

**CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA**

**MESOESTRUCTURAS TERMOHALINAS EN LA PARTE
CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

MAESTRIA EN CIENCIAS

LUIS FELIPE NAVARRO OLACHE

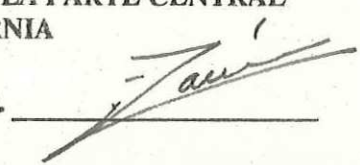
Ensenada Baja California

Diciembre de 1989

Resumen de la tesis de Luis Felipe Navarro Olache presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOLOGIA con opción en OCEANOGRAFIA FISICA. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 1989.

MESOESTRUCTURAS TERMOHALINAS EN LA PARTE CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

Dr. Miguel F. Lavín P. 

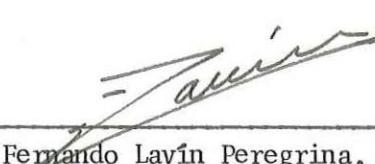
Mediante observaciones directas (XBT, CTD y radioflotadores) se realizó la primera descripción detallada de la estructura interna y del campo de corrientes de algunas de las manifestaciones térmicas que regularmente aparecen en las imágenes infrarrojas del Golfo de California, tales como filamentos y giros de baja temperatura. La estructura interna de estas estructuras reveló la ausencia de la capa mezclada (que es de 40 m en los alrededores) y un levantamiento de las isotermas, detectable hasta ≈ 200 m. El agua superficial es más fría y salina (y por tanto mas densa) que los alrededores.

Entre las estructuras estudiadas destaca un filamento frío; el cual originandose en la zona de intensa mezcla del umbral sur del sistema de canales Ballenas-Salsipuedes, siguió una trayectoria anticiclónica por el eje del golfo y terminó frente a Punta Concepción. El filamento presentó dos fases de evolución; una impulsiva con altas velocidades ($.5$ m/s) y de dos días de duración, y otra estable de casi una semana. La circulación superficial coincide, en terminos generales, con el patrón inferido por la distribución de temperatura: tanto las corrientes geostróficas como las radioboyas indican que hay una intensa corriente (60 cm/s) en el interior del chorro y corrientes de retorno (opuestas) más débiles en sus alrededores. El transporte de este filamento de 40 km de ancho (0.5 a 1 Sv) es muy importante, pues es del mismo orden que el promedio de una sección a través del Golfo.

Por otro lado se investigó un intenso evento de surgencia costera frente a la bahía de Guaymas: las isolíneas se levantaban hacia la costa, originando corrientes de hasta 70 cm/s y temperaturas y salinidades superficiales (19 °C y 35.25 ups) típicas de una profundidad de ≈ 50 m, con la consecuente inyección de nutrientes a la zona eufótica. A pesar de la intensa corriente, las imágenes de satélite no revelan la formación de un chorro frío.

Se analizó una estructura vórtice dipolo, también llamada *en forma de hongo*, detectada tanto con imágenes infrarrojas como por los datos directos de XBT y CTD. El vórtice presentó características radicalmente diferentes a las estructuras frías, mostrando aguas templadas, salinas y boyantes, i.e. agua de origen superficial. El análisis de datos sugiere que esta formación es el resultado de una inestabilidad superficial en la interfase de un frente térmico de las aguas calientes de la cuenca del Carmen con las aguas frías de la cuenca de Guaymas.

TESIS PRESENTADA POR: LUIS FELIPE NAVARRO OLACHE
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ:



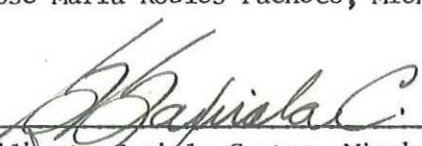
Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina, Director del Comité



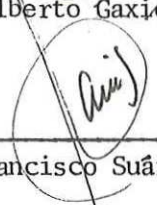
M.C. Luis Gustavo Alvarez Sánchez, Miembro del Comité



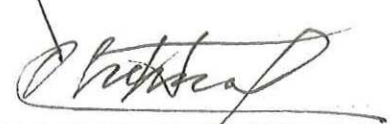
M.C. José María Robles Pacheco, Miembro del Comité



M.C. Gilberto Gaxiola Castro, Miembro del Comité



M.C. Francisco Suárez Vidal, Miembro del Comité



M.C. José María Robles Pacheco, Jefe del Departamento de Oceanografía Física



Dr. José Rubén Lara Lara, Director de la División de Oceanología



Dr. Héctor Echavarría Heras, Director Académico Interino

Diciembre 11, 1989

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE
ENSENADA

DIVISION DE OCEANOLOGIA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA FISICA

MESOESTRUCTURAS TERMOHALINAS EN LA PARTE CENTRAL DEL GOLFO DE
CALIFORNIA

Tesis
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

LUIS FELIPE NAVARRO OLACHE

Ensenada, Baja California. Diciembre de 1989

DEDICATORIA

A Dios a quien todo debo.

A mis padres Waldemar, Maya y Lucha; y mis hermanos Waldemar, Mayela, Eduardo y Armando con todo mi corazón.

A Lucy con todo mi amor.

A las Familias Abúndiz, Garín, Bonfante, Mendoza, Treviño, Castro y Durazo. Con todo mi cariño para Moni, Lili, Evelyn Armandito y Ruben.

A todos mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a todas las personas que de alguna forma u otra me ayudaron en la realización de este trabajo y que el nombrarlas sería imposible.

En especial al Dr. Miguel Lavín P. por la dirección sugerencias y críticas a este trabajo y al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

A Guido Marinone Luis Gustavo, Reginaldo y Rubén por su amistad e incondicional ayuda en mi formación.

Al personal administrativo del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, especialmente a Luis Galindo, Alfredo Chee, Ortencia, Magui y Bety, por su apoyo durante este último año.

Al grupo de oleaje del I.I.O. formado por Oscar Delgado, Asdrubal Martínez, Carlos Torres, Modesto Ortiz, Miguel Angel Pérez, Sergio Larios, Oscar López, Rafael Blanco, Horacio González y Soraida Tanahara.

Al personal de Oceanografía y CCE de CICESE, especialmente a Chema Robles, Paco Ocampo, Gilo Gaxiola, Pancho Suárez, Joaquín García, Chava Sánchez, Victor Godínez, Ricardo, Raúl, Eloisa, Yoli, Maricela, Sara, Mary, Chema y Fabián.

A mis compañeros de crucero, víctimas de la tormenta de Noviembre 1985; LG, MLAVIN, REGYDU, RAFAEL, PERECA, MXCALI, SSBRAVO, EL PADRE y NICOLAS.

A Sergio Pou y su grupo de trabajo, de la revista de Ciencias Marinas Shelly, Raúl, Rosy, Cristina, Laura, por haberme facilitado su equipo de cómputo.

A la Naval Ocean System Center, en especial a Al Zirino por haber proporcionado gran parte de la infraestructura para la toma de los datos de este trabajo, y a R. L. Bernstein de Sea Space quien procesó las imágenes de satélite.

Por último, a todos los que omití, por la premura de estos días; a todos mil gracias.

CONTENIDO

I.- INTRODUCCION.	1
I.1.- Antecedentes.	3
I.2.- Objetivos.	5
II.- Datos e instrumentación.	6
II.1.- CTD.	6
II.2.- XBT.	12
II.3.- Radioboyas.	12
II.4.- Imágenes de satélite.	20
III.- RESULTADOS	23
III.1.- Filamentos y giros.	24
III.2.- Manchas calientes	41
III.3.- Vórtice dipolo.	50
III.4.- Zona de surgencia.	60
IV.- DISCUSION	64
V.- CONCLUSION	74
LITERATURA CITADA	77

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pagina
1 Localización geográfica del Golfo de California y el área de estudio. La línea AB corresponde al transecto del 27 y 28 de Octubre de 1985, utilizando 32 lances de XBT.	7
2 Localización de los transectos hidrográficos (XBT y CTD) realizados del 9 al 18 de Noviembre de 1985. Las letras G representan la posición de las estaciones de localización de radioflotadores (Punta Chivato, B.C.S., Guaymas y La Isla Lobos Sonora).	8
3 Esquematzación de un flotador utilizado para medir las corrientes Lagrangeanas. El emisor E transmite a una frecuencia de alrededor de los 4 MHz. La letra S señala la estructura de arrastrey F representalos flotadores.	14
4 Trayectoria de los flotadores con rombo de error para el mes de Noviembre de 1985; con una desviación estandar; a) flotadores 1, 2, 5, del 9 al 11 de Noviembre, 9 al 14 y 9 al 13, b) Flotadores 3 y 4, para las fechas 9-21 y 9-17 y c) Flotadores 6, 7 y 9, del 9-20, 9-10 y 9-17.	15
5 Diagrama de astillas de viento, registrado durante el crucero con a) instrumentación del B/O <i>DeSTAIGÜER</i> ; del 22 de Octubre al 24 de Noviembre, b) en Punta Colorada Sonora (estación Guaymas), del 9-21 de Noviembre, c) en la Isla Lobos, Sonora, del 9-20 de Noviembre y d) en Punta Chivato Baja California Sur, del 8-15 de Noviembre de 1985.	21
6 Imagen de satélite sobre el Golfo de California en la banda infrarroja (AVHRR) para el a) 23 de Octubre y b) el 24 de Octubre de 1985. Las letras G y F señalan la posición de giros y filamentos de agua fría. La letra S corresponde a un frente cuasi-permanente observado al Sur del conglomerado de islas Angel de la Guarda, San Esteban y Tiburón.	25
7 Distribución vertical de temperatura utilizando 32 XBT del 27 al 28 de Octubre de 1985 (transecto AB). Las letras G*, F y S corresponden a la posición superficial del giro, filamento y frente de surgencia observado en las imágenes de satélite de la figura 8, y posiblemente relacionadas a las estructuras observadas en la figura 6.	27
8 Imagen de satélite correspondiente al a) 29 de Octubre, b) 30 de Octubre de 1985. La letra G* señala la posición probable del filamento G de la figura 6, cinco días despues de observada; S es el inicio del frente térmico acotado al norte por aguas de calientes ($>23\text{ }^{\circ}\text{C}$) del Alto Golfo de California.	28

- 17 Distribución vertical de temperatura de la línea 3, del 11 al 12 de Noviembre, con las estaciones de XBT 140 a 160 y los CTD 151 a 158. La letra M señala un pequeño frente frío, en contraste con la bien mezclada mancha caliente de alrededor de 60 km.

44
- 18 Distribución vertical amplificada de la línea 3 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 151 a 157 de la figura 17. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Este.

45
- 19 Distribución vertical de temperatura para la línea 4, el 12 de Noviembre, con las estaciones de XBT 164 a 175 y los CTD 160 a 164. La mancha fría M y la capa mezclada se observó nuevamente. En los transectos cercanos a la costa de Sonora se observa un incremento de la temperatura (1 °C), reflejado como un aumento en salinidad (figura 20 b).

46
- 20 Distribución vertical amplificada de la línea 4 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 164 a 170 de la figura 19. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Este.

47
- 21 Trayectoria de los flotadores de deriva 3, 4, 6 y 9 los días 14 al 15 de Noviembre. Los contornos sobrepuestos son de temperatura superficiales, con datos de las líneas 6 y 7.

51
- 22 Imagen de satélite del a) 16 de Noviembre, b) 17 de Noviembre de 1985. La letra V y V1 representan estructuras vórtice dipolo (hongos). La letra S es una zona de surgencia, producida por esfuerzos de viento; la letra M señala una pequeña mancha fría, en un borde del vórtice. La parte inferior de las imágenes muestra un intenso frente térmico establecido entre las aguas frías de la cuenca de Guaymas y las aguas calientes de la cuenca el Farallón, las imágenes sugieren que estas aguas están penetrando hacia adentro del Golfo (10 cm/s).

52
- 23 Distribución vertical de temperatura para la línea 5, el 13 de Noviembre, con las estaciones de XBT 177 a 186, y los CTD 166 a 171. Las aguas calientes (> 24 °C) se encuentran cerca de la costa de Baja California, y disminuyen hacia el centro del Golfo.

53

Lista de Figuras (Continuación)

Figura

Página

- 24 Distribución vertical amplificada de la línea 5 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 166 a 171 de la figura 23. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el SE.

54
- 25 Distribución vertical de temperatura para la línea 6, el 16 y 17 de Noviembre, con las estaciones de XBT 209 a 211, y los CTD 172 a 182. Esta gráfica muestra tres distribuciones subsuperficiales; una capa bien mezclada cerca de la costa de Baja California; un frente frío en el centro del transecto (M) y las deformaciones producidas por el cuello del vórtice dipolo (V) observado en la figura 22.

56
- 26 Distribución vertical amplificada de la línea 6 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 172 a 182 de la figura 25. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el SE. La letra M representa una mancha fría, mientras que la V señala un corte de la estructura vórtice dipolo observado en las imágenes de la figura 22.

57
- 27 Distribución vertical de temperatura para la línea 7, del 17 al 18 de Noviembre, con las estaciones de XBT 236 a 256 y los CTD 186 a 192. Las letras A, B y C representan el curso en que fueron realizadas las estaciones.

60
- 28 Distribución vertical amplificada de la línea 7 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 186 a 192 de la figura 27. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Sur (velocidad máxima de 70 cm/s). Esta sección corresponde al transecto A → B señalado en la figura anterior.

61

I.- INTRODUCCION.

La circulación en la capa superficial del océano está regulada principalmente por los esfuerzos de viento, los gradientes de densidad y los flujos de marea. A raíz de mediciones más completas, en particular de observaciones sinópticas vía imágenes de satélite, han revelado una gran variabilidad sobre la circulación promedio. Las estructuras observadas de dichos movimientos superficiales son complejos y se les reconoce dada su forma como filamentos, giros, vórtices dipolo (hongos) y frentes de surgencia.

En particular las estructuras filamentosas se han caracterizado como fuertes mecanismos generadores de frentes térmicos y eficientes agentes de intercambio de agua costera hacia zonas alejadas de la costa (Federov y Ginsburg, 1986), transportando volúmenes del orden de un Sverdup ($Sv = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

El estudio extensivo de las estructuras térmicas superficiales durante las últimas décadas ha mostrado la importancia de estos, principalmente en las regiones donde se presentan surgencias, ya que el agua recién aflorada es transportada mar adentro, ampliando la regularmente estrecha franja productiva.

Existe una gran variedad de regiones geográficas donde las manifestaciones, como filamentos y giros superficiales han sido observados, e.g. los mares del Atlántico Norte (Estrecho Tartar, Mar de Okhotsky, Estrechamiento Báltico, Mar Negro, Isla de Sakahalin, Estrecho de Kuril) y la Corriente de California (Costas

de California y Oregon). A pesar de que la diversidad de regiones es amplia, la forma y recurrencia de las manifestaciones térmicas son similares e incluso se ha observado que la formación, evolución y decaimiento se realiza en escalas de tiempo semejantes, e.g. se ha sugerido que los filamentos y meandros costeros se desarrollan como resultado de inestabilidades entre un chorro costero y una subcorriente (Ikeda y Emery, 1984); por la interacción de dos vórtices de sentidos contrarios cerca de la costa (Robinson et al., 1984); o por la respuesta superficial de la interacción de los esfuerzos de viento con el complejo relieve costero (Huyer, 1984; Reineker et al., 1985; Atkinson et al., 1986; Korso y Huyer 1986). Mediante experimentación con radioflotadores (Davis, 1984 a y b; Thompson y Papadakis, 1986) se ha observado que los filamentos son regiones de intensificación del flujo superficial causada por vórtices a mesoescala. Ha sido demostrado que los estrechamientos son regiones de intensificación de flujo superficial y buenos proveedores de momentum capaz de generar filamentos y vórtices dipolo (Hortman, 1983; Ginsburg y Fedorov, 1984b; Sheres y Kenyon, 1989).

Los mecanismos de generación de las estructuras térmicas y las fuentes de energía que las producen son tan complejos, que todavía no se entienden completamente en las regiones donde se realizan grandes esfuerzos, mediante cruceros y experimentos de laboratorio. Este trabajo se enfoca en la parte central del Golfo de California (figura 1), y tiene como principal intención el

revelar la estructura interna de las manifestaciones térmicas observadas por sensores remotos y las características del movimiento asociadas a estas.

I.1 Antecedentes.

El complejo relieve costero y batimétrico de la cuenca de Guaymas, aunado al patrón de vientos y mareas parece producir efectos dinámicos suficientes para la generación de estructuras filamentosas, similares a las observadas en los bordes de la Corriente de California. Las expediciones científicas realizadas sobre el Golfo han logrado definir de una forma general la circulación para invierno y verano, y los períodos transicionales, primavera y otoño (ver Roden, 1958; Alvarez-Borrego, 1983; Bray y Robles, 1989). Sin embargo la naturaleza de los fenómenos que se desea analizar exige una mayor resolución espacio/temporal, tal que permita captar los agudos gradientes de frentes, giros y filamentos; estos últimos tienden a estrecharse al separarse de la zona de generación.

La información disponible sobre estructuras de éste tipo, dentro del Golfo es escasa, Lepley et al. (1975) utilizan imágenes de satélite en el visible y datos de cruceros oceanográficos para definir una circulación celular en la parte norte del Golfo. Rosas Cota (1976) obtuvo el patrón de circulación para todo el año y definió a la primavera y otoño como una época de transición con distribuciones complejas de giros y vórtices. Alvarez-Sánchez et al. (1976) determinó que la parte baroclínica y Lagrangeana

arriba de los 100 m son altamente concordantes, describiendo la existencia de giros ciclónicos y anticiclónicos con variación estacional. Emilsson y Alatorre (1979) detectan giros con velocidades superficiales de 55 cm/s en el Sur del Golfo, sugiriendo además la presencia de una zona de convergencia en la región central, entre Punta Concepción y la Bahía de Guaymas. Marinone y Ripa (1988) obtienen la variación estacional de la circulación geostrófica a través de una sección en la Cuenca de Guaymas concluyendo que existe al parecer una tendencia de circulación superficial anticiclónica en invierno y ciclónica en verano. Dressler (1981) usó un modelo hidrodinámico numérico para investigar las mareas en el Golfo, con el cual al incluir un viento Norte de 5 m/s se obtiene una circulación en forma de giro anticiclónico alrededor de la cuenca, con un flujo hacia el interior del Golfo frente a las costas de Sonora.

Las zonas de surgencia y el desprendimiento de filamentos en el Golfo de California han sido descritos por Badán-Dangón et al. (1985) usando imágenes de satélite en la banda infrarroja para los períodos de primavera y verano. Los autores sugieren que las estructuras podrían estar relacionadas a los eventos de surgencia causadas por el viento; detectan además la presencia de un giro anticiclónico y la zona de convergencia sugerida por Emilsson y Alatorre (1979).

I.2 Objetivos.

El presente trabajo consiste en describir la estructura hidrográfica y dinámica de algunas de las manifestaciones térmicas a escala intermedia, tales como filamentos fríos, frentes térmicos y vórtices, observadas por sensores remotos en la Cuenca de Guaymas del Golfo de California.

II.- DATOS E INSTRUMENTACION.

Se realizó un crucero oceanográfico en la Cuenca de Guaymas durante Octubre y Noviembre de 1985, auspiciado cooperativamente por The Naval Ocean System Center, U.S.A., y el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. La expedición trató de proveer una densa red de estaciones hidrográficas, para la resolución de las estructuras térmicas superficiales observadas frecuentemente en esta zona. La información colectada consta de: 1) una línea con 32 lances de batitermógrafos desechables (XBT) el 27 y 28 de Octubre de 1985, figura 1. 2) Del 9 al 20 de Noviembre de 1985 (figura 2); siete líneas utilizando un total de 130 XBT, 53 estaciones de conductividad, temperatura, presión (CTD), 29 botellas hidrográficas y 8 radioflotadores (seguidos por estaciones terrenas en Sonora y Baja California.

II.1 CTD.

Se utilizó un CTD Neil Brown μ k III (NB CTD) con las siguientes especificaciones:

Variable	Intervalo	Precisión	Estabilidad
Presión (db)	320	± 0.5	0.1%/mes
	650	± 1.0	
	1600	± 1.6	
	3200	± 3.2	
	6500	± 6.5	
Temperatura (°C)	-32 a +32	± 0.005	0.001/mes
Conductividad ad (mmho)	1 a 65	± 0.005	0.003/mes

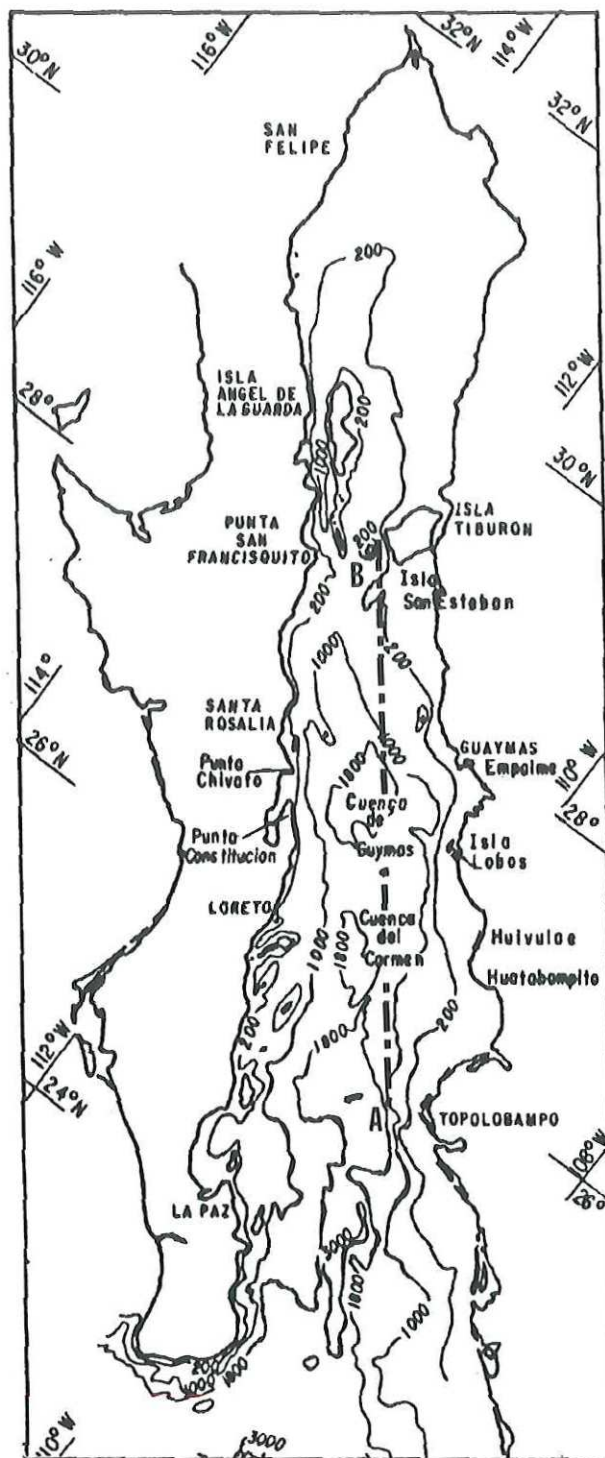


Figura.- 1 Localización geográfica del Golfo de California y el área de estudio. La línea AB corresponde al transecto del 27 y 28 de Octubre de 1985, utilizando 32 lances de XBT.

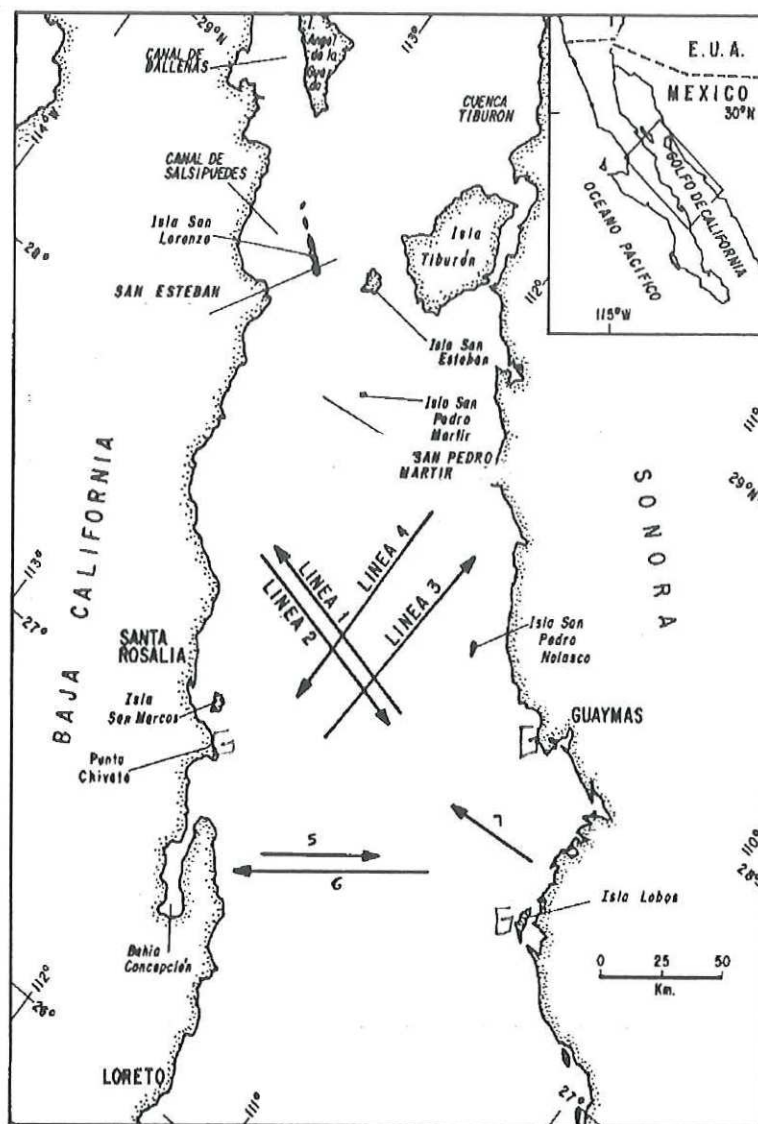


Figura 2.- Localización de los transectos hidrográficos (XBT y CTD) realizados del 9 al 18 de Noviembre de 1985. Las letras G representan la posición de las estaciones de localización de radioflotadores (Punta Chivato, B.C.S., Guaymas y La Isla Lobos Sonora).

El NB CTD fue calibrado en el laboratorio NORDA en 1984. La tabla siguiente muestra dos experimentos de calibración a 5 y 22 °C comparando el sensor Ruska de presión contra el de CTD.

Experimento a 22 °C

Sensor Ruska (db)	NB CTD (db)	Error	Predicción
0.00	0.23	0.23	0.12
1002.91	1002.51	0.40	1002.85
1999.56	2000.16	-0.60	2000.49
2998.99	2998.88	0.10	2999.19
3999.80	3998.50	1.75	3998.35
4999.92	4998.29	1.63	4998.58
6299.61	6300.92	-1.31	6301.20

Experimento a 5 °C

Sensor Ruska (db)	CTD (db)	error	Predicción
0.00	0.18	-0.18	0.02
1002.91	1003.41	-0.50	1002.96
1999.56	2001.41	-1.85	2000.66
2998.98	2999.89	-0.91	2998.85
3999.80	3999.79	0.02	3998.46
4999.92	5000.32	-0.40	4998.69
6299.61	6303.15	-3.54	6303.00

La salinidad y temperatura de los sensores del NB CTD fueron también comparadas en el laboratorio mediante 5 experimentos variando la temperatura y la profundidad con los siguientes resultados:

Experimento No	1	2	3	4	5
Muestras No	15	15	15	15	15
Datos/muestra	32	32	32	32	32
Presión db.	-3.700	-0.600	-0.500	-0.300	0.100

Temperatura °C

(T1) Promedio	30.3000	22.3840	14.9256	7.4914	00.3395
(T2) Prom. CTD	30.3019	22.3863	14.9284	7.4937	00.3412
Error (T1-T2)	00.0019	0.0023	0.0028	0.0023	00.0017

Conductividad mmho/cm

1) Estandar	59.0872	50.7216	43.1568	36.0029	29.5478
2) Tendencia	59.0931	50.7240	43.1567	36.0012	29.5449
3) Promedio	59.1080	50.7040	43.1580	36.0020	29.5468
4) Corregido	59.0949	50.7216	43.1580	36.0038	29.5496
error 4-1	00.0077	0.0000	0.0012	0.0008	00.0019
error 3-2	00.0077	0.0000	0.0012	0.0008	00.0019

Salinidad (ups)

S1) Estandar ppm	35.2800	22.3840	14.9256	35.2895	35.2889
	35.2860	22.3863	14.9284	35.2904	35.2914
S2) CTD (ups)					
	00.0060	0.0023	0.0028	0.0009	00.0025
error S2-S1					

Una vez obtenidos los datos del crucero, se calibró la información de CTD contra botellas hidrográficas utilizando 47 puntos de 30 estaciones de CTD a diferentes profundidades. Diez de estos puntos posiblemente tienen errores de apreciación, o de algún otro tipo, y se omitieron, por resultar muy alejados de los valores esperados (estos datos se imprimieron enfatizados en la siguiente tabla) obteniendo un número de datos $N=37$. La ecuación de regresión lineal de los datos es $Y = 1.59 + 0.956X$; y con un coeficiente de correlación (R^2) del 0.96. El promedio de los errores para los lances sin remarcar tienen un promedio de $\bar{X} = 0.013$, con desviación estandar de $\sigma = 0.025$ y límite de control $\sigma/\sqrt{N} = 0.004$.

# Lance	Profundidad	Salinidad del CTD	Salinidad (autosol)
1	10	35.122	35.2678
	50	35.122	35.1232
2	10	35.541	35.5547
	50	35.502	35.3387
6	350	34.691	34.7091
	10	35.546	35.5586
	50	35.191	35.1850
15	350	34.691	34.7087
	10	35.549	35.5582
	50	35.191	35.1850
19	350	34.691	34.7087
	10	35.547	35.5634
	50	35.216	35.0707
32	350	34.695	34.7105
	10	35.542	35.5491
	50	35.479	35.1816
61	350	34.681	34.1816
	10	35.555	35.5673
	50	35.198	35.2284
74	350	34.688	34.7089
	10	35.558	35.5673
	50	35.199	35.2028
118	350	34.697	34.7154
	10	35.572	35.5572

	50	35.161	35.2547
	350	34.692	34.7117
152	100	34.876	35.1903
157	200	34.799	34.8183
158	30	35.151	35.1388
160	400	34.597	34.5903
161	150	34.833	34.8349
162	10	35.324	35.3388
163	10	35.325	35.3286
167	800	34.523	35.2684
168	200	34.782	35.2986
170	800	34.523	35.3340
172	10	35.267	35.2703
173	200	34.805	34.8079
174	200	34.780	34.7949
175	200	34.763	35.3703
178	200	34.772	34.7801
180	200	34.769	34.7726
181	200	34.768	34.7708
182	300	34.652	35.3075
191	100	34.848	34.8584
192	100	34.864	34.8720

II.2 XBT.

Los XBT marca Sippican, obtienen el registro de temperatura del océano en la vertical durante el recorrido del barco. Las especificaciones del fabricante son las siguientes:

Rango de Sensibilidad de Temperatura	1.7 a 35.5 °C
Precisión de Temperatura	± 0.02 °C
Precisión de Profundidad	2 % (± 5 m como máximo)
Rango de Temperatura ambiental	0 a 50 °C
Ciclo de Tiempo	36 segundos/200 m
	90 segundos/450 m
	180 segundos/760 m
	360 segundos/1820m

II.3 Radioboyas.

Las corrientes superficiales fueron descritas por las trayectorias de ocho flotadores lanzados en el centro de la Cuenca de Guaymas. Los flotadores fueron provistos de un emisor de radio y su posición fue determinada mediante tres antenas direccionales manuales (radiogoniómetros) desde estaciones terrestres. Guaymas, Son., Punta Chivato, Baja California Sur, e Isla Lobos, Sonora (figura 2). En estas estaciones se registraron simultáneamente la magnitud y dirección de viento durante 21, 15 y 19 días respectivamente.

Los elementos Lagrangeanos utilizados (figura 3) consisten de una cortina de arrastre de 3m x 3m a una profundidad de 10 metros. La estructura de arrastre está unida a un emisor de radio el cual transmite una señal cercana a los 4 MHz. Esta señal se recibe en las estaciones terrenas mediante antenas direccionales; el ángulo azimutal asignado corresponde al promedio de entre 6 y 10 lecturas. El fabricante de los instrumentos (Telecommunications Enterprise Co.) reporta una precisión para cada lectura de ± 1 grado respaldada por estudios de Murray et al. (1975), Wiseman et al. (1977) y Alvarez-Sánchez et al. (1984).

El análisis de error de las trayectorias fue calculado utilizando una desviación estándar. Los desplazamientos diarios de las boyas (D), sus velocidades (V), y el error por localización se muestran en las siguientes tablas de datos y en la figura 4. La hora es el tiempo del Pacífico y la Latitud y Longitud están dados en grados y décimas de grado.

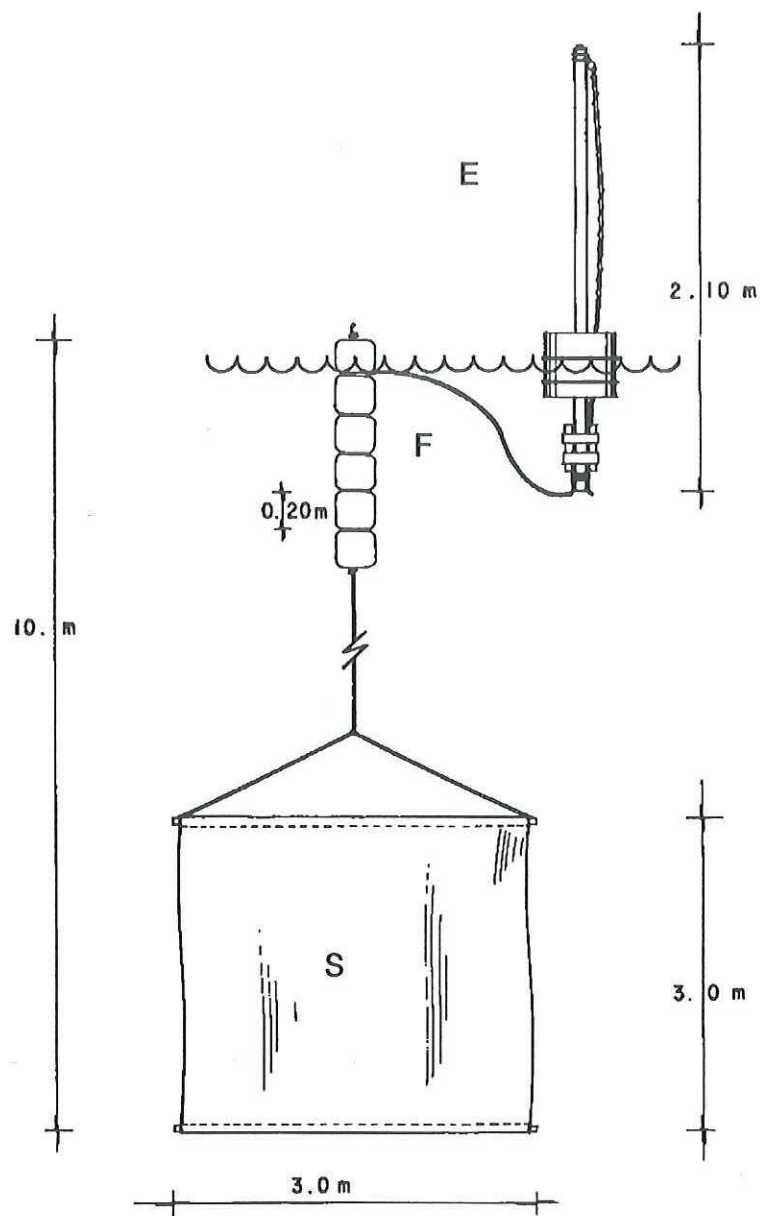


Figura 3.- Esquematzación de un flotador utilizado para medir las corrientes Lagrangeanas. El emisor E transmite a una frecuencia de alrededor de los 4 MHz. La letra S señala la estructura de arrastre y F representa los flotadores.

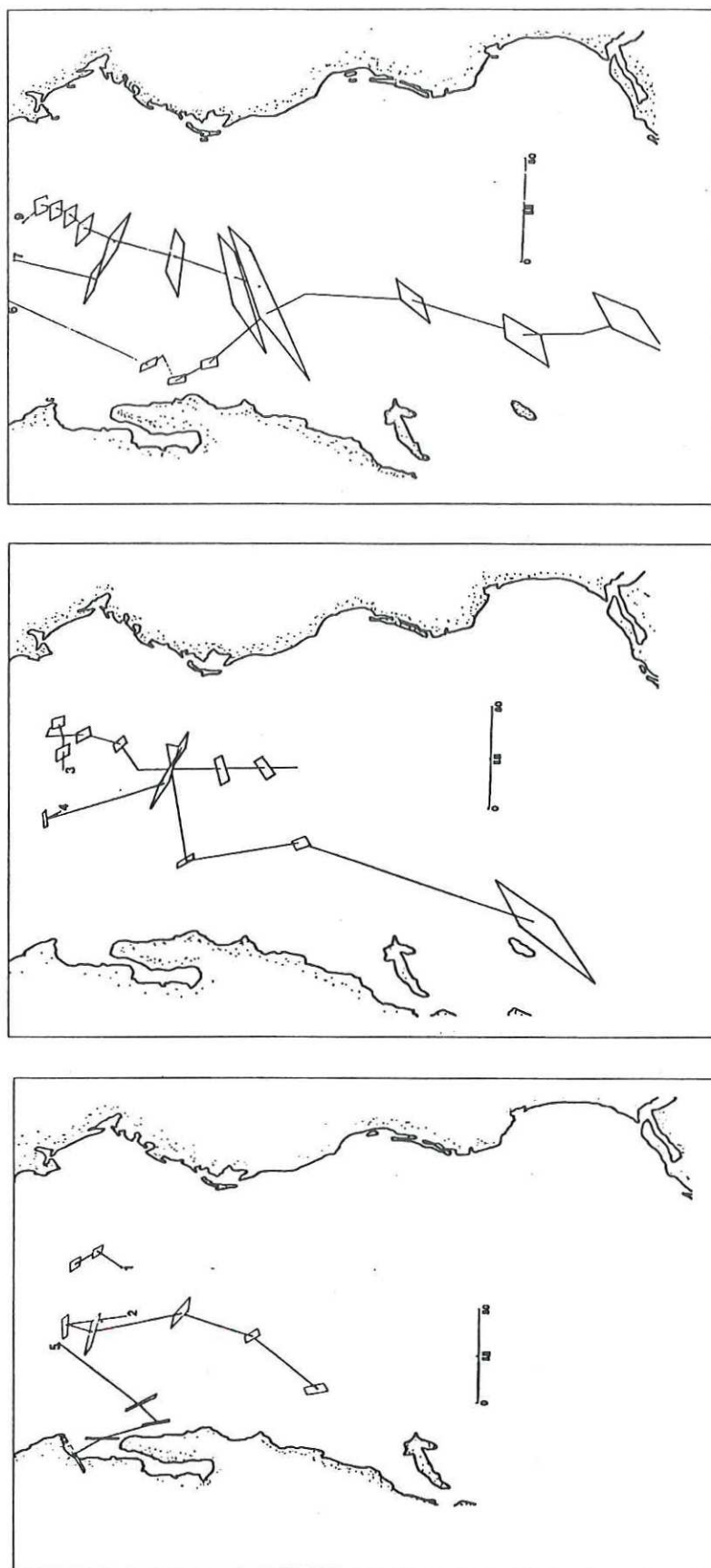


Figura 4.- Trayectoria de los flotadores con rombo de error para el mes de Noviembre de 1985; con una desviación estándar; a) flotadores 1, 2, 5, del 9 al 11 de Noviembre, 9 al 14 y 9 al 13, b) Flotadores 3 y 4, para las fechas 9-21 y 9-17 y c) Flotadores 6, 7 y 9, del 9-20, 9-10 y 9-17.

BOYA #1

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
		Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	12:00	27.4	111.13	0	0		
10-11-85	12:00	27.51	111.13	12.69	14.84	3	20
11-11-85	00:00	27.53	111.22	8.79	20.34	287	20

BOYA #2

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	13:00	27.32	111.31	0	0		
10-11-85	13:00	27.38	111.43	13.94	16.63	310	34.13
11-11-85	13:00	27.30	111.45	9.43	16.91	161	42.5
12-11-85	13:00	27.10	111.15	37.06	42.90	125	48.0
13-11-85	13:00	26.85	111.08	28.87	33.41	164	24.5
14-11-85	11.31	26.50	111.12	38.89	54.66	188	36.13

Boya #3

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	15:00	27.50	111.28	0	0.0		
10-11-85	15:00	27.55	111.22	8.4	9.76	52	36
11-11-85	15:00	27.58	111.15	7.6	8.75	51	25
12-11-85	15:00	27.63	111.12	6.5	7.5	39	25
13-11-85	15:00	27.63	111.15	3.3	3.8	285	25
14-11-85	15.00	27.63	111.18	3.3	3.8	253	25

15-11-85	15.00	27.53	111.10	14.03	16.2	148	22.5
16-11-85	15.00	27.40	111.07	15.16	17.6	163	21
17-11-85	15.00	27.30	111.10	11.84	13.7	201	
18-11-85	15.00	27.17	111.00	17.56	20.32	151	
19-11-85	15.00	27.03	110.90	17.81	20.61	151	55.3
20-11-85	15.00	26.92	110.76	18.49	21.40	151	45
21-11-85	10.46	26.82	110.68	13.63	27.97	151	

BOYA #4

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	16.30	27.41	111.45	0	0		
10-11-85	16.30	27.43	111.52	7.2	8.3	291	7
11-11-85	16.30	27.18	111.08	51.25	59.32	123	42
12-11-85	16.30	27.22	110.92	16.95	19.62	76	24
13-11-85	16.30	27.25	110.95	4.96	5.74	335	40
14-11-85	16.30	26.90	111.32	53.14	61.5	224	17
15-11-85	16.30	26.62	110.97	46.7	54.1	132	27
16-11-85	16.30	25.97	110.73	75.31	87.16	163	
17-11-85	08:25	25.68	110.63	32.95	57.38	163	468

BOYA #5

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	17:30	27.37	111.58	0	0		
10-11-85	17:30	26.95	111.63	46.3	53.5	189	14.5
11-11-85	17:30	26.85	111.65	11.2	13.0	194	11
12-11-85	17:30	26.95	111.85	22.7	26.2	302	11.7
13-11-85	17:30	26.98	112.00	15.28	20.8	284	17

BOYA #6

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	19:00	27.48	111.75	0	0		
10-11-85	19:00	27.17	111.33	54.21	62.74	179	166.3
11-11-85	19:00	27.10	111.56	35.93	41.57	106	19.5
12-11-85	19:00	26.90	111.50	6.95	8.04	210	19.5
13-11-85	19:00	26.78	111.55	13.65	15.8	110	24.5
14-11-85	19:00	26.75	111.41	13.96	16.15	96	31.5
15-11-85	19:00	26.70	111.08	33.14	38.36	113	
16-11-85	19:00	26.63	110.88	21.11	24.43	146	
17-11-85	19:00	26.30	110.63	44.35	51.33	161	63
18-11-85	19:00	25.88	110.38	52.23	60.45	140	199.5
19-11-85	19:00	25.70	110.22	25.85	29.92	125	200
20-11-85	14.34	25.62	110.15				200

BOYA #7

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
		Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	20:00	27.57	111.51	0	0		
10-11-85	02:00	27.30	111.38	32.4	37.5	158	40

BOYA #9

Fecha	Hora	Lat.	Long.	D	V	Az	Error
	T. P.	Norte	Oeste	km	cm/s		km ²
09-11-85	23.30	27.65	111.37	0	0		
10-11-85	23.30	27.63	111.23	13.27	15.38	95	38.5
11-11-85	23.30	27.58	111.22	5.8	6.72	158	35
12-11-85	23.30	27.53	111.21	5.59	6.74	169	33.8
13-11-85	23.30	27.45	111.03	9.26	10.75	185	55
14-11-85	23.30	27.35	111.20	11.6	13.43	170	85
15-11-85	23.30	27.12	111.10	26.27	32.02	161	162
16-11-85	23.30	26.88	111.03	26.5	30.66	163	306
17-11-85	09:28	26.78	111.00	11.49	32.02	162	519.3

La distancia que puede ser cubierta con estos instrumentos es del orden de 100 km, con los errores de localización incrementandose para las posiciones más alejadas. Los errores tienen además una componente aleatoria, debida a la interferencia de la señal emitida por la radioboya con señales como el telégrafo, algunos radios, y otras.

La localización inicial de las estaciones receptoras (figura 2) obedeció a que se esperaban movimientos de las boyas hacia el Norte y Sur del Golfo. Sin embargo, las radioboyas se desplazaron persistentemente hacia el Sur, por lo cual una estación (Guaymas) debió moverse conforme el experimento transcurría (a las playas de Empalme, Huivulai y Huatabampito, Sonora) del 9 al 21 de Noviembre. La estación de Punta Chivato presentó algunos problemas de comunicación, por lo cual sólo se logró recopilar información del 9 al 15 de Noviembre. En la estación de Isla Lobos las mediciones fueron continuas durante todo el experimento del, 9 al 20 de Noviembre.

La instrumentación meteorológica utilizada constó de 3 anemómetros (un MTI, un KALSICO y un J-TEC) de registro gráfico de intensidad y dirección de viento. Los datos de viento se muestran en la figura 5.

II.4 Imágenes de satélite.

La propagación de la radiación infrarroja hacia el espacio fue monitoreada por el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) de los satélites de órbita polar NOAA-6 y TIROS-N. Los instrumentos registran una irradiancia en longitudes de onda de 0.7, 0.9, 3.7, y 11 metros, a una distancia de 800 km sobre la superficie

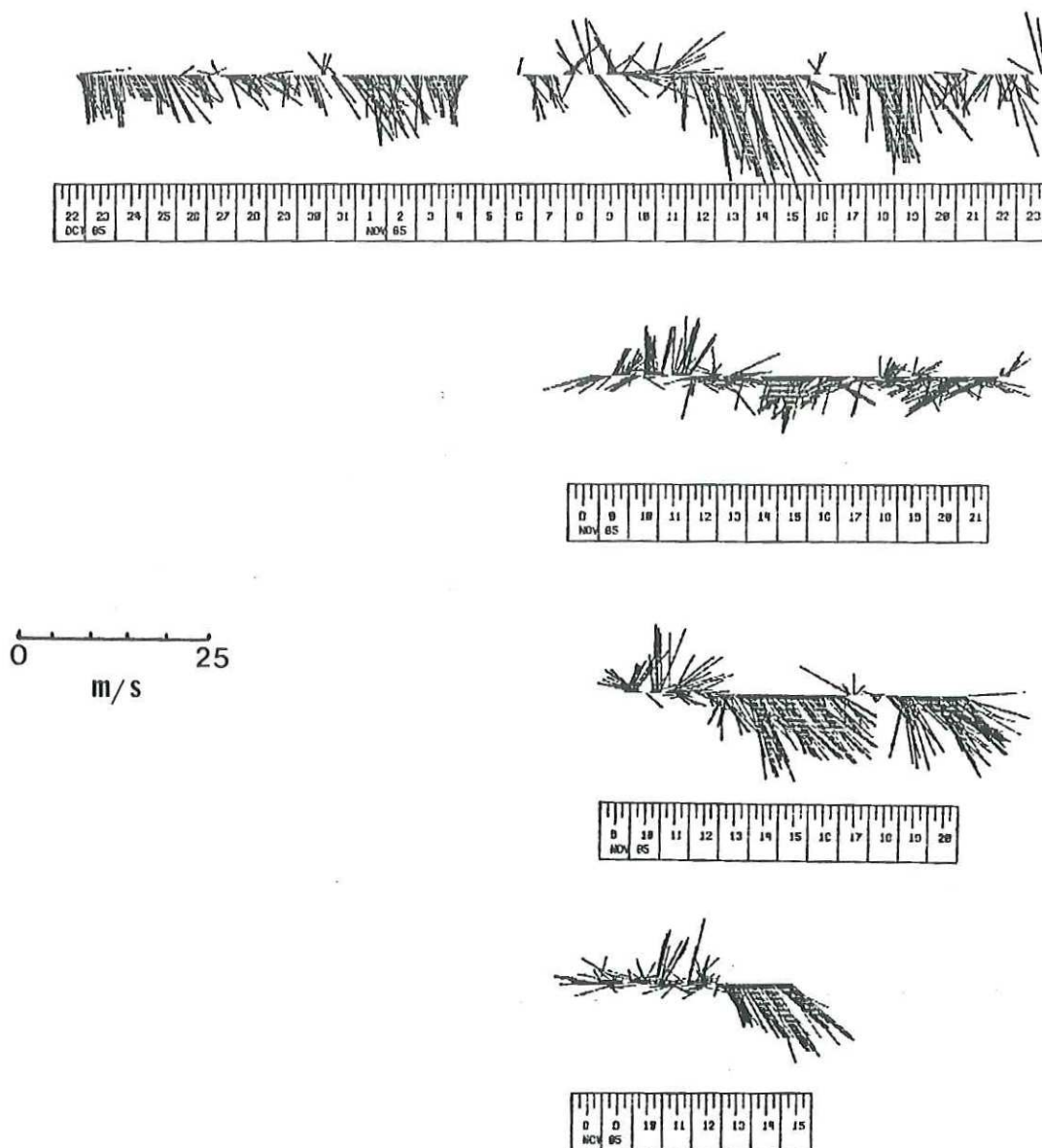


Figura 5.- Diagrama de astillas de viento, registrado durante el crucero con a) instrumentación del B/O *DeSTAIGUER*, del 22 de Octubre al 24 de Noviembre, b) en Punta Colorada Sonora (estación Guaymas), del 9-21 de Noviembre, c) en la Isla Lobos, Sonora, del 9-20 de Noviembre y d) en Punta Chivato Baja California Sur, del 8-15 de Noviembre de 1985.

(Schwalb, 1978). La resolución espacial del sensor AVHRR es de 1.1 km al Nadir (tomado de Badán-Dangón et al., 1985). Las observaciones fueron recibidas en Scripps Sattelite Ocean Facility en La Jolla, California, USA y procesadas por el R. L. Bernstein de Sea Space. El número total de imágenes procesadas es de 16. Las imágenes procesadas en Scripps Facilities fueron transmitidas vía telefónica hacia la embarcación, lo que permitió decidir el curso del crucero con base en las estructuras observadas.

En total el crucero comprendió la realización de 2 líneas con XBT, y 6 líneas con información conjunta de XBT y CTD. Se localizaron 8 radioflotadores y se procesaron 16 imágenes de satélite. El área total cubierta en el estudio fue de $\approx 10000 \text{ km}^2$. Las condiciones de viento para las primeras 5 líneas fueron entre ligeros y de calma del 9 al 13 de Noviembre. El 14 y 15 del mes se desarrolló un intenso evento con velocidades de viento NW de hasta 25 m/s, lo cual impidió las operaciones. A partir del día 16 se realizaron las últimas dos líneas (6 y 7) caracterizadas por dos estructuras superficiales en forma de vórtice dipolo y eventos de surgencia costera, detectados por satélite, fuera de la Bahía de Guaymas.

III.- RESULTADOS.

Los patrones recurrentes que sugieren un tipo de circulación en forma de giros y filamentos alrededor de las cuencas el Farallón y Guaymas han sido descritas por Badán-Dangón et al. (1985) usando imágenes de satélite en la banda infrarrojo, los autores citados han sugerido que la advección horizontal de las corrientes es forzada por la deriva iniciada por el viento. El análisis de imágenes ha provisto una muy útil herramienta para distinguir la riqueza de estructuras que pueden ser observadas mediante los contrastes térmicos o de color. Las manifestaciones térmicas en la superficie muestran desde pequeños giros (10 a 15 km de diámetro) hasta grandes anillos (100 a 150 km de diámetro) con una circulación estacional ciclónica y anticiclónica siguiendo la batimetría de las Cuencas del Golfo (Alvarez-Sánchez et al., 1976; Emilsson y Alatorre, 1975). También estas manifestaciones se han dado como filamentos partiendo de los márgenes costeros, en puntas y Bahías, hasta formaciones del tipo vórtices dipolo (llamados también hongos). Estos últimos evolucionan en periodos que van de días hasta a un par de semanas.

El presente trabajo pretende determinar la estructura hidrográfica y las características del movimiento de las formaciones superficiales mencionadas.

III.1 Filamentos y giros.

En esta sección se describen las características hidrográficas y Lagrangeanas de algunas manifestaciones térmicas superficiales (giros y filamentos) observadas en una serie de imágenes IR tomadas entre el 23 de Octubre y el 11 de Noviembre 1985. Las primeras estructuras observadas están en las imágenes del 23 y 24 de Octubre (figura 6). Una de ellas es un giro anticiclónico, denotado como G en las figura 6, con 160 km de longitud alejándose de las costas de Sonora en dirección Norte a Sur antes de curvarse hacia la cuenca. Más al Norte del Golfo, en el centro de la cuenca de Guaymas, se observa que una mancha fría en forma de filamento (letra F de las figura 6) se aleja de la costa, desde la punta NW de la Bahía de Guaymas, cruzando el Golfo entre aguas de mayor temperatura.

En la región del sur de las islas Angel de la Guarda, San Esteban y Tiburón se observa el intenso y casi permanente frente frío, mostrado por otros autores (Badan et al., 1985), letra S de las figuras 6. Se ha observado que este frente se encuentra la mayor parte del año, en esta zona, y abarca el ancho del Golfo; en particular no se observa, en estas imágenes, (figura 6) que exista un límite al norte (Alto Golfo de California) donde termine el frente S. Es decir el frente S se extiende hacia el norte (NW) y cubre todo el alto Golfo de California. Para describir más claramente los movimientos del agua fría sobre el borde del frente, la zona S se dividirá en

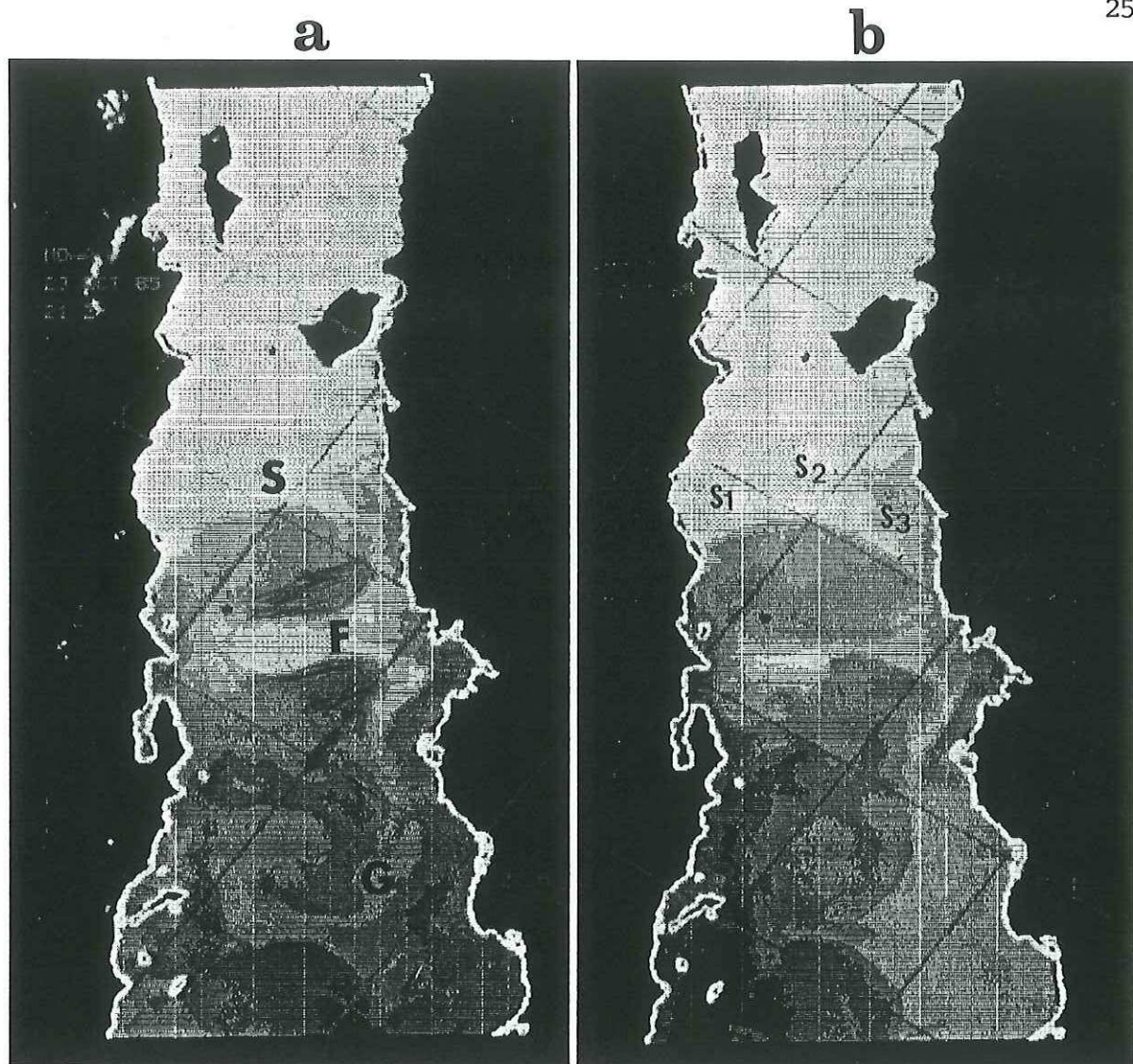


Figura 6.- Imagen de satélite sobre el Golfo de California en la banda infrarroja (AVHRR) para el a) 23 de Octubre y b) el 24 de Octubre de 1985. Las letras G y F señalan la posición de giros y filamentos de agua fría. La letra S corresponde a un frente cuasi-permanente observado al Sur del conglomerado de islas Angel de la Guarda, San Esteban y Tiburón.

tres secciones (figura 6b); la región S1 representará la zona cerca de la costa de Baja California alineada con el Canal de Ballenas; la S2 estará alineada con la Isla San Esteban (región central); y la región S3 en el margen costero de Sonora. Las imágenes muestran que el frente está cargado hacia la región S1 (figura 6), y sugieren un movimiento hacia las zonas S2 y S3, completando un gran giro anticiclónico alrededor de la cuenca de Guaymas, al unirse con el agua del filamento F.

La primera toma de datos directos se inició el 27 y 28 de Octubre mediante un transecto de 550 km utilizando 32 lances de XBT (ver figura 1 ó 7). La estructura vertical de temperatura de este transecto (figura 7) muestra tres estructuras subsuperficiales que bien podrían ser las manifestaciones superficiales G, F y S, del día 23 y 24 de Octubre (figura 6), deformadas en los cinco días transcurridos. La imagen más cercana a este transecto es del día 29 de Octubre (figura 8), se aprecia claramente el frente S, un filamento frío de menor extensión, en donde estaba la estructura F (figura 6), y una estructura fría, no muy visible por la nubosidad, en la región donde se desprendió el giro G. Esta estructura (denotada como G*) está entre aguas de temperatura mayor a los 27 °C, y es ≈ 1 °C más frío que el agua circundante. La distribución vertical muestra una estratificación definida desde la superficie, en contrase con el agua local (o fuera del giro), con una capa mezclada hasta los 20 m de profundidad al SE y 30 m al NW de G*. El filamento F

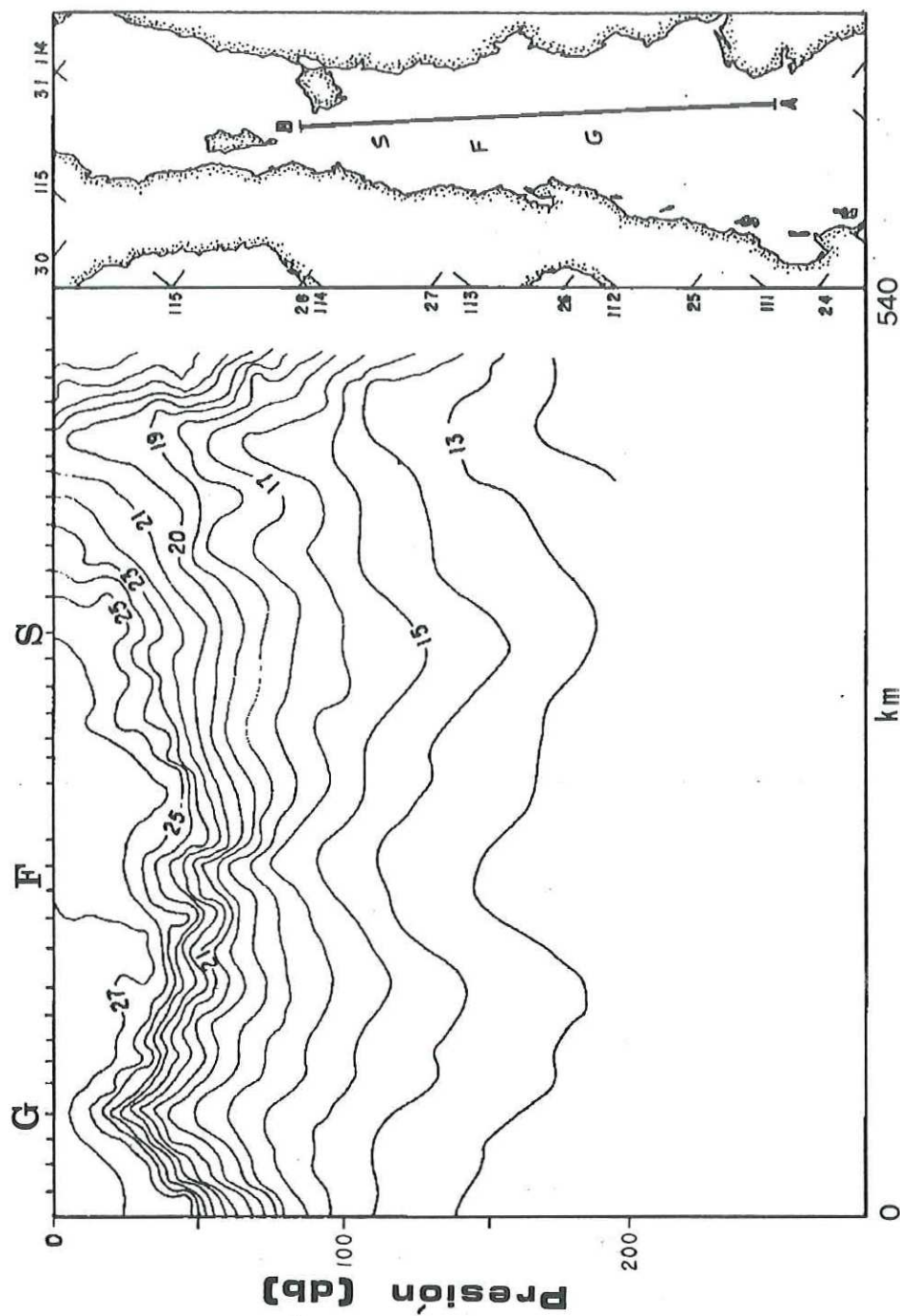


Figura 7.- Distribución vertical de temperatura utilizando 32 XBT del 27 al 28 de Octubre de 1985 (trasecto AB). Las letras G*, F y S corresponden a la posición superficial del giro, filamento y frente de surgencia observado en las imágenes de satélite de la figura 8, y posiblemente relacionadas a las estructuras observadas en la figura 6.

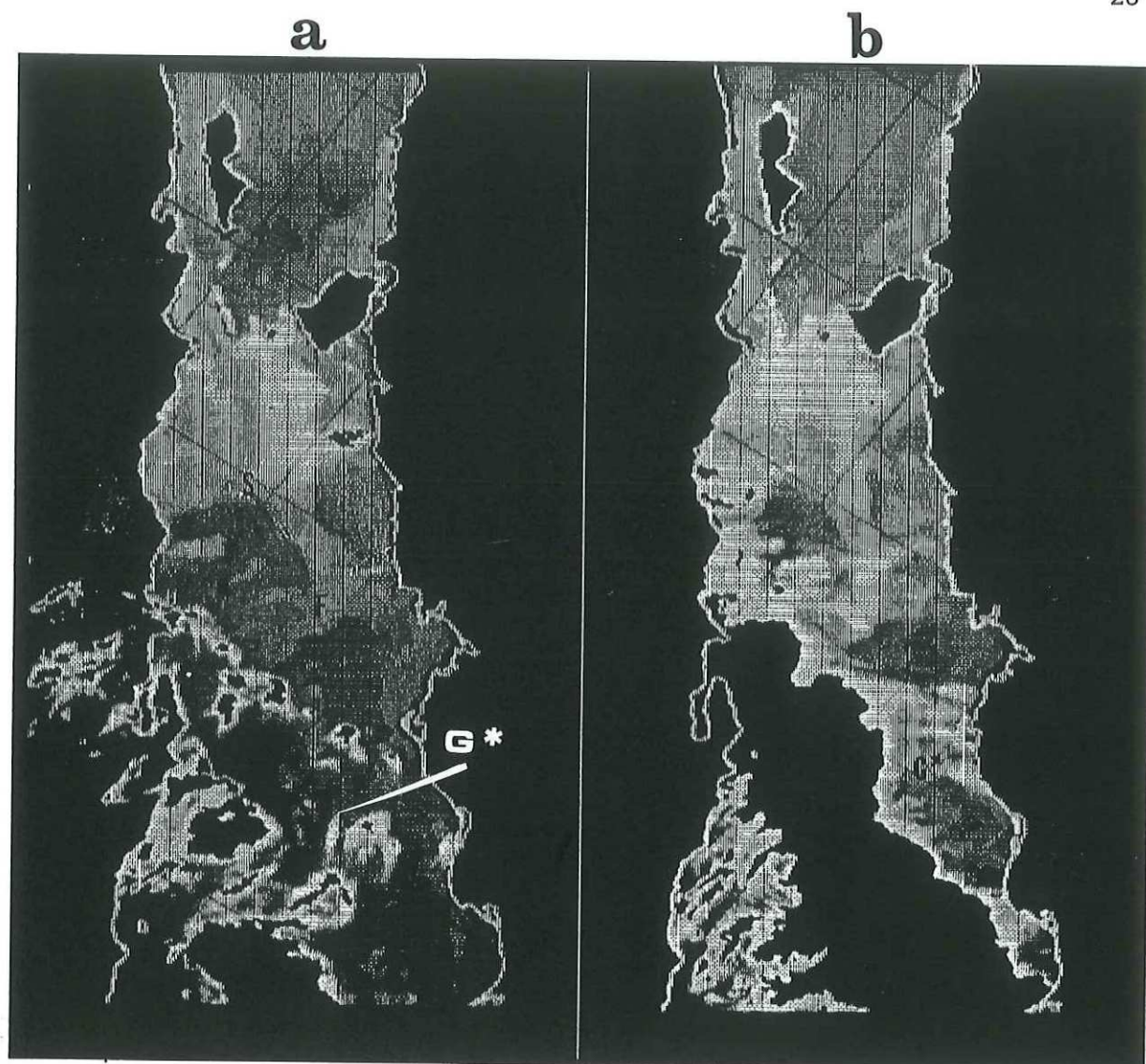


Figura 8.- Imagen de satélite correspondiente al a) 29 de Octubre, b) 30 de Octubre de 1985. La letra G* señala la posición probable del filamento G de la figura 6, cinco días después de observada; S es el inicio del frente térmico acotado al norte por aguas de calientes ($> 23^{\circ}\text{C}$) del Alto Golfo de California.

cruza el ancho del Golfo entre aguas superficiales de mayor temperatura (26°C) con una diferencia superficial de 0.5°C . La distribución vertical de temperatura asociada al filamento y giro muestran una termoclina bien definida y compacta con deformaciones que se extienden hasta cerca de los 200 db.

La región asociada al frente de surgencia (S) se caracteriza por un abrupto afloramiento de aguas de baja temperatura, atribuidos a dos procesos importantes: la fricción de la onda de marea actuando sobre el fondo, y la circulación de las corrientes de marea sobre los bordes de las islas, en particular esto último se observa en la isla San Esteban (Argote et al., 1985). Ambos procesos dan como resultado mezcla vertical e inducen a que la compacta termoclina (afuera del frente, ver figura 7) se abra en forma de abanico y con esto se debilite la estratificación en la columna de agua, haciendo más fácil el tránsito de aguas de estratos inferiores hacia la superficie. La disminución de temperatura superficial va desde los 26°C hasta 20.5°C , donde asciende a temperaturas mayores de 23°C en el Alto Golfo de California (figura 7); las imágenes de satélite (figura 8) muestran este límite norte del frente S al SW de la Isla Tiburón.

La secuencia de imágenes del 31 de Octubre al 2 de Noviembre (figuras 9 y 10a) muestra el desarrollo de una estructura en forma de filamento precisamente sobre la estructura marcada F (se continuará llamando filamento F a este nuevo aporte de aguas frías)

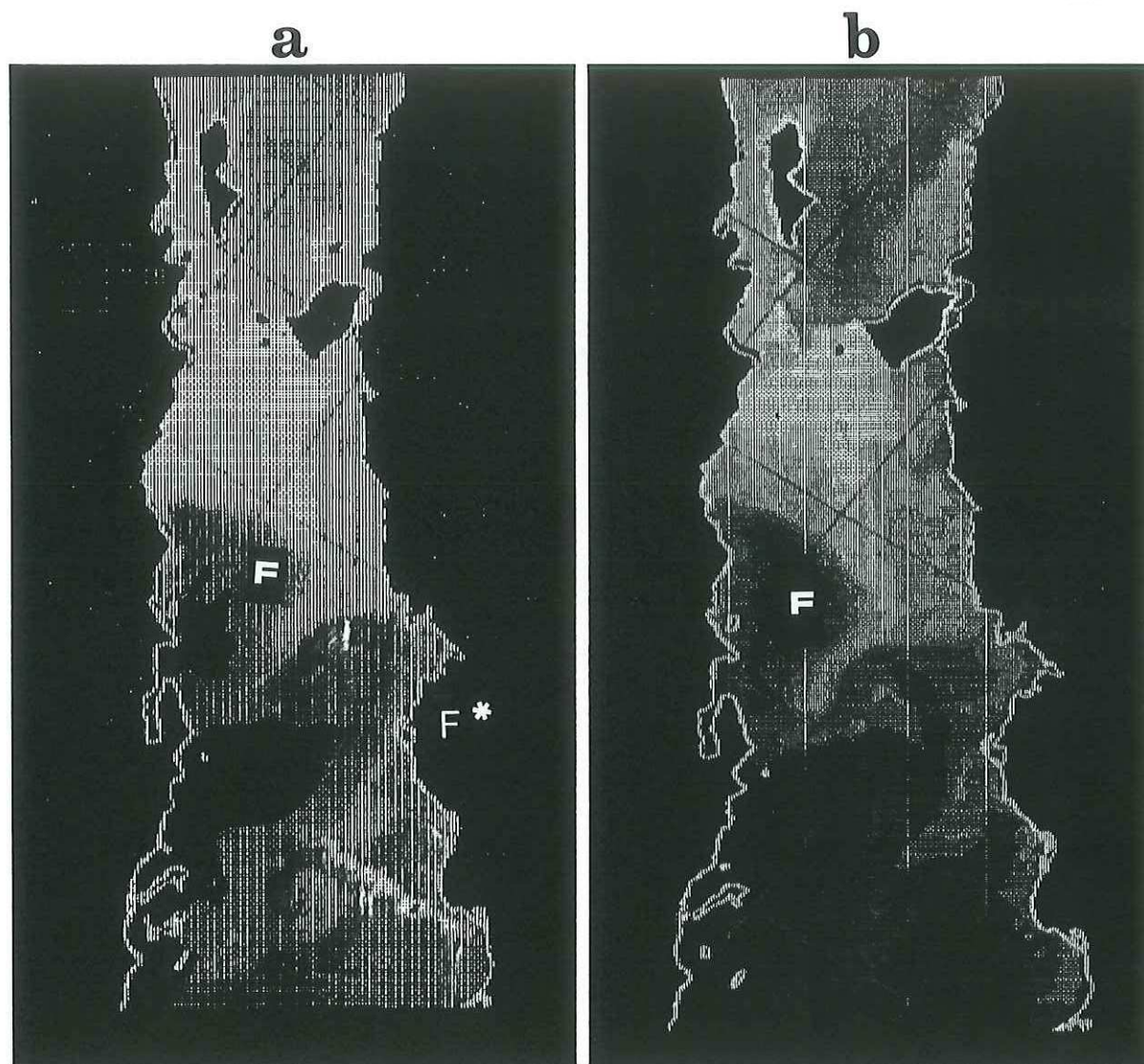


Figura 9.- Imagen de satélite del a) 31 de Octubre, b) 1º de Noviembre de 1985. La letra F* representa un filamento que se desprende a partir de Punta Lobos, Sonora, y se curva ciclónicamente hacia la cuenca el Farallón. F señala un nuevo aporte de agua fría en forma de filamento a partir de la región S2.

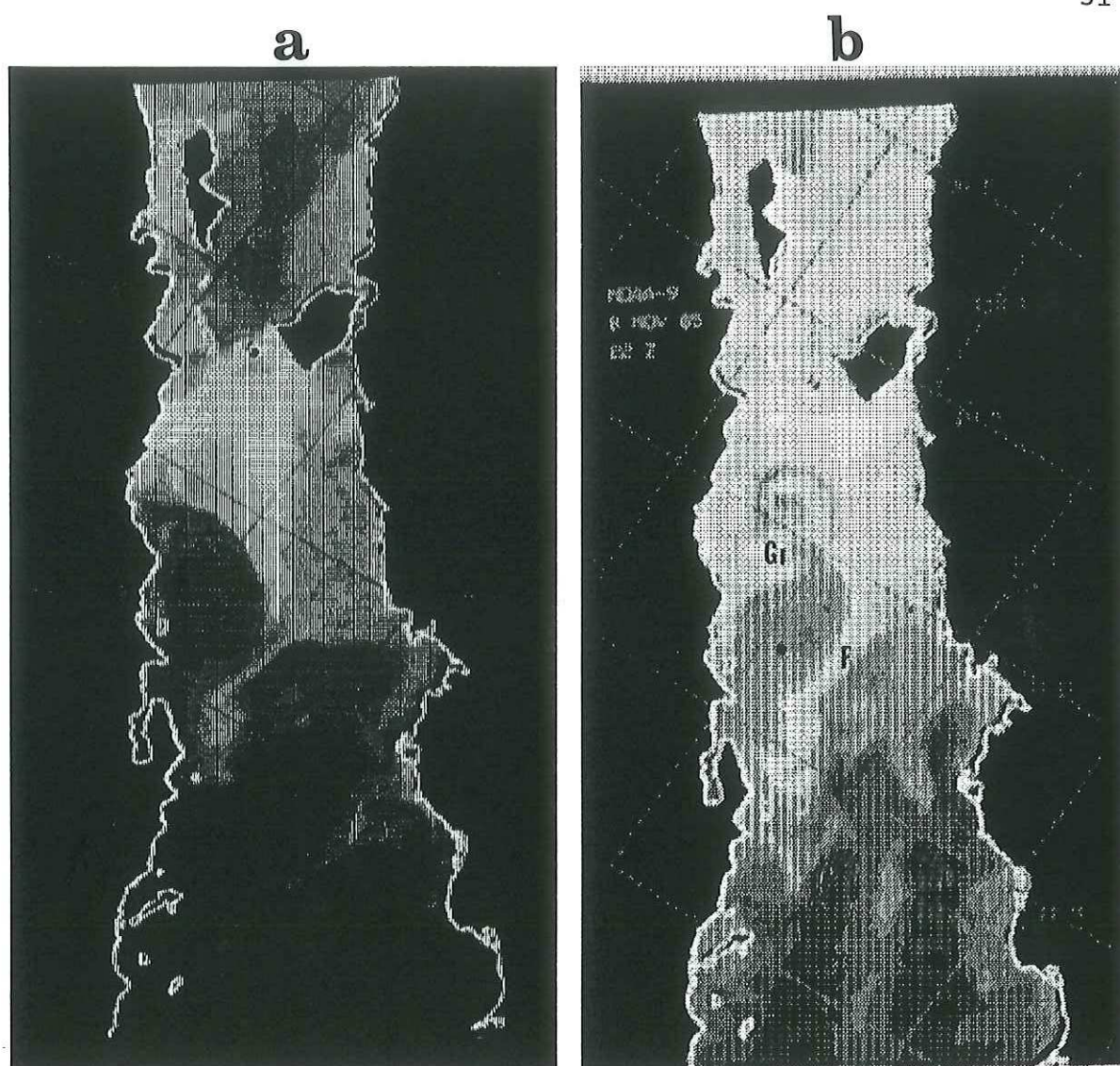


Figura 10.- Imagen de satélite del a) 2 de Noviembre, b) 8 de Noviembre de 1985. La letra G1 representa un giro de alrededor de 20 km de diámetro. F tiene el mismo significado que la figura anterior. En estas imágenes se puede observar la penetración, hacia dentro del Golfo, de aguas de alta temperatura, tanto por la costa de Sonora como las de Baja California.

en las imágenes del 23 y 24 de Octubre. A partir del 31 (figura 9a) se observa un aporte de aguas frías con origen en la región S1 penetrando hacia el centro de la cuenca de Guaymas por la región S2 (figuras 9b y 10a).

Las imágenes muestran una rápida penetración de las aguas frías a través de la cuenca. La rapidez con la que progresó la parte terminal del filamento F fue alrededor de 50 cm/s del 31 de Octubre al 1º de Noviembre; y de 30 cm/s del 1º al 2º de Noviembre. El filamento tiene una longitud de 110 km en dirección Norte a Sur, con un ancho que varía desde 10 km en su parte central hasta 40 km en la región terminal, en forma de bulbo. En este estadio la estructura es independiente al filamento original F (figura 6).

En la secuencia de imágenes (figuras 9 a 10) se pueden observar otras estructuras térmicas. Una de ellas es la evolución de un filamento, de al menos tres días de duración (letra F* de las figuras 9 y 10). El filamento se desprende (1º de Noviembre) de la costa de Sonora (Punta Lobos) en dirección Sur, y se extiende hasta aproximadamente 160 Km fuera de la costa, donde se curva ciclónicamente hacia la Cuenca del Carmen el día 2 de Noviembre.

Las otras estructuras que se observan en las imágenes de satélite son las manchas calientes (agua local) que serán descritas más adelante. Cabe decir que aunque aquí se ha dado preponderancia a los filamentos y las estructuras frías, el agua

local tiene movimientos como pequeños y grandes giros que recorren el Golfo, además se ha observado que las manchas calientes incrementan o disminuyen su área superficial posiblemente respondiendo a los patrones de vientos, mareas, calentamiento solar o a la misma interacción con las estructuras frías.

El 8 de Noviembre (figura 10b) el filamento F se encuentra aún cruzando la cuenca de Guaymas, con la misma forma y dimensiones alcanzadas el 2 de Noviembre (figura 10a). El lapso de tiempo del 2 al 8 de Noviembre es suficiente como para que se hubiesen desarrollado varios filamentos, como el del 31 al 2 de Noviembre; sin embargo se considera que el filamento F conservó su forma a lo largo de estos días con base en los siguientes argumentos: (1º) el comportamiento de los filamentos dentro del Golfo de California, según Badán-Dangón et al. (1985) tiene una duración de una semana a veinte días; (2º) trabajos sobre filamentos sugieren una rápida evolución de éstos en las primeras fases de desarrollo y luego una fase de letargo en la cual la estructura permanece estable (Fedorov y Ginsburg, 1986); y (3º) los filamentos de los días 2 y 8 de Noviembre son prácticamente iguales en forma.

La figura 10b muestra además que el frente S de la región S1 se ha desplazado hacia la zona S3. En el lugar del frente S1 se observa una estructura en forma de giro anticiclónico de ≈ 15 km de diámetro (letra G1 de la figura 10b). Las modificaciones en la región S1 pueden obedecer a alguna de las siguientes causas: una intrusión

MAREA EN GUAYMAS, SONORA OCTUBRE Y NOVIEMBRE DE 1985.

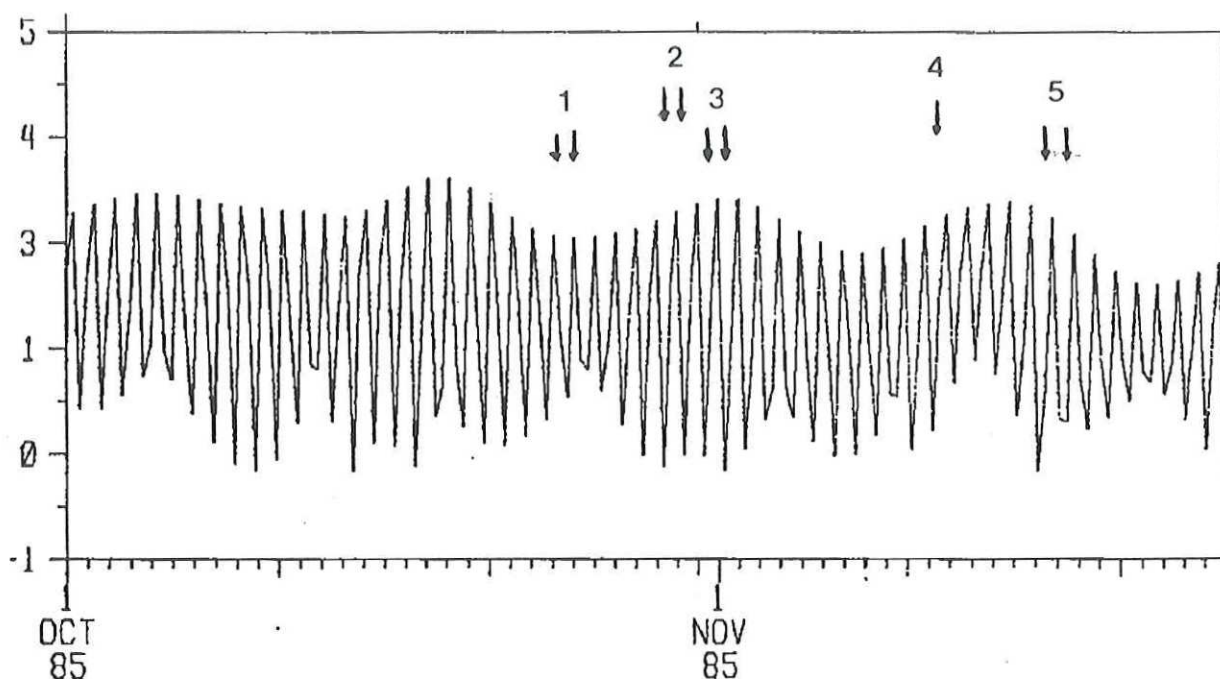


Figura 11.- Predicción de mareas para Guaymas Sonora durante Octubre y Noviembre de 1985 (altura en pies). Las flechas señalan los días en que fueron procesadas imágenes de satélite. 1) Días 23 y 24 de Octubre (figura 6) 2) 29 y 30 de Octubre (figura 8), 3) 31 de Octubre y 1º de Noviembre (figura 9), 4) 2 y 8 de Noviembre (figura 10), 5) 11 de Noviembre (figura 16) y 6) 16 y 17 de Noviembre (figura 22). Los datos fueron proporcionados por la sección de Mareografía de CICESE.

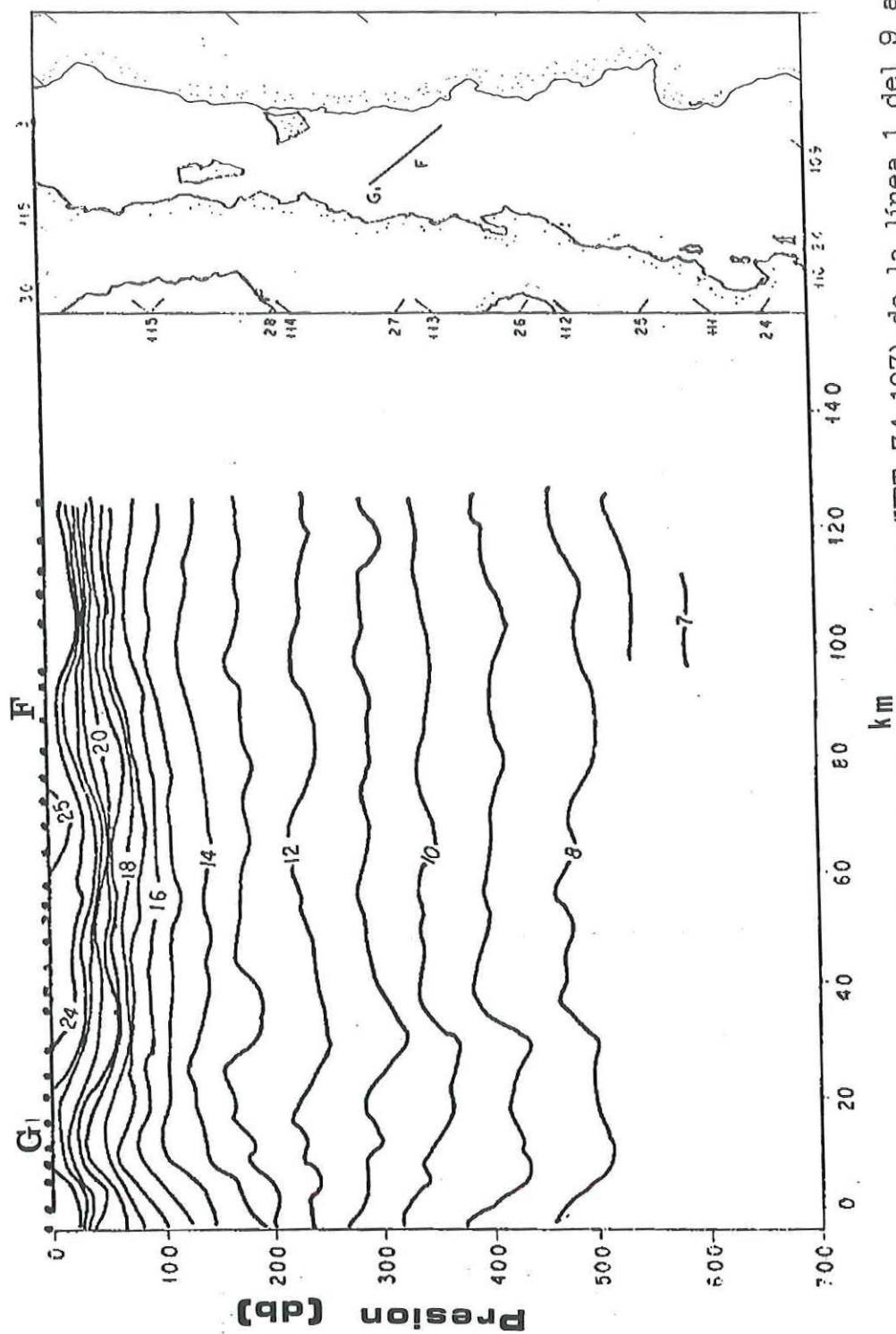


Figura 12.- Distribución vertical de la temperatura (XBT 74-107) de la línea 1 del 9 al 10 de Noviembre de 1985. Las letras G1 y F representan las posiciones de las estructuras en las imágenes de las figura 10. El cuadro en la derecha corresponde a la posición de estas en el transecto.

del agua caliente de la región sur de la cuenca; un aumento de temperatura superficial; o bien la disminución de la mezcla vertical, una vez pasado el régimen de mareas vivas (figura 11).

Estructura del Filamento F del día 9 y 10 de Noviembre.

Se logró muestrear dos secciones sobre el filamento F a partir del 9 de Noviembre (línea 1 y 2, ver figura 2). EL primer transecto fue una línea de 120 km de Este a Oeste utilizando 30 XBT. La distribución de temperatura en la vertical muestra el ascenso de las isothermas abajo de las manifestaciones superficiales marcadas como F y G1 (figura 12), observando una estructura concava o de domo hasta los 100 y 200 metros respectivamente, con la consecuente imagen inversa en las capas profundas debida a un posible balance geostrófico. El filamento F presenta un gradiente horizontal de temperatura superficial de $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, con una diferencia $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en

la superficie respecto al agua circundante. El giro G1 tiene un mayor gradiente térmico con $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ y es $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ más frío que el agua circundante.

El segundo cruce es un transecto de 100 km de Oeste a Este con 36 lances de XBT y 7 de CTD. Se encontró que la distribución vertical de temperatura (figura 13) tiene estructuras por abajo de las manifestaciones superficiales observadas por satélite aunque estas son menos marcadas que en las líneas anteriores, e. g. en la figura 13 se observa el levantamiento local de las

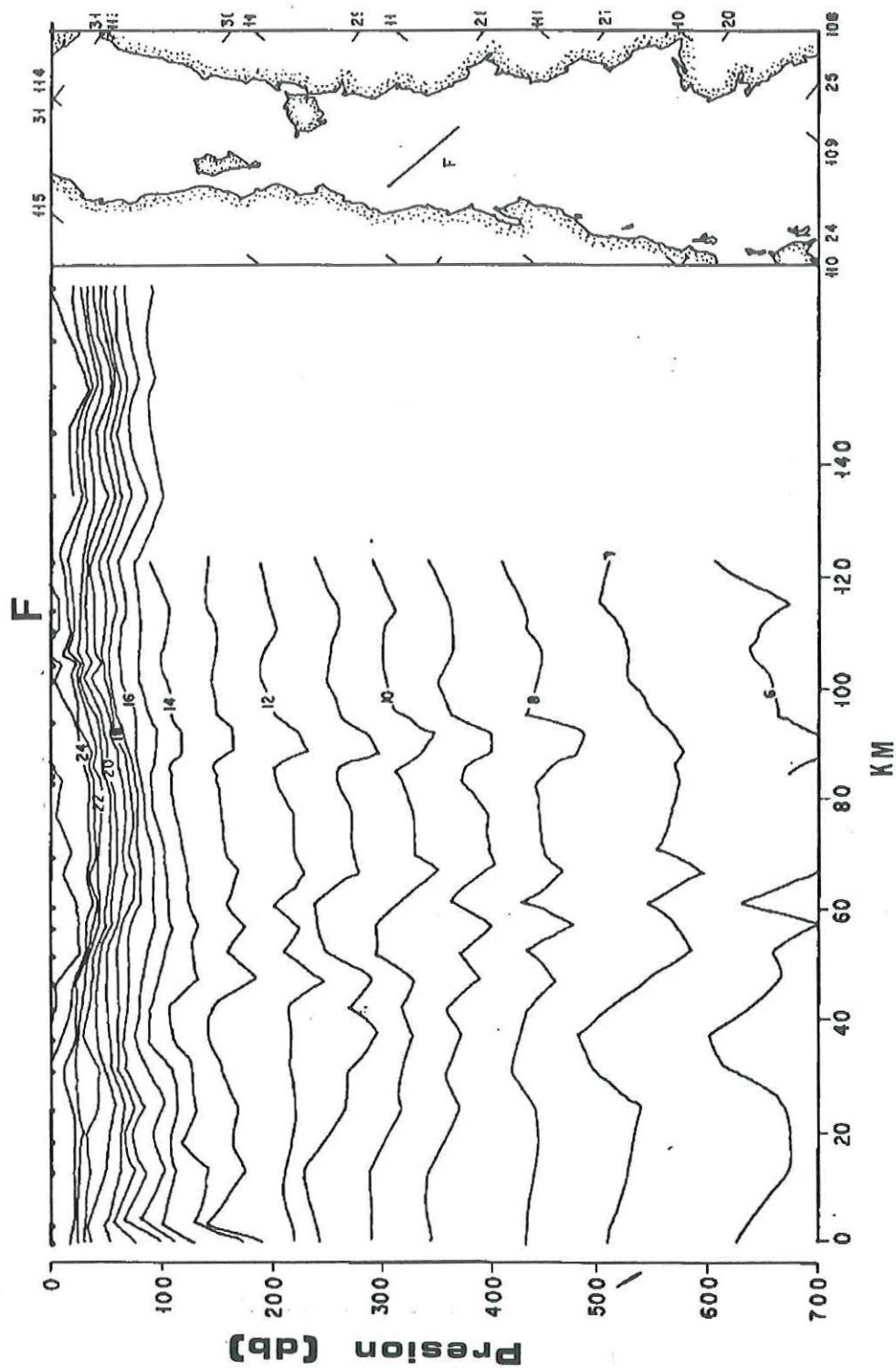


Figura 13.- Distribución vertical de temperatura para la línea 2, del 10 al 11 de Noviembre, con las estaciones de XBT 107 a 139 y los CTD 143 a 149.

isotermas producidas por el filamento F.

Cinco de las siete estaciones de CTD fueron obtenidos precisamente sobre el filamento; la figura 14, muestra esa parte de la sección amplificada hasta 200 db. El filamento tiene en la superficie, además de mínimos en temperatura, mínimos en salinidad (≈ 0.05 ups) y máximos en densidad ($\approx 1025 \text{ kg/m}^3$). Estas características fueron comunes en todas las estructuras frías durante la expedición. Es notable que el campo de densidad es casi paralelo al de temperatura; esto sugiere que la salinidad influye poco en el campo de densidad.

La velocidad geostrófica (figura 14d) muestra que el filamento F tiene un choro superficial de 60 cm/s al Sur, decreciendo a 20 cm/s a los 70 m de profundidad. La estructura geostrófica es casi simétrica, con un gradiente un poco mayor al Oeste respecto del Este. Esta asimetría se observa también en temperatura; el filamento separa aguas calientes de 24 °C en el Este, y de 25 °C en el Oeste (figura 13).

Las coordenadas reportadas vía telefónica del filamento F y la detección de éste por medio de los instrumentos fueron los indicadores para lanzar algunos radioflotadores (figura 15). Las velocidades Lagrangeanas de los flotadores 5 y 6 promediadas por día fueron 54 y 63 cm/s para los dos primeros días. Por otro lado, los flotadores fuera de la influencia del filamento se desplazaban más lentamente (10 a 15 cm/s) y sin un patrón definido con excepción del flotador

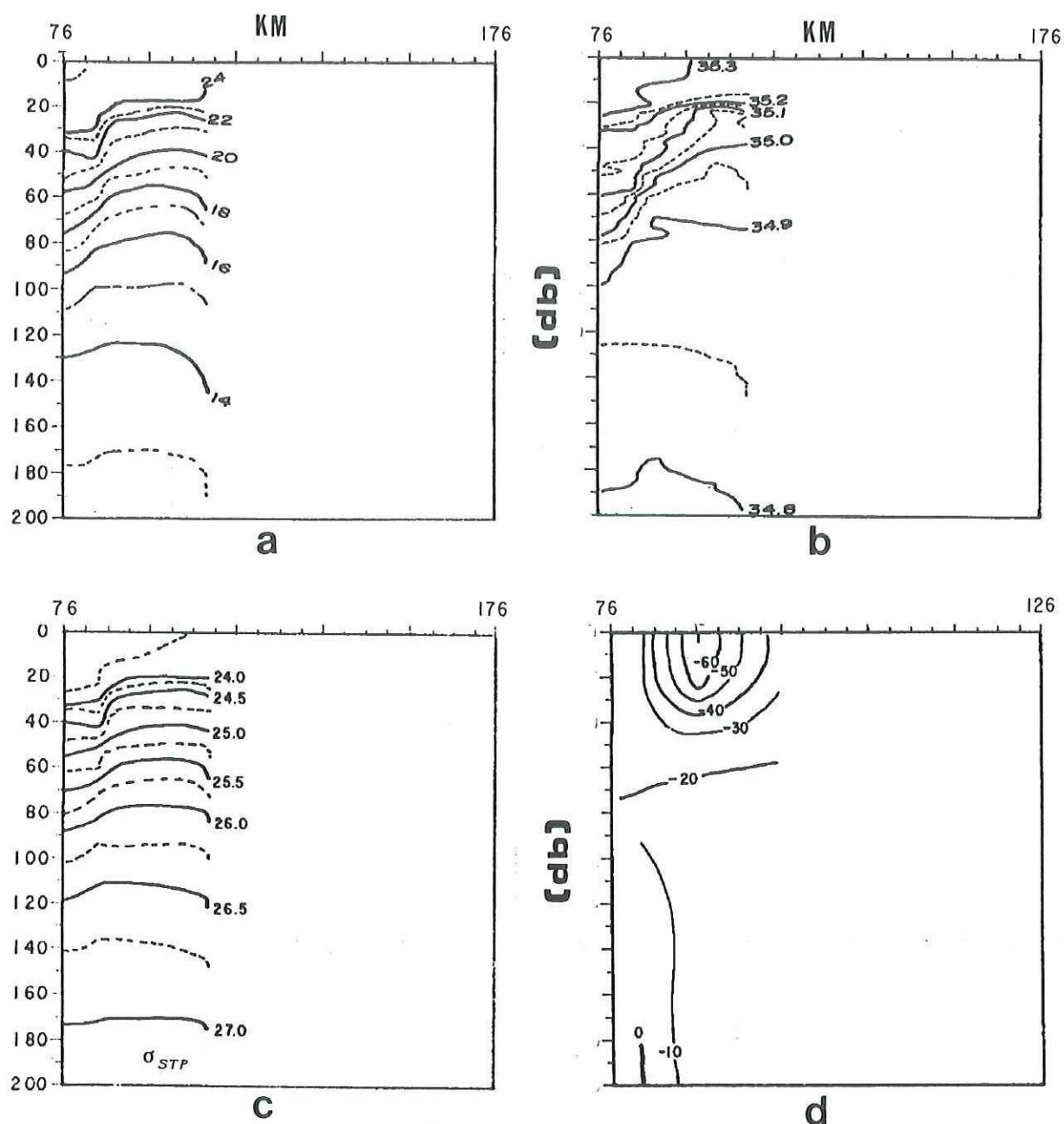


Figura 14.- Distribución vertical amplificada de a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrofica, en el nivel relativo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 145 a 149 de la figura 13. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Sur (ver figura 13).

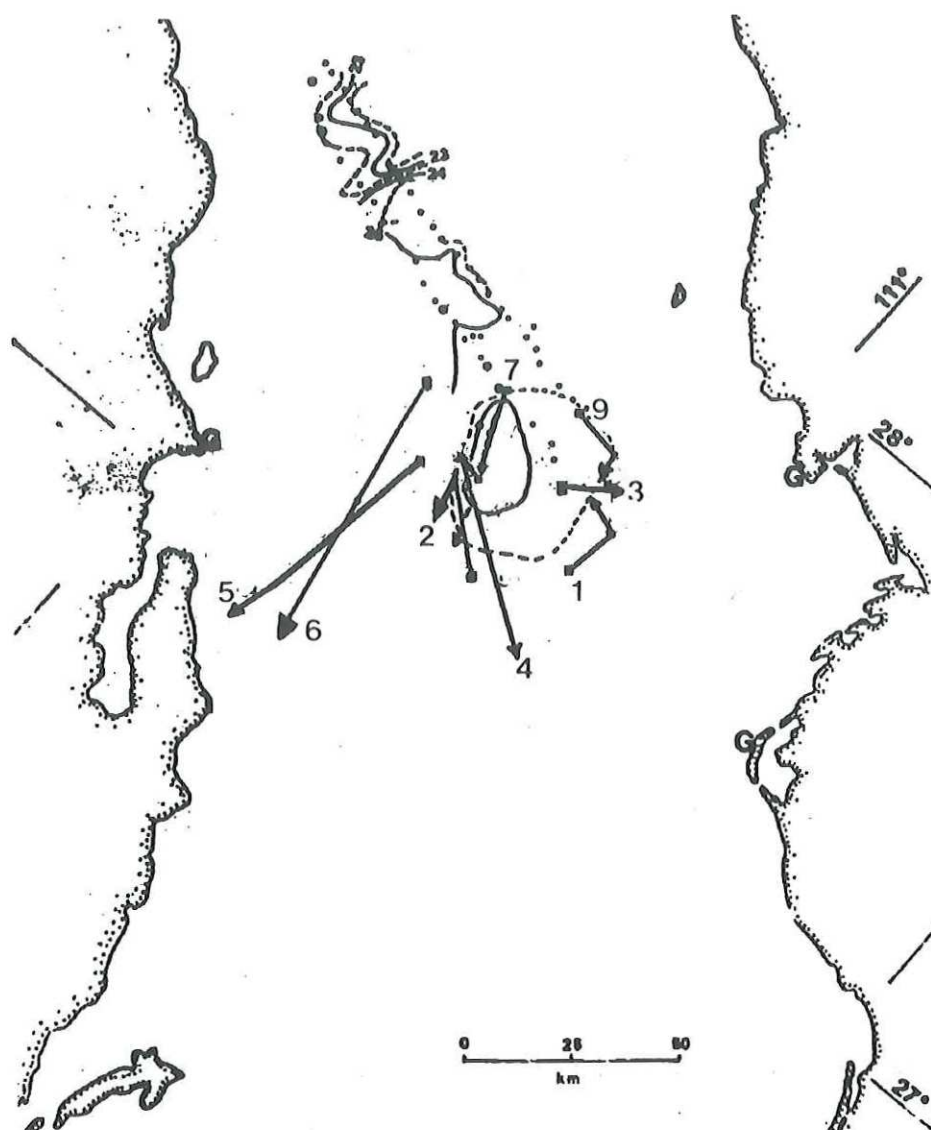


Figura 15.- Trayectoria de los flotadores de deriva lanzados el 9 de Noviembre de 1985. El símbolo () señala la posición inicial; (o) 24 horas después, y las flechas 48 horas después del lanzamiento. Los contornos sobrepuestos corresponden a la temperatura superficial de la línea 1 y 2 de XBT y algunos CTD.

#3, el cual se desplazó en sentido contrario al filamento F al costado Este. Los flujos de retorno asociados a los filamentos han sido observado en otros lugares (Berstein et al., 1977; Flament et al., 1985).

Las velocidades Lagrangeanas obtenidas por las boyas sobre el filamento, mostraron una buena concordancia con las velocidades geostroficas. La magnitud de los desplazamientos de los flotadores 5 y 6 están en el mismo sentido del flujo del filamento, y tienen prácticamente la misma rapidez (60 cm/s) entre la superficie y 10 m de profundidad.

III.2 Manchas calientes.

Las manchas calientes observadas en las imágenes, al igual que los filamentos frios, parecen presentar un patrón estacional consistente con el sistema general de vientos. Esto es, en el caso específico del Golfo de California, cuando las surgencias costeras se desarrollan sobre las costas de Sonora (vientos NW), las manchas calientes se observan sobre el margen costero de Baja California; por otro lado, cuando el sistema de vientos produce surgencias por las costas de Baja California (vientos SE) las manchas calientes se observan en las costas de Sonora. Las manifestaciones frías que se han descrito invaden las cuencas desplazandose en forma de giros y filamentos a través del agua local (de mayor temperatura). Esta transferencia de movimiento debe ser absorbida por las capas

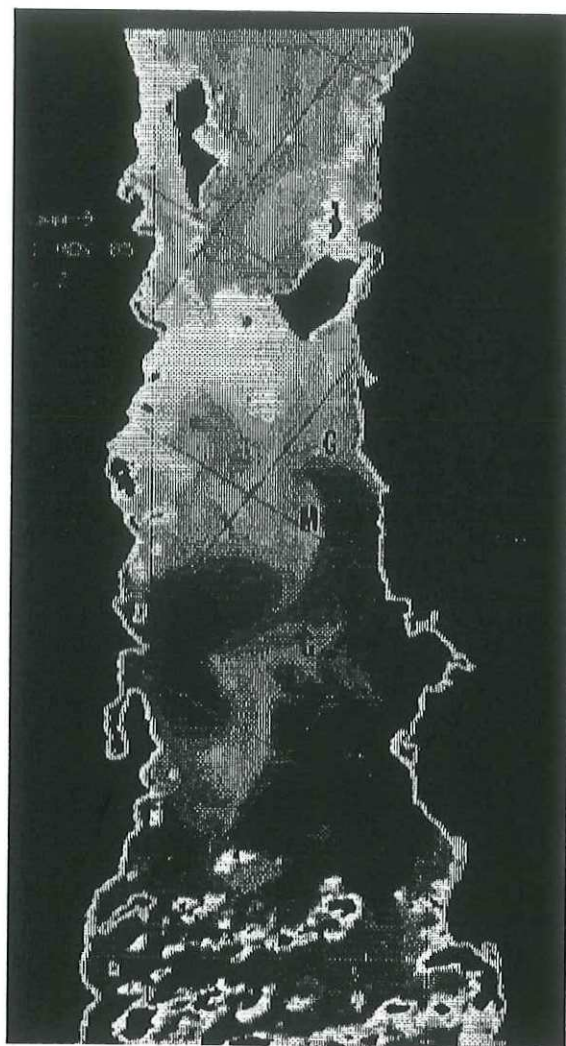


Figura 16.- Imagen de satélite del día 11 de Noviembre de 1985. Se observa la penetración de agua caliente a lo largo de las costas de Sonora, aparentemente advectada a partir de la cuanca El Farallón, se observa además una mancha caliente en forma de ovalo al norte de Punta Concepción. La letra G señala pequeños giros ciclónicos en los bordes de la mancha caliente.

superficiales creando otros tipos de movimientos extras, superponiéndose a los comunmente observados, como el aumento de área de las manchas calientes, debido al calentamiento solar, advección horizontal por viento y corrientes de marea entre los más importantes.

Los movimientos más significativos de las manchas calientes se observan a partir de la secuencia de figuras 9, 10 y 16, correspondientes a los días 31 de octubre, 1^o, 2^o, 8 y 11 de noviembre. El desarrollo del filamento F al cruzar la cuenca de Guaymas ejerce una influencia sobre el agua superficial de las manchas calientes. Por ejemplo, en las figuras 10b y 16 se observa una aparente intrusión de las aguas calientes de la cuenca del Carmen, por los margenes de Sonora, y llega a cubrir una franja de alrededor de 160 km a lo largo de la costa con un ancho de 50 km. En estas mismas imágenes, pero sobre el margen costero de Baja California la penetración del agua caliente hacia el interior del Golfo parece producir el desplazamiento del frente S hacia la región S3, y además aparece una estructura muy energética en forma de giro captada en la línea 1 (letra G1 de las figuras 10b y 12). Como ya fue indicado, la aparición del giro y el desplazamiento del frente coinciden con la relajación del sistema de vientos (NW) y el final del régimen de mareas vivas.

La figura 16 del 11 de Noviembre, muestra las modificaciones del patrón térmico superficial tres días después de la imagen

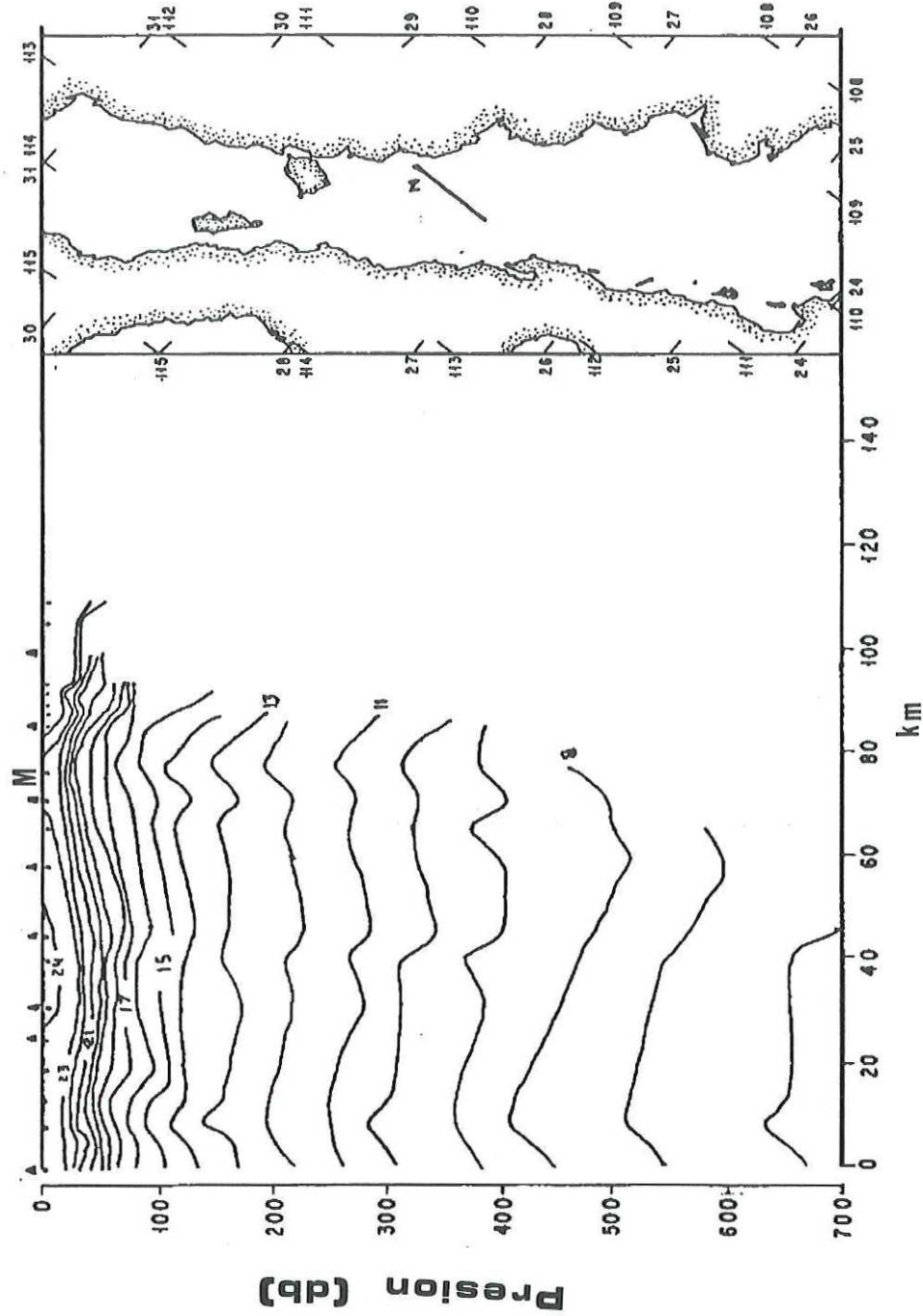


Figura 17.- Distribución vertical de temperatura de la línea 3, del 11 al 12 de Noviembre, con las estaciones de XBT 140 a 160 y los CTD 151 a 158. La letra M señala un pequeño frente frío, en contraste con la bien mezclada mancha caliente de alrededor de 60 km.

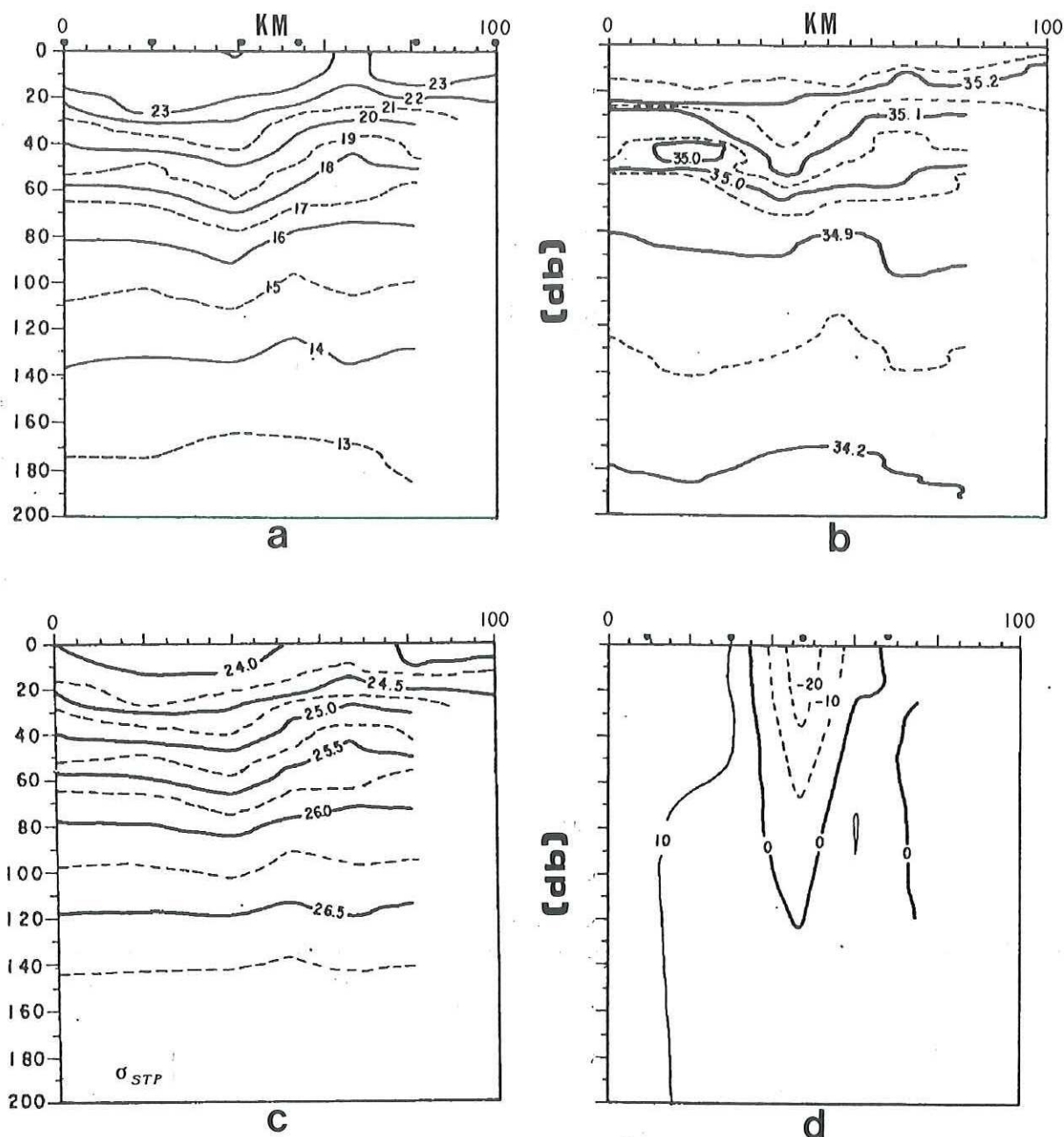


Figura 18.- Distribución vertical amplificada de la línea 3 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrofica, en el nivel relativo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 151 a 157 de la figura 17. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Este.

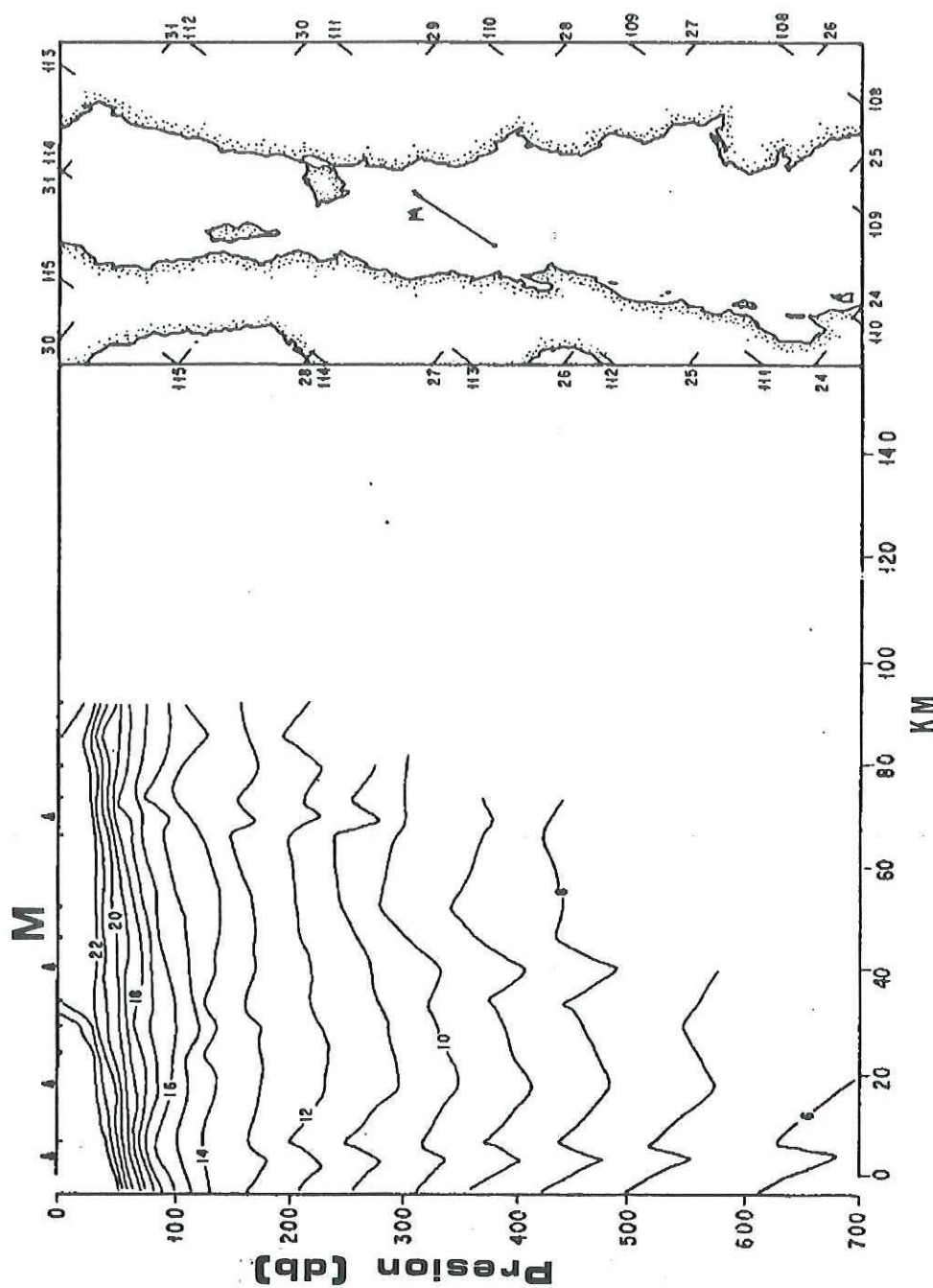


Figura 19.- Distribución vertical de temperatura para la línea 4, el 12 de Noviembre, con las estaciones de XBT 164 a 175 y los CTD 160 a 164. La mancha fría M y la capa mezclada se observó nuevamente. En los transectos cercanos al la costa de Sonora se observa un incremento de la temperatura (1 °C), reflejado como un aumento en salinidad (figura 20 b).

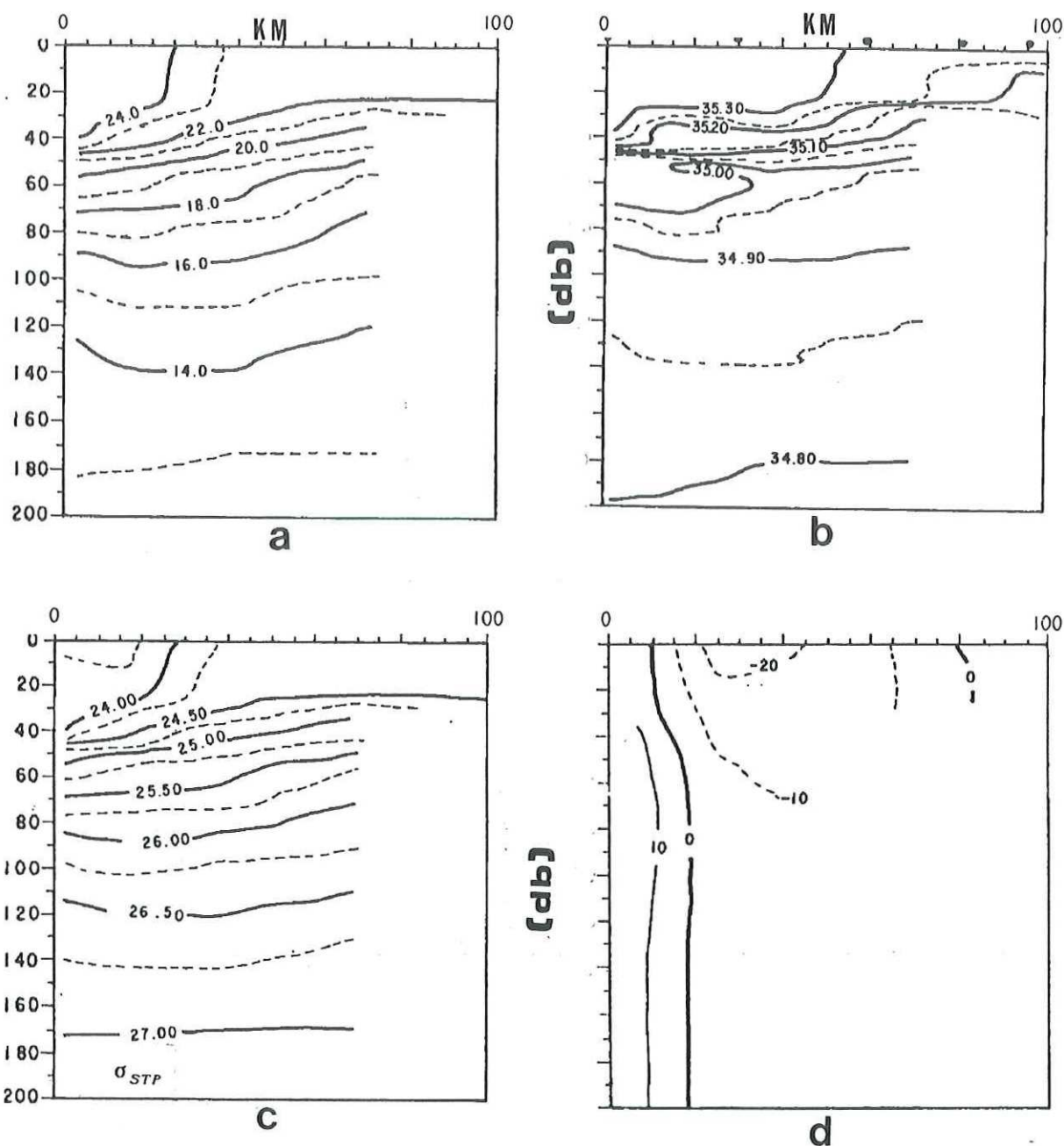


Figura 20.- Distribución vertical amplificada de la línea 4 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrofica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 164 a 170 de la figura 19. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Este.

del 8 de Noviembre (figura 10b). El filamento F aparece difuso en el centro de la Cuenca de Guaymas con aparentes intrusiones de agua caliente por el borde de la costa de Sonora en forma de pequeños giros. En este día se iniciaron dos secciones paralelas alrededor del los meridianos 111.3° y 111.5° N. El primero (línea 3) con 100 km de longitud, en dirección hacia la costa de Sonora se realizó utilizando 19 lances de XBT y 6 de CTD (figura 17). El segundo (línea 4 y también de 100 km fue con 11 XBT y 5 lances de CTD (figura 19). La distribución térmica de la línea 3, con los datos de XBT y CTD hasta 700 db (figura 17) muestra dos manchas de agua caliente, de más de 24°C , en el centro de la cuenca y cerca de la costa de Sonora, con una capa mezclada hasta los 40 db. Entre estas capas de aguas calientes se observa una angosta mancha fría con aguas superficiales de alrededor de 22.5°C , deformando las isotermas hasta los 100 db (letra M en las figuras 16, 17, y 18). La información de los 9 lances de CTD amplificada hasta los 200 db muestra otra vez una gran similitud entre la distribución de temperatura y densidad (figuras 18a y 18c). El agua superficial de la mancha caliente es advectada horizontalmente alrededor de 200 km desde la Cuenca del Carmen y a lo largo de la costa de Sonora, como lo sugieren las imágenes de las figuras 9, 10 y 16. El desbalance de las manchas calientes y frías produce un chorro geostrófico con una rapidez hacia el Este de 20 cm/s (figura 18d). Cerca de la costa, los cálculos geostróficos no se efectuaron debido a que las

estaciones son someras, sin embargo las inclinaciones de isotermas e isopicnas sugieren un flujo hacia el Oeste cercano a la costa de Sonora (figura 18d).

La distribución de temperatura en la vertical de la línea 4 (de regreso al centro de la Cuenca) fue realizada utilizando 11 XBT y 5 CTD el 16 de Noviembre (figura 19). La manchas caliente y fría observadas en la línea anterior aparecen nuevamente. La mancha fría se conserva en esta temperatura por 50 km, donde asciende a 23 °C cerca de la costa (figura 19 y 20a). La distribución de propiedades (figuras 20a a 20d) amplificada a los 200 db muestran que la mancha caliente es más salina (0.5 ups) y más boyante (0.25 kg/m^3) que el agua caliente de la línea anterior, la cual se encuentra a alrededor de 15 km hacia el Este (ver figuras 17 ó 19). La velocidad geostrófica es de 20 cm/s hacia el Este con la misma magnitud y dirección que en la línea anterior (figura 18d), sugiriendo que corresponde a la frontera frío-caliente observada en la imagen del 11 de Noviembre (figura 16) y ya mencionada. El movimiento de la manchas calientes se realiza arriba de los 50 m como indican los gradientes verticales y horizontales de propiedades; esto muestra el carácter superficial de las estructuras de alta temperatura en contraste con las profundas deformaciones observadas en los filamentos y manchas frías (e.g. la estructura F de la sección anterior).

El patrón hidrográfico de la Cuenca de Guaymas en condiciones normales tiene las características de las manchas calientes. Por ejemplo, en la expedición se observó que entre octubre y noviembre, las manchas presentaron con una capa bien mezclada entre los 20 y 40 m de profundidad y de temperatura en el rango de 23.5 a 25 °C, densidad menor a los 1024 kg/m³ y salinidad entre los 35.25 a 35.35 ups.

III.3 Vórtice dipolo.

Las estructuras vórtice dipolo, también llamadas en forma de hongo, han sido identificadas como fuentes energéticas muy importantes en varios contextos de la mecánica de fluidos, basta con mencionar las estructuras posteriores a una explosión nuclear, o al flujo de humo al salir de una chimenea.

En las zonas costeras, estas estructuras han sido claramente observadas en las salidas de cuerpos semicerrados como estuarios, estrechamientos causados por la cercanía de islas, y entre bloques de hielo, por citar algunos ejemplos. Lejos de la costa, la evolución de estructuras de esta forma se complica puesto que la fuente de energía capaz de generarlos no es aún clara.

Los resultados de esta sección corresponden a dos cortes transversales al eje del Golfo, uno de ellos, a través de una estructura de forma de vórtice, observada tanto en la distribución de temperatura superficial de los días 14, 15 y 16 de Noviembre (figura 21) como en las imágenes de satélite de los días 16 y

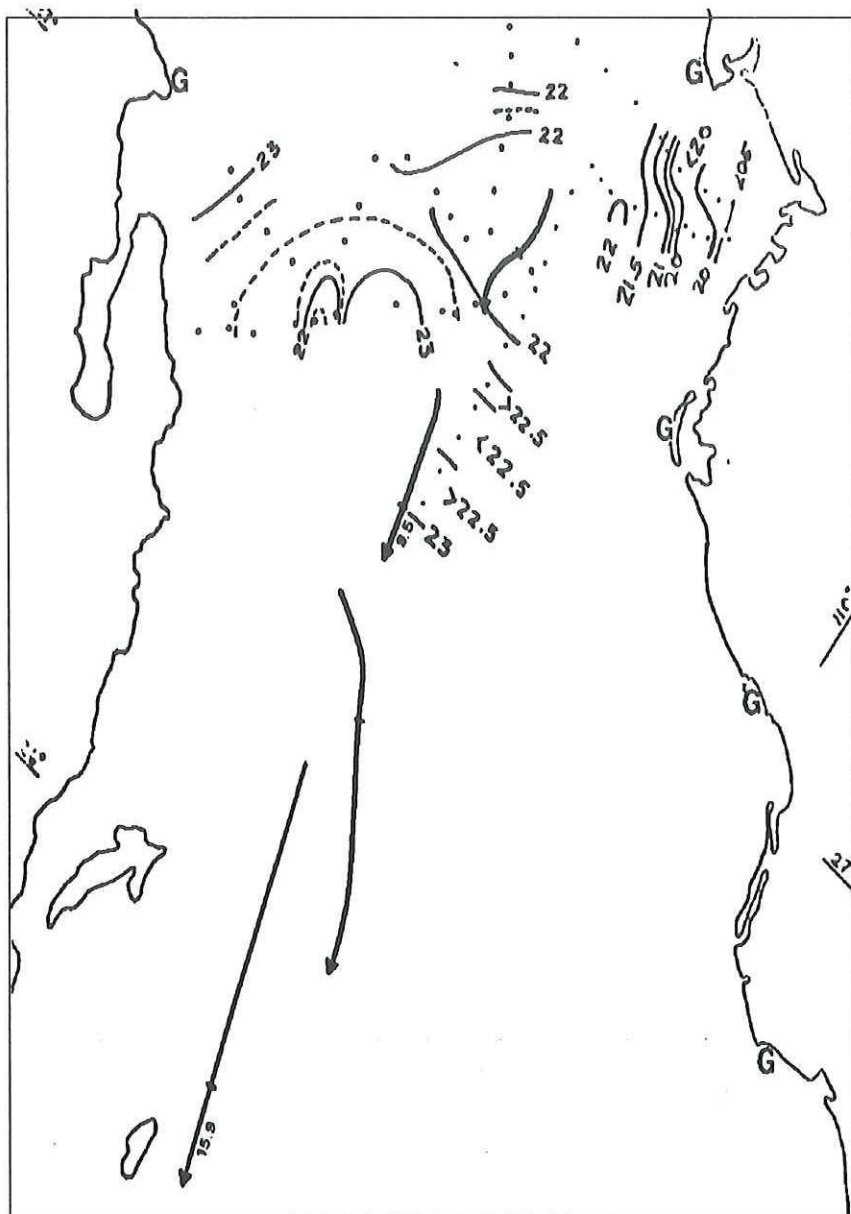


Figura 21.- Trayectoria de los flotadores de deriva 3, 4, 6 y 9 los días 14 al 15 de Noviembre. Los contornos sobrepuestos son de temperatura superficiales, con datos de las líneas 6 y 7.

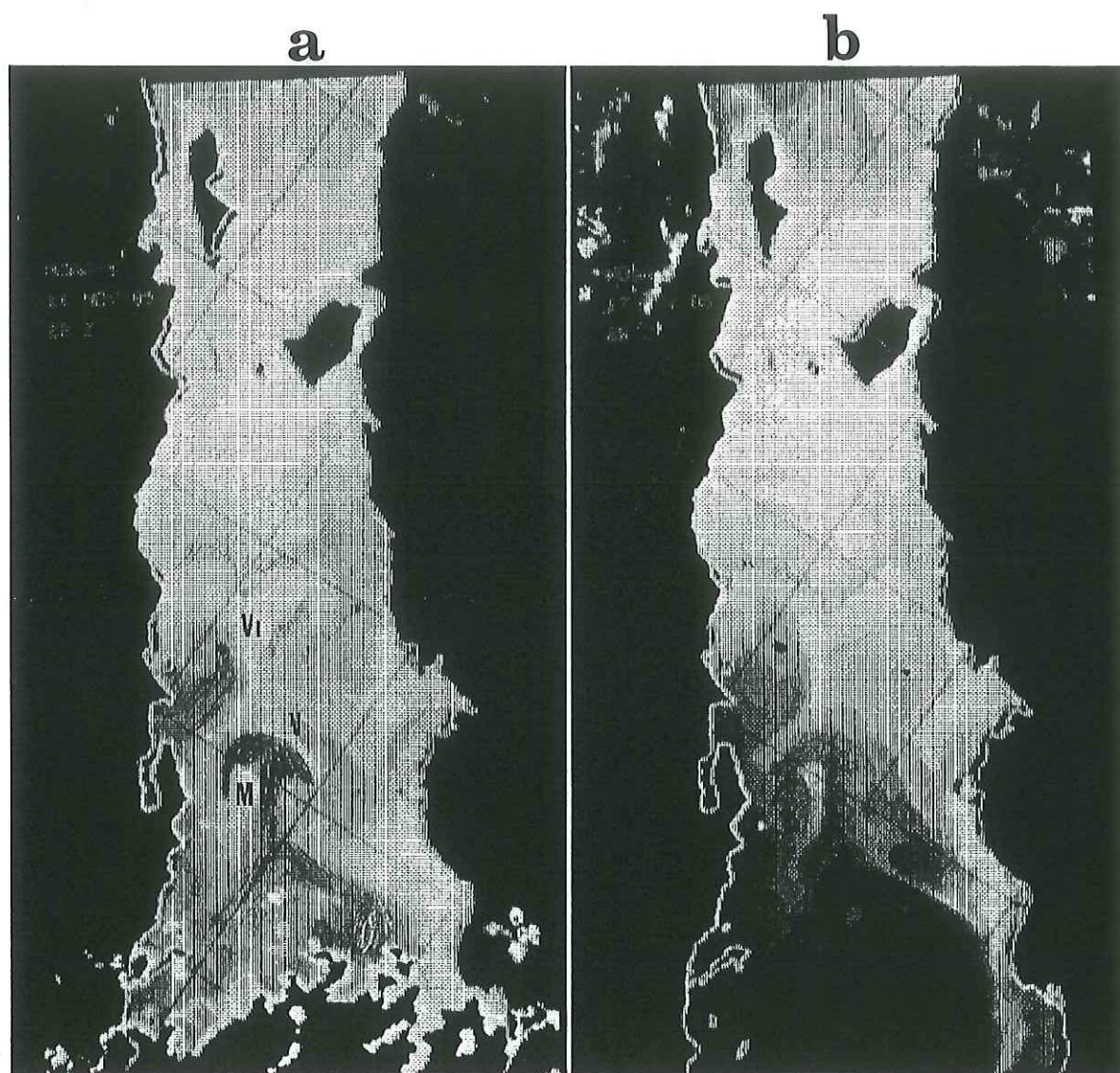


Figura 22.- Imagen de satélite del a) 16 de Noviembre, b) 17 de Noviembre de 1985. La letra V y VI representan estructuras vórtice dipolo (hongos). La letra S es una zona de surgencia, producida por esfuerzos de viento; la letra M señala una pequeña mancha fría, en un borde del vórtice. La parte inferior de las imágenes muestra un intenso frente térmico establecido entre las aguas frías de la cuenca de Guaymas y las aguas calientes de la cuenca el Farallón, las imágenes sugieren que estas aguas están penetrando hacia adentro del Golfo (10 cm/s).

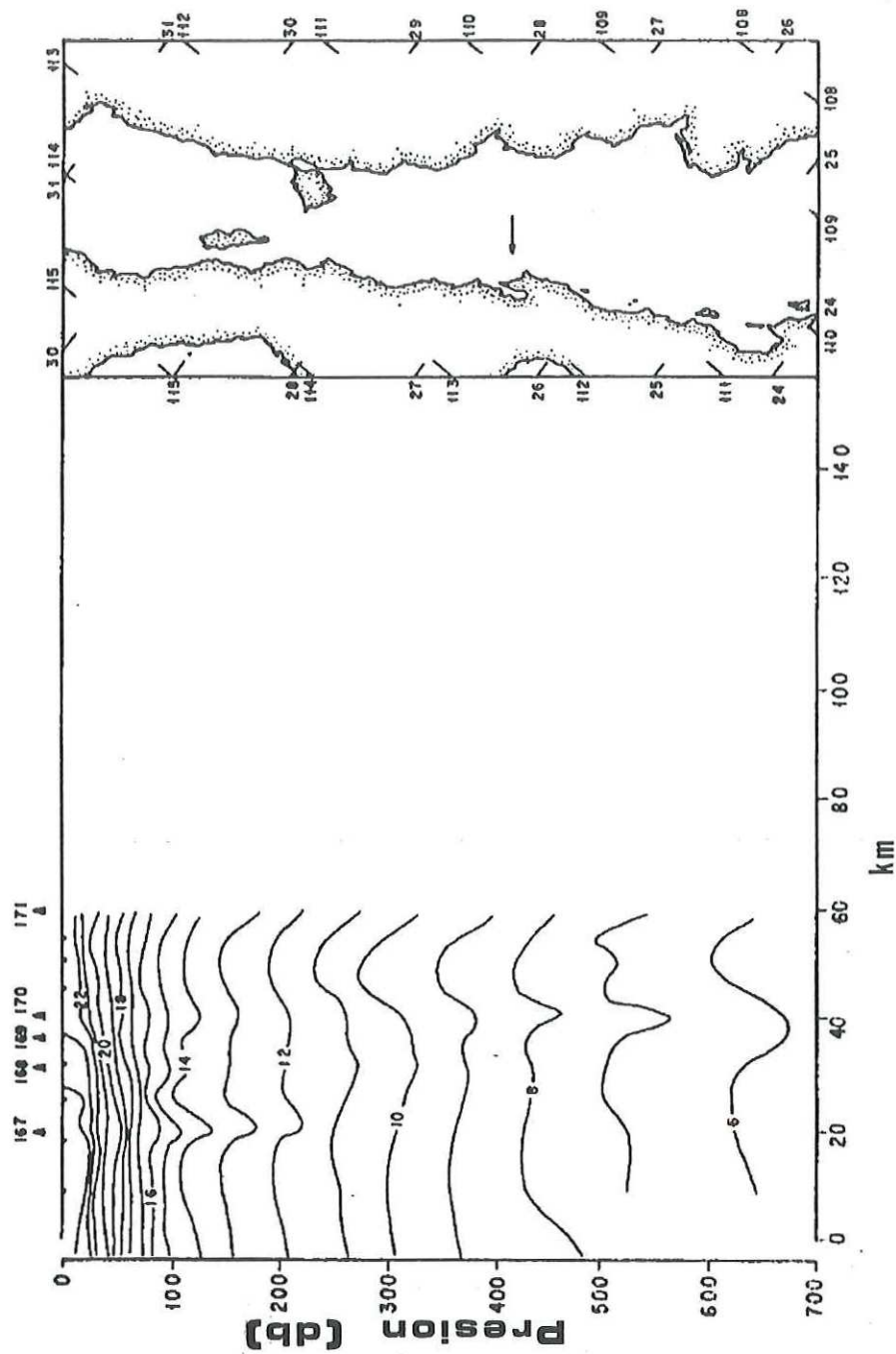


Figura 23.- Distribución vertical de temperatura para la línea 5, el 13 de Noviembre, con las estaciones de XBT 177 a 186, y los CTD 166 a 171. Las aguas calientes ($> 24^{\circ}\text{C}$) se encuentran cerca de la costa de Baja California, y disminuyen hacia el centro del Golfo.

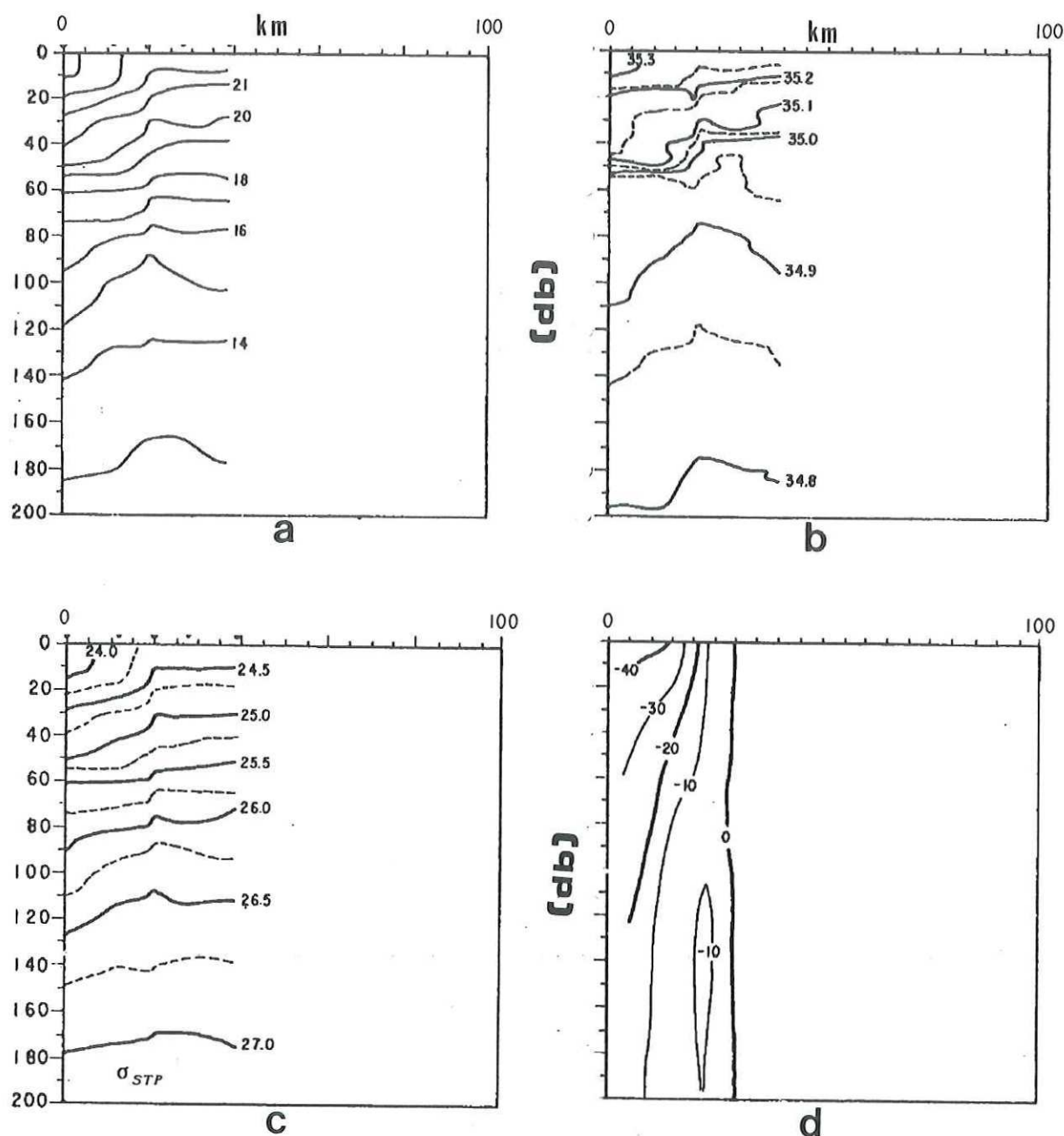


Figura 24.- Distribución vertical amplificada de la línea 5 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrofica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 166 a 171 de la figura 23. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el SE.

17 de Noviembre (figura 22). Las líneas 5 y 6 están separadas entre si ≈ 10 km (figura 2 y 23) y fueron realizadas con dos días de diferencia, tiempo en el cual se registró un fuerte evento de viento NW durante el 13, 14, y 15 de Noviembre (figura 5). Durante la tormenta no se obtuvieron imágenes de satélite, sin embargo, algunos lances de XBT y los datos de la línea 6 (XBT y CTD) resolvieron adecuadamente la estructura en forma de vórtice dipolo.

La línea 5 fue realizada aproximadamente a 20 km afuera de Punta Concepción, el 13 de Noviembre con 9 lances de XBT y 5 de CTD a lo largo de 60 km (figura 23). La distribución de temperatura muestra aguas calientes bien mezcladas en la cercanía de la costa de Baja California y una disminución de temperatura hacia fuera de la costa, i.e. pasa de 24 a 22.5 °C. La información de CTD, amplificada hasta los 200 db (figuras 24), indica que las aguas superficiales de mayor temperatura tienen mayor salinidad y menor densidad, respecto a la mancha fría. En la región del mínimo de temperatura (letra M de la figura 24a) la forma de las isotermas tiene una estructura muy semejante a la distribución de isopícnas (figura 24c), mostrando nuevamente el patrón esperado de la dominancia de la temperatura en el campo de densidad. El desbalance producido arriba de los 60 db es compensado mediante un chorro geostrófico, cerca de la superficie, con una velocidad hacia afuera de la cuenca (SW) de 40 cm/s (figura 24d).

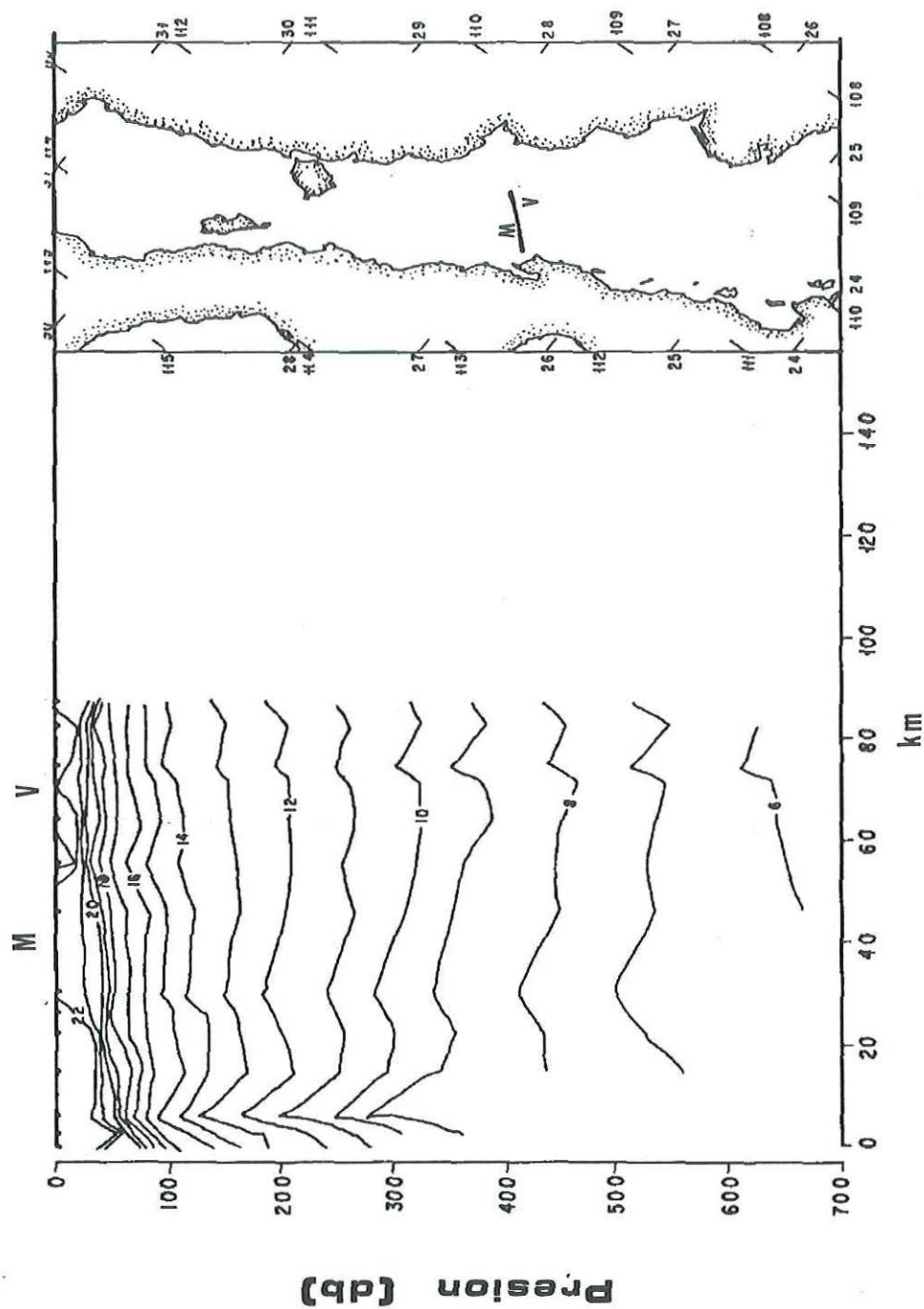


Figura 25.- Distribución vertical de temperatura para la línea 6, el 16 y 17 de Noviembre, con las estaciones de XBT 209 a 211, y los CTD 172 a 182. Esta gráfica muestra tres distribuciones subsuperficiales; una capa bien mezclada cerca de la costa de Baja California; un frente frío en el centro del transecto (M) y las deformaciones producidas por el cuello del vórtice dipolo (V) observado en la figura 22.

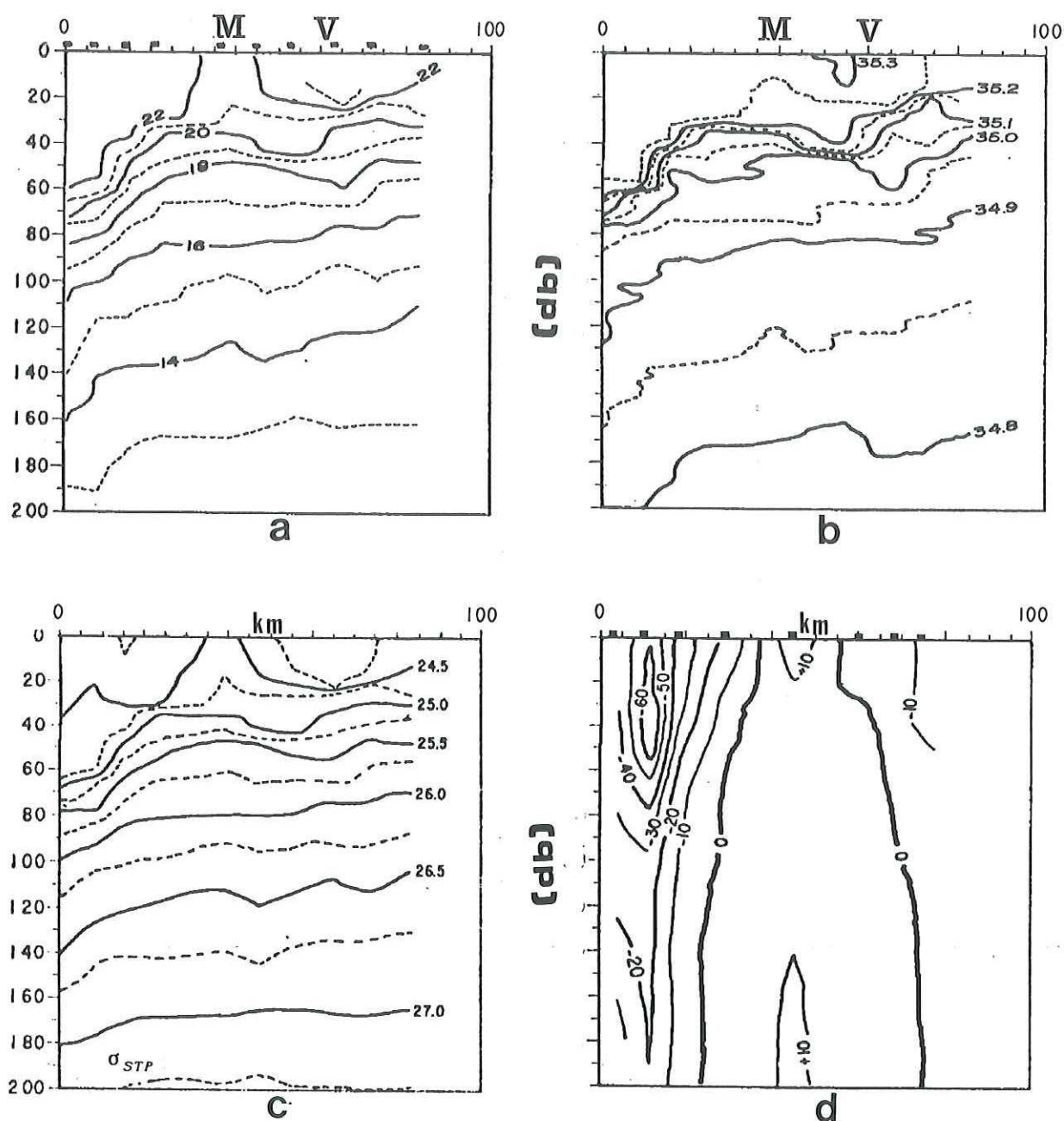


Figura 26.- Distribución vertical amplificada de la línea 6 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrófica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 172 a 182 de la figura 25. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el SE. La letra M representa una mancha fría, mientras que la V señala un corte de la estructura vórtice dipolo observado en las imágenes de la figura 22.

La línea 6 de 80 km de longitud fue realizada el día 15 de Noviembre utilizando 4 lances de XBT y 9 de CTD, 10 km afuera de Punta Concepción (ver figura 25). Las imágenes del 16 y 17 de Noviembre (figura 22) muestran dos estructuras en forma de hongo avanzando hacia el interior del Golfo a una velocidad de progresión de alrededor de 10 cm/seg (letras V y V1). Los cambios causados por la tormenta se observan como una capa superficial bien distribuida de temperaturas bajas, resaltando entre ellas eventos de surgencia en las Puntas de la Bahía de Guaymas e Isla Lobos y las formaciones de tipo vórtice.

La estructura que se seccionó es la marcada como V en la figuras 22, 25 y 26. La distribución de temperatura en la vertical muestra una capa mezclada cerca de la costa de Baja California (figura 25), posiblemente debida al evento de tormenta. Esta capa está acotada a una temperatura de 22.5 °C y salinidad de 35.25 ups, hasta los 60 db (figuras 26a y 26b). De aquí se observa que la temperatura decrece hacia el centro de la sección hasta un pequeño frente frío de 10 km de ancho (letra M de las figuras 22, 25 y 26a). La temperatura se incrementa nuevamente hacia el centro de la cuenca de Guaymas, donde las imágenes y los datos de temperatura superficial localizan el cuello del hongo. La velocidad geostrofica de la línea 6 indica que dos flujos tienen dirección SE (i.e. hacia afuera de la cuenca), uno cerca de la costa de Baja California (60 cm/s) y otro en el

cuello del hongo (10 cm/s); además de un flujo con dirección opuesta (10 cm/s) entre la capa mezclada y la mancha fría, marcada como M.

En resumen, en esta línea se han calculado flujos hacia el Sur del Golfo en la parte central y cerca de la costa de Baja California y un flujo contrario hacia el interior. El sentido de los flujos de la formación tipo hongo no resulta lógico, según lo que se esperaba (Shear y Kenyon, 1989); además, las componentes de velocidad fueron menores a las que regularmente están sujetas este tipo de estructuras, ya que se ha observado que esta clase de manifestaciones está asociada a liberación de valores energéticos altos, con flujos alrededor de 100 cm/s (Fedorov y Ginsburg, 1986).

La comparación de las líneas 5 y 6 muestran una evidente modificación de la capa superficial causada por el esfuerzo de viento. El día 15 la isoterma de los 22 °C y la isohalina de 35.25 ups descendían hasta los 60 m cerca de la costa, creando una profunda capa de mezcla, el cambio fue de 2 °C y .05 ups. El decremento de la temperatura hacia el centro de la cuenca, observado en la línea 5, quedó reducido a una angosta mancha fría, de 10 km de ancho (letra M de las figuras 22 y 26), sin embargo, tomando en cuenta que la líneas 5 y 6 están recorridas espacialmente (i.e la línea 6 empieza más cerca de la costa), los resultados muestran que el flujo de 40 cm/s de la línea 5 coincide con el flujo de esta misma magnitud y dirección de la línea 6. Esto es, los flujos de la línea 5 pudieron ser más

intensos en la cercanía de costa de Baja California, lo que sugiere una independencia de los flujos existentes con la intensificación producida por el evento de viento.

La existencia de flujos intensos hacia fuera de la cuenca, antes y después de la tormenta, es corroborada también por el movimiento de los flotadores 3, 4, 6 y 9, (figura 21) los cuales indican desplazamientos hacia fuera del Golfo, con tendencia a transitar cerca de la costa de Baja California, con velocidades de alrededor de 20 cm/s (flotadores 3, 6 y 9) y 85 cm/s (flotador 4).

III.4 Zona de surgencia.

Sobre el margen costero de Sonora, principalmente en las puntas, el efecto de los vientos NW produce regularmente eventos de surgencia que son observados mediante imágenes de satélite y podrían ser medidos utilizando datos directos. La figura 22 muestra este tipo de respuesta después del evento de tormenta de los días 13, 14 y 15 de Noviembre. La surgencia fue observada afuera de la Bahía de Guaymas (letra S de las figuras 22, 27 y 28) y muestreada con datos directos de 4 XBT y 8 CTD (línea 7, ver figura 27) en un trasecto con dirección Este a Oeste. En esta línea se observaron los valores extremos, medidos en la expedición: la distribución de temperatura en la vertical (figura 27 y 28a) desciende 3 °C en la superficie (en relación a la distribución del 13 de Noviembre, ver figuras 23 y 24); la

salinidad presenta valores superficiales de 35.1 ups (medidas entre 40 y 70 m en otras líneas); y la densidad con un máximo superficial de 25 (1025 kg/m^3 , figura 28c).

Las pendientes pronunciadas producidas por estos afloramientos son balanceados geostroficamente mediante un chorro superficial de alta velocidad (figura 28d) con una componente de Norte a Sur de 70 cm/s. El gradiente horizontal de la velocidad del angosto chorro (menos de 10 km) es de 40 cm/s/5 km. Por otro lado, el decaimiento en la vertical es lento (40 cm/s/140 m), con una disminuci3n de s3lo el 40% en los 100 db. El transporte de este chorro es de $\approx 0.5 \text{ Sv}$, hacia fuera de la Bahía de Guaymas, durante un tiempo de alrededor de una semana.

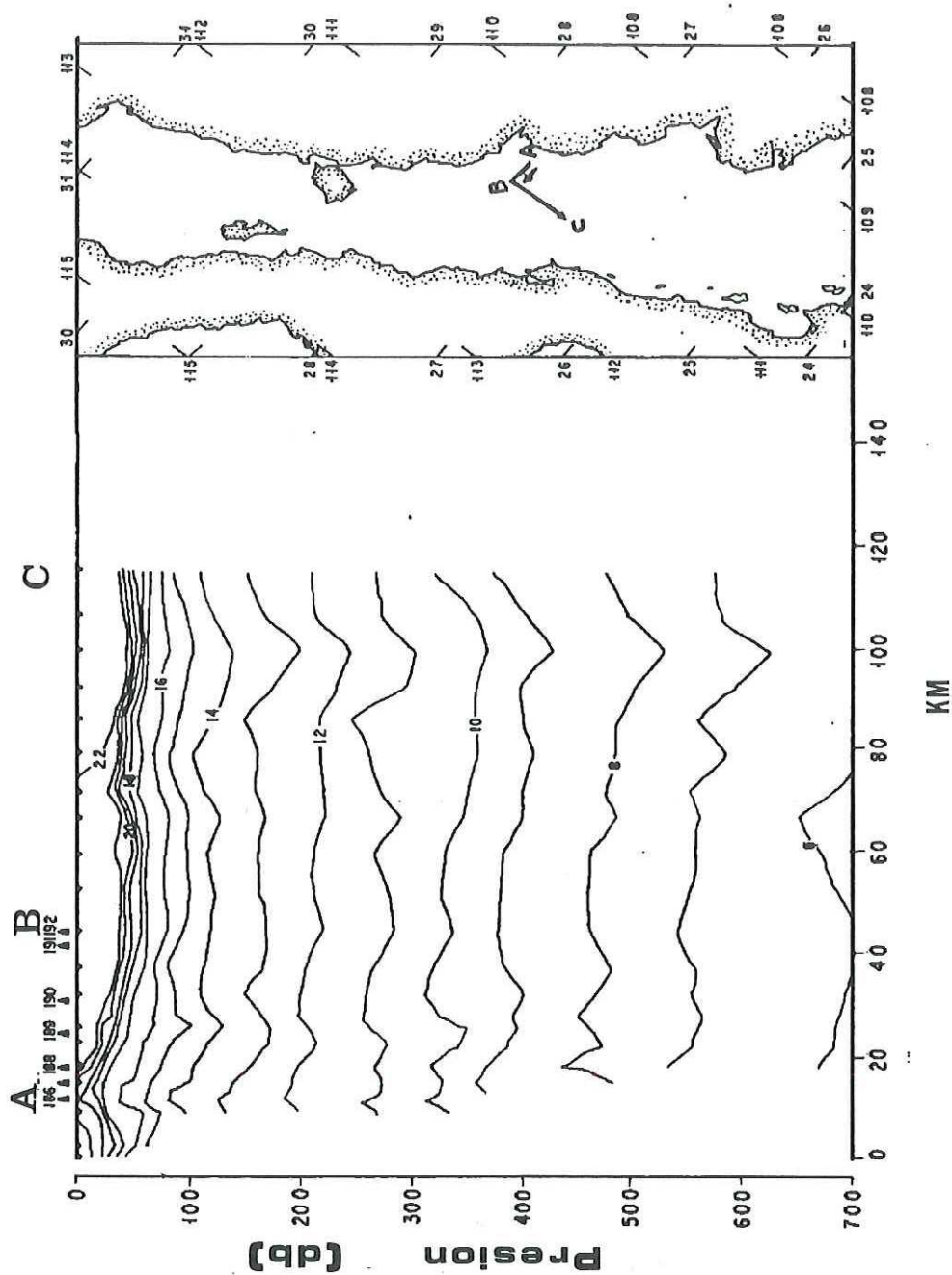


Figura 27.- Distribución vertical de temperatura para la línea 7, del 17 al 18 de Noviembre, con las estaciones de XBT 236 a 256 y los CTD 186 a 192. Las letras A, B y C representan el curso en que fueron realizadas las estaciones.

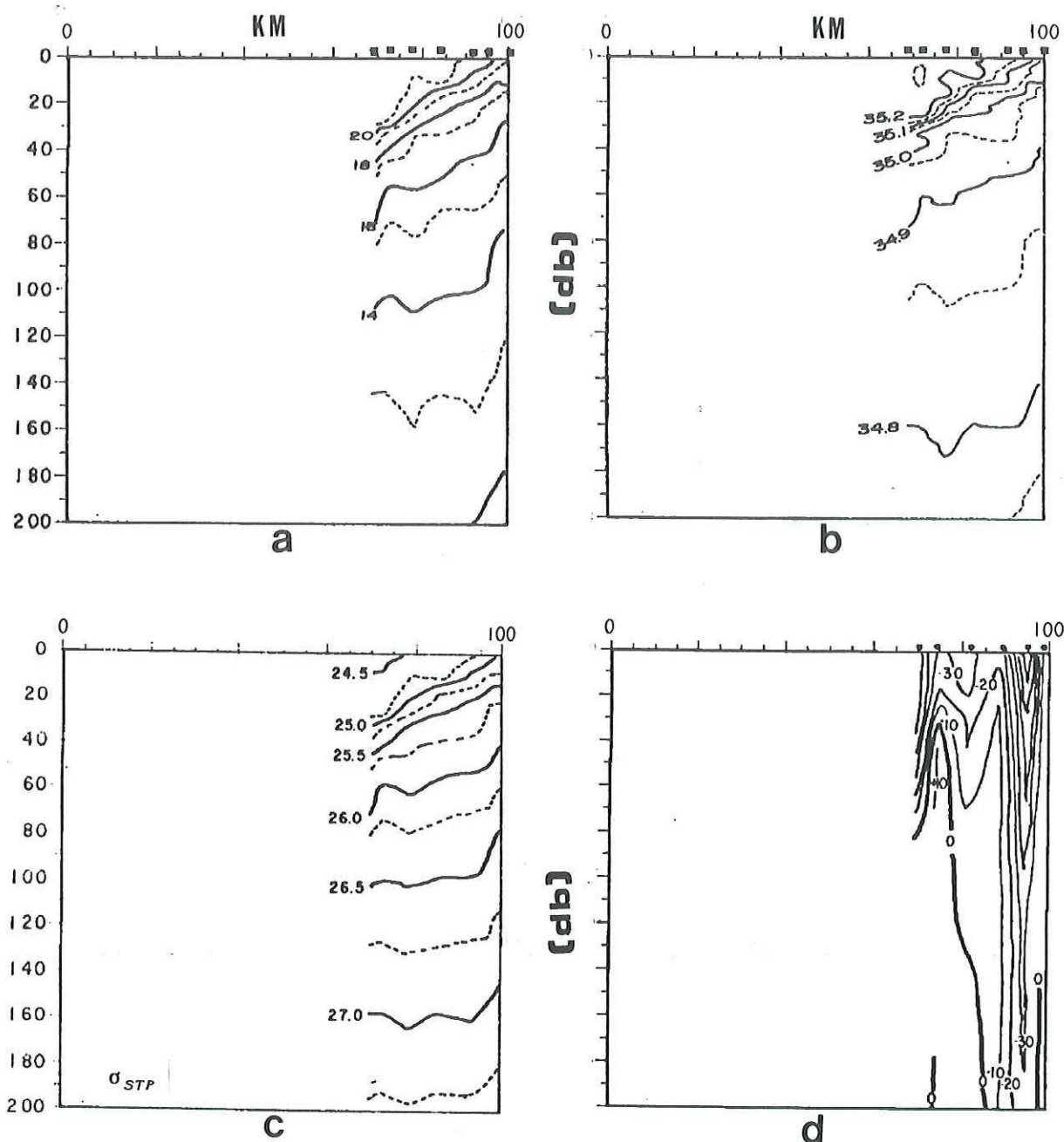


Figura 28.- Distribución vertical amplificada de la línea 7 a) temperatura, b) salinidad, c) densidad y d) velocidad geostrofica, en el nivel realtivo a los 500 db. La sección corresponde a los lances de CTD 186 a 192 de la figura 27. El signo negativo de la figura (d) representa velocidades hacia afuera del papel; que en este caso son hacia el Sur (velocidad máxima de 70 cm/s). Esta sección corresponde a el transecto A → B señalado en la figura anterior.

IV.- DISCUSION.

Las estructuras térmicas estudiadas durante la expedición representan la mayoría de las manifestaciones observadas, usualmente en las imágenes de satélite. La estructura mejor muestreada en este trabajo es el filamento que fue denominado como F (figura 10b). Las aguas que constituyen este filamento aparentemente se originan en la región del Sur del Canal de Ballenas; ésto se pudo apreciar siguiendo la evolución del frente S a través de las secciones S1, S2 y S3 (secuencia figuras 6, 9 y 10) hasta unirse al filamento F. Lo anterior se confirma también si se comparan las características hidrográficas del filamento con las de la Cuenca de Guaymas (Robles y Marinone, 1987) y las de la región del Canal de Ballenas (Robinson, 1973). El análisis muestra que las aguas del filamento, i.e, temperaturas $\approx 19^{\circ}\text{C}$ y salinidades ≈ 35.25 ups son de origen subsuperficial y pueden provenir de dicha región. Las aguas recién afloradas fueron advectadas horizontalmente a lo largo del frente térmico, bordenando la mancha de agua caliente afuera de Bahía Concepción, primero hacia la costa de Sonora y luego hacia el centro de la cuenca, formando el filamento F (ver figuras 9 y 10) con un recorrido de un par de cientos de kilómetros.

El patrón de circulación asociado al filamento debe tener un sistema de refluo capaz de manter la forma de la estructura. Este comportamiento es sugerido por los movimiento del flotador #3, colocado inicialmente al costado del filamento. El flotador presentó un desplazamiento (≈ 10 cm/s) en sentido contrario al

flujo principal del filamento F (figura 15); este tipo de circulación ha sido denominado flujos de retorno (Flament et al., 1985), y están asociados regularmente a los filamentos. Los flujos de retorno posiblemente actúen como una fuente de conservación de masa de tal forma que el filamento permanezca por mas tiempo en la zona.

Un sencillo ejercicio sobre la permanencia de una partícula, que viaje sobre el filamento (≈ 100 km) a una velocidad de 60 cm/s, muestra que la permanencia sería de 2 días. Por otro lado la permanencia de una estructura puede ser estimada como el tiempo de decaimiento de un movimiento geostrófico bajo la influencia de una capa de fricción (Pedlosky, 1984, p. 205) definido como:

$$\tau = f^{-1} \sqrt{Ev}$$

donde

$$Ev = 2(Av/fD^2)$$

es el número vertical de Ekman; Av es el coeficiente vertical de viscosidad turbulenta, f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin \phi$) y D la profundidad de influencia del filamento (en este caso igual a 200 m). Tomando $Av = 58 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (según Bowman et al., 1983) la ecuación da un valor de 2.4 días. Estas estimaciones indican que la estructura debería permanecer en la zona por menos tiempo del que se observa en las imágenes de satélite (alrededor de una semana), lo que sugiere que la estructura está tomando energía cinética o bien de una fuente (como podría ser la continua advección del frente S); o los alrededores (e.g., capas inferiores o los bordes del filamento, mediante los flujos de retorno).

Los posibles mecanismos para la generación de los filamentos parecen estar relacionados a las inestabilidades térmicas inducidas por las corrientes de marea en la región. Como ya fue mencionado, las corrientes a través de los estrechamientos rompen la estratificación provocando el frente denotado como S y la generación de un chorro geostrófico. Al evaluar la ecuación de viento térmico¹ en 10 lances de XBT de la línea 1, la magnitud de este chorro presentó un valor máximo de 55 cm/s, (sección transversal al frente, ver figura 12). Los valores de transporte son de $\approx 0.14 Sv$. de la región S1 a S3 (figura 6) en un ancho del frente de 50 km y 50 m de profundidad.

Por otro lado, a lo largo de la costa de Sonora, los vientos dominantes del NW, en invierno, generan un transporte hacia el centro de la cuenca de $\approx 0.5 Sv$. Cuando es evaluada la relación de transporte $Q = \rho_a / \rho C_D \omega^2 / f$ en 100 km de largo de costa; Q es el transporte, ρ_a / ρ es la razón de densidades ($\approx 10^{-3}$), C_D es el coeficiente de arrastre ($\approx 10^{-3}$), ω es la magnitud de viento (18 m/s, como máximo, ver figura 5) y f el parámetro de Coriolis ($\approx 7 \times 10^{-5}$). La afluencia persistente de aguas de la región S1 a S3 en conjunto con el transporte de Ekman hacia afuera de la costa de Sonora resulta un mecanismo que bien podrían iniciar la deflexión de los filamentos hacia el centro de la cuenca de Guaymas.

¹ Ecuación de viento térmico $V_{\theta 2} - V_{\theta 1} = g\alpha / f(dT/dx)$, V es el corte vertical de la velocidad, g es la gravedad, α el coeficiente de expansión térmica $\approx 10^{-4}$, f el parámetro de Coriolis $\approx 7 \times 10^{-5}$, dT la diferencia de la temperatura entre dos lances de XBT en una distancia dx (≈ 10 km).

En las estructuras analizadas resulta claro que la dinámica de la zona del sur del canal de Ballenas (frente S de la figura 6 y 7) produce flujos intensos hacia las costas de Sonora donde, o bien se desplazan siguiendo los bordes de la costa, o se curvan hacia aguas profundas siguiendo el borde de la frontera frío-caliente, como lo observado en el filamento F (figuras 6 y 14). El filamento evolucionó rápidamente en forma de una mancha fría, avanzando de Norte a Sur, en un rango de dos días (figura 9 y 10a). A partir del 2 de Noviembre la estructura alcanzó una forma bien definida, que se mantuvo por alrededor de una semana (figura 10b). En este estadio, los cálculos de velocidad, tanto geostrófica como Lagrangeana, revelaron magnitudes de 60 cm/s en dirección Norte a Sur (figura 14d y 15).

Los afloramientos de agua subsuperficial, ya sea por mezcla en la región de las islas o surgencias costeras, son evidencias necesarias para detectar la formación de filamentos, giros, o cualesquier estructura térmica, más no son suficientes, ya que pueden existir independientemente de las surgencias, que solo provee la diferencia de temperatura del agua superficial que permite detectarlos. Se han observado grandes giros subsuperficiales en el nivel abajo de los 500 db (Robles y Figueroa, 1986) que pueden generar manifestaciones superficiales como filamentos (Simpson et al., 1984; Koblinsky et al., 1984; Moores y Robinson, 1984).

La expedición logró examinar la distribución subsuperficial de temperatura, salinidad y densidad a través del filamento, así como la forma advectiva en que estos transportan agua fría y de menor salinidad a través del agua superficial, local y bien mezclada de la cuenca. La estructura del filamento no muestra la capa superficial bien mezclada, característica del agua local, se observa en cambio una fuerte estratificación, abajo del filamento, desde la superficie hasta profundidades entre 100 y 200 db, donde aún se observan la formación subsuperficial cóncava asociada a la estructura superficial. Esto sugiere y muestra que el filamento no es solo un chorro que se desarrolle en la superficie, sino que se extiende en la vertical, como se ve en la estructura de velocidad geostrófica de la figura 14d.

Otras posibles fuentes de energía necesarias para la generación de los filamentos y estructuras térmicas es el exceso de energía que entra a el Golfo por radiación solar. Ya ha sido demostrado que existe un desbalance positivo de esta cantidad de energía (Organista, 1987, Lavín y Organista, 1988, Marinone 1988, Bray, 1988b); es decir existe energía térmica disponible que bien puede ser transferida en energía cinética desarrollando flujos horizontales, o perturbaciones como giros y filamentos. Por otro lado en los estudios de otros autores, como el mostrado en éste trabajo, es claro que las manifestaciones evolucionan a partir de una perturbación inicial, dadas las interacciones de uno o más factores, e.g. corrientes en sentidos contrarios, meandros

costeros, formaciones vorticosas cerca de la costa, que en conjunto con las irregularidades de la topografía y los patrones de viento desarrollan estructuras como filamentos, giros y vórtices.

Se ha observado en los diferentes estudios sobre estas manifestaciones, y en éste en particular, que una vez formado el filamento, el balance de fuerzas se establece mediante el equilibrio geostrófico, en lapsos de tiempo del orden de días hasta varias semanas. En el caso del filamento F, el proceso desde su formación hasta desaparecer, es de un poco más de una semana. Con un rápido desarrollo en dos días, en donde las velocidades tanto geostróficas como lagrangeanas, son de igual magnitud, lo cual puede indicar el rápido establecimiento del balance geostrófico.

Los resultados mostraron que un evento de surgencia, causada por el viento, no es una evidencia suficiente para el desarrollo de un filamento. Como ya se indicó, la estructura interna del frente de surgencia de la línea 7 (figura 28) mostró aguas de muy baja temperatura (19°C) con salinidades (35.2 ups) que corresponden a profundidades abajo de 50 m en condiciones normales. El equilibrio geostrófico rápidamente establecido (alrededor de dos días) mostró un flujo con magnitud de 70 cm/s del cual no se encontró evidencia de la formación de un filamento o giro, en las imágenes de satélite.

Otra estructura analizada es la manifestación superficial llamada vórtice dipolo. Se logró captar esta formación tanto en

la estructura térmica superficial de los datos hidrográficos (figura 21), como en las imágenes de satélite del 16 y 17 de Noviembre (figura 22). Esta estructura tuvo en general un desplazamiento hacia dentro del Golfo. Sin embargo se observó un comportamiento anómalo en relación a lo reportado en la literatura (e.g. Fedorov y Ginsburg, 1987; Sheres y Kenyon, 1989). En el cuello de estas estructuras es común un patrón de velocidades, hacia la cabeza del hongo. En este caso esa dirección serían hacia el interior del Golfo (NW), lo cual fue totalmente contrario a nuestros resultados i.e. velocidades geostróficas pequeñas, del orden de 10 cm/s, en dirección SE. La hidrografía del vórtice V mostró diferencias radicales, a las observadas en las estructuras frías, con aguas templadas de ($>23^{\circ}\text{C}$), de mayor contenido de sal ($\approx 35.3\text{ups}$) y menor densidad ($\approx 1024\text{kgm}^{-3}$) que el agua circundante, es decir agua con características de mancha caliente o local. Ya se han descrito algunos aspectos hidrográficos distintivos de las manchas calientes, así como la frecuencia en que son observadas, e.g. afuera de Bahía Concepción (en forma de ovalo), o la que avanzó por los bordes de Sonora desde la Cuenca del Carmen (figuras 10 y 11). La mancha caliente observada en las imágenes del 16 y 17 de Noviembre no es distinta a las anteriormente descritas. En la figura 22a aparece difusa, aparentemente cubierta por la mezcla de agua superficial, causada por los vientos de la tormenta; al siguiente día (figura 22b) la mancha se observa con una muy bien definida frontera frío-caliente, que avanza hacia la Cuenca de Guaymas.

El vórtice V aparentemente se desprende del borde superior del frente formado entre la mancha caliente y las aguas frías, transportando por el cuello de éste agua local superficial y salina. Los resultados sugieren dos mecanismos que causan este comportamiento, aparentemente anómalo del vórtice. En primer lugar al cesar los vientos de la tormenta, el apilamiento de agua debe regresar a su condición normal, i.e. debe existir un transporte de agua en sentido contrario a la dirección del viento predominante de la tormenta, y en tal caso formar las estructuras observadas; en segundo lugar, aunque no se logró seccionar el frente, la trayectoria de los flotadores indica una circulación ciclónica alrededor de la frontera frío-caliente (figura 21), con rapidéz de hasta 80 cm/s. Si este flujo existe, y la frontera frío-caliente ya no se sostiene, debido a la relajación de los vientos (figura 5), es posible que se desarrolle una perturbación superficial (como el vórtice) que libere la energía contenida en el frente. Estas estructuras no son resueltas por el método geostrófico, y es ésta la posible razón por lo que las velocidades de la figura 26d fueron menores a las esperadas.

Tanto los filamentos como los giros fríos han sido observados en ambos bordes del Golfo, por lo que están distribuyendo agua con mayor contenido de nutrientes en un volúmen relativamente pequeño (comparado con el océano abierto). Esto homogeniza la capa arriba de los 100 m generando una zona altamente productiva. Aunque se ha observado que las estructuras son chorros angostos, la importancia de los filamentos y giros recide en el grado en

que éstos se repiten en el tiempo (aperiodicamente) y en las altas velocidades de los flujos. Los valores de transporte de un filamento (como el denominado F) puede llegar a un Sv, en escalas temporales del orden de una semana o más. Marinone y Ripa (1988) calcularon valores de transporte de magnitud similar en una sección transversal al eje del Golfo; es decir, 60 km más ancho que un filamento.

El método de radioboyas que fue utilizado no posee la suficiente resolución para el estudio de manifestaciones superficiales como los filamentos, giros y hongos, ya que no es posible seguir una grupo mayor de diez radioflotadores con las antenas manuales. El éxito de los resultados en nuestra expedición fue que se logró colocar (gracias a los datos directos e informes de NOSC) dos radioflotadores justo en el lugar de intenso flujo del filamento (figura 15) mostrando resultados iguales en los flujos geostroficados y lagrangeanos.

A mayor escala espacial, las boyas precisaron la tendencia de los flujos a transitar hacia la boca del Golfo cerca de las costas de Baja California (figuras 4 y 21), con velocidades que fluctuaron entre los 20 y 40 cm/s. En general, las radioboyas representan un magnífico complemento a los cálculos geostroficados, solo que es requisito contar con mayor cantidad de datos para tener una mejor base estadística.

Las estructuras han demostrado poseer grandes cantidades de energía de movimiento, además de estar muy involucrados en los

procesos de circulación de las Cuencas y en la dinámica general de la región. En este trabajo se pretendió establecer las características de las estructuras observadas, dado que solo fueron analizados un conjunto de datos de información conjunta; la dinámica y mecanismos de formación de las complejas formaciones como filamentos, giros y vórtices quedan para futuras investigaciones.

V.- CONCLUSION.

Las aguas que constituyen el filamento se originan y vienen de la región sur del Canal de Ballenas, y son de origen subsuperficial. La estructura interna mostró una estratificación desde la superficie hasta profundidades entre los 100 y 200 metros, sin capa de mezcla, exhibiendo que no se trata solo de un chorro superficial sino que se extiende en la vertical.

El campo de densidad mostró que las anomalías en temperatura son también anomalías en densidad con agua densa, fría y mínimos en salinidad.

La evolución del filamento se observó en dos estadios de desarrollo; uno impulsivo de dos días de duración, y otro de poco más de una semana, en aparente estado estacionario. La velocidad geostrófica y Lagrangeana del filamento mostró la misma magnitud (60 cm/s) y dirección (Norte a Sur) en un día de la fase estable.

Los flujos generados por el filamento y los giros de características frías fueron balanceados geostróficamente hasta el equilibrio, en lapsos de tres días a dos semanas. Los chorros y giros son eficientes mecanismos para la advección de agua y propiedades, transportando valores alrededor de 0.5 a 1 Sv, en angostas estructuras de 10 a 40 km de ancho.

Las manchas calientes superficiales (agua local) tienen una profundidad de entre 40 m, están bien mezcladas y tienen una

estructura interna en forma de domo invertido. El agua de estas manchas es caliente, salina y boyante, con respecto al agua de los filamentos y chorros fríos.

La estructura vórtice dipolo fue definida mediante los datos directos de XBT y CTD y las imágenes de satélite. Se observó que la estructura es radicalmente diferente a las manifestaciones frías, y su formación es probablemente el resultado de una inestabilidad superficial de altas velocidades, no resueltas por el método geostrófico. La hidrografía de esta estructura mostró que por el cuello del vórtice se transporta agua superficial, i.e. caliente, boyante y salina, con una velocidad geostrófica de alrededor de 10 cm/s.

El patrón general de corrientes superficiales descrito por las trayectorias de los radioflotadores, y por los cálculos geostróficos, mostró un corte horizontal de velocidad, de mayor magnitud cerca de las costas de Baja California, al parecer siguiendo la configuración de un gran frente entre las cuencas del Carmen y Guaymas, la tendencia fue a transitar hacia afuera del Golfo en dirección SE.

Los eventos de surgencia y los chorros geostróficos asociados, no fueron factores suficientes para la generación de estructuras en forma de filamento, giros u hongos. La formación y evolución de estas estructuras deben ser un conjunto de procesos que coinciden

tanto espacial como temporalmente. Es importante continuar el estudio de estas manifestaciones dada la importancia que han demostrado en la dinámica general de la región.

LITERATURA CITADA

- Alvarez-Borrego S. 1983. Gulf of California., Reprint from *Estuaries and Enclosed Seas*, edited by B.H. Ketchum., Elsevier Sci. Pub. Co. Amsterdam., Chapter 17., pp 427-449.
- Alvarez-Sánchez L.G., B. Wyatt., M.R. Stevenson. 1976. Corrientes en la región de la Boca del Golfo de California en la primavera de 1970. *Ciencias Marinas (Mex)*. Vol. 5(1). pp 105-118.
- Alvarez-Sánchez L.G., Badan-Dangon A., Robles-Pacheco J.M. 1984. Lagrangian observations of near-surface currents in Canal de Ballenas, CalCOFI Rep., 25, 35-42.
- Argote, M.L., A. Amador., C. Morales. 1985. Variación estacional de la estratificación en la región norte del Golfo de California. *Memorias Reunión Anual 1985, Unión Geofísica Mexicana*. 334-338.
- Atkinson, L.P., K.H. Brink, R.E. Davis, B. H. Jones, T. Paluszkiwicz, y D.W. Stuart. 1986. Mesoscale hydrographic variability in the vicinity of Point Conception and Arguello During April-May 1983: The OPUS 1983 experiment. *J. Geophys. Res.*, Vol 91, No C11, pp. 12,899-12,918.
- Badan-Dangon A., C.J. Kobinsky., T. Baumgartner. 1985. Spring and Summer in the Gulf of California observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta 1985*. Vol. 8. Nu. 1.
- Berstein, R.L., L. Breaker, and R. Whritner. 1977. California Current eddy formation: Ship, air, and satellite results, *Science*, 195, 353-359.
- Bowman M.J., S.M. Chriswell, P.L., Lapennasy R.A. Murtagh. 1983. Coastal upwelling, cyclogenesis and squid fishing near Cape Farewell, New Zealand. Editado en *Coastal Oceanography* por Herman G. Gade, A. Edwar y H. Svedsen. Nato Conference Series. Serie IV. Marine Sciences. Plenum press. NY. NY.
- Bray, N.A. 1988b. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. G. Res.* Vol. 93, 4993-5020.
- Bray, N.A., J.M. Robles. 1989. Physical Oceanography of the Gulf of California. to appear in: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias Memoir of the American Association of Petroleum Geologists*.
- Davis, R.E. 1984. Drifter Observations of Coastal Surface Currents During CODE: The Method and Descriptive View. Copyright 1985 by the American Geophysical Union. Paper number 4C1354.
- Davis, R.E. 1984. Drifter Observations of Coastal Surface Currents During The Statistical and Dynamical Views. Copyright 1985 by the American Geophysical Union. Paper number 4C1355.
- Dressler, R. 1981. Investigación sobre mareas y efectos de viento en el Golfo de California mediante un modelo hidrodinámico numérico. CICESE.
- Emilsson, I. y Alatorre, M.A. 1975. Investigaciones recientes sobre la circulación en la parte exterior del Golfo de California. En Ayala-Castañares, A., F.B. Phleger, R. Schwartzlose y A. Laruarda (Eds). Simposio "El Golfo de California". UNAM, México.
- Flament, P., L. Armi, L. Washburn. 1985. The evolving structure of a upwelling filament, *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 11765-11778.
- Fedorov, K.N., A.I. Ginsburg. 1986. Mushroom-Like current (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank. *Annales Geophys.*, 4, B, 5, 507-516.
- Figeroa M., J.M. Robles, B. Martínez. 1986. Giros geostroficos en el Golfo de California. *Memorias Reunión Anual 1986. Unión Geofísica Mexicana*.

- Ginsburg, A.I., K.N. Fedorov. 1984b. Mushroom-Like currents in the ocean (based on the analysis of satellite images). *Issled. Zemli i Kosmosa* (Earth Res., in Russian), 3, 18-26.
- Horstmann U. 1983. Distribution patterns of temperature and water colour in the Baltic Sea as recorded in satellite images: indicators for phytoplankton growth. *Ber. Inst. Meereskd.*, 1, 147.
- Huyer, A. 1983. Coastal Upwelling in the California Current System, *Progr. Oceanogr.*, 12, 259-283.
- Ikeda, M., y W.J. Emery. 1984. Satellite observations and modeling of meandres in the California Current system off Oregon and northern California, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1434-1450.
- Koblinsky, C.J., J.J. Simpson, y T.D. Dickey. 1984. An offshore eddy in the California Current System, II, Surface Manifestation, *Progr. Oceanogr.*, 13, 51-69.
- Korso, P.M., A. Huyer. 1986. CTD and velocity surveys of seaward jets off Northern California, July 1981 and 1982. *J. Geophys. Res.* Vol. 91, No. C6, pp. 7680-7690.
- Lavín Peregrina, M.A., S. Organista Sandoval. 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California. *J. G. Res.* Vol (93) C11. pp. 14,033-14,038.
- Lepley, L.K., Vander Haar, S.P., Hendrickson, J.R., Calderón-Riveroll, G. 1975. Circulation in the northern Gulf of California from orbital photographs and ship investigation. *C.M.* Vol 2 (2), UABC.
- Marinone, S.G. 1988. Una nota sobre la variabilidad no estacional de la región central del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 14(4): 117-134.
- Marinone, S.G., P. Ripa. 1988. Geostrophic flow in the Guaymas Basin, Central Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 8: 159-166.
- Marinone, S.G. y J. Ma. Robles. 1988. Hydrographic variability across the Guaymas Basin in the Gulf of California. Xth. Annual CIBCASIO Conference, August 22-23, 1985, SIO, University of California.
- Mooers, C., A.R. Robinson. 1984. Turbulent Jets and Eddies in the California Current and inferred cross-shore transport, *Science*, 223, 51-53.
- Murray, S.P., H.H. Roberts, W.J. Wiseman, Jr., H.G. Tornatore, and W.T. Whelan., 1975. An over-the-horizon radio direction-finders system for tracking coastal and shelf currents. *Geophys. Res. Lett.* 2(6): 211-214.
- Organista Sandoval, S., 1987. Flujos de calor en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE. 142p.
- Pedlosky J. 1984. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag New York Inc., pp. 624.
- Reinecker, M.M., C.N. K. Mooers, D.E. Hagan, y A.R. Robinson, M., 1985. A cool anomaly off northern California: An investigation using IR imagery and in situ data, *J. Geophys. Res.*, 90, 4807-4818.
- Robles J. Ma. y S.G. Marinone. 1987. Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Research*. Vol. 7. No. 7. pp. 715-733. Pergamon Journals Ltd.
- Robinson M.K. (1973). *Atlas of monthly mean surface and subsurface temperatures in the Gulf of California México*. San Diego Society and Natural History, memoir 5, 97 pp.
- Roden, G.I. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.* 12(1): 21-45.

- Rosas-Cota, J.A. 1976. Corrientes geostróficas en el Golfo de California en la superficie y a 200 metros. Tesis, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada B.C., 56 pp.
- Schwalb A., 1978. The Tiros-N/NOAA A-G Satelite Series NOAA. Technical Memorandum, NE55 95, 75 p.
- Sheres, D., K.E. Kenyon. 1989. A double vortex along the California coast Journal of Geophysical Res. Vol. 94, No. C4, pp. 4989-4997.
- Simpson, J.J., T.D. Dickey. y C.J. Koblinsky. 1984. An offshore eddy in the California Current System, I, Interior dynamics, Progr. Oceanogr., 13, 5-49.
- Thomson, R.E., y J.E. Papadakis. 1986. Upwelling filaments and motion of a satellite tracked drifter along the West Coast of North America. J. Geophys. Res., vol 92, No C6, pp. 6445-6461.
- Wiseman, W.J., S.P. Murray, y H.H. Roberts. 1977. High-Frequency techniques and over-the-horizon radar in coastal research. Geoscience and Man 18:229-238.
- Wyllie, J.G. 1966. Geostrophic flow of the California Current at the surface and at 200 m. Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest., Atlas 4, 13 pp., 288 chart, State Calif. Mar. Res. Comm., San Diego.