

ANALISIS DE DOS FOTOGRAFIAS ERTS* COMO POSIBLES INDICADORES DE SURGENCIA COSTERA EN LA ZONA NORTE DE CHILE

Por

FERNANDO L. E. ROBLES **

University of Swansea, South Wales, U.K.

ALVARO L. ULLOA **

Universidad del Norte, Coquimbo, Chile.

JOSE R. PINEDA **

Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.

S U M M A R Y

ANALYSIS OF TWO PHOTOGRAPHS FROM ERTS* AS POSSIBLE
INDICATORS OF COASTAL UPWELLING IN NORTHERN CHILE.

Shades of gray were observed in two ERTS images off northern Chile coastal waters. These photographs were reproduced in band 5, combined with high-density yellow false colour (diaz) images; afterwards they were contrasted against several physico-chemical and biological oceanographic variables. A probable relationship was established among the shades of gray detected, and coastal upwelling of equatorial subsurface water. The significance of this correlation to fisheries-oceanography is discussed, as part of a national policy towards the use of remote sensors in the search of natural resources.

* Earth Resources Technological Satellite.

** Formerly Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) Santiago, Chile.

1. INTRODUCCION

La técnica de detectar con sensores remotos comenzó a ser utilizada en oceanografía en la última década, para la medición de temperatura superficial y la confección de cartas de distribución de esta variable, aplicándolas posteriormente a las pesquerías como una forma de pronósticos de probables áreas de captura.

En los últimos años el uso de sensores remotos se ha diversificado a la medición de otras variables, tales como el color del agua para evaluar contaminación, productividad biológica, sedimentos en suspensión, etc. Las imágenes del ERTS-1 han aportado un valioso material a estos estudios, abriendo atractivas posibilidades de uso en el campo de la oceanografía.

El presente trabajo forma parte del "Seminario de evaluación de imágenes ERTS", organizado por el Instituto Geográfico Militar en Marzo de 1974,

y tiene por objetivo estudiar la factibilidad de utilizar estas imágenes como indicadores de surgencia costera. Este fenómeno es producido por la combinación de los efectos de los vientos de S. y S. W., dominantes en Primavera y Verano, en el área norte de Chile y de la rotación de la tierra, que desplazan el agua superficial, más temperada, fuera de la costa, siendo ésta reemplazada por aguas sub-superficiales, más frías, y ricas en nutrientes, que fertilizan extraordinariamente la capa superficial, dando origen a una alta productividad biológica.

Para este estudio se han seleccionado dos fotografías del norte de Chile, en razón a que el Instituto de Fomento Pesquero estaba desarrollando en su etapa inicial un proyecto de pronosis del ambiente de captura de peces palágicos para la zona Arica-Caldera y además se contaba con datos de terreno relativamente contemporáneos, lo que hacía más factible la utilización de estas imágenes.

El material fotográfico y las facilidades de procesamiento inherentes a él, fueron proporcionados por el Instituto Geográfico Militar. Las variables oceanográficas corresponden a datos recolectados y procesados por el personal de la Sección Investigación Básica Oceanográfica del Instituto de Fomento Pesquero.

Los autores agradecen al "Centro de Distribución EROS" del Instituto Geográfico Militar las facilidades otorgadas para la elaboración de este estudio, y al Centro de Investigaciones Submarinas de la Universidad del Norte de Coquimbo, por la realización de los gráficos y las ampliaciones fotográficas finales.

2.- MATERIALES Y METODOS

De las fotos obtenidas por el satélite ERTS-1 con una cámara multibanda (MSS), en banda 4, 5, 6 y 7, las que corresponden aproximadamente a las longitudes de onda de los colores verde - azul, rojo, cercano infrarrojo y mediano infrarrojo, (0,7-1,1 micrones) (ver tabla I) y en una franja de litoral y océano que abarca desde Arica hasta Caldera, se seleccionaron dos positivos blanco y negro:

TABLA I:

Bandas multispectrales de barrido del ERTS, y sus correspondientes longitudes de onda y colores;

Banda N°	Longitud de onda (micrones)	Color
Banda 4	0.5 - 0.6	Verde - azul
Banda 5	0.6 - 0.7	Rojo
Banda 6	0.7 - 0.8	Cercano infrarrojo
Banda 7	0.8 - 1.1	Mediano "

- i) El primero correspondiente al área denominada A-5, obtenido el 25 de Marzo de 1973, N° 1245 - 14144, y que comprende desde los 29°40'S a los 22°20'S de latitud y desde la costa hasta los 71°40'W de longitud; esto es, desde Punta Cotitira a Punta Copaca y hasta aproximadamente 80 millas náuticas hacia el oeste, desde la línea de la costa (LAM. I).

De las comparaciones múltiples se observó que las mejores combinaciones eran positivo banda 5 con Amarillo densidad 1, y, por otro lado, Amarillo densidad 2 con Azul densidad 3.

Las imágenes sobrepuestas así seleccionadas se procesaron entonces en el laboratorio fotográfico, con el fin de obtener ampliaciones negativas en papel fotográfico. En esas experiencias se agregaron además imágenes positivas en las bandas 4, 6 y 7 con sobreposición de falso color amarillo 1, de la banda respectiva (ver Tabla III).

TABLA III

Tiempo de exposición con una ampolleta de 150 W., para imágenes positivas, en 4 bandas, con falso color amarillo 1. Tiempo revelado, 3 minutos, papel fotográfico Grado 4.

	Minutos de exposición		
	2'	2'	66'
Pos. b.4-A ₁	X	X	X
b.5-A ₁	-	/	X
b.6-A ₁	X	X	X
b.7-A ₁	-	-	X
A ₂ - C ₃	X	X	X

Observaciones: / Bueno
 - Regular
 X Malo

Esta experiencia de laboratorio confirmó las apreciaciones visuales anteriores, en el sentido de que las mejores imágenes, por graduación de la Escala de Grises, se obtuvieron en positivos banda 5 con amarillo 1.

A continuación se seleccionaron datos oceanográficos relativamente contemporáneos de terreno ("ground truth") que coincidieran con las fechas de las fotografías. Se seleccionaron los siguientes cruceros oceanográficos:

Area A-5: Crucero 118 (1-2) 73 CP; este crucero oceanográfico, realizado en el B/C "Carlos Porter", del IFOP, cubrió el área entre el 29 de Marzo y el 1º de Abril de 1973 con las estaciones oceanográficas que se indican en la figura 1; sobre su base, se trazaron en la imagen las siguientes variables: batimetría, en metros (fig. 2); temperatura superficial, en °C (fig. 3); salinidad superficial, en ‰ (fig. 4); oxígeno disuelto superficial, en ml/l (fig. 5); oxígeno disuelto, a la profundidad media de la termoclina (fig. 6); estabilidad a la profundidad media de

la termociclina (fig. 7); densidad (GT) superficial (fig. 8); topografía dinámica superficial (EAD) relativa a 100 db. (fig. 9); distribución de volúmenes de zooplácton, en cc/m² (fig. 10); distribución e identificación de ecorrazos (fig. 11).

Se trazó además la distribución vertical de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en una sección latitudinal, desde la costa hasta 50 millas hacia el oeste y entre la superficie y 200 metros de profundidad, efectuada a la altura de Pta. Arenas (20° 49'S) (fig. 12 a, b y c).

Área A-6: Crucero 114 (4) 72 CP-B, este crucero se realizó en el B/C "Carlos Porter" del IFOP, y cubrió el área entre el 28 de Noviembre y el 1° de Diciembre de 1972; las estaciones oceanográficas correspondientes al área se indican en la figura 13. Basándose en ellas, se trazaron las mismas variables descritas para la zona A-5. Sin embargo, en atención a que el lapso transcurrido entre la obtención de los datos oceanográficos y la toma de la fotografía fué alrededor de 40 días, se incluyen, para efectos de este trabajo, sólo los gráficos de topografía dinámica superficial (EAD) relativa a 500 db (fig. 14 y 2 secciones, de 100 millas c/u, con distribución vertical de T°C, S‰ y O₂ ml/l hasta 1000 metros de profundidad, situadas frente a Cta. Tames (22° 40' S) y Antofagasta respectivamente (figs. 15 y 16).

Estos gráficos son los que presentan las connotaciones generales más significativas en relación a las posibles indicaciones de surgencia mostradas por la imagen.

La información oceanográfica se obtuvo por medio de botellas de Nansen y termómetros reversibles, de precisión; las salinidades se determinaron por medio de un salinómetro inductivo AUTOLAB; el oxígeno disuelto se analizó por el método de Winkler modificado* por STRICKLAND y PARSONS (1965); las variables dinámicas se obtuvieron por medio del programa de computación de datos oceanográficos del IFOP (IFOP 51-IBM 369); los volúmenes de zooplácton se obtuvieron de muestras capturadas con red de Hensen, entre 50 y 0 metros de profundidad; el ecorrazo se efectuó con un ecosonda SIMRAD EK-35, trabajando a la Escala ampliada 0-75 metros.

3. DISCUSION

En los negativos mostrados en las Láminas I y II, los tonos más oscuros corresponderían a intensidades mayores de verde, las que postulamos asociadas a floraciones fitoplanctónicas provocadas por surgencia. Si bien no disponemos de datos contemporáneos de productividad primaria, la serie de variables oceanográficas y biológicas graficadas en el área y período de las imágenes, parecen confirmar esta hipótesis.

Del área mostrada por la Lám. I, las estaciones asociadas más directamente al fenómeno, son los N°s. 25, 26, 27, 28 y 29 (fig. 1), ubicadas justamente sobre un pequeño ensanchamiento de la Plataforma Continental (fig. 2), configuración que ciertamente refuerza a la dinámica del aporte adicional de nutrientes provocado por las cercanías del fondo.

En la zona norte de Chile las aguas que surgen pueden corresponder a dos tipos de agua:

- a) Aguas pertenecientes al mínimo salino sub-antártico ubicado en o inmediatamente bajo la termociclina, hasta aproximadamente los 80 m de profundidad

con salinidades inferiores a 34,8‰ y temperatura entre 15 y 13°.

- b) Aguas exuatoriales subsuperficiales, pertenecientes a la contra/corriente peruano-chilena, o de Gunther, ubicada aproximadamente entre los 100 y 400 metros de profundidad, y caracterizadas por salinidades relativamente altas (34,8‰ o más), temperaturas de lenta variación, entre 14 y 8° C, y un mínimo extremo de O₂ (0,5 ml/l) (ROBLES, ALARCON y ULLOA, 1974).

Ambos tipos de agua son ricos en nutrientes, fundamentalmente fosfatos y nitratos, que al ser aportadas por el afloramiento a la capa fótica, provocan una gran productividad fitoplanctónica superficial, y consecuente productividad biológica general. Comparativamente, los máximos de nutrientes del agua subecuatorial son más importantes que los correspondientes al agua sub-antártica.

Al parecer el matiz señalado por la imagen, corresponde a floraciones debidas a afloramientos de agua sub-ecuatorial. Esto se deduce de las siguientes observaciones:

- a) La temperatura en la zona cubierta por las estaciones 25 a 29 (fig. 3) se presenta notablemente baja, especialmente en la costa, donde alcanza valores inferiores a los 15°C.
- b) Las salinidades en la misma zona (fig. 4) son relativamente altas (en general 34,8‰ en la costa), correspondiendo a los contenidos que caracterizan en la zona norte del país, al agua ecuatorial sub-superficial. Cabe destacar que un poco más hacia el oeste las salinidades disminuyen, lo que no ocurre cuando son aguas sub-antárticas las que surgen. Este último caso (afloramiento sub-antártico) es el más usual en la costa norte y central de Chile.

En la zona exterior de Pta. Paracho (20°49'S) es posible observar además el frente termohalino sub-tropical, caracterizado por salinidades superiores a 34,9‰, y temperaturas sobre 19°C.

- c) La distribución del oxígeno disuelto superficial (fig. 5) es tal vez la confirmación más evidente de que el afloramiento es de aguas ecuatoriales sub-superficiales, al presentar valores costeros inferiores a 3 ml/l, algunos con saturaciones de sólo un 40%, a pesar de estar estas aguas con contacto directo con la atmósfera. A fin de confirmar esta apreciación, y minimizar el efecto en los datos del O₂ atmosférico, se trazó también esta variable a la profundidad media de la termoclina. (fig. 6), observándose una disminución de los contenidos de O₂ en la zona costera, y a sólo 10m de profundidad, a menos de 2 ml/l.
- d) La estabilidad positiva como indicador de tendencia de afloramiento (fig. 7) muestra en general valores extraordinariamente altos cerca de la costa. Los valores positivos bajos o negativos que se observan en el exterior corresponden a la tendencia estabilizadora y eventuales hundimientos provocados por el avance hacia el S.E. del frente termo-halino sub-tropical. Los altos valores positivos cerca de la costa, estarían indicando un transporte vertical muy activo, lo que ayuda al afloramiento de aguas más profundas, como son las sub-ecuatoriales.
- e) La distribución de la densidad a la presión de la superficie (Sigma-t) (Fig. 8) al combinar las variables temperatura y salinidad, guarda, como cabe esperar, una estrecha relación con las consideraciones anteriores, presentando los más altos valores cerca de la costa, donde hay bajas temperaturas y salinidades relativamente altas (agua ecuatorial sub-superficial), y los más bajos valores en el frente térmico sub-tropical.
- f) La corriente superficial relativa mostrada por la topografía dinámica (Delta), a pesar de haber sido trazada a sólo 100 db de referencia, muestra claramente un desplazamiento costero de cierta intensidad hacia el norte (fig. 9). En

la zona cubierta por las estaciones N°s 25 a 28, el desplazamiento es más hacia el NW. lo que concuerda con la dirección de la deriva provocada por la dinámica de la surgencia. Como es de esperar, el desplazamiento se invierte en el frente sub-tropical exterior.

- g) Los volúmenes de zooplancton señalados en la fig. 10, muestran sus más altos valores en, o en las cercanías de la zona costera analizada, lo que en términos generales viene a ser un indicador grueso de mayor productividad superficial. Se incluye además la fig. 11 que muestra, a través de la distribución e identificación de ecotrazos, una densidad y variedad de recursos pesqueros de cierta importancia, asociada a la zona.
- h) La sección latitudinal trazada frente a Pta. Patache basada en los datos aportados por las estaciones 29 a 32 (fig. 12a, b y c) confirma las apreciaciones anteriores. El perfil de temperatura (fig. 12a) nos señala claramente el abundante afloramiento de isotermas cerca de la costa, como también la presencia exterior superficial del agua sub-tropical (temperaturas mayores de 19°C).

El ensanchamiento observable en el área costera entre las isotermas de 13° y 12° es un indicador de la presencia del agua ecuatorial sub-superficial.

El perfil de salinidad (fig. 12b) nos indica que el agua que surge, proviene del máximo relativo sub-ecuatorial (34,8) y no del mínimo subantártico (34,6) que se muestra desplazado hacia el oeste. El perfil del oxígeno (fig. 12c) confirma lo anterior al presentar una clara tendencia de afloramiento del mínimo de oxígeno sub-ecuatorial (0,5 ml/l) en la zona costera.

En el área mostrada por la fig. 13, los datos disponibles, como se ha mencionado, son anteriores cerca de 40 días a la fecha de la toma de la imagen. (Lámina II) Sin embargo se ha estimado de interés incluir tres gráficos basados en dichos datos, por las correlaciones que ellos muestran vinculadas al notable matiz que se observa al norte de la península de Mejillones.

El primero (fig. 14) se refiere a la corriente superficial relativa, representada por la topografía dinámica referida al nivel de 500 db. Se observa una buena correspondencia entre la dirección e intensidad de flujo costero hacia el norte y el matiz señalado. Al mismo tiempo es dable observar en el área intermedia exterior, un avance extraordinario del frente sub-tropical superficial hacia el sur. La cercanía de ambos frentes es un buen indicador de la actividad del afloramiento al norte de la Península de Mejillones. Las condiciones señaladas fueron también detectadas en graficaciones de propiedades físico-químicas, efectuadas para esta zona, similares a las trazadas para el área de la Fig. 1.

Cabe señalar que por su configuración geográfica, en las cercanías de esta península se han detectado centros de surgencias casi permanentes, usualmente de aguas sub-antárticas.

El segundo gráfico muestra la distribución vertical de la temperatura, salinidad y oxígeno hasta 1.000 metros de profundidad en la sección efectuada frente a Cta. Tames (22°40'S) (fig. 15). En el perfil de temperatura se observa nuevamente un abundante afloramiento costero de isotermas relativamente coincidente al matiz de la imagen. El perfil de salinidad nos muestra que las aguas que surgen pertenecen indudablemente al máximo relativo ecuatorial sub-superficial con salinidades generalmente superiores a 34,8‰. El mínimo sub-antártico se encuentra de nuevo notoriamente desplazado hacia el oeste. Se observa además en la zona exterior de este perfil la penetración de la masa subtropical superficial, con salinidades superiores a 34,9‰.

Finalmente, el perfil de O₂ nos confirma que las aguas que surgen pertenecen al mínimo de oxígeno ecuatorial sub-superficial (<0,5 ml/l).

El tercer gráfico (fig. 16) corresponde a la sección trazada frente a Antofagasta. En el perfil de temperatura es dable observar, a través de la configuración de las isotermas superficiales, que la surgencia costera es mucho menos activa que el perfil de Caleta Tames. Como consecuencia probable de ello, el perfil de salinidad nos muestra que el máximo sub-antártico sub-superficial (34,6) se encuentra ahora en la costa y el máximo salino ecuatorial sub-superficial (34,8‰) se observa bajo él, muy distante de la superficie. La distribución vertical del oxígeno confirma esta situación general de estabilidad.

En la zona exterior superficial de los perfiles de temperatura y salinidad se observa la fuerte penetración del agua sub-tropical, especialmente por la profundidad que alcanzan los valores salinos superiores a 34,9‰.

Cabe finalmente destacar que la observación de surgencias ecuatoriales sub-superficiales en este período, guarda una estrecha relación con las condiciones anómalas de penetración de este tipo de agua observadas durante 1972 y parte de 1973 en las aguas del norte de Chile.

4. CONCLUSIONES

Las consideraciones anteriores, si bien preliminares, señalan notables posibilidades de uso de las imágenes ERTS, y otras mediciones obtenidas por sensores remotos, para la detección de surgencia costera, agente fertilizador de extraordinaria importancia, cuya descripción permitiría, entre otros fines, el conocimiento y descripción biológicos y eventual pronosis del comportamiento de recursos pesqueros.

Como se ha señalado, el Instituto de Fomento Pesquero se encontraba cumpliendo la fase inicial de un proyecto de pronosis del medio ambiente de de captura de peces pelágicos de la zona norte del país, a través del procesamiento y correlación de datos oceanográfico-pesqueros provenientes de diversas fuentes. (BRANDHORST, 1966; WYRTKI, 1967; ROBLES, 1968).

La posibilidad de incorporar en el futuro a estas fuentes información de imágenes, y/u otro tipo de datos recolectados mediante satélites o aviones de prospección de recursos naturales, ofrece ciertamente extraordinarias expectativas de eventual afinamiento del sistema de pronosis, sobre todo en fases de de prueba y puesta en marcha en coordinación con la flota industrial pesquera.

El disponer de un Centro Nacional de Información de datos de sensores remotos que provea un fácil acceso a la información, sera por tanto vital en la utilización científica y aplicada de estas informaciones. Estimamos que la implementación de dicho centro, debe ser parte consubstancialde una política nacional que a tal efecto deberán formular las diferentes instituciones usuarias, oportunamente.

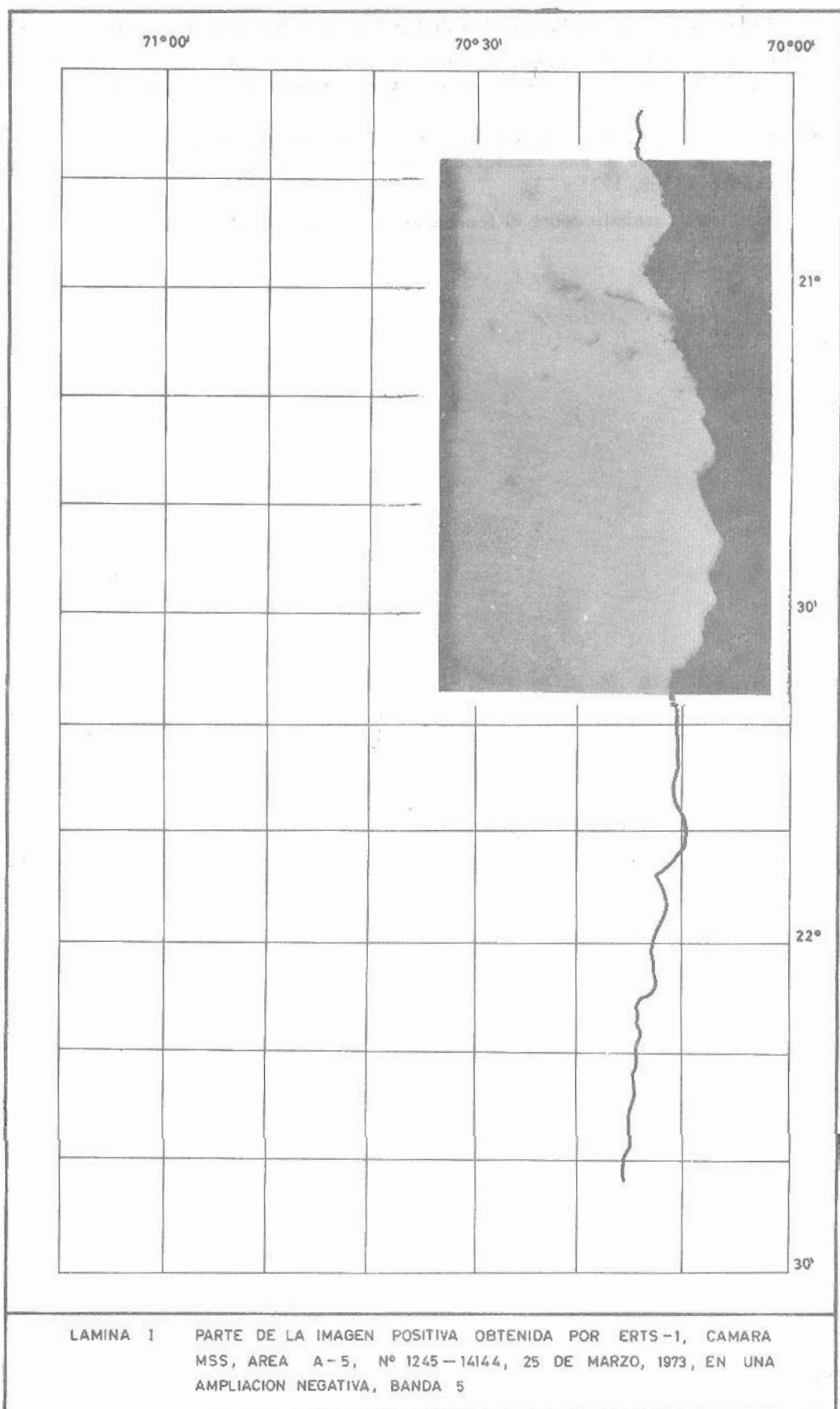
BIBLIOGRAFIA

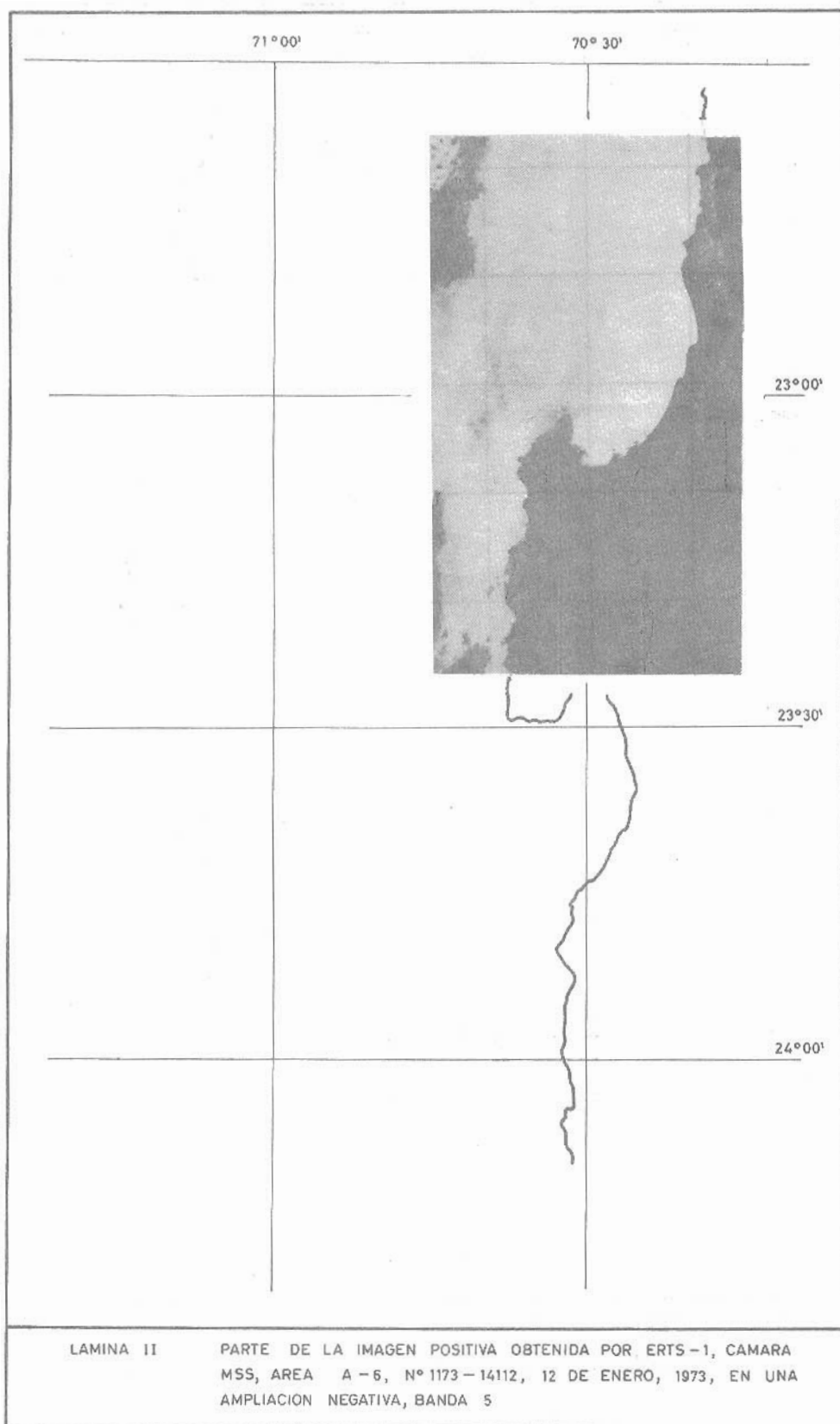
- BRANDHORST, W. 1966. *Upwelling and the anchoveta fishery in Northern Chile*. 2nd. Internt. Oceanog. Upwelling Symposium, Moscow. (manuscript).
- STRICKLAND, J.D.H. & T.R. PARSONS. 1968. *A practical handbook of seawater analysis*, Fisheries Research Board of Canada. Bull. Nº 167.
- WYRTKI, K. 1967. *Circulation and Water Masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean*. Int. J. Oceanol. and Limnol. 1 (2): 117 - 147.

ROBLES, F. 1968, *Descripción general de las condiciones Oceanográficas en Aguas Chilenas*. En Sinopsis sobre algunos aspectos de las pesquerías chilenas . U.C.V.

ROBLES, F., E. ALARCON, & A. ULLOA. 1974. *Las masas de agua en la región norte de Chile y sus variaciones en un período frío (1967) y en períodos cálidos (1969, 1971 - 73)*.

Reunión de trabajo sobre el fenómeno de "El Niño", Guayaquil, Ecuador.





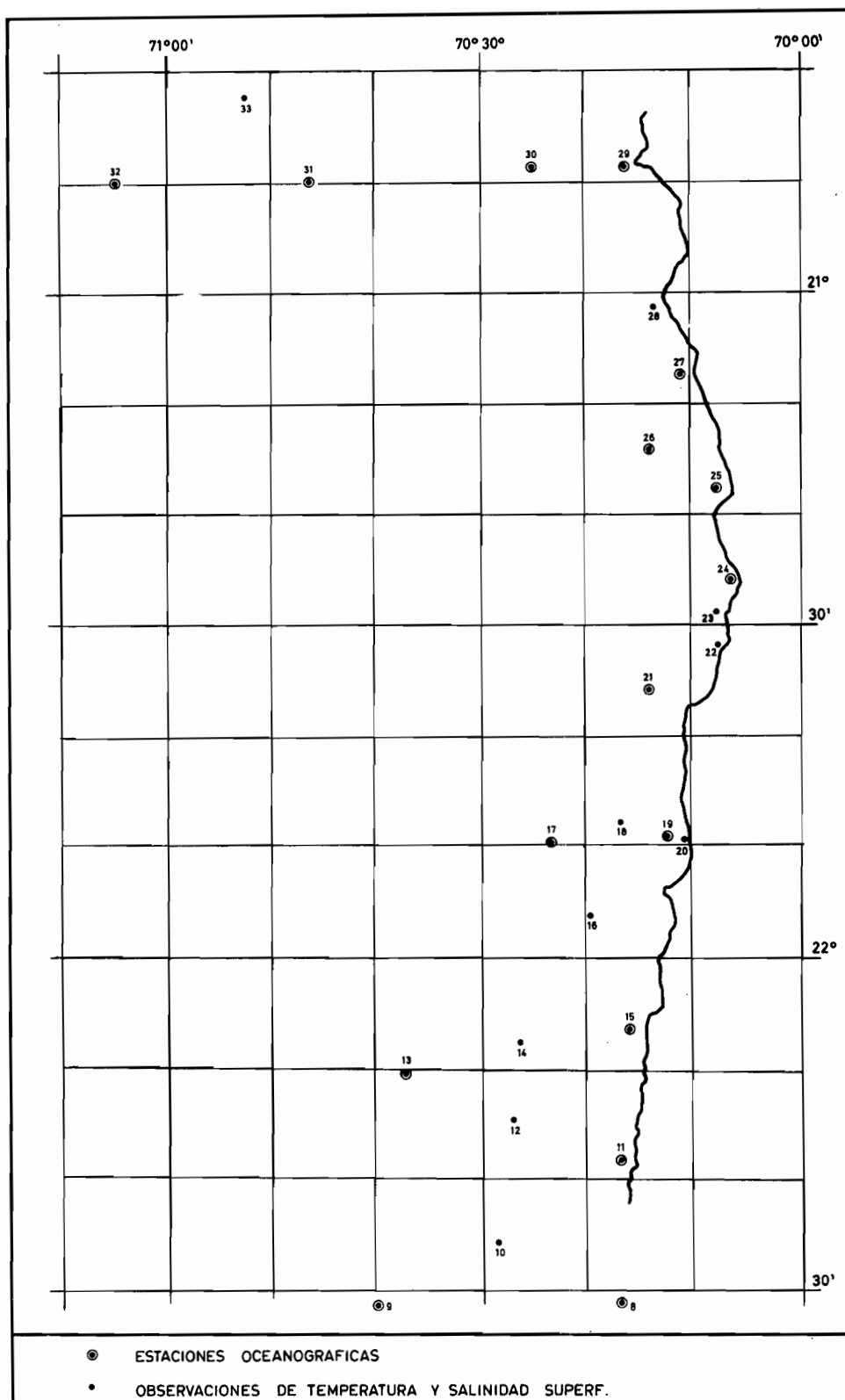


FIG. 1 CRUCERO IFOP. 118 (1-2) 73 CP
(29 de Marzo - 1º de Abril 1973)

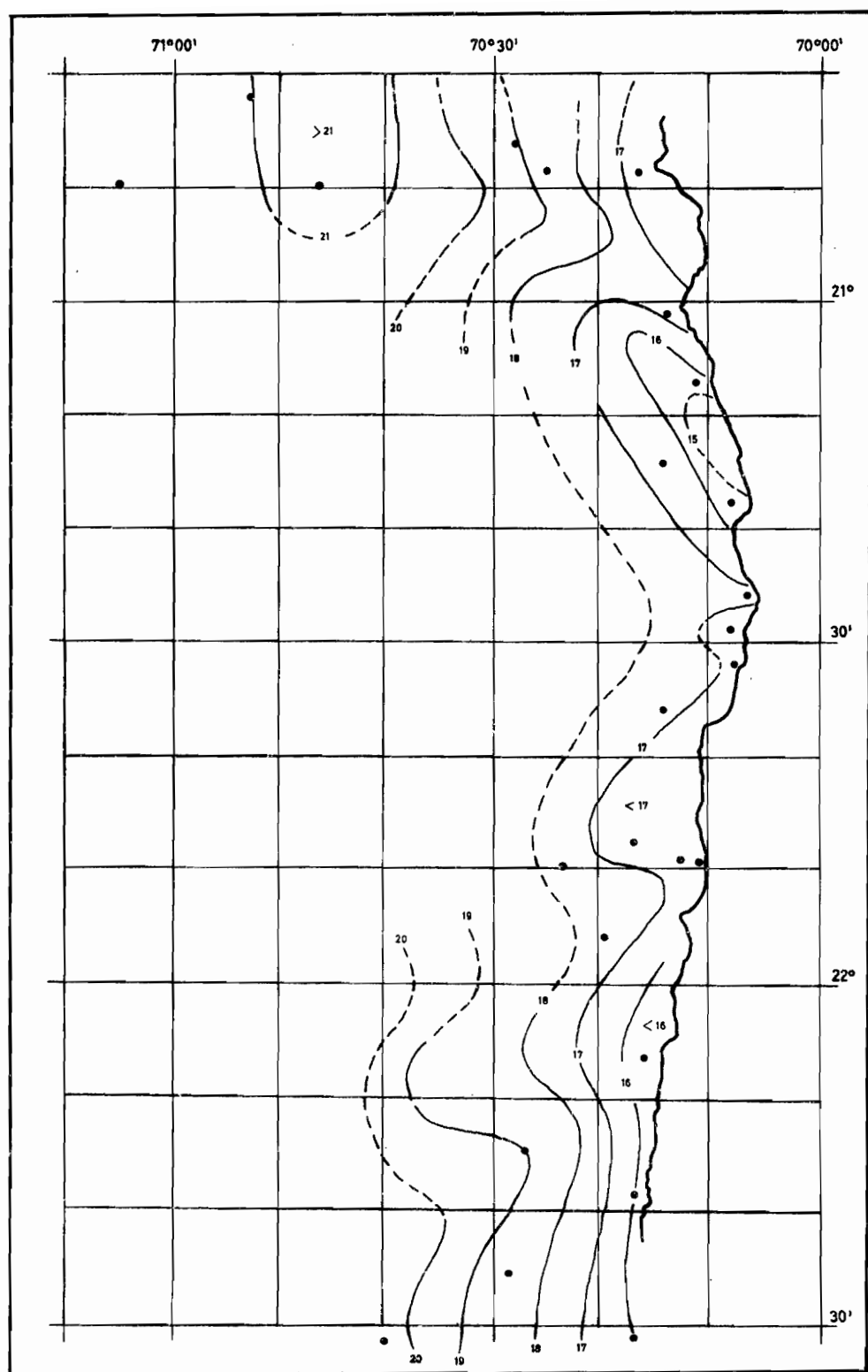


FIG 3. TEMPERATURA SUPERFICIAL (°C)
 CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP.
 (29 de Marzo - 1º de Abril 1973)

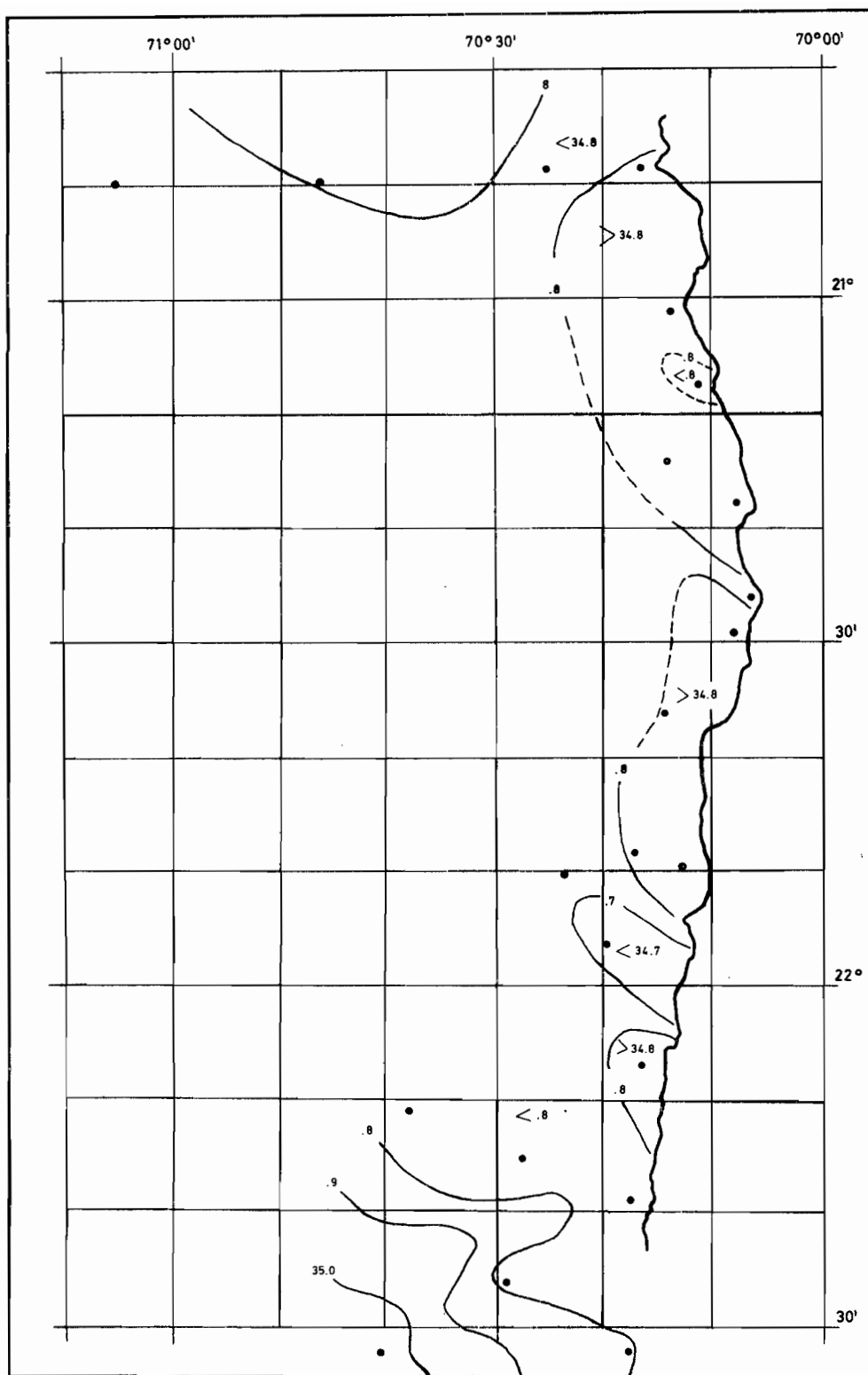


FIG 4. SALINIDAD SUPERFICIAL EN ‰.
 CRUCERO IFOP. 118 (1-2) 73 CP
 (29 de Marzo - 1° de Abril 1973)

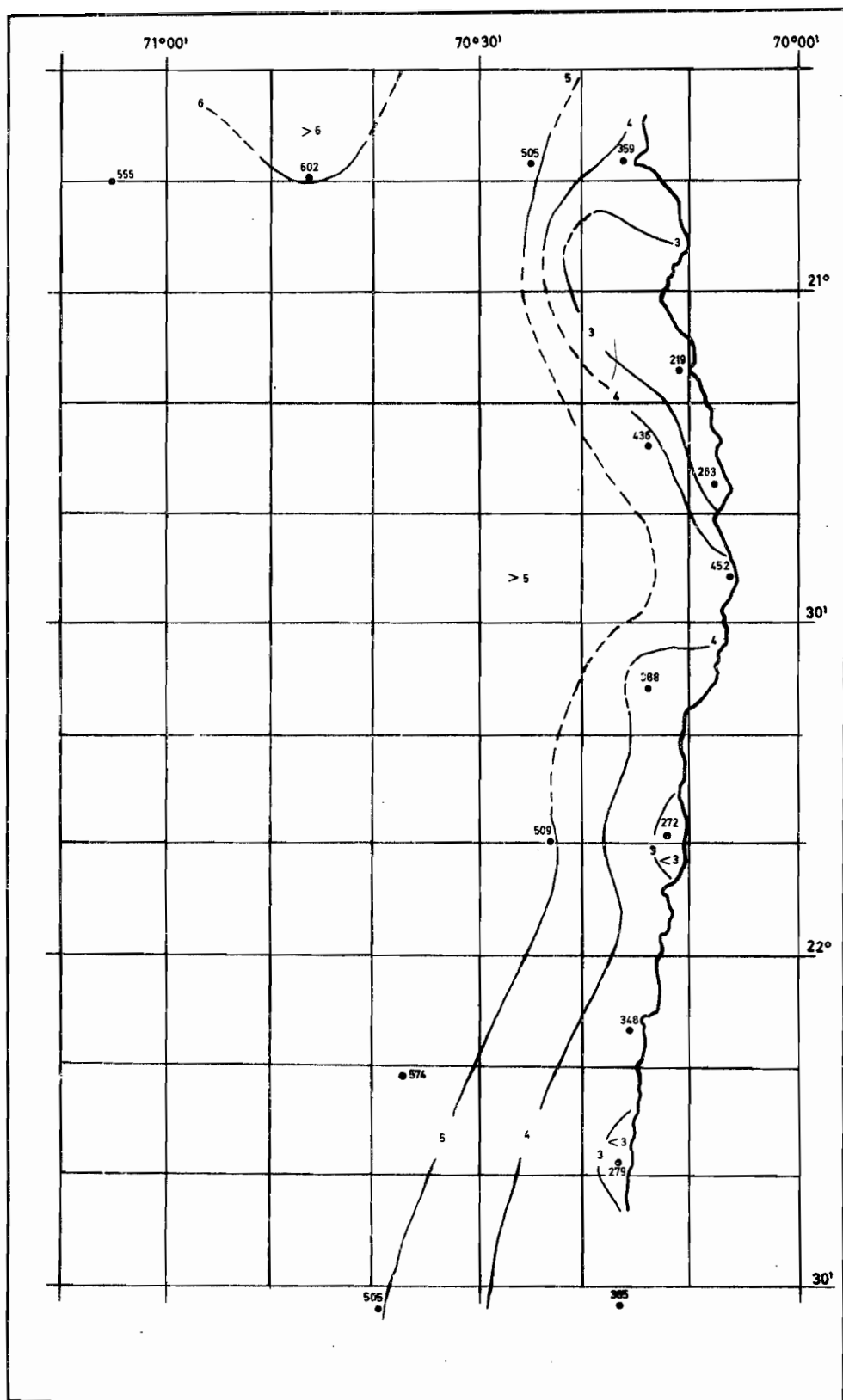


FIG. 5. O_2 SUPERFICIAL en (ml./l.)
CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP
(29 Marzo - 1º de Abril, 1973)

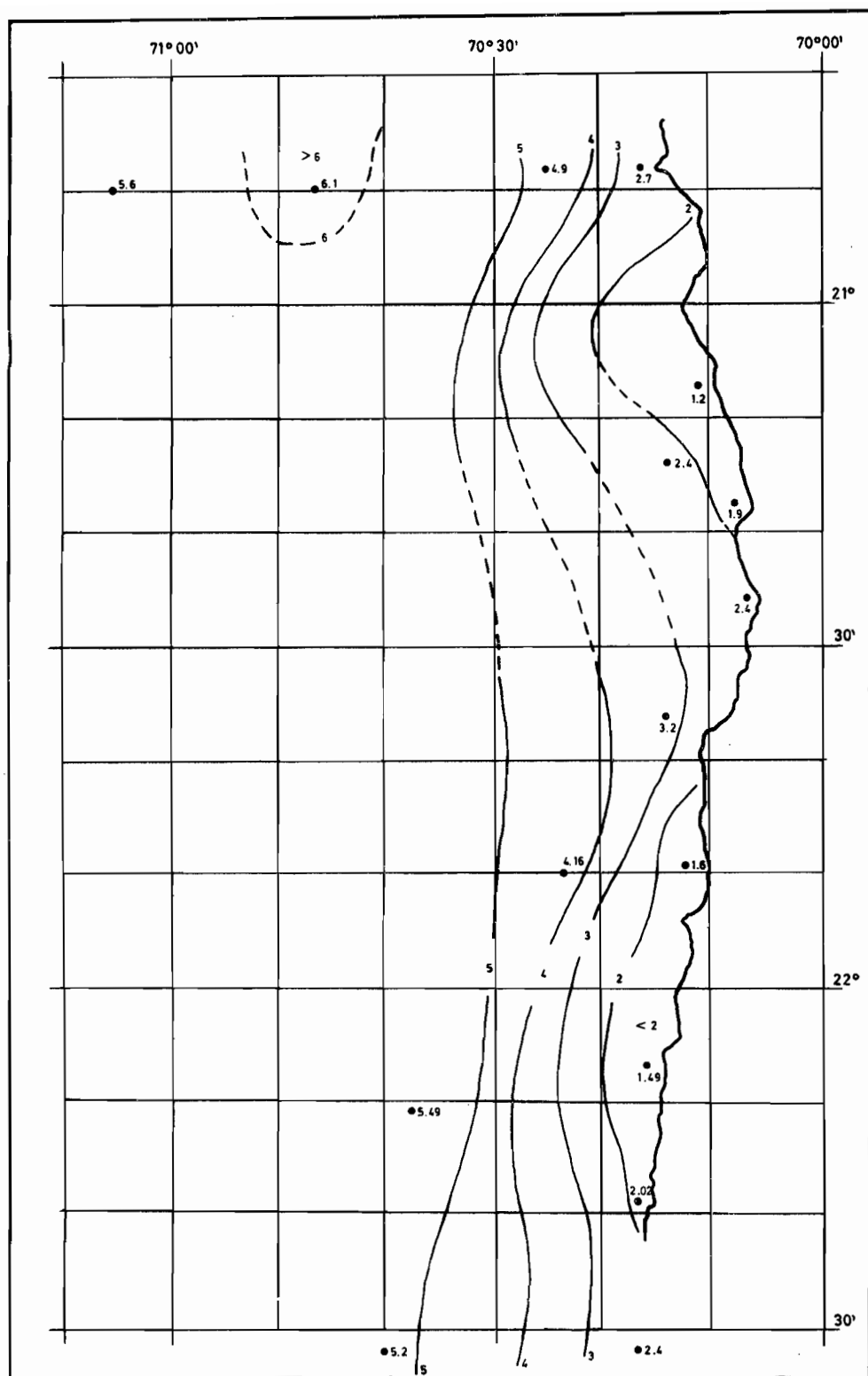


FIG 6. O₂ PROFUNDIDAD MEDIA DE TERMOCICLINA (10 mts)
 CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP
 (29 de Marzo - 1º de Abril, 1973)

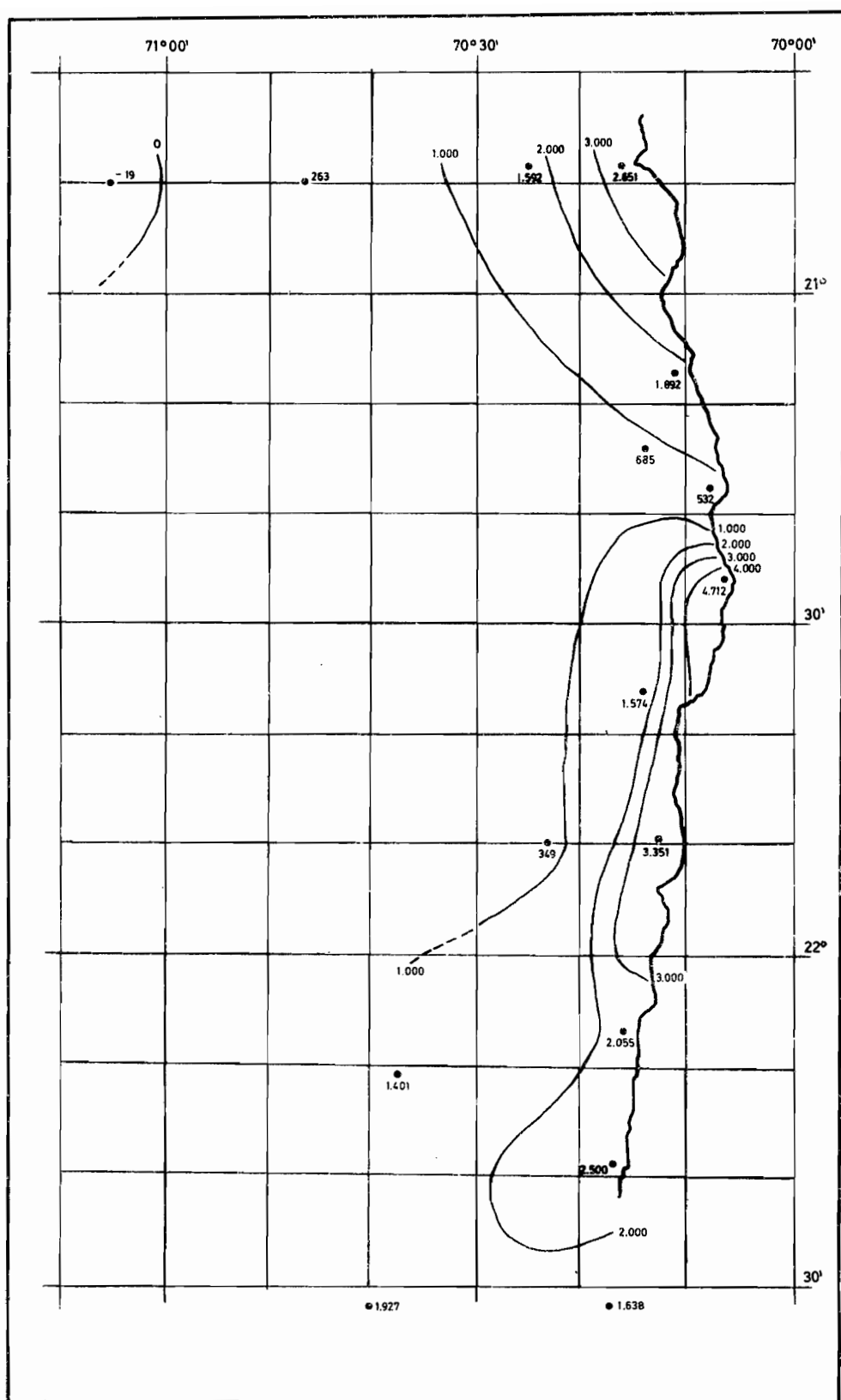


FIG. 7 ESTABILIDAD, PROFUNDIDAD MEDIA DE TERMOCICLINA (10 mts)
 CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP
 (29 de Marzo - 1º de Abril, 1973)

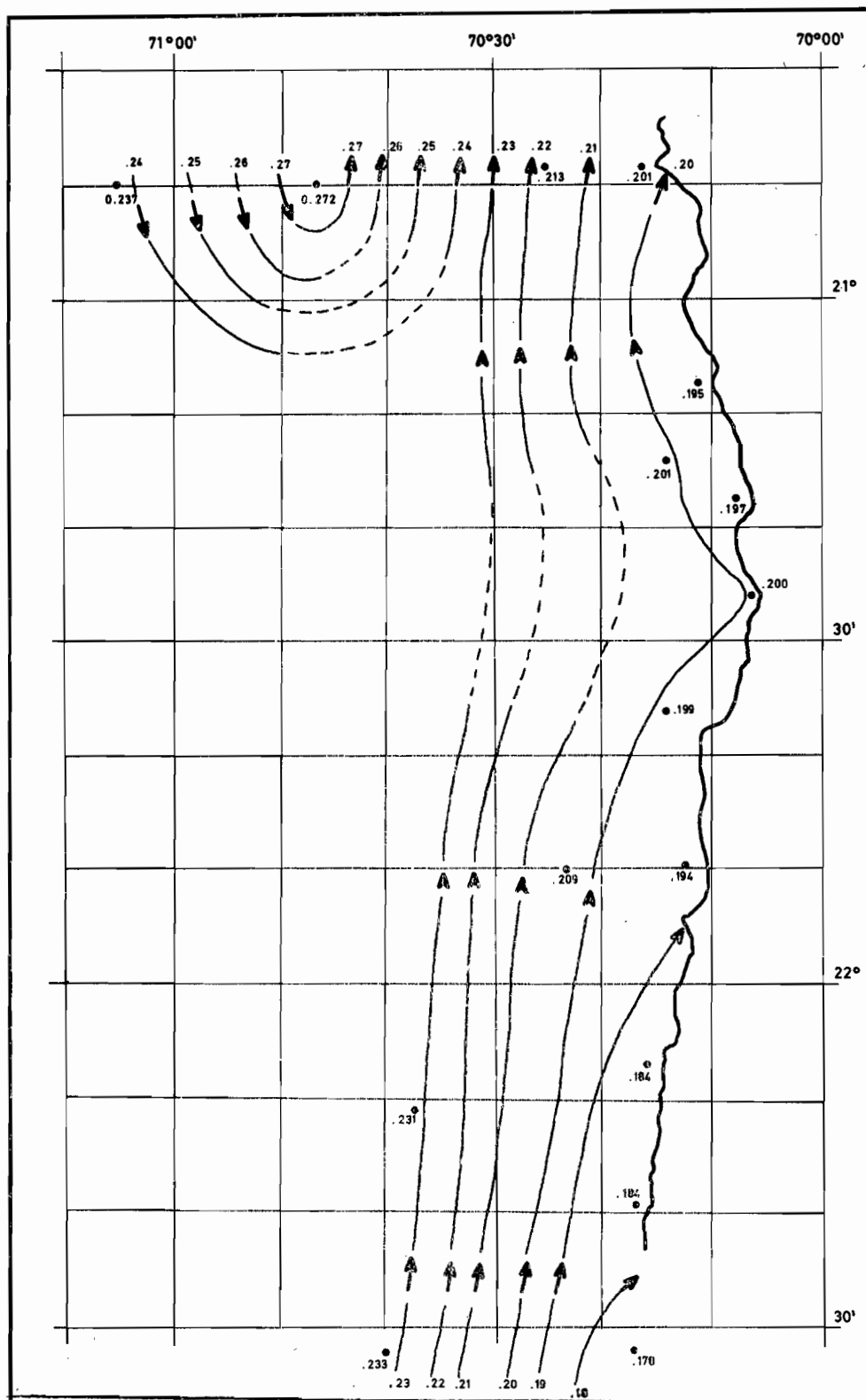
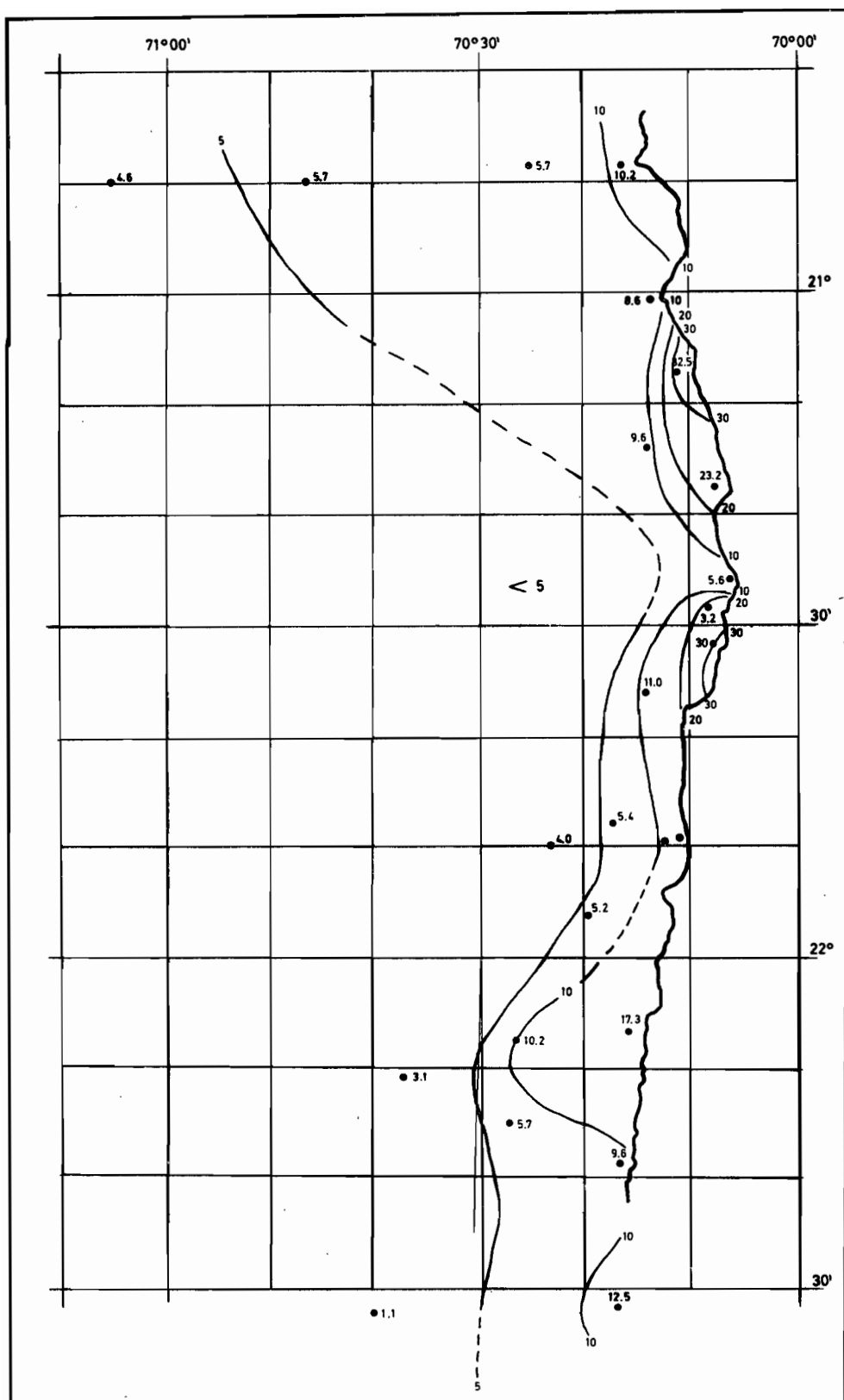


FIG. 9 TOPOGRAFIA DINAMICA SUPERFICIAL ($\pm \Delta D$)
 en metros dinamicos relativa a 100 db.
 CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP
 (29 de Marzo - 1º de Abril, 1973)



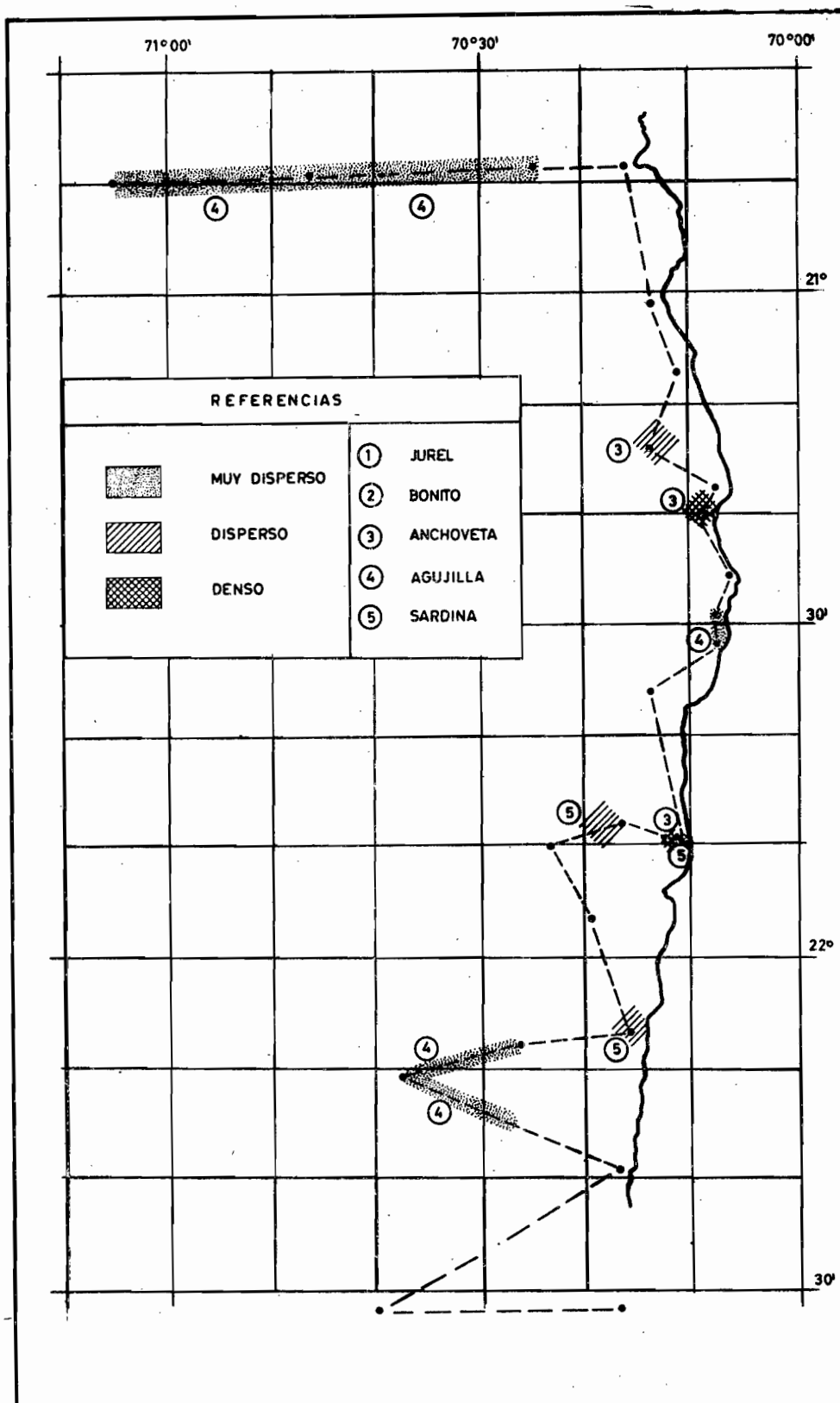


FIG. 11 DISTRIBUCION E IDENTIFICACION DE ECOTRAZOS
CRUCERO IFOP. 118 (1-2) 73 CP
(29 de Marzo - 1º de Abril 1973)

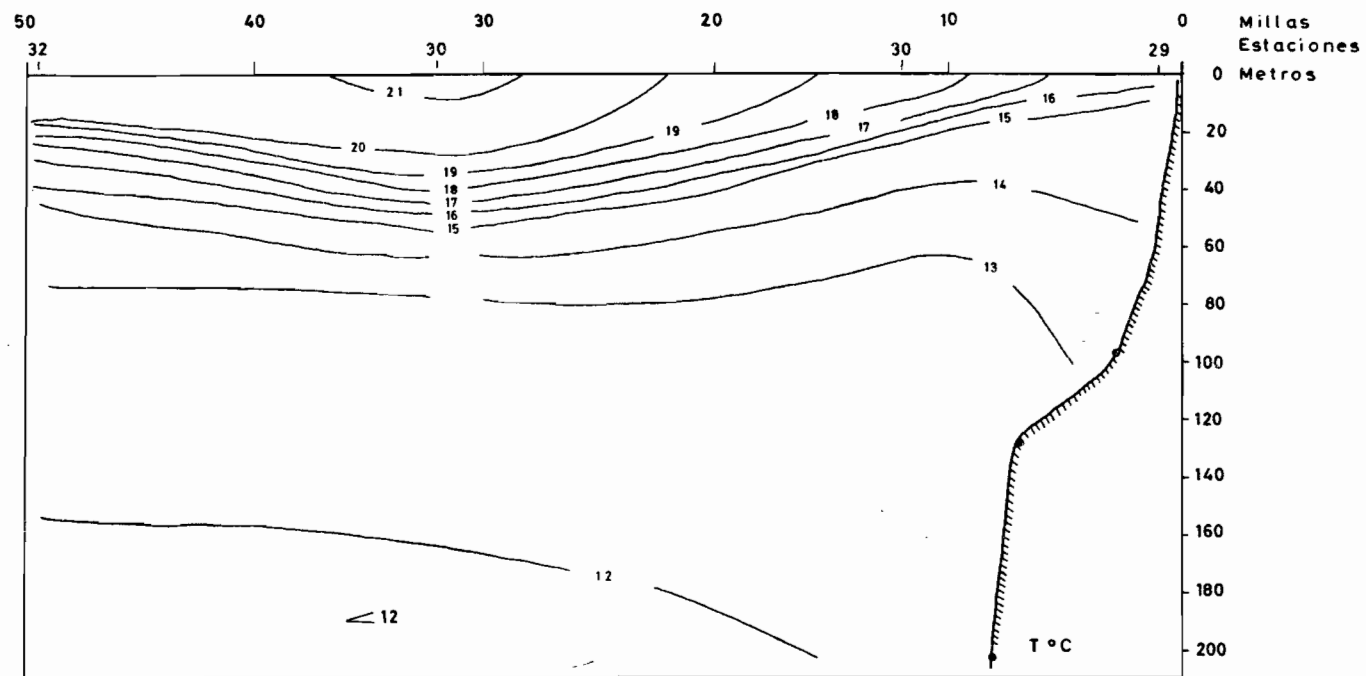


FIG. 12 (a) CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP

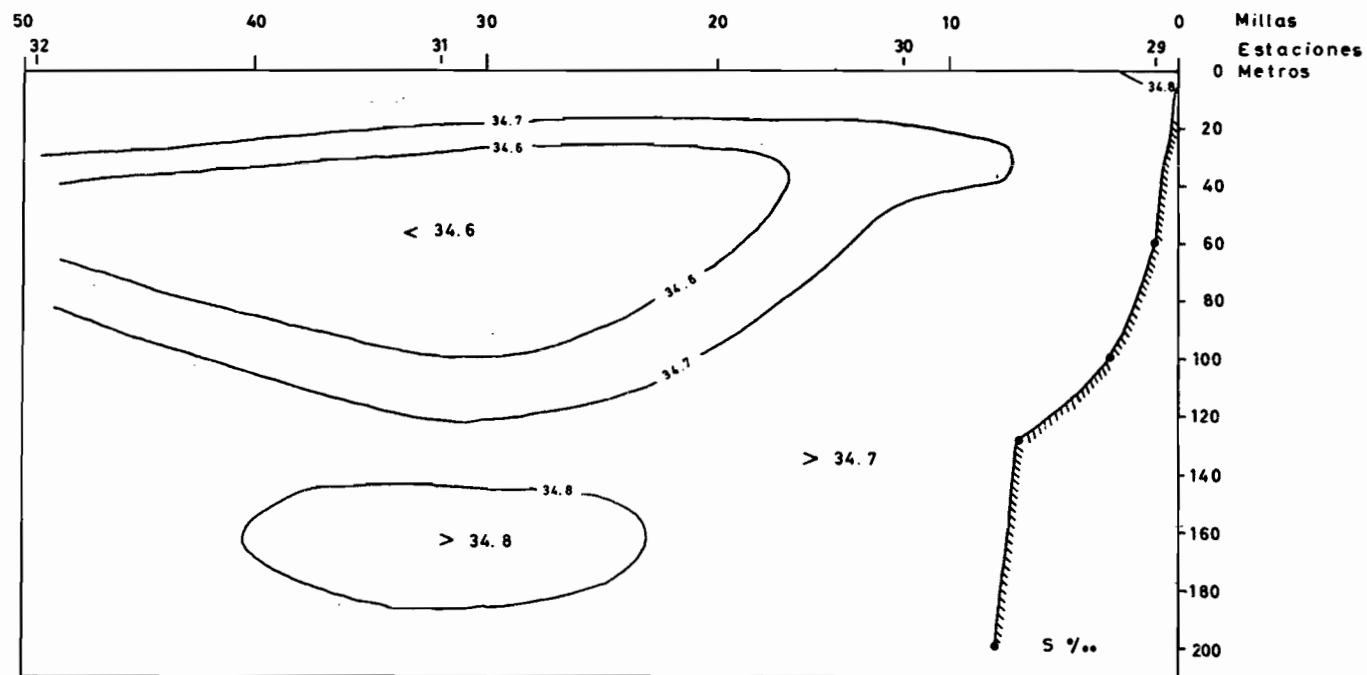


FIG 12 (b)

CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP

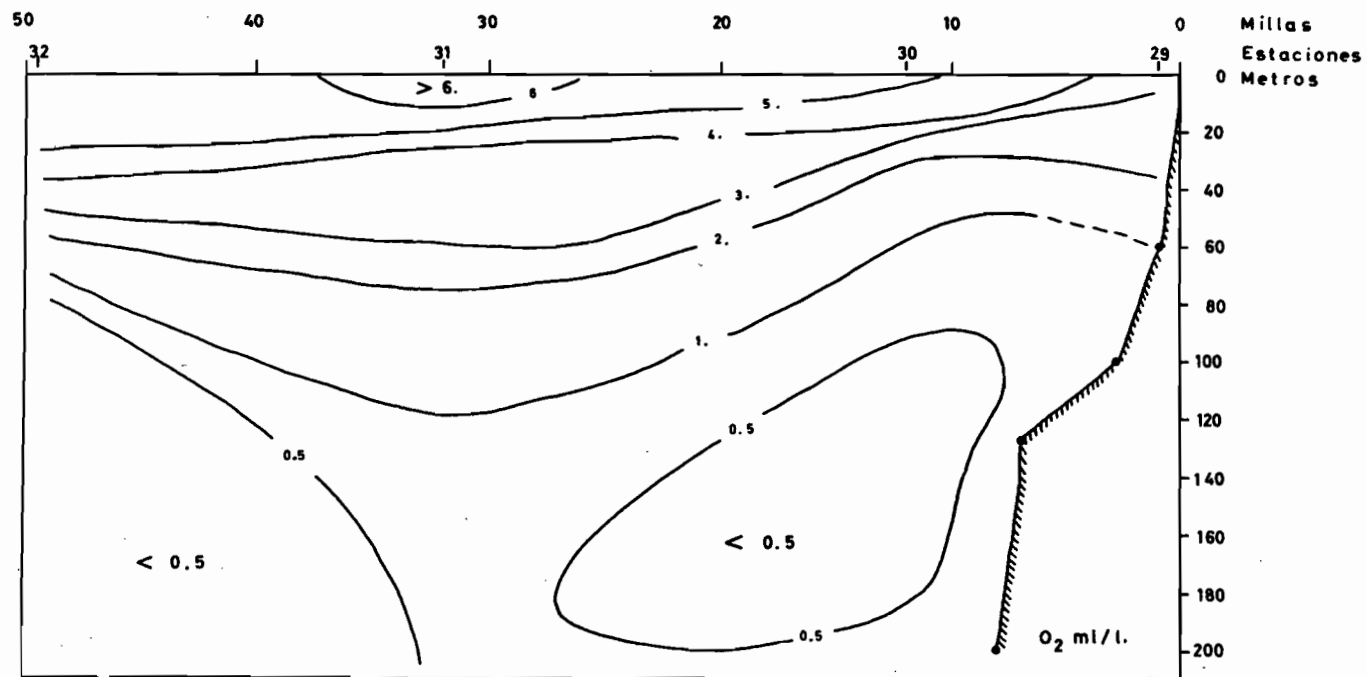


FIG. 12(c)

CRUCERO IFOP 118 (1-2) 73 CP.

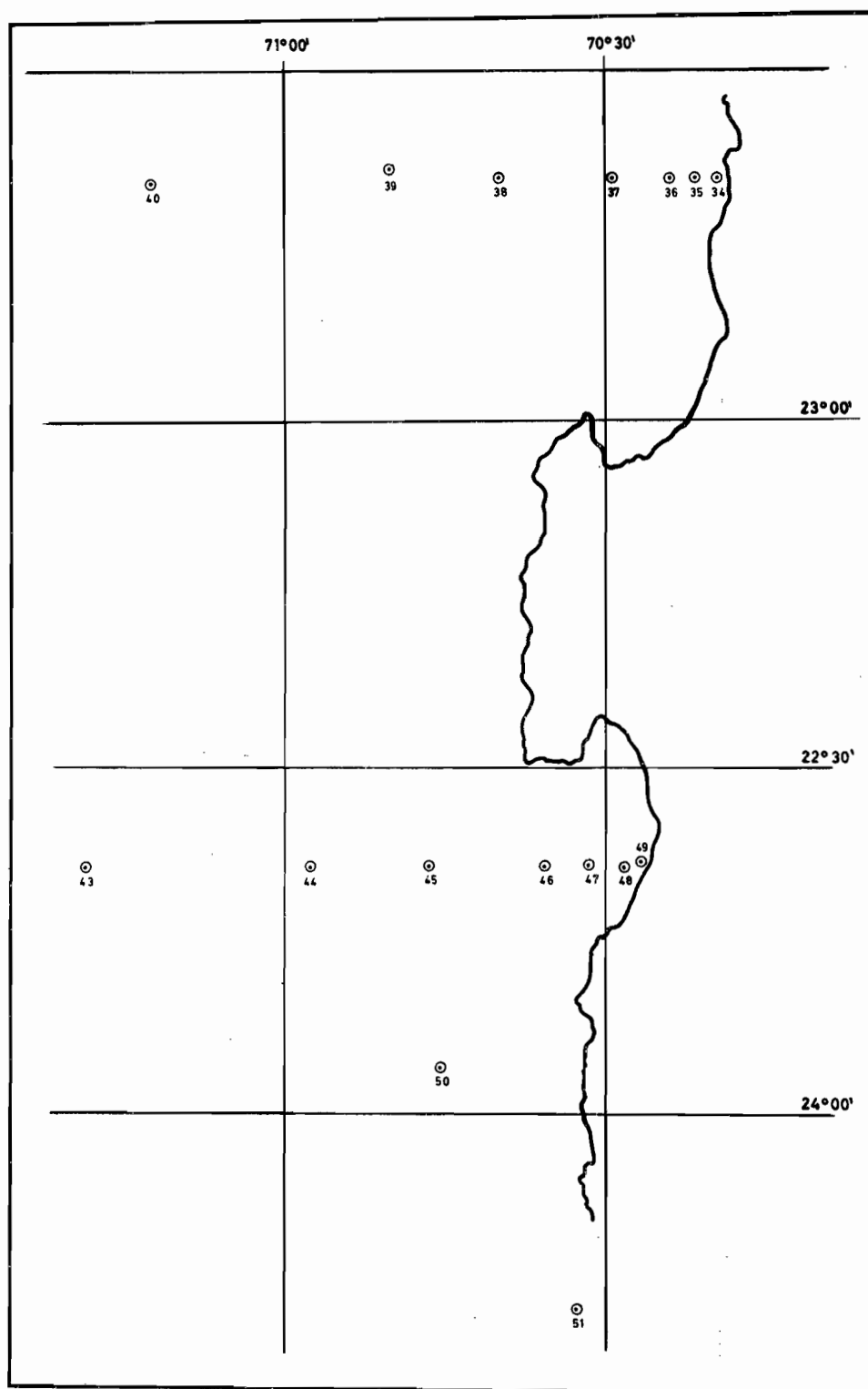


FIG. 13

POSICION ESTACIONES OCEANOGRAFICAS.
 CRUCERO I F O P 114 (4) 72 CP - B
 (28 Noviembre - 1º Diciembre 1972)

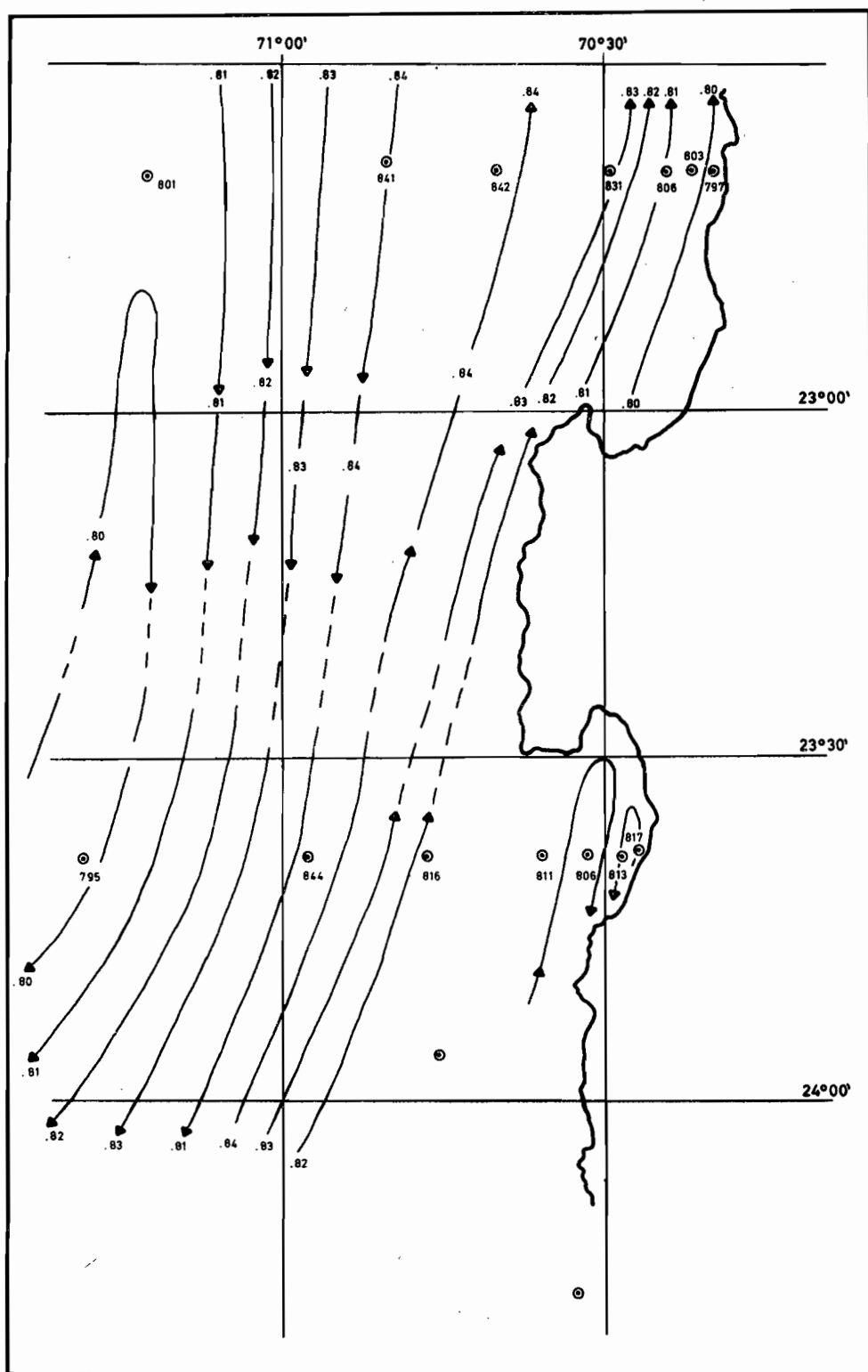


FIG 14. TOPOGRAFIA DINAMICA SUPERFICIAL ($\Sigma \Delta D$)
 En metros dinamicos, relativa a 500 db
 CRUCERO IFOP 114 (4) 72 cp - B
 (28 Noviembre - 1º Diciembre. 1972)

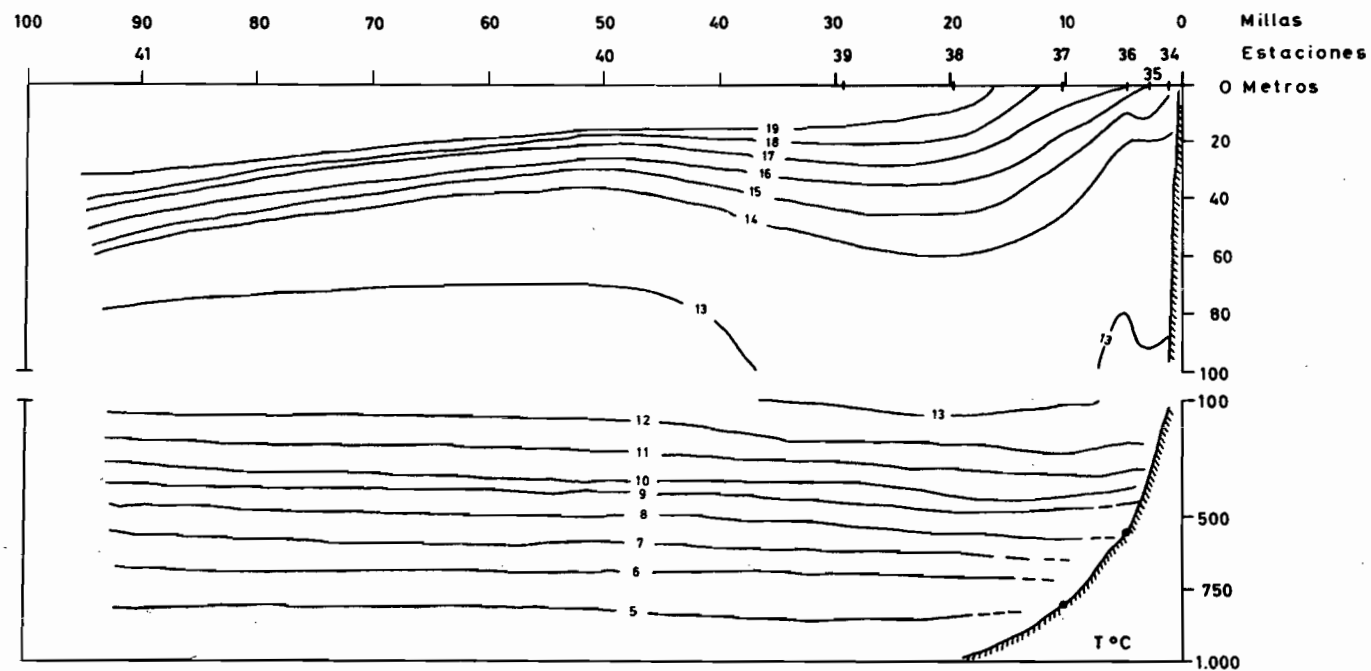


FIG. 15 a.

CRUCERO IFOP 114 (4) 72 CP-B
(28 de Noviembre 1° de Diciembre 1972)

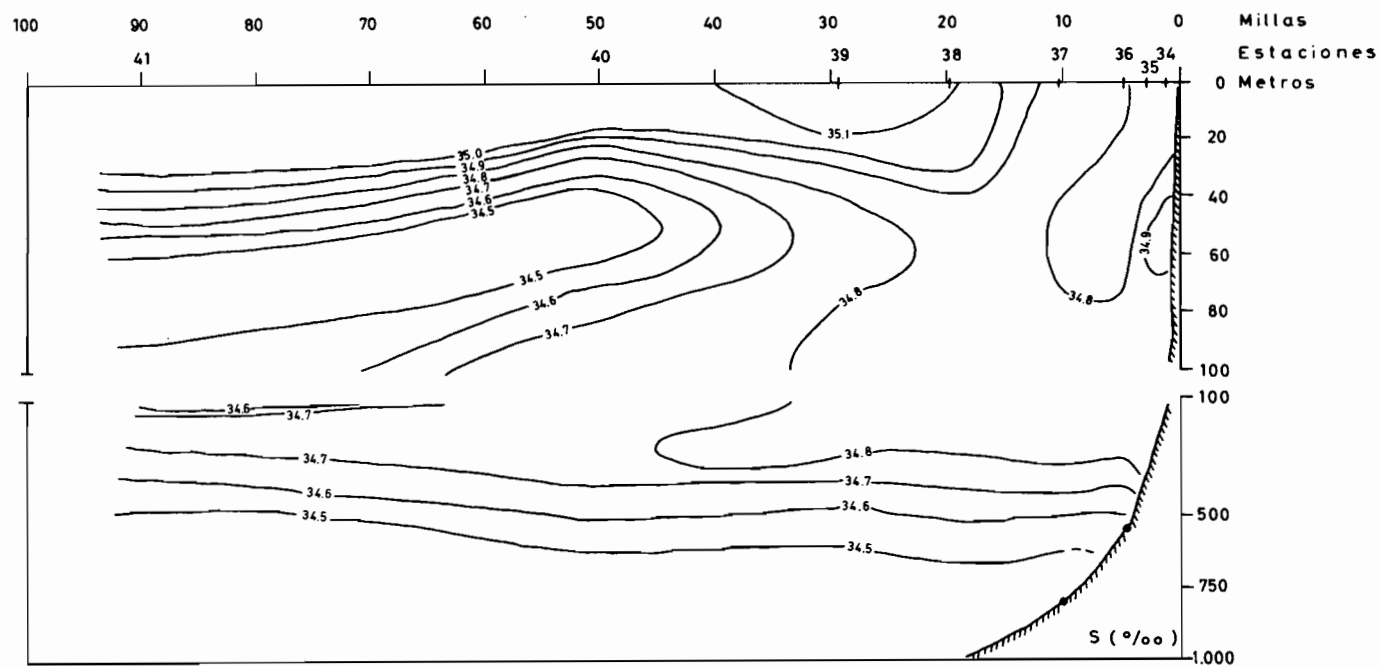


FIG 15 b.

CRUCERO I FOP 114(4) 72 CP-B
(28 de Noviembre - 1º de Diciembre 1972)

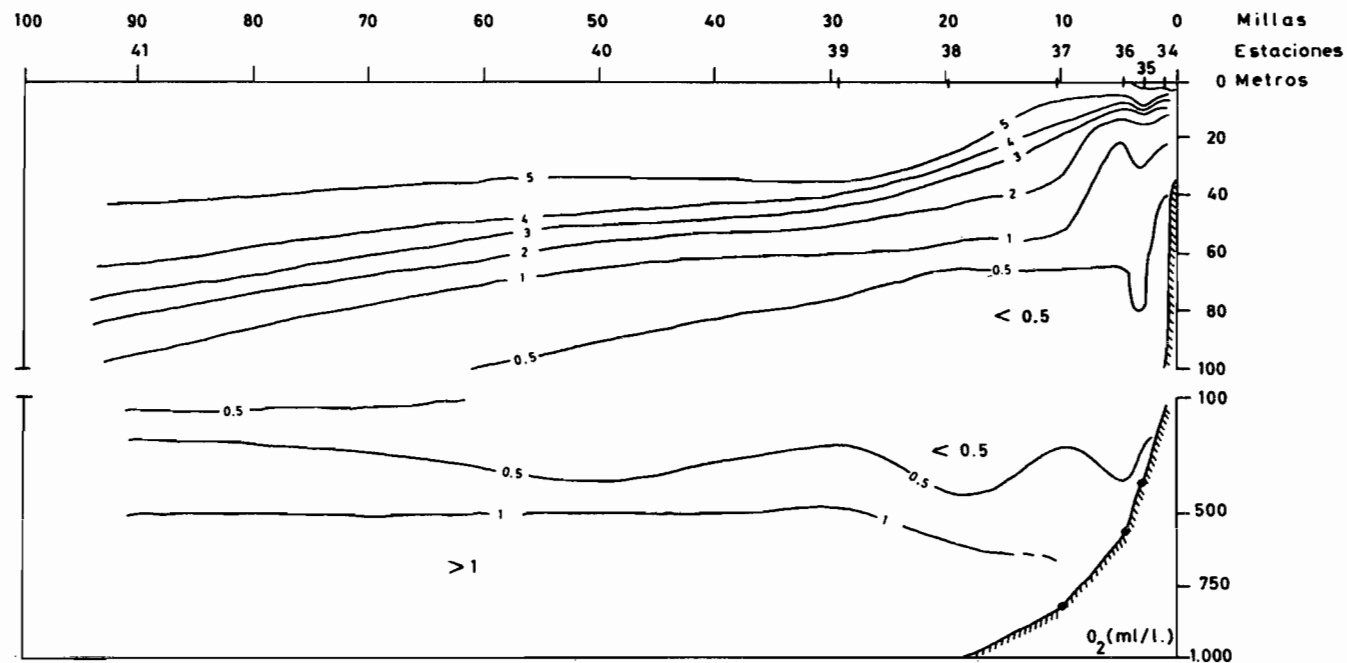


FIG 15 c.

CRUCERO IFOP 114 (4) 72 CP-B
(28 de Noviembre - 1º de Diciembre 1972)

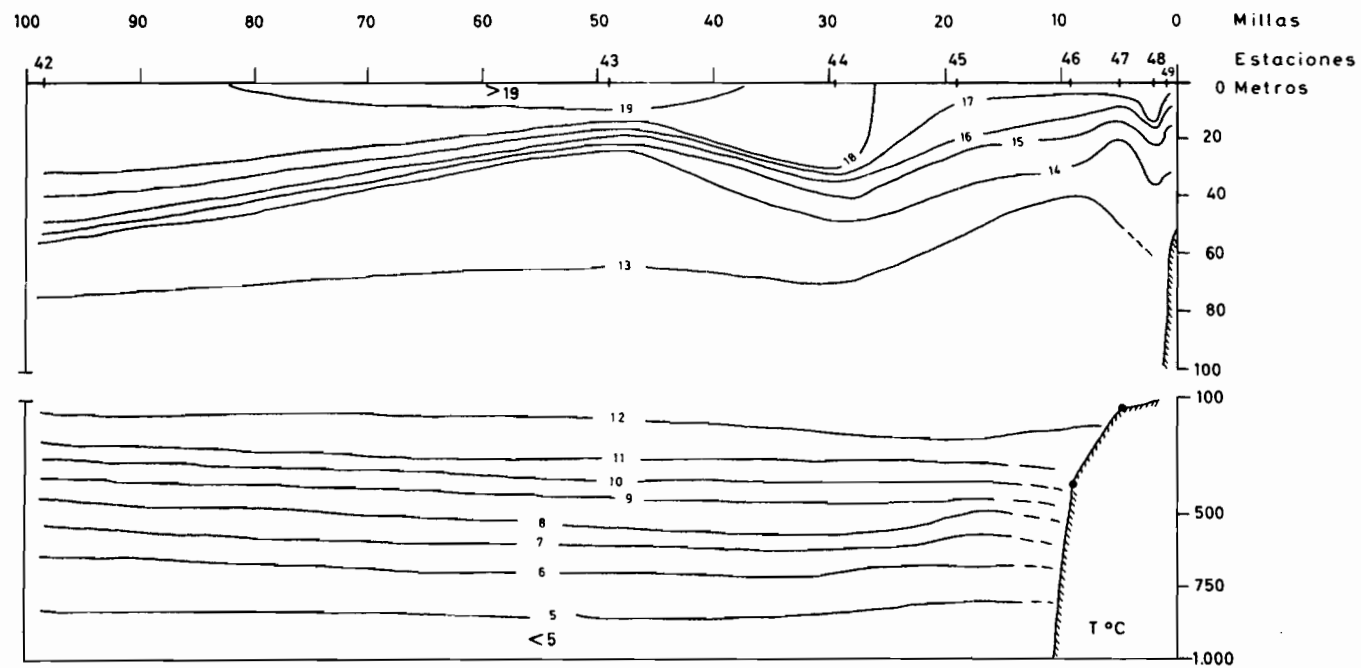


FIG 16 a. CRUCERO IFOP 114 (4) 73 CP-B
(28 de Noviembre - 1º de Diciembre)

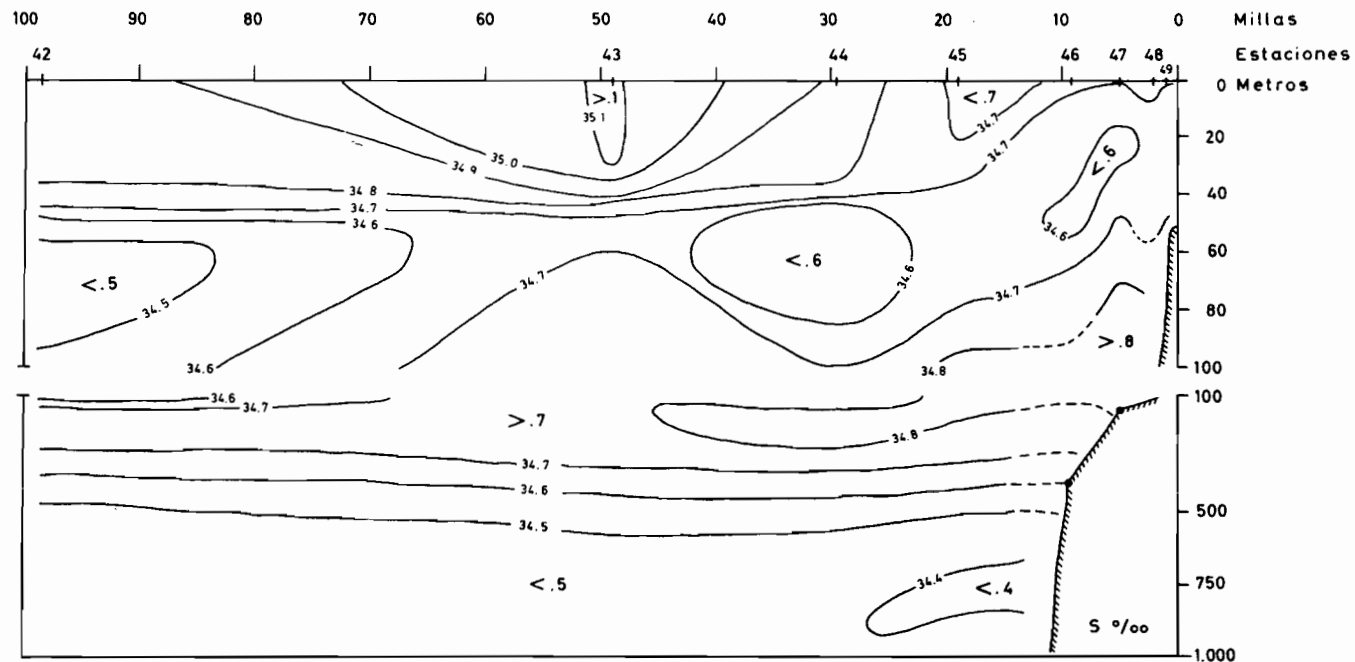


FIG 16b. CRUCERO IFOP 114 (4) 73 CP-B
(28 de Noviembre - 1º de Diciembre 1972)

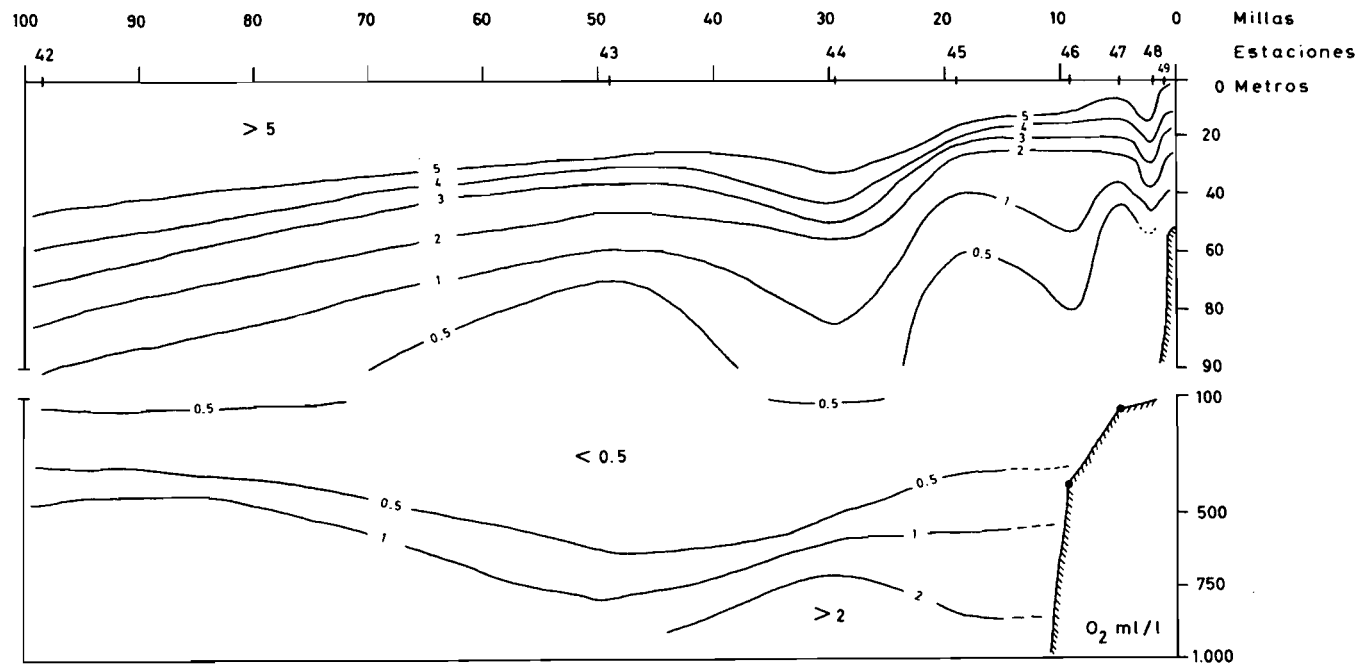


FIG 16 c.

CRUCERO IFOP 114 (4) 73 CP-B

(28 de Noviembre - 1º de Diciembre. 1972)