

## CANTIDAD DE SEDIMENTO DRENADO HACIA LA COSTA DEL PACIFICO EN EL NOROESTE DE BAJA CALIFORNIA, MEXICO

## AMOUNT OF SEDIMENT DRAINED INTO THE PACIFIC COAST IN NORTHWESTERN BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Sergio Pou-Alberú<sup>1</sup>  
Guillermo Pozos-Salazar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas  
Universidad Autónoma de Baja California  
Apartado Postal 453  
Ensenada, Baja California, México

<sup>2</sup> Avenida 20 de Noviembre 1492  
Tuxtepec, Oaxaca, México

*Recibido en julio de 1991; aceptado en octubre de 1991*

### RESUMEN

Mediante métodos indirectos se estimó la cantidad de sedimento susceptible de ser drenado hacia el Pacífico por el sistema orográfico del norte de Baja California. Se empleó la expresión de Langbein y Schumm (1958) para relacionar la acción erosiva de la lluvia y la acción protectora de la vegetación. Se empleó la estadística de precipitación pluvial de 21 estaciones de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos para los años de 1950 a 1983. Asimismo, se trabajó con la topografía de 44 cartas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), correspondientes a la zona norte de Baja California, digitizados en una computadora PRIME 750 y manejados con un programa (TOPOGRAFIC) desarrollado en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) con la colaboración del segundo autor. Se identifican como aportadores potenciales máximos de sedimento las cuencas de los ríos Tijuana ( $S = 809649.88$  ton/año) y Guadalupe ( $S = 834889.13$  ton/año). Los valores de sedimento aportado no son los máximos de acuerdo al modelo. Podemos esperar mayores aportes con mayor precipitación pluvial, por lo que clasificamos la zona como de alto riesgo geológico.

### ABSTRACT

The amount of sediment drained into the Pacific coast due to the orographic system of northern Baja California was estimated by indirect methods. Langbein and Schumm's (1958) equation was used to relate the erosive action of the rain and the protective action of the vegetation. Statistics on pluvial precipitation for 1950 to 1983 of 21 stations of the Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos were used. Furthermore, topographical data of 44 charts of the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), corresponding to the northern area of Baja California, were digitized on a PRIME 750 computer and processed with a program (TOPOGRAFIC) developed at the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Two drainage basins were identified as maximum potential sources of sediment: the Tijuana River basin ( $S = 809649.88$  tons/year) and the Guadalupe River basin ( $S = 834889.13$  tons/year). According to the model, these are not maximum values. Higher values can be expected with greater rainfall and we therefore consider this area to be one of high geological risk.

## INTRODUCCION

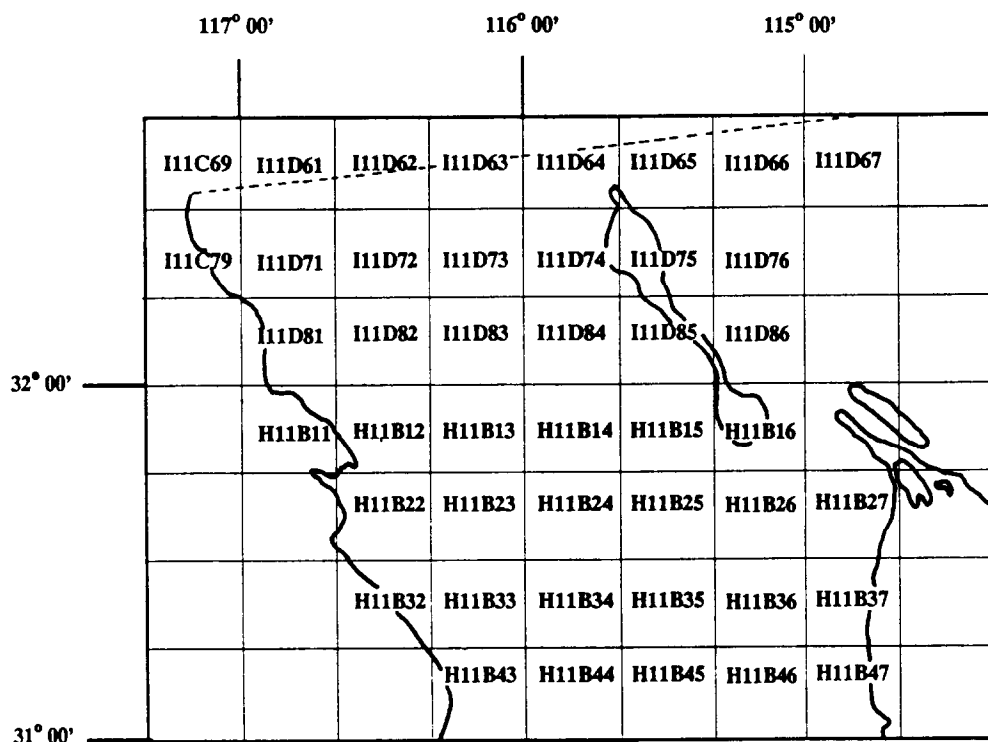
La cantidad de sedimento que aportan los ríos al océano puede medirse directamente aplicando distintas técnicas (Holeman, 1968; Rodolfo, 1970) o bien estimarse indirectamente a partir de la razón de erosión de los continentes (Langbein y Schumm, 1958; Fournier, 1960). Los resultados obtenidos al estimar la erosión suelen ser mayores que los que se obtienen al medir la carga directamente, debido a que al evaluar la razón de erosión del continente, implícitamente se considera una gran cantidad de sedimento que queda atrapado en la cuenca y que probablemente jamás llegue a las costas (Milliman y Meade, 1983). Sin embargo, la evaluación indirecta del material susceptible de ser drenado hacia el océano mediante el sistema orográfico de una región, permite determinar las localidades de la línea de costa que están más expuestas a recibir un aporte sedimentario del continente. No existen trabajos de esta naturaleza en Baja California. En la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el segundo autor colaboró en el desarrollo de un programa (TOPOGRAFIC) para manejar una base de archivos topográficos generada a partir de 44 cartas del INEGI correspondientes a la zona de estudio (Fig. 1) (Pozos, 1985). Se utilizó estadística de precipitación pluvial para el período 1950-1983 de las estaciones 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 21 y de la 25 a la 32 de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y cartas del tipo de vegetación del estado de Baja California de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1973), además de un mapa geológico de la zona (Gastil *et al.*, 1971).

El área de estudio se encuentra localizada entre los 31° N y 33° N y los 115°30' W y 117°28' W (Fig. 2). La vertiente occidental de la península de Baja California presenta un tramo inicial de fuerte pendiente ( $p > 30\%$ ) y posteriormente un trayecto largo de pendiente media ( $p < 10\%$ ) que remata en la costa en forma de playas o pequeños acantilados. La topografía de la costa es muy similar a la del sur del estado de California (EUA) y ha sido descrita por Emery (1960). El clima es cálido y seco, con lluvias irregulares. De acuerdo con el sistema de clasificación de Kippen (Marham, 1972), esta zona se cataloga como árida (BW)

## INTRODUCTION

The amount of sediment delivered to the ocean by rivers can be measured directly by applying different techniques (Holeman, 1968; Rodolfo, 1970) or indirectly from the rate of erosion of the continents (Langbein and Schumm, 1958; Fournier, 1960). The results obtained by estimating erosion are usually higher than those obtained by measuring the load directly, because on evaluating the rate of erosion of the continent a great amount of sediment that is trapped in the basin and probably never reaches the coasts is considered (Milliman and Meade, 1983). However, through the indirect evaluation of the material that may be drained into the ocean due to the orographic system of the region, the sites on the coast that are most likely to receive sediment from the continent can be determined. There are no such studies in Baja California. At the Earth Sciences Division of the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), the second author helped to develop a computer program (TOPOGRAFIC), to manage topographic data obtained from 44 INEGI charts of the study area (Fig. 1) (Pozos, 1985). Pluvial precipitation data for the period 1950-1983 of stations 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 21 and 25 to 32, and vegetation charts for the state of Baja California of the Secretaría de Recursos Hidráulicos (1973) were used, as well as a geologic map of the area (Gastil *et al.*, 1971).

The study area is located between 31° N and 33° N and 115°30' W and 117°28' W (Fig. 2). The west slope of the Baja California peninsula is at first steep ( $p > 30\%$ ) and then slight ( $p < 10\%$ ), ending on the coast in the form of beaches or small cliffs. The topography of the coast is similar to that of southern California (USA) and has been described by Emery (1960). The weather is dry and hot, with irregular rainfall. According to Kippen's classification (Marham, 1972), this area is classified as arid (BW) or semi-arid (BS). Most of the rain during the year falls on the mountain range, that determines the areas of precipitation (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1971). The vegetation mainly consists of woods, scrub, grasses and associations of halophytes (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973). There are 13 main rivers or streams in the area, which are, from north to



**Figura 1.** Plano del noroeste de Baja California que muestra las cartas del INEGI digitizadas en la base de archivos topográficos utilizados en el estudio.

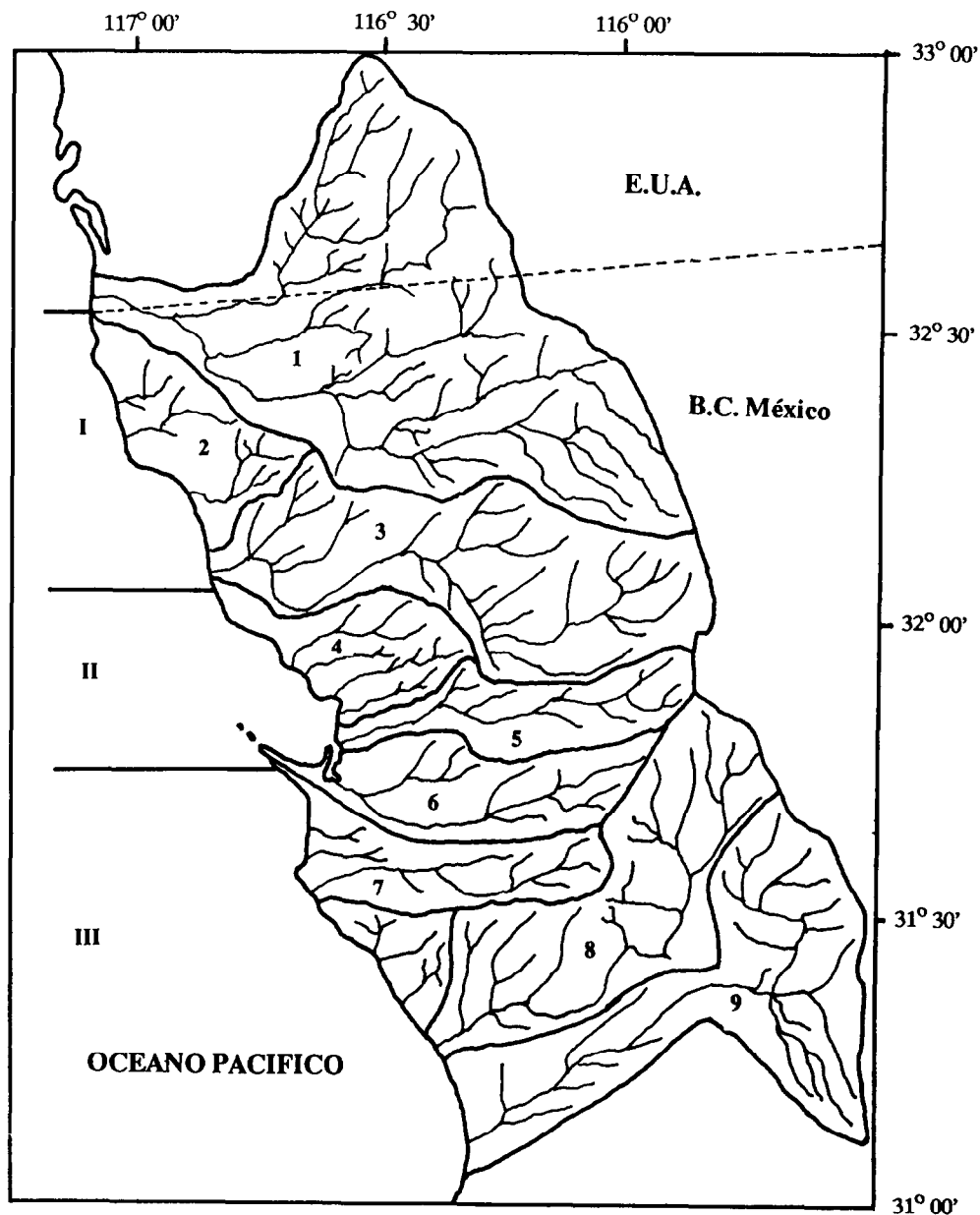
**Figure 1.** Map of northwestern Baja California as shown by the INEGI charts digitized in the topographic data base used in the study.

o semi-árida (BS). La mayoría de las lluvias en el año suceden sobre la cadena montañosa, que es la que determina las zonas de precipitación (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1971). La vegetación está formada por bosque, matorral, pastos y asociaciones de halófitas (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973). Existen 13 ríos o arroyos principales en el área de estudio, que son, de norte a sur: Río Tijuana, Río Guagatay, Río Descanso, Río Guadalupe, Arroyo San Miguel, Arroyo Sauzal, Arroyo Ensenada, Arroyo El Gallo, Arroyo San Carlos, Arroyo Las Animas, Río Santo Tomás, Río San Isidro y Arroyo El Salado (Fig. 2).

Las cantidades de sedimento reportadas para las distintas cuencas de drenaje no deben interpretarse como cantidades de sedimento que aportan las cuencas directamente al

south: Tijuana River, Guagatay River, Descanso River, Guadalupe River, Arroyo San Miguel, Arroyo Sauzal, Arroyo Ensenada, Arroyo El Gallo, Arroyo San Carlos, Arroyo Las Animas, Santo Tomás River, San Isidro River and Arroyo El Salado (Fig. 2).

The amount of sediment reported for the different drainage basins should not be interpreted as the amount of sediment directly supplied by the basins to the ocean, because in many regions the rate of erosion of the continents due to surface run-off is much higher than the real loads of the rivers. For example, in the United States only 0.4 tons/year of sediment reach the ocean of the  $5 \times 10^9$  tons/year of sediment eroded, which is only 8% (Milliman and Meade, 1983). Theoretical results are presented in this study according to the model used. Knowledge of the



**Figura 2.** Localización de la zona de estudio: (1) Río Tijuana; (2) ríos Guagatay y Descanso; (3) Río Guadalupe; (4) San Miguel, El Sauzal, Ensenada, El Gallo; (5) Arroyo San Carlos; (6) Arroyo Las Animas; (7) Río Santo Tomás; (8) Río San Isidro y (9) Arroyo Salado.

**Figure 2.** Location of the study area: (1) Tijuana River; (2) Guagatay and Descanso rivers; (3) Guadalupe River; (4) San Miguel, El Sauzal, Ensenada, El Gallo; (5) Arroyo San Carlos; (6) Arroyo Las Animas; (7) Santo Tomás River; (8) San Isidro River; (9) Arroyo Salado.

océano, dado que en muchas regiones se observa que la razón de erosión de los continentes debido a escurrimientos superficiales es mucho mayor que las cargas reales de los ríos. Por ejemplo, en Estados Unidos sólo  $0.4 \times 10^9$  ton/año de sedimento llegan al océano como producto de las  $5 \times 10^9$  ton/año de sedimento que se erosionan del suelo, lo cual sólo representa 8% (Milliman y Meade, 1983). En este trabajo se presentan resultados teóricos según el modelo empleado. Sin embargo, el conocimiento de las regiones de mayor aporte sedimentario potencial a la costa es de importancia para la planificación de obras portuarias o desarrollos turísticos y en general, para cualquier actividad relacionada con la ingeniería costera.

### MATERIALES Y METODOS

En función del tipo de datos disponibles, se empleó la ecuación de Langbein y Schumm (1958) que relaciona la variación climática con el aporte sedimentario y considera paralelamente el efecto erosivo de la lluvia con la acción protectora de la vegetación:

$$S = \alpha P^m \frac{1}{(1 + bP^n)}$$

en donde  $S$  es la carga anual en toneladas por kilómetro cuadrado,  $P$  es la precipitación anual media efectiva (milímetros),  $m$  y  $n$  son exponentes y  $a$  y  $b$  son coeficientes.

Los siguientes factores describen:

$$\alpha P^m$$

acción erosiva de la lluvia en ausencia de vegetación, y

$$\frac{1}{(1 + bP^n)}$$

acción protectora de la vegetación.

Los valores constantes se han obtenido a partir de depósitos sedimentarios conocidos (Milliman y Meade, 1983). Para el caso particular de nuestra área de estudio, esta expresión queda de la forma:

regions that are potential sources of sediment to the coast is of importance in developing ports and tourism and, in general, to any activity related to coastal engineering.

### MATERIALS AND METHODS

In terms of the available data, Langbein and Schumm's (1958) equation was used, that correlates the climatic variation with the sediment yield and at the same time considers the erosive effect of the rain with the protective action of the vegetation:

$$S = \alpha P^m \frac{1}{(1 + bP^n)}$$

where  $S$  is the annual load in tons per square kilometer,  $P$  is the effective mean annual precipitation (millimeters),  $m$  and  $n$  are exponents and  $a$  and  $b$  are coefficients.

The following factors describe:

$$\alpha P^m$$

erosive action of the rain in the absence of vegetation, and

$$\frac{1}{(1 + bP^n)}$$

protective action of the vegetation.

The constant values have been obtained from known sedimentary deposits (Milliman and Meade, 1983). For our study area in particular, the equation is as follows:

$$S = \frac{(41.14 \times 10^{(-4)} P^{(2.3)})}{(1 + 1.47 \times 10^{(-8)} P^{(3.33)})}$$

The derivative of this equation was calculated to determine the value of  $P$  so that  $S' = 0$ , and to determine the maximum value of the curve.

It is of interest to know the amount of rainwater that manages to stay on the surface long enough to flow, since this is the water that really transports the sediment. The term

$$S = \frac{(41.14 \times 10^{(-4)} P^{(2.3)})}{(1 + 1.47 \times 10^{(-8)} P^{(3.33)})}$$

Posteriormente se calculó la derivada de esta ecuación para evaluar el valor de  $P$  tal que  $S' = 0$ , y conocer el valor máximo de la curva.

Es de interés conocer la cantidad de agua precipitada que logra permanecer sobre el suelo el tiempo suficiente para fluir, ya que es ésta la que realmente se encarga de transportar el sedimento. Se introduce el término de precipitación anual media efectiva (PAME), entendiéndose éste como la cantidad de precipitación requerida para producir una cantidad conocida de escurrimiento considerando las características del terreno. Para calcular la precipitación anual media efectiva (PAME), es necesario conocer el valor de la precipitación media en la cuenca, el área de la misma y su coeficiente de escurrimiento mediante la siguiente relación (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977):

$$E_m = ACP_m$$

en donde  $E_m$  es el volumen medio de flujo (miles de metros cúbicos),  $A$  es el área de la cuenca (kilómetros cuadrados),  $C$  es el coeficiente de escurrimiento (de 0.1 a 1.0) y  $P_m$  es la precipitación anual media de la cuenca.

El valor del coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) se estimó a partir de tablas (Tabla 1) de acuerdo con las características de la cuenca y el uso del suelo (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977). Cuando la cuenca de drenaje tuvo diferentes tipos de vegetación, el coeficiente de escurrimiento se definió para cada área parcial y posteriormente se calculó el promedio ponderado. La información referente a la cobertura vegetal del área de estudio se tomó de las cartas de tipo de vegetación del estado de Baja California (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973).

La precipitación efectiva es una forma de expresar la cantidad de agua de lluvia que logra escurrir en una cuenca y es calculada a partir del escurrimiento de la siguiente forma. Para calcular el escurrimiento medio o volumen en la cuenca es necesario conocer el valor

effective mean annual precipitation (EMAP) is introduced, which is the amount of precipitation required to produce a known amount of run-off considering the characteristics of the terrain. To calculate EMAP it is necessary to know the value of mean precipitation in the basin, its area and its run-off coefficient by means of the following relation (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977):

$$E_m = ACP_m$$

where  $E_m$  is the mean volume of flow (thousands of cubic meters),  $A$  is the area of the basin (square kilometers),  $C$  is the run-off coefficient (from 0.1 to 1.0), and  $P_m$  is the mean annual precipitation of the basin.

The value of the run-off coefficient ( $C$ ) was estimated from tables (Table 1) according to the characteristics of the basin and use of the soil (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977). When the drainage basin had different kinds of vegetation, the run-off coefficient was defined for each partial area and then the weighted average was calculated. The information regarding the vegetation coverage in the study area was taken from the maps of the different types of vegetation in Baja California (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973).

Effective precipitation is a way to express the amount of rainwater that runs off in a basin. To calculate the mean run-off or volume in the basin it is necessary to know the value of mean annual precipitation in the basin of interest, the area of the basin and its run-off coefficient by means of the relation:

$$E_m = ACP_m$$

where  $E_m$  is the mean volume of flow (thousands of cubic meters),  $A$  is the area of the basin (square kilometers),  $C$  is the run-off coefficient (from 0.1 to 1.0), and  $P_m$  is the mean annual precipitation of the basin (millimeters).

The run-off coefficient ( $C$ ) value is obtained from Table 2 according to the characteristics of the basin and the use of the soil. When the basin presented different kinds of vegetation, a  $C$  value was obtained for every partial area and then the weighted

**Tabla 1.** Valores de *C* para el cálculo del escurrimiento (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977).

**Table 1.** Values of *C* for the run-off calculation (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977).

Topografía Cobertura vegetal	Textura del suelo		
	Grueso	Medio	Fino
<b>Bosques:</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
<b>Pastizales:</b>			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Escarpado	0.22	0.42	0.60
<b>Terrenos de cultivo:</b>			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Escarpado	0.52	0.72	0.82

**Tabla 2.** Coeficiente de escurrimiento de las cuencas

**Table 2.** Run-off coefficient for the basins.

Cuenca	<i>C</i>	Cuenca	<i>C</i>
Cuenca del Río Tijuana	0.4423	Cuenca del Río Las Animas	0.4320
Cuenca del Río Guagatay	0.4200	Cuenca del Río Santo Tomás	0.4410
Cuenca del Río Guadalupe	0.4478	Cuenca del Río San Isidro	0.4200
Cuenca del Río Ensenada	0.4200	Cuenca del Río Salado	0.4559
Cuenca del Río San Carlos	0.4390		

de precipitación anual media de la cuenca de interés, el área de la cuenca y su coeficiente de escurrimiento mediante la relación:

$$E_m = ACP_m$$

en donde  $E_m$  es el volumen medio que puede escurrir (miles de metros cúbicos),  $A$  es el área

average was calculated. For example, for the basin of the Guadalupe River, a mean annual precipitation of 749.6 mm was calculated for 1983, the area of the basin is 2,484 km<sup>2</sup> and the calculated run-off coefficient is 0.4478, obtained as a weighted average because the upper part of the basin is covered by woods and the rest by shrubs and grasslands. The average runoff ( $E_m$ ) is:

de la cuenca (kilómetros cuadrados),  $C$  es el coeficiente de escurrimiento (de 0.1 a 1.0) y  $P_m$  es la precipitación anual media de la cuenca (milímetros).

El valor del coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) se obtiene de la Tabla 2 de acuerdo a las características de la cuenca y al uso del suelo. Cuando la cuenca presentó diferentes tipos de vegetación, se obtuvo un valor de  $C$  para cada área parcial y posteriormente se calculó el promedio ponderado. Por ejemplo, para la cuenca del Río Guadalupe para 1983, se calculó una precipitación anual media de 749.6 mm, el área de la cuenca es de 2,484 km<sup>2</sup> y el coeficiente de escurrimiento calculado es de 0.4478 que se obtuvo como un promedio ponderado ya que la parte alta de la cuenca está cubierta por vegetación tipo bosque y el resto por arbustos y pastizales. El escurrimiento medio ( $E_m$ ) es:

$$E_m = ACP_m = (2484)(0.4478)(749) = 833139.06 \times 10^3 m^3.$$

Si interpretamos que el volumen  $E_m$  está contenido en un cubo y que el área de su base es igual al área de la cuenca, entonces la altura del nivel del agua en el cubo será:

$$h = \frac{8.33139 \times 10^8 m^3}{(A)(B)}$$

$$h = \frac{8.33139 \times 10^8 m^3}{2.484 \times 10^9 m^2} = 0.33540 m = 335.6 mm.$$

El criterio básico que se sigue al hacer una medición de precipitación mediante el pluviómetro es que la medición expresada en milímetros es el espesor o altura de la capa de agua caída o lo que es equivalente, en litros de agua precipitados por metro cuadrado de superficie, por lo que la altura ( $h$ ) aquí calculada es equivalente a la precipitación anual media efectiva.

$$E_m = ACP_m = (2484)(0.4478)(749) = 833139.06 \times 10^3 m^3.$$

If we interpret that volume  $E_m$  is contained in a cube and that the area of its base is equal to the area of the basin, then the height of the water level in the cube will be:

$$h = \frac{8.33139 \times 10^8 m^3}{(A)(B)}$$

$$h = \frac{8.33139 \times 10^8 m^3}{2.484 \times 10^9 m^2} = 0.33540 m = 335.6 mm.$$

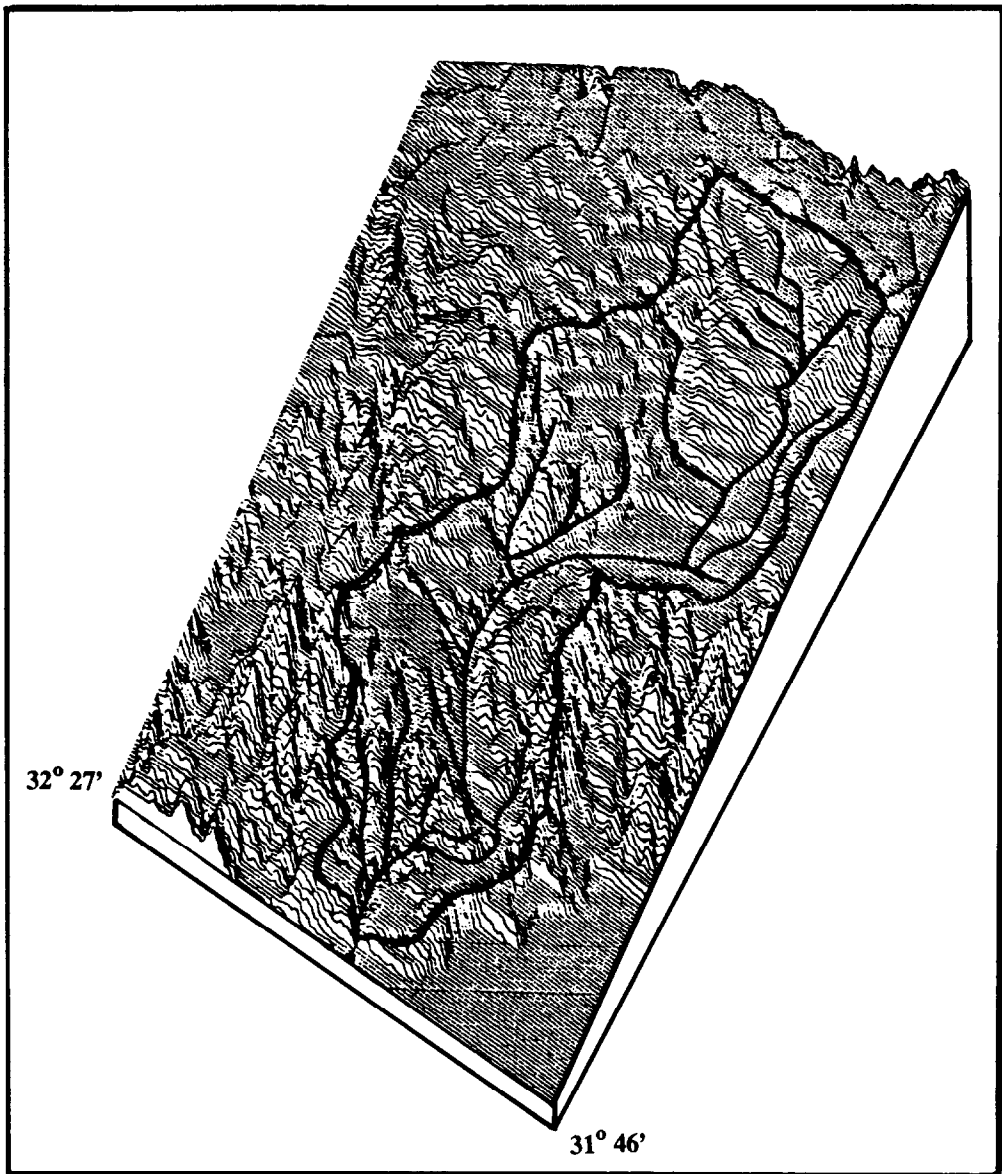
The basic criterion followed in order to measure precipitation using a pluviometer is that the measurement expressed in millimeters is the height of the water layer or the equivalent in liters of water precipitated per square meter of surface. Therefore, the height ( $h$ ) calculated is equivalent to the effective mean annual precipitation.

The run-off coefficient must be calculated as a weighted average due to the presence of different soil textures. However, this was not done due to the size of the study area and the impossibility of carrying out prospecting work. The value of the soil texture was considered as average for the whole study area.

Three-dimensional graphs of the digitized topography were done to identify and delimit the areas of the drainage basins, so that they would objectively show the relief of the terrain (Fig. 3). The contour of the basin was then delimited to calculate the area. For this, two-dimensional graphs were plotted and the points that defined the borders of the basin were read consecutively on the computer. The number of points depends on the irregularities of the borders of the basin.

To calculate the area within this contour we took the total area as the sum of the





**Figura 3.** Representación gráfica tridimensional de la cuenca del Río Guadalupe, para la delimitación del contorno.

**Figure 3.** Three-dimensional graphic representation of the Guadalupe River basin, for the delimitation of the contour.

Es importante señalar que al igual que en el caso en que existen diferentes tipos de coberturas vegetales en una cuenca, el coeficiente de escurrimiento se debe calcular como

areas with the highest number of possible triangles that were generated within the contour, if these triangles had a common point in the center of it. The number of triangles

un promedio ponderado debido a la existencia de diferentes texturas del suelo. Sin embargo, esto no se realizó dada la extensión del área de estudio y la imposibilidad de efectuar trabajo de prospección. Se consideró que el valor de la textura del suelo es media para toda la zona de estudio.

Para identificar y delimitar las áreas de las cuencas de drenaje se realizaron despliegues gráficos en tres dimensiones del material topográfico digitizado, de tal forma que mostraran objetivamente el relieve del terreno (Fig. 3). Posteriormente, se delimitó el contorno de la cuenca para calcular el área dentro de sus límites. Para ello se realizó el despliegue gráfico en dos dimensiones, y mediante los cursores de la terminal de la computadora, se efectuaron lecturas consecutivas de los puntos que definían las fronteras de la cuenca. El número de estos puntos está en función de la irregularidad de las fronteras de la misma cuenca.

Para calcular el área dentro de dicho contorno se tomó en cuenta que el área total es igual a la suma de las áreas del mayor número de triángulos posibles, generados dentro del contorno, si dichos triángulos tienen un punto común en el centro del mismo. El número de triángulos se incrementó hasta que el valor del área que se obtuvo fue constante. El área de los triángulos se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Semiperimetro} = S = \frac{(A + B + C)}{2}$$

$$\text{Area} = S(S - A)(S - B)(S - C)$$

en donde los valores  $A$ ,  $B$ ,  $C$  se determinaron mediante sustracción vectorial (Fig. 4).

El algoritmo calcula el área en términos de unidades cuentas cuadradas, que se traducen a kilómetros cuadrados mediante las consideraciones propias relacionadas con las escalas usadas.

## RESULTADOS Y DISCUSION

A pesar de que las cuencas de drenaje se encuentran contiguas, la precipitación anual media por cuenca no es igual en toda la zona, sino que se observan diferencias de hasta 120 mm. Los valores mayores de precipitación

increased until the value of the area obtained was constant. The area of the triangles was calculated as follows:

$$\text{Semiperimeter} = S = \frac{(A + B + C)}{2}$$

$$\text{Area} = S(S - A)(S - B)(S - C)$$

where the values of  $A$ ,  $B$ ,  $C$  were determined by means of vectorial subtraction (Fig. 4).

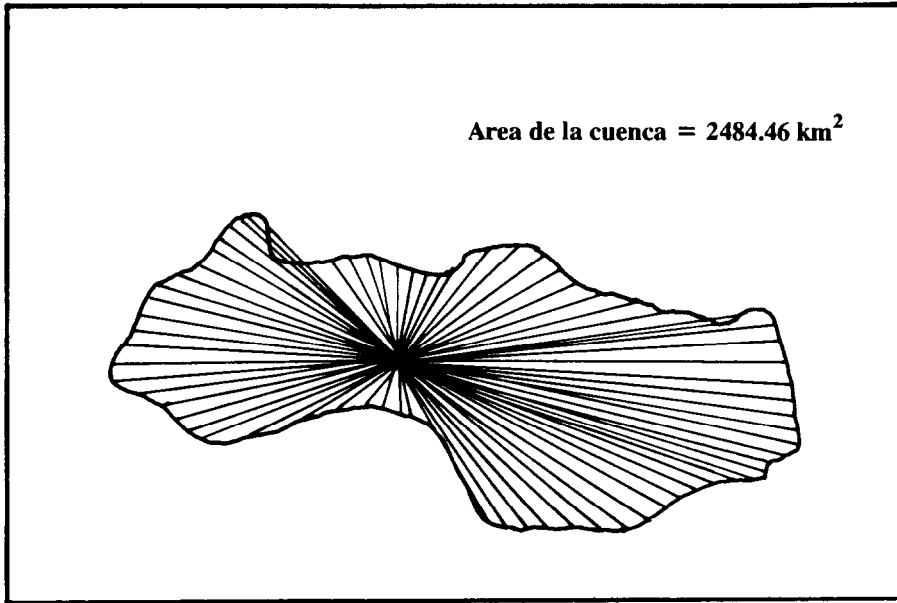
The algorithm calculates the area in terms of square units, which are expressed in square kilometers using proper considerations related to the scales used.

## RESULTS AND DISCUSSION

Even though the drainage basins are located adjacent to each other, the mean annual precipitation per basin is not the same. Differences of up to 120 mm are observed. The highest precipitation values corresponded to the basins of the Guadalupe and Tijuana rivers, probably because these basins extend to the high parts of the Sierra de Juárez, where precipitation is greater than in the rest of the area (Table 3).

The mean annual precipitation tended to increase in all the basins during the last few years of the period considered. When the derivative of the function of Langbein and Schumm (1958) was made, using the appropriate parameters for the study area, the critical EMAP (for which  $S' = 0$ ) was found to be 286.37 mm. This value was not reached during the years of the study period. That is, theoretically and according to the proposed model, higher amounts of drained matter than those obtained for 1978, 1980 and 1983 may be expected, because to obtain an EMAP value of 286.37 mm for this area a mean precipitation of approximately 600 mm is required and this has not yet happened. However, Schumm (1956) found that the maximum load of sediment in a current occurs when there is around 250 to 300 mm annual rainfall, and the load decreases rapidly if the volume of precipitation increases or decreases.

On the other hand, Ahnert (1970) shows that the relation between the rate of denudation and the average relief of a basin is linear and concludes that, given that this relation is



**Figura 4.** Representación gráfica bidimensional de la cuenca del Río Guadalupe, para el cálculo del área.

**Figure 4.** Two-dimensional graphic representation of the Guadalupe River basin, for the calculation of the area.

correspondieron a las cuencas de los ríos Guadalupe y Tijuana, probablemente debido a que dichas cuencas se extienden hasta las partes altas de la Sierra de Juárez, en donde existe mayor precipitación que en el resto de la zona (Tabla 3).

En todas las cuencas, la precipitación anual media tiende a aumentar hacia los últimos años del período considerado. Al hacer la derivada de la función de Langbein y Schumm (1958) y utilizando los parámetros apropiados para la zona de estudio, se encontró que la PAME crítica (para la cual  $S' = 0$ ) es de 286.37 mm; cifra que no ha sido alcanzada en los años que corresponden al período de estudio. Es decir, teóricamente y de acuerdo con el modelo, se pueden esperar mayores cantidades de material drenado que el obtenido para los años húmedos 1978, 1980 y 1983, puesto que para obtener una PAME de 286.37 mm en esta zona, se requiere una precipitación media de aproximadamente 600 mm, y esto aún no ha ocurrido. Sin embargo, Schumm (1956) encontró que la máxima carga de sedimento en una corriente

valid for the rivers of the humid eastern United States as well as for the semi-arid western part of the country, there is no relation between the mean annual precipitation and the rate of denudation. This author also shows that the rapid removal of detritus by the rare but intense rainfall of the dry western United States is as efficient a means of denudation as the constant but less intense rainfall of the eastern United States. This shows the need of working with precipitation data as effective mean annual precipitation (EMAP).

Given the different topography and size of the basins, the values of mean precipitation and EMAP of each basin can be very different to those of nearby or even adjacent basins. The basins of the Tijuana and Guaguatay-Descanso rivers have similar values of mean annual precipitation. However, the EMAP of the former was slightly less than that of the latter (Table 3). On the other hand, the mean annual precipitation value for the basin of the Santo Tomás River was lower than that for the San Isidro River, whereas

**Tabla 3.** Resultados del aporte sedimentario drenado en la zona de estudio según el modelo empleado. *C* = coeficiente de escurrimiento, *P<sub>m</sub>* = precipitación anual media, PAME = precipitación anual media efectiva.

**Table 3.** Results of the amount of sediment drained into the study area according to the model used. *C* = run-off coefficient, *P<sub>m</sub>* = mean annual precipitation, PAME = effective mean annual precipitation.

Cuenca (ver Fig. 2)	Area (km <sup>2</sup> )	<i>C</i>	<i>P<sub>m</sub></i> (mm) (34 años)	PAME (mm) (34 años)	Aporte promedio (ton/año) ( <i>S</i> )
1	4502	0.4423	227.7	100.7	809649.88
2	698	0.4200	228.8	95.3	115544.98
3	2484	0.4478	346.7	155.2	834889.13
4	780	0.4200	262.4	112.0	172524.31
5	729	0.4390	313.8	139.0	210090.03
6	940	0.4320	285.7	123.8	230995.38
7	707	0.4410	270.2	119.3	164053.94
8	1846	0.4200	281.8	120.4	429402.88
9	2065	0.4559	236.0	107.7	417700.00

ocurre cuando la precipitación es del orden de 250 a 300 mm de lluvia anual y la carga disminuye rápidamente si el volumen de precipitación aumenta o disminuye.

Por otra parte, Ahnert (1970) demuestra que la relación entre la razón de denudación y el relieve promedio de una cuenca es lineal y dado que esta relación es válida tanto para los ríos del este húmedo de los Estados Unidos como para el oeste semiárido del mismo país, concluye que no hay relación entre la precipitación anual media y la razón de denudación. También muestra que la remoción rápida de los detritus por las raras pero intensas lluvias del seco oeste norteamericano es un medio tan eficiente de denudación como las constantes pero menos intensas lluvias del este de Estados Unidos. Esto fortalece en nuestro concepto la necesidad de trabajar los datos de precipitación como precipitación anual media efectiva (PAME).

Dada la diferencia de topografía y de extensión de las cuencas, los valores de precipitación media y PAME de cada una de ellas pueden ser muy variables con respecto a los de cuencas cercanas o incluso contiguas. Las cuencas de los ríos Tijuana y Guauatay-Descanso tienen valores similares de precipitación anual media, sin embargo, la PAME de la primera resultó un poco menor

the EMAP value was similar for both. This is because the main branches of the basins of the Tijuana and Santo Tomás rivers extend to the high parts of the Sierra de Juárez. Hence, a considerable portion of these basins are covered by forest-type vegetation, which is reflected in the run-off coefficient (calculated for each basin), which in this case determines the differences between the mean annual precipitation and EMAP.

Even though the volume of material that is reported in this study as susceptible of being drained should not be considered more than a product datum of a theoretical model and that only a small percentage (probably 20%, according to the results of Long and Xiong, 1981 and Rodolfo, 1970) of this material reaches the coasts, it is important to determine the sites which receive most sediment during a wet season. Table 3 shows that basins 1 and 3, corresponding to the Tijuana and Guadalupe rivers respectively, are the ones that can contribute the highest amount of sediment, according to the model. Therefore, greater modifications can be expected at the mouths of these rivers. In the case of the Tijuana River, the Rodríguez dam is located relatively close to the mouth. This dam will be subjected to great contributions of sediment that could produce shoaling risks in a very short period of time. In the case of the

que el de la segunda (Tabla 3). Por otra parte, el valor de la precipitación anual media observado en la cuenca del Río Santo Tomás fue menor que el de la cuenca del Río San Isidro y, no obstante, el valor de PAME fue similar para las dos cuencas. Esto obedece a que los parteaguas principales de las cuencas de los ríos Tijuana y Santo Tomás se extienden hasta las partes altas de la Sierra de Juárez, por lo que una porción considerable de dichas cuencas está cubierta por vegetación tipo bosque, lo que se refleja en el valor del coeficiente de escurrimiento (calculado para cada cuenca), que en este caso es el que determina las diferencias entre la precipitación anual media y la PAME.

A pesar de que el volumen del material que se reporta en este trabajo como susceptible de ser drenado no debe considerarse más que como un dato producto de un modelo teórico y que sólo un porcentaje bajo (probablemente un 20%, siguiendo los resultados de Long y Xiong, 1981 y de Rodolfo, 1970) de este material alcanza las costas, es importante determinar cuáles son los puntos de la misma en los que se puede esperar mayor aporte sedimentario en una temporada húmeda. En la Tabla 3 podemos ver que las cuencas 1 y 3, correspondientes a los ríos Tijuana y Guadalupe respectivamente, son las que pueden aportar, de acuerdo con el modelo, mayor cantidad de sedimento. Son entonces las desembocaduras de estos ríos los puntos en los cuales podemos esperar mayores modificaciones. En el caso del Río Tijuana, existe la Presa Rodríguez, que se encuentra relativamente cerca de la desembocadura del mismo. Esta presa estará sometida a grandes aportes de sedimento que pueden producir riesgos de asolvamiento en períodos de tiempo muy cortos. En el caso del Río Guadalupe, no existe ninguna presa en su cauce, pero muy cerca y en la desembocadura misma del río se encuentran puentes carreteros que pueden ser arrastrados por avenidas de aguas sobrecargadas de material sedimentario, lo cual provocaría una virtual incomunicación carretera.

Por otra parte, existen reportes en los que se considera que el aporte sedimentario por ríos y arroyos en la región es poco significativo (Duffet, 1969). Sin embargo, se han reportado como fuente de sedimento en la costa a algunos de los arroyos de la región. Por ejemplo, Baca (1981) observa que la mayoría de los minerales pesados identificados

Guadalupe River, there is no dam near the mouth, but there are highway bridges nearby that could be carried away by water overloaded with sedimentary matter.

On the other hand, there are reports which consider that the sediment yield of rivers and streams in the region is not significant (Duffet, 1969). However, some of the streams in the region have been reported as being sources of sediment along the coast. For example, Baca (1981) observed that most of the heavy minerals identified along the shores of Todos Santos Bay are found in the streams that flow into the area and concludes that they are the sources. Gómez-Morín (1981), applying the hypsometric analysis, calculated the volume of sediment deposited in the dock of Ensenada harbour between 1967 and 1981, and concluded that an important amount of this material comes from Arroyo Ensenada.

The topography, weather and rate of erosion, as well as the rate of emersion or submersion of drainage basins at any locality, are factors that complicate the application of theoretical models to determine the potential loads of the streams and rivers of a region. For example, when the range of variation of the relief is large, the effective geomorphologic factors of the weather vary in terms of the relief and become part of the denudation-relief relation. In our study area, in the drainage basins that extend to the upper parts of the Sierra de Juárez, snow falls during the winter. This is due to altitude rather than relief, but an area above the tree line will be subjected to more intense denudation than a basin below the tree line, even though both have the same relief.

The lithological differences generate additional problems. This is particularly important in small drainage basins (hundreds of square kilometers) that have one or two types of rocks. Larger basins usually have a great variety of rocks with different resistances and the effect of the lithology is balanced in such a way that the total load of sediment neutralizes this effect (Ahnert, 1970).

The solid material removed from the surface by mechanical denudation processes is soil rather than rock, normally with a specific weight of less than 2.0 due to the expansion of the mineral grains because of chemical weathering (Ahnert, 1970). However, it can be assumed that for long periods of surface

en las playas de la Bahía de Todos Santos están presentes en los arroyos que desembocan en la zona y concluye que éstos son los aportadores. Por otra parte, Gómez-Morín (1981), aplicando el análisis hipsométrico, calculó el volumen de sedimento depositado en la rada del puerto de Ensenada entre 1967 y 1981 y concluye que una parte importante de este material proviene del Arroyo Ensenada.

La topografía o relieve, el clima y la razón de erosión, en conjunto con la razón de emergencia o sumergencia de las cuencas de drenaje en cualquier localidad, contribuyen a complicar la aplicación de modelos teóricos que pretenden evaluar cargas potenciales de los arroyos y ríos de una región. Por ejemplo, cuando el intervalo de variación del relieve es grande, los factores geomorfológicos efectivos del clima varían entre sí como función del relieve e implícitamente entran a la relación denudación-relieve. En nuestra área de estudio, en el caso de las cuencas de drenaje que tienen parteaguas extendidos hasta las partes altas de la Sierra de Juárez se presenta también en este sentido el aporte de aguas fluviales a partir de precipitación de nieve durante las temporadas invernales. Por supuesto, esto es más función de altitud que de relieve, pero una zona sobre la línea de bosques estará sujeta a denudación más intensa que una cuenca bajo la línea de bosques, aunque ambas presenten el mismo relieve.

Las diferencias litológicas generarán además problemas adicionales. Esto es particularmente importante en cuencas de drenaje pequeñas (del orden de cientos de kilómetros cuadrados) que tengan uno o dos tipos de rocas. Con el incremento del tamaño de la cuenca, ésta usualmente contiene una gran variedad de rocas con diferentes resistencias y se balancea el efecto de la litología de manera que en el total de la carga de sedimento se neutraliza este efecto (Ahnert, 1970).

El material sólido removido de la superficie por procesos de denudación mecánica es suelo más que roca y normalmente con un peso específico de menos de 2.0 debido a la expansión de los granos minerales por efecto del intemperismo químico (Ahnert, 1970). Sin embargo, es lícito asumir que para largos períodos de denudación superficial (decenas a centenas de años), el espesor de suelo en una localidad permanecerá más o menos constante; entonces, el proceso de intemperismo y el proceso de denudación tienden a estar en

denudation (tens to thousands of years), the thickness of the ground at a locality will remain more or less constant. Thus, weathering and denudation processes tend to be in equilibrium. The decrease in ground surface tends to be the same as the decrease in rock surface due to weathering action and to the partial removal of the lithic material in solution. Consequently, when the dissolved load is considered together with the detritus load in the rivers, the density of the rock rather than the density of the ground should be used.

Despite the previously mentioned limitations in the calculation of the amount of sediment that could be drained towards the western coast of northeastern Baja California, we consider that knowledge of the areas that are more susceptible of receiving intense sediment contribution during the rainy season is of interest to both the channeling of the currents in urban parts and for the protection and design of coastal structures, and should be taken into consideration in the planning of all kinds of coastal development. The modification of the contribution of sediment along the shoreline could break the delicate equilibrium between this contribution and longshore transport and could provoke important changes in the shoreline, both if the amount of sediment decreases or increases.

If there is an increase in the amount of sediment carried towards the coast by rivers of the region during a more intense rainy season than usual, damages could occur especially at the river mouths, consisting of the deposition of deltas that would modify the longshore currents and wave action with the consequent modification of the distribution of the sediment downstream. Even though the deposition of a delta in a river mouth may be considered a net gain in the amount of sediment in the coastal ecosystem, there could be immediate inverse effects in the downstream part of the shoreline. That is, the delta could be a trap that retains the sediment that comes from upstream, producing a deficit of sediment downstream with the consequent erosion and damage of the shoreline in this portion, whilst the system recovers its dynamical equilibrium and the shoreline moves to a new position.

On the other hand, the unexpected contribution of a higher amount of sediment than usual in some of the streams that flow into the harbour of the region (Ensenada and

equilibrio. El descenso de la superficie del suelo tiende entonces a ser igual al descenso de la superficie de roca bajo él mediante la acción de intemperismo y remoción parcial de material lítico en solución. Consecuentemente, cuando la carga disuelta es considerada conjuntamente con la carga detrítica en los sistemas fluviales, se deberá usar la densidad de la roca más que la densidad del suelo.

Pese a las limitaciones enunciadas con anterioridad en la estimación de la cantidad de sedimento que puede ser drenado hacia las costas occidentales en el noroeste de Baja California, consideramos que el conocimiento de las zonas susceptibles de recibir un aporte sedimentario más intenso durante la temporada de lluvias es de interés tanto en los aspectos de canalización de las corrientes en las porciones urbanas de las mismas como en la protección y diseño de las estructuras costeras. Asimismo, debe tomarse en consideración para la planeación de desarrollos costeros de todo tipo. La modificación del aporte sedimentario en la línea de costa puede romper el delicado equilibrio entre dicho aporte y el transporte litoral y ocasionar cambios sustanciales en la línea de costa, tanto si la cantidad de sedimento aportada aumenta como si disminuye.

En el caso particular de un incremento en este aporte producido por sedimento drenado hacia la costa por el sistema fluvial de la región durante una temporada de lluvias más intensa de lo habitual, se producirían daños especialmente en las desembocaduras de los arroyos, consistentes en la depositación de deltas que modificarían a las corrientes litorales y a la acción del oleaje que las produce con la consecuente modificación de la distribución del sedimento corriente abajo. A pesar de que la depositación de un delta en la desembocadura de un arroyo puede considerarse como una ganancia neta en la cantidad de sedimento en el sistema costero, los efectos inmediatos en la porción corriente abajo en la línea costera pueden ser contrarios. Es decir, el mismo delta puede hacer las veces de una trampa que detiene el sedimento que proviene a lo largo de la costa corriente arriba y causar un déficit del mismo corriente abajo con la consecuente erosión y daño a la línea costera en esta porción, mientras el sistema recupera su equilibrio dinámico y la línea de costa ocupa su nueva posición.

Sauzal), could produce an almost complete shoaling of the dock in a very short time, damaging both the installations and the boats.

Finally, the bathymetry of coastal bodies of water is modified with a higher than normal contribution of sediment, especially when this contribution occurs in a short time period, breaking the dynamical equilibrium of the coastal lagoon.

Pluvial precipitation in the study area is not constant throughout the year, but rather it occurs seasonally. Furthermore, the cycles of wet and dry years are relatively long (apparently around 11 years) which can produce a considerable layer of detritus on the surface of the drainage basins. On occasion there is intense rainfall. That is, even though the amount of rain in terms of mean annual precipitation is not very abundant, it could occur in a short period of time, causing the transport of a large amount of sediment and increasing the risk of damages.

We consider that direct measurements of deposits and measurements of loads in suspension are necessary to evaluate with greater precision the vulnerability of the coastal area and urban areas of the river mouths to the precipitation cycles and be able to establish predictive models of erosion-deposition that are in better agreement with the climatic conditions of the region.

## CONCLUSION

The estimated value for pluvial precipitation that would produce a maximum sedimentary contribution to the Pacific coast of Baja California ( $S' = 0$ ) was not reached, according to the model used, during the rainy years of 1978, 1980 and 1983. However, during these years the delivery of sediment caused considerable damage to highways, bridges, dams and harbours of the region. This allows us to infer that in the event of another wet cycle as the one recorded for these years, the material damages could be even worse, especially after a long dry period in which the amount of sediment susceptible to be drained by pluvial run-off is high. Based on these results, we can catalogue the coastal Pacific region of Baja California as an area of high geological risk, for human life as well as for coastal and hydraulic infrastructure.

Por otra parte, el aporte súbito de una cantidad de sedimento mayor que el habitual en algunos de los arroyos que desembocan en las radas portuarias de la región (Ensenada y Sauzal), puede producir el asolvamiento casi completo de dicha rada en un tiempo muy corto con los consecuentes daños tanto a las instalaciones como a las embarcaciones.

Finalmente, los cuerpos de agua costeros se ven modificados en la batimetría con un aporte sedimentario mayor del normal, especialmente cuando este aporte es en un período corto dado que se rompe el equilibrio dinámico de la laguna costera.

En el área de estudio la precipitación pluvial no es constante durante el año sino que se presenta de manera estacional. Además, los ciclos de años húmedos y secas son relativamente largos (aparentemente del orden de 11 años) lo cual favorece a que se produzca una capa de detritus considerable en la superficie de las cuencas de drenaje. En ocasiones la lluvia es muy intensa, es decir, aunque la cantidad de lluvia en términos de precipitación media anual no es muy abundante, ésta puede ocurrir en un lapso de tiempo muy reducido, lo cual provoca que gran cantidad de sedimento susceptible de ser drenado sea transportado en forma de avenidas y esto aumenta el grado de los daños causados.

Por último, consideramos necesario efectuar trabajos de medición directa de depósitos y de medición de cargas en suspensión que nos permitan evaluar con mayor precisión la vulnerabilidad de la zona costera y zonas urbanas de los cauces de los arroyos frente a los ciclos de precipitación y procurar establecer modelos predictivos de erosión-depositación más acordes con las condiciones climáticas particulares de la región.

## CONCLUSION

El valor estimado para la precipitación pluvial que produzca un máximo de aporte sedimentario hacia las costas del Pacífico de Baja California ( $S' = 0$ ), no se alcanzó de acuerdo con el modelo empleado durante los años lluviosos 1978, 1980 y 1983, en los que sin embargo, los aportes de sedimento causaron daños de consideración a carreteras, puentes, presas y radas portuarias de la región. Lo anterior nos permite suponer que en el caso de otro ciclo húmedo como el registra-

## ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank CICESE for the facilities provided to one of the authors at the Centro de Cálculo, and José Domingo Carriquiry B. and one anonymous referee for the critical review of this paper.

English translation by Ana Luz Quintanilla M.

---

do en dichos años, los daños materiales pueden ser aún mayores, en especial después de un período largo de sequías en el que la cantidad de sedimento susceptible de ser drenado por escurrimientos pluviales es alto. Con base en estos resultados podemos catalogar a la región costera de Baja California en el Pacífico como una zona de alto riesgo geológico tanto para la vida humana como para la infraestructura hidráulica y costera.

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al CICESE por las facilidades proporcionadas en el Centro de Cálculo a uno de los autores. A José Domingo Carriquiry B. y a un revisor anónimo por sus críticas y sugerencias durante la revisión de este artículo.

## LITERATURA CITADA

- Ahnert, F. (1970). Functional relationships between denudation, relief and uplift in large mid-latitude drainage basins. *Am. J. Science*, 268: 243-263.
- Baca, Ch.C. (1981). Procedencia de minerales pesados en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de Licenciatura, UABC, Ensenada, B.C., México.
- Duffet, W.N. (1969). Arroyo-shoreline relationships in northwest Baja California, Mexico. Ph.D. Dissertation, Univ. of Colorado, USA.
- Emery, K.O. (1960). *The Sea of Southern California*. John Wiley and Sons, New York, 366 pp.
- Fournier, F. (1960). *Climat et Erosion*. Paris Presses, Univ. de France.
- Gastil, R.G., Allison, C. and Phillips, R.P. (1971). *Reconnaissance of the State of*



- Baja California. Geol. Soc. of Amer. Mem., 170, 85 pp.
- Gómez-Morín, F.L. (1981). Estudio hipsométrico de la rada del puerto de Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura, UABC, Ensenada, B.C., México.
- Holeman, N.J. (1968). The sediment yield of major rivers of the world. *Water Resources Res.*, 4(4): 737-747.
- Langbein, W.B. and Schumm, S.A. (1958). Yield of sediment in relation to the mean annual precipitation. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39: 1076-1084.
- Long, Y.Q. and Xiong, G.S. (1981). Sediment measurement in the Yellow River. In: *Erosion and sediment transport measurement*. Int. Assoc. Hydrol. Sci. Pub., 133: 275-285.
- Marham, C.G. (1972). Baja California's climate. *Weatherwise*, 25(2): 64-76.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, 91(1): 23.
- Pozos, S.G. (1985). Cantidad de sedimento drenado hacia el Océano Pacífico por los principales ríos del norte de Baja California (1950-1983). Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., México, 85 pp.
- Rodolfo, K.S.R. (1970). Annual suspended sediment supplied to the California Continental Borderland by the Southern California Watershed. *J. Sedim. Petrol.*, 40(21): 666-671.
- Schumm, S.A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy, N.J. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67: 597-646.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1977). *Manual de conservación del suelo y el agua*. Colegio de Graduados, Chapingo, México.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1971). *Boletín Hidrológico No. 28. Regiones Hidrológicas No. 1 a 7. Península de Baja California*. Oficina de Publicaciones de la Dirección de Hidrología de la S.R.H., 1-05 a 1-06.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1973). *Mapa de tipos de vegetación del estado de Baja California*. No. AC-22800, México, D.F.