

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1977

07.77.03

REPUBLICA ARGENTINA

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ACARREO
RIO PARANA
TECNICAS NUCLEARES Y BATIMETRICAS**

**DIRECCION NACIONAL DE
CONSTRUCCIONES PORTUARIAS
Y VIAS NAVEGABLES**

AREA RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

**COMISION
NACIONAL DE
ENERGIA ATOMICA**

DEPARTAMENTO DISTRITO PARANA SUPERIOR

1977

REPUBLICA ARGENTINA

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ACARREO

RIO PARANA

TECNICAS NUCLEARES Y BATIMETRICAS

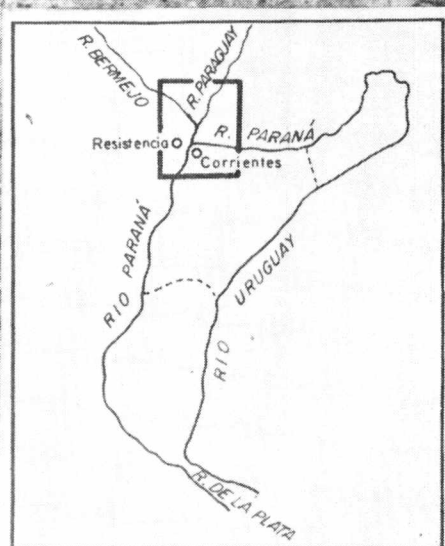
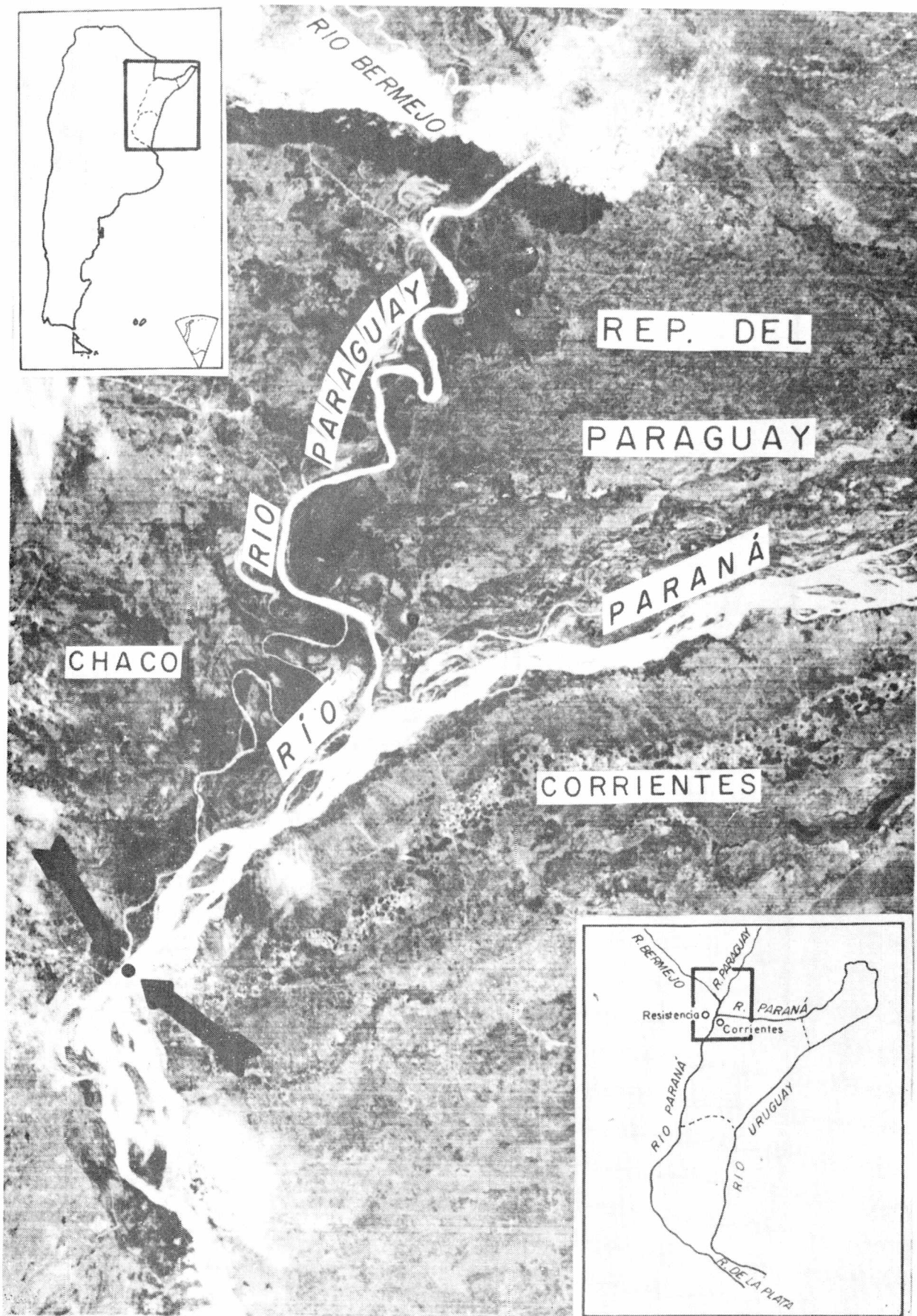
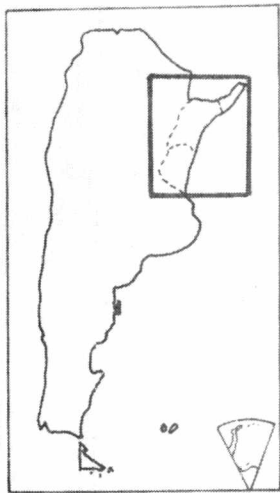
**DIRECCION NACIONAL DE
CONSTRUCCIONES PORTUARIAS
Y VIAS NAVEGABLES**

DEPARTAMENTO DISTRITO PARANA SUPERIOR

**COMISION
NACIONAL DE
ENERGIA ATOMICA**

DEPARTAMENTO RADIOISOTOPOS

1977



PREFACIO

Este estudio es ejecutado por grupos interdisciplinarios de trabajo de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCP y VN), con un aporte parcial de la Organización de Estados Americanos (OEA).

El programa y los objetivos originariamente trazados y expuestos en los dos primeros informes de progreso, fueron en parte alterados; unas veces por favorables circunstancias tales como el excepcional apoyo logístico logrado, mientras que otras, en cambio, impusieron limitaciones en virtud de contingencias o deficiencias de diversa índole.

La incorporación de técnicas batimétricas modernas para analizar y evaluar simultáneamente con las nucleares un mismo fenómeno y el procesamiento y cálculo por computación de los datos obtenidos en campaña, hacen a la parte positiva de las alteraciones mencionadas; la exclusión del estudio de acarreo en el Río Bermejo por contingencias propias de la naturaleza de estas experiencias y cierta incertidumbre respecto a la continuidad y sistemática ejecución de las campañas de medición, acorde con los requerimientos del ciclo hidrológico son la contrapartida que al menos en parte, creemos haber superado. Sólo resta efectuar la última campaña para dar por terminado este estudio.

Han participado en este estudio hasta el presente:

CNEA (Departamento Radioisótopos):

Héctor R. Gómez; Direc. del estudio	Jorge G. Graiño
Ricardo J. Gillen	Ursula I. Kopp
Luis C. Ayala	Casimiro J. Lazor
Silvio E. Rey	Humberto A. Delle Chiaie
Gregorio B. Baró	Adolfo F. Dorozs

DNCP y VN (Departamento Distrito Paraná Superior):

Horacio Balderotto y Angel Abas, Direc. Operaciones y Navegación.	
Marcos Roig	Víctor Zaracho
Arnaldo Gil	Juan Ledesma

En la elaboración de los programas de computación y análisis de los primeros resultados participaron Alvaro Velazco y Guillermo Zapata (JAN-Bogotá-Colombia) y en la fabricación del sedimento artificial marcado con Sc-46 participó Vicente Linuesa efectuándose la fundición del vidrio en Cristalerías Rex, a quienes expresamos nuestro reconocimiento.-

Resumen

Se hace en primer lugar una reseña referente a los antecedentes existentes en la Cuenca del Plata sobre transporte de sedimentos por acarreo.

La metodología aquí utilizada para cuantificar el transporte por acarreo, basada en la medición del desplazamiento de dunas (14) permite cubrir amplias áreas del lecho del río con excelente resolución y eficiencia. Las grandes dunas (sobre canal) y las más pequeñas (fuera de canal) son identificadas unívocamente y correlacionadas siguiendo racionales procedimientos puestos por primera vez en experimentación.

Antes de iniciar la medición sistemática durante un ciclo hidrológico se comprobó la baja dispersión de los resultados obtenidos midiendo cuatro perfiles longitudinales de igual profundidad e idénticas condiciones de flujo.

Las mediciones sistemáticas que pretenden abarcar un ciclo hidrológico completo (aún no ha finalizado) son ejecutadas midiendo periódicamente un perfil sobre canal y un perfil fuera de canal.

Simultáneamente se han ejecutado experiencias con trazadores radiactivos comprobándose que:

- .- El uso de un trazador de corto período de semidesintegración (Au-198) marcando el sedimento natural ha permitido comprobar la dirección preferencial del transporte y además efectuar algunas comprobaciones semicuantitativas referentes al lapso mínimo de mezclado del sedimento marcado con el sedimento del lecho.
- .- El uso de un trazador de largo período de semidesintegración (Sc-46) incorporado a un sedimento artificial ha permitido seguir su desplazamiento hasta cubrir, por lo menos, 10 meses (fecha de la última campaña). Se presentan inconvenientes para medir o evaluar el espesor del transporte, proponiéndose aquí una posible alternativa cuya validez aún no estamos en condiciones de evaluar.

Las mediciones sistemáticas del transporte de sedimentos utilizando trazadores radiactivos se efectuaron fuera de canal, simultáneamente con las mediciones batimétricas. Las grandes pendientes o desniveles existentes en cortos trazados perpendiculares al canal impiden navegar, arrastrando el trineo y detector de radiación.-

Summary

First a review of existing procedures for sediment transportation by carrying in the Río de la Plata area, is made.

The methodology used for counting sediment transportation by carrying, based on the measurement of dune displacement (14) allows to cover vast river bed areas with good resolution and efficiency. High dunes (within channel) and low dunes (outside channel) are identified univocally and correlated by rational proceedings that are being used experimentally for the first time.

Before starting systematic measurements during a hydrological cycle low dispersion of results was confirmed by measuring longitudinal profiles of equal depth and identical flow conditions.

Systematic measurements that intend to cover a whole hydrological cycle (at present unfinished) are being carried out, measuring periodically one profile within channel and one outside.

Simultaneously we have carried out experiments with radioactive tracers:

- .- The use of a short half-life tracer (^{198}Au) for labelling natural sediment has allowed to confirm a preferential direction for sediment transportation and to establish semiquantitative data for minimum blending time of labelled sediment and river bed sediment.
- .- The use of a long half-life tracer (^{46}Sc) incorporated on an artificial sediment has allowed to measure its path within, at least, ten months (the date of our last field work). We have had some difficulties for measuring or estimating transport thickness, and therefore we present an alternative whose value cannot yet be estimated.

Systematic measurements of sediment transportation using radioactive tracers have been carried out outside channel simultaneously with bathymetric measurements. Strong slopes and unevenness existent within short traces perpendicular to the channel hinder sometimes sailing, because the sledge with radiation detectors is dragged away.

1.0.0 ANTECEDENTES PARA LA CUENCA DEL PLATA RELATIVOS AL
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ACARREO E INTERCAMBIO *
ENTRE EL LECHO Y LA CORRIENTE

Para acrecentar y mantener la navegación de los ríos que forman la cuenca, la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables ejecuta periódicos y sistemáticos trabajos de dragado. Sus evaluaciones y estadísticas referentes a volúmenes anuales de dragado en distintos canales o tramos de los mismos deben ser la base y referencia para cualquier estudio de transporte de sedimentos por acarreo e intercambio, particularmente en aquellos pasos o barras donde los mecanismos de rodamiento, resbalamiento y pequeñas saltaciones (acarreo) son predominantes durante largos lapsos del ciclo hidrológico y causa principal del atarquinamiento de los canales artificiales.

El análisis cronológico de los cambios de conformación del lecho en una sección o tramo del cauce, durante períodos suficientemente prolongados, es también base de un método de cálculo que puede resultar sumamente útil si se posee confiable información al respecto.

Algunas Instituciones realizan también periódicas evaluaciones en estaciones fijas de aforo; esta información está referida principalmente al transporte de sedimentos de suspensión, siendo muy escasos los datos relativos al acarreo de fondo e intercambio.

Para proyectar o ejecutar obras de infraestructura, se han realizado en los últimos años algunos estudios orientados a la determinación de las masas de sedimentos transportadas por acarreo en áreas afectadas por dichas obras. Pasamos a sintetizar aquellos estudios que por su importancia o afinidad con este trabajo consideramos de interés.

1.1.0 ESTUDIOS BASADOS EN EL DESPLAZAMIENTO DE
 DUNAS CON CONTROL BATIMETRICO

1.1.1 Movimiento de las ondulaciones del lecho del Río Paraná(1)(2) Este estudio fué ejecutado entre 1967 y 1968 sobre el brazo principal del río, en la zona donde se

* Algunos Autores denominan saltación a este intercambio. Para evitar confusiones con la saltación (o pequeña saltación) involucrada en el mecanismo de acarreo hemos eludido esta terminología.

construyó el túnel subfluvial que une las ciudades de Santa Fé y Paraná.

Los resultados obtenidos cobran significación si se tiene en cuenta que el

$$0,5 \text{ m}^3/\text{día} < q < 6,5 \text{ m}^3/\text{día} \cdot \text{m}$$

$$v = 1,2 \text{ m/día}$$

$$v_{\min} = 0,21 \text{ m/día}$$

$$v_{\max} = 2,6 \text{ m/día}$$

$$q = 2,85 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{Q}{1000}\right)^{3,5}$$

$$\Delta h = 2 \text{ m}$$

$$\lambda' : 40 \text{ m a } 200 \text{ m}$$

$$h = 14 \text{ m}$$

$$A_{r10} = 1400 \text{ m}$$

$$\gamma' = 1,8 \text{ ton/m}$$

$$d_{50} = 0,38 \text{ mm}$$

desplazamiento de las dunas fue seguido durante veinte meses, repitiéndose periódicamente un perfil sobre el talweg de 1.200 m de extensión y una profundidad media del orden de los 14 m.

Se aprecia una buena correlación entre la velocidad promedio de un grupo de dunas y los caudales flujos; algunas dunas cambian temporalmente de forma resultando difícil su ulterior reconocimiento.

Las relaciones empíricas conocidas, entre altura y longitud de dunas, no satisfacen razonablemente a los valores medidos. También se advierte que las mayores alturas de dunas no concuerdan predominantemente con los mayores tirantes de agua.

Los caudales específicos transportados por acarreo para distintas velocidades o caudales de agua verifican, en este caso, una buena concordancia con la

fórmula establecida en 1.934 por Armin Schoklitsch* (3) (9). El uso de otras fórmulas o ecuaciones (Meyer Peter-Muller, Einstein, etc.) acarrearía considerables errores, fuera de todo razonable límite.

1.1.2 Identificación de aprovechamientos hídricos de múltiples propósitos en el Rfo Alto Paraná: (4) Fue ejecutado este estudio en 1.971, cuatro kilómetros aguas arriba del Puerto de Candelaria siendo seguida una duna cuidadosamente seleccionada durante treinta y tres días.

Se operó con embarcación fondeada, buscando que el trasductor de la sonda se colocara sobre la vertical del valle seleccionado, con gran precisión. Si bien el período de observación no incluyó como se había previsto el lapso de crecientes (que llegaron inoportunamente) resulta de interés transcribir algunos resultados: "Habiéndose" "detectado que durante treinta y tres días la duna en estudio, de dimensiones promedio ha avanzado treinta y seis metros se estaría tentado a considerar una velocidad" promedio directamente de: $V_d = 36 \text{ m}/33 \text{ días} = 1,09 \text{ m/día}$."

* Dr. Ing. Armin Schoklitsch: Investigador de reputación internacional en hidráulica experimental y fundaciones. Profesor de las Universidades de Tucumán y Cuyo.

"Sin embargo si se considera que durante dieciocho días el nivel de agua superó los valores medios para los cuales no se detectara movimiento de dunas, en el "pasado mes de diciembre, como consecuencia de dos crecidas sucesivas, resulta posible estimar que en caso de existir efectivamente movimiento (caso de crecidas) la "velocidad de propagación de las dunas es: $V_d = 36 \text{ m}/18 \text{ días} = 2 \text{ m/día}$ ".

"El valor indicado se consigna a título de ejemplo del método y para dar una "idea del orden de magnitud ya que dicha cifra no se puede dar como válida por estar "basada en datos no representativos, los que podrían obtenerse extendiendo el lapso "de observaciones hasta abarcar, por lo menos un año hidrológico. "

El gasto sólido calculado en crecida para un ancho de 380 m es (q) $914 \text{ m}^3/\text{día}$ y la altura promedio de dunas de 3,7 m para una profundidad del orden de los 24 m.

1.1.3 Informe sobre el estudio de navegabilidad del Río Paraguay (5): Las mediciones

$v = 0,66 \text{ m/día}$
 $v_{\min} = 0,04 \text{ m/día (set)}$
 $v_{\max} = 2,92 \text{ m/día (enero)}$
 $q = 132560 \text{ ton/año}$
 $f = 0,66$
 $(\frac{\Delta h}{\lambda}) = 0,025$

batimétricas correspondientes a este estudio se efectuaron entre los 382 y 384,5 km (Montanel, Paraguay) durante el lapso comprendido entre noviembre de 1.970 y diciembre de 1.971.

Se efectuaron 22 corridas sobre un perfil longitudinal que en algunas circunstancias fue preciso cambiar por otro paralelo. También en este trabajo los autores manifiestan que "contra toda expectativa normal la altura de "las dunas se redujo durante la crecida de 1.971".

1.2.0 ESTUDIOS BASADOS EN EL DESPLAZAMIENTO DE TRAZADORES RADIACTIVOS

1.2.1 Estudio y proyecto del canal de vinculación entre el Puerto de Buenos Aires y el Río Paraná de las Palmas (7) (8) : En el marco de un amplio estudio destinado a determinar la traza más conveniente del canal mencionado (hoy en construcción) y además medir en forma directa el caudal de acarreo para su posterior contraste en un modelo físico de fondo móvil se ejecutaron éstas experiencias. El sedimento natural del Río de la Plata fue marcado con Ag-110.

La Comisión Nacional de Energía Atómica proyectó y construyó los equipos nucleares, electrónicos y mecánicos utilizados desarrollando además el método de marcación así como la inyección y posterior medición directa, durante más de un año.

La Compañía Consultora y Asociados (8) adjudicatarios directos del estudio, seleccionaron los tres lugares de inyección (A: cerca del canal Costanero, frente a Olivos-San Isidro; B: en las inmediaciones del canal Sur; y C: sobre una de las trazas propuestas, frente a Olivos).

En virtud de la excelente eficiencia de marcación alcanzada y la confiable información obtenida al medir en sucesivas y periódicas campañas la actividad del lecho del estuario, puede afirmarse que el transporte por acarreo (al menos en las áreas A y C) es prácticamente nulo.

$$q_A \approx q_C \approx 0; q_B: \text{reducido}$$

$$(d_{50})_A = 0,045 \text{ mm};$$

$$(d_{50})_B = 0,065 \text{ mm};$$

$$(d_{50})_C = 0,095 \text{ mm};$$

$$h_A; h_C; h_B: 1,5^* \text{ a } 3^* \text{ m.}$$

$$\text{Nivel medio mareas: } 0,80^* \text{ m}$$

$$\text{Amplitud (PMA-BMB): } 0,90^* \text{ m}$$

*: Valores referidos O Bs As

$$(P_{50})_A \approx 6^{***} \text{ meses}$$

$$(P_{50})_B \approx 6^{**} \text{ meses};$$

$$(P_{50})_C \approx 50^{***} \text{ días}$$

** : Con post. primeros 5 días

***: Con post. tormentas

El estudio con trazadores radiactivos, la medición directa de sedimentos en suspensión y la medición de otros parámetros hidráulicos permitieron comprobar y cuantificar otros mecanismos de transporte:

.- Transporte en suspensión: es preponderante

.- "Erosión": Las partículas antes de incorporarse al lecho son resuspendidas varias veces.

Resultó imposible en el modelo físico a fondo móvil reproducir simultáneamente y aún por separado, éstos mecanismos, en virtud de las peculiares características del estuario, baja granulometría de los sedimentos, etc.

Cabe recordar, antes de terminar ésta síntesis, que en los canales artificiales el orden de magnitud del dragado

es de 0,30 m/año mientras que en los bancos y explayadas el mismo orden de deposición corresponde a un siglo: 0,30 m/siglo. En un modelo de dimensiones razonables, con las limitaciones impuestas por las leyes de similitud esta realidad es difícil de materializar.

1.3.0 CALCULOS Y ESTIMACIONES DEL CAUDAL DE ACARREO, EFECTUADOS

A PARTIR DE FORMULAS EMPIRICAS O PARAMETROS NO DIMENSIONALES

1.3.1 Movimiento de las ondulaciones del lecho del Rfo Paraná (1) (2) : Este estudio ha sido ya mencionado al describir el desplazamiento de dunas del Rfo Paraná en lo que hoy es el túnel subfluvial. Los autores exponen los resultados experimentales confrontados con los que resultarían de la aplicación de las fórmulas y métodos de Meyer Peter y Muller, Einstein (y Barbosa) Engelund y Hansen, Haynie y Simons's. Todos los resultados difieren por exceso respecto a los observados con excepción de las ecuacio-

nes de Schoklitsh (1.934) que verifican aceptable concordancia para el Rfo Paraná, en las secciones experimentadas.

1.3.2 Resultado de la aplicación del método modificado de Kalinsky (6) : La velocidad V_{100} (velocidad 100 cm sobre el lecho) fue medida directamente en diversas verticales de secciones escogidas de antemano; entre estas secciones ésta, precisamente, la denominada "Corrientes" situada algunos metros aguas arriba de la zona donde se efectuaron los estudios aquí expuestos.

$$q = 5000 \text{ t/día} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ t/año}$$

$$q = 2,4 \cdot 10^6 \text{ t/día m}$$

$$Q = 22,4 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$v = 1,13 \text{ m/seg}$$

$$h = 9,4 \text{ m}$$

La velocidad crítica V_c fue determinada a partir de una relación empírica obtenida por Sundborg para sedimentos similares a los del lecho del Rfo Paraná. Los autores de este trabajo calcularon además el acarreo para otras secciones del Medio y Bajo Paraná efectuando por otra parte una estimación de los caudales totales de acarreo y suspensión basándose en cartas compiladas desde 1.865 hasta 1.937. El relleno medio anual durante esos 70 años está indicado aquí para tres secciones del Estuario del Plata advirtiéndose para la sección tres un "formidable relleno" que los autores

Atribuyen a la "propagación de los bancos de arena en la boca del estuario."

La fórmula utilizada en este caso es:

$$G_i = \frac{1,18 V_{100} M_d}{\log \frac{3020}{M_d}} f \frac{(V_c)^2}{V_{100}}$$

2.0.0 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos no cohesivos, en lecho aluvial, son transportados:

- .- En suspensión.
- .- Por acarreo (resbalamiento, rodamiento y pequeñas saltaciones).
- .- Por intercambio entre el lecho y la corriente (erosión) y entre la corriente y el lecho (sedimentación).

El primero de los mecanismos de esta subjetiva división está fuera de los alcances de este estudio mientras que los dos restantes han sido así clasificados por requerimientos inherentes a la performance de los métodos de medición directa, aquí expuestos.

2.1.0 TRANSPORTE POR ACARREO

Las fuerzas hidrodinámicas puestas en juego sobre la capa límite y la naturaleza y dimensiones de los sedimentos del lecho son determinantes del movimiento de estos.

Cuando la tensión tangencial en la interfase (τ) es igual o superior a la tensión tangencial crítica (τ_c) sobre la misma, comienza el movimiento en virtud de la inestabilidad en la capa límite y turbulencia resultante. Pequeñas saltaciones, rodamiento o resbalamiento caracterizan este tipo de transporte.

La teoría de A. Shields (11) que vincula la tensión tangencial crítica al número de Reynolds estrella (Fig. 1) es quizá la mejor confirmada por los resultados obtenidos por diversos investigadores (en lechos móviles planos) para definir la velocidad (V) a partir de la cual comienza el movimiento.

Con crecientes velocidades del agua la morfología del fondo pasa de las superficies planas a los risos, de los risos a las dunas y de las dunas a las anti-dunas pudiendo verificarse etapas de transición entre unas y otras. (Figs. 2 y 3).

La investigación empírica moderna parte de parámetros adimensionales o números y constantes bien conocidas, que conservan vigencia, para definir la inestabilidad entre la capa límite mencionada y las fuerzas hidrodinámicas que actúan:

$$D_* = \left(\frac{\rho'}{\nu^2} g \right)^{1/3} D \quad R_* = \frac{\mu_* D}{\nu} \quad F = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gh}}$$

En corrientes unidireccionales y no alternativas ha sido demostrado que para:

$D_* < 15$ Se forman rizos ; $R_* > 15$ Se forman dunas

$F > 0,8$ Transición $F > 1$ Se forman antidunas

En las figuras 2 y 3 se exponen los diagramas (11) y (12) que vinculan estos parámetros entre sí, dando además una idea respecto a la morfología del lecho.

Para calcular el caudal específico de acarreo (q) existen numerosas teorías y fórmulas empíricas algunas de las cuales hemos ya mencionado. Para medir directamente este caudal, en cambio, sólo dos técnicas ofrecen posibilidades ciertas: los trazadores radiactivos que pueden ser utilizados en ríos, estuarios o el litoral marítimo y técnicas batimétricas de reciente desarrollo aptas para medir el transporte de sedimentos (no cohesivos) por acarreo en lechos aluviales con formación de dunas en su cauce.

Antes de iniciar un estudio con trazadores radiactivos como el que nos ocupa es conveniente efectuar, con los datos disponibles, un análisis exhaustivo que conduzca a obtener al menos órdenes de grandor respecto al movimiento (o no movimiento) de los sedimentos de fondo. Contribuye esto a seleccionar el radioisótopo más apto para cada caso, su actividad específica, masa de sedimentos a inyectar, etc.

Lo expuesto en este capítulo son sólo pautas que utilizadas dentro del entorno para las que fueron concebidas, sirven razonablemente a los fines buscados.

3.0.0 SELECCION DEL AREA DE MEDICION

El tramo de 600 m de longitud, seleccionado en el Rfo Paraná (km 1.205) reúne las siguientes características que fundamentan su elección:

- Prácticamente todos los sedimentos transportados por el Rfo Paraná Medio provienen del Rfo Paraguay (que incluyen los del Rfo Bermejo) y del Alto Paraná. Aguas arriba y aguas abajo de la confluencia de ambos y a la menor distancia posible están las mejores secciones y tramos donde podrían cuantificarse los diversos mecanismos de transporte con miras a un racional balance general. La sección escogida es por otra parte cabecera, respecto a las obras hidráulicas proyectadas en el Paraná Medio.
- .- Es uno de los tramos del Rfo Paraná mejor cubiertos por estudios y controles periódicos o sistemáticos. Posee estación permanente de aforo.
- .- Existen tramos rectos, de cauce único, sin brazos secundarios significativos. La morfología del lecho es del tipo "dunas" en amplios trayectos.
- .- No existen sobre el lecho formaciones rocosas, toscas u accidentes que puedan dañar el trineo e instrumental electrónico asociado que debe ser arrastrado por el fondo para efectuar las mediciones previstas.
- .- Las márgenes del rfo son aptas para facilitar el acceso a la zona de operaciones. Sobre la costa existen mojones vinculados a poligonal existente, aptos para posesionar y operar instrumental topográfico.
- .- Previsiblemente y durante buena parte del ciclo hidrológico podrá navegarse con las embarcaciones disponibles. La velocidad (sensiblemente cte.) considerada óptima es del orden de 1 m/seg para piernas trasversales o bien con rumbo contrario a la corriente.

En las secciones de observación escogidas es conveniente efectuar mediciones en sectores que resulten representativos y cubran convenientemente:

- .- El canal principal donde el acarreo específico es supuesto máximo.
- .- Fuera del canal donde el acarreo total puede ser preponderante.

Operando así se evitarán dudosas extrapolaciones.

En la primera campaña sólo ha sido cubierto el sector, fuera de canal, antes mencionado.

4.0.0 TECNICAS DE MEDICION DIRECTA DEL TRANSPORTE POR ACARREO

En virtud de haber experimentado utilizando simultáneamente y en una misma área dos modernas técnicas, consideramos conveniente exponer las bases teóricas y los resultados alcanzados para confrontar por último las ventajas, limitaciones y márgenes de confiabilidad de ambas técnicas.

Si bien el lapso de observación es reducido respecto a los requerimientos hidráulicos, estos primeros resultados cobran significación, al menos relativa, pues no existen antecedentes en la bibliografía disponible, que permitan comparar resultados obtenidos empleando ambas técnicas a la vez.

4.1.0 MEDICION DEL DESPLAZAMIENTO DE DUNAS CON SONDA ECOGRAFA.

En los últimos quince años se ha desarrollado esta técnica.

En base a una racional formulación y posterior comprobación en modelos, Simons, Richardson y Nordin (14) publicaron en 1965 la ecuación que, con algunas variantes posteriores, se aplica en la actualidad para calcular el transporte por acarreo en lechos con formación de dunas o rizos.

La ecuación de continuidad partiendo de un supuesto equilibrio o volumen cte. de acarreo (sin intercambio) puede expresarse por:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Integrando esta ecuación y utilizando diversas transformaciones los autores arriban a:

$$q = \frac{1}{2} (1-p) v_m \Delta h \quad (2)$$

La carga específica (q) puede así ser calculada midiendo con sonda ecógrafa en periódicas corridas la posición del valle de las dunas y con ello su velocidad promedio (v_m) entre dos corridas sucesivas.

La cte. 1/2 denominada posteriormente coeficiente de forma (F) sólo puede utilizarse cuando predominan dunas "triangulares" mientras que en otros casos (5) en virtud de haberse encontrado dunas predominantemente "parabólicas" se utilizó un coeficiente de forma igual a 2/3.

En este estudio hemos calculado para cada duna su correspondiente coeficiente de forma en base a los valores medidos de amplitud (Δh), longitud (L) y superficie longitudinal (A)

$$F = \frac{A}{\Delta h \cdot L} \quad (3)$$

La ecuación (2) queda entonces reducida a:

$$q = F(1 - \rho) v_m \Delta h \quad (4)$$

4.1.1 Condiciones operativas de navegación, medición y posesionamiento: Cada corrida debe efectuarse siguiendo un perfil previamente seleccionado, paralelo a la dirección de la corriente o, mejor aún, paralelo o coincidente con la dirección del transporte por acarreo. En virtud de haber determinado previamente esa dirección de transporte utilizando trazadores radiactivos estabamos en condiciones de optar por la última alternativa (dirección del transporte por acarreo) que es más exacta.

Para facilitar el gobierno de la embarcación y operar a la mínima velocidad constante posible, el sentido de la embarcación debe ser opuesto al sentido del transporte de sedimentos.

Para las condiciones operativas existentes la velocidad óptima es del orden de 1 m/seg: se alcanza así una excelente resolución en el registro gráfico de la sonda ecógrafa y una elevada eficiencia de medición.

El posesionamiento instantáneo de la embarcación se efectuó utilizando dos teodolitos colocados en puntos estratégicos de la margen izquierda y previamente seleccionados tomando como base la triangulación existente en la zona.

Se efectuaron lecturas cada treinta segundos volcando la información inmediatamente sobre las cartas geográficas y registro gráfico de la zona ecógrafa ubicada en la cabina de la embarcación.

Este sistema operativo permitió conocer con precisión el rumbo de la embarcación y efectuar las correcciones necesarias para hacer coincidir la corrida real con la prevista en el derrotero fijado o perfiles seleccionados. Se midieron así tres corridas por perfil y un total de 4 perfiles.

La amplitud (Δh) de cada duna se obtiene directamente del registro gráfico mientras que su longitud (L) medida en el mismo registro es corregida de acuerdo a la velocidad (V) de la embarcación al pasar sobre la duna respectiva. (Fig.7). La velocidad óptima de la embarcación para obtener elevada eficiencia de medición y excelente resolución de valles y crestas es del orden de 1 m/seg siendo esta velocidad compatible, (en contracorriente), con las posibilidades de gobierno de las embarcaciones utilizadas.

El coeficiente de forma se obtiene a partir de la fórmula (3) teniendo en cuenta la corrección de velocidad antes mencionada.

Queda aún por saber si la duna fue medida correctamente; la dirección de medición x' o rumbo previsto de la embarcación (misma dirección y sentido contrario al del transporte de sedimentos por acarreo) debe coincidir o acusar pequeñas desviaciones respecto a la trayectoria real de la embarcación. Para lograr esta coincidencia, cada treinta segundos se corrige, si es necesario, el rumbo de la embarcación de acuerdo a la información suministrada por los operadores de teodolitos.

Estas condiciones operativas permiten lograr una aceptable identificación, correlación y posterior selección de las dunas a utilizar en el cálculo definitivo del transporte por acarreo mediante un programa de computación que:

- .- Transforma las coordenadas de campo $(\varphi; \omega)$ en coordenadas cartesianas (x', y') .
- .- Identifica los valles correlativos entre dos o más corridas sucesivas.
- .- Elimina las dunas, presumiblemente correlativas cuyo factor de forma (F) o su longitud (L) ha cambiado excesivamente con el tiempo
- .- Elimina las dunas medidas con una velocidad de embarcación superior a un tope previsto (1,5 m/seg) o un derrotero que supere en $\pm 20^\circ$ al rumbo previsto.

Este programa de computación, que será objeto de una publicación por separado, tiene un carácter restrictivo ya que la metodología utilizada permite medir en cortos lapsos un gran número de dunas siendo necesario y prudente eliminar aquellas cuya forma, longitud, etc. cambia substancialmente con el tiempo o bien las formaciones del cauce que no responden a la misma dinámica de las dunas.

Estas condiciones operativas y estos programas de computación son utilizados hasta el presente para completar un ciclo hidrológico, con miras a evaluar el transporte anual por acarreo. Se efectúan dos corridas periódicas, una sobre canal (16 a 22 m de profundidad) y otra fuera de canal, coincidente con la traza D de la fig. 6.

4.1.2 Resultados de la primera campaña de medición: En las Tablas I a IV se exponen las características morfológicas de las dunas medidas, su velocidad de desplazamiento y el caudal específico de acarreo (q) para cada una de las dunas de los cuatro perfiles ensayados en tres corridas sucesivas.

En las Tablas V, VI y VII se analizan estadísticamente las dunas observadas, las profundidades medias, velocidades medias de la embarcación y, por último, en la Tabla VIII se exponen los acarreos específicos medios para los cuatro perfiles medidos. No hemos extendido este resultado a todo el cauce del río pues estos valores son sólo representativos del sector que no incluye al canal de navegación donde el caudal específico de acarreo es presumiblemente mayor.

Sin computar este excedente tendríamos para el lapso comprendido entre el 21- 1-75 y el 4- 2-75 un caudal total transportado por acarreo del orden de:

$$q' = 850 \text{ m}^3/\text{dfa}$$

Los valores medios de velocidad de dunas (v), amplitud (Δh), longitud (L) y profundidad (h) son:

$$v = 1,74 \text{ m/dfa}$$

$$h = 0,58 \text{ m}$$

$$L = 28,88 \text{ m}$$

$$h = 4,80 \text{ m}$$

Los caudales de acarreo (q') medidos independientemente sobre las cuatro trazas o perfiles escogidos (C, D, E y F) acusan resultados prácticamente iguales. Si se tiene en cuenta que estas trazas fueron seleccionadas para que sobre ellas se manifiesten idénticas condiciones hídricas y morfológicas (igual profundidad, igual dirección y velocidad de los filetes líquidos, etc.) podremos así apreciar la excelente reproducibilidad del método.

Estos excelentes resultados surgen del amplio espacio barrido con las sondas ecógrafas y (en virtud de la gran cantidad de parámetros medidos) la posibilidad de seleccionar las dunas más adecuadas para este estudio, es decir, aquellas cuyo factor de forma (F) se mantiene sensiblemente constante y además comprendida entre $1/2$ y $2/3$.

4.1.3 Resultados de las campañas sistemáticas durante un ciclo hidrológico: Estas mediciones batimétricas han sido extendidas al área ocupada por el canal.

La correlación entre los valores del transporte por acarreo y los caudales del Río Paraná $q' = f(Q)$ se efectuará cuando se terminen los trabajos correspondientes ya programados; la primera campaña sólo cubrió un lapso muy reducido comparando con las necesidades reales que se extienden a un ciclo hidrológico, razón por la que se efectúan campañas periódicas para medir el transporte anual sobre y fuera de canal. Actualmente resta sólo efectuar una campaña de medición, prevista para el mes de febrero del corriente año y suspendida a raíz de las circunstancias conocidas.

4.2.0 MEDICION DEL TRANSPORTE POR ACARREO UTILIZANDO TRAZADORES RADIATIVOS.

4.2.0.1 Sedimentos utilizados: Las alternativas más frecuentes son;

- .- Utilizar el sedimento natural y marcarlo (siguiendo un procedimiento físico o químico) con un radioisótopo, emisor de radiación gamma y período de semidesintegración compatible con la duración previsible de las experiencias programadas. Este procedimiento fue empleado en la primera campaña del río Paraná.
- .- Utilizar un sedimento artificial (vidrio molido, por ejemplo) al que previamente se incorporó un elemento de alta sección eficaz a los neutrones térmicos.
La irradiación en el reactor nuclear se realiza una vez que alcanzaron valores de densidad, granulometría, redondez, etc. aceptables, respecto al sedimento que se busca simular.

Ambas alternativas tienen sus ventajas y limitaciones. En el primer caso resulta generalmente fácil mantener las características morfológicas, físicas y aún ciertas propiedades floculantes del sedimento natural. Sin embargo puede resultar difícil lograr la cohesión permanente entre el soporte (grano de sedimento) y el núcleo radiactivo incorporado; la eficiencia de marcación depende, no sólo del método físico y/o químico utilizado sino, en gran medida, de la agresividad del medio fluvial o marítimo durante el lapso de experimentación. Esta última limitación es superada utilizando sedimentos artificiales.

Otro aspecto importante que debe tenerse en cuenta para optar por una u otra técnica se refiere a las masas de sedimentos a inyectar: con sedimentos naturales marcados prácticamente no surgen limitaciones mientras que con sedimentos artificiales activados la masa a inyectar está subordinada a la capacidad disponible en el reactor nuclear (rara vez se sobrepasa el kilogramo por inyección).

A partir de la segunda campaña se utilizó vidrio molido marcado con Sc-46, producido por la CNEA. Es este tema motivo del apéndice I.

4.2.0.2 Fundamentos: El trazador radiactivo natural o artificial, es inyectado en el lecho del río (apéndice II). En sucesivas y periódicas campañas de medición por rastreo directo se determinan las isocurvas de actividad y con ellas el centroide del área radiactiva; la velocidad del centroide es la velocidad media del transporte por acarreo deducida la pérdida por intercambio.

Los valores de actividad medida previa corrección por decaimiento, son interpretados a partir de calibraciones previas efectuadas en laboratorio simulando las condiciones naturales previsibles.

El caudal de acarreo q' es determinado a partir de la siguiente expresión:

$$q' = \delta \cdot B \cdot VE \quad (5)$$

donde:

- q' (ton/dfa) : caudal de acarreo;
- δ (ton/m³) : peso específico de los sedimentos;
- B (m) : ancho del transporte por acarreo, aproximadamente igual al ancho del río;
- V (m/dfa) : velocidad del centroide promediada entre dos experiencias sucesivas;
- E (m) : espesor del transporte por acarreo.

El espesor E del transporte por acarreo y la función de distribución vertical en el lecho (lineal, parabólica, etc.) resultan en algunos casos difíciles de medir en la práctica pues la obtención de suficiente cantidad de muestras no destruidas de fondo presenta dificultades con tirantes de agua importantes o altas velocidades del agua, ateniéndonos a los muestreadores existentes o disponibles.

Cuando no existen muestras verticales debe apelarse a aproximaciones (21) cuya confiabilidad no estamos en condiciones de juzgar.

En este trabajo se propondrá una nueva interpretación del fenómeno partiendo de las mediciones batimétricas: distribución vertical del trazador que es calculada conociendo el espesor de transporte que surge de la altura promedio de la duna respectiva. Esta nueva interpretación, válida para ríos aluviales con formación de dunas es sólo posible cuando se trabaja utilizando técnicas nucleares y batimétricas, simultáneamente.

También, complementando adecuadamente estas técnicas se llega a ponderar razonablemente el instante en que el trazador inyectado alcanza el equilibrio con el sedimento de acarreo, es decir, el instante en el que la partícula "típica" marcada tiene un comportamiento y dinámica similar a la partícula "típica" natural.

Hasta el presente no se ha dado mucha importancia a este aspecto proponiéndonos aquí determinar experimentalmente el lapso mínimo de espera entre la inyección y la primera medición válida para el cómputo del caudal de acarreo (q').

Si consideramos que la actividad inyectada A_0 se distribuye en toda la superficie, se obtiene:

$$\iint n \, dx \, dy = N = \frac{f_0 A_0}{E \alpha} (1 - e^{-\alpha E}) \quad (6)$$

donde:

- n (ctas/seg) : conteo por unidad de tiempo
- N (ctas/seg/m²) : conteo total detectado en el rastreo del área radiactiva
- f_0 (ctas/seg/ μ Ci/m²) : Parámetro que surge de la curva de calibración del trazador utilizado.
- α (1/cm) : coeficiente de atenuación para el nucleído, la geometría y el instrumental utilizado.

La ecuación (6) es válida para una distribución vertical uniforme del trazador, cosa que ocurre rara vez en la naturaleza.

En la práctica se opera a partir de:

$$N = \frac{\beta f_0 A_0}{E \alpha} (1 - e^{-\alpha E}) \quad (7)$$

donde:

β : función de la distribución vertical del sedimento marcado en el lecho del río.

Hasta el presente se calcula E en base a esta expresión ya que N es medido experimentalmente y β se supone igual a la distribución vertical que con mayor frecuencia se ha encontrado en trabajos anteriores.

En nuestro caso determinamos β ya que E es medido por batimetría. Consideramos válido este criterio ya que en el capítulo 4.0.0 se demuestra que en lechos aluviales el espesor de transporte sigue la configuración transversal de las dunas respectivas.

Por otra parte, en el cálculo se seleccionan sólo aquellas dunas que mantienen su configuración (factor de forma) durante el lapso de experimentación.

4.2.1 Implementación. Condiciones operativas de navegación, medición y posesionamiento.

4.2.1.1 Inyección del trazador radiactivo. Para ejecutar las inyecciones del trazador radiactivo se utilizó la embarcación tipo Balizador N° 567/B. El inyector (apéndice II) (Figs. 9 y 10) fue izado y arriado en todos los casos, (previo posesionamiento de la embarcación en el lugar seleccionado) empleando el cabrestante principal y aparejos de velocidad regulables aptos para operar fuera de borda y a profundidades variables.

El día 17-1-75 se ejecutaron las dos inyecciones de sedimentos naturales marcados con Au-198 en las áreas previstas (Fig. 6).

4.2.1.2 Medición directa de la actividad en el lecho del río: El instrumental y equipos de la figura 10 es el utilizado en estas mediciones:

Detector: con cristal de INa (Tl) de 2" x 2"

Trineo: Se utilizó un trineo diseñado y construido especialmente para profundidades variables (canal-fuera de canal) y previsible elevadas velocidades del agua. Este trineo, cuyo peso sumergido es del orden de los 50 kilos puede operar en tándem con otro similar en barridos donde la velocidad de la embarcación supere ciertos toques (del orden de los 2 m/seg) que harían "planear" al trineo separándolo del lecho del río; hasta el presente no fue necesaria la utilización simultánea de ambos trineos.

Integrador: Es transitorizado, portátil, con escalas variables comprendidas entre 10^3 y 10^6 ctas/min. Constantes de tiempo variables entre 0,5 seg y 2 seg.

Registrador gráfico: Marca Minigor, portátil y transitorizado.

Multiescalímetro: Marca Packard, modelo 930, asociado a integrador especialmente concebido para estos estudios y construido por la CNEA. Operan indistintamente con baterías o línea de 220 V.

La medición directa del fondo natural (primero) y del trazador inyectado (después) se ejecutó siguiendo las pautas expuestas en la figura 6. Se barrieron "piernas" separadas entre 5 y 15 m sobre las dos áreas de dispersión del trazador.

Para arrastrar el trineo y operar el instrumental electrónico asociado se utilizó un catamarán tipo "velocímetro", n° 204, impulsado por el remolcador L 107. El uso de dos embarcaciones "amadrinadas" para batir las piernas programadas no restó mayores facultades al gobierno del remolcador aún teniendo en cuenta que el rumbo de las piernas es generalmente transversal a la dirección de la corriente.

Desde los puntos seleccionados en tierra donde operaban los dos teodolitos se seguía permanentemente el mástil del "velocímetro" 204 y cada treinta segundos se transmi-

tían los valores angulares a la embarcación; estas posiciones se marcaban en las cartas geográficas y los registros de actividad disponibles en la cabina. Se disponía así de un permanente registro de rumbos, posiciones y actividad que facilitaba el óptimo gobierno de la embarcación por las trayectorias programadas o los eventuales cambios aconsejados por los registros de la actividad en el lecho del río.

Un programa de computación elaborado para este estudio permite (Fig. 11):

- .- Transformar las coordenadas angulares en cartesianas (vértices de trayectorias rectilíneas en la figura 11).
- .- Modificar las trayectorias rectilíneas batidas por la embarcación y trazar la más probable trayectoria barrida por el trineo y el detector de actividad que es arrastrado por la embarcación. Esta transformación se hace en función del largo de la cuerda de tracción utilizada y su catenaria más probable para la profundidad o tirante de agua medio existente.

Los registros de actividad son obtenidos en unos casos a partir del integrador antes mencionado y cuando las condiciones operativas lo permiten se utiliza también el multiescalímetro-integrador. La información digital no sólo es más precisa sino que también facilita los cálculos posteriores y de valores numéricos de entrada directa en los programas de computación desarrollados. Cuando se dispone sólo de información analógica el procesamiento de datos es más complicado.

4.2.2 Resultados de la primera campaña de medición: Antes de inyectar el sedimento marcado con Au-198 se efectuó un relevamiento del lecho del río para medir la actividad natural del fondo. Con posterioridad a las inyecciones se efectuaron cuatro relevamientos (18, 20, 21 y 23 de enero), utilizando el instrumental antes mencionado.

Partiendo de los resultados de estas mediciones se construyeron las isocurvas de actividad (actividad medida menos actividad natural difusa) y con ellos se determinó el eje de transporte.

Las curvas de la Fig. 13 son una regresión y aproximación polinómica construida en base a los valores de las curvas de isoactividad, rebatidos sobre el eje de transporte.

La velocidad de desplazamiento del sedimento marcado se determinó de acuerdo al desplazamiento de los centroides de las curvas de la Fig. 13 y los lapsos transcurridos entre cada medición.

En la Fig. 14 se puede apreciar la actividad perdida durante los primeros días posterior a la inyección.

En virtud de haber deducido el decaimiento del Au-198 se aprecia que en el

área de medición se experimenta una notable reducción en la actividad total medida; una gran parte del sedimento inyectado se aleja del punto de inyección antes de "consolidarse" y distribuirse en todo el espesor de transporte.

Los cálculos de velocidad y caudales de acarreo obtenidos son, como era de esperar, muy superiores a los reales (Tabla X). Se advierte sin embargo que a medida que nos alejamos de la fecha de inyección los valores tienden a reducirse y acercarse a los obtenidos por batimetría.

4.2.3 Resultado de las campañas sistemáticas durante un ciclo hidrológico: Las campañas de medición efectuadas hasta el presente sirvieron para seguir el desplazamiento del trazador, fuera de canal, y sobre la misma traza donde simultáneamente se ha medido, mediante batimetría, el movimiento de dunas (4.1.3).

Se inyectaron 780 gramos de vidrio molido, marcado con Sc-46 y de una actividad del orden de los 800 mCi. Este sedimento artificial, producido e irradiado en nuestro país, fue inyectado con el equipo neumático-mecánico que se muestra en la Fig. 16 desarrollado y construido en la CNEA, estando diseñado para operar en forma automática cuando se ha producido su asentamiento en el lecho del río; la inyección de la carga de sedimento artificial se realiza con un mínimo de perturbaciones al sistema natural.

En la Fig. 15 se muestra una distribución granulométrica del sedimento marcado con Sc-46 antes mencionado, apreciándose su morfología respecto del sedimento natural que se simula.

Al igual que en el estudio expuesto en 4.1.3 quedan aún por efectuar una última campaña de medición que permita evaluar el transporte total anual.

5.0.0 CONCLUSIONES

5.1.0 REFERENTES A LA TECNICA BATIMETRICA

La metodología aquí empleada para cuantificar el transporte por acarreo en base a la medición del "desplazamiento" de dunas permite ampliar considerablemente (con excelente resolución y eficiencia) el área de control de dunas cubriéndose así amplios sectores en las secciones de medición escogidas. Las dunas son identificadas unívocamente y correlacionadas siguiendo racionales procedimientos puestos por primera vez en experimentación. Los programas de computación elaborados facilitan estas tareas eliminando inseguras apreciaciones visuales.

Los caudales específicos de acarreo medidos en cuatro perfiles distintos, bajo idénticas condiciones hidrodinámicas, acusan muy baja dispersión de resultados, contribuyendo así a la confiabilidad del método.

5.2.0 REFERENTES A LA TECNICA NUCLEAR

El uso de un nucleído de corto período de semidesintegración (Au-198; $T_{1/2} = 2,7$ días) ha permitido seguir el transporte por acarreo durante un breve período facilitando la determinación o semicuantificación de:

- .- El lapso mínimo de mezclado entre el sedimento natural del lecho del río, y el sedimento natural marcado, incorporado al cauce del río Paraná.
- .- Comprobar semicuantitativamente las pérdidas de sedimentos marcados durante el lapso mínimo de mezclado; durante ese tiempo parte del sedimento marcado (probablemente el más fino) es resuspendido y se aleja del área de control sin posibilidades de ulteriores detecciones.
- .- La dirección del transporte por acarreo, dirección que es utilizada; entre otras cosas, para fijar la trayectoria de la embarcación en las correrías ejecutadas para medir el transporte por acarreo en el método batimétrico antes mencionado (la dirección de medición debe ser perpendicular a la dirección del transporte por acarreo).

Los caudales de acarreo medidos con trazadores radiactivos en la primera campaña son superiores a los que consideramos reales.

El lapso comprendido entre la inyección del trazador y el instante a partir del cual los caudales de acarreo medidos por ambas técnicas sean correlacionables es para nosotros el lapso mínimo de mezclado, que intentamos determinar por primera vez, ya que no existen antecedentes sobre este tema. Hasta el presente los investigadores se limitaban a esperar un "tiempo prudencial", sin racional base y luego comenzaban las mediciones "válidas".

Consideramos que sobre este tema se deben centrar investigaciones futuras basadas en la correlación lógica que debe existir entre el caudal del río y el caudal del transporte medido con la técnica batimétrica (para nosotros muy confiable) y la técnica nuclear cuyos resultados deben tomarse con ciertas reservas en virtud de las indeterminaciones mencionadas, que pretendemos investigar.

5.3.0 GENERALES

El uso simultáneo de técnicas nucleares (trazadores radiactivos) y batimétricas (sonda ecógrafa sobre dunas) permite cuantificar con razonable exactitud el transporte de sedimentos por acarreo en ríos de lecho aluvial. Se alcanza además a comprender mejor complejos mecanismos de intercambio entre el sedimento de fondo y el sedimento en suspensión llegándose en algunos casos a semicuantificar los mismos.-

BIBLIOGRAFIA

- (1) STUCKRATH, T. Movimiento de las ondulaciones del lecho del Rfo Paraná. Traducción Ing. Miguel Horacio Balderiote. Univ. Hannover, 1969.
- (2) HENSEN, W. Opinión de peritaje referente al problema de aseguramiento del túnel subfluvial en Paraná mediante una cubierta de defensa en el lecho del Rfo. Hannover, 23-1-1969.
- (3) SCHOKLITSCH, A. Acta Cuyana de Ingeniería. Vol.3 - Fac. Ing. y Cs. Exactas, Físicas y Naturales. San Juan, Rep. Argentina, 1960.
- (4) Grupo de Trabajo Alto Paraná y Afluentes Misioneros. Identificación de Aprovechamientos Hídricos de Múltiple Propósito en el Rfo Alto Paraná. MOSP. Subsecretaría de Recursos Hídricos, 1973.
- (5) Informe sobre el estudio de navegabilidad del Rfo Paraguay. Consultoría Sir William Halcrows and Partners, agosto 1973.
- (6) Mejoramiento de la navegación del Rfo Paraná. Versión preliminar del informe sobre aspectos hidrológicos y fluviomorfológicos. 23-11-1972 - Berger-Brokon-sult.
- (7) BARO, G.B.; GARCIA AGUDO, E.; GOMEZ, H.R. Estudio con trazadores radiactivos en el Rfo de la Plata. C.N.E. Atómica. Rep. Argentina, 1966.
- (8) Sir HALCROWS, W. and PARTNERS. Estudio y proyecto del canal de vinculación entre el Puerto de Buenos Aires y el Rfo Paraná de las Palmas.
- (9) SCHOCKLITSCH, A. Der Wasserben. Vol 1.
- (10) LELIAVSKY, S. Introducción a la hidráulica fluvial. Ed. Omega S.A. Barcelona, 1964.
- (11) LARRAS, J. Hydraulique et granulats. Eyrolles. Ed. París, 1972.
- (12) BONNEFILLE, R. Cours d'hydraulique maritime, 1973.
- (13) BONNEFILLE, R. L'utilisation des paramètres dimensionnels dans l'étude de la hydrodynamique des sédiments. XI Convegno di Idraulica e Costr. Idraulica, Génova, octubre 1968.
- (14) SIMONS, D.B.; RICHARDS, E.V.; NORDIN, C.F. Bedload Equation for Ripple and Dunes. Geological Survey, Prof. paper, 462 H, 1965
- (15) VANONI, V.A.; BROOKS, N.H. and KENNEDY, J.F. Lectures notes on sediments

transportation and channel stability. Report N* KH-R1-Sept. 1960, Pasadena, California.

- (16) SNISCHCHENKO. Movimiento de dunas de arena en corrientes naturales.
Traducción Miguel Horacio Balderiote de T. of the State Hydrologfa Inst. (Trudyggi)
N* 136 pp. 82-91, 1966.
- (17) MILLI, H. Transporte total de material de lecho en el Rfo Paraná (Una aproximación teórica) INCYTH, Laboratorio de Hidráulica.
- (18) Cuenca del Rfo de la Plata. Estudio para su planificación y desarrollo, OEA.
- (19) SIMONS, D.B. y ANDING M.C. Hidráulica. Cap.IV - R.A., 1973. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo.
- (20) KRISHNAMURTHY, K.; RAO, S.M. A theory for the quantitative estimation of bed load transport using radioisotopes. Isotopen praxis 8 J. Heft 11-12-1972.

TABLA I - CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LAS DUNAS, VELOCIDAD DE VALLES Y CAUDAL ESPECIFICO DE ACARREO.

Perfil C ; Corridas C₁ (21-1-75) ; C₂ (28-1-75) y C₃ (4-2-75)

Duna	Corri-da	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m	m/dfa	m ³ /dfa m
1C	C ₁	5,94	28,50	0,36	8,40	0,78	15,84	2,26	0,52
	C ₂	5,02	27,60	0,39			9,14	1,31	0,41
	C ₃	4,41	36,30	0,64					
2C	C ₁	5,94	20,90	0,54	10,20	0,90	12,09	1,73	0,60
	C ₂	4,87	25,30	0,60	9,26	0,61		1,66	0,64
	C ₃	4,51	21,80	0,64	11,10	0,80			
3C	C ₁	5,97	20,80	0,30			7,16	1,02	0,17
	C ₂	5,03	20,30	0,25			20,13	2,88	0,43
	C ₃	4,57	21,30						
4C	C ₁	6,40	29,00	0,24	9,66	0,53	11,38	1,63	0,24
	C ₂	5,09	18,00	0,24			13,04	1,86	0,53
	C ₃	4,72	26,00	0,70					
5C	C ₁	5,79	40,10	0,42			14,14	2,02	0,48
	C ₂	4,51	28,00	0,36			24,11	3,44	0,89
	C ₃	4,10	30,80	0,48					
6C	C ₁	5,79	31,50	0,51	12,04	0,65	17,21	2,46	0,71
	C ₂	4,40	32,40	0,43	13,16	0,77	12,36	1,77	0,51
	C ₃	4,17	33,50	0,51					
7C	C ₁	5,48	20,00	0,57	8,93	0,78	19,98	2,86	1,02
	C ₂	4,26	26,50	0,60			15,97	2,28	0,77
	C ₃	3,90	19,00	0,51					
8C	C ₁				6,71	0,79	21,00	3,00	0,57
	C ₂			0,31			11,64	1,66	0,33
	C ₃	4,14	24,90	0,34					
9C	C ₁	5,88	26,50	1,06	18,94	0,67	12,25	1,75	1,15
	C ₂						19,84	2,83	1,47
	C ₃	4,30	20,30	0,83					
10C	C ₁	5,94	22,50	0,33			11,46	0,82	0,16
	C ₃	4,57	24,17	0,30					
11C	C ₁						22,35	1,60	0,54
	C ₃	4,41	26,40	0,54					
12C	C ₁	5,50	27,80	0,61	12,03	0,70	31,52	2,25	0,85
	C ₃	4,10	28,10	0,61					

TABLA I - (continuación)

Duna	Corri- da	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m	m/dfa	m ³ /dfa m
13C	C ₁ C ₃	5,79 4,11	31,2 34,6	0,61 0,70	16,91 15,15	0,89 0,63	28,33	2,02	0,80
14C	C ₁ C ₃	5,79 4,27	27,6 28,3	0,61 0,60	14,00 11,75	0,83 0,68	40,14	2,87	1,06
15C	C ₂ C ₃	4,0	45,0	0,74			14,39	2,06	0,94
16C	C ₂ C ₃						12,24	1,75	
17C	C ₁ C ₃	6,30 4,63	18,8 23,5	0,60 0,42	6,79	0,60	21,37	1,53	0,48

TABLA II- CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LAS DUNAS, VELOCIDAD DE VALLES Y CAUDAL ESPECIFICO DE ACARREO.

Perfil D ; Corridas D₁ (21-1-75) ; Corridas D₂ (28-1-75) y D₃ (4-2-75)

Duna	Corri-da	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m	m/dfa	m ³ /dfa m
1D	D ₁	5,79	21,70	0,27			5,35	0,77	0,08
	D ₂	4,54	21,02	0,12			13,65	1,95	0,13
	D ₃								
2D	D ₁	5,70	38,66	0,70	19,09	0,71	19,95	2,85	0,94
	D ₂	5,06	31,45	0,37	8,79	0,76	14,97	2,14	0,49
	D ₃								
3D	D ₁						9,70	1,39	0,61
	D ₂	4,88	40,27	0,70					
	D ₃								
4D	D ₁						15,76	2,25	0,72
	D ₂	4,57	29,57	0,52					
	D ₃								
5D	D ₁	5,43	20,78	0,67	6,17	0,44	17,15	2,45	0,95
	D ₂	4,91	19,79	0,58	6,37	0,55			
6D	D ₁	5,64	17,69	0,31			21,31	3,04	0,57
	D ₂	4,94	17,38	0,31					
7D	D ₂	5,33	28,10	0,52			17,88	2,56	0,71
	D ₃	4,79	19,54	0,40					
8D	D ₂	4,94	23,72	0,46			17,92	2,56	0,87
	D ₃	4,63	30,90	0,64					
9D	D ₂	4,91	17,38	0,31			13,00	1,86	0,35
	D ₃	4,27	24,27	0,31					
10D	D ₂	5,18	27,93	0,34			8,91	1,27	0,26
	D ₃	4,51	28,42	0,34					
11D	D ₂	5,12	19,03	0,27	9,29	0,60	22,20	3,17	0,98
	D ₃	4,39	21,18	0,73					
12D	D ₂	5,00	33,23	0,91	19,01	0,63	2,12	0,30	0,17
	D ₃	4,45	33,05	0,85	26,58	0,85			
13D	D ₂	4,57	36,31	0,88			14,32	2,05	1,20
	D ₃	3,81	28,70	1,00					

TABLA II (continuación)

Duna	Corri da	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m/día	m/día	m ³ /día m
14D	D ₂	4,66	14,50	0,27	13,64	0,63	10,52	1,50	0,27
	D ₃	4,02	17,62	0,34					
15D	D ₂	4,51	22,26	0,43			17,71	2,53	0,55
	D ₃	4,14	21,40	0,27					
16D	D ₂	4,57	24,53	0,67			11,74	1,71	0,83
	D ₃	3,96	23,96	0,91					
17D	D ₂	4,72	12,23	0,12			16,22	2,32	0,18
	D ₃	4,32	13,58	0,15					

TABLA III- CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LAS DUNAS, VELOCIDAD DE VALLES Y CAUDAL ESPECIFICO DE ACARREO.

Perfil E ; Corridas E₁ (21-1-75) ; E₂ (28-1-75) ; E₃ (4-2-75)

Duna	Corrida	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m	m/dfa	m ³ /dfa m
1E	E ₁						11,51	1,64	0,45
	E ₂	5,73	18,59	0,46			6,69	0,96	0,22
	E ₃	4,72	14,84	0,30					
2E	E ₁	6,16	8,98	0,21			4,82	0,70	0,09
	E ₂						6,61	0,94	0,27
	E ₃	4,63	8,65	0,46					
3E	E ₁						1,66	0,24	0,16
	E ₂	4,88	31,77	1,09	14,24	0,41	12,02	1,72	0,94
	E ₃	4,45	29,44	0,67	12,55	0,64			
4E	E ₁	5,67	36,85	0,55	8,85	0,44	8,31	1,19	0,44
	E ₂	5,09	41,52	0,64	14,73	0,55	10,53	1,50	0,66
	E ₃	4,57	42,03	0,79	22,07	0,66			
5E	E ₁	6,10	30,60	0,30			17,79	2,54	0,47
	E ₂	5,36	29,64	0,30			6,91	0,99	0,19
	E ₃	4,75	30,75	0,37					
6E	E ₁	6,04	37,06	0,55			25,03	3,58	1,14
	E ₂	5,18	36,72	0,49			20,65	2,95	1,00
	E ₃	4,45	40,57	0,61					
7E	E ₁	5,67	37,87	0,91	18,82	0,55	18,00	2,57	1,20
	E ₂	4,94	52,40	0,61					
8E	E ₁	5,24	39,82	0,67	15,10	0,57	13,18	1,88	0,82
	E ₂	4,57	62,58	0,76	27,19	0,57	6,44	0,92	0,38
	E ₃	4,27	58,96	0,61	26,94	0,75			

TABLA IV- CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LAS DUNAS, VELOCIDAD DE VALLES Y CAUDAL ESPECIFICO DE ACARREO.

Perfil F; Corridas F₁ (21-1-75) ; F₂ (28-1-75) y F₃ (4-2-75)

Duna	Corrida	h	L	Δh	A	F	d	v	q
		m	m	m	m ²		m	m/dfa	m ³ /dfa m
1F	F ₁						10,37	1,48	
	F ₂						5,64	0,81	
	F ₃								
2F	F ₁	6,10	72,73	0,61			6,16	0,88	0,54
	F ₂	6,55	77,91	1,37			8,68	1,24	0,88
	F ₃	5,64	72,96	0,91					
3F	F ₁	5,94	18,50	0,61	6,31	0,56	15,84	2,26	1,06
	F ₂	5,79	14,46	0,91	4,93	0,37	5,88	0,84	0,43
	F ₃	5,03	17,81	0,76	4,40	0,34			
4F	F ₁						5,85	0,84	0,26
	F ₂	5,94	41,18	0,52			3,30	0,45	0,15
	F ₃	5,18	39,14	0,61	17,90	0,75			
5F	F ₁						6,12	0,87	0,21
	F ₂	5,49	12,70	0,40			6,54	0,93	0,17
	F ₃	5,12	15,93	0,30					
6F	F ₁						8,36	1,19	0,81
	F ₂	5,18	53,44	1,10			9,34	1,33	1,02
	F ₃	4,72	50,90	1,22					
7F	F ₁	5,94	20,91	0,30			6,88	0,98	0,26
	F ₂	4,94	21,00	0,58	6,44	0,53			
8F	F ₁	5,79	22,86	0,64	7,30	0,50	2,66	0,38	0,14
	F ₂	4,75	24,09	0,61	7,45	0,51			
9F	F ₁	5,55	22,43	0,49			10,72	1,53	0,41
	F ₂	5,18	26,85	0,37					
10F	F ₁	5,24	16,67	0,76			5,30	0,76	0,39
	F ₃	4,72	18,62	0,91					
11F	F ₂	5,79	44,09	1,01	19,41	0,44	7,59	1,09	0,67
	F ₃	5,12	43,55	0,98	19,21	0,45			
12F	F ₂	4,66	23,62	0,85			13,66	1,95	0,87
	F ₃	3,99	23,56	0,61					
13F	F ₂	5,41	33,98	0,40	9,63	0,77	5,51	0,79	0,24
	F ₃	4,72	33,25	0,61	14,10	0,67			

TABLA V- VALORES MEDIOS DE LONGITUD, ALTURA, FACTOR DE FORMA,
 VELOCIDAD DE VALLES Y CAUDALES ESPECIFICOS DE ACARREO.
 ANALISIS ESTADISTICO.-

Nº datos	Fecha	Int.e/ corri- da	L	h	F	v	q	S ²	S	ξ
		dfas	m	m		m/dia	m ³ /dfa m			
28	21-1-75			0,52				0,04	0,20	0,04
44	28-1-75			0,55				0,08	0,28	0,04
41	4-2-75			0,60				0,06	0,24	0,04
28	21-1-75		28,31					137,98	11,75	2,22
43	28-1-75		29,30					182,99	13,53	2,06
43	4-2-75		29,04					153,47	12,39	1,89
44					0,63			0,02	0,14	0,02
31	21-1-75 al 28-1-75	7				1,76		0,76	0,87	0,16
39	28-1-75 al 4-2-75	7				1,72		0,60	0,78	0,12
31	21-1-75 al 28-1-75	7					0,57	0,11	0,34	0,06
39	28-1-75 al 4-2-75	7					0,57	0,11	0,34	0,05

TABLA VI - VELOCIDAD PROMEDIO DE LA EMBARCACION DE SONDEO V(m/seg)

Perfil Corrida	C	D	E	F
21-1-75	0,94	0,66	0,71	0,75
28-1-75	0,81	0,91	0,81	0,86
4-2-75	0,87	0,91	0,86	0,90

TABLA VII - PROFUNDIDAD MEDIA DE VALLES DE DUNAS h(m)*

Perfil Corrida	C	D	E	F
21-1-75	5,88	5,64	5,81	5,86
28-1-75	4,74	4,84	5,10	5,41
4-2-75	4,30	4,29	4,54	4,91

* Falta corregir por profundidad de inmersión del transductor

TABLA VIII - CAUDALES ESPECIFICOS DE ACARREO*(m³/dfa-m)

Perfil Corridas	C	D	E	F	Promedio
21-1-75 al 28-1-75	0,61	0,65	0,60	0,46	0,57
28-1-75 al 4-2-75	0,69	0,54	0,52	0,54	0,57

* Estos valores son sólo representativos del caudal real de acarreo "fuera de canal" y para el breve lapso de medición de la primera campaña.

TABLA IX - ACTIVIDAD DETECTADA Y MEDIDA* CON TRAZADORES
RADIATIVOS

dia	Coordenadas centroide		Valores de N	Actividad medida
	x m	y m	Ctas/seg m ²	μCi
17-1-75	1.838,3	1.022,5	11.203.692,1 5.972.350,0 4.844.227,9 3.650.125,0	461.437,1
18-1-75	1.785,7	1.023,9		245.978,0
21-1-75	1.763,5	1.029,9		199.515,1
23-1-75	1.749,6	1.047,3		150.334,0
25-1-75	1.734,3	1.083,4		

TABLA X - VELOCIDAD Y CAUDALES DE ACARREO DETERMINADO CON
TRAZADORES RADIATIVOS

Dfa	Desplazamiento m	Velocidad m/dfa	Espesor cm	Caudal de acarreo	
				m ³ /dfa.m	Ton/dfa.m
17-1-75	52,7	53,7	16,0	8,4	15,2
18-1-75		8,0	34,0	2,7	4,9
21-1-75	22,3	10,1	42,0	4,2	7,7
23-1-75	17,7	8,9	50,0	4,4	8,0
25-1-75					

$$f_0 = 24,28 \frac{\text{ctas}}{\text{seg}} \frac{\text{m}^2}{\mu\text{Ci}} ; \quad \alpha = 0,133 \text{ cm}^{-1} ; \quad \gamma = 1,8 \text{ ton/m}^3 ; \quad A_0 = 1 \text{ Ci}$$

* Estos valores no son representativos del caudal de acarreo real, pues el trazador aún no alcanzó el equilibrio con el sedimento del lecho.

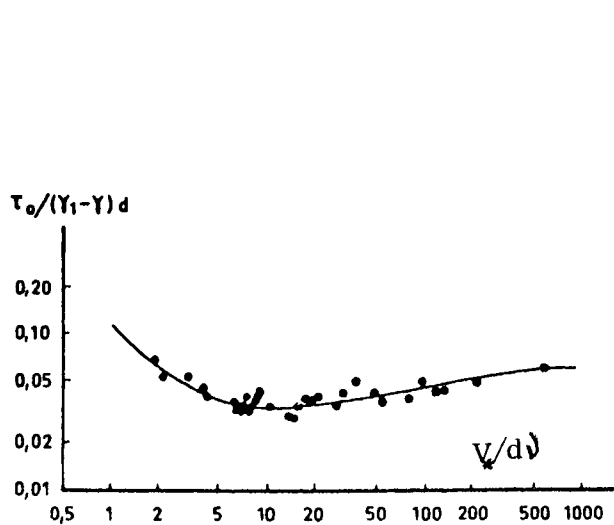


Fig 1 Tensión tangencial crítica en función de R_* -A. Shields(11)

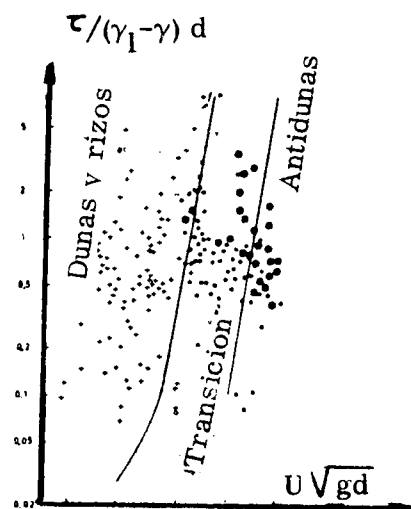


Fig 2 Diagrama de Garde y Albertson(11)

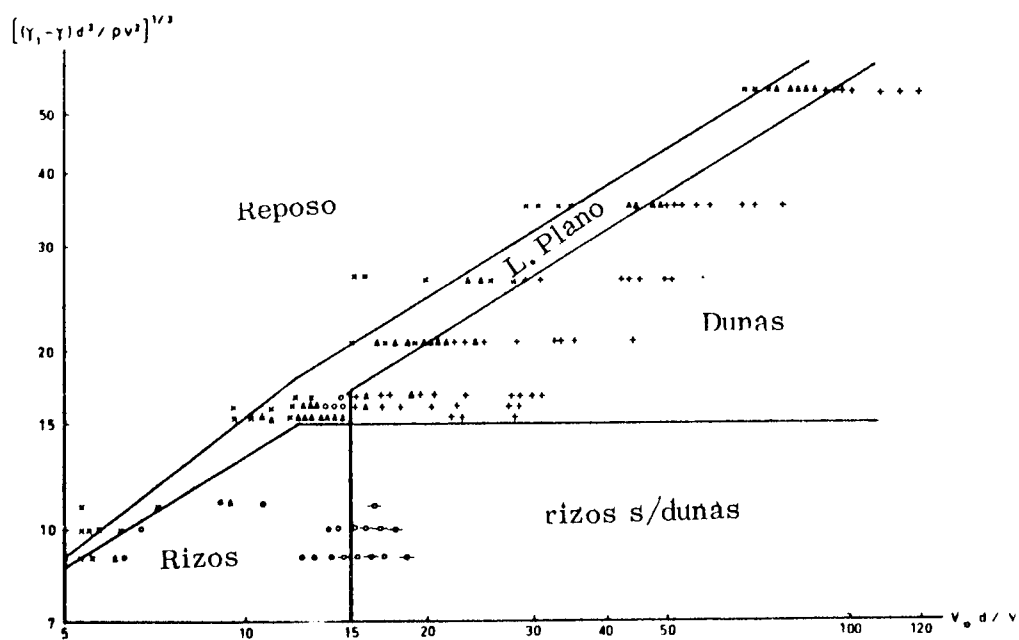
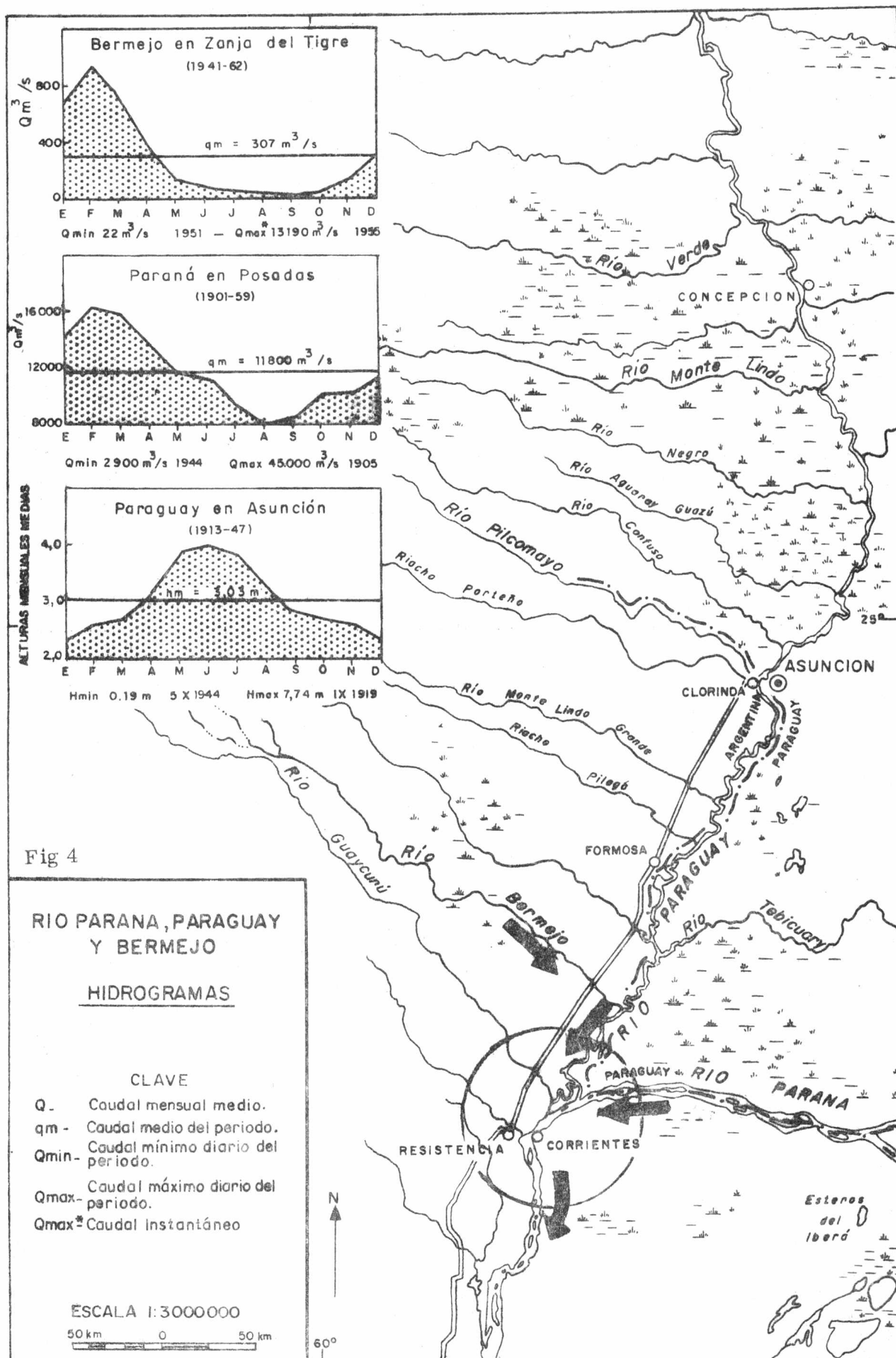


Fig 3 Diagrama de R Bonfille(11)(12)



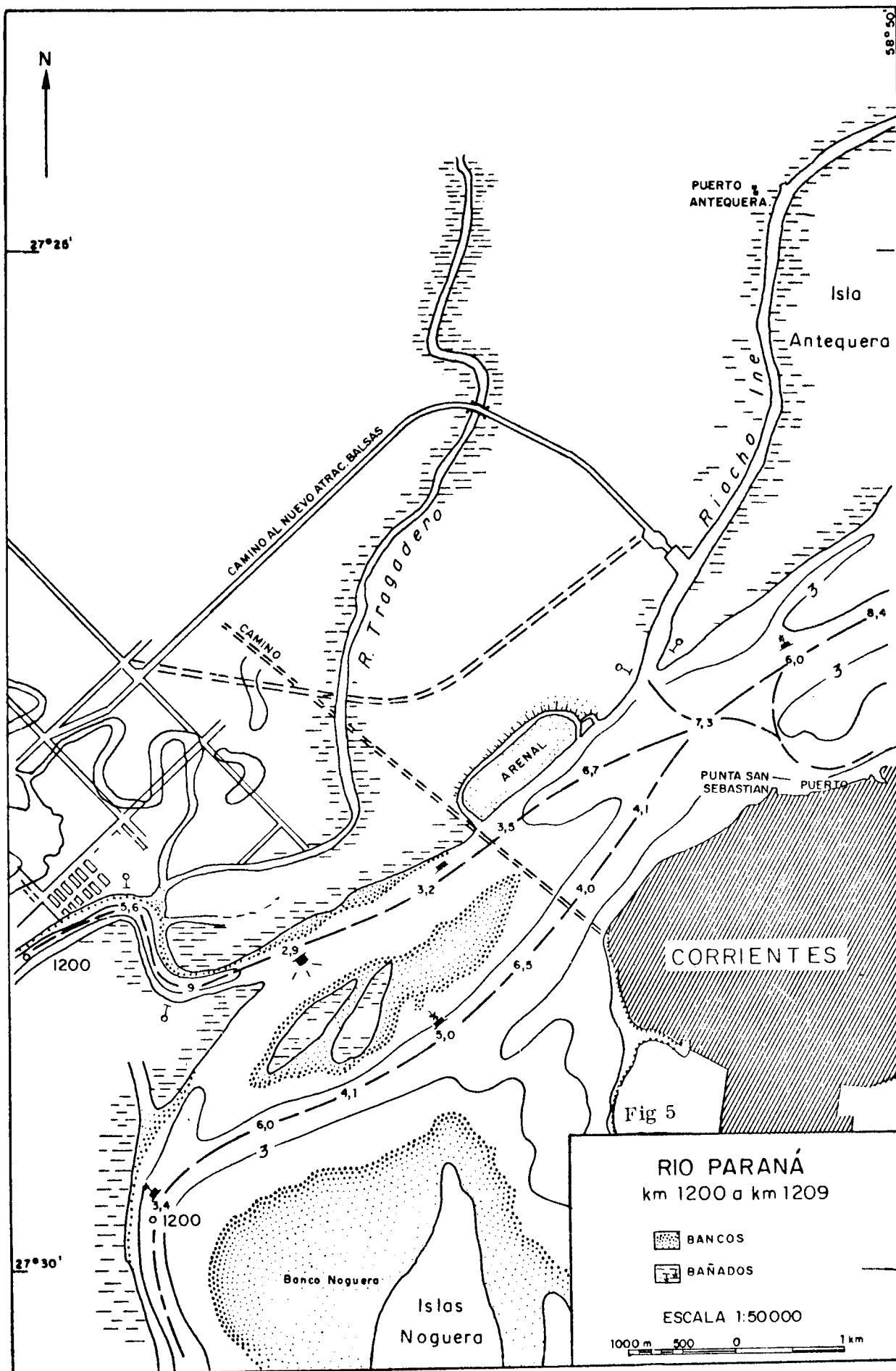


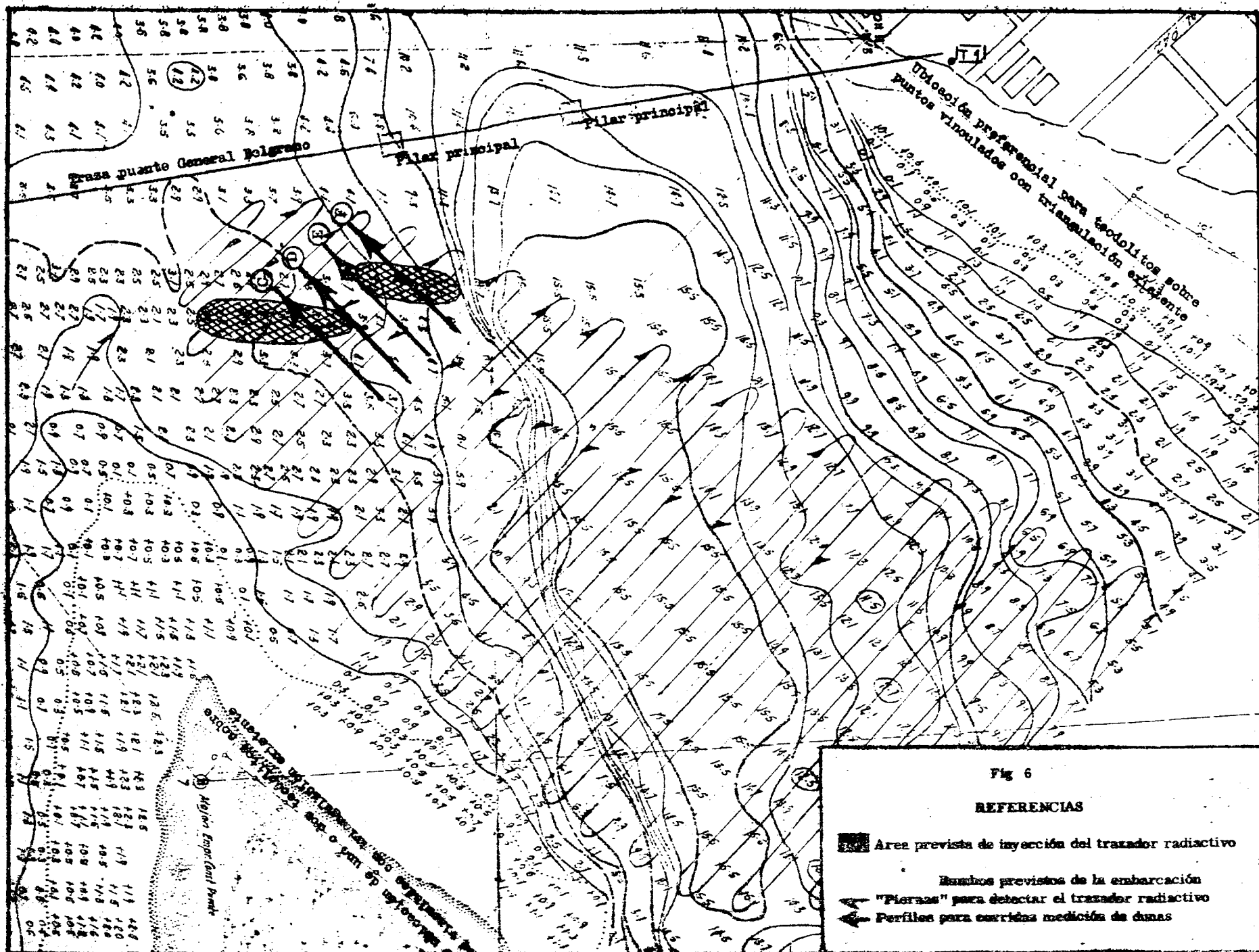
Fig 5

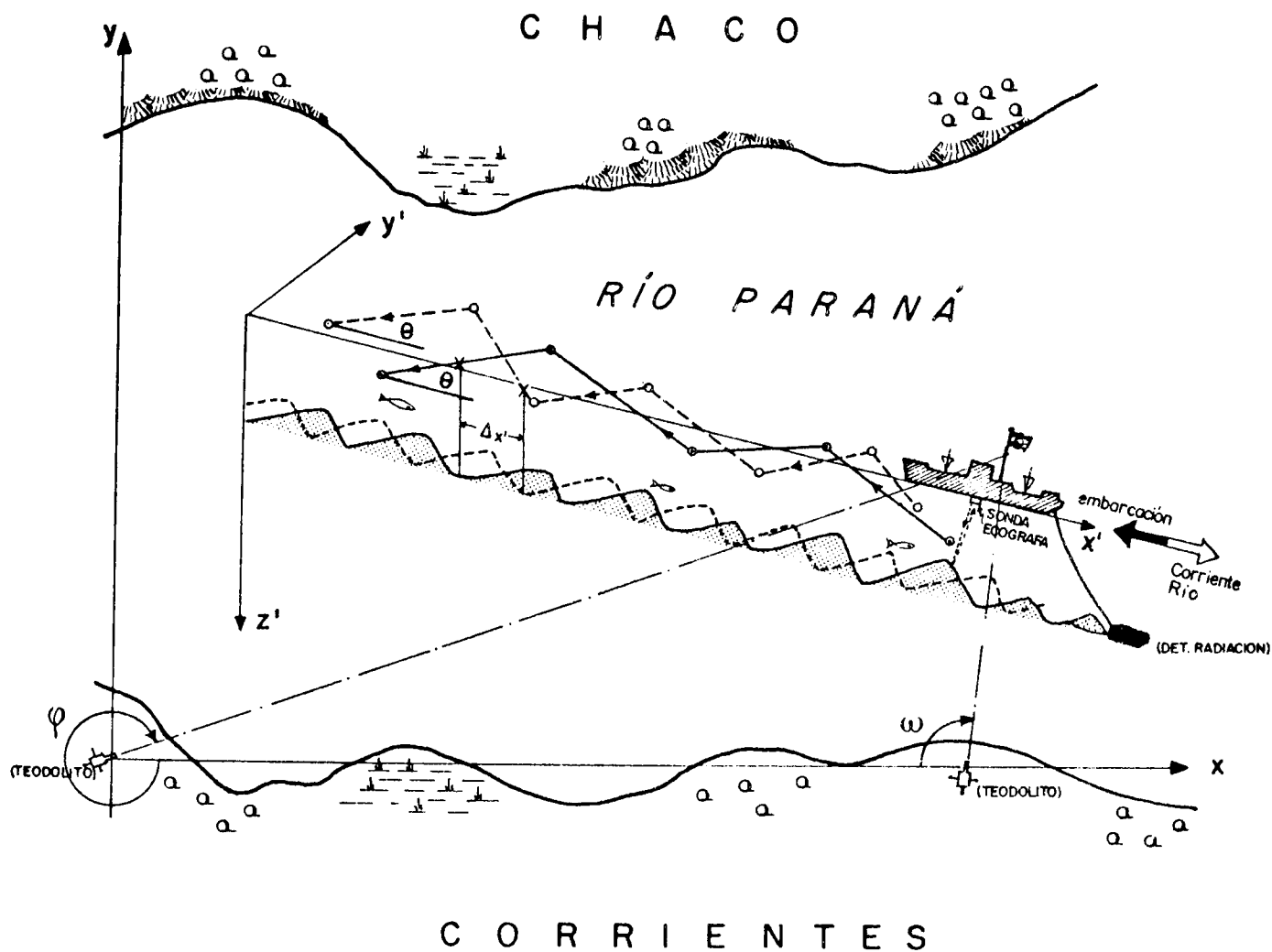
RIO PARANÁ
km 1200 a km 1209

- BANCOS
- BAÑADOS

ESCALA 1:50000

1000 m 500 0 1 km





REFERENCIAS

- o Proj. posición embarcación
- x Proj. valle dunas
- Duna y corrida n
- Duna y corrida n + 1

Fig. 7 Esquema del sistema de medición con sonda ecógrafa y bases para corrección por desviación de rumbo respecto x' (θ) y velocidad de embarcación. El eje x' coincide con la dirección del transporte de sedimentos por acarreo.

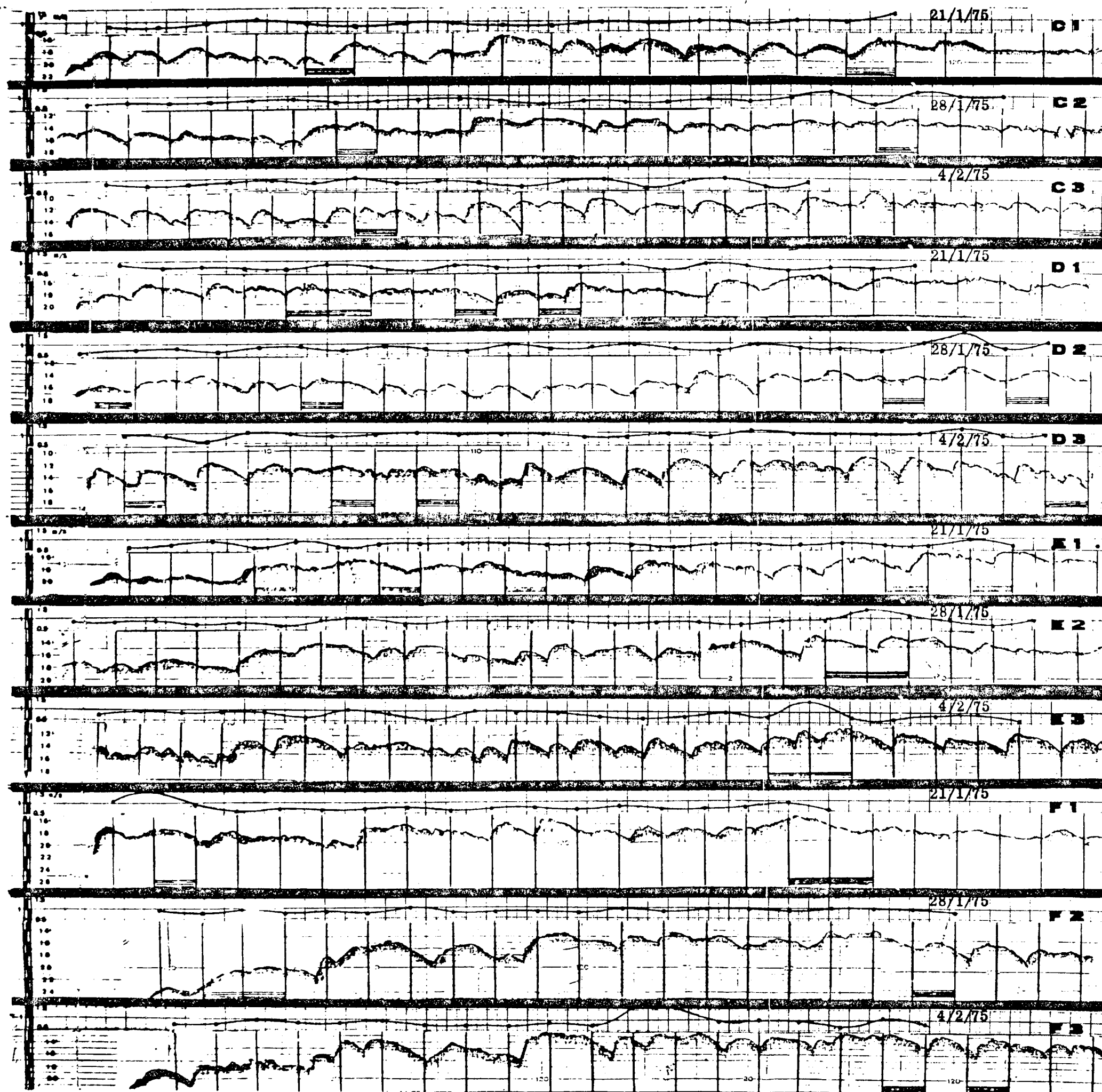


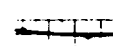
Fig. 8

Perfiles de dunas obtenidos con sonda ecógrafa.
Velocidad de la embarcación y desviación de rumbo mayor que 20° respecto al previsto.

REFERENCIAS

C, D, E, F : Perfiles seleccionados.

1, 2, 3 : Corridas.

 : Velocidad embarcación (m/seg).

 : Perfil duna (pies).

 : Desviación rumbo mayor $\pm 20^\circ$.

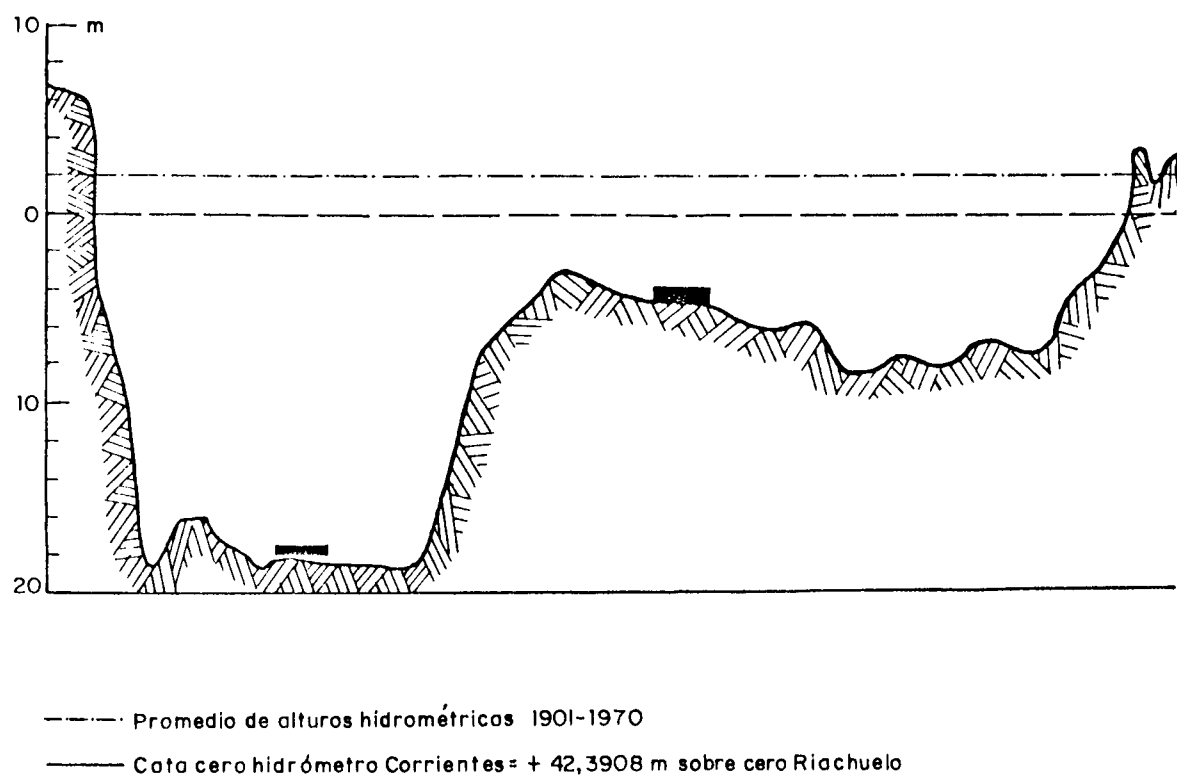


Fig. 9 Perfil del Río Paraná frente al Puerto Corrientes

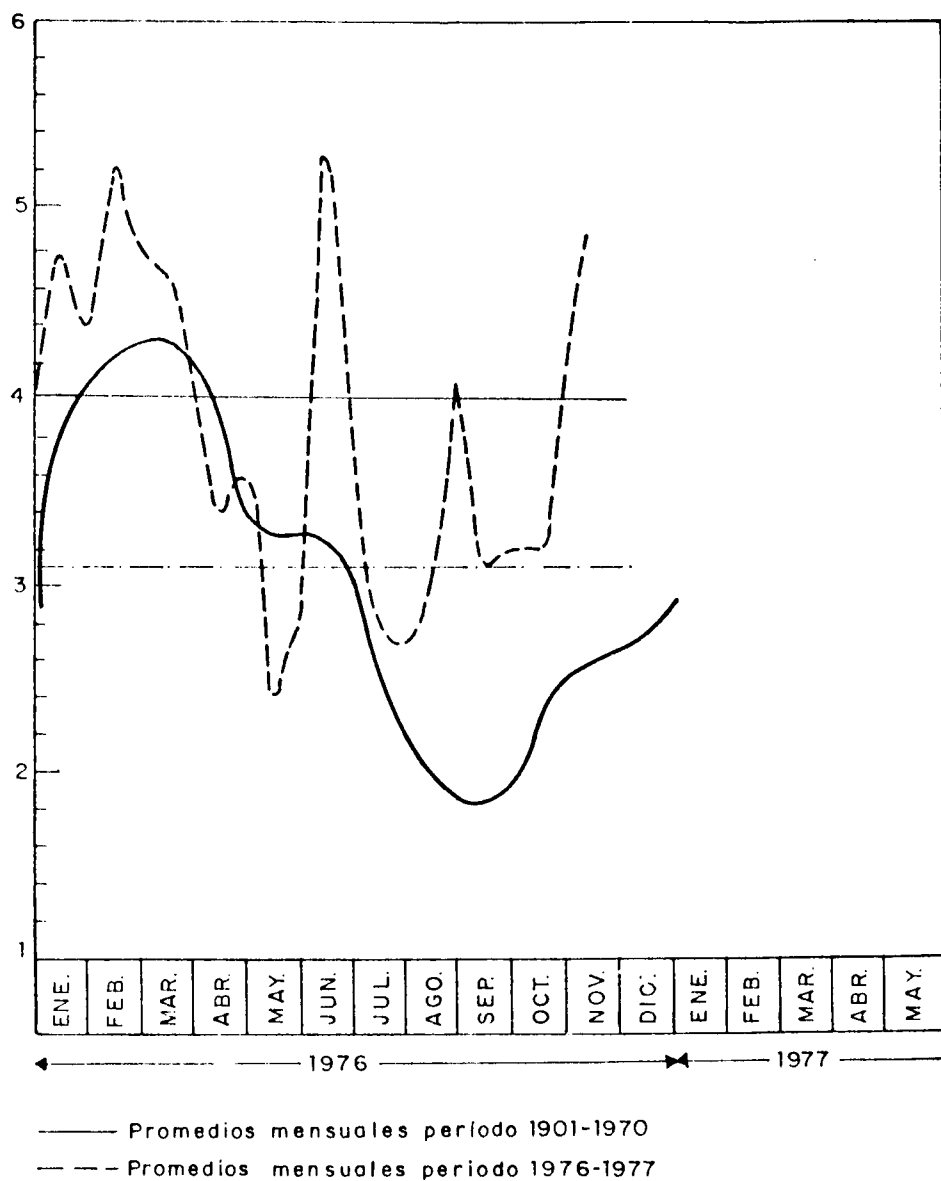


Fig. 10 Altura de aguas del Rfo de la Plata medidas en estación Corrientes. Promedio y período 1976-1977

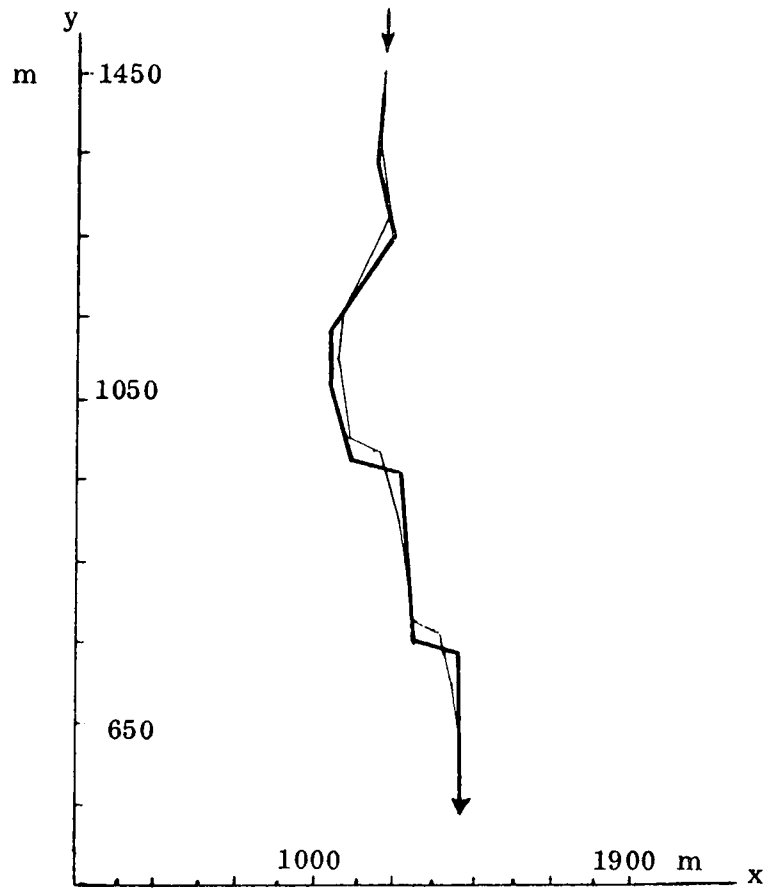


Fig. 11 Parcial de una corrida para medir la actividad en el lecho del río.

- Recorrido de la embarcación.
- - - Según cálculo, recorrido del trineo-detector.

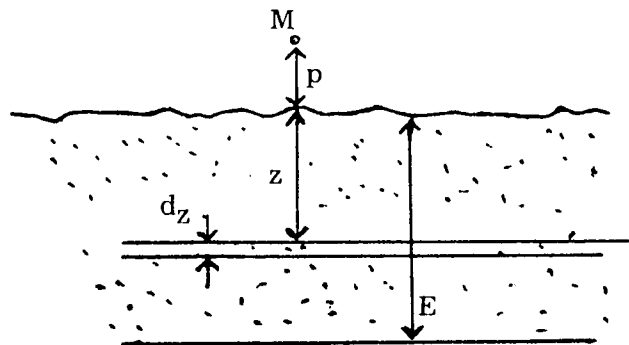


Fig. 12 Espesor del transporte por acarreo (E) y distancia del centro del detector a la superficie del cauce (p).

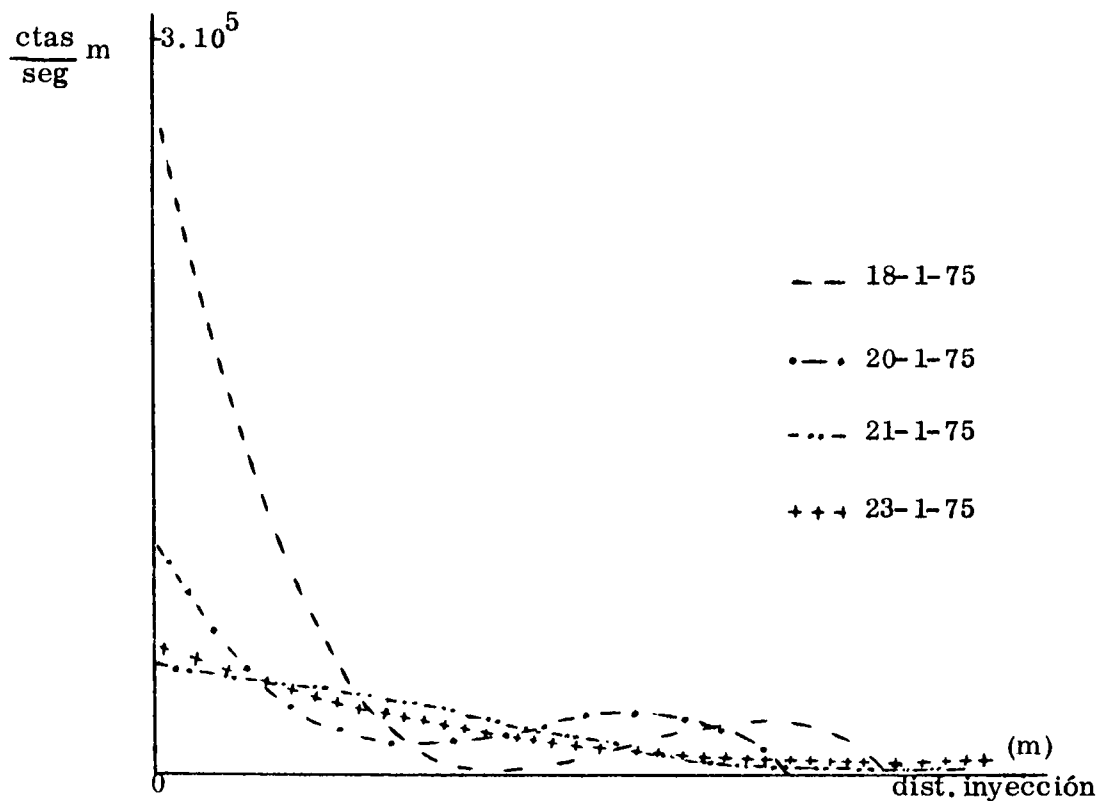


Fig. 13 Regresión y aproximación polinómica sobre el eje de transporte de sedimentos por acarreo.

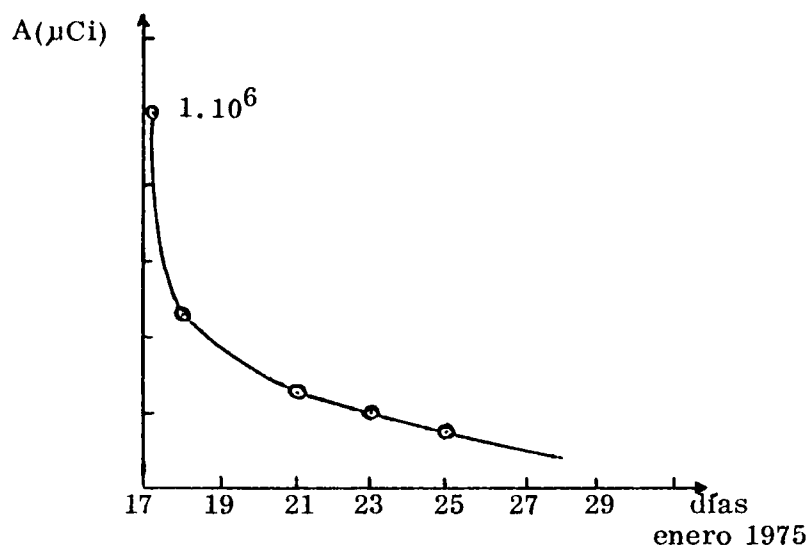


Fig. 14 Actividad inyectada y actividad remanente medida en el lecho del río entre las secciones controladas.

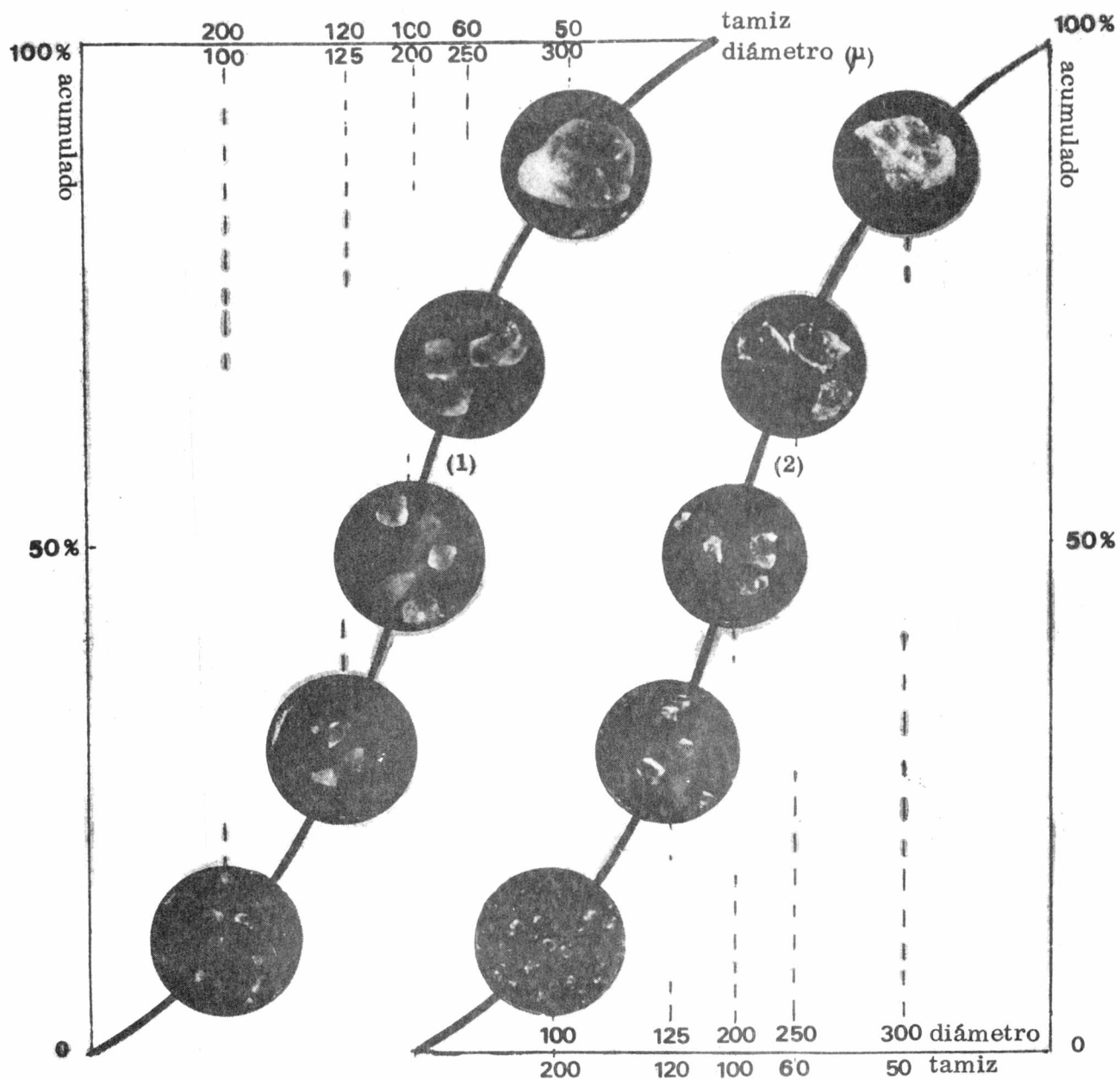


Fig. Curva granulométrica de frecuencias acumuladas para sedimento natural (1) y sedimento artificial marcado con Sc-46 producido por la CNEA y otras empresas nacionales (2).

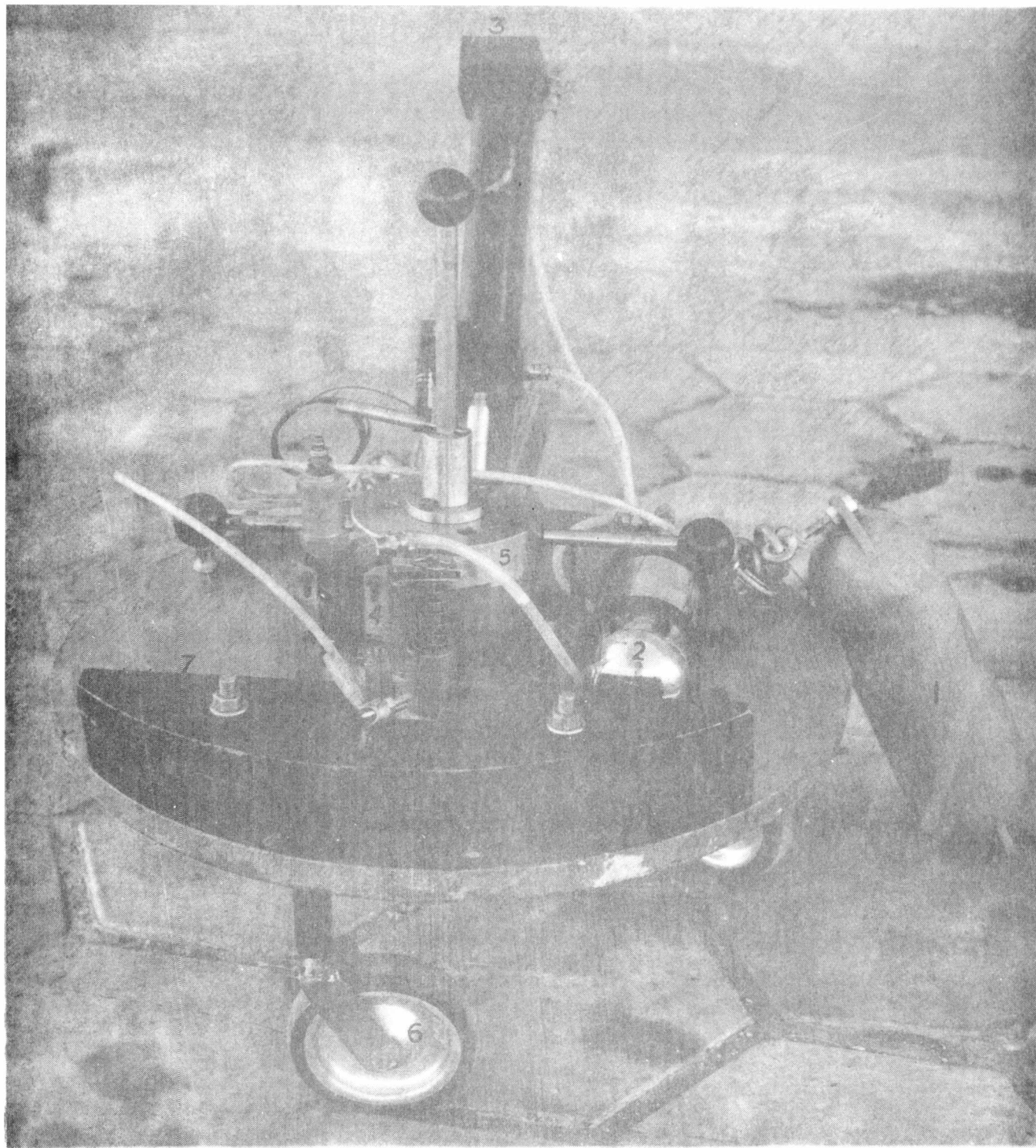


Fig. 1. Inyector de sedimentos marcados: 1) Baliza; 2) Cámara de presión; 3) Pistón neumático; 4) Válvula de retención y de tres vías; 5) Cámara de sedimentos con compuerta automática; 6) Ruedas para facilitar desplazamientos en tierra; 7) Contrapeso.-

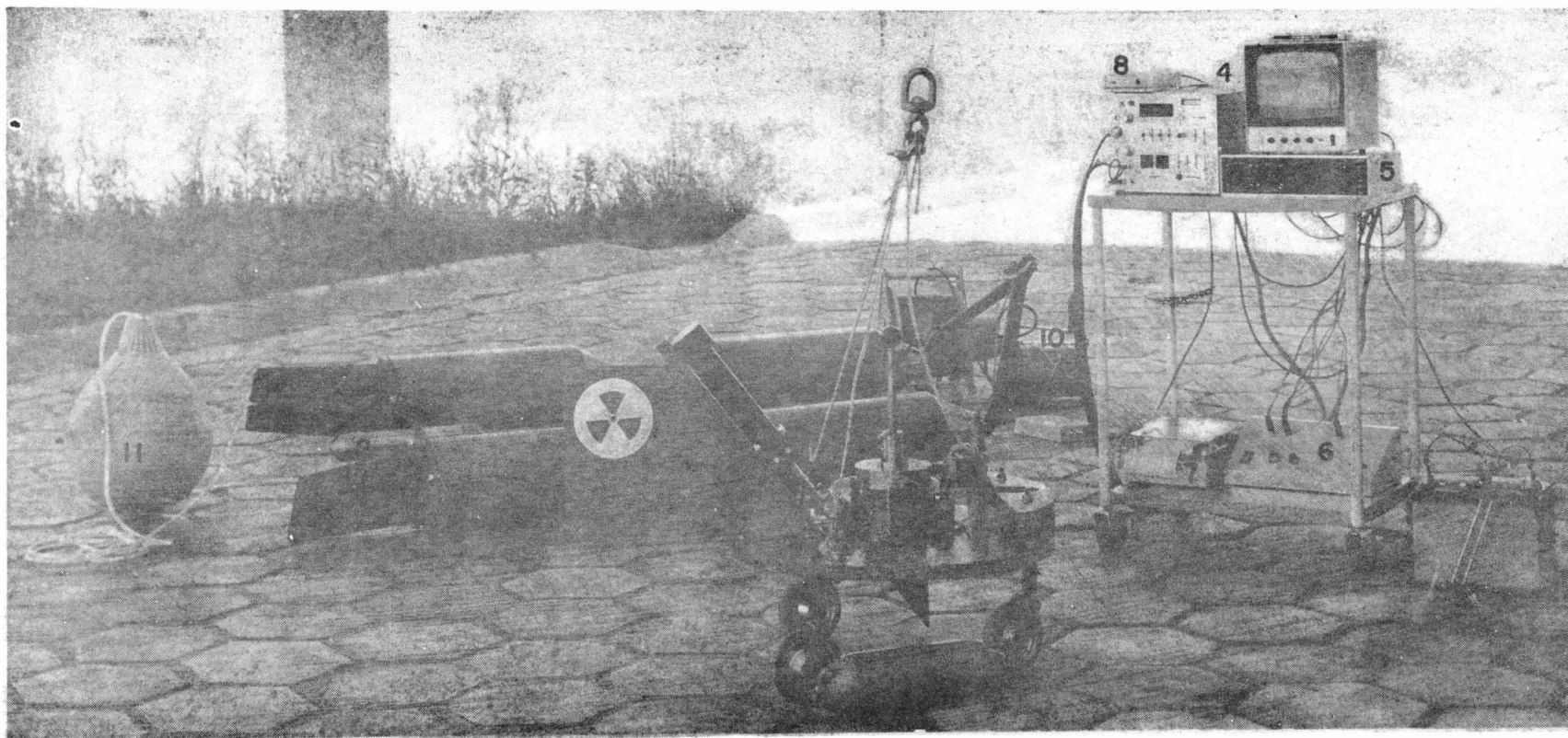


Fig. 17 Equipos e instrumental : 1) Baliza del inyector; 2) Trineo doble cuerpo; 3) Inyector de sedimentos marcados; 4) Multicanal y multiescalfmetro; 5) Integrador; 6) Tablero de conexiones; 7) Registrador gráfico; 8) Disparador; 9) Sonda detectora; 10) Cabrestante mecánico; 11) Baliza del trineo.-

* Proyectoado y construido por la CNEA.