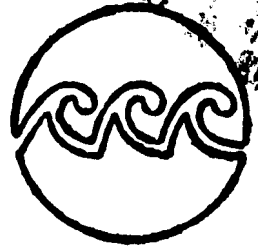




# Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología



03066  
1 ej //

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES  
UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONALES Y DE POSGRADO  
ESPECIALIZACIÓN, MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DEL MAR

TRANSPORTE LITORAL DE ARENAS EN PLAYAS DE LA  
COSTA SUR DEL ESTADO DE SINALOA.

## T E S I S

Para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR  
( Oceanografía Geológica )

RAMON PERAZA VIZCARRA

1985

TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VII
RESUMEN .....	VIII
INTRODUCCION .....	1
AREA DE ESTUDIO .....	7
METODOS .....	9
Mediciones directas .....	9
Trazadores de arena .....	9
Perfil de la playa .....	12
Análisis granulométrico y mineralógico .....	12
Mediciones de olas y corrientes .....	13
Cálculo del transporte con los parámetros del oleaje .....	13
Predicción del transporte litoral usando datos estadísticos de oleaje de aguas profundas .....	14
Fuente de datos .....	14
Descripción de la metodología usada en la computación del transporte arena .....	19
RESULTADOS Y DISCUSION .....	26
Mediciones en la Isla de la Piedra .....	26
Predicción del transporte en otras playas de la región .....	36
CONCLUSIONES .....	45
LITERATURA CITADA .....	46
APENDICE .....	52

## LISTA DE TABLAS

TABLA	Pág.
1. Valores representativos de la altura de las olas usados en la computación del flujo de energía ..	17
2. Valores representativos del período de las olas usados en la computación del flujo de energía ...	17
3. Medidas gráficas del tamaño del grano del sedimento .....	30
4. Concentración relativa al cuarzo de los minerales más abundantes a lo largo del perfil de la playa.	30
5. Estimación del transporte litoral de arenas utilizando el método de trazadores fluorescentes .....	35
6. Comparación de los valores del transporte litoral obtenidos por otros investigadores utilizando el método de trazadores fluorescentes .....	35
7. Estimación del transporte litoral con los parámetros de oleaje medidos en la zona de rompientes .....	37
8. Parámetros utilizados en el cálculo de los valores parciales del transporte litoral $Q_L$ .....	38
9. Resultados finales del transporte litoral de arenas en los transectos seleccionados .....	39
10. Comparación de los valores del transporte litoral neto calculados en diferentes áreas por otros investigadores .....	42

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pág.
1. Terminología del ambiente de playa .....	2
2. Localización del área del estudio .....	5
3. Rosa de oleaje para el área de estudio .....	8
4. Localización del cuadro de datos del "Summary of Synoptic Metereological Observations", adyacente a la costa de Sinaloa .....	15
5. Modificación de los datos de oleaje para olas para lelas a la línea de costa .....	18
6. Relación entre el azimut de una perpendicular a la línea de costa $Q_n$ , el azimut de la dirección de - propagación del oleaje $\theta$ y la dirección del trans- porte litoral .....	21
7. Perfil de la playa durante la inyección del traza- dor .....	27
8. Distribuciones granulométricas de muestras obteni- das en: la berma ( $X$ ) y la zona de vaivén ( $X_c$ ) ....	28
9. Distribuciones granulométricas de muestras obteni- das en: La zona de derrame ( $X_1$ ), ( $X_2$ ), ( $X_3$ ) y la zona de rompiente ( $X_4$ ) .....	29
10. Vectores de velocidades promedios de corrientes en cm/seg .....	31
11. Distribución de la concentración del trazador en granos/kg de arena .....	32
12. Distribución de la concentración del trazador en granos/kg de arena .....	33
13. Direcciones y magnitudes del transporte litoral ne- to (en miles de metros cúbicos por año) en playas de la costa sur de Sinaloa .....	40
14. Mapa de la desembocadura del Río Baluarte .....	44
15. Gráfica de $I_\ell$ contra $P_\ell$ .....	56
16. Modelo esquemático para el transporte de arena ...	56

## RESUMEN

Se evaluó el transporte litoral de arenas a lo largo de la costa en áreas específicas del sur de Sinaloa, utilizando métodos directos y predictivos. La determinación directa del transporte se efectuó en una playa de la Isla de la Piedra, durante una prueba en la que se usó arena fluorescente como trazador. La cantidad de transporte obtenida fluctuó entre .01 y .02 m<sup>3</sup>/seg. aproximadamente. Se realizaron además durante la prueba, mediciones de corrientes y de oleaje, se colectaron muestras para análisis granulométricos y mineralógicos y se levantó un perfil de la playa.

La magnitud y dirección del transporte, se evaluaron en otras playas de la región utilizando un modelo empírico basado en la computación del flujo de energía a lo largo de la costa, a partir de datos estadísticos de oleaje de aguas profundas. El transporte neto calculado por este método fue hacia el norte en los transectos I, III, IV y V con una magnitud que varió entre 18,000 a 45,000 m<sup>3</sup>/año aproximadamente, mientras que los transectos II, VI y VII fue hacia el sur con una magnitud que varió aproximadamente entre 112,000 a 380,000 m<sup>3</sup>/año. Todos los transectos presentaron intensos movimientos de arenas en ambas direcciones, reflejo de los cambios en el régimen de oleaje durante el año.

## INTRODUCCION

La utilización de la playa como un espacio para la recreación es conocida y estimada por la mayoría de la gente. Las playas arenosas no solamente tienen gran popularidad con los residentes de las áreas costeras sino que apoyadas en una infraestructura turística atraen a miles de visitantes, lo que representa una fuente de ingresos para las comunidades adyacentes. Uno de los mayores problemas en la preservación de las playas se produce por el movimiento de la arena en la zona litoral por acción de las olas y corrientes. La zona litoral se extiende a través de la playa hasta una profundidad generalmente considerada entre los 10 y 20 m (Figura 1), donde el movimiento de los sedimentos transportados por las olas superficiales es menos activo (30).

El movimiento de sedimentos en la zona litoral puede ser dividido en dos principales modos direccionales: transporte a lo largo de la costa y transporte hacia fuera y dentro de la costa. El estudio de estos dos modos de transporte es de gran interés durante la etapa de planeación de obras de ingeniería costera, ya que estructuras tales como espigones y rompeolas interfieren con el movimiento natural de la arena y afectan a las playas adyacentes. Por otro lado la magnitud del transporte neto a lo largo de la playa en costas abiertas puede variar de 50,000 a más de 1.5 millones de metros cúbicos por año (42), dando lugar a que muchas áreas sometidas a fuertes corrientes litorales o tormentas tengan serios problemas de erosión.

El estudio del transporte litoral de arena es también de interés en los trabajos de Geología Marina relacionados con la formación de barras arenosas y la interpretación de los cambios en la línea de costa.

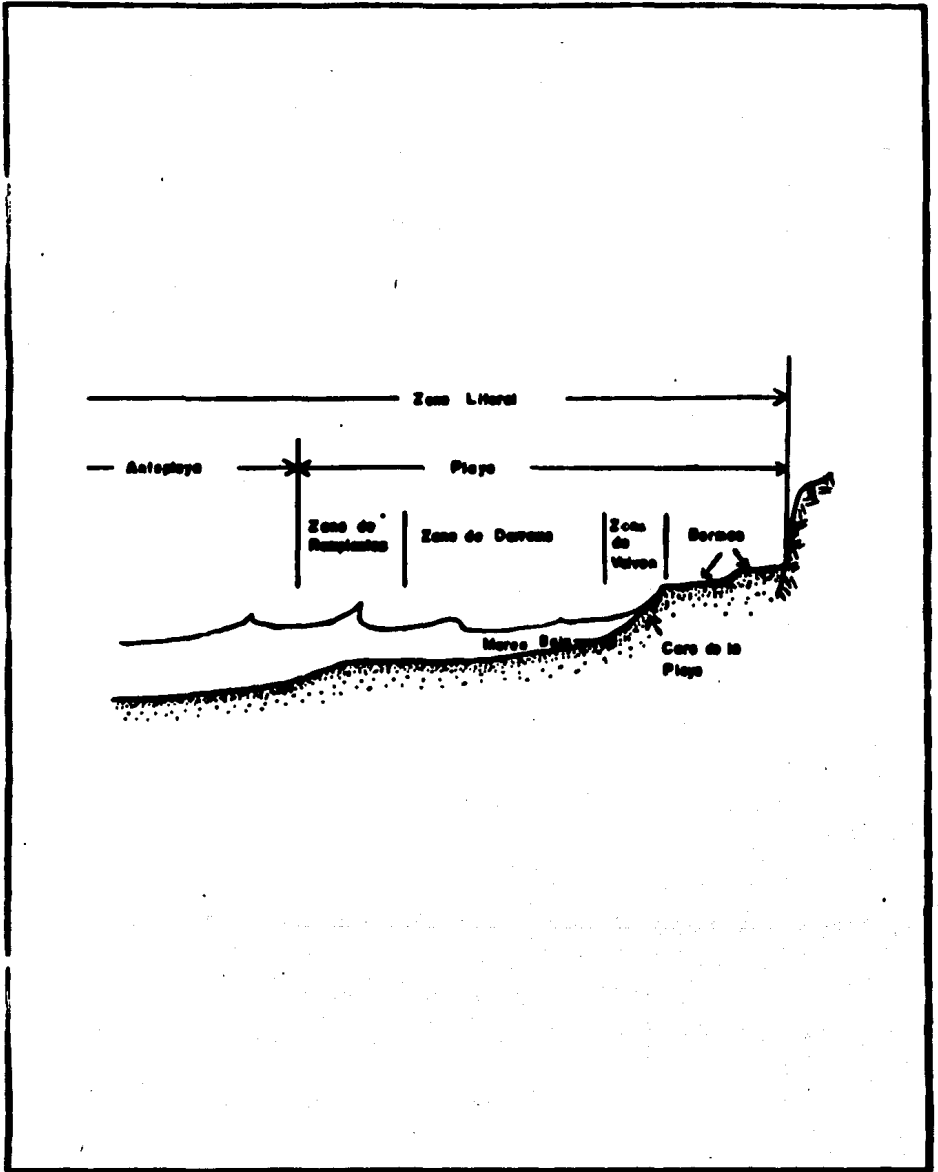


Fig. 1. Terminología del ambiente de playa (30).



Actualmente es posible la predicción del transporte de sedimentos a lo largo de la costa, a partir de los parámetros del oleaje incidente utilizando relaciones empíricas (Inman, Komar y Bowen, 26; Galvin y Vitale, 20) y consideraciones reales del transporte mecánico de la arena (Inman y Bagnold, 24; Komar e Inman, 31 y Longuet-Higgins, 34). En ambos tipos de enfoque se aplican modelos matemáticos que funcionan con datos investigados en el campo y en el laboratorio.

Los modelos basados en relaciones empíricas son los que más se usan para la predicción del transporte litoral (31). Estos modelos son esencialmente intuitivos y se fundamentan en la correlación entre el transporte de arena medido directamente en el campo y el flujo de energía del oleaje evaluado en la zona de rompiente. La base de los modelos que utilizan consideraciones reales del transporte es el análisis físico de las fuerzas que actúan sobre las partículas de sedimento. En el apéndice se describe brevemente el desarrollo de estos dos tipos de conceptos.

La predicción de la magnitud del transporte perpendicular a la costa todavía no se ha logrado (Aubrey et al., 2). Sin embargo existen considerables esfuerzos tendientes a encontrar relaciones empíricas entre el oleaje incidente, las características de la marea y el movimiento del sedimento hacia fuera y dentro de la costa (Winant et al., 49; Aubrey et al., 2; Winant y Aubrey., 48; entre otros).

En los últimos años, la importancia de la costa y playas arenosas del sur de Sinaloa, se ha acentuado como resultado del incremento de la población y del crecimiento de las actividades pesqueras, comerciales y recreacionales en el área. Es evidente que en un futuro cercano la protección y el mantenimiento de la zona costera deberá tener un carácter prioritario para los sectores responsables del desarrollo de la región, ya que con el tiempo la presión sobre el uso de la costa y playas aumentará.

El manejo inteligente de la zona costera requiere de la investigación de los procesos litorales que afectan a esas áreas.

El objetivo fundamental de este trabajo es evaluar el transporte litoral de arenas a lo largo de la costa en áreas específicas del sur de Sinaloa, realizando mediciones directas y aplicando un modelo predictivo, con el propósito de obtener un orden de la magnitud y una estimación de la dirección del movimiento de arena.

La determinación directa del transporte se efectuó en una zona de la Isla de la Piedra en Mazatlán (Figura 2), seleccionada por ser una área localizada en una costa abierta, de fácil acceso y con importantes proyectos de urbanización. La medición se realizó durante una prueba en la que se usó arena marcada con pintura fluorescente como trazador.

La magnitud y dirección del transporte, se evaluaron en otras playas de la región utilizando un modelo empírico basado en la computación del flujo de energía a lo largo de la costa, a partir de datos estadísticos de oleaje de aguas profundas recopilados desde embarcaciones. Este tipo de metodología se seleccionó en virtud de que en nuestras costas no existen datos estadísticos de oleaje de rompiente.

En la región se han efectuado algunos trabajos relacionados con el transporte litoral de arenas. Freemont (18) mencionó observaciones concernientes al movimiento de sedimentos y corrientes en las proximidades de Mazatlán, Sin., que suministraron criterios para el diseño de las estructuras de protección del puerto. Curray et al., (9) en la investigación sobre el origen y desarrollo de las llanuras de estrán de las costas de Nayarit y sur de Sinaloa, realizaron deducciones del transporte litoral prevaeciente durante los diversos periodos

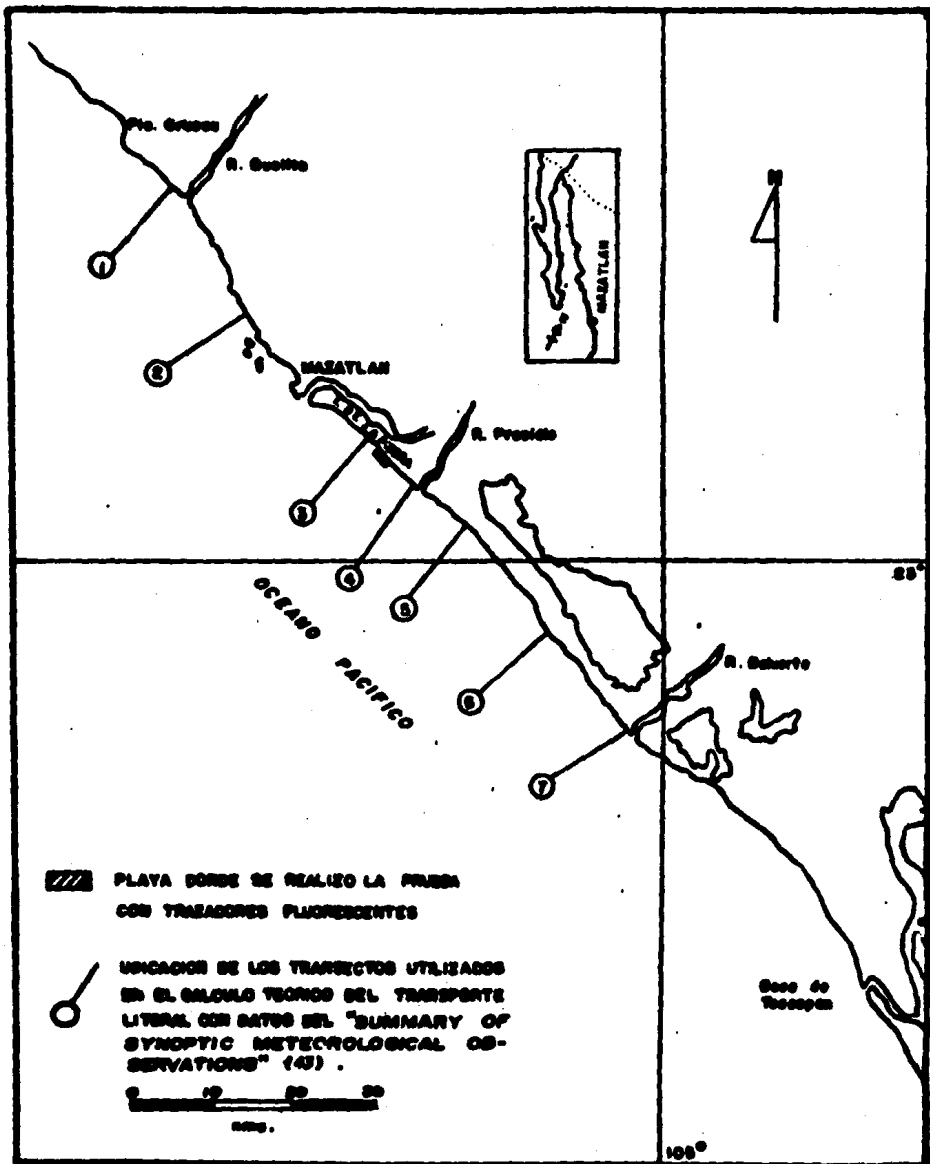


Fig. 2. Localización del área de estudio.

en que dividieron la historia Holocénica de esa región.

Phleger y Ayala-Castañares (38) apoyados en el trabajo anterior, deducen la dirección prevaleciente del transporte litoral durante la formación de la barrera interior y exterior de la laguna costera Huizache-Caimanero. García-Krasovsky (22) basado en el trabajo de Ingle (23) propuso un método para el marcado de arena con material fluorescente y efectuó mediciones del transporte litoral en una playa de la laguna de Agua Brava, Nayarit. La Compañía Oceanografía S.A. por encargo de la Secretaría de Marina (12) elaboró un proyecto para la intercomunicación de la Laguna de las Cabras con el mar, realizando estudios de oleaje y del transporte litoral en una playa de esa zona. Montaño-Ley (35) y Peraza-Vizcarra (37) efectuaron mediciones directas del transporte litoral en una playa de la Isla de la Piedra, utilizando trazadores fluorescentes y posteriormente cuantificaron el transporte en dos playas de la región usando datos de oleaje de aguas profundas (36).

## AREA DE ESTUDIO

La figura 2, muestra el área entre la boca de Teacapán y Punta Gruesa, así como la ubicación de las playas seleccionadas para el estudio. Esta zona se encuentra situada en la entrada del Golfo de California y corresponde geológicamente a la provincia fisiográfica denominada por Alvarez Jr. (1) como llanura costera de Sinaloa, limitada hacia el oriente por la Sierra Madre Occidental y al poniente por el Océano Pacífico. La línea de costa de la región tiene una orientación aproximada NW-SE y se caracteriza por la presencia de una serie de lagunas costeras separadas del mar por barreras constituidas por sedimentos principalmente arenosos. El origen y desarrollo de estas lagunas ha sido descrito por Curray et al., (9), Phleger y Ayala-Castañares (38) y Lanckford (32).

El clima es subtropical a tropical, tipo cálido subhúmedo (21), con una temperatura media anual de 25° y un régimen de lluvias predominante durante el verano. La precipitación pluvial media anual alcanza entre 500 mm al norte de Punta Piaxtla hasta aproximadamente 800 mm al sur de Teacapán (7). Los vientos predominantes son del noroeste en invierno y del oeste al suroeste en verano, con velocidades promedio entre 2.6 y 3.5 m/seg. Los vientos del suroeste aunque menos frecuentes son debido principalmente a perturbaciones ciclónicas que se presentan en los meses de junio a octubre (11). Las olas más frecuentes provienen del noroeste, norte, oeste y suroeste. La figura 3 es una reproducción de la rosa del oleaje que afecta al área de estudio. Este diagrama fue construido por Montaño-Ley (35) con datos del "Summary of Synoptic Meteorological Observations"(43).

El tipo de marea es mixta semi-diurna y en el puerto de Mazatlán presenta un rango medio de marea de 0.9 metros (27).



## METODOS

El transporte litoral de arenas se evaluó en forma directa, usando trazadores fluorescentes. También se efectuó una estimación del transporte usando los parámetros del oleaje medidos durante la prueba. Para la evaluación del transporte en otras playas de la región se utilizó información estadística de oleaje de aguas profundas obtenida del "Summary of Synoptical Meteorological Observations" publicado por el U.S. Naval Weather Service Command (43) y referida como SSMO. Una descripción de la metodología utilizada se da a continuación.

### Mediciones directas

El 17 de diciembre de 1982 se efectuó una prueba utilizando trazadores fluorescentes en una playa de la Isla de la Piedra localizada a 11 Km aproximadamente al sur de Mazatlán (Figura 2). Paralelamente se realizaron mediciones de corrientes, de olas, del perfil de la playa y se colectaron muestras de arena a lo largo del perfil para análisis granulométricos y mineralógicos.

### Trazadores de Arena

Los estudios con trazadores se basan en un rastreo de arenas fácilmente identificables, que previamente son depositadas en un lugar clave de una red de estaciones dada. Aunque se ha utilizado una amplia variedad de materiales trazadores, los materiales fluorescentes por su facilidad de elaboración y manejo, son los de mayor uso de la medición directa del transporte litoral (15). Por este motivo se seleccionó esta técnica en el presente trabajo.

El pre-requisito primario de cualquier tipo de granos usados para trazar el movimiento de sedimentos es que deben de ser físicamente similares a los granos naturales que se encuentran en el lugar

de estudio. La forma más lógica y práctica de asegurar esta similitud es marcar y reintroducir los granos del sitio en que se esté efectuando la prueba (23). Una semana antes de efectuar la prueba, se procedió a elaborar el material trazador para lo cual se colectaron del sitio de estudio, aproximadamente 50 kg de arena, los cuales fueron secados, teñidos y empacados en bolsas de plástico de 10 kg. Para el teñido de la arena y la comprobación de las propiedades hidrodinámicas del material trazador, se utilizó la técnica de pinturas fluorescentes en solventes seguida por García-Krasovsky (22). El método usado para determinar la cantidad del transporte de arena, fue el de integración espacial denominado también de Lagrange (15).

Durante la prueba, el arreglo de las estaciones de muestreo y los puntos de inyección fueron determinados de acuerdo a las condiciones de la corriente litoral y del oleaje. Los puntos de inyección se localizaron corriente arriba de una red de estaciones definidas por varillas de posición conocida, que ayudaron a los operadores a posicionarse dentro de la zona de la rompiente. El trazador se inyectó simultáneamente en cinco puntos de un transecto normal a la línea de playa realizando dos ciclos de muestreo separados por un intervalo de dos horas. En cada ciclo se colectaron 45 muestras volumétricas de arena usando aparatos muestreadores con capacidad de 200 cm<sup>3</sup>. El espesor de la capa móvil fue estimado de la estratigraffa del trazador en núcleos de sedimentos extraídos de tubos de plástico transparente.

Una vez finalizado el trabajo de campo, las muestras fueron lavadas y secadas, procediéndose posteriormente al conteo de los granos de arena marcados, utilizando una lámpara de luz ultravioleta. Las concentraciones de granos marcados por kilogramo de arena se usaron para elaborar los diagramas de distribución del trazador para los diferentes tiempos del muestreo. Estos diagramas proporcionan información cualitativa concerniente al movimiento de la arena a lo largo de la playa. Los diagramas además



pueden ser utilizados para evaluar la distancia media del transporte del trazador a lo largo de la costa la cual es presumiblemente la misma que la de la arena no pintada, ya que se supone que tienen las mismas propiedades hidráulicas.

Siguiendo el procedimiento utilizado por Crickmore y Lean (8), se calculó la distancia media del transporte de la distribución del trazador, tomando momentos de las concentraciones en la dirección a lo largo de la costa a partir de la línea de inyección usando la siguiente relación:

$$\bar{V}_L = \frac{\sum_{x=0}^{x_b} \sum_{y=-\infty}^{\infty} y C(x,y)}{\sum_{x=0}^{x_b} \sum_{y=-\infty}^{\infty} C(x,y)} \quad (1)$$

donde:

- $\bar{V}_L$  = Nuevo centro de gravedad del trazador desplazado de su posición original en el sitio de inyección.  
 $C(x,y)$  = Concentración del trazador a una distancia "y" a lo largo de la costa desde la línea de inyección y a una distancia "x" normal a la línea de playa.

La velocidad media de la arena transportada a lo largo de la playa ( $\bar{V}_L$ ) fue calculada usando la relación:

$$\bar{V}_L = \frac{\bar{V}_L}{t} \quad (2)$$

donde:

- t = Tiempo transcurrido entre la inyección y el muestreo.

Para obtener la cantidad de transporte en volumen ( $Q_L$ ) se utilizó la siguiente ecuación, empleada por Komar e Inman (31):

$$Q_L = b x_b \bar{V}_L \quad (3)$$

donde:

- b = Espesor de la capa móvil

$X_b$  = Amplitud de la playa.

La cantidad de transporte en peso sumergido  $I_L$  se obtuvo aplicando la ecuación de Inman y Bagnold (24)

$$I_L = (\rho_s - \rho) g a' Q \quad (4)$$

donde:

$\rho_s$  y  $\rho$  = Son respectivamente la densidad de la arena y la del agua.

$g$  = Es la aceleración de la gravedad

$a'$  = Es un factor de correlación por el espacio poroso y puede ser tomado como 0.6 para la mayoría de los depósitos de playa.

### Perfil de la Playa

Al inicio de la prueba se levantó un perfil de la playa a lo largo de la línea de inyección del trazador utilizando el método visual aproximativo descrito por Emery (16).

### Análisis Granulométrico y Mineralógico

Se colectaron muestras de arena para análisis granulométricos y mineralógico a través del perfil de la playa. Las muestras fueron analizadas por el método de tamices. Después del tamizado se calcularon porcentos de material retenido en cada tamiz, porcentos acumulativos y se construyeron curvas granulométricas en papel de probabilidades, de las cuales se obtuvieron medidas gráficas granulométricas según el criterio de Folk (17). La identificación de los minerales se efectuó mediante difracción de rayos X, usando un difractómetro Phillips-PW140 con radiación de cobre K(30 Ku; 20MA). Una vez molidas las muestras se montaron siguiendo el procedimiento descrito por Diebold et al (13). La identificación cuantitativa se realizó mediante la altura de los siguientes picos: Cuarzo, el pico de una reflexión en 4.26 A (100); Cristobalita 4.04 A (101); Feldespatos 3.25-2.28 A (040, 202); Mica 9.99-10.4 A (002); Illita 10.16 A (001) (Carrol, 6).

La concentración relativa de los minerales se hizo en relación al pico de 4.26 A del cuarzo, por lo que se enfatiza que los valores obtenidos con esta técnica son relativos solamente.

#### Medición de Corrientes y Olas

La velocidad y dirección de las corrientes se estimó usando flotadores, los cuales se soltaron en la zona de rompientes y de derrame. La posición de los flotadores se determinó usando una brújula.

La altura de las olas se midió utilizando un tubo graduado colocado cerca de la zona de rompiente. Las observaciones se realizaron usando un tránsito colocado en la berma de la playa. Se obtuvieron además datos del período y dirección de las olas. El ángulo de incidencia fue medido por medio de una brújula Brunton visualizando a lo largo de la línea de rompiente.

#### Cálculo del transporte litoral con los parámetros de oleaje

Para la estimación del transporte litoral utilizando los datos de olas, se aplicó el modelo empírico utilizado por Komar e Inman (31), con un coeficiente adimensional  $K=0.77$ .

$$I_{\ell} = K P_{\ell} = K (E C_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (5)$$

donde:

- $P_{\ell}$  = Es la componente longitudinal del flujo de energía del oleaje o parámetro  $P_{\ell}$ .
- $(E C_g)_b$  = Es el flujo de energía de las olas evaluado en la zona de rompiente.
- $\alpha_b$  = Es el ángulo de la rompiente.

Para el cálculo del parámetro  $P_{\ell}$  se aplicaron en la ecuación anterior las siguientes relaciones:

Se aproximó la velocidad de grupo  $C_g$  por la velocidad de fase  $C_b$  en la zona de rompiente.

$$C_b = \sqrt{2.28 g H_b} \quad (6)$$

donde:

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

De la teoría lineal de ondas y la ecuación de la energía

$$E_b = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 \quad (7)$$

donde:

$E_b$  = Energía del oleaje en la zona de rompiente.

La altura de la ola usada fue obtenida de:

$$(H_{rms})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \quad (8)$$

donde:

$H_{rms}$  = Raíz media cuadrada de las alturas de las olas

$N$  = Número total de observaciones

$H_i$  = Altura de la ola correspondiente a la observación  $i$ .

**Predicción del transporte litoral usando datos estadísticos de oleaje de aguas profundas.**

Se estimó el transporte litoral de arenas en siete playas seleccionadas de la región (Figura 2) utilizando un modelo predictivo basado en la computación del flujo de energía a lo largo de la costa ( $P_L$ ) a partir de observaciones visuales de olas realizadas desde embarcaciones. Para la aplicación de la metodología se siguió el análisis utilizado por Walton y Chiu (45).

#### Fuentes de Datos

La información del oleaje se obtuvo del "Summary of Synoptical Meteorological Observations" publicado por el U.S. Naval Weather Service Command (43). Los datos son observaciones meteorológicas y del estado del mar tomados desde embarcaciones que navegaron a través de "cuadros de datos" definidos por sus correspondientes latitudes y longitudes. La figura 4 muestra la localización de la zona de observaciones de los datos utilizados en este trabajo

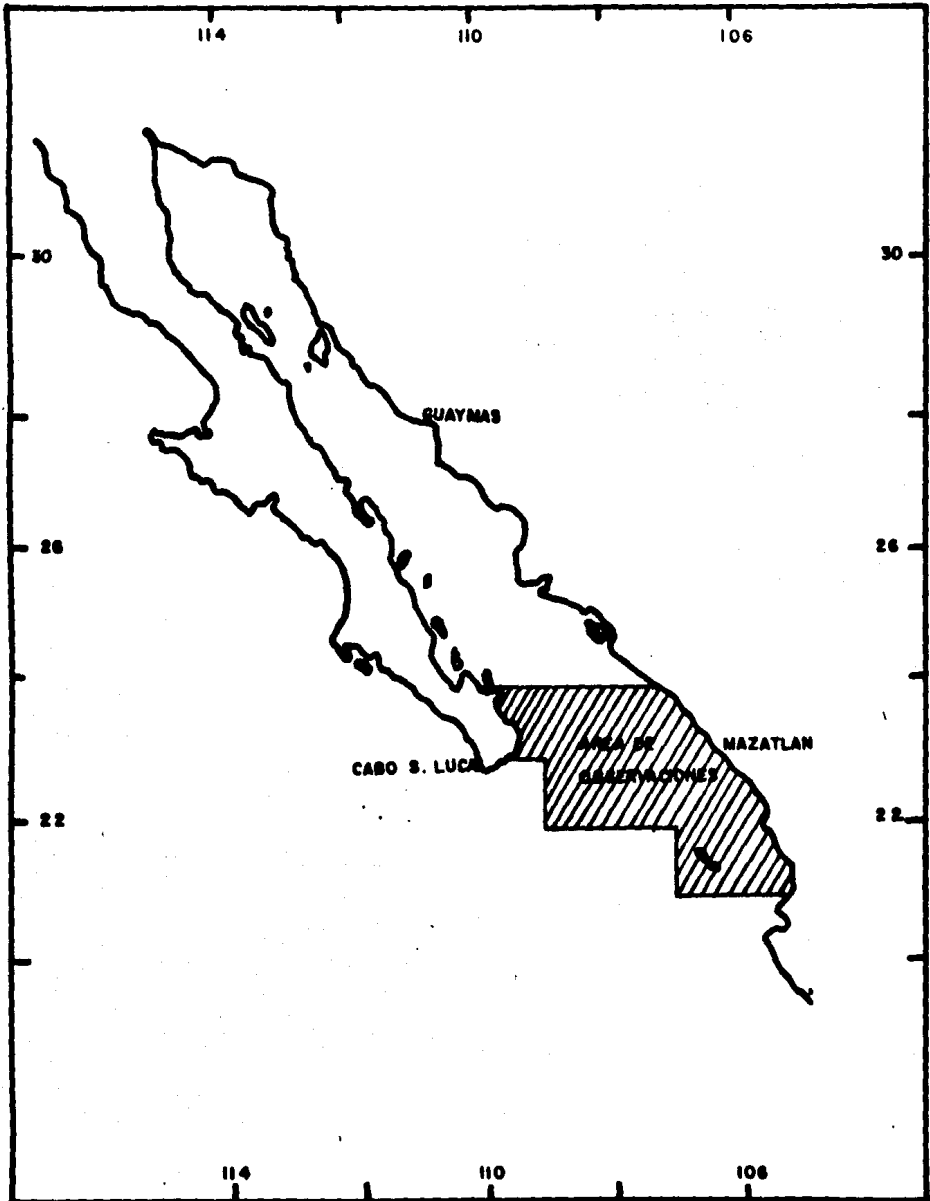


Fig. 4. Localización del cuadro de datos del "Summary of Synoptical Meteorological Observations" (43).

(área 4, Mazatlán). El porcentaje de frecuencia de la dirección del viento contra alturas del mar se encuentra en la Tabla 18 del Vol. 1 del SSMO. Esta información fue recabada durante el período 1963-1979. El porcentaje de frecuencias de la altura de las olas contra el período para observaciones de oleaje distante (Swell) y oleaje cercano (Sea) se encuentra en la Tabla 19 del SSMO. Estos datos fueron recopilados desde 1949 a 1979. Para efectuar las computaciones del transporte de arena siguiendo la metodología propuesta por Walton y Chiu (45) se deben de usar los datos de ambas tablas. Las suposiciones implicadas durante la utilización de los datos de SSMO son las siguientes:

En el uso de la Tabla 18 se supone que: (1) el oleaje distante tiene la misma dirección que el oleaje cercano, el cual corresponde a la dirección del viento; y (2) las olas se propagan solamente en la dirección observada en cualquier intervalo específico de tiempo. El uso de la Tabla 19 supone que: (1) el oleaje cercano y lejano con el mismo período y altura puede ser tratado igual y que no existe pérdida de energía hacia la atmósfera entre el punto de observación y la porción de la línea de costa considerada; (2) no se presentan otras alturas de olas y períodos durante la observación y registro de la altura y período de una determinada ola, y (3) todas las observaciones fueron hechas en aguas profundas ( $h \geq 2.56 T^2$  en pies) para los períodos de olas registradas (45).

Las correlaciones entre los rangos de las alturas de olas y períodos dados en los datos del SSMO y los valores representativos correspondientes usados en los cálculos del transporte se encuentran en las Tablas 1 y 2. La dirección del oleaje registrada en los datos del SSMO está dada sobre los ocho puntos del compás, por lo que corresponde a los ocho sectores de  $45^\circ$  del compás.

Cuando una ola representativa con una frecuencia dada era paralela a la costa, el sector correspondiente de olas se dividió en dos partes, una de las cuales se eliminó de las computaciones y la otra se utilizó considerando la mitad de la frecuencia inicial (Figura 5).

Tabla 1. Valores representativos de la altura de las olas usados en la computación del flujo de energía (45).

Altura codificada en los datos del SSMO	Altura usada en la computación (Pies)
1	0.47
1- 2	1.71
3- 4	3.31
5- 6	4.94
7	6.58
8- 9	8.22
10-11	9.85
12	11.49
13-16	13.98
17-19	17.25

Tabla 2. Valores representativos del periodo de las olas usados en la computación del flujo de energía (45).

Periodo codificado en los datos del SSMO	Periodo usado en la computación
6	3.0
6- 7	6.5
8- 9	8.5
10-11	10.5
12-13	12.5
13	16

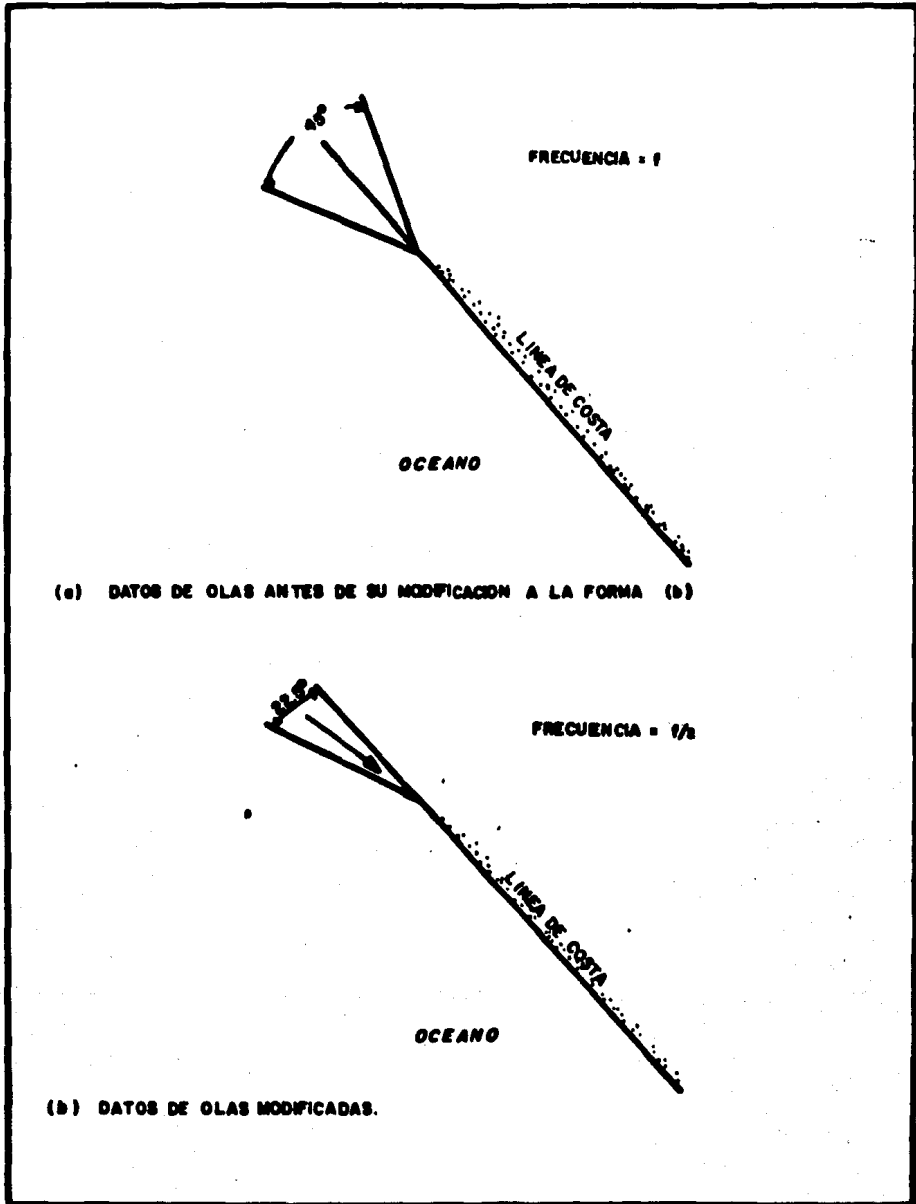


Fig. 5. Modificación de los datos de oleaje para olas paralelas a la línea de costa (45).



Descripción de la metodología usada en la computación del transporte de arenas.

La cantidad de transporte de arena como peso sumergido está dada por la ecuación 4, debido a que el transporte litoral usualmente se reporta en forma volumétrica, esta ecuación puede ser expresada como:

$$Q_L = \frac{K P_L}{(\rho_s - \rho) g a'} \quad (9)$$

donde los términos K y  $P_L$  dependen de los parámetros de oleaje  $H_b$ , T,  $\alpha_b$ .

La ecuación anterior representa el transporte litoral de arenas en términos de una ola con una determinada altura, período y dirección. Walton y Chiu (45) estiman que para un estado cambiante de las condiciones del oleaje en aguas profundas, el transporte total de arenas a lo largo de la costa promediado para el intervalo de tiempo  $t^*$  puede expresarse como:

$$Q_L = \frac{1}{t^*} \int_{t=0}^{t=t^*} Q_L(t) dt = \int_{t=0}^{t=t^*} Q_L(t) \frac{dt}{t^*} \quad (10)$$

El término  $\frac{dt}{t^*}$  se considera como la fracción de tiempo durante la cual una ola con características específicas de altura, período y dirección se genera durante el período  $t^*$ . Esto se puede expresar en intervalos finitos como:

$$\hat{f}(H_o, T, \theta) = \text{frecuencia} = \frac{dt}{t^*} \quad (11)$$

$$Q_L = \sum_{t=0}^{t=t^*} Q_L(t) \cdot \hat{f}(H_o, T, \theta) \quad (12)$$

donde:

$$\sum_{H_0 = 0}^{\infty} \sum_{T = 0}^{\infty} \sum_{\theta = 0}^{2\pi} \hat{f}(H_0, T, \theta) = 1.00 \quad (13)$$

El ángulo  $\theta$  representa el azimut de la dirección de propagación de la ola y se relaciona a  $\alpha_0$  mediante la ecuación:

$\alpha_0 = \theta_n - \theta$  donde  $\theta_n$  es el azimut de una perpendicular a la línea de costa (Figura 6).

La suma de las frecuencias de olas se efectuó con valores de  $\theta$  dentro del rango  $\theta = \theta_n \pm \alpha_0$ .

donde:

$\alpha_0 = 90^\circ$ . Esto elimina el oleaje que no incide o no llega a la costa.

$$\sum_{H_0 = 0}^{\infty} \sum_{T = 0}^{\infty} \sum_{\theta = \theta_n - \frac{\pi}{2}}^{\theta_n + \frac{\pi}{2}} \hat{f}(H_0, T, \theta) < 1.00 \quad (14)$$

Por lo tanto el transporte total de arenas se puede calcular de:

$$Q_L = \sum_{H_0 = 0}^{\infty} \sum_{T = 0}^{\infty} \sum_{\theta = \theta_n - \frac{\pi}{2}}^{\theta_n + \frac{\pi}{2}} Q_L(H_0, T, \theta) \cdot \hat{f}(H_0, T, \theta) \quad (15)$$

El valor de  $\hat{f}(H_0, T, \theta)$  se puede calcular por medio de las Tablas 18 y 19 del SSMO. De la Tabla 19 se obtiene un valor de  $\hat{f}_{19}(H_0, T)$  de tal manera que:

$$\sum_{H_0 = 0}^{\infty} \sum_{T = 0}^{\infty} \hat{f}_{19}(H_0, T) = 1.00 \quad (16)$$

De la Tabla 18 se obtiene un valor de  $\hat{f}_{18}(H_0, \theta)$  correspondiente

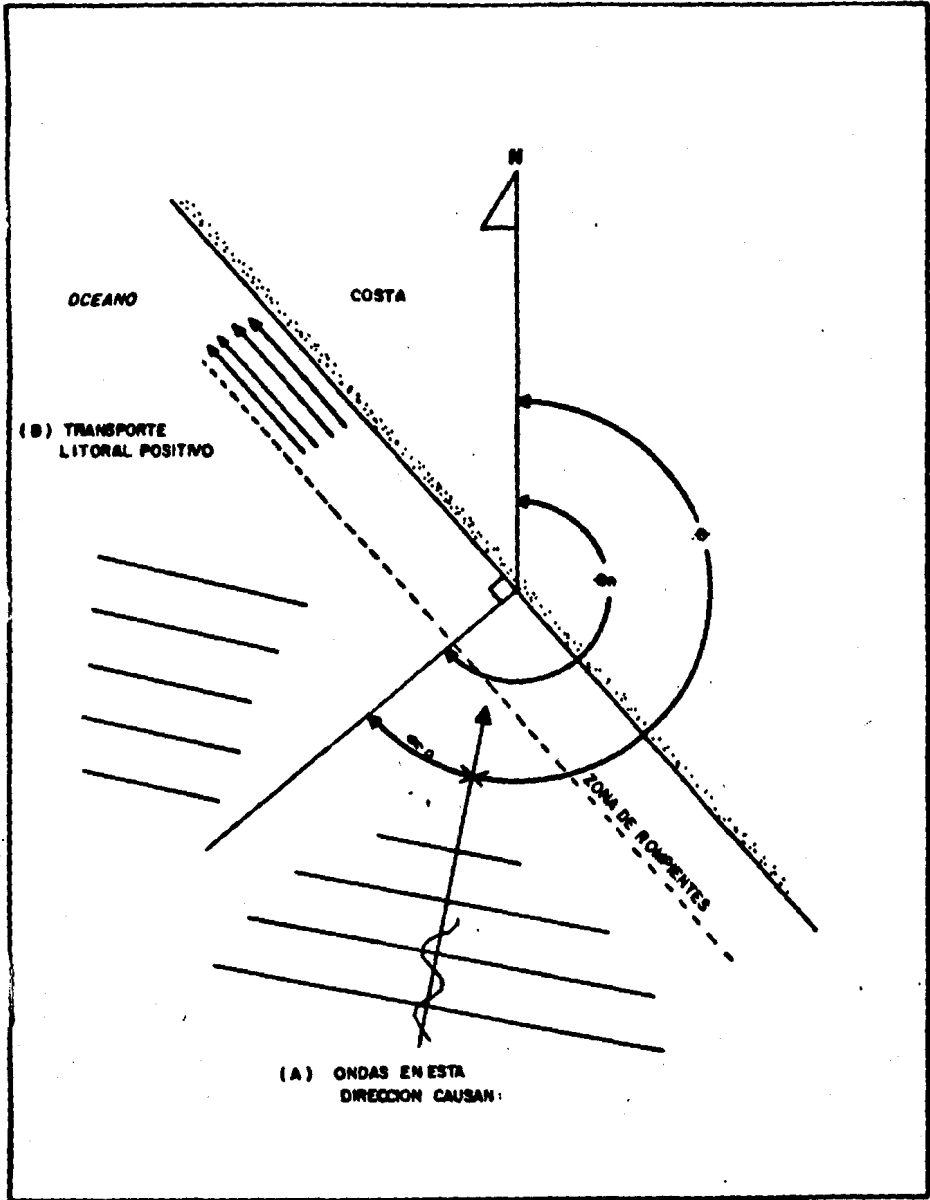


Fig. 6. Relación entre el azimut de una perpendicular de la línea de costa  $\theta_n$ , el azimut de la dirección de propagación del oleaje ( $\theta$ ) y la dirección del transporte litoral.

a un rango de altura de ola de la Tabla 19 de tal manera que:

$$\sum_0^{2\pi} \hat{f}_{18}(H_o^*, \theta) = 1.00 \quad (17)$$

Donde el \* representa la correspondencia de  $H_o$  en la Tabla 18 a el mismo rango en la Tabla 19. Multiplicando estos dos factores se obtiene la frecuencia deseada como una función de altura de la ola, período y dirección.

$$\hat{f}(H_o, T, \theta) = \hat{f}_{18} \cdot \hat{f}_{19} \quad (18)$$

Utilizando la ecuación 15 se obtiene el transporte litoral de arenas a lo largo de la costa en yardas cúbicas por día como un promedio de tiempo en que se efectuaron las observaciones del oleaje (Walton y Chiu, 45).

El proceso utilizado para calcular el transporte total de arenas a lo largo de la costa se puede resumir en la forma siguiente:

- 1) Se obtuvieron los valores  $\hat{f}_{18}$  y  $\hat{f}_{19}$  de las Tablas 18 y 19 del SSMO y se calculó  $\hat{f}(H_o, T, \theta) = \hat{f}_{18} \cdot \hat{f}_{19}$ . En cada transecto seleccionado se filtraron las frecuencias resultantes para eliminar las direcciones menores que  $\theta_n - 90$  y mayores que  $\theta_n + 90$ .
- 2) Se obtuvo el flujo de energía a lo largo de la costa utilizando la ecuación empleada por Walton (44).

$$P_L = E_o C_g K_f^2 \cos \alpha_o \quad \text{sen } \alpha_b \quad (19)$$

donde todos los parámetros del oleaje son de aguas profundas, excepto para el  $\text{sen } \alpha_b$  y el coeficiente  $K_f$  que representa la pérdida de energía debido a la fricción. Este coeficiente del fondo se determinó utilizando el método de integración numérica de Bretschneider (4). Los cálculos se llevaron a cabo

desde aguas profundas hasta una profundidad de 10 pies a lo largo de los transectos indicados en la Figura 2 utilizando cartas de la Secretaría de Marina (14) y del Departamento de Cartografía Militar (10).

Para el cálculo de los demás términos de la ecuación se aplicaron las siguientes relaciones:

$$E_0 = \frac{\gamma H_0^2}{8} \quad (20)$$

donde:

$E_0$  = Energía del oleaje en aguas profundas  
 $\gamma$  = Gravedad específica del agua de mar  
 $H_0$  = Altura de las olas de aguas profundas.

$$Cg_0 = \frac{gT}{4} \quad (21)$$

donde:

$Cg_0$  = Velocidad de grupo de las olas en aguas profundas.  
 $T$  = Período.

$$\alpha_b = \alpha_0 \cdot (0.25 + 5.5 H_0/L_0) \quad (22)$$

donde:

$\alpha_b$  = Ángulo de incidencia de olas en la zona de rompientes.  
 $L_0$  = Longitud de la onda en aguas profundas  
 $\alpha_0$  = Ángulo de incidencia de olas en aguas profundas.

Las relaciones 20 y 21 están basadas en la teoría lineal de ondas. La ecuación 22 fue postulada por LeMehaute y Koh (33) basándose en la Ley de Snell. Sustituyendo estas relaciones en la ecuación 19 se obtiene el flujo de energía  $P_L$  en función de condiciones representativas de oleaje ( $H_0, T, \alpha_0$ ).

$$P_L = K_f^2 [20.63 H_0 T \cos \alpha_0] \sin \left[ \alpha_0 (0.25 + 1.07) \frac{H_0}{T} \right] \quad (23)$$

- 3) Se computó el transporte de arena sustituyendo  $P_L$  en la ecuación 9 y multiplicando la expresión obtenida por la frecuencia  $f$  correspondiente, se obtiene:

$$Q_L(H_0, T_{a_0}) \cdot f(H_0, T_{a_0}) = c f K_f^2 [20.63 H_0 T \cos \alpha_0] \sin \left[ \frac{\alpha_0}{T} (0.25 + 1.07) \frac{H_0}{T} \right] \quad (24)$$

donde:

$$c = \frac{K}{(b_s - \rho) g a'} \quad (25)$$

El valor total del transporte litoral de arena se calculó de acuerdo a la fórmula anterior (ec. 24) por adición de los valores parciales de transporte correspondientes a cada frecuencia considerada. Esto es, se obtuvieron valores positivos de  $Q_L$  cuando la propagación de las olas registradas provienen del lado izquierdo de un observador que mire hacia el mar. Esta dirección de propagación causa un transporte de arena hacia la derecha. Por otro lado, se obtuvieron valores negativos de  $Q_L$  para olas que se propagan de la derecha, causando un transporte a la izquierda (Figura 6 ). Sumando los valores positivos, negativos y los valores totales del transporte litoral se obtuvieron las cantidades  $Q_L +$ ,  $Q_L -$ ,  $Q_L$  neto.

Las operaciones se efectuaron en una calculadora programable Texas Instruments 59.

Las suposiciones implicadas en la aplicación del método son las siguientes (45):

- 1) La teoría lineal es válida para los procesos de transformación de olas y para los cálculos de energía.
- 2) El coeficiente de fricción  $K_f$  se calculó de acuerdo al procedimiento de Bretschneider (4).
- 3) La topografía del fondo está compuesta de contornos rectos y paralelos.

- 4) Ningún cambio drástico se encuentra en el perfil que va desde la zona de rompientes hasta una profundidad  $h = L_0/2$ .
- 5) Se considera que existe una cantidad adecuada de arena para ser transportada.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Mediciones en la Isla de la Piedra

La playa donde se realizó la prueba está compuesta principalmente de arena media y fina con un diámetro medio (Mz) que varía entre 245 y 337 micras en las muestras colectadas a lo largo del perfil (Figura 7). Las figuras 8 y 9 presentan la distribución granulométrica de las muestras. La Tabla 3 presenta medidas gráficas representativas del tamaño de grano del sedimento colectado.

La arena de la playa está constituida principalmente por minerales de cuarzo, cristobalita y feldespatos. La Tabla 4 presenta la concentración de los minerales encontrados a lo largo del perfil.

La Figura 7 muestra el perfil de la playa, levantado al inicio de la prueba. El levantamiento del perfil fue un elemento básico para el control y los resultados de la prueba, ya que nos permitió situar los puntos de inyección del trazador, las muestras para análisis granulométricos y mineralógicos, así como el patrón de muestreo seguido. Además con la medición del perfil fue posible estimar la amplitud de la capa móvil, variable incluida en las relaciones para evaluar el transporte litoral de arenas.

Las corrientes superficiales fueron medidas durante el inicio de la prueba, permitiendo implementar la red de muestreo. La Figura 10 muestra una representación vectorial de las velocidades promedio en cm/seg de estas corrientes.

El efecto de las corrientes litorales sobre el transporte neto de la arena se ve reflejado en las gráficas de distribución de la concentración del trazador (Figuras 11 y 12), las cuales revelan un transporte predominante de arenas de dirección sureste



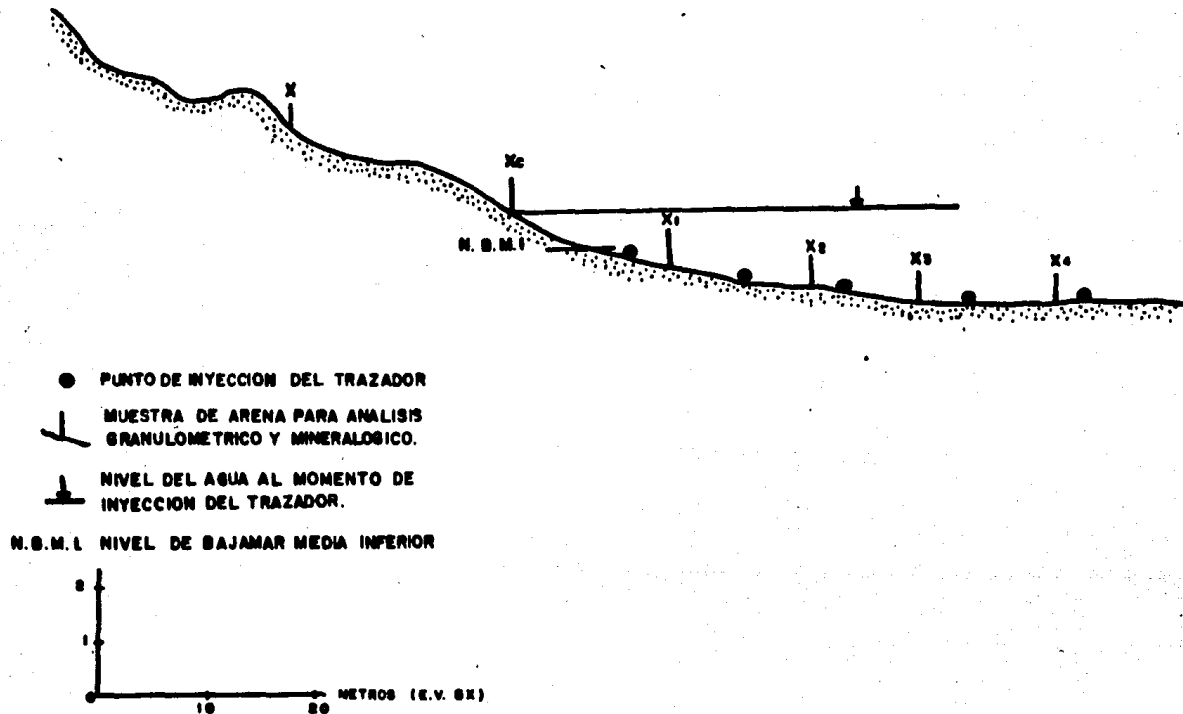


Fig. 7. Perfil de la playa durante la inyección del trazador.

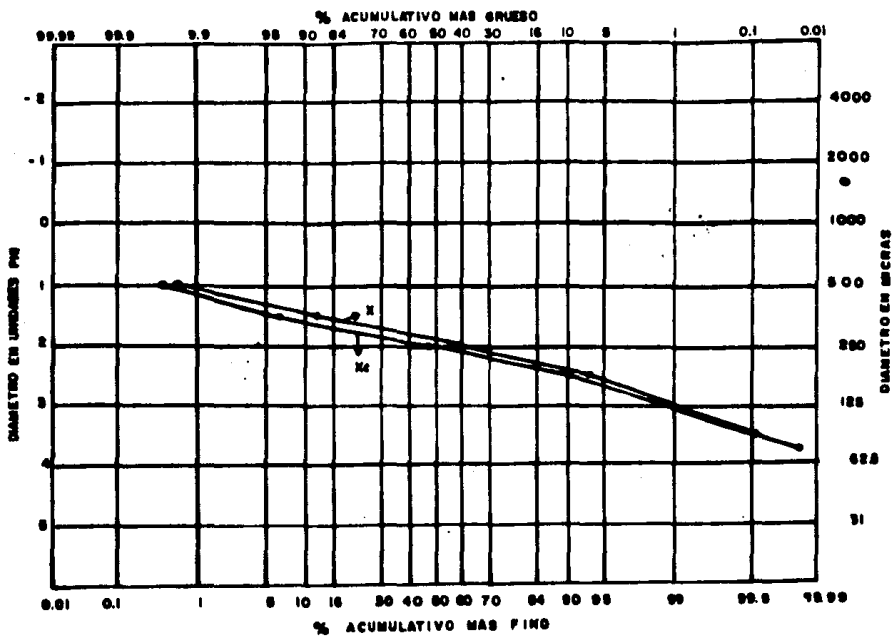


Fig. 8. Distribución granulométrica de muestras obtenidas en: la berma (X) y la zona de vaivén (Xc).

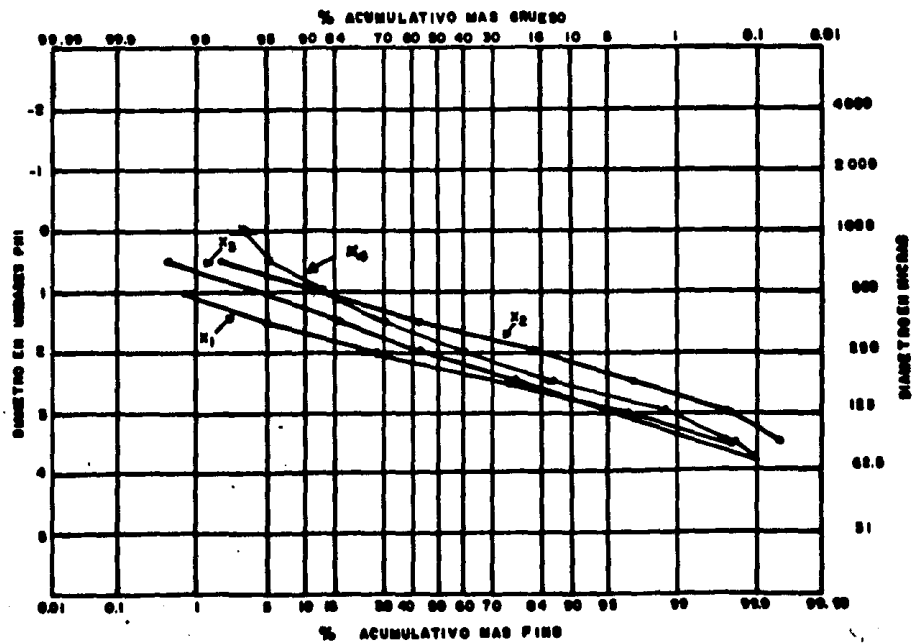


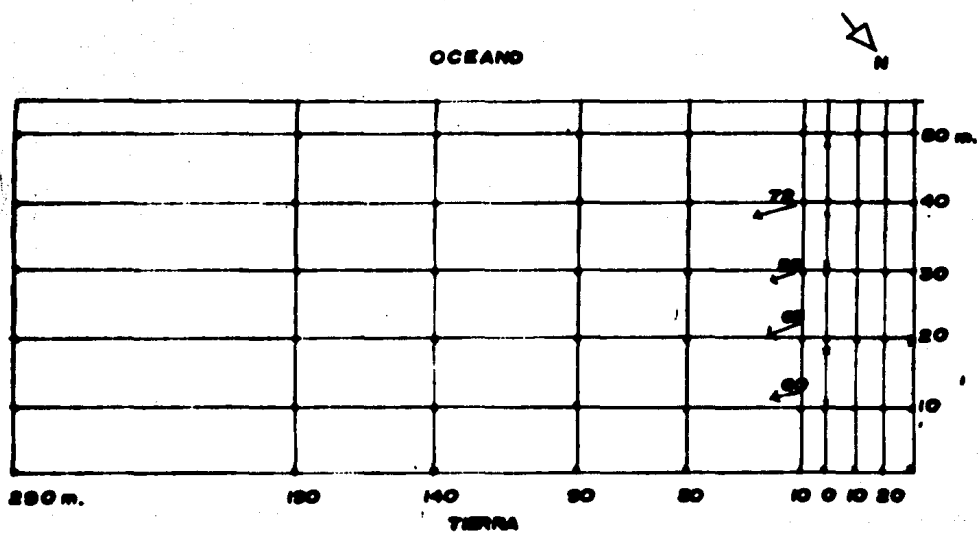
Fig. 9. Distribución granulométrica de muestras obtenidas en: La zona de derrame ( $X_1$ ), ( $X_2$ ), ( $X_3$ ) y la zona de rompiente ( $X_4$ ).

Tabla 3. Medidas gráficas del tamaño de grano del sedimento.

Parámetro estadístico	Fórmula	Berma (X)	Zona de vaivén (Xc)	Zona de derrame (X <sub>2</sub> )	Zona de rompiente (X <sub>4</sub> )
Tendencia central	$Mz = (\phi 16 + \phi 50 + \phi 84) / 3$	1.93	2.03	1.57	1.78
Desviación estandar	$\sigma_1 = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6.6}$	0.38	0.37	0.48	0.68
Coefficiente de asimetría	$SK_1 = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2\phi 50}{2(\phi 84 - \phi 16)} + \frac{\phi 5 + \phi 95 - 2\phi 50}{2(\phi 95 - \phi 5)}$	-0.01	+0.11	- .08	-0.15

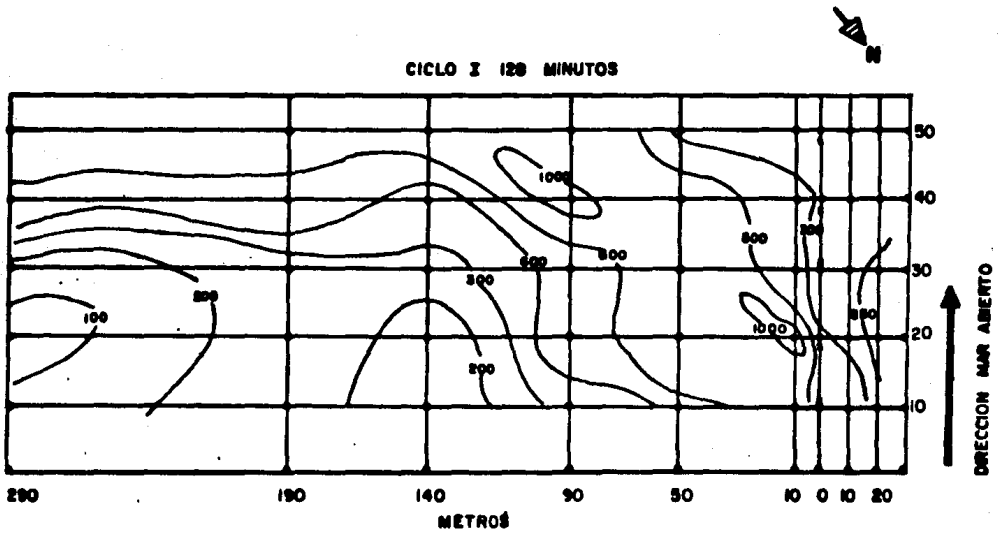
Tabla 4. Concentración relativa al cuarzo de los minerales más abundantes a lo largo del perfil de la playa.

Muestra.	<u>Cristobalita (4.24A)</u> Cuarzo (4.26A)	<u>Feldespatos (3.25A)</u> Cuarzo (4.26A)	Otras observaciones
X	0.8	6.1	Trazas de mica o illita (10.1A)
X-1	9.2	3.4	Trazas de mica o illita
X-2	2.3	0.8	Trazas de mica o illita
X-3	3.1	6.3	Trazas de mica o illita
X-4	0.5	2.3	Trazas de mica o illita
X-C	2.2	1.5	Trazas de mica o illita



**SIMBOLOGIA**  
 → CORRIENTE SUPERFICIAL  
 • PUNTO DE INYECCION DEL MATERIAL  
 FLUORESCENTE  
 PUNTO DE MUESTREO

Fig. 10. Vectores de velocidades promedio de corrientes en cm/seg.

**SIMBOLOGIA**

■ PUNTO DE INYECCION DEL MATERIAL  
FLUORESCENTE

● PUNTO DE MUESTREO

— ISOPLETAS

**Fig. 11.** Distribución de la concentración del trazador en granos/kg de arena.

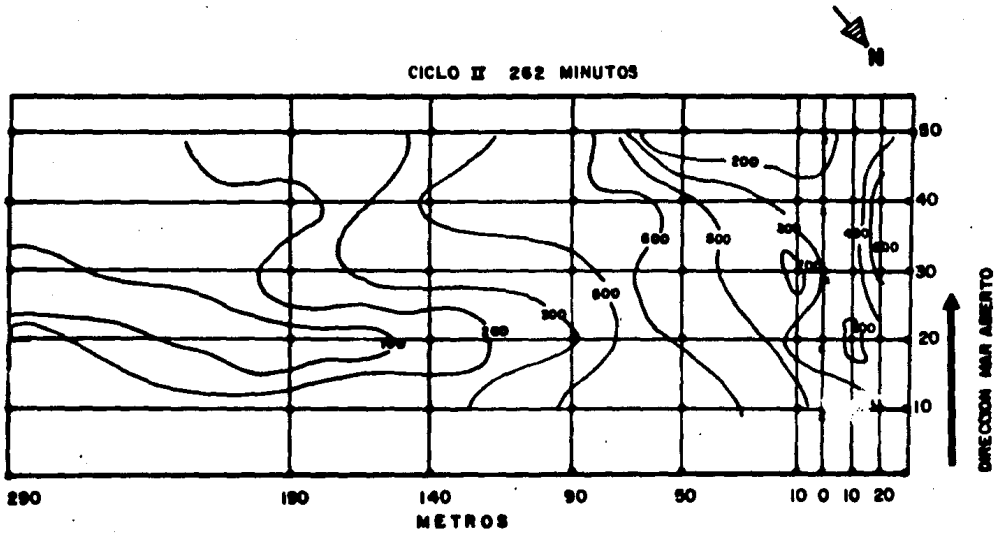


Fig. 12. Distribución de la concentración del trazador en granos/kg de arena.

a lo largo de la costa, o sea la misma dirección de la corriente litoral prevaleciente, conjuntamente con un transporte hacia la playa y mar abierto.

Montaño-Ley (35) considera que debido a la variabilidad en las condiciones del oleaje que afecta al área de estudio, se deben de preveer cambios o inversiones en la dirección del movimiento del sedimento a lo largo del año. Estos cambios en la dirección predominante del transporte se comprueban al comparar los resultados de este trabajo con los del autor citado quien estimó un transporte de arena en dirección noroeste en la misma área de estudio. Estas inversiones en la dirección predominante del transporte litoral en la región ya habfan sido previstos por Curry et al (9) quien basados en los regimenes actuales de oleaje y viento que afecta al sur de Sinaloa y norte de Nayarit, pronostican un balance probable entre el oleaje que proviene del norte y el que proviene del sur, ya que el régimen actual de viento representa un balance entre los vientos de verano y los de invierno: durante el régimen de invierno, la mayoría de los vientos se aproximan del noroeste y generalmente producen transporte litoral hacia el sur, en contraste, los vientos que proceden del sur y suroeste durante el periodo de verano producen el transporte litoral hacia el norte (9).

La Tabla 5 presenta los resultados de la cuantificación del transporte litoral utilizando el método de trazadores fluorescentes. Los valores de advección de la arena resultaron altos (.43 a 1 cm/seg) en relación a los obtenidos por Montaño-Ley (35), quien reportó valores de 0.16 a 0.22 cm/seg. Por otro lado García-Krasovsky (22) en una playa de Laguna de Agua Brava, Nay. ubicada al sur del área de estudio determinó valores de velocidades promedio de los granos de 1.33 y 4.7 cm/seg.

La cantidad de transporte en volumen ( $Q_L$ ) y en peso sumergido ( $I_L$ ) obtenidos en este estudio, fueron también más altos (9675 a 22500 cm<sup>3</sup>/seg y 73 a 171X10<sup>5</sup> dinas/seg) que los valores



Tabla 5. Estimación del transporte litoral de arenas en la Isla de la Piedra, utilizando el método de trazadores fluorescentes.

No. de ciclo durante la prueba	Advección de arena	Espesor de la capa móvil	Cantidad de transporte en volumen	Cantidad de transporte en peso sumergido
17 Dic. 82	$V_L$ (cm/seg)	b(cm)	$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /seg)	$I_L$ (dinas/seg)
1	1.0	5	22500	$171 \times 10^5$
2	.43	5	9675	$73 \times 10^5$

Tabla 6. Comparación de los valores del transporte litoral obtenidos por otros investigadores utilizando el método de trazadores fluorescentes.

ESTIMACIONES REALIZADAS POR KOMAR E INMAN (31)				
Ubicación	Fecha	Advección de arena. $V_L$ (cm/seg)	Espesor de la capa móvil. b(cm)	Cantidad de transporte en volumen $Q_L$ (cm <sup>3</sup> /seg)
El Moreno Beach	5 mayo 66	0.65	10.5	8380
El Moreno Beach	11 oct. 66	0.14	10.0	2560
El Moreno Beach	22 mayo 67	0.076	9.0	1450
El Moreno Beach	11 mayo 68	0.14	6.0	2060
Silver Strand Beach	22 nov. 67	0.55	6.0	30100
Silver Strand Beach	5 sep. 68	0.12	5.5	3760
ESTIMACIONES REALIZADAS POR MONTAÑO-LEY (35)				
Isla de la Piedra	15 jul. 81	0.18	6.0	4320
Isla de la Piedra	22 oct. 81	0.22	7.5	6600

presentados por Montaña-Ley (35). Posiblemente la diferencia se deba a las distintas condiciones de oleaje que predominaron cuando se realizaron las pruebas y a diferencias en la precisión de las mediciones.

Uno de los principales problemas encontrados en la aplicación del método de trazadores fluorescentes fue la medición del espesor de la capa móvil, b. debido a la dificultad de obtener suficiente número de núcleos y a la inhabilidad para determinar el grosor del movimiento en la zona de rompiente. En vista de esto se puede esperar que los valores calculados de la cantidad de transporte de arena tengan cierto grado de incertidumbre. Sin embargo los resultados obtenidos son comparables con los valores encontrados por otros investigadores (Tabla 6).

La Tabla 7 muestra una estimación del transporte litoral utilizando el modelo empírico aplicado por Komar e Inman (31) basado en características del oleaje en la zona de rompiente. Los métodos usados en este trabajo para determinar esas características fueron relativamente simples por lo cual los flujos de energía obtenidos se pueden considerar como estimaciones gruesas.

**Predicción del transporte en otras playas de la región.**

La Tabla 8 presenta un ejemplo de los parámetros empleados en la computación de los valores parciales del transporte litoral  $Q_L$  (transecto VI), utilizando el método predictivo basado en datos de oleaje de aguas profundas. Ilustrativamente se considera un período de 8.5 segs, para diferentes alturas y direcciones de oleaje.

Los resultados finales se presentan en la Tabla 9. Las direcciones y magnitudes del transporte litoral neto se esquematizan en la Figura 13. Las diferencias entre los valores calculados se debe principalmente a la variación en la orientación de la

Tabla 7. Estimación del transporte litoral con los parámetros de oleaje medidos en la zona de rompientes.

No. de ciclo durante la prueba	Raíz media cuadrada de altura de olas	Raíz media cuadrada del período de olas	Angulo medio entre la línea de rompiente y la costa $\alpha_b(^{\circ})$	Flujo de energía a lo largo de la costa	Cantidad de transporte en peso sumergido
17 Dic. 82	Hrms (cm)	Trms (seg)		$P_{\ell}$ (erg/cm/seg)	$I_{\ell} = k P_{\ell} \left( \frac{\text{dinas}}{\text{seg}} \right)$
1	73	9	5	$235 \times 10^5$	$180 \times 10^5$
2	58	9.5	4	$106 \times 10^5$	$81.6 \times 10^5$

Tabla 8. Parámetros utilizados en el cálculo de los valores parciales del transporte litoral  $Q_L$ .

Ho	T	$\alpha$	$\sigma$	f	$K_f$	C	$Q_L$
0.47	8.5	10		0.00109	.935	0.01271	0.00002
0.47	8.5	-80		0.00178	.935	0.01271	-0.00005
0.47	8.5	.35		0.00178	.935	0.01271	-0.00010
1.71	8.5	10		0.00294	.835	0.01271	-0.00063
1.71	8.5	-80		0.00767	.835	0.01271	-0.00227
1.71	8.5	-35		0.00548	.835	0.01271	-0.00341
1.71	8.5	55		0.00253	.835	0.01271	0.00172
3.31	8.5	10		0.00143	.725	0.01271	0.00094
3.31	8.5	-80		0.00452	.725	0.01271	-0.00408
3.31	8.5	-35		0.00246	.725	0.01271	-0.00470
3.31	8.5	55		0.00109	.725	0.01271	-0.00227
4.94	8.5	10		0.00027	.655	0.01271	0.00035
4.94	8.5	-80		0.00178	.655	0.01271	-0.00315
4.94	8.5	-35		0.00041	.655	0.01271	-0.00154
4.94	8.5	55		0.00027	.655	0.01271	0.00110
6.58	8.5	10		0.00070	.660	0.01271	0.00013
6.58	8.5	-80		0.00109	.550	0.01271	-0.00267
6.58	8.5	-35		0.00020	.560	0.01271	-0.00107
6.58	8.5	55		0.00020	.560	0.01271	0.00116
8.22	8.5	-80		0.00021	.510	0.01271	-0.00071
8.22	8.5	-35		0.00007	.510	0.01271	-0.00050
8.22	8.5	55		0.00013	.510	0.01271	0.00102
9.85	8.5	-80		0.00013	.466	0.01271	0.00058
11.49	8.5	10		0.00007	.427	0.01271	0.00027
11.49	8.5	-80		0.00007	.427	0.01271	0.00036
17.25	8.5	55		0.00007	.343	0.01271	0.00134

Tabla 9. Resultados finales del transporte litoral de arenas en los transectos seleccionados.

UBICACION TRANSPORTE LITORAL m <sup>3</sup> /año	TRANSECTO I Rfo Quellte	TRANSECTO II Sábalo-Cerri- tos	TRANSECTO III Isla de la Piedra	TRANSECTO IV Rfo Presidio	TRANSECTO V Huizache	TRANSECTO VI Caimanero	TRANSECTO VII Rfo Baluarte
Transporte litoral positivo + $Q_L$	273,000	270,000	285,000	251,000	265,000	250,000	234,000
Transporte litoral negativo - $Q_L$	231,000	382,000	239,000	233,000	230,000	429,000	614,000
Transporte litoral neto $Q_L$	42,000	112,000	46,000	18,000	35,000	179,000	380,000
Dirección del transporte neto	NORTE	SUR	NORTE	NORTE	NORTE	SUR	SUR

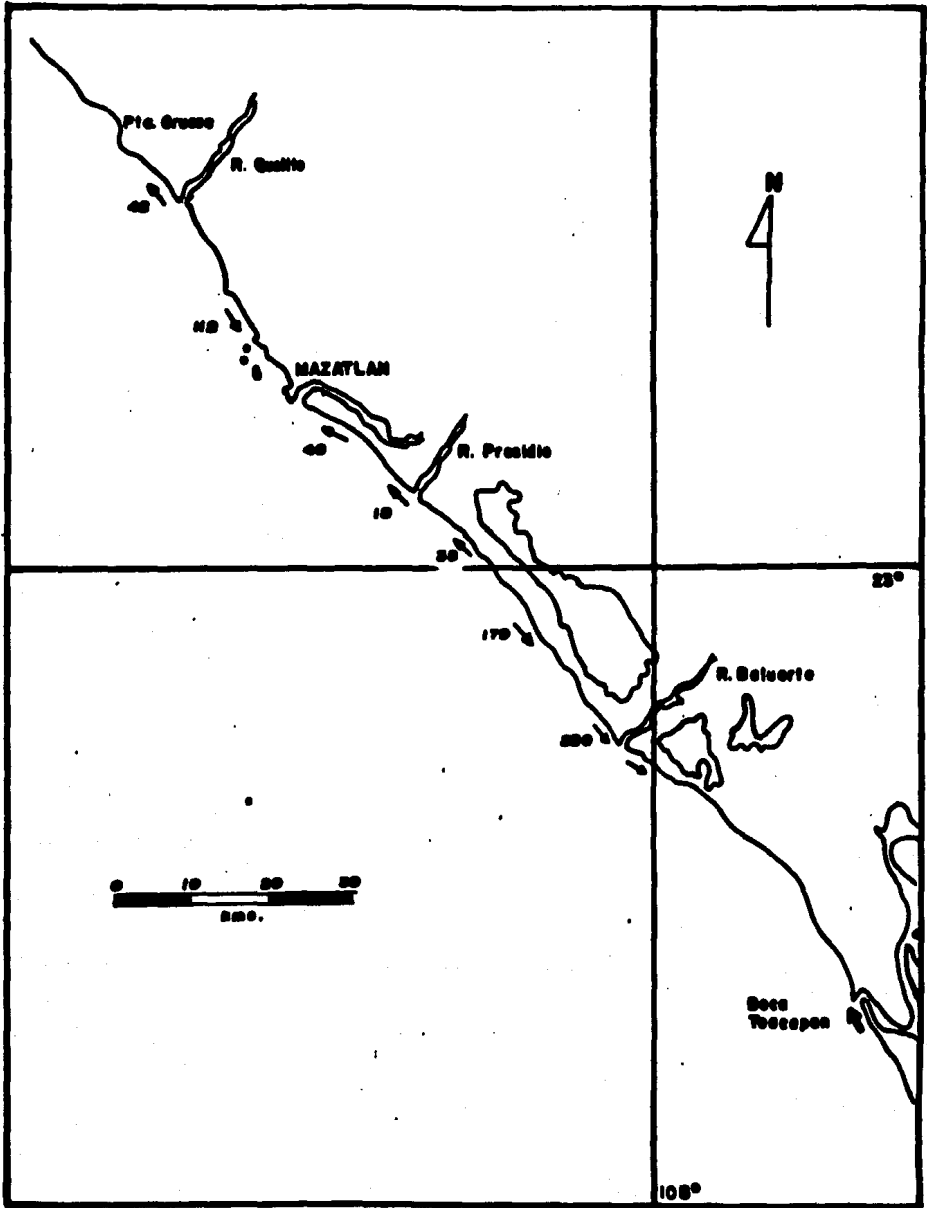


Fig. 13. Direcciones y magnitudes del transporte litoral neto (en miles de metros cúbicos por año) en playas de la costa sur de Sinaloa.

línea de costa (cuyo azimut fluctúa entre  $130^{\circ}$  y  $157^{\circ}$  en los transectos seleccionados) y a los cambios topográficos del fondo, lo cual determina los ángulos de incidencia del oleaje y los valores de los coeficientes de fricción respectivamente.

Los resultados obtenidos en este trabajo son comparables con los calculados en otras zonas, para períodos mayores de 10 años, por algunos investigadores e instituciones (Tabla 10). Johnson (28,29) recopiló estimaciones del transporte litoral neto en varias localidades. Estas evaluaciones se basaron en registros volumétricos periódicos de tiempo. La Tabla 10 presenta también comparaciones entre los resultados obtenidos, por Walton y Chiu (45) utilizando datos del SSMO y las estimaciones del "U.S. Army Corps of Engineers" (42), efectuadas por varios métodos, entre los cuales se incluyen: registros de dragado, estimaciones volumétricas y datos de plantas de bombeo.

Independientemente de la diferencia en la metodología aplicada para la evaluación del transporte litoral de arenas, por los investigadores mencionados, sus resultados son comparables entre sí, así como los obtenidos en este trabajo, lo cual afirma la confiabilidad del método utilizado.

La dirección del movimiento predominante de las arenas determinadas en este estudio coincide con las predicciones efectuadas con anterioridad para algunos lugares cercanos a los transectos seleccionados.

Freemont (18) basado en las observaciones de acumulación de arenas durante y posteriormente a la construcción del muro este que protege al puerto de Mazatlán del oleaje del sur, dedujo que los principales volúmenes de arena en esa zona se mueven hacia el norte. Esta deducción concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo (Figura 13).

Tabla 10. Comparación de los valores del transporte litoral neto calculado en diferentes áreas por otros investigadores.

Estimaciones recopiladas por Johnson (28,29).		
Ubicación	Transporte litoral neto en metros cúbicos/año.	Dirección
Santa Barbara, Calif.	214,000	ESTE
Camp. Pendleton, Calif.	76,000	SUR
Palm Beach, Fla.	144,000	SUR
Hillsboro Inlet, Fla.	57,000	SUR
Perdido Pass, Ala.	153,000	OESTE
Estimaciones efectuadas por el "U.S. Army Corps of Engineers" (42).		
Lake Worth Inlet, Fla.	176,000	SUR
Ft. Myers Beach, Fla.	170,000	NORTE
Gordon Pass, Fla.	50,000	SUR
Hillsboro Inlet, Fla.	92,000	SUR
Perdido Pass, Ala.	50,000	OESTE
Computaciones realizadas con datos del SSMO por Walton y Chiu (45).		
Lake Worth Inlet, Fla.	257,000	SUR
Ft. Myers Beach, Fla.	16,000	NORTE
Gordon Pass, Ala.	54,000	SUR
Hillsboro Inlet, Fla.	241,000	SUR
Perdido Pass, Ala.	210,000	OESTE



Sin embargo cabe señalar que aunque el transporte dominante calculado para períodos largos de tiempo es en esa zona hacia el norte, el movimiento de las arenas en dirección sur, también es de magnitud considerable tal como lo indican los resultados presentados en la Tabla 9.

La Compañía Oceanográfica, S.A. (12) estimó un transporte litoral neto anual hacia el sur, con una magnitud de  $115\ 500\ m^3/año$ . La dirección predominante del transporte coincide con la predicción efectuada en este trabajo para una playa cercana ubicada a 2 Km al norte de la desembocadura del Rfo Baluarte (Figura 13). Por otro lado la dirección sur del transporte neto de arena en esta zona puede ser deducida basándose en criterios tales como: la dirección de la barra arenosa y el sitio de la desembocadura del Rfo Baluarte (Figura 14).

Más hacia el sur de la costa de Nayarit y sur de Sinaloa, Curray et al (9) infieren que el transporte litoral neto de las arenas es actualmente hacia el norte. Esta deducción está basada en criterios geomorfológicos y meteorológicos tales como: la dirección de crecimiento de la barra arenosa de Teacapán y del sitio de erosión de la boca, así como en los regímenes actuales del oleaje y viento que afectan a la zona. Debido a la carencia de cartas batimétricas adecuadas no fue posible aplicar en esa zona el método predictivo.

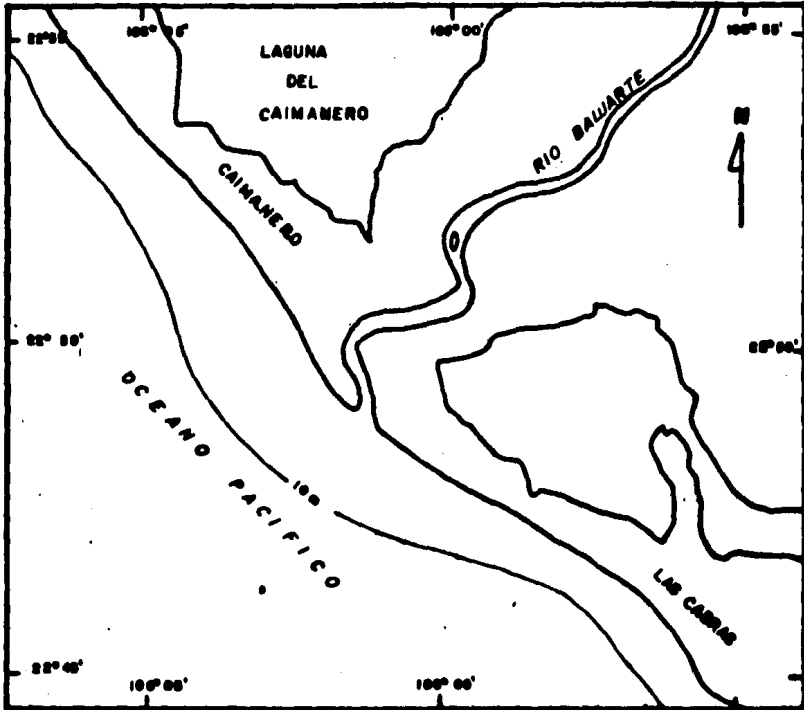


Fig. 14. Mapa de la desembocadura del Rfo Baluarte (10).

## CONCLUSIONES

El estudio de campo realizado en Isla de la Piedra reveló un transporte dominante en dirección sureste a lo largo de la costa conjuntamente con movimientos de arenas orientadas hacia la línea de playa y mar abierto. La cantidad de transporte en volumen fluctuó durante la prueba entre .01 y .02 m<sup>3</sup>/seg aproximadamente.

El transporte neto evaluado aplicando en método predictivo basado en datos de oleaje de aguas profundas, fue hacia el norte en los transectos I, III, IV y V con una magnitud que varió entre 18,000 a 42,000 m<sup>3</sup>/año aproximadamente. Mientras que en los transectos II, VI y VII fue hacia el sur con una magnitud que varió aproximadamente entre 112,000 a 380,000 m<sup>3</sup>/año.

Todos los transectos presentan intensos movimientos de arenas en ambas direcciones, reflejo de los cambios en el régimen de oleaje durante el año.

Las diferencias de los valores calculados del transporte litoral entre los transectos seleccionados se debe principalmente a la variación en la orientación de la línea de costa y a los cambios topográficos del fondo, lo cual determina los ángulos de incidencia del oleaje y los valores de los coeficientes de fricción respectivamente.

La comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con estudios previos reafirman la confiabilidad de los métodos utilizados en este trabajo. Sin embargo, debido a que el método de trazadores solo proporciona información instantánea del transporte y a que en nuestras costas no existen datos sistemáticos disponibles del oleaje de rompientes, el método predictivo basado en características de oleaje de aguas profundas, es hasta la fecha, el medio más idóneo para conocer en la región las características del transporte litoral durante periodos largos de tiempo.

## LITERATURA CITADA

1. Alvarez Manuel, Jr., 1961. Provincias Fisiográficas de la República Mexicana. Biol. Soc. Geol. Mexicana, 24 (2): 1-21.
2. Aubrey, D.G., D.L. Inman y C.E. Nordstrom, 1976. Beach profiles at Torrey Pines, California. Proc. 15th Int. Conference on Coastal Engineering, 2: 1297-1311.
3. Bagnold, R.A., 1963. Mechanics of marine sedimentation. In: Hill, M.N. (Ed.) The Sea. Interscience, New York. 3: 507-528.
4. Bretschneider, C.L. y R.O. Reid, 1954. Modification of wave energy by bottom friction, percolation, and refraction. Beach Erosion Board Tech. Mem. 45, Washington, D.C.: 1-36.
5. Caldwell, J.M., 1956. Wave action and movement near Anaheim Bay, California. Beach Erosion Board. Tech. Mem. 68, Washington, D.C.: 1-21.
6. Carrol, D., 1970. Clay Mineral: A guide to their X-ray identification. Geol. Soc. Am. Bull. Special paper 126.
7. Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación, 1970. Carta de Climas: Mazatlán 13Q-I. Secretaría de la Presidencia.
8. Crickmore, M.J. y G.H. Leon, 1962. The measurement of sand transport by means of radioactive tracers. Proc. Royal Soc., Ser. A, 266: 402-421.
9. Curray, J.R., F.J. Emmel y P.J. Crampton, 1969. Holocene History of a Strand Plain Lagoonal Coast Nayarit, Mexico. In: Ayala-Castañares, A. y F.B. Phleger (Ed.). Lagunas Costeras un Simposio, Mem. Simp. Intern. Lagunas Costeras, UNAM-UNESCO, Nov. 28-30, 1967. México, D.F.: 63-100.

10. Departamento de Cartografía Militar, 1958. Mazatlán 13Q-I. Comisión Intersecretarial Coordinadora del Levantamiento de la Carta Geográfica de la República Mexicana, D.C.M. México.
11. Departamento de Estudios y Laboratorio, 1965. Estudio en modelo reducido de la agitación en el antepuerto de Mazatlán, Sin., y las obras de defensa necesarias para el ataque del transbordador "La Paz". Dir. Gral. Obras Marítimas, Mem. 9. Secr. Marina: 1-72.
12. Departamento de Estudios y Laboratorio, 1974. Estudios de acarreo litorales frente a la Laguna de las Cabras, Escuinapa, Sinaloa. Dirección General de Obras Marítimas. Secretaría de Marina: 1-122.
13. Diebold, F.E., J. Lemish y C.L. Hiltrop, 1963. Determination of calcite, dolomite, quartz and clay content of carbonate rocks. Jour. Sediment. Petrol., 33 (1): 124-139.
14. Dirección General de Oceanografía, 1980. Carta Náutica S.M. 363. Rio Elota a Mazatlán Esc. 1:100 000. Secretaría de Marina.
15. Downing, J.P., 1977. Sediment Transport Measurement in the Nearshore Environment: a review of the state of the Art. In: Nearshore sediment transport study workshop on instrumentation for nearshore processes. June 16-17, 1977. La Jolla, California. Sea Grant Publication 62.
16. Emery, K.O., 1961. A simple method of measuring beach profiles. Limnol., Oceanog. 6: 99-93.
17. Folk, R.L., 1965. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill's books Co. Austin Texas: 1-151.

18. Freemont, E., 1935. Proceso experimental seguido en la ejecución de la obra del Puerto de Mazatlán. VI Congreso Científico Americano, México, D.F.: 1-14.
19. Galvin, C.J., 1967. Longshore current velocity: a review of theory and data. Reviews of Geophysics, 5(3): 287-303.
20. Galvin, C.J. Jr. and P. Vitale, 1976. Longshore transport prediction-SPM 1973 revision. 15th Int. Conf. on Coastal Eng., Amer. Soc. Civil Eng.: 133-35. (Abstracts Volume).
21. García, E., 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Inst. Geogr., Univ. Nal. Autón. México: 1-246.
22. García Krasovsky, R., 1973. Determinación del acarreo litoral por medio de trazadores fluorescentes en la Laguna de Agua Brava, May., Tesis, Univ. Autón. Baja Calif. Ensenada, B.C.: 1-115.
23. Ingle, J.C. Jr., 1966. The movement of beach sand. Development in sedimentology 5, Elsevier Publ. Co., New York: 1-221.
24. Inman, D.L. y R.A. Bagnold, 1963. Littoral processes. In: Hill, M.N. (Ed.). The Sea. Interscience, New York. 3: 529-533.
25. Inman, D.L. y Franschy, J.D., 1965. Littoral processes and development of shorelines. Proc. 10th Conf. Coastal Eng., Am. Soc. Civil Eng., Santa Barbara, Calif.: 511-536.
26. Inman, D.L., P.D. Komar y A.J. Bowen, 1968. Longshore transport of sand. Proc. 11th Conf. Coastal Eng., Am. Soc. Civil. Eng., 1: 298-306.

27. Instituto de Geofísica, 1982. Tablas de Predicción de Mareas: Puertos de Océano Pacífico. Univ. Nal. Autón. México.
28. Johnson, J.W., 1956. Dynamics of nearshore sediment movement. Bull. Am. Soc. Petrol. Geolog., 40(9): 2211-32.
29. \_\_\_\_\_, 1957. The littoral drift problem at shoreline harbors. J. Waterways and Harbors Div., Am. Soc. Civil Eng., 83, WW1, paper 1211: 1-37.
30. Komar, P.D., 1976. Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs Nueva Jersey: 1-430.
31. Komar, P.D. y D.L. Inman, 1970. Longshore sand transport on beaches. Jour. Geophys. Res., 75 (30): 5914-27.
32. Lankford, R.R., 1977. Coastal Lagoons of Mexico: their origin and clasification. In: Wiley. M. (Ed.) Estuarine processes, circulation, sediment and transfer of materials in the estuary. Academic Press Inc. New York, 2: 182-215.
33. Lemehaute, B. y R.C.Y. Koh, 1967. On the breaking of waves arriving at an angle to the shore. Jour. Hydraulic. Res. 5 (1): 67-88.
34. Longuet-Higgins, H.S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, parts 1 y 2. Jour. Geophys. Res., 75(33): 6778-6801.
35. Montaña-Ley, Y., 1984. Estudio del transporte litoral de arenas en Isla de la Piedra, Mazatlán, Sin., usando trazadores fluorescentes. An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Autón. México (En prensa).

36. Montaño-Ley, Y. y R. Peraza-Vizcarra, 1984. Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa sur de Sinaloa. An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Autón. México (En prensa).
37. Peraza-Vizcarra, R., 1983. Reporte de un estudio del transporte litoral de arenas en una playa de la Isla de la Piedra, Mazatlán, Sin., Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Autón. México. Problema de investigación. Inédito.
38. Phleger, F.B. y Ayala-Castañares, A., 1972. Ecology and development of two coastal lagoons in Northwest Mexico. An. Inst. Biol., 43, Ser. Cienc. Mar. y Limnol., Univ. Nal. Autón. México., 1: 1-20.
39. Savage, R.P., 1959. Laboratory study of the effect of grains on the rate of littoral transport: Equipment development and initial tests. Beach Erosion Board Tech. Mem. 114, Washington, D.C.
40. Thornton, E.B., 1970. Variations of longshore current across the surf zone. Proc. 12th Conf. Coast. Eng., Am. Soc. Civil Eng., 1, Washington, D.C.
41. U.S. Army Corps of Engineers, 1966. Shore Protections, Planning and Design. Technical Report Number 4, Washington, D.C. 1966.
42. U.S. Army Corps of Engineers, 1975. Shore Protection Manual. Washington, D.C.
43. U.S. Naval Weather Service Command, 1981. Summary of Synoptic Meteorological Observations for Central American Coastal marine areas. 1, Asheville, N.C.



44. Walton, T.L., 1972. Littoral drift computations along the coast of Florida by use of ship wave observations. Thesis (MS), Univ. Florida, (Inédita).
45. Walton, T.L. y T.Y. Chiu, 1979. Littoral sand transport on Beaches. Coastal and Oceanographic Engineering Department. Univ. Florida. Gainesville, Fla.: 1-135.
46. Walton, T.L. y R.G. Dean., 1973. Application of littoral drift roses to coastal engineering problems. Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics in the Coastal Zone.
47. Watts, G.M., 1953. A study of sand movement at Lake Worth Inlet, Florida. Beach Erosion Board Tech. Mem. No. 42, Washington, D.C. : 1-24.
48. Winant, C.D. y D.G. Aubrey, 1976. Stability and Impulse Response of Empirical Eigenfunctions. Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng., Amer. Soc. Civil Eng.
49. Winant, C.D., D.L. Inman y C.E. Nordstrom, 1975. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. Jour. Geophys. Res., 80 (15): 1979-86.

**A P E N D I C E**

## Modelos Predictivos

La mayoría de los modelos utilizados para evaluar el transporte litoral de arenas a lo largo de la costa, están basados en los parámetros de oleaje como fuerzas generadoras del transporte, por lo que es importante notar que en estos modelos no debe de haber transporte de arenas si no se presenta la acción del oleaje para agitar los sedimentos del fondo y generar la corriente litoral (45). Básicamente son dos de los conceptos o modelos que han sido propuestos para explicar los mecanismos del transporte litoral de arenas (31). El primero es esencialmente intuitivo y consiste en correlacionar la cantidad del transporte de arena a la componente longitudinal del flujo de energía de las olas ( $P_L$ ) por unidad de longitud de playa.

$$P_L = (E C g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (A-1)$$

$(E C g)_b$  = Flujo de energía de las olas evaluada en la zona de rompientes

$E$  = Densidad de la energía del oleaje

$Cg$  = Velocidad de grupo de las olas

$\alpha_b$  = Angulo de la rompiente

$P_L$  = Componente longitudinal del flujo de energía del oleaje o parámetro  $P_L$ .

Los primeros intentos enfocados a demostrar las relaciones empíricas entre de  $P_L$  y la cantidad volumétrica de arena transportada a lo largo de la costa  $Q_L$  fueron hechos por Watts (47), Cadwell (5) y Savage (39), quienes utilizaron una ecuación de la forma:

$$Q_L = \text{constante } P_L^n \quad (A-2)$$

Cadwell (5) fue el primer investigador que encontró una expresión basada en datos de campo con un exponente  $n=0.8$ . Otros investigadores utilizando diferentes datos, efectuaron intentos por separado para refinar esta ecuación con varios valores de

la constante y del exponente n. El CERC (Coastal Engineering Research Center) revisó la fórmula con un exponente  $n = 1.0$  lo cual se conoce como la ecuación estandar del transporte litoral de arenas y es usada por el cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (42). La constante de la ecuación es dimensional.

$$Q_L = K P_L \quad (A-3)$$

La computación del parámetro  $P_L$  también se ha efectuado utilizando datos estadísticos de oleaje de aguas profundas obtenidas de observaciones meteorológicas y del estado de mar realizadas desde embarcaciones. Este tipo de metodología ha sido discutida en detalle por Walton (44), Walton y Dean (46) y Walton y Chiu (45).

Una modificación de la ecuación A-3 fue hecha primeramente por Inman y Bagnold (24), quienes señalaron que la cantidad del transporte de sedimentos, debería de ser expresada como una cantidad de transporte en peso sumergido  $I_L$ , en lugar de transporte en volumen  $Q_L$ .

$$I_L = (\rho_s - \rho) g a' Q_L \quad (A-4)$$

$\rho_s$  = Densidad de la arena

$\rho$  = Densidad del agua

$a'$  = Factor de correlación por el espacio poroso y puede ser tomado como 0.6 para la mayoría de los depósitos de playa.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

Esta modificación toma en cuenta los efectos que causan sobre el transporte la densidad de los granos y la porosidad del material sedimentario, por otra parte este modelo permite que  $I_L$  y  $P_L$  se relacionen, ya que tienen las mismas unidades y transforma la constante (K) en adimensional.

$$I_{\ell} = K P_{\ell} = K (E Cg)_b \sin \alpha_b \cos \beta_b \quad (\text{A-5})$$

Una gráfica sobre la ecuación similar a la anterior, prevista de considerables datos de campo y laboratorio fue presentada por Komar e Inman (31), quienes efectuaron estudios en dos playas de diferente ambiente físico con el propósito de obtener mediciones directas del transporte litoral durante pequeños períodos de tiempo y simultáneamente medir las olas y corrientes para probar las relaciones entre la cantidad del transporte de arena y el flujo de energía del oleaje. La gráfica que presenta de  $I_{\ell}$  contra  $P_{\ell}$  se reproduce en la Figura 15. La línea recta ajustada con los valores de campo indican un coeficiente  $K = 0.77$ . Otros investigadores han encontrado valores diferentes para el coeficiente adimensional ( $K$ ):

0.2 (39); 0.25 (25); 0.4 (41); 0.8 (42).

Las correlaciones anteriores entre la cantidad del transporte de arena y el parámetro  $P_{\ell}$ , son las de mayor uso en la actualidad para la predicción del transporte litoral, sin embargo son básicamente empíricas y su formulación no incluye consideraciones reales del transporte mecánico de arena (31). Bagnold (3) propone un modelo basado en las siguientes consideraciones: Bajo la influencia del movimiento orbital de las olas, el sedimento se mueve hacia atrás y hacia adelante pero sin que se produzca transporte neto, aún cuando la energía de la ola se consume (Figura 16). Este gasto de energía soporta o suspende la arena arriba del fondo sin que se requiera de alguna otra fuerza adicional. Inman y Bagnold (24) al aplicar este concepto a la zona litoral asumen que una porción del flujo de energía del oleaje  $(E Cg)_b \cos \alpha_b$  se disipa al ponerse la arena en movimiento por lo que la fuerza media aplicada al lecho de la playa es proporcional a  $(E Cg)_b \cos \alpha_b / U_o$ , donde  $U_o$  es la velocidad del movimiento de la ola con relación al lecho de la zona de rompientes, asumiendo que es proporcional a la velocidad orbital del fondo,

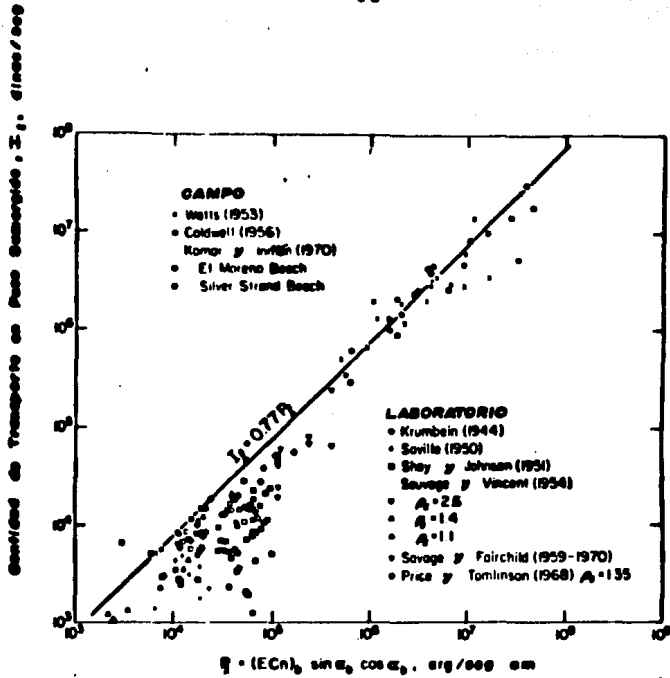


Fig. 15. Relación entre la cantidad de transporte en peso sumergido y la componente longitudinal del flujo de energía del oleaje por unidad de longitud de playa (31).

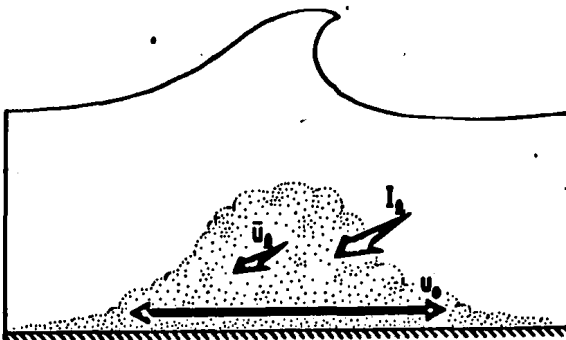


Fig. 16. Esquema de el modelo para el transporte de arena en el cual la velocidad orbital  $U_0$  debido a las olas pone a la arena en movimiento y la corriente  $U_1$  produce un transporte neto de arena,  $I_s$  (30).

justo antes de que las olas rompan. Una vez que el sedimento está en movimiento, la presencia de cualquier corriente unidireccional  $\bar{U}_L$  deberá producir un transporte neto de arena, por lo que la cantidad total de sedimento transportado como peso sumergido, por unidad de tiempo en una sección de playa es:

$$I_L = K' (E Cg)_b \cos \alpha_b \bar{U}_L / U_o \quad (A-6)$$

donde  $K'$  es un factor adimensional de proporcionalidad. El origen de la corriente litoral  $\bar{U}_L$  no se especifica en la derivación de la ecuación anterior. Puede ser una corriente de marea, una corriente local generada por el viento o una corriente longitudinal asociada con la circulación celular (Komar e Inman, 31).

Una revisión detallada de las ecuaciones que se emplean para predecir la velocidad de la corriente litoral es dada por Galvin (19) y Thorton (40).

Otros investigadores han postulado diversas ecuaciones para la evaluación del transporte litoral tomando en cuenta otras variables aparte de la energía de la ola, tales como: La pendiente de la playa, la temperatura del agua, el uso de algunas otras propiedades concernientes a las características del sedimento no contempladas en la ecuación A-4, el empleo de coeficientes de fricción de fondo, así como la utilización de otras suposiciones teóricas referentes al enfoque del modelo y al tipo de transporte. Walton y Chiu (45) presentan una revisión detallada de los estudios de laboratorio y de campo que se han realizado tendientes a determinar los mecanismos que causan el transporte de arena y las formulaciones y pruebas de los principales modelos de transporte. Los autores citados consideran que todos los modelos que existen en la literatura para predecir el transporte litoral de arenas solo proporcionan un "orden de magnitud" del mismo.