

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



“ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN EL ANCHO DE PLAYA Y VOLUMEN DE ARENA EN PLAYAS DE ROSARITO, BAJA CALIFORNIA.”



**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
OCEANÓLOGO
PRESENTA:**

NAPOLEÓN GUDIÑO ELIZONDO

Septiembre del 2007.

RESUMEN

Se levantaron y analizaron un total de 1,232 perfiles de playa en Playas de Rosarito, Baja California. Los perfiles se efectuaron mensualmente sobre 13 puntos de control para estudiar la relación entre el ancho de playa y volumen de arena, con el propósito de estimar el requerimiento volumétrico para la playa subaérea. La playa mas ancha alcanzó casi los 200m (distancia horizontal entre el P.C. y la cota cero), mientras que la más angosta fue de sólo 10 m, el rango promedio del ancho de las playas fue de 100 metros. La mayor cantidad de arena contenida en la playa subaérea fue de $392\text{m}^3/\text{m}$ mientras que el menor volumen registrado fue de $6\text{m}^3/\text{m}$, con un rango promedio de $192\text{ m}^3/\text{m}$. Los cambios acumulativos mensuales de ambas variables se ajustaron a un modelo de regresión lineal cuya pendiente fue positiva con un coeficiente de correlación de 0.60 para el total de diadas generadas. Se encontró que en el 85% de los casos al aumentar el volumen de arena en la playa subaérea ocurrió un aumento en el ancho de playa y viceversa. El máximo avance y retroceso de la línea de playa se presento corriente arriba y corriente abajo de las estructuras costeras de la CFE. El requerimiento volumétrico de la playa osciló entre 1.3 y $3.5\text{ m}^3/\text{m}/\text{m}$ con un promedio de $2.40\text{ m}^3/\text{m}/\text{m}$, por lo que el cambio de un metro en el ancho de playa requiere la adición y/o la erosión de dicho volumen de arena.

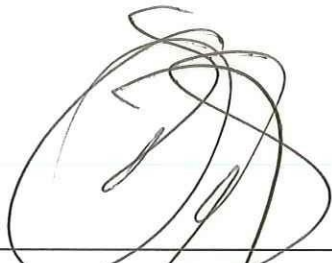
“ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN EL ANCHO DE PLAYA Y VOLUMEN DE
ARENA EN PLAYAS DE ROSARITO, BAJA CALIFORNIA.”

T E S I S
QUE PRESENTA:
NAPOLEÓN GUDIÑO ELIZONDO

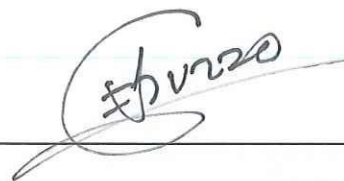
Aprobada por:



Presidente del Jurado
Dr. José Román Lizárraga Arciniega



Sinodal Propietario
Dr. Asdrubal Martínez Díaz de León



Sinodal Propietario
Oc. Eduardo Gil Silva

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

EL SEÑOR NAPOLEON GUDIÑO GONZALEZ

Y

LA SEÑORA MARIA DEL ROSARIO ELIZONDO SILVA

A MIS ABUELOS:

QUE ADELANTE ESTAN...

IGNACIO SALOMON GUDIÑO VASCONCELOS
MARIA AURELIA GONZALEZ MENDOZA

MIS ABUELITOS: RAMON ELIZONDO Y TERESA SILVA

A MIS HERMANOS:

JESSICA Y NORMAN

A MIS SOBRINOS: OMAR Y JOSSELIN

Y A MI NOVIA: BELINDA SANDOVAL

**Por que han sido, son y serán los principales pilares de mi existencia., NO TENGO
PALABRAS PARA EXPRESARLES MI MAS PROFUNDO
AGRADECIMIENTO...**

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Román Lizárraga Arciniega por aceptarme en su equipo de trabajo y proporcionarme todas las herramientas para la elaboración de este trabajo. Por la paciencia, el compromiso y la dedicación al dirigirme en esta fase final de mi carrera, además de sus sabios consejos en la labor académica y cotidiana, Muchas Gracias Jefe!!!

Al Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León por sus acertados puntos de vista y correcciones que lograron darle mejor cuerpo al presente trabajo. Gracias...

Al Oc. Eduardo Gil Silva por su amistad incondicional e innumerables enseñanzas tanto en el campo como en el laboratorio, por su tiempo y la fe que deposito en mí como estudiante a lo largo de mi carrera, Gracias Profe...

A la FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS en general por las enseñanzas transmitidas por todos mis profesores (buenos, malos, doctores y no doctores), a la administración y en especial a Doña Tere; que dios la siga bendiciendo con mas años de vida ...

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada del proyecto titulado "El uso de la caracterización morfológica en la predicción de la erosión costera y la clasificación de zonas de riesgo durante eventos de tormenta extrema" proyecto # P47656F, la cual fue de gran ayuda en la ultima fase de mi formación profesional.

A mis amigos que no necesito decir nombres, sino al que lea esto y que realmente me conozca; sabrá si lo (a) contemplo (a) o nomás NO...

INDICE

LISTA DE TABLAS.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	II
INTRODUCCION.....	1
ANTECEDENTES.....	3
HIPOTESIS.....	6
OBJETIVO.....	6
AREA DE ESTUDIO.....	7
METODOLOGIA.....	9
RESULTADOS.....	12
DISCUSION.....	17
CONCLUSION.....	21
BIBLIOGRAFIA.....	22

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Intervalo de tiempo en el muestreo.....	9
Tabla II. Valores máximos y mínimos de las variables a estudiar.....	13
Tabla III. Porcentaje de ocurrencia de cada condición.....	16
Tabla IV Relación entre el cambio de ancho de playa y el cambio de volumen referido al NBMI	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Localización de los puntos de control.....	8
Figura 2. Atributos de la playa y variables utilizadas en este trabajo.....	10
Figura 3. Perfiles de playa frente a una playa con muro al norte del área de estudio.....	12
Figura 4. Perfiles de playa frente a una playa sin muro al sur del área de estudio.....	12
Figura 5. Relación entre el cambio de ancho de playa (m) y volumen de arena (m^3/m) del total de los datos.....	14
Figura 6. Requerimiento volumétrico para la playa subaerea a lo largo del área de estudio.....	21
Figura 7. Perfiles de playa y amplitud de la envoltura del punto de control 9.....	22

INTRODUCCION

La zona costera representa la interfase entre la atmósfera, océano y continente. Sobre ella se encuentran depósitos de material sedimentario no consolidado conocido como playas, cuyo origen está ligado principalmente al aporte de sedimentos por ríos, la acción de las mareas, corrientes costeras y viento. Dichos factores interactúan con una dinámica compleja e influyen de manera continuada en la morfología y configuración de las playas (Aubrey, 1979; Lazcano, 1997).

El oleaje que arriba a las costas es el principal agente modificador del frente de playa ya que produce corrientes que transportan y distribuyen el sedimento principalmente en dos direcciones, normal y paralelo a la línea de costa (Wiegel, 1964; Bascom, 1964). La importancia de este proceso se basa fundamentalmente en el hecho de que es el oleaje el que origina y regula, en su mayor parte, la erosión o depositación de los sedimentos costeros (Frías y Moreno, 1988).

La forma más común de observar los cambios en una playa determinada es a través de la medición continua y repetitiva de perfiles de playa. Esta forma nos permite observar la respuesta de la playa a los cambios de las condiciones ambientales y además tener una cuantificación directa de dicho cambio. Los cambios ocurridos en el perfil de playa están controlados principalmente por la pendiente de la ola (H/L) y el tamaño de grano del sedimento (Rivera, 2004). En general las olas con pendiente alta (*seas*: olas cuya longitud de onda es de 10 a 20 veces la altura de la ola) son capaces de mover arena hacia fuera de la costa formando barras y canales, mientras olas con pendiente baja (*swell*: olas cuya longitud de onda es de 30 a 500 veces la altura de la ola) mueven la arena hacia la costa formando bermas (USACE, 1984; Bascom, 1964).

La variación en la pendiente de la ola sobre una misma playa ocasiona un cambio en la configuración del perfil de playa definiendo dos clases de perfiles típicos: perfil de verano (bermas) y perfil de invierno (barras). La ocurrencia alternada de ellos ha sido definida como ciclo de playa (Shepard, 1950; Lizarraga, 1976; Mendoza, 1999) y puede no ser estacional o puede presentarse invertido (Komar, 1976; Lizarraga, 2006) ya que durante invierno puede ocurrir un periodo de incidencia del oleaje con baja pendiente o viceversa.

Los cambios temporales en el ancho de playa (A_p) y el volumen de arena contenido en la playa subaérea (V_p) producto de la fluctuación en dichas características del oleaje, se utilizan para cuantificar los cambios en una playa. La medición continua de estas variables permite identificar patrones de erosión-depositación, así como establecer relaciones entre el requerimiento de arena que se erosiona o se deposita sobre una playa determinada. La importancia en el entendimiento de esta dinámica es esencial desde el punto de vista ingenieril, tanto para el desarrollo de infraestructura costera como en proyectos de alimentación artificial de playas. La aplicación directa del resultado de monitorear sistemáticamente estas variables es la identificación de áreas con cierta estabilidad que puedan ser ordenadas para un uso de suelo determinado, caracterizar zonas de mayor o menor riesgo y de esta manera establecer franjas de resguardo como una medida de protección a la infraestructura costera.

Para la práctica del relleno artificial de playas, el CERC (1984) estimó como regla general que para que la línea de playa avance un pie, se requiere añadir una yarda cúbica por pie de playa. Sin embargo este requerimiento volumétrico es aplicable a playas abiertas y puede variar de localidad a localidad dependiendo de las condiciones del oleaje y de la morfología local de la costa (U.S. Army Corps of Engineers, 1984). En el presente trabajo se estudiara la relación entre el cambio en el ancho de playa y su correspondiente cambio de volumen de arena mensual, para estimar el requerimiento volumétrico para la playa subaérea en Playas de Rosarito, Baja California.

ANTECEDENTES

Los estudios publicados sobre la estadística general del oleaje en litorales mexicanos son escasos. Sin embargo para la región de Rosarito, Baja California, se han generado investigaciones que han contribuido en gran parte al conocimiento de dicha dinámica. Oropeza (1998) realizó un estudio estadístico del oleaje incidente en las costas del noroeste de Baja California de 1984 a 1988, en el cual concluyó que el oleaje presentó un comportamiento estacional bimodal, presentando dos regímenes: primavera-verano y otoño-invierno, teniendo un cambio suave del patrón primavera-verano a otoño-invierno y un cambio abrupto de la manera contraria.

Marichal (2001) describió la estadística general del oleaje que arriba a la costa de Rosarito frente a las instalaciones de la CFE obtenida por un sensor de presión. La autora analizó la serie de datos de oleaje durante el periodo 1994-1998, la cual constituye la serie de datos mas larga registrada en el NO de Baja California y concluyó que las características del oleaje son variables y siguen patrones estacionales. Determinó que la altura significativa que presenta la mayor frecuencia de ocurrencia en verano es de 0.75 a 1.25m mientras que en invierno las olas presentan alturas mayores de 2.5m y representan solo el 0.2% del registro. La dirección de aproximación del oleaje, en lo general, es desde el cuadrante SO; sin embargo, durante el verano la aproximación de las olas es preferentemente desde el SSO.

En relación a la variación estacional de la playa en Playas de Rosarito, Baja California, Mendoza (1999) realizó un estudio sobre la variación estacional de la línea de costa durante mayo de 1997 a febrero de 1999. Su estudio consistió en la medición mensual de perfiles de playa y evaluó la capacidad de la playa como un rasgo natural para la recreación y protección de la infraestructura. Observó que el proceso de mayor erosión de la playa domino en los meses de enero y febrero de 1998 cuando se presentaron olas de tormenta

con alturas superiores a los 3 m como consecuencia de la ocurrencia del fenómeno de El Niño (1997-1998). El volumen de arena removida por este oleaje en el lapso de solo algunos días fue de 1,272,024 m³, cantidad que usualmente es removida en toda la estación invernal. Concluyó que la capacidad de recreación y protección aumenta significativamente en verano cuando el proceso de depositación es llevado a cabo y disminuye progresivamente con el proceso estacional erosivo.

Rivera (2004) realizó un estudio sobre los efectos que causan los muros costeros sobre la playa en Playas de Rosarito, Baja California. Obtuvo perfiles de playa mensualmente desde Junio de 1997 a diciembre de 2002, en nueve puntos de control a lo largo de 11 Km de litoral. Analizó la variabilidad del perfil de playa empleando valores de ancho de playa y volumen de arena contenido en la misma y encontró que en todos los puntos de control se presenta una clara estacionalidad verano-invierno; que los muros no afectan la periodicidad de los valores máximos y mínimos del perfil de playa en respuesta a las condiciones ambientales, y que las playas con muro presentan una recuperación más rápida del perfil de playa erosionado en invierno en comparación a las playas sin muro, ya que actúan como una barrera física en el transporte de arena perpendicular a la playa en dirección a la playa. Reportó que en la porción norte del área de estudio se presenta una disminución gradual tanto en el ancho como en el volumen, indicando una pérdida potencial a largo plazo y contrario al resto de la zona donde se observó un comportamiento estable con una ligera tendencia al crecimiento de la playa.

Lizárraga (2005) completó el registro sistemático de perfiles de playa mas largo de la historia para costas mexicanas, en conocimiento del autor, el cual comprendió de octubre de 1995 a diciembre del 2003. Además obtuvo datos de las características del oleaje desde junio de 1994 a febrero del 2001 y dos fotografías aéreas y una imagen satelital con el objetivo de identificar y cuantificar los cambios de playa en escalas temporales de corto (días), mediano

(meses) y largo plazo (decenas de años) así como los factores que los inducen. Se probó por primera vez que los cambios de playa de corto plazo en Rosarito están controlados por la acción de tormentas invernales; los cambios de mediano plazo se analizaron como episodios cíclicos usando la técnica de análisis espectral. Se documentó por primera vez en esta zona un ciclo de playa anual invertido, esto es, erosión en verano y acreción en invierno, dominado por variaciones locales en la morfología costera y el ángulo local de rompiente respecto a la costa. En base a dos fotografías aéreas de los años 1972 y 1985 y una imagen satelital del año 2002, el autor observó una fluctuación de avance y retroceso de la posición de la línea de playa, y contrario a las playas al norte y sur del rompeolas de la CFE. Argumentó que los forzantes de los cambios de largo plazo son los aportes de sedimentos por parte de los Arroyos Guaguatay y Rosarito en la época húmeda de 1972 y los eventos ENSO de 1982 y 1998 en su acción erosiva.

Bokuniewicz y Tangren (1985) realizaron un estudio para determinar el requerimiento volumétrico de arena para la playa subaerea de las costas de East Hampton, Nueva York. Esta investigación se llevó a cabo por medio de la medición mensual de perfiles de playa durante el periodo de octubre de 1979 hasta mayo de 1983 en veinte puntos de control a lo largo de tres millas de línea litoral. Los autores analizaron la relación entre el cambio en el ancho de playa y su correspondiente cambio en volumen de arena de un mes a otro encontrando un coeficiente de correlación lineal de 0.68 y un intercepto de (0ft, $-0.24\text{yd}^3/\text{ft}$) para toda la zona de estudio. Estimaron que el requerimiento volumétrico para la playa subaérea es de $1.3\text{ yd}^3/\text{ft}/\text{ft}$. Observaron que cerca de un espigón el requerimiento es mayor en comparación con otras áreas de la misma playa. En el presente trabajo se plantea estudiar la relación entre el volumen de arena y el ancho de playa para estimar la cantidad de arena que se requiere erosionar o depositar para que el ancho de playa disminuya o aumente un metro en Playas de Rosarito, B.C.

HIPOTESIS

El aumento en el volumen de arena en la playa subaérea produce un incremento en el ancho de playa y viceversa.

OBJETIVOS

- ✚ Estudiar la relación entre el ancho de playa y volumen de arena en Playas de Rosarito, Baja California.

- ✚ Cuantificar el volumen de arena que es necesario depositar/erosionar para que la línea de playa avance/retroceda un metro lineal en su ancho en Playas de Rosarito, Baja California.

AREA DE ESTUDIO

El municipio de Playas de Rosarito se encuentra localizado en la zona noroeste de la península de Baja California entre los $32^{\circ} 20'$ y $32^{\circ} 23'N$ y los $117^{\circ} 03'$ y $117^{\circ} 05' W$ y a 20 kilómetros aproximadamente de la frontera México-EE.UU. Tiene extensas playas arenosas desde la localidad conocida como San Antonio del Mar, en el norte, hasta la desembocadura del Arroyo Rosarito en el sur (Figura 1).

La morfología costera en la parte norte de la zona de estudio presenta cantiles ígneos y sedimentarios en el área de San Antonio del Mar. Al pie de ellos se han construido muros de diversos materiales y diseños para minimizar la erosión y proteger la propiedad adyacente. Hacia el sur se encuentra una playa baja arenosa que aumenta progresivamente en su ancho y algunos vestigios de un campo de dunas modificadas sustancialmente por el incremento en la infraestructura turístico-habitacional (Lizarraga et al., 2001).

Al oeste de la costa de Rosarito (18km) se localizan las Islas Coronados que representan un rasgo geográfico de gran importancia puesto que actúan como protección a las condiciones de oleaje de mar abierto y además, debido a las características morfológicas del fondo marino entre ellas y la costa, el oleaje llega con relativamente menor energía a la playa.

La línea de costa de Playas de Rosarito es recta y semiabierta de cara al Océano Pacífico en la que sobresale la estructura costera de toma de agua de la CFE y que delimita entre las playas al norte y al sur del área de estudio. La estructura cuenta con un rompeolas en forma de "J" y al sur de éste, se encuentra un espigón y que en conjunto actúan como trampa al transporte de arena inducido por las corrientes litorales paralelas a la playa (Marmolejo, 1985; Appendini, 1995, Mendoza, 1999, Rivera, 2004)

La climatología del oleaje en mar abierto que ocurre frente a la costa de Rosarito es en general, parecida a la que se registra frente a la costa del sur de California (Appendini, 1998; Lizárraga, 2005); sin embargo, cabe señalar que la climatología del oleaje cercano a la costa presenta modificaciones derivadas de la refracción del oleaje producto de su interacción con las Islas Coronados y la topografía submarina.

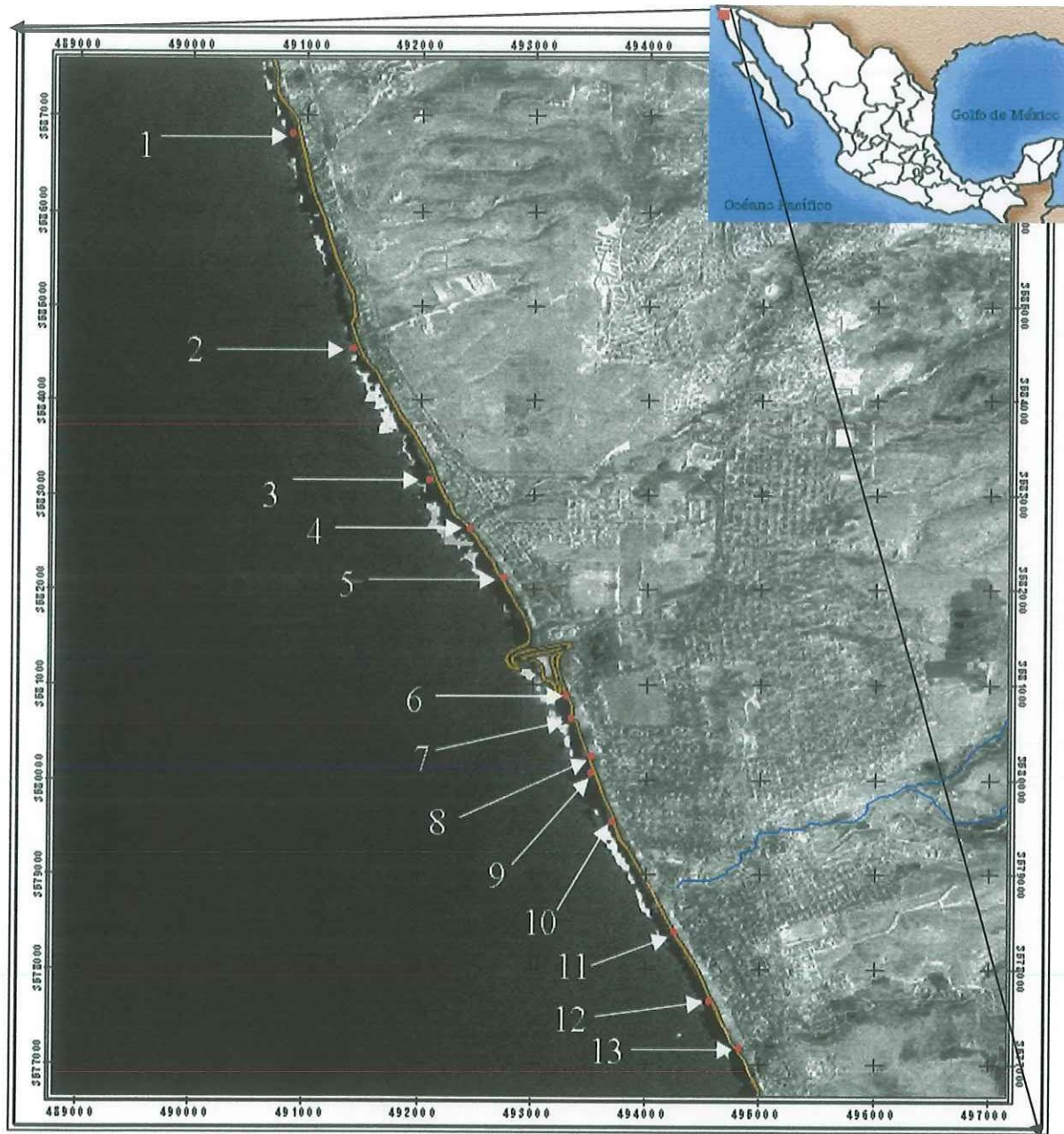


Fig1. Área de estudio. Localización de los puntos de control

METODOLOGIA

Para obtener el ancho de playa y volumen de arena se levantaron perfiles de playa a lo largo de la zona de estudio con la técnica de nivelación diferencial de primer orden (Montes de Oca, 1989). Se emplearon niveles fijos de la compañía TOPCON, estatales de fibra de vidrio de 5 m de altura marcados cada centímetro y cinta métrica de 30 m de longitud. Se calcularon las diferencias de altura referidas a un datum de referencia (Nivel de Bajamar Media Inferior, NBMI) a lo largo de un transecto perpendicular a la costa, a intervalos de cinco metros.

La cota de referencia para cada punto de control se obtuvo mediante el traslado de una cota conocida referida al NBMI y ubicada en las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para el traslado de cotas entre puntos de control se empleó la técnica de nivelación diferencial de segundo orden hasta donde se encontraron rasgos permanentes y de fácil acceso para que cada perfil tuviera el mismo punto de partida a través del tiempo.

Se levantaron un total de 1232 perfiles de playa mensualmente durante la marea mas baja diurna del mes para que el perfil tuviese una longitud mayor. Los periodos de mediciones mensuales son variables como se indica en la siguiente tabla:

Tabla I. Intervalo de tiempo en el muestreo para cada Punto de Control.

Lapso de medición	Puntos de Control
Junio de 1997 a junio de 2006	1, 3, 9 y 13
Enero de 1998 a junio de 2006	2, 4, 10, 11 y 12
Octubre de 1995 a febrero de 2001	5, 6, 7 y 8

Los cambios de playa se estudiaron mediante el análisis del ancho de playa (A_p) y el volumen de arena contenido en la playa subaérea (V_p), mismas que son consideradas como las variables que mejor describen la evolución de la playa (Smith y Jackson, 1992). El primero se definió como la distancia horizontal que existe desde el punto de control hasta la intersección del perfil con el nivel de bajar media inferior (NBMI). El volumen de arena contenida en la playa subaérea se calculó mediante la suma de áreas diferenciales bajo la curva del perfil hasta su intersección con el datum de referencia (NBMI), sus unidades son en metros cúbicos por metro de largo de playa (figura 2). Ambos parámetros se estimaron con el programa Beach Morphology Análisis Package (BMAP), desarrollado por el cuerpo de Ingeniería costera de la armada de EUA (CERC, 1995)

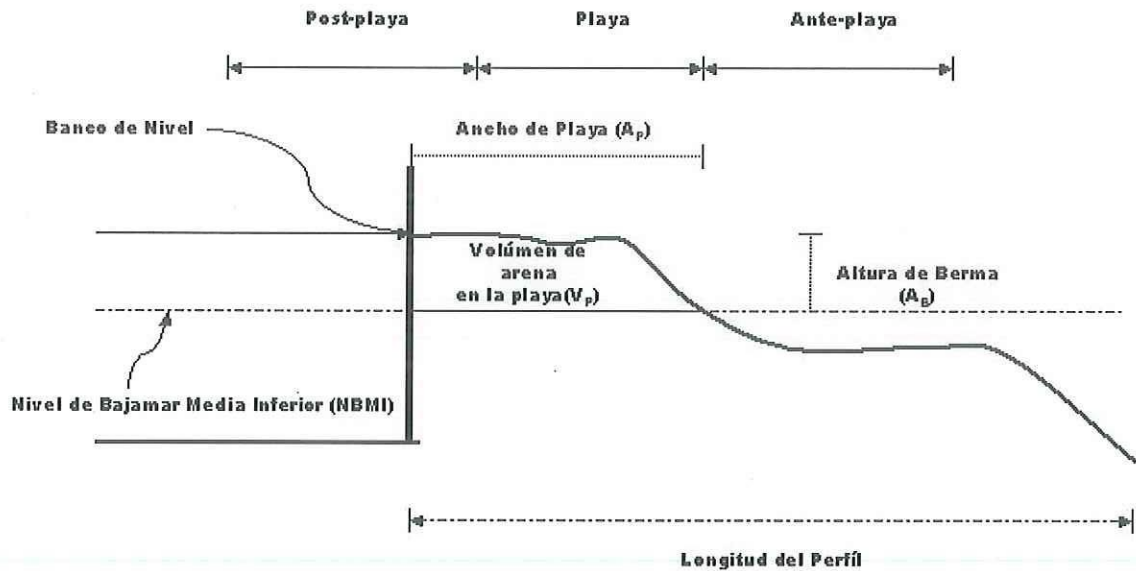


Fig. 2. Atributos de la playa y variables utilizadas en este trabajo.

Se obtuvo el cambio mensual tanto para los valores de A_p como para V_p , restando el valor posterior del inmediato anterior (dA y dV respectivamente). A esta díada de valores se aplicó un modelo de regresión lineal de la forma $y = mx + b$, del cual se obtuvo el intercepto y el valor del coeficiente de correlación lineal (R^2).

Para estimar el requerimiento volumétrico de la playa subaérea por cada metro de playa, se obtuvo el factor de conversión de volumen a área, al dividir el cambio de volumen de arena (dV) entre el ancho de playa (A_p) para todos los puntos de control a lo largo de la zona de estudio. El cuerpo de ingenieros (USACE, 1977) estimó que para playas con ciertas características morfológica y exposición al oleaje para el avance o retroceso de un metro de playa en el ancho, se requiere la ganancia o pérdida de una yarda cúbica de arena. Dado que el requerimiento volumétrico propuesto por (USACE, 1977) está dado en yardas cúbicas por pie y en este trabajo los datos de campo se levantaron en metros, se efectuaron las transformaciones respectivas a metros cúbicos por metro.

RESULTADOS

Se levantaron un total de 1232 perfiles de playa en los 13 puntos de control a lo largo de la zona de estudio. Por cuestiones de espacio, en las figuras 3 Y 4 se presentan el total de perfiles de playa levantados en el punto de control 3 y en el punto de control 12 los cuales se consideran representativos para las playas hacia el norte y hacia el sur del área de estudio.

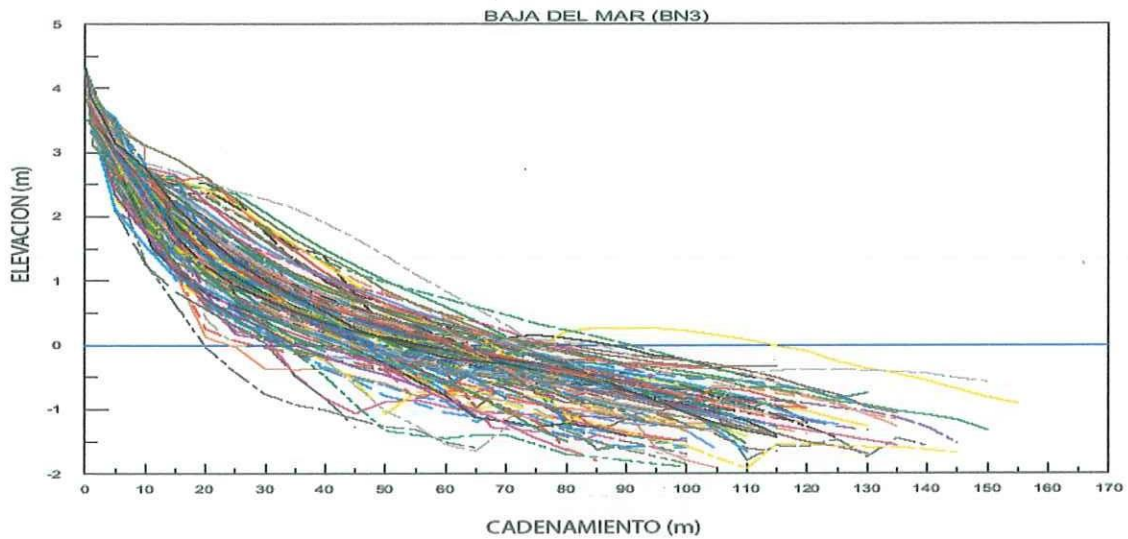


Fig. 3. Perfiles de playa frente a una playa con muro al norte del área de estudio

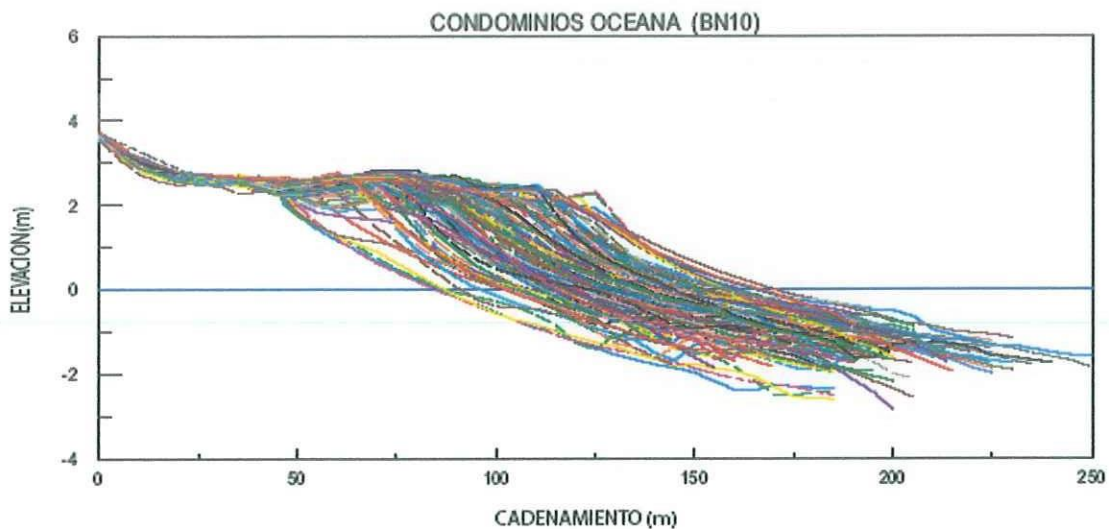


Fig. 4. Perfiles de playa frente a una playa sin muro al sur del área de estudio.

De cada uno de estos perfiles se obtuvieron los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar del ancho de playa y del volumen de arena para cada uno de los puntos de control (Tabla II).

Tabla II. Valores máximos y mínimos de las variables a estudiar.

Puntos de control	Total de perfiles	Ancho de playa (m)				Volumen de arena (m ³ /m)			
		Máx.	Min.	Prom.	D.E.	Máx.	Min.	Prom.	D.E.
1	114	107.5	17.3	61	19.5	170.5	11.9	86	44
2	105	97	18.2	54	16.8	138	26.4	72	28.6
3	113	114	19.7	54	15.2	139.2	32.0	73	20.3
4	104	117.5	35	67	19.9	127.5	16.35	63	29.7
5	65	157.2	72.6	111	14.8	274.7	101.5	199	29.8
6	63	197.5	40.4	109	44.8	346	47.7	171	76.1
7	65	167.7	31.5	104	32.8	391.7	37.5	198	93
8	64	126.2	33.4	88	19	271	12.7	152	59
9	112	109.1	10.3	54	20	160.3	6.6	74	37.5
10	105	128	15	76	20	214	5.7	123	40.6
11	105	155.5	73	118	18.4	264	95.9	182	44
12	105	170.4	85	129	19.4	363	165.1	274	46.3
13	112	184.2	69.1	131	25	268.5	45.6	166	54.2

De estos valores destaca que a lo largo del tiempo de mediciones, la playa más ancha alcanzó casi los 200 m (P.C. 6) mientras que la más angosta fue de sólo 10 m (P.C. 9). También resultó que los menores promedios del ancho de las playas fueron entre 50 y 60 m (norte) mientras que los mayores promedios oscilaron entre 100 y 130 m (sur). La mayor variabilidad alrededor de la media del ancho de playa en términos de la desviación estándar fue de 45 m (P.C. 6) mientras que la menor fue de solo 15 m (puntos de control 3 y 5).

El punto de control donde se observó el mayor cambio de la cota cero a lo largo del periodo fue el P.C. 6 con un valor de 157 m mientras que el menor cambio fue en el P.C. 2 con un valor de 79 m. El rango promedio del ancho de playa fue de 100 m considerando todos los puntos de control a lo largo del lapso de mediciones.

Con respecto al volumen de arena en la playa por arriba del nivel de referencia se obtuvo que la mayor cantidad de arena fue de $392 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 7) mientras que el menor volumen fue de solo $6 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 10). Se observó también que los menores promedios del volumen de arena fueron entre los 60 y $90 \text{ m}^3/\text{m}$ mientras que los mayores promedios oscilaron entre los 120 y $270 \text{ m}^3/\text{m}$. La mayor variabilidad alrededor de la media, en términos de desviación estándar, fue de $93 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 7) mientras que la menor variabilidad fue de $20 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 3). El punto de control donde se observó el mayor rango de contenido de arena por arriba del nivel de referencia a lo largo del periodo de mediciones fue en el punto de control 7 con un valor de $355 \text{ m}^3/\text{m}$ mientras que el de menor rango fue en el punto de control 3 con un valor de $107 \text{ m}^3/\text{m}$. El rango promedio del volumen de arena contenido por arriba del nivel de referencia para todos los puntos de control a lo largo del periodo de mediciones fue de $192 \text{ m}^3/\text{m}$.

Respecto a la relación lineal entre el cambio mensual del ancho de playa (dA) y el cambio mensual de volumen de arena (dV) del total de los perfiles medidos resultó ser positiva con un coeficiente de correlación de 0.60 (figura 5).

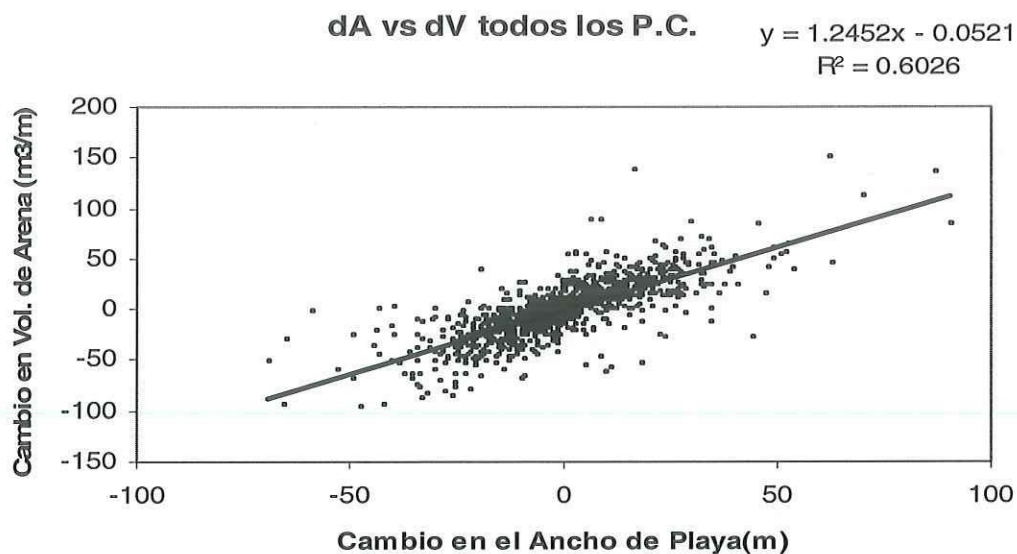


Fig. 5. Relación entre el cambio de ancho de playa (m) y volumen de arena (m^3/m) del total de los datos.

Del análisis del cambio mensual de la totalidad de dA y dV resultó que el mayor dA positivo (avance de playa hacia el mar) fue de 90 m (P.C. 7) mientras que el mayor dA negativo fue de 70 m (P.C. 6). Respecto del cambio mensual de volumen, el mayor cambio positivo (aumento de volumen de arena en la playa) fue de $150 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 6) mientras que el mayor cambio negativo (pérdida de arena) fue de $96 \text{ m}^3/\text{m}$ (P.C. 13), el cambio de volúmen promedio mensual fue de $20 \text{ m}^3/\text{m}$ para todos los puntos de control, a excepción de los puntos de control 6 y 7 que resulto ser de $34 \text{ m}^3/\text{m}$.

Conviene señalar que el mayor volumen de arena en la playa no necesariamente correspondió con el máximo en el ancho de playa y viceversa. Este comportamiento resultó que el cambio de ancho y volumen se dio bajo 4 casos diferentes:

- 1) aumento de ancho de playa asociado al aumento de volumen ($dA+$, $dV+$),
- 2) aumento de ancho de playa asociado a la disminución de volumen ($dA+$, $dV-$),
- 3) disminución de ancho de playa asociado al aumento de volumen ($dA-$, $dV+$) y
- 4) disminución de ancho de playa asociado a la disminución de volumen ($dA-$, $dV-$).

Bajo esta definición se observó que cuando los cambios de ancho y volumen de arena corresponden ambos en signo positivo representan un avance de la playa hacia el mar y una acreción de la playa como deposito sedimentario, mientras que al ser negativas ambas variables representa un retroceso de la playa hacia tierra firme asociados a una perdida de arena en la playa subaérea.

La ocurrencia en porcentaje del total de díadas en cada punto de control se presenta en la Tabla III.

Tabla III. Porcentaje de ocurrencia de los cambios de volumen y el respectivo cambio en el ancho para cada punto de control.

P. C.	Total de perfiles	%(dA+, dV+)	%(dA+, dV-)	%(dA-,dV+)	%(dA-, dV-)
1	114	45.1	5.3	13.2	36.2
2	105	45.7	9.5	8.5	36.2
3	113	44.6	7.1	6.2	41.9
4	104	41.7	9.7	14.5	33.9
5	65	37.5	9.3	18.7	34.3
6	63	38.7	9.6	1.6	50
7	65	34.3	9.3	4.6	51.5
8	64	42.8	9.5	7.9	39.6
9	112	45	1.8	12.6	40.5
10	105	38.4	8.6	11.5	41.3
11	105	41.3	5.7	12.5	40.3
12	105	47.1	2.8	5.7	44.2
13	112	45.9	2.7	14.4	36.9
Promedio		42	7	10	41

Los porcentajes de mayor ocurrencia correspondieron a las condiciones 1 (dA+, dV+) y 4 (dA-, dV-) con un 42 y 41% respectivamente, mismas que en conjunto representaron el 83% de los datos. Los porcentajes de menor ocurrencia correspondieron a las condiciones 2 (dA+, dV-) y 3 (dA-, dV+), sumando un porcentaje de 17% y representando datos anómalos según nuestra hipótesis de trabajo.

El requerimiento volumétrico para la playa subaérea, así como el coeficiente de correlación y el intercepto resultado del ajuste lineal entre dA y dV para el total de días en cada uno de los puntos de control se presenta en la tabla IV.

Tabla IV. Relación entre el cambio de ancho de playa y el cambio de volumen referido al NBMI.

P.C.	No. Total de perfiles	dV/A_p . (Inviernos)	dV/A_p . (Veranos)	dV/A_p . Promedio Total	Coefficiente de correlación	Intercepto (m, m^3/m)
1	114	0.51	0.24	0.37	0.77	(0, -0.13)
2	105	0.29	0.28	0.29	0.59	(0, 0.17)
3	113	0.19	0.31	0.25	0.68	(0, 0.08)
4	104	0.39	0.22	0.31	0.52	(0, -0.003)
5	65	0.15	0.18	0.17	0.50	(0, -0.53)
6	63	0.24	0.32	0.27	0.53	(0, -0.05)
7	65	0.35	0.27	0.31	0.50	(0, -1.1)
8	64	0.37	0.22	0.30	0.36	(0, -0.83)
9	112	0.47	0.27	0.40	0.65	(0, -0.02)
10	105	0.35	0.18	0.28	0.75	(0, 0.44)
11	105	0.23	0.14	0.19	0.74	(0, 0.38)
12	105	0.19	0.10	0.15	0.80	(0, 0.02)
13	112	0.21	0.11	0.23	0.77	(0, -0.13)

Se estimó que la cantidad de arena promedio requerida para incrementar o disminuir un metro en el ancho (requerimiento volumétrico) de la playa subaérea osciló entre 0.15 y 0.40 $m^3/m/m$ y presentó un promedio para el conjunto total de días de 0.27 $m^3/m/m$. En general, el requerimiento de arena en la playa subaérea fue mayor en el invierno que en el verano; a excepción de los puntos de control 2, 3, 5 y 6. Se observó que los coeficientes de correlación (r^2) variaron entre 0.36 y 0.80 aunque el 60% de los valores se mantuvieron entre 0.6 y 0.8 y el valor negativo más alejado del intercepto cero fue de -1.1 m^3/m (P.C. 7) y el más positivo fue de 0.44 (P.C. 10).

DISCUSION

Las playas más anchas y con mayor volumen de arena promedios ocurren hacia la parte sur del área de estudio, en la playa inmediata al espigón de la CFE y en la zona cercana a la desembocadura de los arroyos Rosarito y Guaguatay. Las playas más angostas y de menor volumen ocurren en la parte más hacia el norte del área de estudio donde la presencia de muros costeros que protegen el pie del cantil y la presencia de plataformas rocosas que quedan expuestas en marea baja, limitan el intercambio de arena desde atrás de la zona de rompiente hacia la playa.

Los cambios positivos mensuales de ancho de playa y volumen de arena contenido en la playa subaérea de mayor magnitud se presentaron en los puntos de control P.C. 7 (+90.23m) y P.C. 6 (+150m³/m) en los veranos de 1998 y 1999 respectivamente. Esta condición se debe a la influencia que tienen el rompeolas y espigón sobre el transporte de arena paralelo a la línea de playa en dirección hacia el norte, ya que en conjunto actúan como trampa de arena corriente arriba de dichas estructuras (Lizárraga, 2005); además de que en estos veranos en particular, ocurrieran los cambios más positivos en respuesta a la recuperación del perfil de playa posterior al proceso erosivo causado por el fenómeno de el Niño 97-98 como ha sido descrito por Mendoza-Ponce (1999).

Respecto a los mayores cambios negativos de ambas variables, el máximo retroceso de la línea de playa ocurrió también en el punto de control 6 en invierno de 1997 (-70m), el cual puede ser atribuido a la erosión corriente abajo de las estructuras cuando la dirección de flujo de la corriente litoral es preferentemente hacia el sur como lo describe Marmolejo (1985). La mayor pérdida de arena contenida en la playa subaérea (-95.8m³/m) se registró en el punto de control 13 (invierno del 2002), donde la interacción de las olas con una estructura costera es prácticamente nula por lo que la playa avanza o retrocede en función exclusiva de la magnitud e intensidad de los agentes forzantes como son las olas.

En todos los perfiles estudiados predominaron las relaciones directamente proporcionales entre el ancho de playa y el volumen de arena. Esto es, un incremento en el ancho tuvo asociado un incremento en el volumen de arena ($dA+$, $dV+$); por el contrario, un decremento en el ancho de playa estuvo asociado a una disminución en el volumen de arena ($dA-$, $dV-$). Esta correspondencia se puede explicar en términos estacionales ya que las primeras ocurrieron durante el verano-otoño (cuando H/L es menor) y las segundas en el invierno-primavera (cuando H/L es mayor) como se ha descrito por Lizarraga et al (2007) y que es típico para las playas arenosas (Johnston y Bokuniewicz, 2001; Bittencourt et al, 1997).

Como excepción a este patrón, en los puntos de control 2 y 3 ocurrió un proceso inverso en el sentido estacional, ya que en los veranos se observó consistentemente la disminución del ancho con su respectiva disminución en el volumen de arena (erosión de la playa) mientras que en invierno se presentó el aumento del ancho con su respectivo aumento de volumen (acreción de la playa). Este comportamiento está asociado a variaciones locales en la morfología costera, en la orientación de la playa y en el ángulo local de rompiente respecto a la costa, mismos que a su vez controlan la dirección de flujo de la corriente litoral inducida por las olas (Lizarraga, 2005).

Los cambios de ancho de playa y volumen de arena de un mes a otro que no conservaron la relación directamente proporcional, esto es, un aumento en el ancho de playa asociado a una disminución en el volumen de arena ($dA+$, $dV-$) y una disminución en el ancho de playa asociado a un aumento en el volumen de arena ($dA-$, $dV+$) representaron el 17% (209) del total de los perfiles de playa analizados (tabla III). De este porcentaje, el 80% (167) se presentaron en las etapas de transición entre verano e invierno y viceversa. Los cambios ($dA+$, $dV-$) ocurrieron principalmente durante el otoño (transición de verano a invierno) por lo que el aumento en el ancho de playa se puede explicar en términos de la arena que fue removida de la berma y de la parte alta de la cara de playa y se

acumuló en la parte baja de la playa (Lizarraga, 2005). En contraste los cambios (dA^- , dV^+), ocurrieron de preferencia durante la primavera (transición de Invierno a verano) cuando inciden olas bajas y acarrean arena de las barras a la parte alta de playa formando una berma bien definida (Komar, 1976; Rivera, 2004).

Referente al cambio de volumen de arena por metro de ancho de playa (dV/A), se observó generalmente una mayor magnitud de este durante el invierno que durante el verano y esto puede ser explicado en términos del transporte de arena perpendicular a la costa, ya que cuando este es en dirección hacia fuera de la costa (perfil con barras) el ancho de playa disminuye asociado a un cambio de volumen de arena en un área mas estrecha, en comparación al ancho que puede tener la misma playa en condiciones de verano (perfil con bermas). En los puntos de control 2, 3, 5 y 6 se observó que, contrario al resto de los puntos de control, los valores máximos del requerimiento de arena se presentaron en verano y los mínimos en invierno. En el caso de los puntos de control 2 y 3 pudiese ser debido a las características de morfología local antes referida para este segmento de la playa (morfología costera, orientación de la playa y ángulo local de rompiente del oleaje) que invierten estacionalmente los valores máximos y mínimos de A_p y V_p y estos a su vez el requerimiento de arena en la playa subaérea.

En los puntos de control 5 y 6, por su localización al norte y sur respectivamente de las estructuras costeras de la CFE, el requerimiento de arena es mayor en verano que en invierno. Este comportamiento puede ser debido a que además de la acumulación de arena sobre la playa subaérea producida por el transporte perpendicular de arena también se adiciona la arena movida por el transporte paralelo a la playa en dirección sur y norte respectivamente (Marmolejo, 1985; Appendini, 1998) y que es retenida por las estructuras de la CFE.

En la figura 6 se muestran los valores promedios del requerimiento volumétrico para la playa subaérea obtenidos para cada punto de control, los cuales se mencionan de norte a sur a lo largo de la playa en estudio:

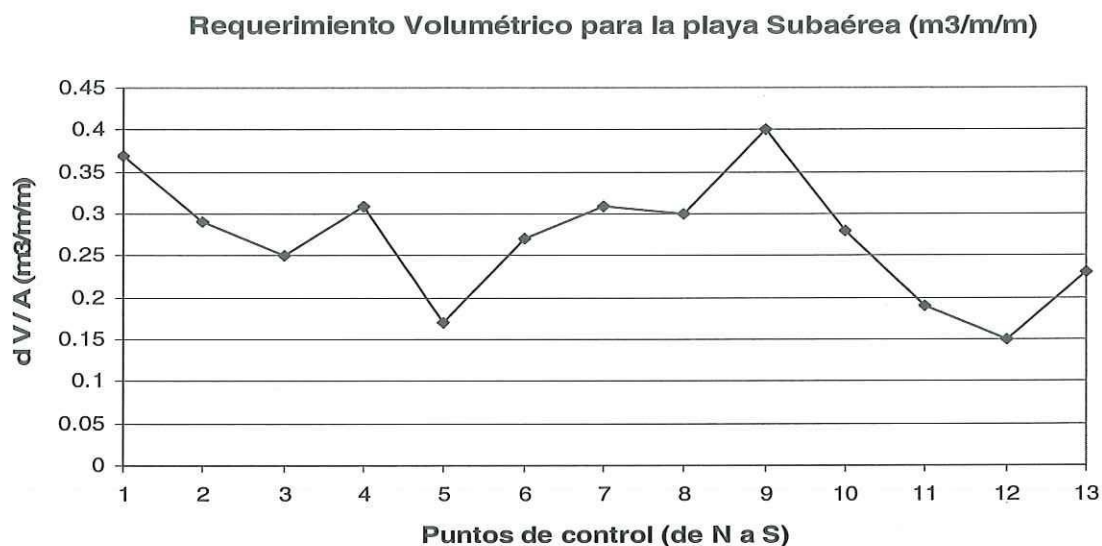


Fig. 6. Requerimiento volumétrico para la playa subaerea a lo largo del área de estudio.

El mayor requerimiento volumétrico para la playa subaérea en el área de estudio correspondió al punto de control 9 con un valor de 0.40 m³/m/m, en el cual dicho requerimiento pueda ser debido al reducido ancho de playa promedio (ver tabla II) causado por la presencia de un muro ubicado en la posplaya. Esta estructura esta provocando un aumento en la amplitud de la envoltura del perfil (figura 7) sobre un área relativamente estrecha. Este incremento en la envoltura del perfil de playa se manifiesta en respuesta a que en esta playa, en particular, se mueve una mayor cantidad de arena por metro de ancho de playa en comparación con otros puntos de control de la misma zona y por ende requiriendo de mayor volúmen de arena en la playa subaérea por unidad de área.

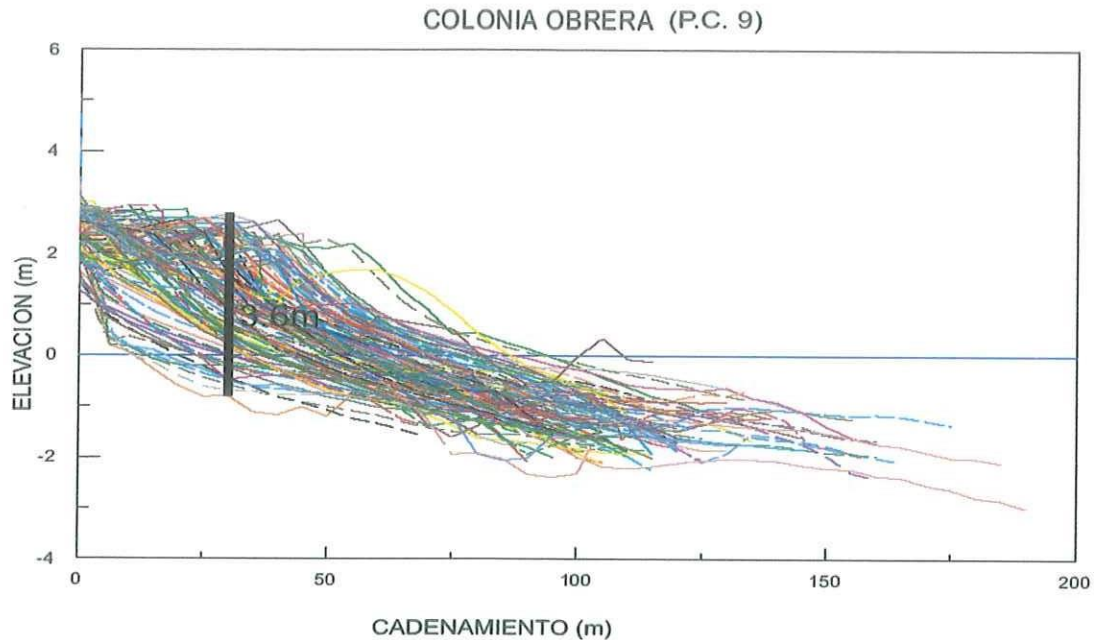


Fig. 7. Perfiles de playa y amplitud de la envoltura del punto de control 9.

El menor requerimiento correspondió al punto de control 12 con un valor de $0.15 \text{ m}^3/\text{m}/\text{m}$ y puede ser debido a que esta sección de la playa se caracteriza por contar con un amplio ancho de playa promedio (Tabla II), lo cual sugiere que al presentarse el mismo cambio de volúmen promedio mensual en una playa mas ancha, es claro que se requiera una menor cantidad de arena para lograr el mismo cambio en el ancho de playa. Por otra parte, el bajo requerimiento del P.C. 5 también puede ser atribuido al vertido de material dragado del azolve de la toma de agua de la CFE.

Cabe resaltar que los resultados obtenidos en Playas de Rosarito, Baja California fueron contrarios a los reportados por Bokuniewicz y Tangren (1985) para playas de East Hampton, New York, donde encontraron que para ocasionar un cambio determinado en el ancho de playa cercano a una estructura (espigón) se requiere una mayor cantidad de arena para lograr el mismo cambio que en otras áreas de la playa.

El valor promedio del requerimiento volumétrico para la playa subaérea en Playas de Rosarito es de $0.27\text{m}^3/\text{m}/\text{m}$. Sin embargo, para comparar este valor con el obtenido por el CERC (1975) es necesario ajustar nuestros valores para incluir la porción sumergida de la playa o bien la sección que se encuentra por debajo del datum de referencia (NBMI), hasta la profundidad de cierre. Esta corrección es posible si asumimos que la playa migra hacia el mar o hacia tierra la configuración del perfil; el cambio de volumen de arena en la playa subaérea puede convertirse en el *cambio de volumen total* de la playa, al multiplicar el requerimiento volumétrico de la playa subaérea por un factor de ajuste conforme a la ecuación propuesta por Bokuniewicz (1985):

$$F = \frac{Hb + Zc}{Hb}$$

En donde: Hb= Elevación de la berma; Zc= Profundidad de cierre.

Appendini (1998) calculó una profundidad de cierre de 13 metros frente a la obra de toma de agua de la CFE. Ramos et al. (2001) encontraron la acumulación de arena a una profundidad de 18 metros. Sin embargo, Lee y Osbourne (1995) en base a un análisis granulométrico reportaron que al sur de la frontera México-EE.UU. la energía de las olas deja de tener influencia sobre los sedimentos marinos hasta una profundidad de 22 metros. El promedio de elevación de la berma durante el periodo de tiempo analizado resultó ser 2.8m respecto al Nivel de Bajamar Media Inferior, por lo que el factor de ajuste para Playas de Rosarito, en particular, es igual a **8.86**. Al multiplicar este factor por el promedio del requerimiento volumétrico de la playa subaérea se estima que es necesario añadir o remover **$2.40\text{m}^3/\text{m}$** por metro a lo largo de la playa para ocasionar el cambio de un metro lineal en el ancho de playa, ya sea de avance o retroceso.

Este valor del requerimiento volumétrico de la playa es muy parecido al obtenido por Bokuniewicz y Tangren (1985) quienes concluyeron que para las playas de East Hampton, New York, por cada pie de avance o retroceso del ancho de playa, en promedio, involucra una ganancia o pérdida de 1.3 yd³/ft y equivale a 3.25 m³/m/m. De igual manera el CERC (1984) estimó un valor de 2.5 m³/m/m como regla general para proyectos de terraplén en playas. En base a los criterios anteriores el valor de **2.4 m³/m/m** estimado en este trabajo es apropiado para aplicaciones de Ingeniería en Playas de Rosarito, Baja California.

CONCLUSIONES

- Cerca del 85% de los cambios acumulativos mensuales cumplieron con la hipótesis de trabajo.
- Se calculó que, en promedio, el volumen de arena removido fue de 94 m³/m y el retroceso de la cota cero fue de 42 metros para todos los inviernos del total de los datos disponibles.
- En promedio, para que la playa aumente o reduzca un metro en su ancho, es necesario añadir o remover **2.40m³/m** por metro en Playas de Rosarito, Baja California.

BIBLIOGRAFIA

- ✦ Aubrey, D.G.(1979) Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement, *Tour. Of Geophysical Research*. 84(10):63476354
- ✦ Appendini, C.M. 1995. Aplicación de un modelo numérico para la estimación de volúmenes de azolve en la central termoeléctrica de Rosarito, B.C. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 94pp.
- ✦ Appendini C.M. 1998. Plan de manejo de la erosión costera para playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 123pp.
- ✦ Bascom, W. 1964. Waves and beaches, the dynamics of ocean surface. Anchor books science study series S34. 1ra. Edit, Garden City, N.Y. 267pp.
- ✦ BMAP Version 2.0. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Costal Engineering Research Center, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS39180-6199.
- ✦ Bokuniewicz and Tangren 1985. Volume requirements for the subaerial beach at East Hampton, New York. *Shore and Beach*. Vol 53(1), pp16-18.
- ✦ Elizarrarás, S.R. 1986. Determinación de la dirección del transporte litoral predominante por medio de minerales trazadores entre punta los buenos y Playas de Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 14pp
- ✦ Frías, A.V y G.C. Moreno (1988) *Ingeniería de Costas*. Edit. LIMUSA, 2da Edición, México, D.F. 339pp
- ✦ Komar, P.D. 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 429pp.
- ✦ Lazcano, H. 1997. Variación del perfil de playa bajo condiciones de tormenta en playas de Tijuana B.C. México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B.C. 55pp.
- ✦ Lizárraga, J.R. 1976. Variaciones estacionales de la playa en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 3(1):30-50.

- ✚ Lizárraga et al, 2003. Effect of El Niño on the subaereal beach in Playas de Rosarito, B.C. México. *Geofísica Internacional*. Vol. 42 (3), pp. 419-428.
- ✚ Lizárraga, J.R. 2005. Cambios espacio-temporales de playa en Playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B.C. 159pp.
- ✚ Marmolejo, M. 1985. Control de azolvamiento en una obra de toma de agua marina. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas.
- ✚ Marichal, A.E. 2001. Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito B.C. de 1994-1998. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B.C. 70pp.
- ✚ Mendoza, E.T. 1999. Variación espacio temporal del perfil de playa en Rosarito, Baja California, México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B.C. 50pp
- ✚ Montes de Oca, Miguel.1989. Topografía. Ed. Alfaomega. IV edición.
- ✚ Oropeza, F., 1998. Descripción del clima de oleaje para las costas mexicanas del oceano pacifico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC., Ensenada, B.C. 218pp.
- ✚ Rivera, E.R. 2004. Análisis de la variabilidad de perfiles de playa en playas de Rosarito B.C. comparación entre playas con muro y playas sin muro. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B.C.49pp.
- ✚ Shepard, F. P. 1950. Beach cycles in Southern California. U.S. Army Corps of Engineers, beach erosion boar, technical Memo No. 20.
- ✚ Smith and Jackson. 1992. The variability in width of the visible beach. *Shore and beach*. Vol. 60 (2). 7-14pp
- ✚ USACER (U.S. Army Coastal Engineer Research Center), 1984. Shore Protection Manual, 3vol.
- ✚ Wiegel, R.L. Oceanographical Engineering. Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1st. Edition, Englewood Cliffs, N.J. 532pp.