

Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano
Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas



Laboratorio de Hidráulica Aplicada

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES HIDRAULICAS
Y SEDIMENTOLOGICAS EN LAS PROXIMIDADES DE LA
EX-CIUDAD DEPORTIVA DE BOCA JUNIORS**

LHA-S4-037-93

Informe producido por:
Ing. R.D. Castellano

Ezeiza, abril de 1993

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA
Y TECNICA HIDRICAS

LABORATORIO DE HIDRAULICA
APLICADA

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES HIDRAULICAS
Y SEDIMENTOLOGICAS EN LAS PROXIMIDADES DE LA
EX-CIUDAD DEPORTIVA DE BOCA JUNIORS
LHA-S4-037-92**

Resúmen: Se presenta una análisis de la situación actual y proyección futura desde el punto de vista de la hidrodinámica local y aspectos sedimentológicos del área, a los efectos de evaluar el impacto producido por la construcción de un relleno para ganar terrenos al Rio de la Plata. El estudio está dirigido especialmente a la evaluación de la eventual alteración de las tasas de sedimentación en la zona de influencia de las obras.

Descriptoros: puertos - sedimentación - sedimentos en suspensión
- Rio de la Plata.

EQUIPO DE TRABAJO

Responsable de Proyecto

Ing. R.D. CASTELLANO

Asesoramiento

Dr. A.N. MENENDEZ

Modelación Matemática

Ing. M. CAVALIERE

Tratamiento de datos

Sr. C.A.HASPERT

INDICE

INTRODUCCION	1
1. DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL	2
1.1. El Rio de la Plata y los mecanismos de sedimentación	2
1.2. Los canales de acceso al Puerto de Buenos Aires	3
1.2.1. Geometría	3
1.2.3. Tasas de sedimentación en los Canales Norte y Sur	5
1.3. Sedimentación en las zonas costeras	7
2. MODELACION MATEMATICA	8
2.1. Hipótesis básicas y método de cálculo	8
2.1.1. Hidrodinámica	8
2.1.2. Estimación de la sedimentación	9
2.2 Sedimentación en el Canal Sur	12
2.3. Sedimentación en el Canal Norte	14
2.4. Sedimentación en las áreas costeras	14
2.5. Sensibilidad a los datos de entrada	14
3. EL IMPACTO DE LAS OBRAS PROYECTADAS	17
3.1 Hidrodinámica	17
3.2. Sedimentación en el Canal Sur	18
3.3. Sedimentación en el Canal Norte	19
3.5. Sedimentación en zonas costeras	20
4. CONCLUSIONES	21

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES HIDRAULICAS Y SEDIMENTOLOGICAS EN LAS PROXIMIDADES DE LA EX-CIUDAD DEPORTIVA DE BOCA JUNIORS

INTRODUCCION

La empresa Santa María del Plata S.A. proyecta construir una obra de relleno, avanzando sobre aguas del Rio de la Plata, en las proximidades de los canales de acceso Norte y Sur al puerto de la ciudad de Buenos Aires. La Figura N° 1 muestra la zona costera donde se proyecta construir las obras de relleno.

El grado en que dichas obras puedan potencialmente afectar las tasas de sedimentación en el área, y las eventuales consecuencias económicas sobre los costos de mantenimiento de las vías navegables de acceso al puerto, especialmente en Canal Sur, motivaron la realización del presente estudio.

La Figura N° 2 muestra un área de 7x7 Km sobre la que se focalizó el análisis del impacto de las obras sobre las condiciones hidrodinámicas en la región, y sus efectos sobre las tendencias de sedimentación.

1. DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL

1.1. El Rio de la Plata y los mecanismos de sedimentación

El régimen de mareas en el Rio de la Plata es semi-diurno con desigualdades diurnas. La amplitud media en el puerto de Bs. As es de 0.60 m, mientras que las correspondientes a mareas de sicigias equinocciales de perigeo llegan a los 0.90 m.

Las velocidades de la corriente no superan en general los 0.6 m/s en bajante y los 0.5 m/s en creciente. El nivel medio respecto del plano de referencia (cero del Riachuelo) es de 0.79 m. A este plano se refieren tanto los relevamientos batimétricos como los niveles de la marea. Los vientos tienen gran influencia sobre los niveles y velocidad de la corriente.

Dadas las bajas profundidades del estuario, el oleaje oceánico no penetra hasta la zona de Buenos Aires, y allí el oleaje resulta de generación local. Mediciones realizadas en la zona en 1985 (Ref.[1]) indican una altura media del oleaje de unos 0.45 m y su período de 3,5 seg. Otras fuentes de información (Ref.[2],[3]) indican valores similares para el oleaje medio.

El sedimento del Rio de la Plata consiste en una suspensión muy fina de limo y partículas de arcilla en concentraciones variables que se mueven bajo la acción de las corrientes producidas por la marea. Este material es originado en el rio Bermejo, y aportado por el rio Paraná al Rio de la Plata. En toda el área de estudio el agua es dulce y la suspensión al decantarse no muestra tendencia a flocular.

Estudios efectuados indican que la sedimentación en los canales dragados es motivada por el material en suspensión, más que por el ingreso de material local del lecho proveniente de los bancos. El sedimento que llega de los ríos tiene dificultad para fijarse en los bancos, y puede ser transportado por la corriente para luego depositarse principalmente en las zonas de poca perturbación tales como los canales artificiales.

Los mismos estudios sugieren que, aún bajo condiciones severas de oleaje o corriente, el sedimento aportado por los ríos resulta apenas incrementado por la liberación de material proveniente de las áreas de bancos, lo que indica muy escasos efectos de resuspensión del material depositado. Es probable sin embargo que durante tormentas las márgenes del estuario ubicadas en la zona de rompiente constituyan la fuente de algún incremento de las concentraciones de sedimento. Puede asimismo producirse, por las operaciones mismas del dragado, un incremento adicional localizado.

El tiempo prolongado que se requiere para que el material en suspensión pase a formar parte del lecho permite la existencia de una dispersión grande, produciéndose como resultado un amortiguamiento general de cualquier variación en la proporción del sedimento que ingresa. Por lo tanto el aporte de material, y en consecuencia el potencial de sedimentación es más o menos similar en todas partes. La diferencia en los órdenes de sedimentación entre los canales y entre determinados tramos de

2.1.2. Estimación de la sedimentación

La sedimentación tanto en áreas costera como en los canales de navegación (Canal Norte y Sur) bajo las distintas condiciones hidrodinámicas (situación actual y con rellenos) se efectuó siguiendo la metodología utilizada por Harrison y Owen (Ref. [9]).

El movimiento de materiales cohesivos fue considerado como un ciclo compuesto por cuatro procesos: erosión, transporte en suspensión, deposición y consolidación.

Estos procesos resultan ser complejas funciones de las propiedades del escurrimiento y las características del sedimento.

La erosión ocurre (Figura N° 19) cuando la tensión de corte ejercida por el escurrimiento supera un valor crítico. La reducción de masa del lecho debido a la erosión por unidad de tiempo y de área puede expresarse como:

$$\frac{dm}{dt} = M \cdot \left[\left(\frac{v_*}{v_{*c}} \right)^2 - 1 \right] \quad [4]$$

donde v_* es la velocidad de corte del escurrimiento; el subíndice c indica el valor crítico a partir del cual comienza la erosión.

El material removido del lecho se transporta enteramente en suspensión a la velocidad del escurrimiento. Su distribución vertical depende de la velocidad de caída de las partículas y de la turbulencia del escurrimiento. La deposición del material en suspensión se produce cuando la tensión crítica ejercida por el escurrimiento cae por debajo de un cierto valor v_{*1} . En este caso, la acumulación de masa por unidad de área puede expresarse como:

$$\frac{dm}{dt} = c \cdot \omega \cdot \left[1 - \left(\frac{v_*}{v_{*1}} \right)^2 \right] \quad [5]$$

Si se asume que la velocidad de corte del escurrimiento v_* es una función sinusoidal con el período de la marea T y con un valor máximo v_{*0} , su valor puede expresarse como:

$$v_* = v_{*0} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \quad [6]$$

La velocidad de corte se vincula con la velocidad media del escurrimiento en la vertical mediante la siguiente expresión:

$$v_{*0} = V_{\max} \cdot \frac{\sqrt{g}}{C} \quad [7]$$

siendo C el coeficiente de Chezy.

La deposición de material puede calcularse a partir de la integración de la ec.[5] para valores de v^* entre 0 y v^*1 . La erosión se calcula integrando la ec.[4] para valores de v^* entre v^*c y v^*o . De ello resulta:

$$\frac{S \cdot \rho_b}{C \cdot \omega} = \frac{2}{\pi} \cdot (D - E) \quad [8]$$

siendo:

$$D = [\arcsen(\frac{v^*1}{v^*o})] \cdot [1 - \frac{1}{2} (\frac{v^*o}{v^*1})^2] + \frac{1}{2} \sqrt{(\frac{v^*o}{v^*1})^2 - 1} \quad [9]$$

$$E = (\frac{M}{C\omega}) \cdot \left[\frac{1}{2} \sqrt{(\frac{v^*o}{v^*c})^2 - 1} - \left[\frac{\pi}{2} - \arcsen(\frac{v^*c}{v^*o}) \cdot [1 - \frac{1}{2} (\frac{v^*o}{v^*c})^2] \right] \right] \quad [10]$$

y S es la sedimentación neta media ocurrida en un ciclo de marea expresada como *variación de profundidad por unidad de tiempo*. La ec.[8] tiene validez si v^*o es mayor que v^*c , es decir cuando en un ciclo de marea ocurren procesos tanto de sedimentación como de erosión. Si $v^*1 < v^*o \leq v^*c$, la condición para que se inicien procesos de erosión no es alcanzada durante el ciclo de marea, por lo que la ec. [8] resulta:

$$\frac{S \rho_b}{C \omega} = \frac{2D}{\pi} \quad [11]$$

Cuando la velocidad v^*o es menor que v^*1 , la sedimentación ocurre en todo el ciclo de marea y la solución de [5] es:

$$\frac{S \rho_b}{C \omega} = \left[1 - \frac{1}{2} (\frac{v^*o}{v^*1})^2 \right] \quad [12]$$

La ec.[8] fue calibrada para los canales profundos del Rio de La Plata por Owen y Harrison (Ref.[9]) adoptando como valores críticos de la velocidad de corte los siguientes: $v^*1 = 0.008$ m/s

y $v^*c = 0.018$ m/s. Los mismos valores se han adoptado en el presente estudio. Como peso específico del material sedimentado se adoptó 1500 kg/m^3 . La constante $M/c.\omega$ se adoptó igual a 0.1. La velocidad de corte v^* originada por las condiciones hidrodinámicas locales es la resultante de combinar vectorialmente la velocidad de la corriente con la velocidad media debida a la ola en un período T ; para este caso se asumió que la velocidad orbital de la ola es perpendicular a la velocidad de la corriente.

La velocidad orbital máxima debida al oleaje se expresa como:

$$U_{\max} = \frac{\pi \cdot H}{T \cdot \text{sh}\left(\frac{\pi d}{L}\right)} \quad [13]$$

donde d es la profundidad y H la altura de la ola. A partir de ello, la velocidad de corte resulta:

$$u_* = \left(\frac{8 v U_{\max}^2}{\pi T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad [14]$$

El valor medio en un período T de la velocidad orbital debida a la ola se calculó teniendo en consideración que la velocidad de corte es una magnitud asociada a la disipación de energía, dependiente en consecuencia del cuadrado de la velocidad. Por este motivo se adoptó como valor representativo de la velocidad de corte del oleaje v^*w el valor medio cuadrático UMC de la función sinusoidal, dado por:

$$v_{*w} = UMC = \left[\frac{1}{T} \int v_{*\max}^2 \text{sen}^2 \frac{(2\pi t)}{T} dt \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{u_{*\max}}{\sqrt{2}} \quad [15]$$

donde $u_{*\max}$ es la máxima velocidad de corte generada por la ola, dada por la ec. [14]. De acuerdo a lo expresado el valor de la velocidad de corte resultante es:

$$v_* = \sqrt{v_{*c}^2 + v_{*w}^2} \quad [16]$$

donde v^*c es la velocidad de corte de la corriente y v^*w la debida a la ola.

2.2 Sedimentación en el Canal Sur

La metodología arriba descripta fue aplicada para la estimación de sedimentación en el Canal Sur.

un mismo canal no se deben tanto a variaciones en el aporte sino más bien a la geometría del canal y a las condiciones hidrodinámicas locales.

Las obras proyectadas se hallan emplazadas sobre la ribera sur de la ciudad de Buenos Aires, en el frente costero comprendido entre los canales de acceso Norte y Sur al puerto. Inmediatamente al norte del sitio, se halla la Reserva Ecológica de la ciudad, construida por la Municipalidad de Buenos Aires mediante el relleno del río de la Plata; a escasa distancia hacia el sur se halla el Canal Sur de acceso al Puerto de Buenos Aires; asimismo, a unos 2200 m en sentido opuesto se halla el Canal Norte; por tal razón resulta importante estimar las consecuencias que el relleno tendrá en ambos canales y también en las zonas costeras próximas.

1.2. Los canales de acceso al Puerto de Buenos Aires

1.2.1. Geometría

El Canal Sur es un canal artificial que vincula el Canal de Acceso a la Dársena Sur del Puerto de Buenos Aires. Su extensión es de 5 Km, su profundidad bajo el plano de Referencia es 26,5 pies (8.08 m), con ancho de solera de 30 m y taludes 1:9,5. En las Figuras Nº 3 y 4 se presentan dos secciones transversales de un total de 8 relevadas por HYTSA S.A. en Febrero de 1993. Puede considerarse que las corrientes máximas tienen una dirección aproximadamente perpendicular a su eje.

El Canal Norte vincula la Dársena Norte con el Canal de Acceso. Tiene una extensión de unos 6 Km, y una profundidad de 30 pies. El ancho de solera es de 60 m y los taludes tienen pendiente 1:9,5. Las corrientes máximas tienen un ángulo aproximado de unos 40° respecto del eje del canal en marea creciente y en marea bajante.

1.2.2. Sedimentos de fondo y en suspensión

El material de fondo en el Canal Sur está compuesto de materiales limo-arcillosos, con diámetro medio de próximo a 20 μ . En la siguiente Tabla, extraída de la Ref.[2], se indican resultados de algunos muestreos.

TABLA Nº 1 - Canal Sur. Sedimentos de fondo.

Muestra Nº	Km	Prof (pies)	Diámetro (μ)		
			d10	d50	d90
18	3	26		26	70
50	3	26	1	14	50

Las características del material en suspensión resultan

también de difícil determinación y los valores indicados en la literatura no son homogéneos. Halcrow (1975) indica valores de d_{50} inferior a 2μ ; E.I.H. (1985) (Ref.[3]) da para d_{50} valores de 2 a 30μ . En cuanto a la concentración de sedimentos, en el Rio de la Plata Superior son habituales valores de 60 a 100 mg/l, pero se han detectado valores de hasta 600 mg/l debidas tal vez a condiciones de oleaje más intensas (Halcrow, 1975; E.I.H, 1985). Determinaciones realizadas por HYTSA S.A. el 4 de Febrero de 1993 en el lugar arrojaron los siguientes resultados:

TABLA Nº 2 - Muestras de sedimentos en suspensión

Muestra	Ubicación	Marea	Conc. (mg/l)	Tiempo de sed. (seg)
I	fondo	B	84	603
II	superf.	B	69	574
III	superf.	C	1003	784
IV	fondo	C	1156	855

B: marea bajante; C:marea creciente.

Los valores de las muestras I y II son consistentes con los indicados por la literatura; las muestras III y VI están fuera de los valores medios medidos en el Rio de la Plata. No se efectuaron determinaciones de composición granulométrica sobre las muestras. También en la Ref.[5] puede hallarse una descripción de la composición granulométrica del material en suspensión, y se presenta en la Figura Nº 5. La Figura muestra dos envoltentes y una curva media cuyo diámetro medio es algo superior a 2μ . Curvas granulométricas del material en suspensión se han presentado también en la Ref.[2]; la fracción gruesa tiene diámetros de 2 a 100μ . Si se divide la muestra (Ref.[6]) en cinco partes de igual peso y de $1/5$ de la concentración total, los diámetros medios y velocidades de caída asociadas de cada una de ellas resultan los valores indicados en la Tabla Nº 3, que fueron los adoptados en este estudio.

TABLA Nº 3 - Características del material en suspensión. Fuente: Ref.[5,6]

$d_{50}(\mu)$	w (cm/s)
22.8	0.04670
4.8	0.00207
2.35	0.00050
1.45	0.00019
0.74	0.00005

La densidad del material se adoptó en 1500 Kg/m^3 , de acuerdo a resultados presentados en la Ref.[3].

1.2.3. Tasas de sedimentación en los Canales Norte y Sur

Existen diversas fuentes en las que se ha estimado la sedimentación de los canales Norte y Sur. En la Ref.[3] se indica para el Canal Sur una tasa de 139.000 m³/Km/año (de Halcrow,1975). La fuente para estos valores es la DNCPyVN.

A los fines del presente estudio se efectuó una estimación de la sedimentación a partir de secciones transversales del canal Sur relevadas en Septiembre de 1978 y Septiembre de 1979, período éste en el que no ha habido dragados. Las secciones correspondientes se indican en las Figuras N° 6 a 12. Para cada sección se calculó el área bajo el plano de referencia y la diferente para las fechas consideradas. En la Tabla N° 4 se muestran los resultados de los cálculos efectuados. La tasa media estimada en el presente estudio para el período 1978-1979 resultó de 77.600 m³/Km/a.

TABLA N° 4 - Sedimentación en el Canal Sur. 1978/1979

Sección (Km)	Variación del área (m ²)	Volumen (m ³)
0.1	64,3	--
1.0	141,3	92.520
1.8	97,5	95.520
2.0	84,2	18.170
3.0	37,3	60.750
3.2	71,7	10.900
3.8	67,9	41.880
4.0	52,2	12.010
5.2	54,6	64.080
VOLUMEN TOTAL (m ³)		395.830
Sedimentación (m ³ /a/Km)		77.600

Las tasas de sedimentación estimadas por la DNCPyVN para el Canal Norte son de aproximadamente 215.000 m³/Km/a. Por las mismas razones expuestas más arriba, estos valores pueden resultar sobreestimados. En la Ref.[3] se citan en cambio valores de 121.000 m³/a/Km para el Canal Norte dragado a 31 pies bajo el cero (Conforti,1990).

En la Ref.[3] se encuentra la siguiente Tabla que aporta nuevos valores de tasas de sedimentación del Canal Norte.

TABLA Nº 5 - Sedimentación en el Canal Norte. Fuente: Ref.[3]

Fecha	Km	Volumen (m ³ /a/Km)
julio - noviembre 1959	1,2 a 9,2	217.000
febrero - mayo 1961	3 a 6	104.000
mayo 1972- marzo 1973	4 a 8	245.000

Finalmente, de la Ref.[2] se ha extraído la Tabla Nº 6, que en la que se encuentran valores de sedimentación para ambos canales.

TABLA Nº 6 - Sedimentación en los canales de Navegación. Fuente: Ref.[2]

Canal	Tramo (Km)	Fechas		Ancho en sup. (m)	Sedim. (m/a)
		de	a		
Sur	2 - 7,6	2/66	1/67	140	0.98
Norte	1,2 - 9,2	7/59	11/59	150	1.43

Estos valores equivalen a 768.300 m³/año para el Canal Sur (137.200 m³/Km/a), y 1.716.000 m³ para el Canal Norte (214.500 m³/Km/a). Según esta estimación, el Canal Norte presenta así una tasa anual por Km 46 % mayor que el Canal Sur. La Tabla Nº 7, de la Ref.[2], presenta valores todavía superiores a los indicados, observándose además una importante variación temporal, con una relación para el Canal Sur 1 a 4 entre valores mínimo y máximo.

TABLA Nº 7 - Volúmenes Anuales de dragados. Fuente: Ref.[2]

Año	Canal Norte (m ³ x 106)	Canal Sur (m ³ x 106)
1960	2.28	0.72
1961	1.36	1.67
1962	2.60	0.90
1963	2.47	2.28
1964	2.04	2.95
1965	2.15	1.80
1966	2.03	1.00

El valor medio de la Tabla anterior es de 2.133.000 m³/a para el Canal Norte (266.000 m³/a/Km) y 1.617.000 m³/a para el Canal Sur (323.000 m³/a/Km).

De lo expuesto surge que existe una gran discrepancia en los valores establecidos para las tasas de sedimentación de los canales. Ello puede deberse a variaciones de los factores que inciden de manera directa en la sedimentación (corrientes, nivel del agua, composición de los sedimentos en suspensión), o bien a los métodos utilizados para cuantificar los volúmenes sedimentados.

1.3. Sedimentación en las zonas costeras

La comparación de relevamientos en la zona de la costanera Norte es consistente con estos resultados, según se indica en la Ref.[7], a partir de una comparación de relevamientos batimétricos que arrojaron, para el período 1959-1967 una tasa anual media de sedimentación de 20 mm en una zona costera de profundidad media del orden de los 3 m.

Dada la homogeneidad de material en suspensión, y la relativa proximidad de ambas zonas, resulta posible admitir valores similares para la zona ubicada en las proximidades de las obras de relleno.

Como se verá más adelante, de los cálculos efectuados para la zona surge una tasa media anual de 15 mm.

2. MODELACION MATEMATICA

2.1. Hipótesis básicas y método de cálculo

Con el propósito de estimar las consecuencias del avance del relleno sobre la hidrodinámica local y sobre las tasas de sedimentación, particularmente sobre el Canal Sur de acceso al puerto de Buenos Aires, se utilizó el sistema computacional HIDROBID desarrollado en el L.H.A.

El modelo se basa en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant en la dos dimensiones horizontales. Complementadas con adecuadas condiciones de contorno, las ecuaciones son resueltas mediante un esquema numérico en diferencias finitas, sobre una malla de discretización espacial alternada, en la que las variables h , u y v están centradas en puntos diferentes. Para la resolución del esquema numérico se utiliza el método implícito en direcciones alternadas.

La simulación numérica permitió conocer el campo de velocidades en un área próxima a la obra y al Canal Sur. El área modelada abarcó un área de 7 x 7 Km y puede verse en la Figura N° 2; el borde Norte fue seleccionado de manera de ser sensiblemente paralelo al Canal E. Mitre, cuyo eje está alineado con las máximas velocidades de las corrientes, de manera que en las situaciones estudiadas este límite se comporta como una línea de corriente, y matemáticamente como un borde sólido.

Mediante la modelación numérica se simularon dos situaciones: marea media bajante y media creciente. La razón de ello fue que los resultados de estas corridas fueron utilizados posteriormente en cálculos de sedimentación para los que se requiere conocer la velocidad máxima generada por la marea. Los datos de profundidades fueron obtenidos de la Carta Náutica H-156 y de un relevamiento local efectuado por HYTSA S.A. Los datos fueron digitalizados y a partir de ello se generó una grilla de 50 m de lado, 141 nodos sobre cada lado y un total de 19881 nodos. La topografía y contornos resultantes se muestran en la Figura N° 13. Los datos de entrada requeridos por el modelo son: caudal de entrada y tirante en la sección de salida.

Como información de base se dispuso de los datos presentados en las Ref.[4] y [5] y que son velocidades de creciente y bajante en puntos próximos a los bordes laterales del modelo (Figura N° 14), y una curva que relaciona tirantes y velocidades en un punto próximo a área de cálculo (Figura N° 15). A partir de esta información se esquematizaron las situaciones de creciente y bajante como se indica en la Figura N° 16. El caudal de entrada se calculó a partir

[1]

$$U = C \sqrt{h i}$$

donde C es el coeficiente de Chezy .

Con el valor de U y d en un punto de la sección, se calculó el valor de \sqrt{i} y con éste se calculó el valor de U en cada uno

de los nodos restantes de la sección de entrada; multiplicando por el tirante correspondiente, por el ancho de la celda, y efectuando la sumatoria, se determinó el caudal. Los datos de entrada resultantes se sintetizan en la Tabla N° 8.

TABLA N° 8 - Parámetros de calibración del modelo hidrodinámico

	Marea bajante	Marea creciente
Q (m ³ /s) =	4.600	5.700
h (m) =	0.75	1.14
v1 (m/s) =	0.31	0.31
v2 (m/s) =	0.28	0.20

Las velocidades v1 y v2 corresponden a puntos indicados en la Figura N° 16, y han sido obtenidos de la Ref.[5]. Fueron utilizados para verificar los resultados de las corridas de situación actual, habiéndose logrado un adecuado ajuste. h es el nivel del agua respecto del plano de referencia de la carta. La rugosidad de fondo (Coeficiente de Manning) adoptada fue n = 0.025.

2.1.1. Hidrodinámica

Con las condiciones indicadas más arriba se efectuaron las corridas del modelo para marea creciente y bajante. En primera instancia se simuló la situación actual y se verificó que, para las condiciones de ingreso dadas, se obtuvieron las velocidades deseadas en la sección de salida. En las Figuras N° 17 y 18 se presentan los campos de velocidad para marea creciente y bajante, en la situación actual. La refracción de la corriente al atravesar los canales de navegación (Ref.[11]) bajo un ángulo menor de 90° fue estimada utilizando la relación :

$$v_c = v \left[\cos^2 \phi + \left(\frac{h}{h_c} \operatorname{sen} \phi \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

donde el subíndice c indica valores en el canal y las variables sin subíndice corresponden a las zonas externas al canal; el ángulo ϕ es el formado por el vector velocidad y el eje del canal. El ángulo ϕ_c se calcula mediante:

$$\phi_c = \operatorname{arcsen} \left[\frac{v}{v_c} \cdot \frac{h}{h_c} \cdot \operatorname{sen} \phi \right] \quad [3]$$

La velocidad en el canal se calculó teniendo en cuenta efectos de refracción de la corriente mediante la ec.[3].

Con estos valores de velocidad a lo largo del eje del canal, se utilizó la ecuación [8] para estimar S, en mm/a y también en m³/a/Km, entre el Km 2 y el 5 del Canal Sur. El resto de los parámetros que intervienen en la fórmula de cálculo se resumen en la Tabla siguiente:

TABLA Nº 9 - Parámetros para el cálculo de sedimentación

d (μ)	C (mg/l)	H (m)	T (s)	ρ (kg/m ³)
22.8	80	0.4	3,5	1500

En la Tabla anterior sólo se ha considerado la fracción más gruesa de la muestra. Dado que la velocidad de caída ω de las partículas es inversamente proporcional a la cuarta potencia del diámetro, los volúmenes sedimentados de las restantes 4 fracciones son muy pequeñas. En la siguiente Tabla se muestran los resultados del cálculo de sedimentación incluyendo la totalidad de las fracciones, para la situación actual, con marea creciente y bajante.

TABLA Nº 10 - Sedimentación Canal Sur, incluyendo todas las fracciones.

Marea	Sedimentación (m ³ /a/Km)					Total
	d=22.8	d=4.8	d=2.35	d=1.45	d=0.74	
B	78638	3485	835	318	83	83359
C	79236	3512	842	320	83	83993

Con puede observarse, las fracciones de diámetro inferior a 22.8 colaboran sólo con un volumen sedimentado del orden del 6% de la fracción gruesa. Por esta razón los cálculos de sedimentación subsiguientes se efectuaron con la fracción gruesa y se incrementaron los volúmenes en un 6%.

Para la situación actual, el cálculo arrojó un resultado de 83.500 m³/a/Km (promedio de bajante y creciente), consistente con la evaluación efectuada en 2.1.3. correspondiente a los años 1978/79. Teniendo en cuenta que: a) la sensibilidad de las ecuaciones de sedimentación a los datos de entrada (ver 2.4), b) el hecho de que finalmente la sedimentación depende linealmente de C, ω y ρ , y por lo tanto las variaciones porcentuales de sedimentación respecto de la situación actual son independientes de ellos, c) la coincidencia del valor calculado con algunos de los valores estimados, y d) la dispersión de valores de volúmenes sedimentados según las distintas fuentes, el cómputo efectuado y el valor de las variables de ajuste adoptadas para el cálculo

fueron considerados adecuados a los fines del estudio.

2.3. Sedimentación en el Canal Norte

Con iguales parámetros, pero con una profundidad bajo el plano de referencia de 30 pies y un ancho de 150 m se realizó el cálculo de sedimentación en el Canal Norte; se utilizaron las velocidades de la corriente en marea creciente y bajante a lo largo del eje del canal, producidos mediante la aplicación del modelo matemático hidrodinámico. En este caso el Canal Norte presenta un ángulo de unos 40 grados respecto de la dirección de la corriente. El valor computado para la situación actual fue de 92.000 m³/Km/a, o sea unos 740.000 m³/a en todo el canal. Estos valores resultan, al igual que en el Canal Sur, inferiores a los presentados en la literatura referente al tema. Con respecto al Canal Sur, la estimación de la tasa de sedimentación anual por Km resulta un 12 % mayor.

2.4. Sedimentación en las áreas costeras

En la Figura N° 21 se muestran las curvas de isosedimentación anual, que resultan de aplicar la ec.[8] a cada nodo de la grilla de velocidades y de profundidades con los mismos parámetros (sedimentos y olas) que en el caso anterior. Puede verse que en la región estudiada, en las zonas de relativamente poca profundidad ubicadas entre los canales, las tasas de sedimentación son bajas, próximas a los 15 mm/a y consistentes con valores citados.

2.5. Sensibilidad a los datos de entrada

Se efectuó un análisis de la sensibilidad de la ec.[8] precisamente a los parámetros de más difícil determinación, como lo son especialmente la concentración C y el diámetro medio del material en suspensión. En la Tabla N° 11 se presentan a título de ejemplo, resultados para el Canal Sur, marea bajante, para distintos valores de C y d, asumiendo $\rho = 1500 \text{ Kg/m}^3$.

TABLA N° 11 - Sensibilidad a los datos de entrada. (Sedimentos)

Caso	C (mg/l)	d50 (μ)	Sedimentación (m ³ /a/Km)
1	80	22.8	74.950
2	80	20	57.670
3	100	26	121.836
4	120	30	194.650

Puede notarse que el Caso 3 arroja resultados que se aproximan a los indicados en 2.1.3, para un d50 del material en suspensión de 26 μ , valor que se halla dentro de los valores mencionados en la literatura. Es importante destacar sin embargo que, dada la linealidad de la ec.[8] respecto de C, w y ρ , las tasas relativas de sedimentación referidas a la situación actual

no resultan afectadas por este motivo, ya que son independientes de los parámetros citados. También los valores finales de sedimentación anual resultan sensibles a los parámetros hidrodinámicos utilizados en su cálculo. En la Tabla N° 12. se muestra la incidencia de la variación del ángulo de la corriente respecto del eje del canal, y de la variación de su módulo para el Canal Norte.

TABLA N° 12. Sensibilidad a los datos de entrada. (Corrientes)

Caso	$\phi 1$ (°)	v1 (m/s)	S (mm/a)	Variación (%)
1	45	0.25	394.0	---
2	47	0.25	409.1	+3.8
3	43	0.25	378.9	-3.8
4	45	0.26	370.1	-6.0
5	45	0.24	416.9	+5.8

Tomando como referencia el caso 1, resulta evidente la sensibilidad del método de cálculo adoptado a los parámetros hidrodinámicos. También el oleaje interviene como parámetro de cálculo en la fórmula de sedimentación. Para el Canal Sur especialmente, la longitud creciente del relleno actuará como una obra de protección al oleaje, reduciendo su altura por efectos de difracción cuando la dirección de procedencia sea del N o NW. La longitud del oleaje resulta reducida, por tratarse de olas de corto período (3.5 seg); esta circunstancia hace que los efectos de difracción resulten más notables. La Tabla N° 13 muestra la manera en que la altura del oleaje incide sobre las tasas anuales de sedimentación. En la última columna se indica la variación porcentual de la sedimentación respecto de una situación de referencia. El cálculo se ha efectuado para una velocidad del escurrimiento constante en todos los casos, y para profundidades representativas del Canal Sur.

TABLA N° 13 - Sensibilidad a los datos de entrada. (Olas)

Caso	H (m)	θ (°)	S (mm/a)	Var (%)
1	0.40	90	629.8	--
2	0.35	90	645.7	+2.5
3	0.30	90	661.6	+5.0
4	0.25	90	677.5	+7.6
5	0.20	90	693.4	+10.0

Como puede advertirse, las tasas de sedimentación resultan considerablemente sensibles a reducidas variaciones del ángulo de incidencia de la corriente y a su intensidad. En cambio resultan relativamente menos afectadas por cambios en la altura del oleaje.

3. EL IMPACTO DE LAS OBRAS PROYECTADAS

Se estudiaron tres configuraciones de obras, con avances de 250, 500 y 700 m respectivamente. En cada caso se evaluó la influencia de las obras sobre el campo de velocidades y se computaron las nuevas tasas de sedimentación vinculadas a la nueva situación hidrodinámica.

3.1 Hidrodinámica

El modelo hidrodinámico fue aplicado a las configuraciones de obras que se indican en la Figura N° 22. Para la variante 3 (la de mayor extensión) se consideró una reducción de la altura de ola en primer tramo del Canal Sur, para tener en cuenta efectos de difracción del oleaje. La altura considerada fue de 0.30 m y 0.20 para las variantes 2 y 3 respectivamente. Las Figuras N° 23 a 30 muestran los campos de velocidad para los estados de marea indicados y para las configuraciones de la Figura N° 22. La velocidad en el canal fue computada con la metodología indicada en 2.1.1. En la Tabla que sigue se indican los valores del ángulo de incidencia de la corriente respecto del eje del canal, según resulta de la modelación matemática.

TABLA N° 14 - Canal Sur. Angulo de incidencia de la velocidad de la corriente respecto del eje del canal.

		Progresiva						
		Km 1	Km 1.5	Km 2	Km 3	Km 4	Km 5	Km 6
Actual	B	88	87	87	78	79	79	81
	C	85	83	82	87	82	80	76
Var 1 (250m)	B	80	88	86	83	80	80	78
	C	76	80	79	89	84	82	78
Var 2 (500m)	B	78	82	82	83	82	81	80
	C	76	73	74	83	88	84	79
Var 3 (700m)	B	71	77	75	90	82	82	79
	C	74	62	65	82	90	83	77

TABLA N° 15 - Canal Norte. Angulos de incidencia de la corriente respecto del eje del Canal

		Progresiva						
		Km 1	Km 2	Km 3	Km 4	Km 5	Km 6	Km 7
Actual	B	43	47	42	39	37	36	37
	C	42	45	41	35	38	40	37
Var 1	B	47	45	41	34	31	34	36
	C	50	46	40	40	39	43	38
Var 2	B	46	45	38	35	30	33	38
	C	53	44	38	35	37	44	38
Var 3	B	43	48	39	32	28	34	36
	C	44	42	36	35	38	43	38

3.2. Sedimentación en el Canal Sur

Con iguales parámetros que los indicados en 3.2.2, pero con los campos de velocidades correspondientes a los casos estudiados, se repitió el cómputo de sedimentación. Para las variantes 2 y 3 (500 y 700 m) se adoptó una altura de ola de 0.30 m y 0.20 m respectivamente, teniendo en cuenta los efectos de atenuación de la altura del oleaje por la difracción, para el caso de olas procedentes del sector N y NW. Estos valores están basados en los coeficientes de atenuación para el caso de una escollera semi-infinita para ángulos de incidencia de 15 a 45 ° (Shore Protection Manual, del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos), y cuyos valores oscilan en términos generales entre 0.5 y 0.14. Como se desconoce la distribución direccional del oleaje en la región, se asumió que un 50 % de las olas se difractan por efecto de las obras. En la Figura N° 31 se presentan los resultados, lo que permite compararlos entre sí y con la situación actual. Puede observarse un incremento de la sedimentación en el primer kilómetro, compensado por una reducción de las tasas de sedimentación en otros tramos del canal, debido al cambio de la dirección e intensidad de las corrientes generados por la presencia de la obras.

La sedimentación indicada es el valor medio en cada tramo de 1000 m estudiado (Km 1 al 6), incluyendo un 6% de materiales finos.

En la Tabla que sigue se indican los valores obtenidos, tanto en la situación actual como para las variantes analizadas.

TABLA Nº 16 - Sedimentación en el Canal Sur

Km	Actual (m3/Km/a)	V1 (250m)		V2 (500m)		V3 (700m)	
		(m3/Km/a)	(%)	(m3/Km/a)	(%)	(m3/Km/a)	(%)
1-2	96.765	99.326	2.6	104.727	8.2	108.554	12.2
2-3	89.439	90.067	0.7	88.702	-0.8	86.134	-3.7
3-4	83.139	84.368	1.5	83.724	0.7	81.824	-1.6
4-5	78.647	79.832	1.5	79.577	1.2	77.756	-1.1
5-6	76.850	77.611	1.0	77.486	0.8	75.650	-1.6
PROM	81.435	82.654	1.5	86.843	6.6	85.984	5.6

Cabe señalar que los valores absolutos (tanto en la situación actual como para las obras proyectadas) pueden resultar discutibles en virtud de la sensibilidad de la fórmula de cálculo a los parámetros de entrada (especialmente concentración, diámetro y densidad del material) y por el hecho de ser estos parámetros de difícil determinación. Sin embargo, como puede verse a partir de la ec.[8] la variación relativa porcentual de la sedimentación resultará independiente de $C\omega/\rho$.

3.3. Sedimentación en el Canal Norte

La Figura Nº 32 resume los cálculos efectuados para el Canal Norte, dando valores absolutos. Valen las mismas consideraciones antes efectuadas respecto de la realidad de los valores absolutos de los volúmenes calculados. Se observa un incremento importante de la sedimentación en el tramo de canal más próximo a la costa, donde la reducción de velocidades por efecto de las obras de relleno es más notoria.

TABLA Nº 17 - Sedimentación en el Canal Norte

Km	Actual (m3/Km/a)	V1		V2		V3	
		(m3/Km/a)	(%)	(m3/Km/a)	(%)	(m3/Km/a)	(%)
1-2	81.620	91.561	12.2	92.416	13.2	91.076	11.6
2-3	53.578	56.048	4.6	56.151	4.8	55.998	4.5
3-4	48.543	48.015	-1.1	46.107	-5.0	45.091	-7.1
4-5	54.260	52.970	-3.1	50.057	-7.7	47.421	-12.6
5-6	58.266	56.365	-3.3	55.025	-5.6	52.525	-9.9
6-7	60.253	59.881	-0.6	59.446	-1.3	57.946	-3.8
PROM	57.039	57.980	1.6	57.218	0.3	55.794	-2.2

En virtud del análisis de sensibilidad a las variables realizado, puede concluirse que existe una tendencia a la redistribución de los materiales sedimentados, pero que la sedimentación total del Canal Norte no resultara mayormente afectada por las obras.

La Tabla N° 18 resume los valores de sedimentación totales estimados para ambos canales

TABLA N° 18 - Sedimentación total en los canales Norte y Sur para las alternativas estudiadas.

Canal	Actual (m3/a)	V1 (250m) (%) (m3/a)	V2 (500m) (%) (m3/a)	V3 (700m) (%) (m3/a)
Norte	356.520	364.840 +2.3	359.202 0.8	350.057 -1.8
Sur	424.840	431.204 +1.5	434.216 2.2	429.910 1.2
TOTAL	781.360	796.044 1.9	793.418 1.5	779.967 -0.2

Puede advertirse que, considerados de manera conjunta, la afectación a la sedimentación global por efecto de las obras es muy reducido si bien las obras generarán esencialmente una redistribución de las volúmenes sedimentados a lo largo de la traza de ambos canales. Debe tenerse en cuenta que los pequeños valores porcentuales computados resultan del orden de las variaciones que el método de cálculo utilizado produce ante pequeñas variaciones en los datos de entrada.

3.5. Sedimentación en zonas costeras

Con igual metodología que la descrita en 3.2.1, pero con los campos de velocidades correspondientes a las obras proyectadas, se calculó la sedimentación media anual en las zonas costeras vecinas a las obras. Los resultados se muestran en las Figuras N° 33 a 35, bajo la forma de curvas de igual variación porcentual de la tasa de sedimentación anual.

Para las tres variantes estudiadas se observa la influencia de las obras sobre un frente costero extenso, en el que las tasas de sedimentación actuales se verán incrementadas entre 10 y 20 %; en el entorno próximo a las obras los incrementos serán superiores al 30 % o 40 % en un radio creciente (según las dimensiones de las obras) de 500 a 1000 m. Los resultados de estos cálculos deben ser interpretados como una tendencia al avance que la línea de costa experimentará como consecuencia del incremento de las tasas de sedimentación media en las proximidades del relleno. No se ha tenido en cuenta en tales evaluaciones el aporte de sedimentos de otra naturaleza que la del transportado por el río en forma suspendida.

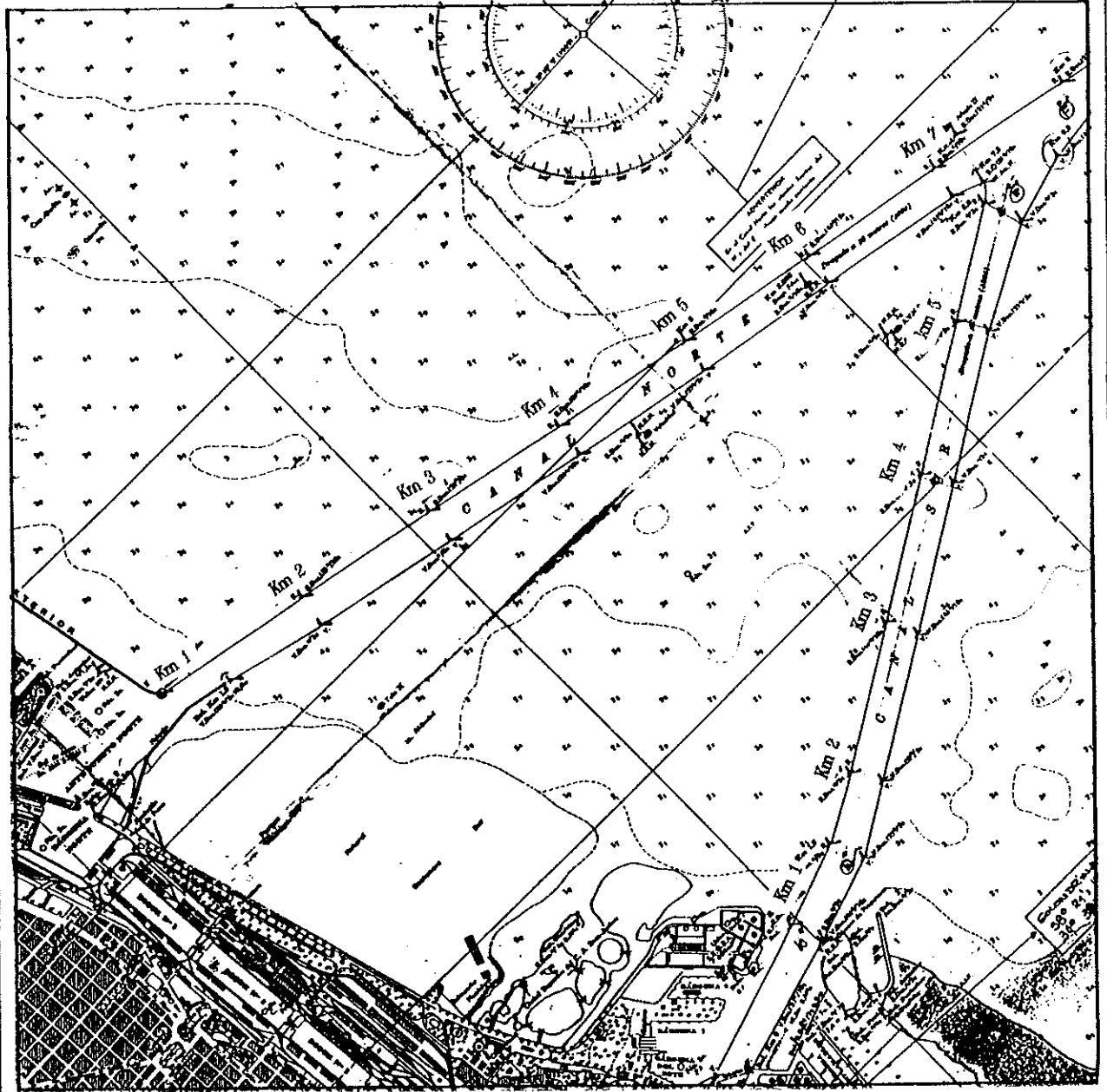
4. CONCLUSIONES

1. Considerados de manera global, los volúmenes totales sedimentados en ambos canales no resultan afectados sensiblemente por la construcción del relleno proyectado, en ninguna de las tres alternativas estudiadas. No obstante se prevé una redistribución de los mismos a lo largo de la traza de ambos canales.
2. En el Canal Norte, las obras propuestas tenderán a generar una redistribución de la sedimentación, la que se verá incrementada en los dos primeros kilómetros, pero reducida, respecto de la situación actual en el resto del canal debido a la modificación de la dirección e intensidad de las corrientes por efecto de las obras, tendiendo a compensar los volúmenes sedimentados.
3. Para el Canal Sur, se ha calculado un aumento de los volúmenes medios sedimentados, de 1,5 (relleno de 250 m) al 6 % (relleno de 700 m) respecto de los valores actuales; en el primer kilómetro estos efectos son más notables, pero se ven parcialmente compensados (especialmente para las variantes de mayor longitud) por una reducción de las tasas de sedimentación en los siguientes tramos del canal, debido a una reorientación de las corrientes y a una variación en su intensidad inducidos por las presencia de las obras.
4. En las áreas costeras, los cálculos efectuados indican una zona de influencia amplia a ambos lados de las obras, creciente a medida que aumenta la longitud del relleno. Las tasas de sedimentación actuales en la región costera han sido estimadas en unos 15 mm anuales; sin embargo estos cálculos han sido realizados para condiciones medias de oleaje, sin considerar el efecto de temporales que en estas zonas poco profundas pueden resultar importantes. Se ha estimado que la variación de la sedimentación media puede resultar incrementada en valores de 10 a 20 % sobre un frente costero que abarca desde el Canal Norte al Sur, incluyendo el tramo costero de la Reserva Ecológica de la ciudad de Buenos Aires. En un entorno más limitado, de 500 a 1000 m según la extensión del relleno, el incremento de la sedimentación será considerablemente mayor, con lo cual es previsible una remodelación de la línea de costa en el entorno de las obras, hasta una nueva posición de equilibrio.

BIBLIOGRAFIA

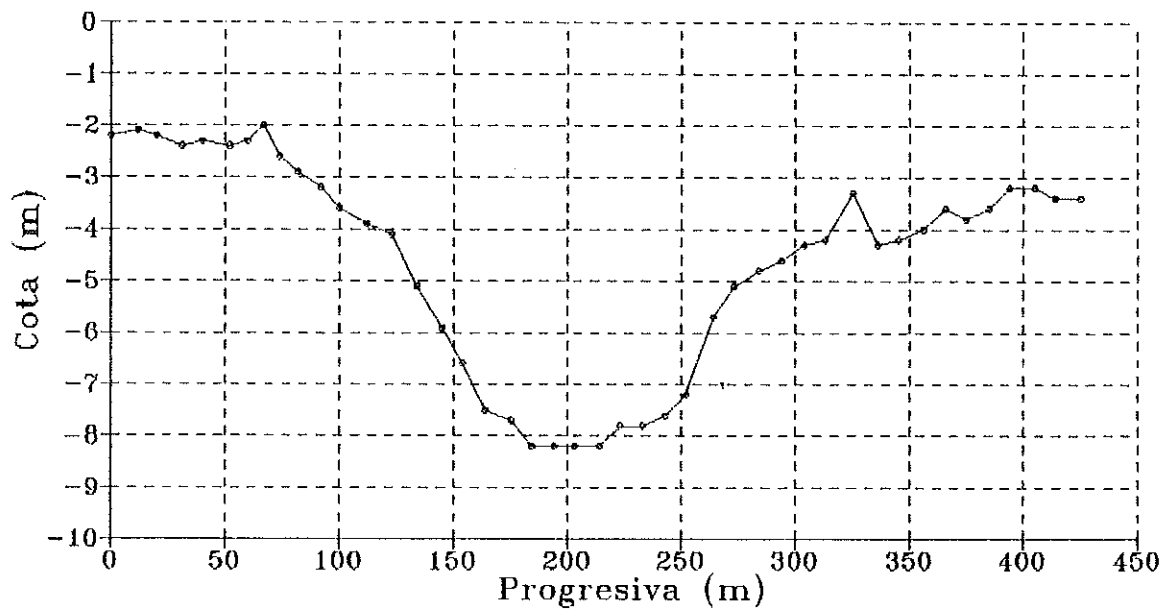
- [1] Estudio de la Costanera Sur. Condiciones hidrodinámicas. R. Castellano, G. Molinari, L.H.A., 1986.
- [2] Estudio de los aspectos físicos de las mejoras propuestas para el Puerto de Buenos Aires, los Canales de Acceso, el Canal Costanero y las Islas de Recreación. Sir William Halcrow & Part. Informe Final, Diciembre 1971.
- [3] Informe de Diagnóstico sobre Navegación en la Ruta Rosario Océano. INCYTH, Informe LHA-114-01-91.
- [4] Estudio de suelos y fundaciones y estudios hidráulicos por modelos matemáticos del Canal Costanero Norte en el Rio de la Plata. Ministerio de Defensa. DIGID. 1978.
- [5] Recuperación, urbanización y forestación de tierras de la ribera norte. Estudio Gradowczyk y Asociados. Informe Final, Julio 1980.
- [6] Estudio y Proyecto del Canal de vinculación entre el Puerto de Buenos Aires y el Rio Paraná de las Palmas. Sir William Halcrow & Part. Informe Final, Abril, 1969.
- [7] Estudio de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas en las proximidades de Puerto Norte. INCYTH, Informe LHA-S4-036-92, Agosto 1992.
- [8] Estudio de la incidencia hidráulica y sedimentológica de la implantación de dos islas flotantes frente a la Costanera Norte de la Ciudad de Buenos Aires. INCYTH, Informe LHA-124-001-93, Enero 1993.
- [9] Siltation of fine sediments in estuaries. A.J.M.Harrison, M.W. Owen, XIV Congreso de la IAHR, 1971.
- [10] Estimation of siltation in dredged channels in open situations. B.A. O'CONNOR, G.H.LEAN. XXIV Congreso Internacional de Navegación. 1977.
- [11] Experiencias en un canal piloto para estudios desedimentación. D.D SERMAN. E.I.H.. XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1984.

FIGURAS



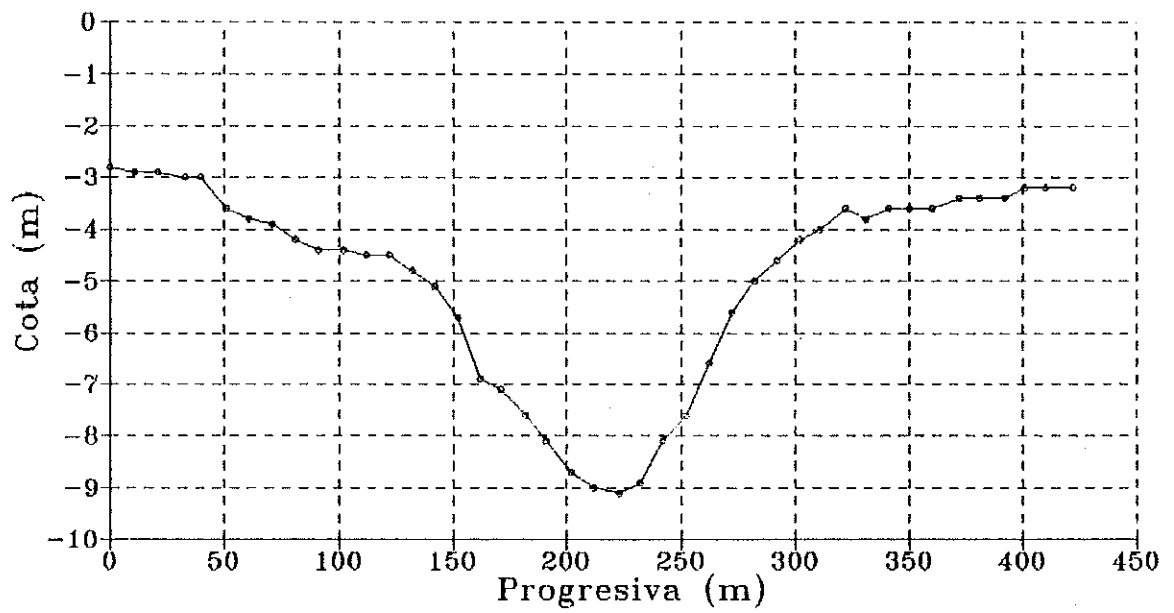
Delimitación del área de estudio.

Figura Nº 2



Canal Sur, 1993. Km 1.5.

Figura Nº 3



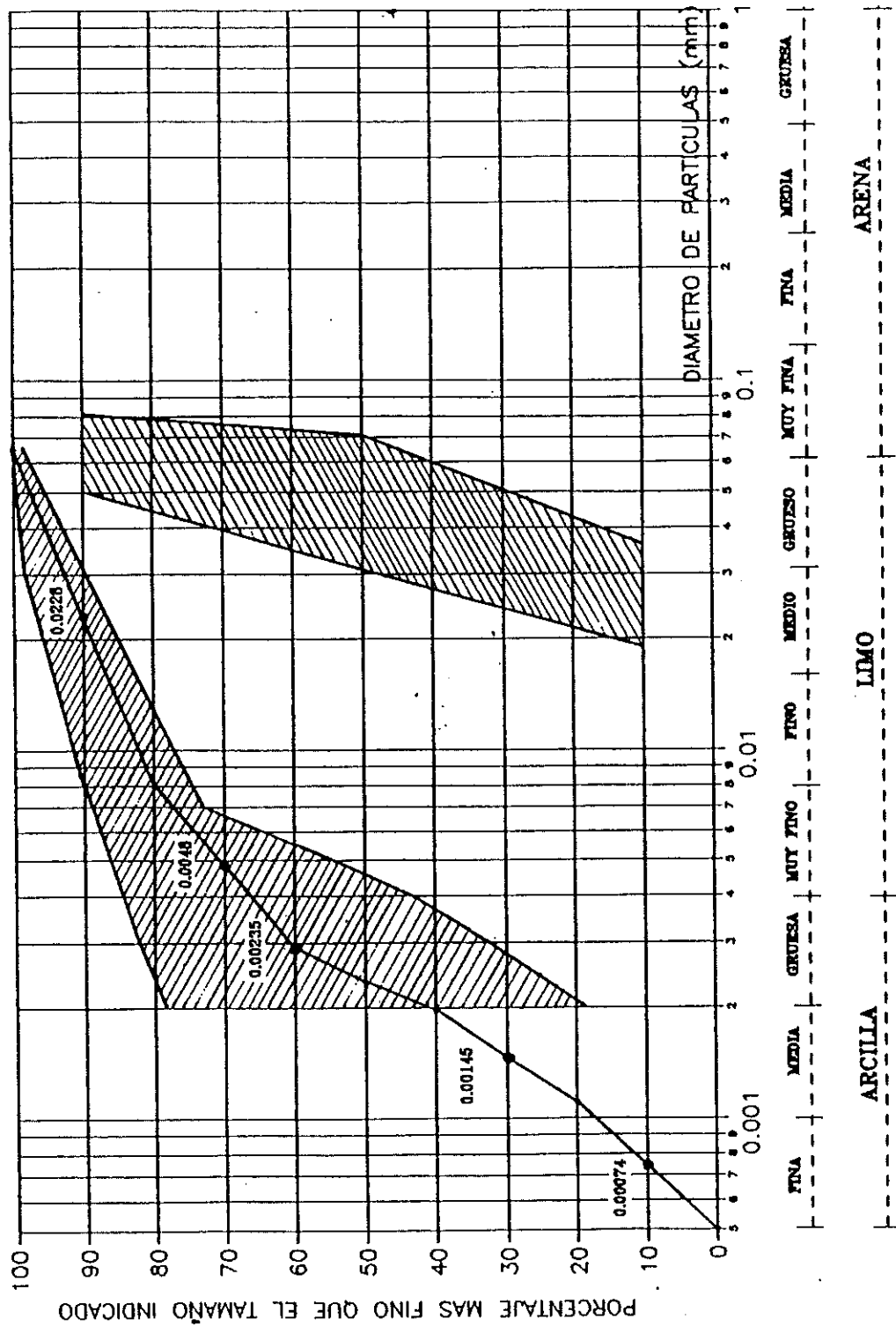
Canal Sur. 1993. Km 2.

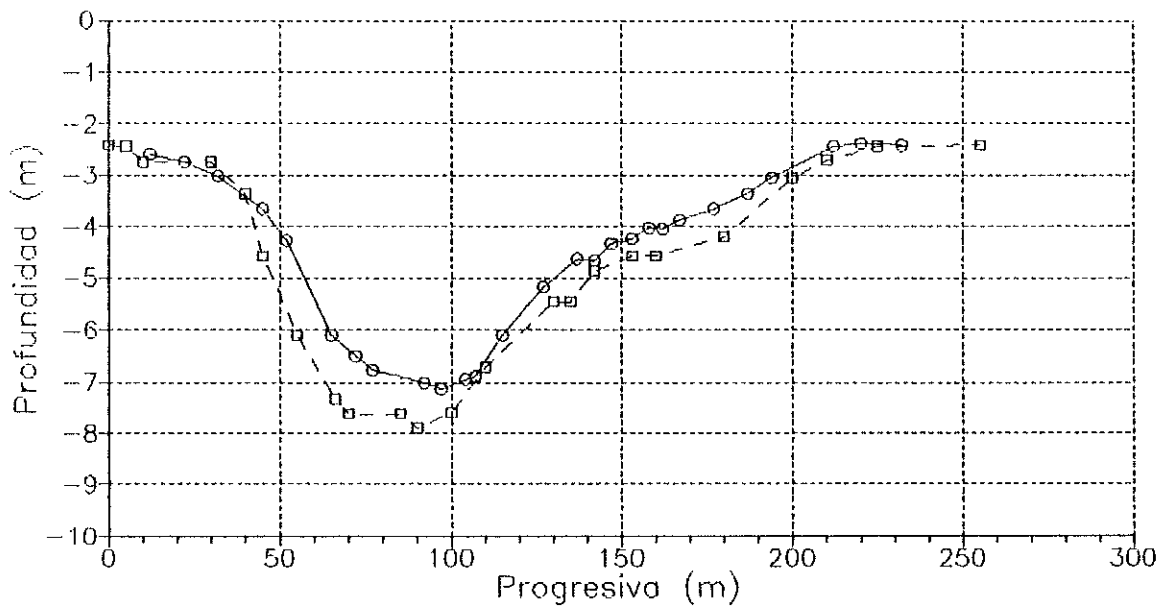
Figura Nº 4

FORM.LHA-3

Composición granulométrica del material en suspensión.

Figura Nº 5

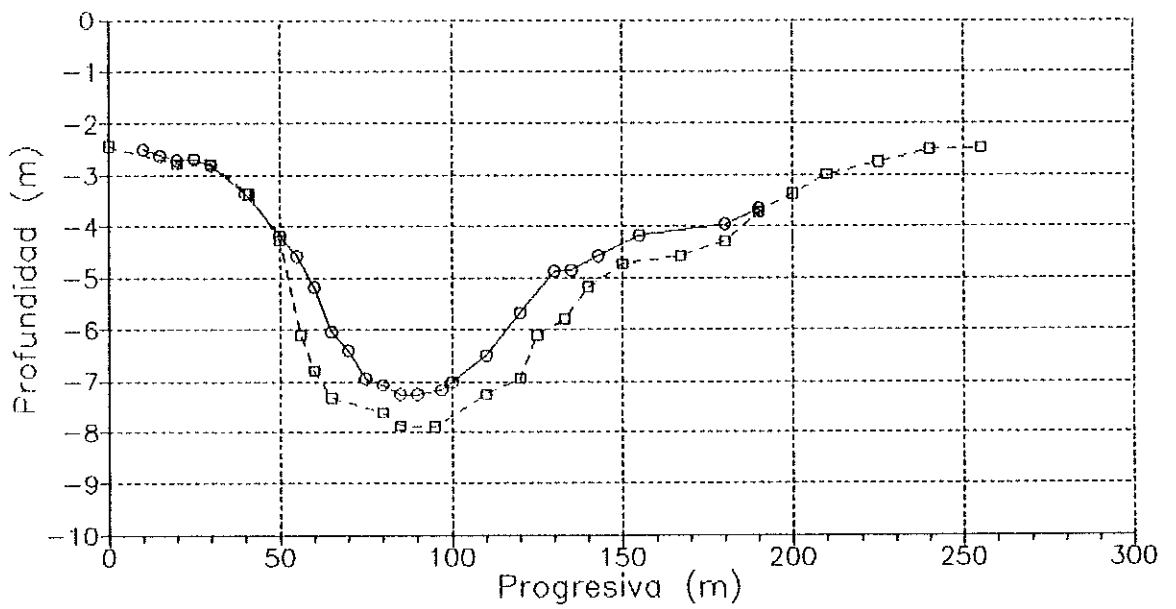




○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 1.8.

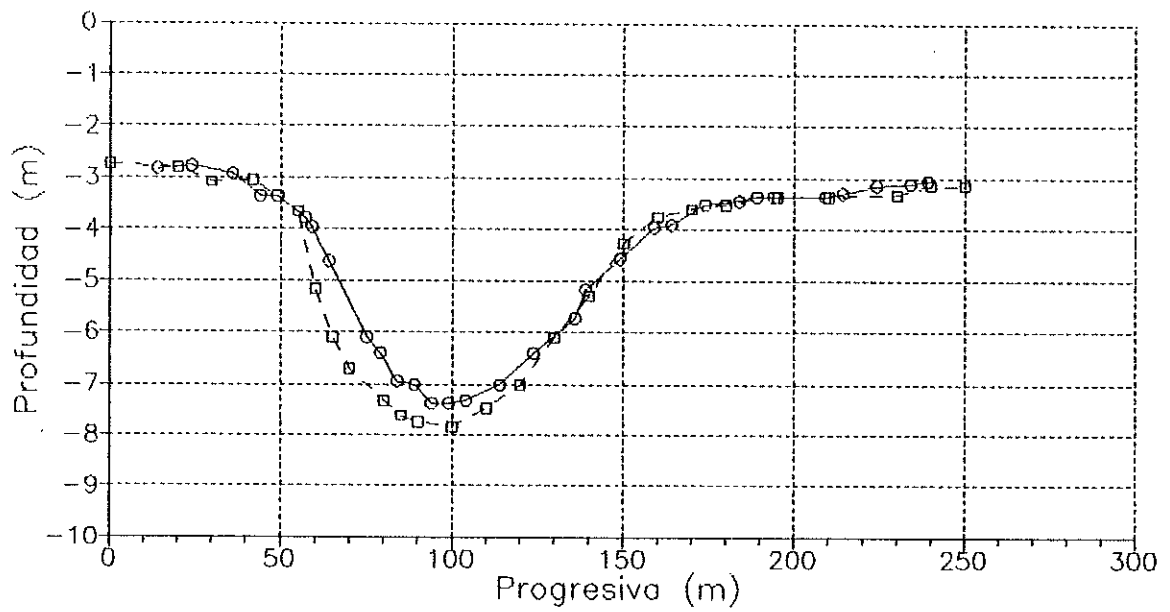
Figura Nº 6



○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 2.

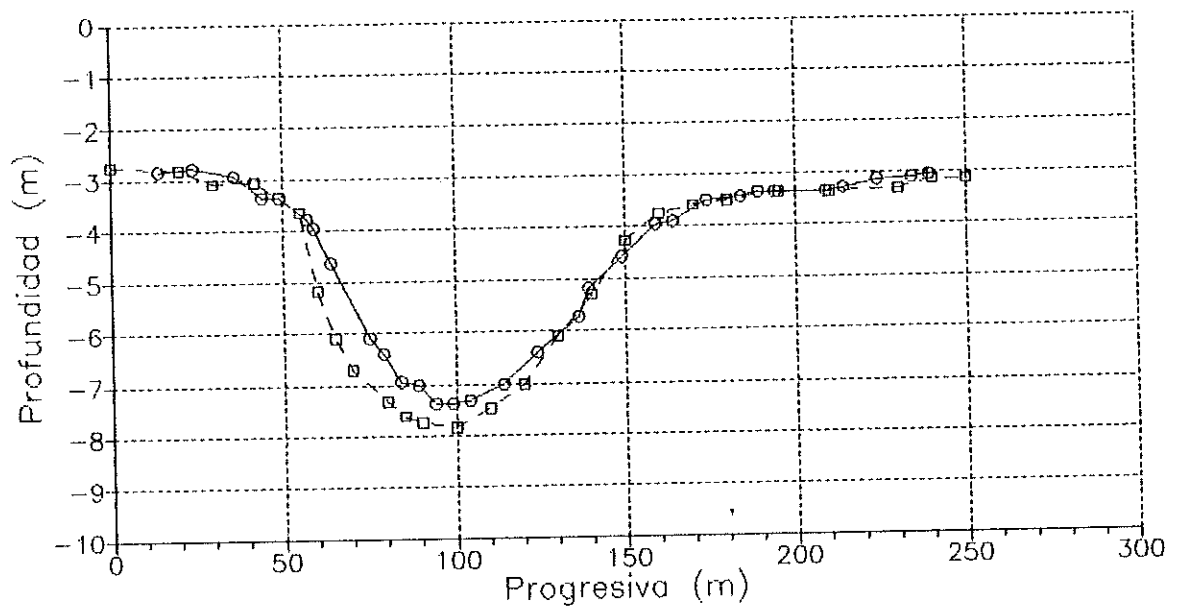
Figura Nº 7



○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 3.

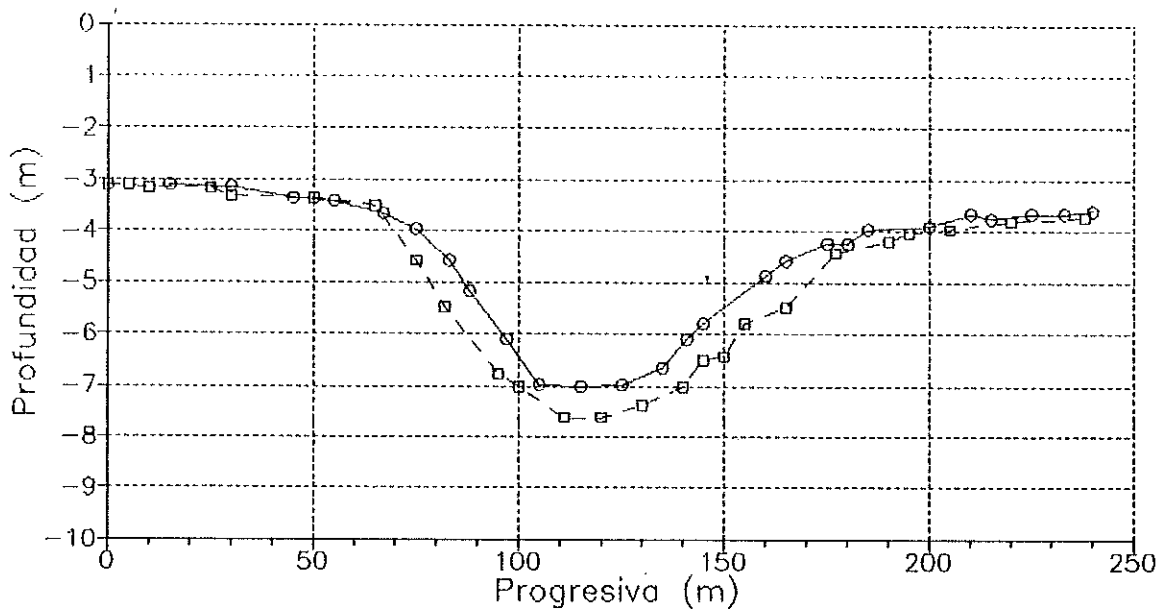
Figura Nº 8



oooo 1979
 oooo 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 3.2.

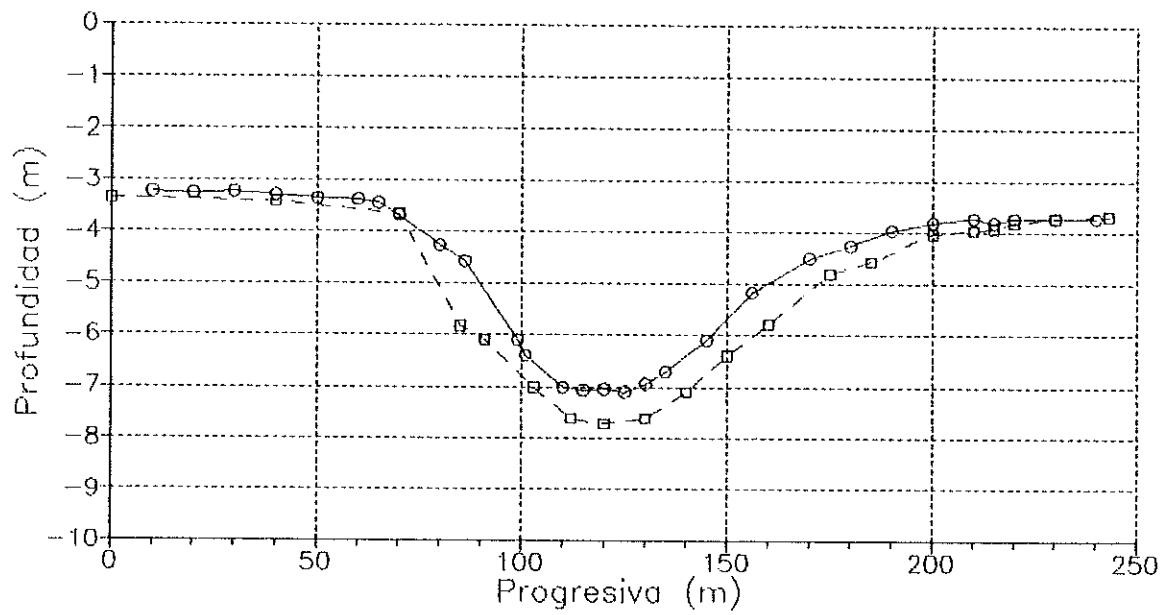
Figura Nº 9



○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 3.8.

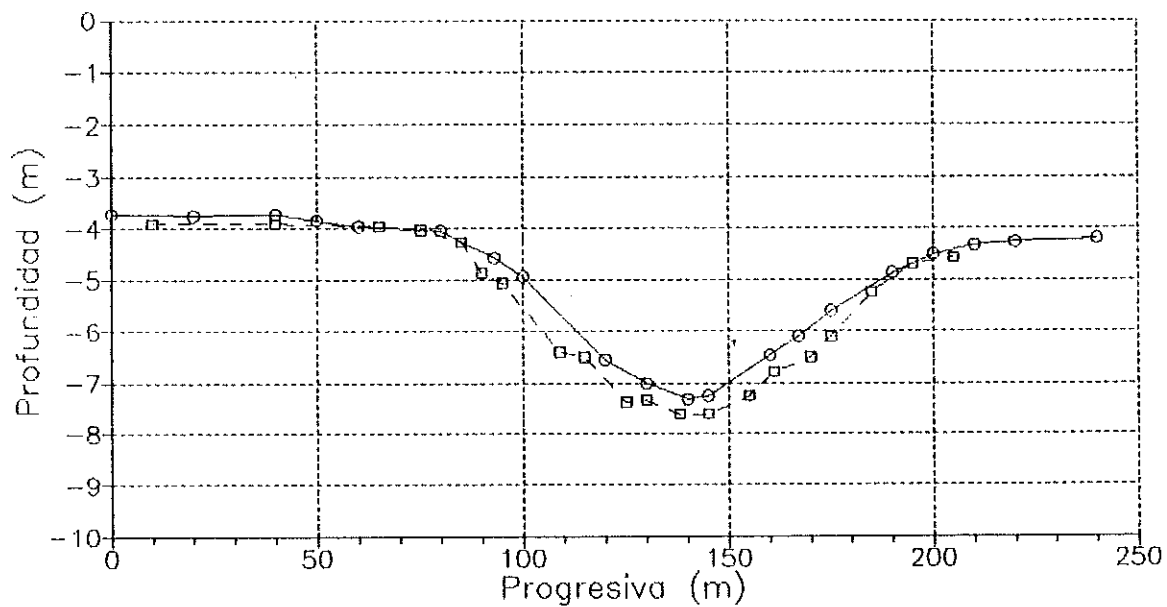
Figura Nº 10



○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

Canal Sur. 1978/1979. Km 4.

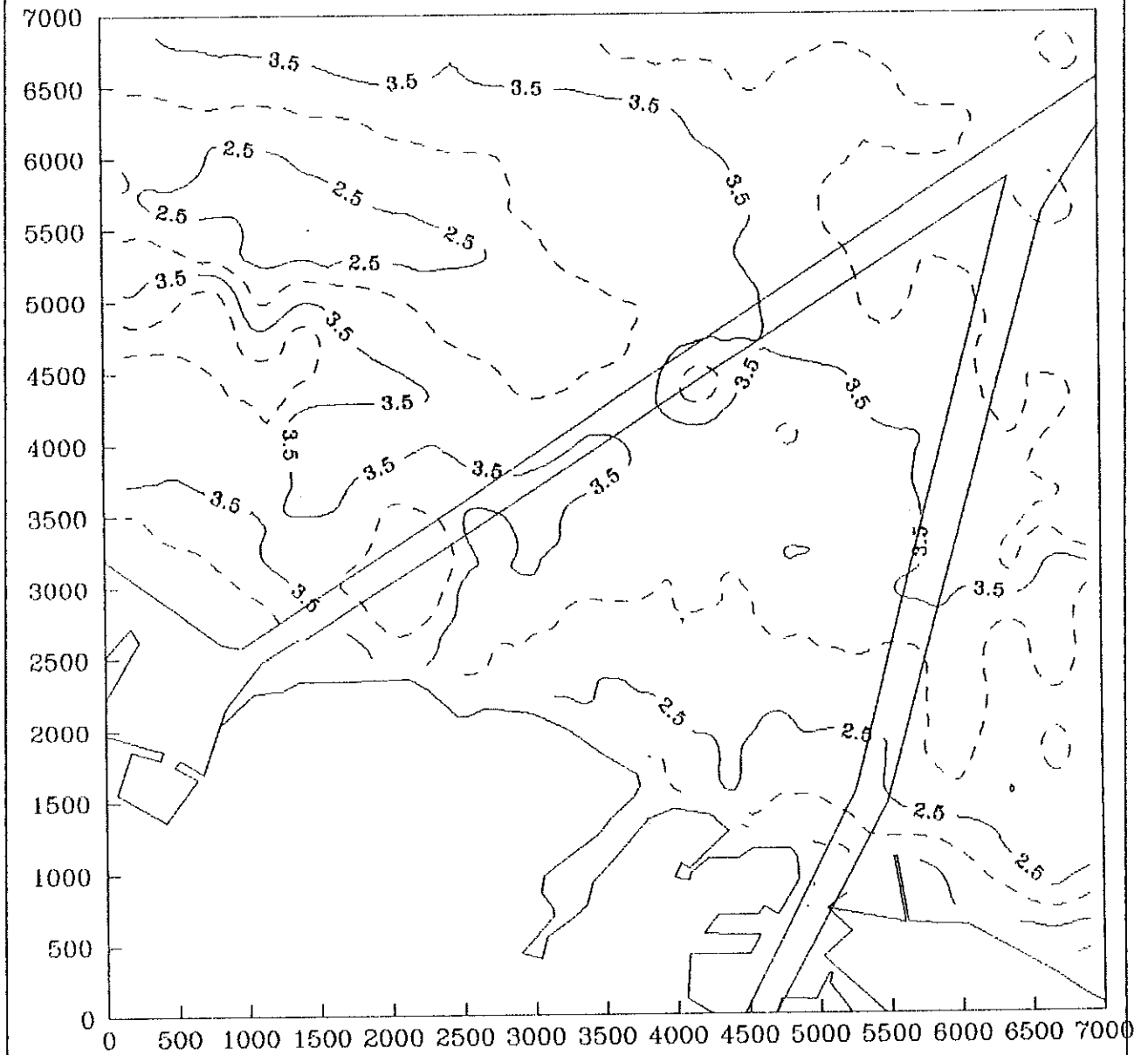
Figura Nº 11



○○○○○ 1979
 □□□□□ 1978

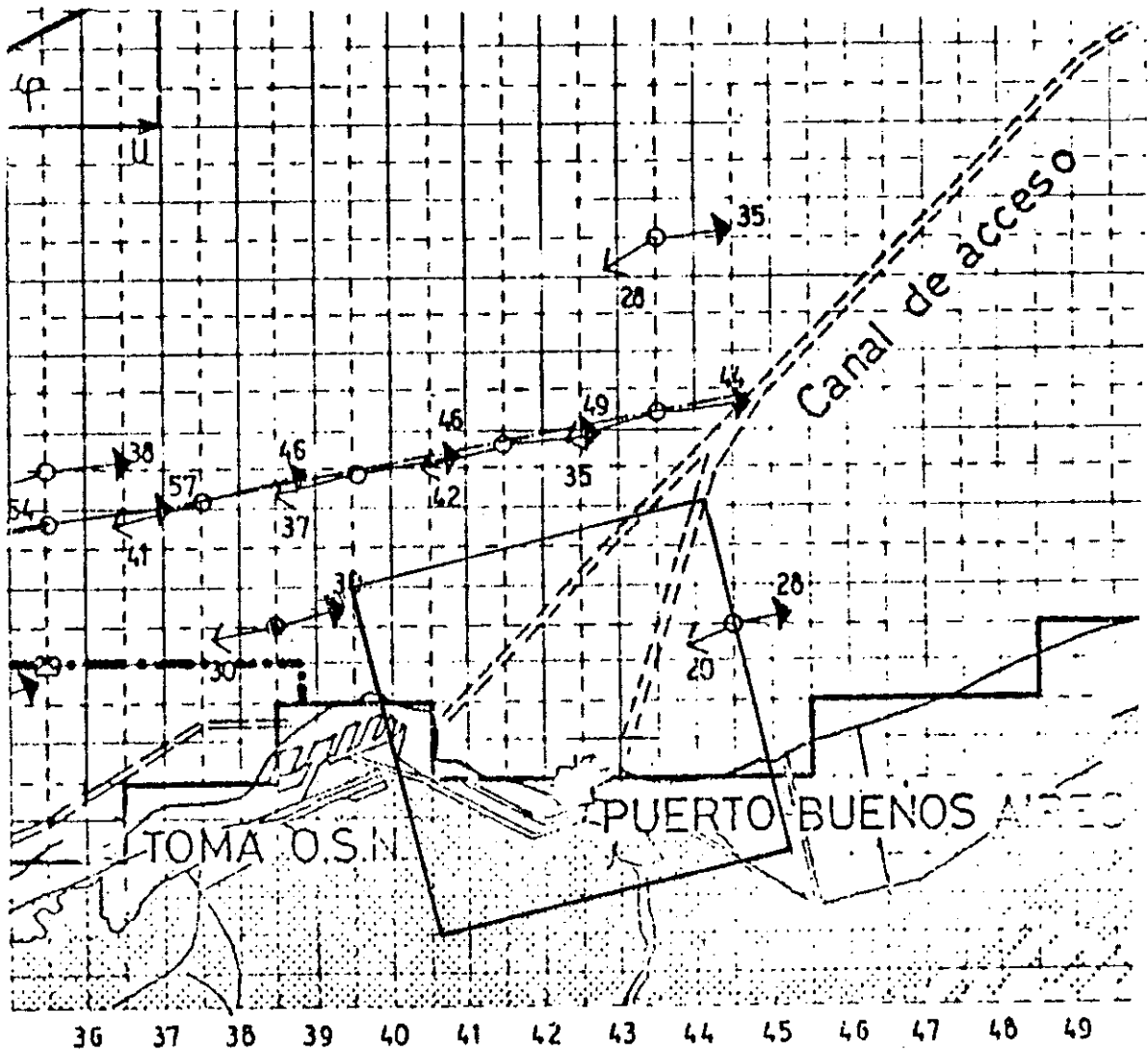
Canal Sur. 1978/1979. Km 5.

Figura Nº 12



Curvas de nivel en el área de estudio.

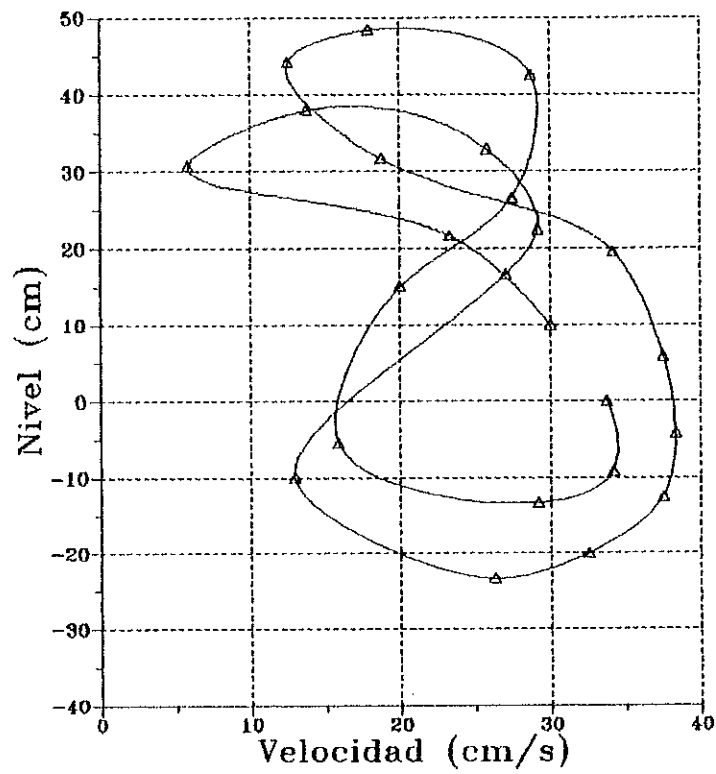
Figura Nº 13

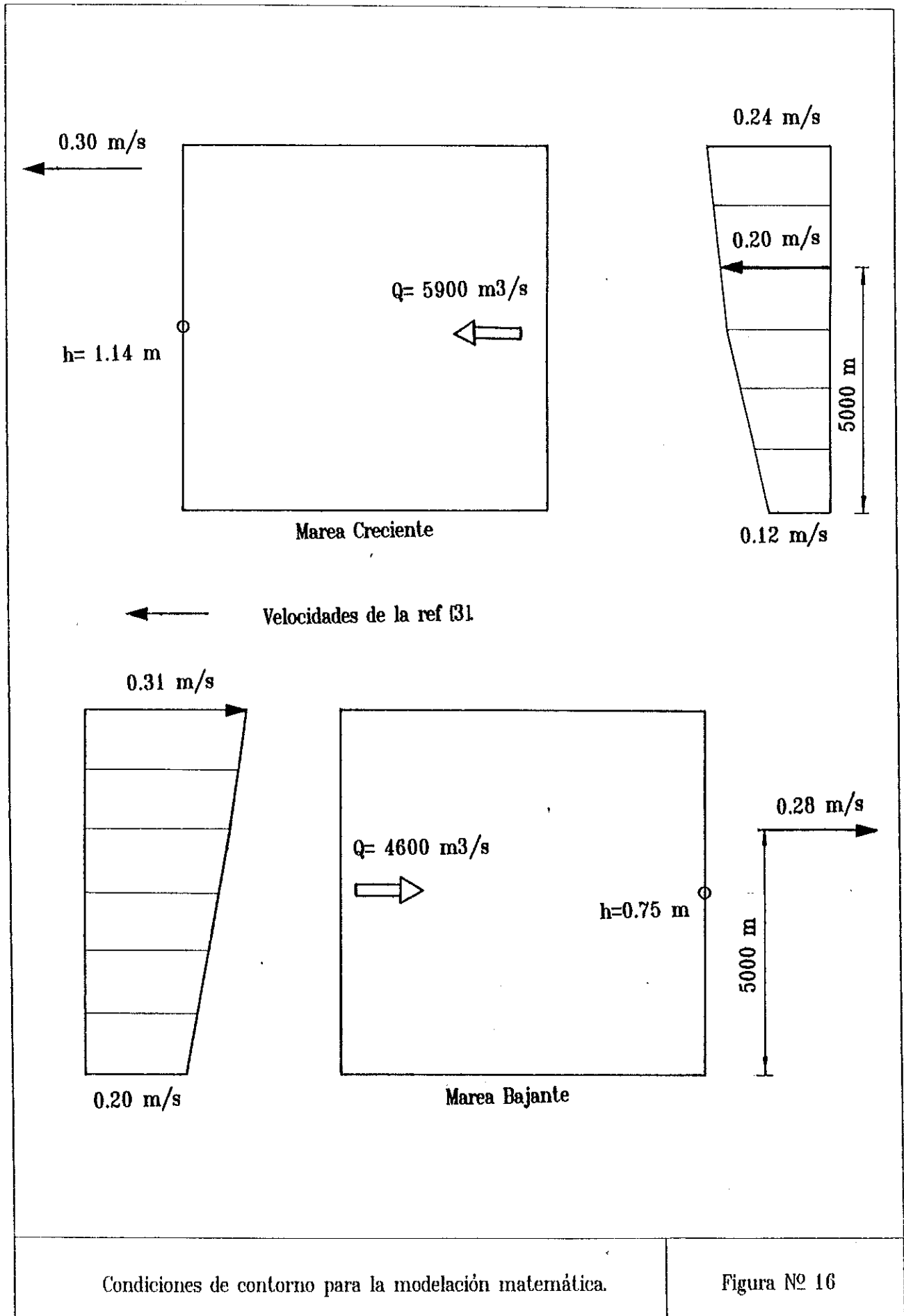


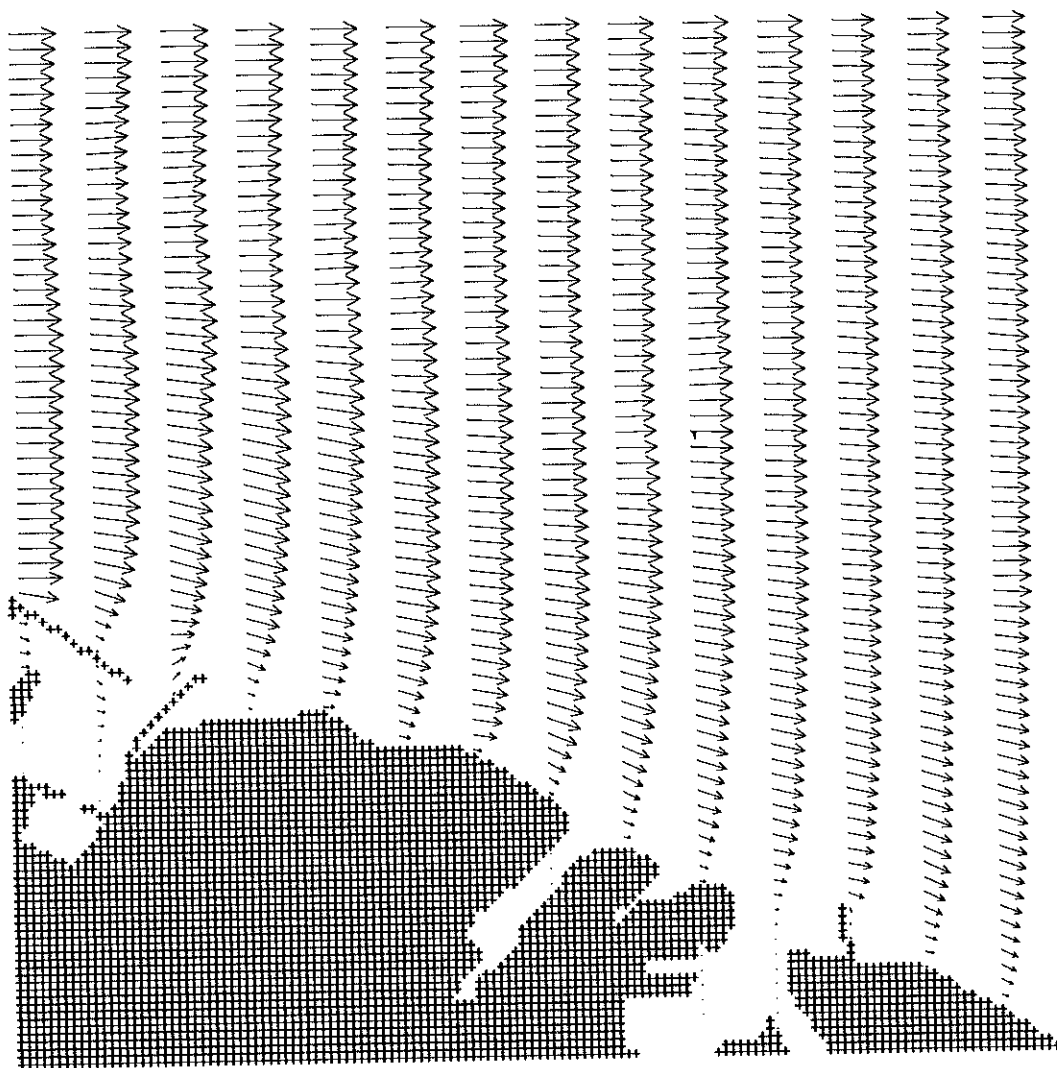
MODELO MATEMATICO DEL
 RIO DE LA PLATA SUPERIOR
 REGIMEN NATURAL (CON CANAL E. MITRE)
 MAREA SIN VIENTO
 PERIODO COMPRENDIDO ENTRE LAS 2 h DEL DIA 18-5-65
 A LA 1 h DEL DIA 19-5-65

Velocidad de la corriente en el área de estudio;

Figura Nº 14

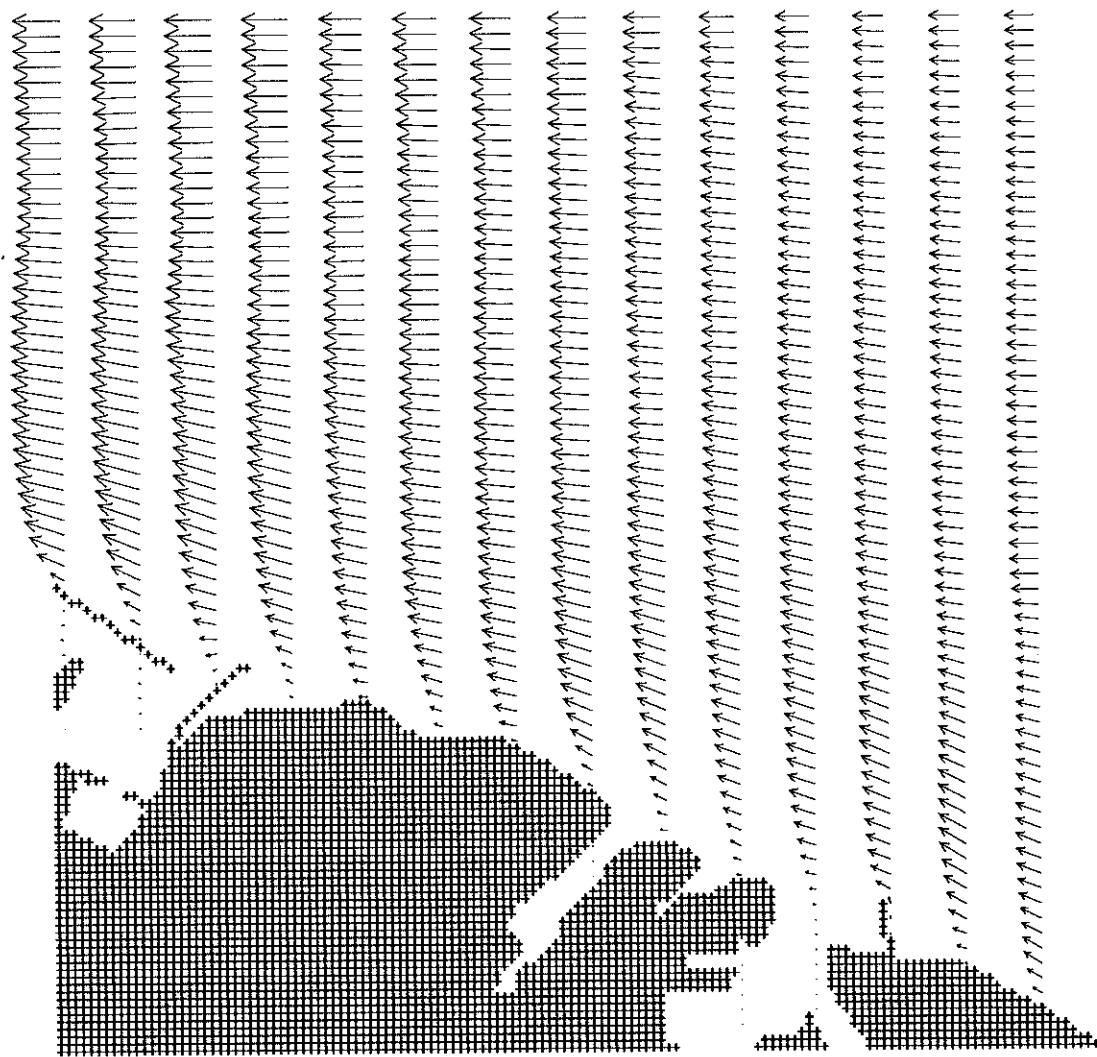






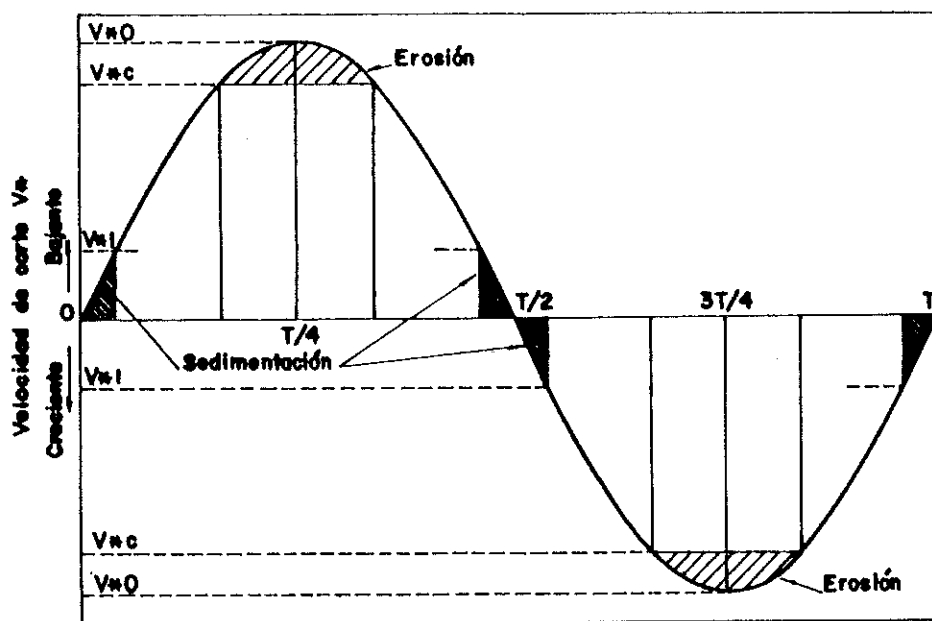
Campo de velocidades en marea bajante. Situación actual.

Figura Nº 17



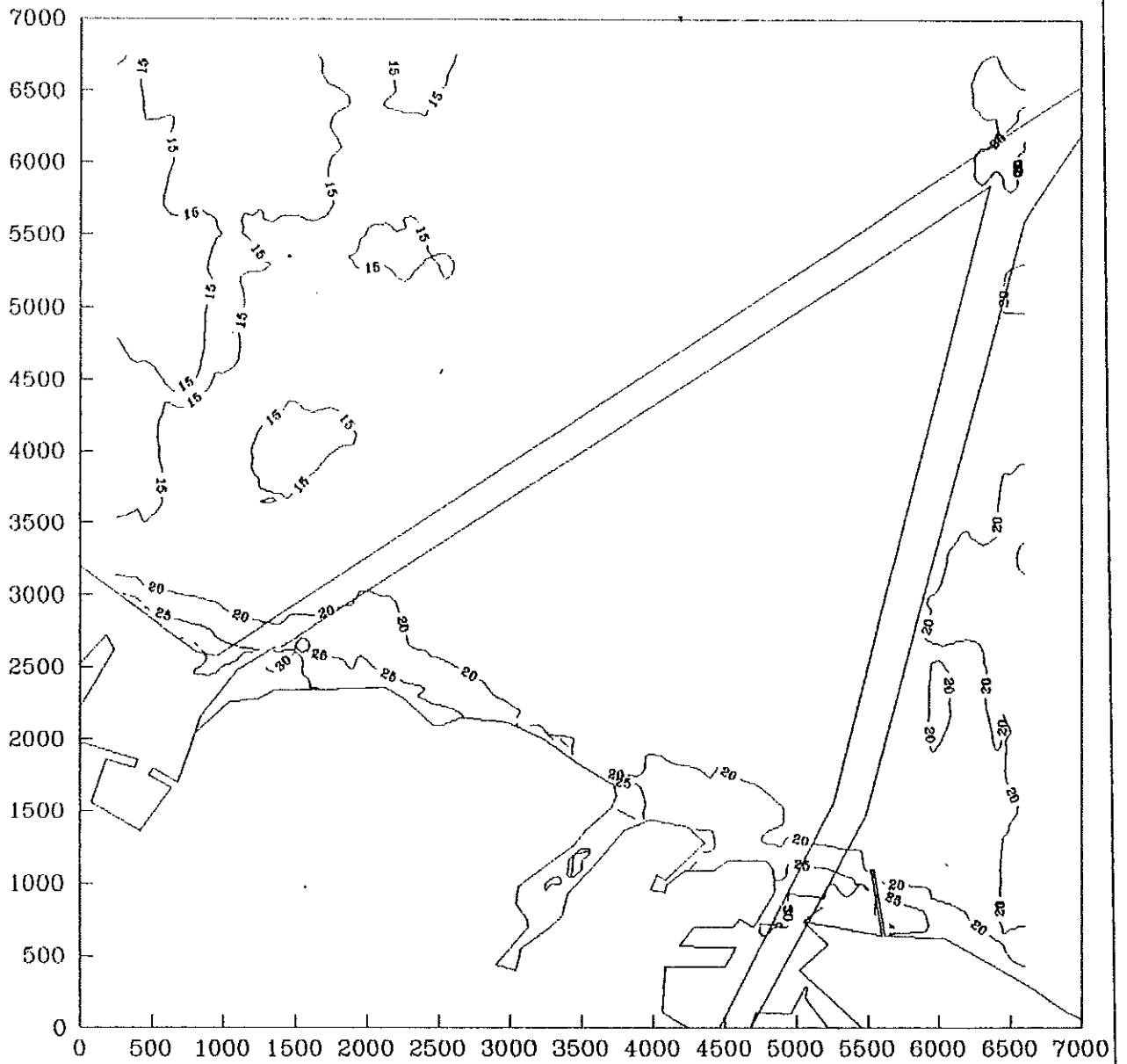
Campo de velocidades en marea creciente. Situación actual.

Figura Nº 18



Condiciones para el transporte de sedimentos en suspensión.

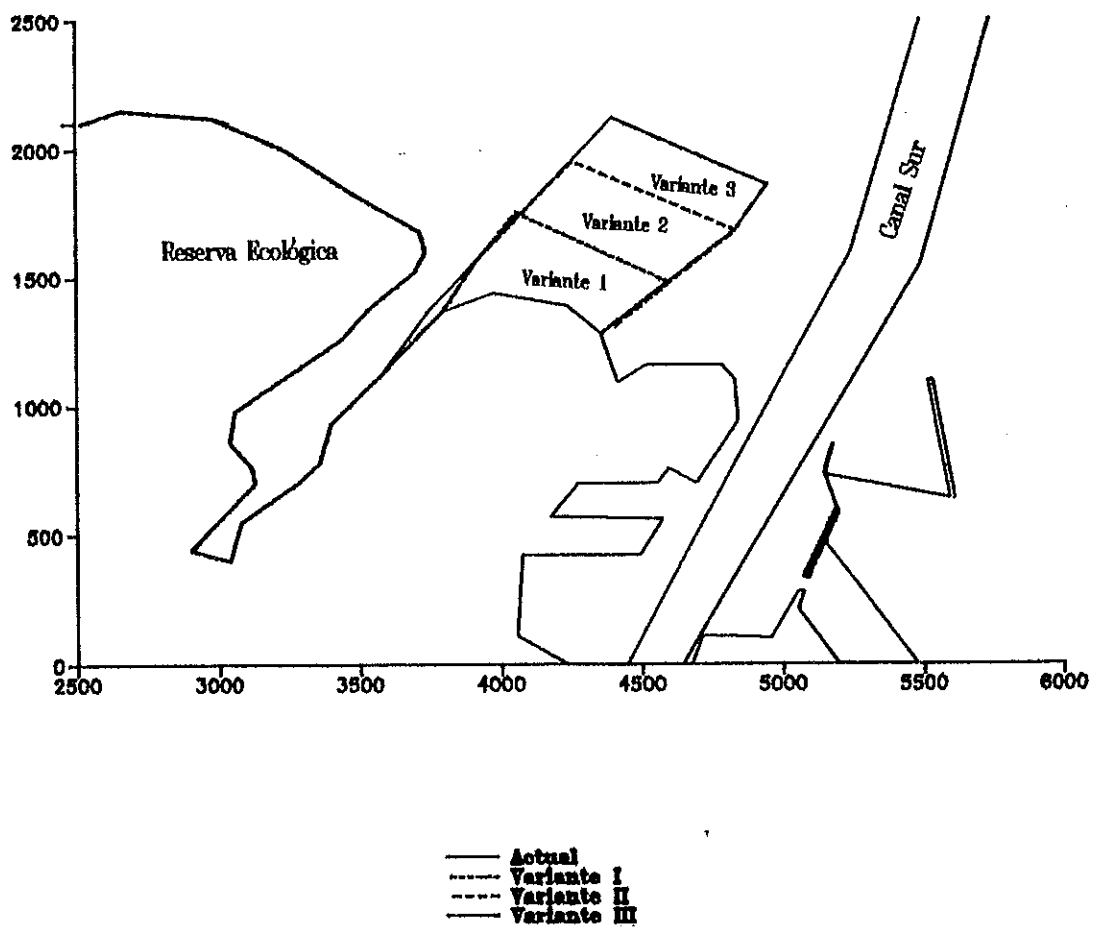
Figura Nº 19



Sedimentación en áreas costeras. Situación actual.

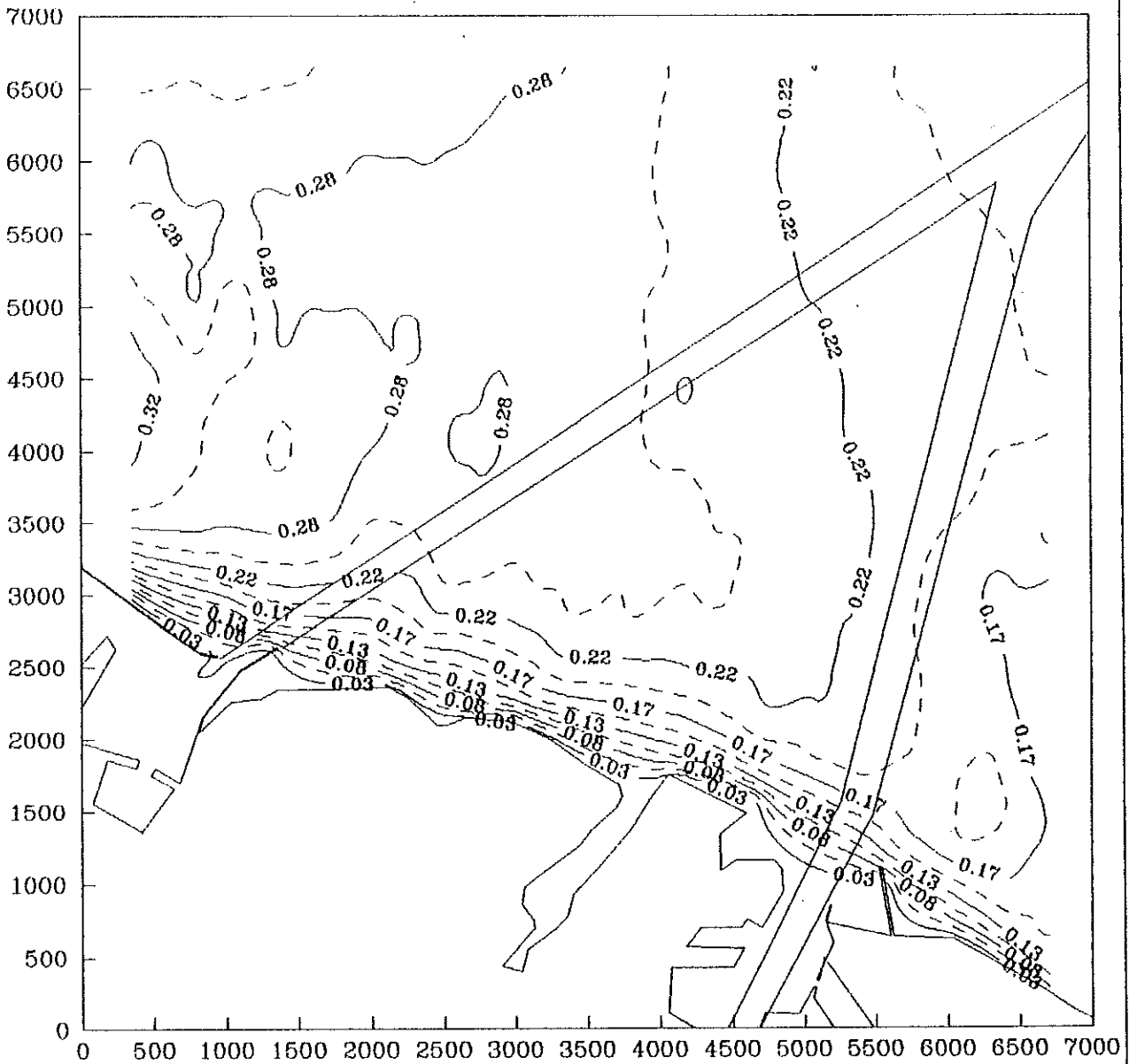
Figura Nº 20

Río de la Plata



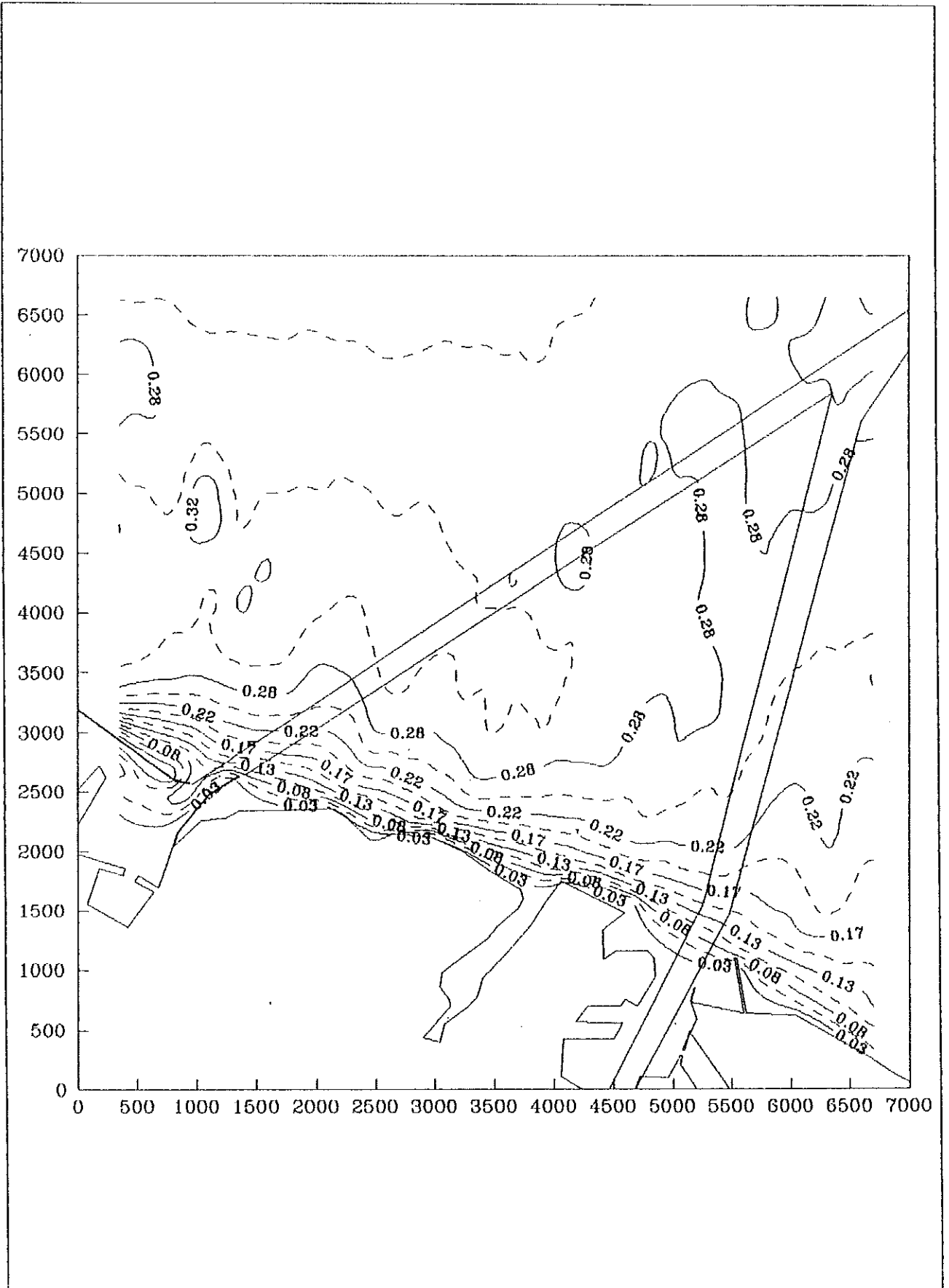
Disposición de las obras de relleno.

Figura Nº 21



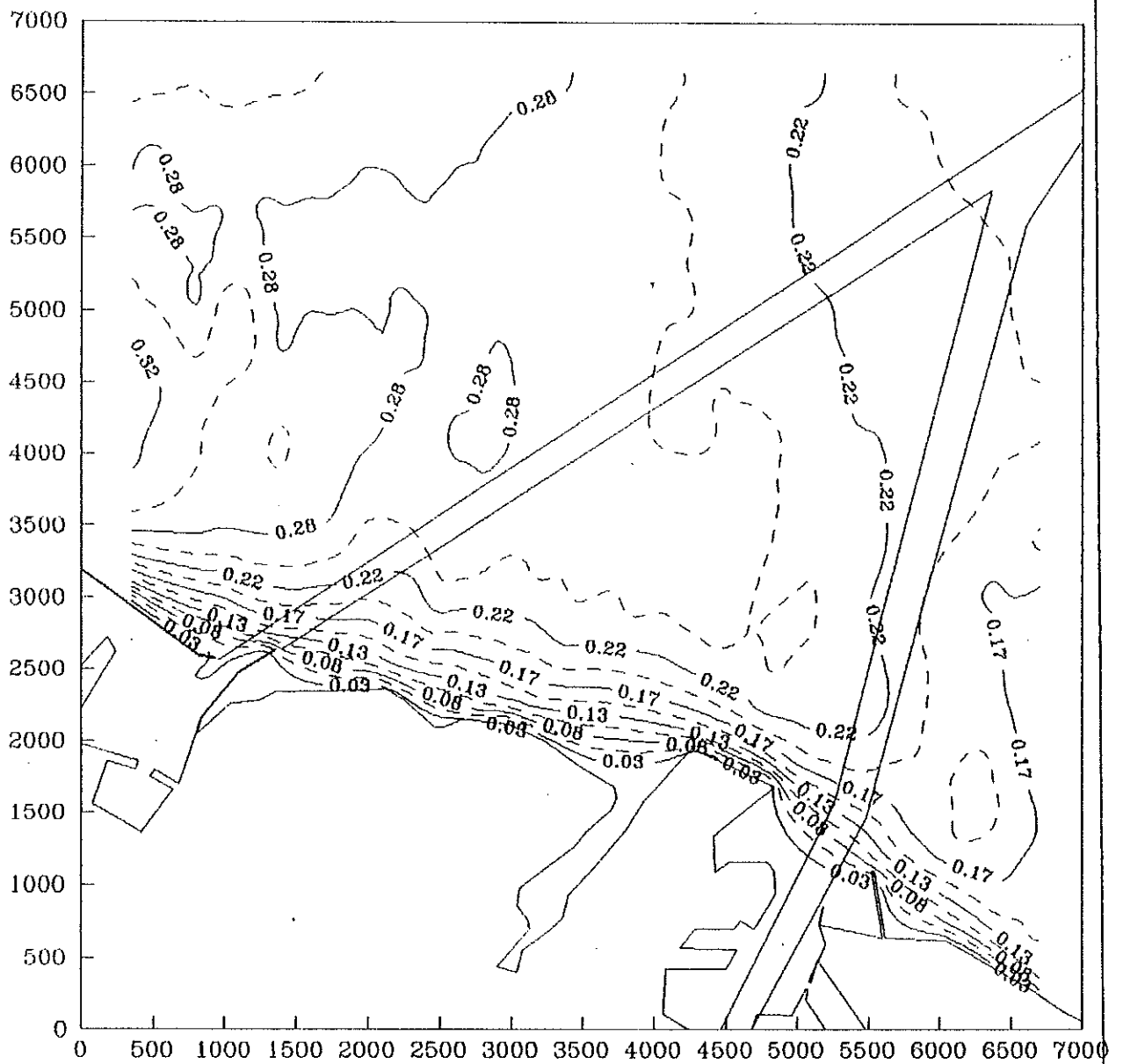
Curvas de iso-velocidad en marea creciente. Variante 1.

Figura Nº 22



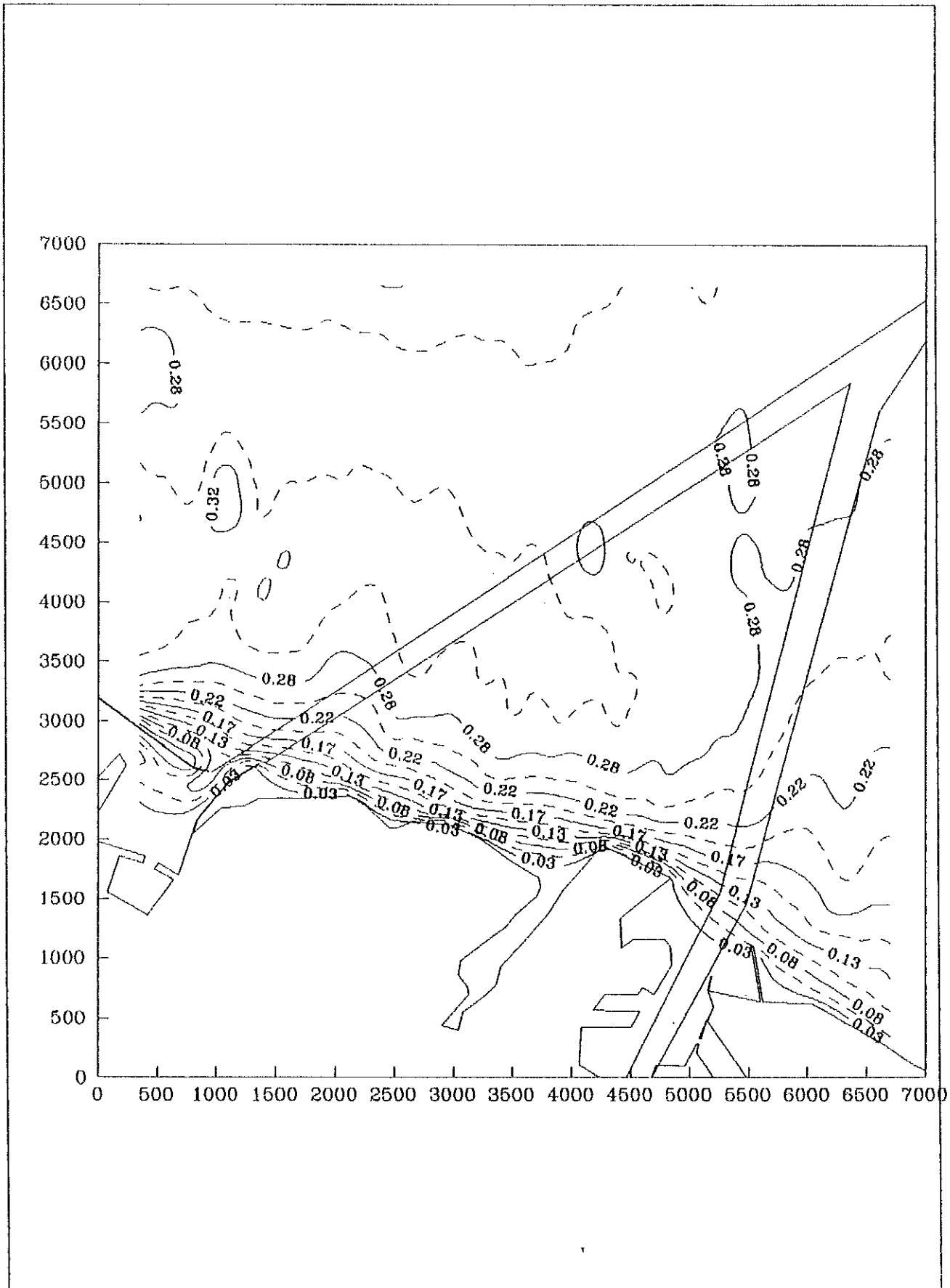
Curvas de iso-velocidad en marea bajante. Variante 1. .

Figura Nº 23



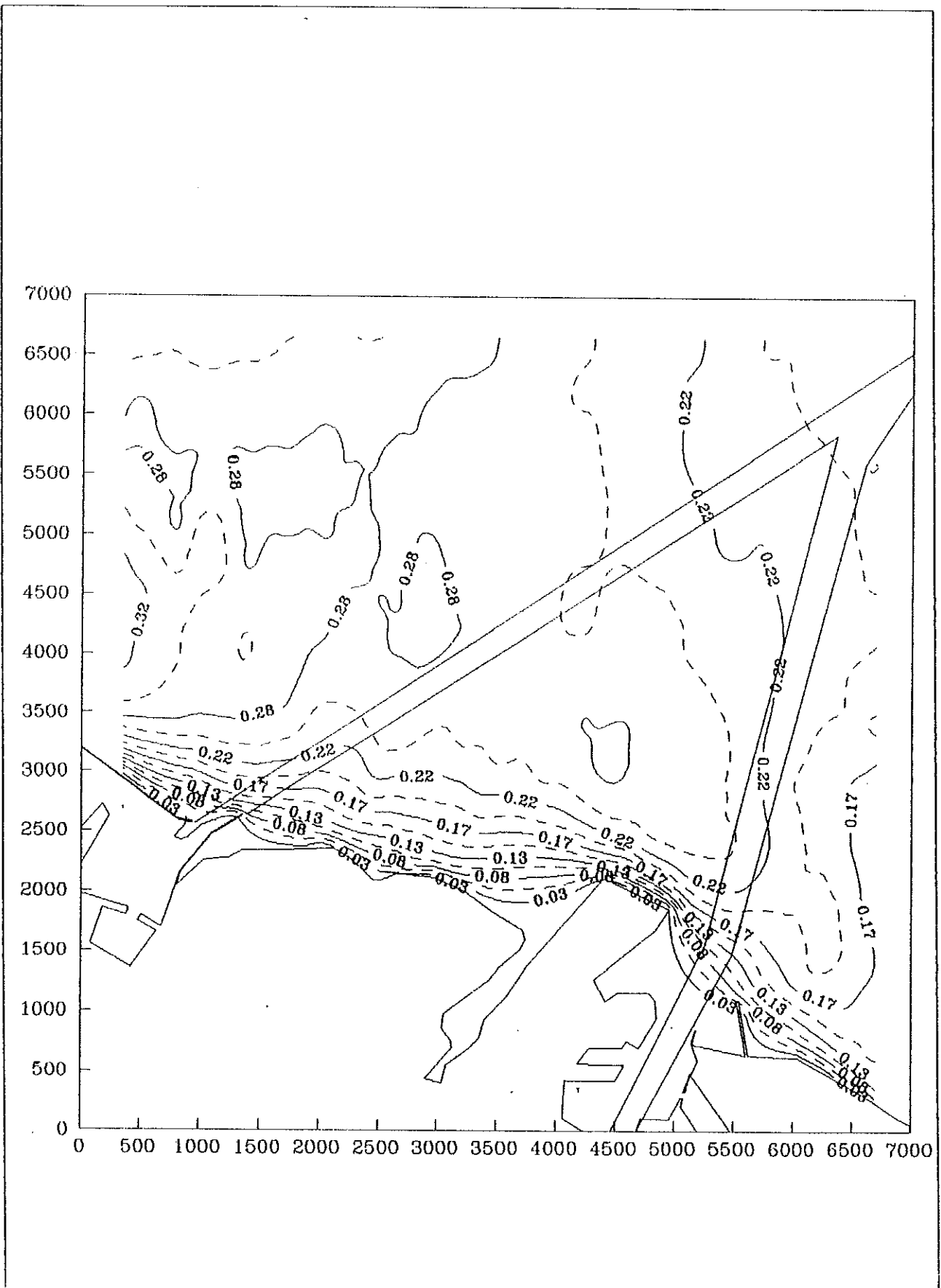
Curvas de iso-velocidad en marea creciente. Variante 2.

Figura Nº 24



Curvas de iso-velocidad en marea bajante. Variante 2.

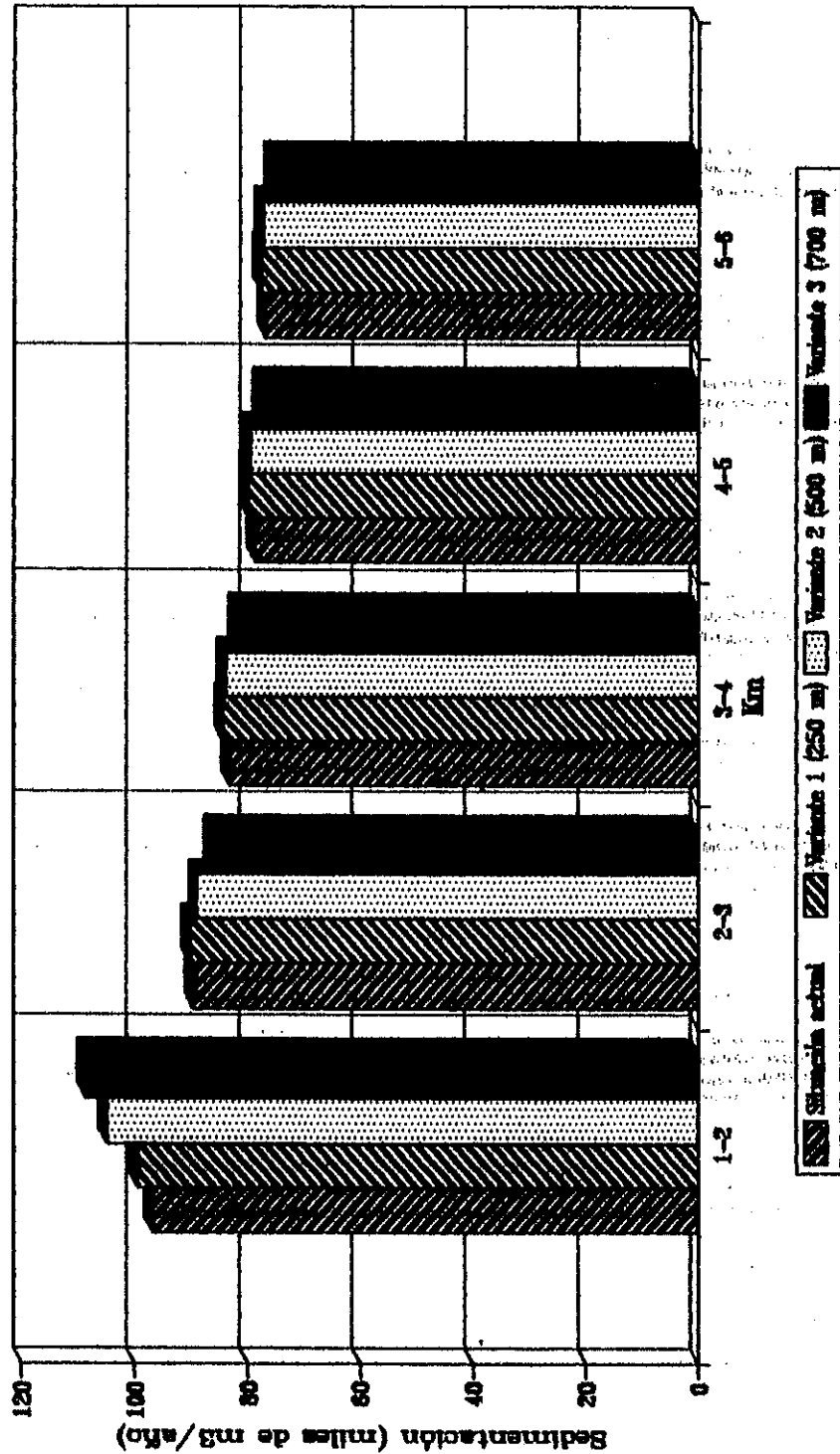
Figura Nº 25



Curvas de iso-velocidad en marea creciente. Variante 3.

Figura Nº 26

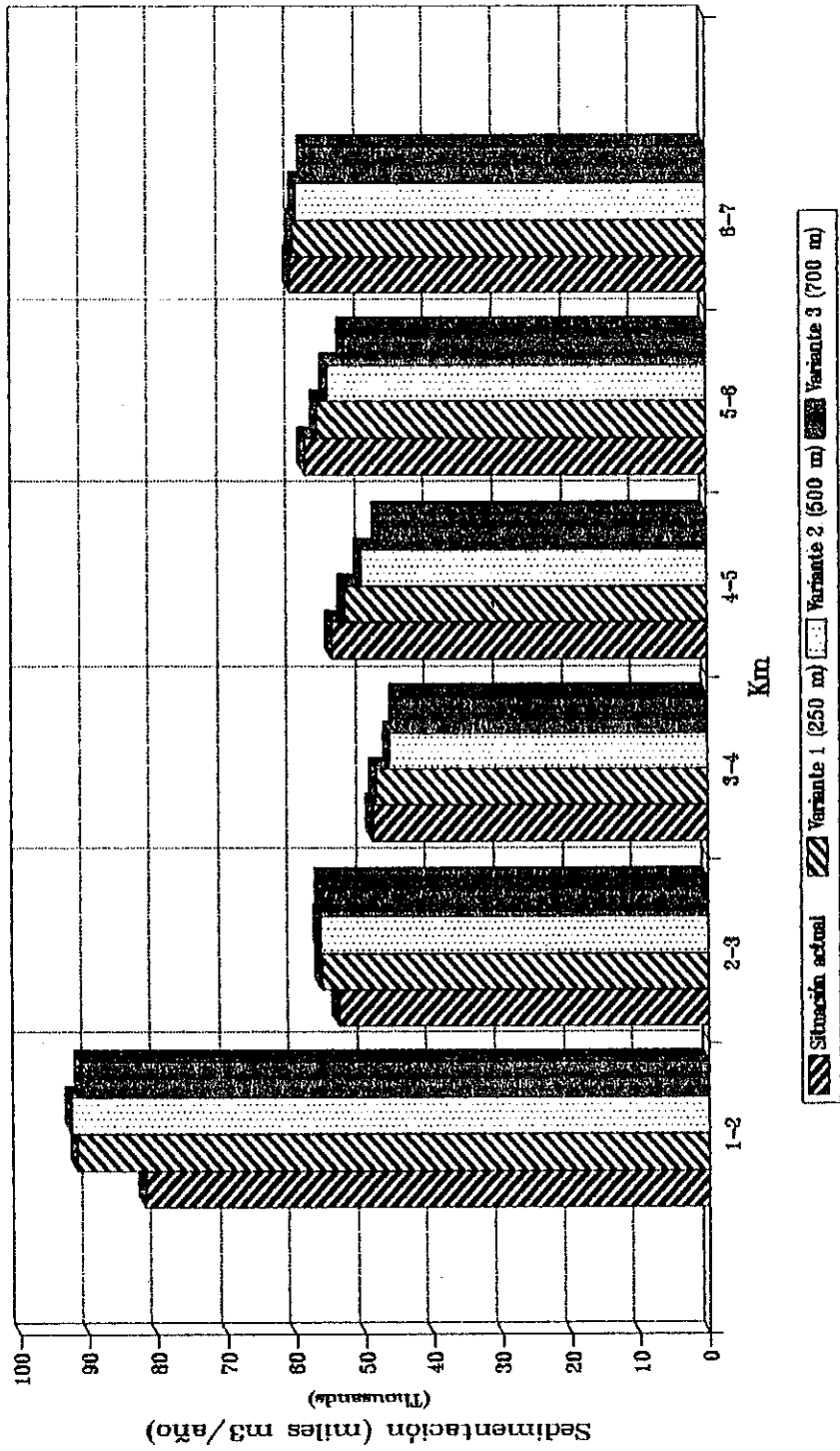
CANAL SUR
Sedimentación anual



Canal Sur. Cómputo de volúmenes sedimentados.

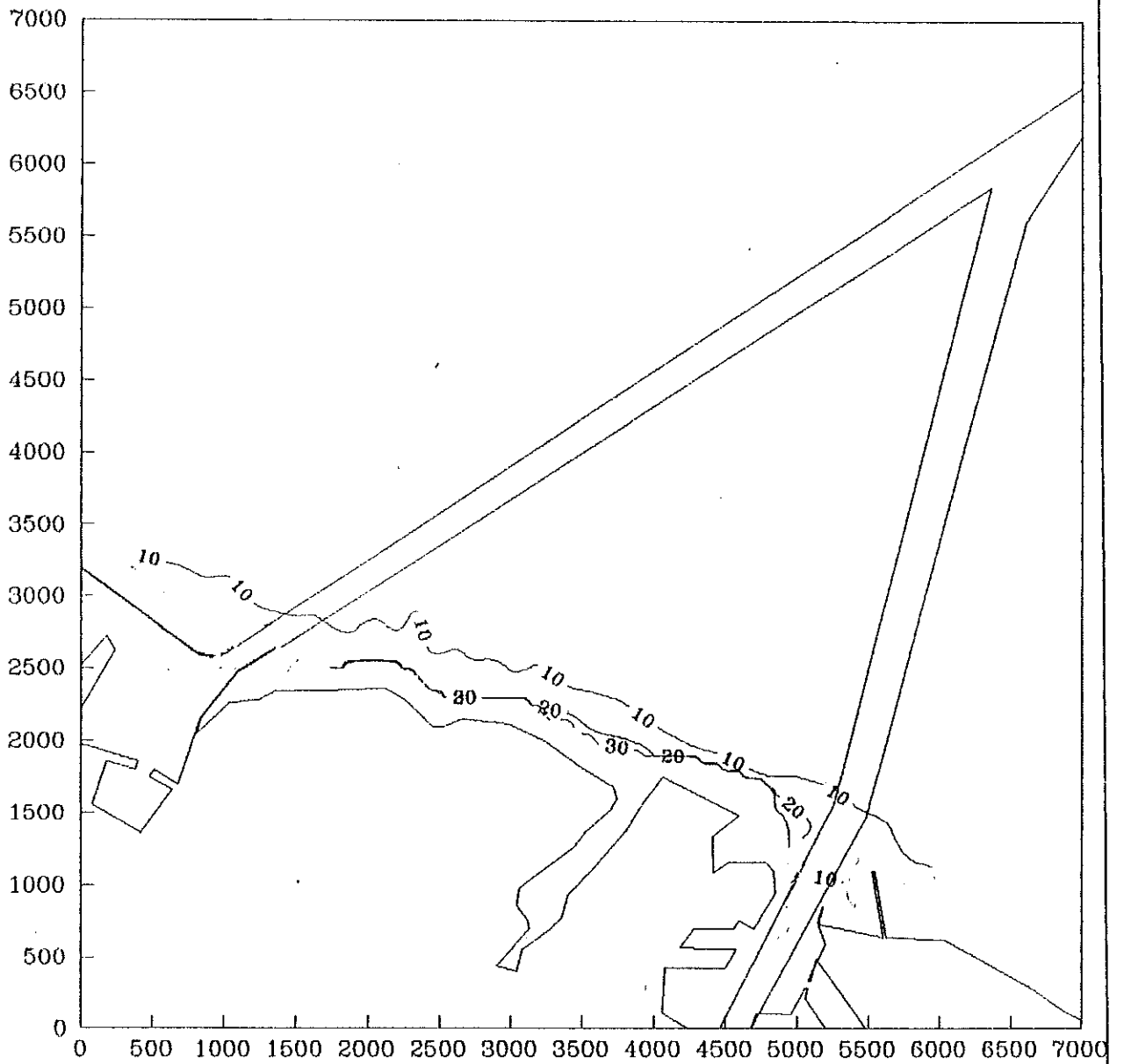
Figura Nº 28.

CANAL NORTE
Sedimentación anual



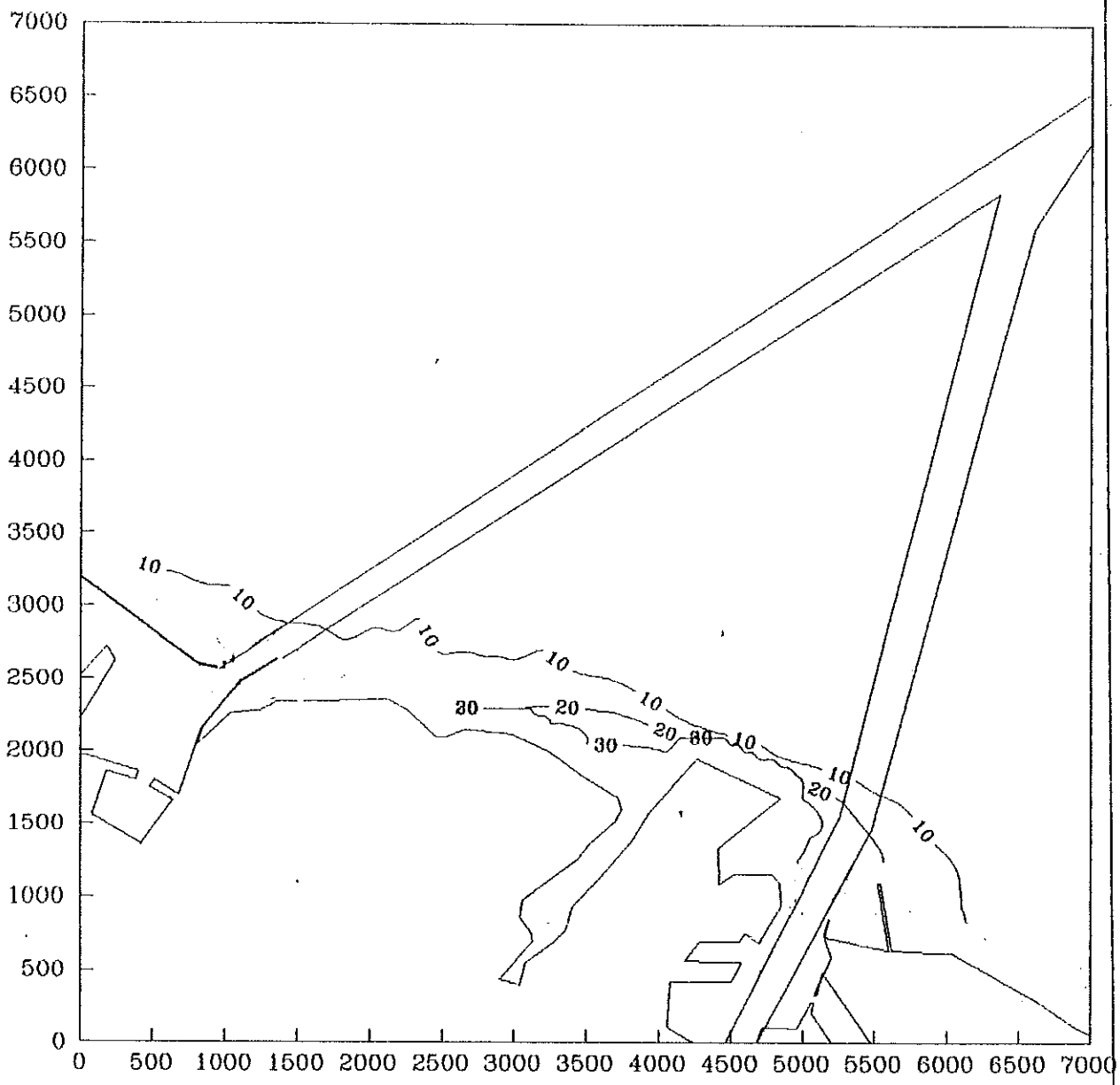
Canal Norté. Cómputo de volúmenes sedimentados.

Figura Nº 29



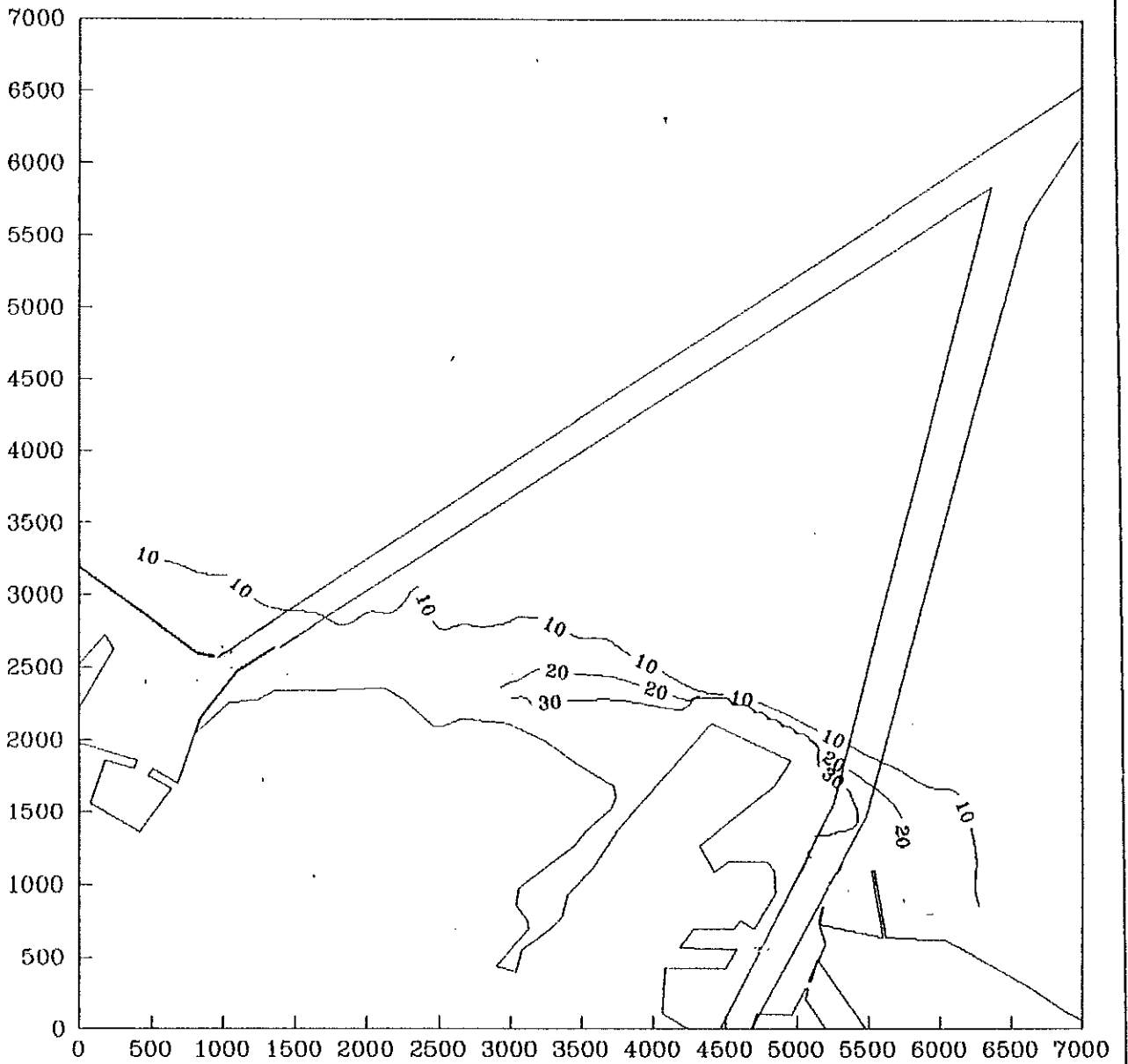
Variante 1. Sedimentación en áreas costeras.

Figura Nº 30



Variante 2. Sedimentación en áreas costeras.

Figura Nº 31



Variante 3. Sedimentación en áreas costeras.

Figura Nº 32