

Localización de frentes oceánicos por teledetección infrarroja.

El caso del Mar de Alborán

J. FONT, J. TINTORE y P. E. LA VIOLETTE

1. INTRODUCCION

La heterogeneidad del agua oceánica se manifiesta en diferencias de temperatura y salinidad que se traducen en diferencias de densidad. En el 90 % de los casos, la densidad oscila únicamente en el rango de 1.026 a 1.028 g/cm³. Estas diferencias, aparentemente tan sutiles, son suficientes para generar y mantener movimientos considerables en el seno de los océanos, y permitir caracterizar y distinguir masas de agua distintas.

Generalmente el contacto entre dos masas de agua diferentes no da lugar a una mezcla progresiva, con la consiguiente homogeneización, sino a la formación de una zona frontal. Se trata de una región donde, en una distancia relativamente corta, se pasa de unas características uniformes correspondientes a una masa de agua a la situación uniforme propia de la segunda masa. Existe pues un gradiente fuerte de una o varias propiedades físicas. Las plumas de agua dulce en la desembocadura de un río (fácilmente observables por diferencias de color) constituyen un ejemplo de zona frontal.

Cuando las zonas frontales se forman a mayor escala tienen unas implicaciones dinámicas muy importantes. Esto ocurre por ejemplo con los frentes de densidad del tipo talud/plataforma que se encuentran separando las aguas continentales de las de mar abierto (Fig.1). El gradiente horizontal de densidad es responsable de la aparición de una corriente (en equilibrio geostrófico) a lo largo del frente. En regiones como el Mediterráneo Noroccidental las características de la circulación general vienen impuestas por este tipo de corrientes ligadas a frentes (Bethoux et al., 1988; Font et al., 1987).

Sin embargo en zonas frontales existe también una circulación ageostrófica en la dirección perpendicular al frente. Esta circulación es más débil que la circulación a lo largo del frente y da lugar a la formación de zonas de convergencia y divergencia superficiales con los correspondientes movimientos verticales. Este tipo de movimientos tienen gran importancia biológica, ya que son responsables de un aumento de la fertilización de las aguas y de la distribución de biomasa (James, 1984; Boucher et al., 1987).

Por otro lado los frentes oceánicos presentan inestabilidades que pueden dar lugar a estructuras bien definidas (filamentos, remolinos) muy energéticas (Flament et al., 1985; Wang et al., 1988), con velocidades asociadas tanto verticales como horizontales muy superiores a las medias. Dichos fenómenos juegan un papel muy significativo en el intercambio de aguas entre la plataforma continental y mar abierto y en consecuencia influyen en campos de gran impacto social como los recursos marinos y la dispersión de contaminantes en zonas costeras. El estudio de la evolución de los frentes marinos es, por lo tanto, un tema de gran interés en oceanografía, así como también en meteorología, ya que la persistencia de zonas frontales influye fuertemente en el clima.

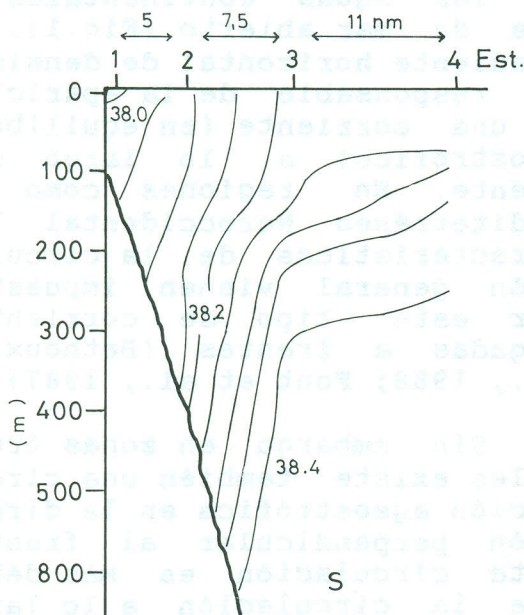


Fig.1 Distribución vertical de salinidad en una sección hacia el SE frente a Barcelona en marzo de 1985, mostrando una situación de tipo frontal entre las estaciones 2 y 3.

La variabilidad espacial y temporal de una zona frontal

hace muy difícil su descripción a partir de medidas *in situ*. La teledetección permite observar los frentes a gran escala y estudiar su estructura horizontal, compleja y variable. Cuando las diferencias de densidad tienen una componente térmica importante, las situaciones frontales pueden localizarse con relativa facilidad por medio de imágenes de satélite en la banda del infrarrojo térmico. También con imágenes de radar se están empezando a realizar estudios de frentes, captando la información sobre diferencias de rugosidad en la superficie causada por la distinta naturaleza de las aguas.

En el Mediterráneo el uso de termografías de los satélites de la serie NOAA en el estudio de la dinámica de frentes y fenómenos de mesoescala ha producido ya resultados muy interesantes (Philippe y Harang, 1982; Crépon et al., 1982; La Violette, 1984; Millot, 1985). En la actualidad la teledetección infrarroja es una herramienta esencial en el estudio de fenómenos frontales, no sólo como ayuda para una interpretación correcta de los análisis oceanográficos, sino incluso como interpretación previa que permite un adecuado diseño de las medidas de campo y las hace viables al delimitar la zona de estudio, tal como veremos en el presente trabajo.

2. CIRCULACION SUPERFICIAL EN EL MEDITERRANEO OCCIDENTAL

El Mediterráneo es una cubeta marina cuyas características hidrográficas están determinadas por su situación geográfica y el régimen climático a la que está sometida. En todas sus regiones y prácticamente durante todas las épocas del año, las pérdidas de agua por evaporación

superan a los aportes por precipitación, tanto la que cae directamente sobre el mar como la que es recogida por su cuenca hidrográfica. Ello hace que el Mediterráneo sea un mar deficitario en agua, lo que se llama una cubeta de concentración. Si se encontrara perfectamente aislado, sin posibilidad de intercambio de aguas con el Atlántico, se iría vaciando al ritmo de un metro por año (Lacombe, 1977).

El nivel del mar se mantiene gracias a la continua entrada de agua a través del estrecho de Gibraltar. En realidad lo que se produce es una entrada de agua atlántica en un volumen diez veces superior al necesario, compensada por la correspondiente salida de agua mediterránea. Ello es debido a que no sólo hay que conservar la masa total de agua mediterránea sino también su salinidad, superior a la que existe en el océano Atlántico. Como se trata de dos masas de agua de densidad distinta, el intercambio en la zona Gibraltar se produce en la forma de una entrada superficial de agua atlántica, por encima de los 150 m de profundidad, mientras que por debajo fluye el agua mediterránea en sentido contrario (ver por ejemplo Salat y Font, 1985).

La masa de agua atlántica con características claramente diferenciadas de las aguas de su entorno se ve sometida en el mar de Alborán a una dinámica que posibilita que no haya una mezcla inmediata, que aparezcan situaciones de tipo frontal, y que en consecuencia pueda seguirse por teledetección el movimiento y evolución de esta masa de agua. La Figura 2 es una perfecta ilustración de este seguimiento. Corresponde a una termografía obtenida por el

satélite NOAA-6 el 17 de Julio de 1980 y procesada en el Centre de la Météorologie Spatiale de Lannion (Francia). En ella se distingue la entrada de agua atlántica (blanca=fria) por el estrecho de Gibraltar, un primer giro anticiclónico situado en la región occidental del mar Alborán, un segundo giro menos marcado en la parte oriental y la formación de un frente hacia el este a lo largo de la costa argelina. También se distingue la progresiva inestabilización de dicho frente hasta originar grandes remolinos que llevan el agua atlántica hasta la región central del Mediterráneo Occidental. Todos estos son fenómenos que se han verificado mediante estudios de campo (Millet, 1985).

3. EL FRENTE ALMERIA-ORAN

En la zona próxima al cabo de Gata se produce una convergencia entre el agua atlántica, que a la salida del mar de Alborán se encuentra adosada a la costa española, y el agua mediterránea que fluye hacia el sudoeste siguiendo la circulación general de la región. Como consecuencia ambas masas de agua se desvían hacia el sudoeste formando un frente, tal como puede verse en la Fig.2. Este frente, que sigue aproximadamente la línea de Almería a Orán ha sido observado repetidamente en imágenes de satélite desde hace varios años.

Sin embargo, los estudios experimentales realizados en el mar de Alborán, casi nunca habían señalado la presencia del frente, probablemente como consecuencia de no haber efectuado un muestreo con la suficiente resolución horizontal. Tampoco los resultados obtenidos a partir de modelos numéricos

mostraban ningún frente en la zona. Hasta ahora no se había hecho nunca un estudio de campo detallado que permitiera confrontar los resultados de la teledetección con medidas in situ y obtener un conocimiento de las diversas características del frente, especialmente en lo que concierne a su estructura vertical. Aquí presentamos los resultados obtenidos en el primer estudio de este tipo que se ha llevado a cabo (Tintoré et al., 1988).

3.1 Localización por teledetección

A partir de un análisis exhaustivo de gran cantidad de imágenes NOAA obtenidas bajo situaciones estacionales distintas en diferentes años, se pudo comprobar el grado de persistencia del frente. Incluso teniendo en cuenta que, mientras el agua atlántica es siempre menos salada que la mediterránea, el gradiente térmico puede llegar a invertirse según las circunstancias. A pesar de ello las termografías siempre mostraron una discontinuidad clara en la misma zona, indicio evidente de una confluencia persistente de dos masas de agua distintas (Fig. 3 y 5).

En octubre de 1984, durante un vuelo del transbordador espacial Shuttle, se tomaron diversas fotografías de la región (Fisher, 1986; La Violette et al., 1987). Estas fotografías mostraron perfectamente, y con una resolución muy superior a las imágenes de satélite, la existencia de una transición brusca en la superficie del mar. Tanto por cambios en la textura como por la generación de remolinos por la fricción en la convergencia, así como por una discontinuidad en las estelas de los buques (Fig. 4). Superpo-

niendo el mosaico de las distintas fotografías que cubren la zona de discontinuidad con la imagen termográfica tomada por el satélite NOAA-7 en aquella misma fecha (8 Octubre), pero tres horas más tarde, se comprobó su perfecta coincidencia con el frente térmico repetidamente observado.

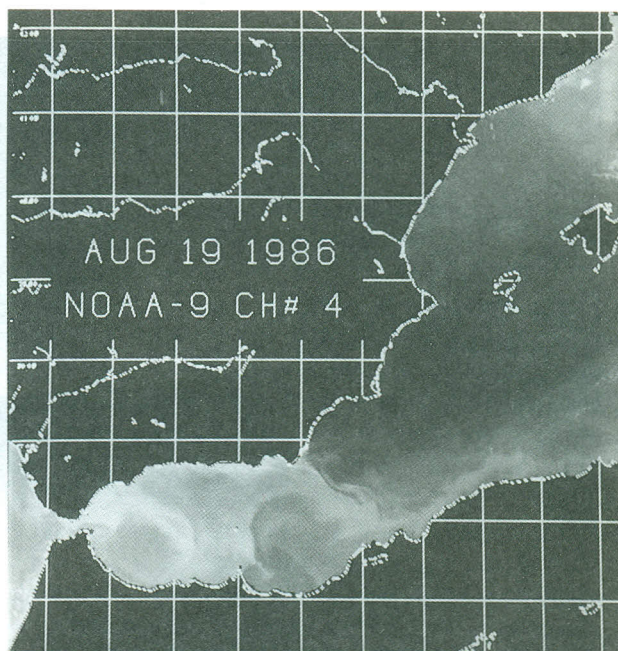
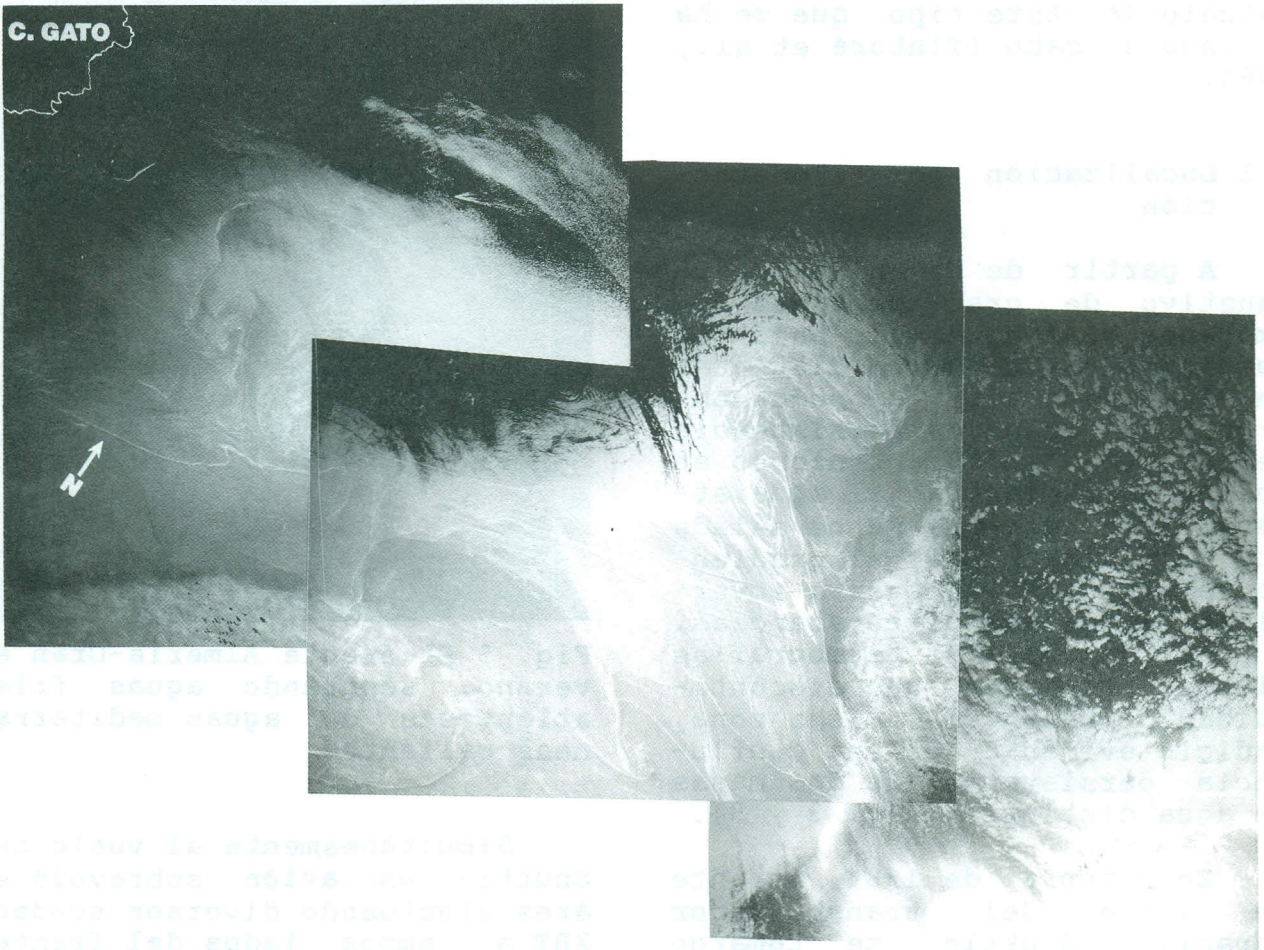


Fig. 3 El frente Almería-Orán en verano, separando aguas frías atlánticas de aguas mediterráneas calientes

Simultáneamente al vuelo del Shuttle un avión sobrevoló el área efectuando diversos sondeos XBT a ambos lados del frente. Se trata de pequeñas sondas desechables que, arrojadas desde el avión, se hunden en el mar mientras van transmitiendo a través de un fino cable conductor un perfil vertical de la temperatura. Se encontró que había una diferencia de hasta 2°C en la temperatura superficial y que la termoclina, límite inferior de la capa de mezcla superficial, estaba más hundida y debilitada en el lado occidental del frente.

C. GATO



Ver Foto color n.º 42 en página 376

Fig. 4 Composición de tres fotografías tomadas por el U.S. Shuttle el 8 de octubre de 1984. Siguiendo aproximadamente la diagonal puede distinguirse la discontinuidad en las características superficiales

3.2 Campaña oceanográfica TANO

Teniendo en cuenta la información precedente, se diseñó una campaña oceanográfica para medir directamente diversas variables fisico-químicas, tanto en superficie como en profundidad, en la región del frente. El recorrido del buque (Fig.5), y la situación de los puntos en los que se efectuarían sondeos verticales (Fig.6), se fijaron a partir de la localización del frente por teledetección.

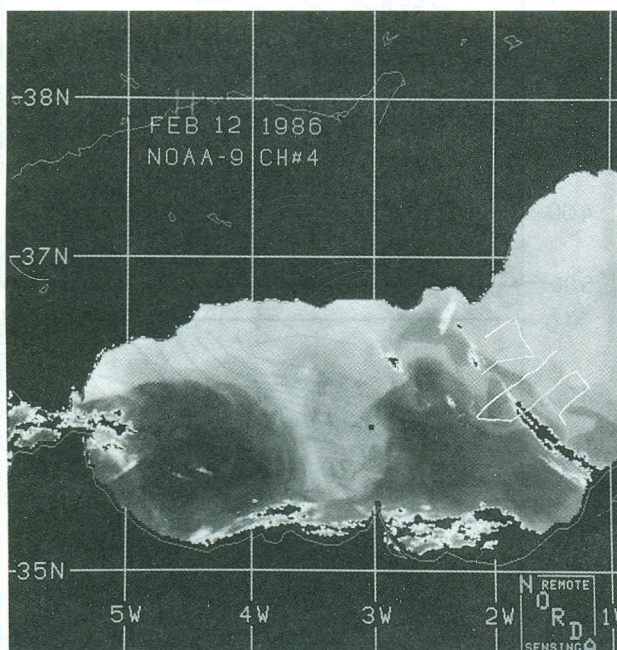


Fig. 5 El frente Almería-Orán en invierno y el recorrido efectuado por el buque durante la campaña TANO.

La campaña TANO se llevó a cabo entre el 11 y el 15 de Marzo de 1986 a bordo del buque oceanográfico García del Cid del CSIC. La estructura superficial se estudió mediante análisis, ininterrumpido a lo largo del recorrido, de temperatura, salinidad y concentración de iones nitrato. Todos ellos parámetros indicadores de las distintas masas de agua. En vertical se muestrearon en puntos fijos (esta-

ciones) 13 niveles distintos entre 0 y 500 m de profundidad. Además de las tres variables ya citadas se determinó en cada caso la concentración de oxígeno disuelto y de clorofila a.

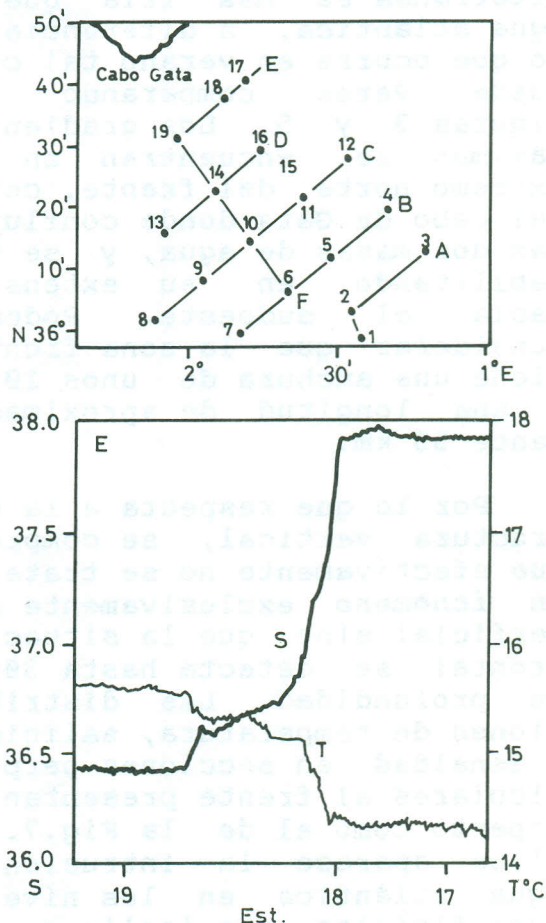


Fig. 6 Situación de las estaciones hidrográficas muestreadas durante la campaña TANO y distribución de los valores superficiales de temperatura y salinidad a lo largo de una radial

Los resultados de esta campaña se encuentran en el trabajo de Tintoré et al. (1988), pendiente de publicación. De ellos podemos destacar, en lo que se refiere al análisis superficial (Fig.6), que cada vez que se cruzó el frente se registró una variación brusca de la salinidad del orden del 1 por mil, llegando a diferencias del 1,5 en sólo 3-4 km. La temperatura mos-

tró diferencias de 1°C en las mismas distancias, teniendo en cuenta que la campaña se realizó durante la época de mayor enfriamiento superficial y que en estas circunstancias el agua mediterránea es más fría que el agua atlántica, a diferencia de lo que ocurre en verano tal como puede verse comparando las figuras 3 y 5. Los gradientes máximos se encuentran en el extremo norte del frente, cerca del cabo de Gata donde confluyen las dos masas de agua, y se van debilitando en su extensión hacia el sudoeste. Podemos considerar que la zona frontal tiene una anchura de unos 10 km y una longitud de aproximadamente 55 km .

Por lo que respecta a la estructura vertical, se comprobó que efectivamente no se trata de un fenómeno exclusivamente superficial sino que la situación frontal se detecta hasta 300 m de profundidad. Las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad en secciones perpendiculares al frente presentan un aspecto como el de la Fig.7. En ellas aparece la intrusión de agua atlántica en los niveles superficiales, con isolíneas inclinadas y acumuladas en la zona frontal. Los registros de las ecosondas del buque muestran una señal parecida, indicando una distribución de materia siguiendo las isopícnas. En la dirección paralela al frente se observa una gran homogeneidad, con isolíneas prácticamente horizontales.

Estos datos permiten hacer deducciones sobre la dinámica del sistema estudiado. El cálculo de la circulación geostrofica asociada a esta distribución de densidad indica una corriente muy intensa (de hasta 1 m/s) a lo largo del frente. La situación de convergencia super-

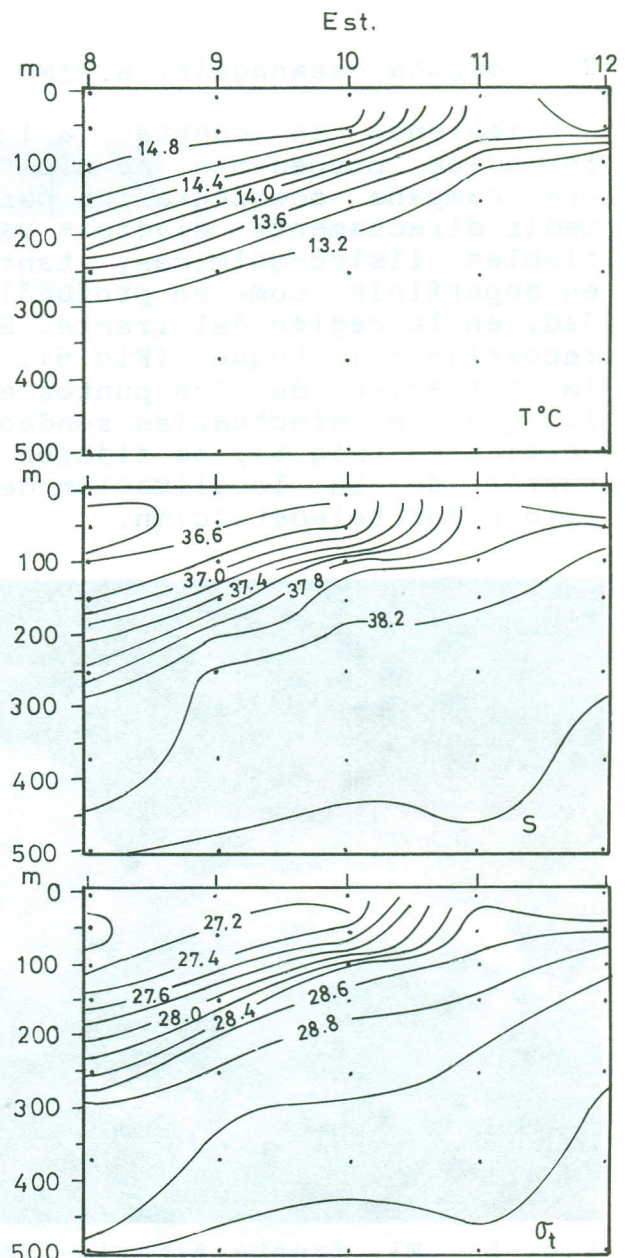


Fig. 7 Distribuciones verticales de temperatura, salinidad y densidad a lo largo de la radial C (ver situación en fig. 6). El frente aparece en superficie entre las estaciones 10 y 11

ficial implica la existencia de movimientos verticales importantes. Los valores superficiales de nitratos indican la presencia de aguas recientemente afloradas (movimiento ascendente) inmediatamente al oeste del frente. Las distribuciones verticales de oxígeno disuelto, clorofila y nitratos confirman también la

existencia de movimiento vertical, así como a lo largo de las isopícnas, tal como se reflejaba en los registros de ecosondas. La deriva observada del buque, en diagonal hacia el frente en ausencia de viento, corrobora asimismo la existencia de una componente ageostrofica de la velocidad en la dirección transversal. Todo ello concuerda con la dinámica de un frente de densidad, tal como se deduce de los distintos modelos de simulación que han examinado el caso, por ejemplo el de Wang (1984).

Se ha podido comprobar como, a partir de la información obtenida por teledetección, se puede programar con gran precisión un experimento en el mar que proporcione resultados hasta el momento nunca encontrados. Sólo el detalle en las medidas de campo ha permitido localizar y describir un fenómeno dinámico de gran importancia, que había pasado inadvertido en estudios anteriores. Se ha constatado una perfecta coincidencia entre la discontinuidad térmica repetidamente observada en las imágenes de satélite y un frente de densidad tridimensional generado por la confluencia de dos masas de agua notablemente distintas.

4. BIBLIOGRAFIA

- Bethoux, J.P., L.Prieur y J.H. Bong (1988) Le courant Ligure. Oceanol. Acta (en prensa)
- Boucher, J., F.Ibañez y L.Prieur (1987) Daily and seasonal variations in the spatial distribution of zooplankton populations in relation to the physical structure in the Ligurian Sea Front. J.Mar.Res., 45: 133-173
- Crépon, M., L.Wald y J.M.Monget (1982) Low frequency waves in the Ligurian Sea during December 1977. J.Geophys Res., 87(C1): 595-600
- Fisher, M.G. (1986) Oceanographic analysis of sun glint images taken on Space Shuttle Mission STS 41-G Master Thesis. U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, California
- Flament, P., L.Armi y L.Wafburn (1985) The evolving structure of an upwelling filament. J.Geophys. Res., 90(C6): 11765-11778
- Font, J., J.Salat y J.Tintoré (1987) Permanent features in the general circulation of the Catalan Sea. Oceanol. Acta (en prensa)
- James, I.D. (1984) A three dimensional numerical shelf-sea front model with variable eddy viscosity and diffusivity. Cont. Shelf Res., 3(1): 69-98
- La Violette, P.E. (1984) The advection of submesoscale thermal features in the Alboran Sea gyre. J.Phys.Oceanogr., 14: 550-565
- La Violette, P.E., C.S.Yentsch y J.R.Apel (1987) An oceanographer in space: the next step. EOS transactions, 68(9): 130-131
- Lacombe, H. (1977) The mesoscale and local scale response of the Mediterranean to the transfer and exchange of energy across the sea surface. En: Physics of oceans and atmosphere, ICTP, Trieste, 1(1): 211-278
- Millot, C. (1985) Some features of the Algerian current. J.Geophys.Res., 90(C4): 7169-7176
- Philippe, M. y L.Harang (1982) Surface temperature fronts in the Mediterranean Sea from infrared satellite imagery. En: Hydrodynamics of semi-enclosed seas. J.C.J.Nihoul Ed., Else-

vier, Amsterdam: 91-128

Salat, J. y J. Font (1985) Masses d'aigua i circulació a la Mediterrània. Quad.Ecol.Apl., 8; 61-98

Tintoré, J., P.E. La Violette, I. Bladé y A. Cruzado (1988) A study of an intense density front in the eastern Alboran sea: the Almeria-Oran front.

presentado a J.Phys. Oceanogr.

Wang, D.P. (1984) Mutual intrusions of a current and density front formation. J.Phys. Oceanogr., 7: 1191-1199

Wang, D.P., M. Vieira, J. Salat y J. Tintoré (1988) A shelf/slope filament off Northeast Spanish coast. J.Mar.Res. (en prensa)