

**LIBRO:** PRY. PROYECTO  
**TEMA:** PUE. Puertos  
**PARTE:** 1. ESTUDIOS  
**TÍTULO:** 07. Estudios de Transporte de Litoral  
**CAPÍTULO:** 010. Determinación del Porcentaje de Sedimentación en los Canales de Acceso

**A. CONTENIDO**

Este Manual describe el procedimiento para determinar la sedimentación en los canales de acceso al puerto, expresada como porcentaje de la tasa de transporte longitudinal, a que se refiere la Fracción E.9. de la Norma N·PRY·PUE·1·07·001, *Ejecución de Estudios de Transporte Litoral*, para estudios de puertos que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios.

**B. DEFINICIÓN**

La sedimentación en los canales de acceso se define como la cantidad de material depositado en el fondo de estas obras, de una parte del sedimento suspendido en el agua, producto del transporte litoral.

**C. REFERENCIAS**

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Estudios de Transporte Litoral .....	N·PRY·PUE·1·07·001
Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos .....	M·PRY·PUE·1·07·003
Cuantificación del Transporte Litoral .....	M·PRY·PUE·1·07·004

**D. REQUISITOS**

Antes de efectuar la determinación de la sedimentación en los canales de acceso, se requiere contar con la siguiente información.

- D.1.** La velocidad de caída del material,  $W_f$ , expresada en m/s y calculada de acuerdo con lo indicado en el Manual M·PRY·PUE·1·07·003, *Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos*.
- D.2.** Los estudios topográficos y batimétricos, que contengan el levantamiento topobatimétrico, con el propósito de conocer la profundidad del lecho marino antes del dragado del canal, expresada como  $h_a$ , en m.
- D.3.** El proyecto de los canales de navegación, de acuerdo con la Figura 1, que aporte los siguientes datos:
  - El ancho total del canal  $B$ , expresado en m.
  - La profundidad del canal después del dragado  $h_c$ , expresada en m.

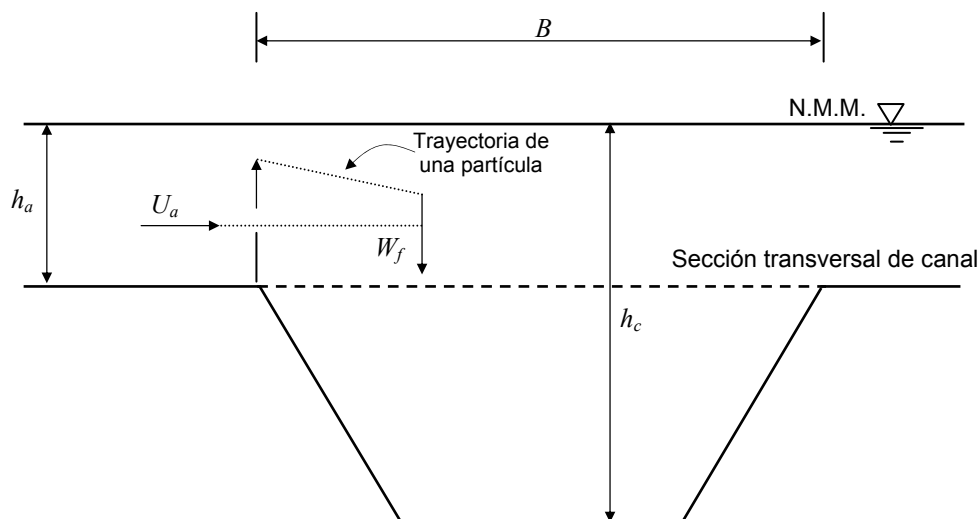


FIGURA 1.- Definición del problema

**D.4.** La velocidad de la corriente perpendicular al canal  $U_a$ , en metros por segundo, medida en campo. Si la corriente presenta un ángulo  $\theta$  respecto del eje del canal, la velocidad  $U_a$  se dividirá entre el seno de este ángulo, es decir sólo se considerará la componente de la velocidad perpendicular al canal y el porcentaje de sedimentación se calculará empleando el valor resultante en lugar de  $U_a$  en la expresión del Inciso E.2.1. de este Manual.

**D.5.** El diámetro  $D_{50}$  de la arena del fondo del canal, en m, y la densidad  $\delta_s$  de la arena del canal.

## E. PROCEDIMIENTO

La sedimentación en los canales de acceso a puertos se expresará como porcentaje de la tasa de transporte longitudinal, generada de acuerdo con lo establecido en el Manual M-PRY-PUE-1-07-004, *Cuantificación del Transporte Litoral*.

Los canales de acceso a puertos interceptan principalmente el sedimento que se mueve en sentido longitudinal a la línea de costa, propiciando la deposición de un porcentaje de este sedimento en el fondo de dichos canales, el cual se determina de la siguiente manera:

### E.1. HIPÓTESIS

Para estimar la cantidad de material que puede sedimentarse dentro del canal, son necesarias las siguientes suposiciones. Por el carácter general de éstas, este procedimiento es de gran aplicación en la ingeniería de costas:

- E.1.1.** El transporte de sedimento ocurre principalmente en la zona de rompiente.
- E.1.2.** La sedimentación en el canal es controlada por la velocidad de caída del sedimento,  $W_f$ , despreciando los efectos de turbulencia y corrientes verticales.
- E.1.3.** Se desprecia la recirculación en el canal, esto es, el flujo se considera en una sola dirección.
- E.1.4.** La velocidad  $U_a$  se considera uniforme en toda la columna de agua.

**E.2. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE LA TASA DE TRANSPORTE LONGITUDINAL QUE SE SEDIMENTA**

**E.2.1.** El porcentaje de material que se sedimenta se determinará mediante la siguiente expresión:

$$p = \frac{1 - \exp\left(-\lambda \frac{h_c B W_f}{h_a^2 U_a}\right)}{1 - \exp(-\lambda)} \times 100$$

Donde:

$p$  = Porcentaje de material sedimentado con relación a la tasa de transporte longitudinal, (%)

$\lambda$  = Coeficiente de decaimiento experimental, (adimensional), determinado con la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{3}{4 K_d} \left( \frac{W_f^2}{g h_a} \right)^{1/3}$$

$K_d$  = Coeficiente experimental con valor aproximado de 0,03, (adimensional)

$g$  = Aceleración debida a la fuerza de la gravedad, (m/s<sup>2</sup>)

$B, h_c, h_a, U_a$  y  $W_f$  tienen el significado indicado en la Cláusula D. de este Manual.

Si  $p \geq 1$ , todo el material moviéndose en sentido longitudinal a la línea de costa se depositará en el canal.

**E.2.2.** Alternativamente se puede utilizar la Figura 2 para calcular el porcentaje de sedimentos que se deposita en el canal. Para ello se calculará el número de *Froude* de sedimentación, como:

$$F_r = \frac{W_f}{\sqrt{g h_a}}$$

Donde:

$F_r$  = Número de Froude de sedimentación, (adimensional)

$h_a$  y  $W_f$  tienen el significado indicado en la Cláusula D., mientras que  $g$  tiene el significado indicado en el Inciso anterior.

El valor  $F_r = 0+$  indica un número de Froude de sedimentación muy cercano, pero mayor de cero.

**E.2.3.** El volumen de sedimentación también puede ser calculado mediante la utilización de modelos numéricos que aplican la teoría de Bijker, la cual considera la velocidad de caída del agua a una profundidad  $h$  en diferentes secciones del canal (Bijker 1980), teoría que se describe a continuación.

La ecuación básica del transporte de sedimentos en suspensión, de donde se obtiene la distribución en la vertical, se expresa como sigue:

$$W_f C + \varepsilon \frac{dC}{dz} = 0$$

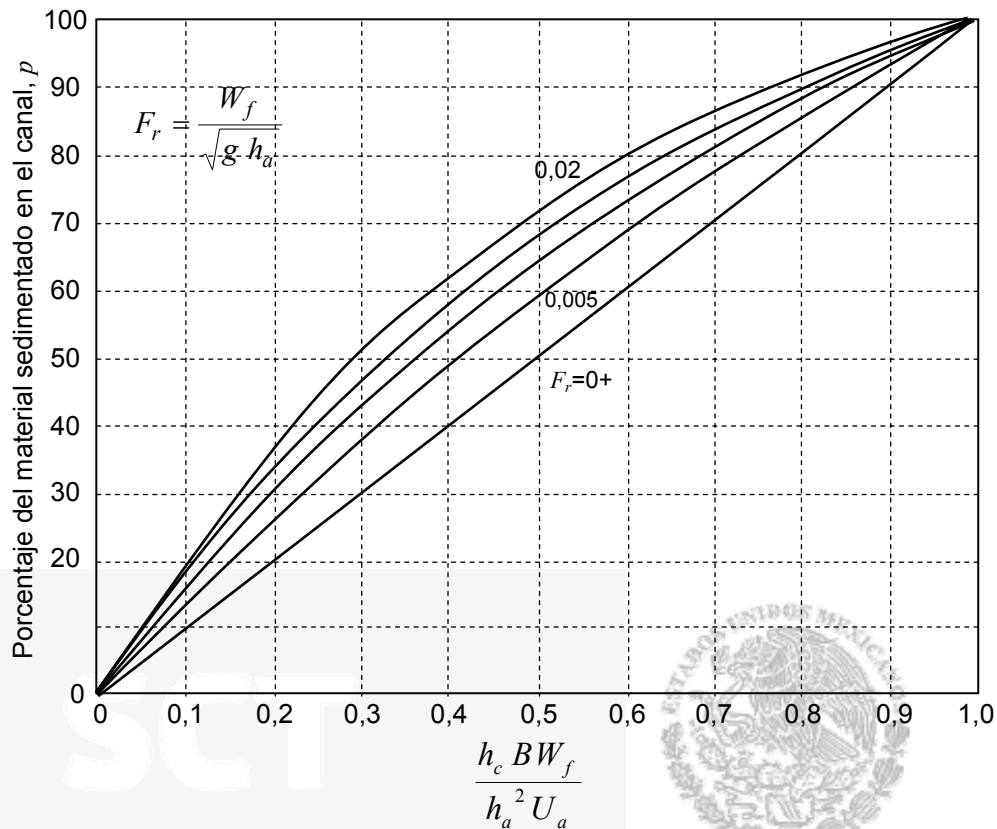


FIGURA 2.- Porcentaje de material que se sedimenta en el canal

Donde:

$W_f$  = Velocidad de caída de los sedimentos en el agua (m/s), calculada de acuerdo con lo indicado en el Manual M-PRY-PUE-1-07-003, *Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos*

$C$  = Concentración de los sedimentos (ppm)

$\varepsilon$  = Coeficiente de difusión de la arena en suspensión (m<sup>2</sup>/s), que se expresa como sigue:

$$\varepsilon = 0,16 \bar{V} h \frac{\sqrt{g}}{c_{ch}}$$

Donde:

$\bar{V}$  = Velocidad promedio de la corriente obtenida mediante modelaciones numéricas para diferentes direcciones y períodos del oleaje, (m/s)

$g$  = Aceleración de la fuerza de gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$c_{ch}$  = Coeficiente de resistencia de Chezy (m<sup>1/2</sup>/s)

$h$  = Profundidad del canal dragado (m)

$d_z$  = Profundidad donde se calcula la concentración de la arena, en el fondo del canal, (m),  $Z = h$  (ver Figura 3)

El coeficiente de Chezy relacionado con la rugosidad del fondo del canal, se expresa como sigue:

$$c_{ch} = 18 \log \left( \frac{12h}{\gamma} \right)$$

Donde

$\gamma$  = Rugosidad del fondo del canal con valor de 0,1, (m)

$h$  = Profundidad del canal, (m)

La expresión general para estimar el transporte de arena  $S_b$  en el fondo, se expresa utilizando las siguientes variables:

$$S_b = \left[ b D_{50} \bar{V} \frac{\sqrt{g}}{c_{ch}} \exp \left[ \frac{-0,27 \Delta D_{50} (c_{ch})^2}{\mu \bar{V}^2 \left( 1 + \frac{I}{2} \left( \frac{\xi \mu}{\bar{V}} \right)^2 \right)} \right] \right]$$

Donde:

- $b$  = Coeficiente con valor de 5, (adimensional)
- $D_{50}$  = Diámetro 50 de la arena del fondo del canal, (m)
- $\bar{V}$  = Velocidad promedio de la corriente obtenida mediante modelaciones numéricas para diferentes direcciones y períodos del oleaje, (m/s)
- $g$  = Aceleración de la fuerza de gravedad, (m/s<sup>2</sup>)

$\Delta$  = Se expresa como  $(\delta_s - 1)$

$\delta_s$  = Densidad de la arena del canal

$\xi$  = Parámetro de Battjes =  $c_{ch} \sqrt{\frac{\tau_w}{2g}}$

$\tau_w$  = Coeficiente de fricción con valor de 0,01 (adimensional)

$\mu$  = Coeficiente de rizos en el fondo del mar =  $\left( \frac{c_{ch}}{c_{90}} \right)^{\frac{3}{2}}$

$C_{ch}$  = Coeficiente de Chezy relacionado con la rugosidad del fondo del canal

$C_{90}$  = Coeficiente de Chezy relacionado con las características de la arena del fondo del canal

$$C_{90} = 18 \log_{10} \left( \frac{12h}{D_{90}} \right)$$

$D_{90}$  = Diámetro 90 del fondo del canal  $\approx 2(D_{50})$

### E.2.3.1. Determinación de los parámetros de base

La determinación de los parámetros que servirán de base para el cálculo de la sedimentación en el canal de acceso, en tres diferentes secciones del canal, de acuerdo con la Figura 3 de este Manual, se realiza de acuerdo con las siguientes expresiones:

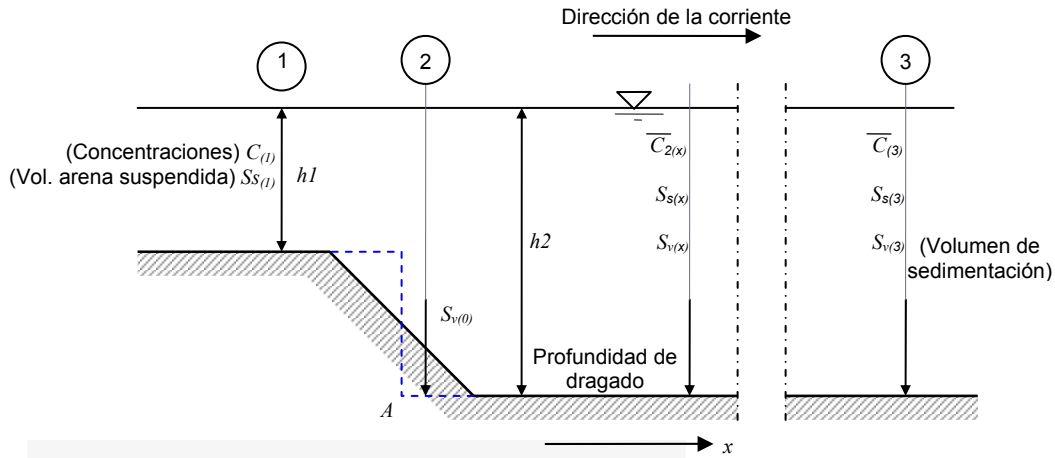
#### a) Sección 1 del canal

- Coeficiente de difusión  $\varepsilon_{(1)}$

$$\varepsilon_{(1)} = 0,16 \bar{V} h \frac{\sqrt{g}}{c_{ch}}$$

- Concentración promedio de los sedimentos

$$\bar{c}_{(1)} = \left( \frac{C_{b(1)} \varepsilon_{(1)}}{W h_{(1)}} \right) \left[ 1 - \exp \left( \frac{-W h_{(1)}}{\varepsilon_{(1)}} \right) \right]$$



a) Mecanismos de sedimentación



b) Concentraciones verticales en las secciones

FIGURA 3.- Esquema que indica el proceso de sedimentación de canal de acceso

La concentración en el fondo  $c_{b(1)}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{b(1)} = \frac{S_{(1)}}{\left(6,34 \bar{V} \gamma \sqrt{g}\right)}$$

El transporte de arena  $S_{(1)}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$S_{(1)} = \left[ b D_{50} \bar{V} \frac{\sqrt{g}}{c_{ch}} \exp \left[ \frac{-0,27 \Delta D_{50} (c_{ch})^2}{\mu \bar{V}^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\xi \mu}{\bar{V}} \right)^2 \right)} \right] \right]$$

- Volumen de arena en suspensión, en  $m^3/m*s$

$$S_{S(1)} = q_{(1)} \bar{c}_{(1)}$$

- Volumen de arena transportada por la corriente litoral, en  $m^3/m*s$

$$q_{(1)} = \bar{V}_{(1)} h_{(1)} B$$

donde  $B$  es el ancho del canal, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

**b) Sección 2 del canal**

- Coeficiente de difusión

$$\varepsilon_{(2)} = \frac{h_{(2)}}{h_{(1)}} \varepsilon_{(1)}$$

- Concentración promedio

$$\bar{c}_{(2)} = \bar{c}_{(1)}$$

- Volumen de arena en suspensión, en  $m^3/m*s$

$$S_{S(2)} = q_{(2)} \bar{c}_{(2)}$$

- Volumen de arena transportada por la corriente litoral, en  $m^3/m*s$

$$q_{(2)} = \bar{V}_{(2)} h_{(2)} B$$

donde  $B$  es el ancho del canal, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

- Concentración en el fondo

$$C_{(2)} = C_{(1)}$$

**c) Sección 3 del canal**

- Coeficiente de difusión

$$\varepsilon_{(3)} = \varepsilon_{(2)} = \frac{h_{(2)}}{h_{(1)}} \varepsilon_{(1)}$$

- Concentración promedio

$$\bar{c}_{(3)} = \left( \frac{C_{b(3)} \varepsilon_{(3)}}{W h_{(2)}} \right) \left[ 1 - \exp\left( \frac{-W h_{(2)}}{\varepsilon_{(3)}} \right) \right]$$

- Volumen de arena en suspensión

$$S_{S(3)} = q_{(2)} \bar{c}_{(3)}$$

- Volumen de arena transportada por la corriente litoral

$$q_{(3)} = \bar{V}_{(3)} h_{(2)} B$$

donde  $B$  es el ancho del canal, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

- Concentración en el fondo

$$C_{b(3)} = \frac{S_{(3)}}{\left(6,34 \bar{V} \gamma \sqrt{g}\right)}$$

$$S_{(3)} = \left[ b D_{50} \bar{V} \frac{\sqrt{g}}{c_{ch}} \exp \left[ \frac{-0,27 \Delta D_{50} (c_{ch})^2}{\mu \bar{V}^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\xi \mu}{\bar{V}} \right)^2 \right)} \right] \right]$$

### E.2.3.2. Volumen de sedimentación en el canal

$$S_{v(0)} = W_f C_{b(1)} \left( 1 - \frac{h_{*1}}{h_{*2}} \right)$$

Donde:

$S_{v(0)}$  = Volumen de sedimentación vertical (ver Figura 3)

$W_f$  y  $C_{b(1)}$  tienen el significado indicado en la Fracción D.1. y en el Punto a) del Párrafo E.2.3.1. de este Manual.

$$h_{*1} = \frac{W_f h_{(1)}}{\varepsilon_1}$$

Donde:

$h_{(1)}$  = Profundidad del canal en la sección 1 (ver Figura 3)

$\varepsilon_1$  tiene el significado indicado en el Punto a) del Párrafo E.2.3.1. de este Manual.

Haciendo:

$$h_{*2} = \frac{W_f h_{(2)}}{\varepsilon_2}$$

Donde:

$h_{(2)}$  = Profundidad del canal en la sección 2 (ver Figura 3)

$\varepsilon_2$  tiene el significado indicado en el Punto b) del Párrafo E.2.3.1. de este Manual.

Obtenemos el Gradiente vertical de sedimentación  $E$ :

$$E = \frac{h_{*1} (h_{*2} - h_{*1})}{h_{*2} (1 - \exp(-h_{*1})) - \alpha h_{*1} (1 - \exp(-h_{*2}))}$$

Haciendo:  $\beta = \frac{E W_f}{q}$        $\alpha = \frac{C_{b(3)}}{C_{b(1)}}$



Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de sedimentación;  $C_{b(1)}$  y  $C_{b(3)}$  son las concentraciones en el fondo para las secciones 1 y 3 del canal, respectivamente.

Entonces

$$S_{S1} - S_{S(x)} = (S_{S1} - S_{S3})(1 - \exp(-\beta x))$$

En la ecuación anterior,  $S_{S1} - S_{S(x)}$  es el volumen de sedimentación que se presenta en la distancia del punto  $A$  al punto  $x$  como se indica en la Figura 3 de este Manual.

## F. BIBLIOGRAFÍA

Bruun, P., *Port Engineering*, Gulf Publishing Company, Texas, EUA (1981).

Kraus, N. y Dean, J., *Longshore sediment transport rate distributions measured by trap*, Proc. of Conf. on Coastal Sediments ASCE, (1987).

Larson, M. y Kraus, N., *Estimation of suspended sediment trapping ratio for channel infilling and bypassing*, Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note IV-34, US Army, EUA (2001).

Bijker, E.W., *Sedimentation in channels and trenches, proceedings of Coastal Engineering*, págs. 1708-1718, (1980).

SCT



SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES