

CONDICIONES DE SURGENCIA ASOCIADAS A LA DISTRIBUCION DE ZOOPLANCTON EN SAN HIPOLITO, B.C.S.

UPWELLING CONDITIONS ASSOCIATED TO THE DISTRIBUTION OF ZOOPLANKTON IN SAN HIPOLITO, B.C.S.

Rafael Cervantes-Duarte^{1*}
Sergio Aguiñiga-García^{1*}
Sergio Hernández-Trujillo^{2*}

¹ Departamento de Oceanología

² Departamento de Plancton

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas

Apartado Postal 592

La Paz, B.C.S., México

Recibido en febrero de 1992; aceptado en abril de 1992

RESUMEN

Del 22 al 24 de junio de 1989, se tomaron datos de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nitratos, fosfatos (a profundidades entre 0 y 300 m), velocidad y dirección del viento, en una red de 35 estaciones hidrográficas en la costa del Pacífico frente a Bahía San Hipólito, B.C.S. Asimismo, se determinó la biomasa de zooplancton y se analizó la comunidad de copépodos estimando su abundancia y diversidad. El registro promedio de dirección y velocidad del viento fue de 309°NO y 6.7 m s⁻¹, respectivamente. El coeficiente de correlación entre sigma-t y la concentración de NO₃⁻¹ en el intervalo de densidad de 25.0 a 26.0 fue 0.67 (r, con 95% de confianza). En general, las mayores concentraciones de biomasa zooplanctónica se encontraron en las estaciones costeras más frías. Se identificaron 33 especies de copépodos, entre las cuales predominó *Calanus pacificus* (91%) y en menor abundancia *Pleuromamma abdominalis* (6.2%) y *Calanus minor* (0.7). La taxocenosis de copépodos presentó, en conjunto, dominio de fauna de transición, con especies de origen templado-tropical. Con base en la velocidad del viento y la distribución de nitratos, se estimó que se transportan hacia la zona eufótica 80 milimoles de NO₃⁻¹m⁻² d⁻¹, que equivalen a una producción nueva de aproximadamente 6.4 g C m⁻² d⁻¹. Esta se considera alta en comparación con otras zonas de surgencia y aparentemente mantiene altas biomásas de zooplancton en las estaciones más cercanas a la costa.

ABSTRACT

From June 22 to 24, 1989, temperature, salinity, dissolved oxygen, nitrate, phosphate (0 to 300 m depth), wind speed and direction were measured in a grid of 35 hydrographic stations in the coastal Pacific off Bahía San Hipólito, B.C.S. Zooplankton biomass, abundance and diversity of the copepod community were also determined. The average wind direction and speed were 309° NW and 6.7 m s⁻¹, respectively. The correlation coefficient between sigma-t and NO₃⁻¹ in the 25.0 to 26.0 density range was 0.67 (r, 95% confidence level). In general, high concentrations of zooplankton biomass were found at the coolest coastal stations. Thirty-three species of copepod were identified, dominated by *Calanus pacificus* (91%) and, in lesser abundance, by *Pleuromamma*

*Becarios de la COFAA, IPN.

abdominalis (6.2%) and *Calanus minor* (0.7). A taxonomic analysis of the composition of copepods indicated a predominantly transitional fauna with some species of temperate-tropical origin. Using wind velocity and nitrate distribution, we estimate that 80 millimoles of $\text{NO}_3^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ are transported into the euphotic zone, which is equivalent to a new production of approximately $6.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. This value is considered high in comparison to other upwelling areas and apparently maintains high zooplankton biomass at inshore stations.

INTRODUCCION

La surgencia es el movimiento ascendente de agua subsuperficial transportada hacia la superficie, en dirección opuesta a la costa, por un flujo superficial horizontal (Barber y Smith, 1981). Esta actividad produce anomalías horizontales en la distribución de propiedades físicas (v.g. temperatura, salinidad) y químicas (v.g. oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, fosfatos) que normalmente tienen marcados gradientes verticales (Torres-Moye y Acosta-Ruiz, 1986).

Las zonas de surgencia costera, a menudo localizadas en un radio de 50 km de la costa (Cushing, 1975), llevan nutrientes *new* (NO_3^{-1}) hacia la capa de mezcla que promueven los florecimientos y la disponibilidad de material orgánico, lo cual propicia la congregación de organismos consumidores secundarios y terciarios. Las surgencias son eventos transitorios en los que, además de establecerse interesantes relaciones ecológicas, se obtiene la mitad de la pesca mundial, aun cuando sólo comprenden el 0.1% del área de la superficie del océano (Cushing, 1969).

De acuerdo con Walsh *et al.* (1977) las regiones de surgencia costera están caracterizadas al menos por tres escalas de tiempo: estacional, semanal y diaria. El periodo de surgencias a escala estacional (época de inicio de surgencias) puede producir cambios importantes en la región (v.g. Oregon y Portugal) o pequeñas variaciones en un ciclo anual (v.g. Perú). En Baja California las surgencias son estacionales, con fuerte actividad en marzo y/o abril (Walsh *et al.*, 1974), de acuerdo con el ciclo estacional del transporte de Ekman; todo el año hay algún grado de surgencia, aunque con mayor intensidad de marzo a junio (Bakun y Nelson, 1975).

Husby y Nelson (1982) encontraron que, al sur de los 30°N en la Corriente de California, se desarrolla un patrón de producción de turbulencias en dos distintas épocas del año: una de mayo a junio, acorde con los vientos

INTRODUCTION

Upwelling is the movement of subsurface water rising toward the surface and transported away from the coast by a horizontal surface flow (Barber and Smith, 1981). Upwellings produce horizontal anomalies in the distribution of physical (e.g. temperature, salinity) and chemical (e.g. dissolved oxygen, pH, alkalinity, phosphates) properties that normally have marked vertical gradients (Torres-Moye and Acosta-Ruiz, 1986).

Regions of coastal upwelling, often located within a radius of 50 km from the coast (Cushing, 1975), carry *new* nutrients (NO_3^{-1}) towards the mixed layer that propitiate blooms and the availability of organic matter, which favours the assemblage of secondary and third consumer organisms. Upwellings are transient events which, in addition to producing interesting ecological relations, provide half of the world fishery, even though they comprise only 0.1% of the ocean surface area (Cushing, 1969).

According to Walsh *et al.* (1977), coastal upwelling regions are characterized by at least three time scales: seasonal, weekly and daily. The periods of upwelling on a seasonal scale (onset of upwelling) produce important changes in some regions (e.g. Oregon and Portugal), whereas in others (e.g. Peru) the variation within an annual cycle is relatively small. In Baja California, upwellings are seasonal, with strong activity in March and/or April (Walsh *et al.*, 1974), according to the seasonal cycle of the Ekman transport; upwelling occurs to some degree throughout the year, though with greater intensity from March to June (Bakun and Nelson, 1975).

Husby and Nelson (1982) found that south of 30°N, a pattern of turbulence occurs in the California Current twice a year: in May and June, due to northerly surface winds that favour upwelling, and in autumn due to the occurrence of tropical storms, with relatively strong thermal stratification from August to

superficiales provenientes del norte que favorecen las surgencias, y otra en otoño, debida a la ocurrencia de tormentas tropicales, con una estratificación térmica relativamente fuerte de agosto a noviembre. Durante noviembre, diciembre y enero las surgencias disminuyen su intensidad por el debilitamiento de los vientos, lo que provoca que la Corriente Superficial de Davidson fluya hacia el norte a lo largo de la costa oeste de América del Norte desde Cabo San Lucas, B.C.S., hasta al menos el Río Columbia, frente a las costas de Oregon y Washington (Sverdrup *et al.*, 1942).

Durante febrero y marzo los vientos del norte, al intensificarse, disipan la Corriente de Davidson y reaparece la Corriente de California fluyendo hacia el sur a lo largo de la costa, con manchas de surgencia que se inician detrás de los cabos y sobresalen por fuera de la corriente (Reid *et al.*, 1958; LaFond y LaFond, 1971). Las poblaciones que habitan áreas donde las surgencias ocurren estacionalmente parecen estar adaptadas y estructuradas para resistir fluctuaciones en la disponibilidad de alimento (Whitledge, 1981). Por ejemplo, en Baja California la langostilla, *Pleuroncodes planipes*, es probablemente el herbívoro dominante durante la estación de surgencias (Walsh *et al.*, 1977), y durante la estación de relajamiento de surgencias cambia su estrategia de alimentación de pelágica a bentónica, alimentándose principalmente de *detritus* del fondo (Boyd, 1962).

En la escala de tiempo de días, el relajamiento de las surgencias se produce por intermitencia del campo de viento en periodos mayores que días pero menores que meses. En Baja California los periodos de surgencia se presentan típicamente en intervalos de una a tres semanas (Walsh *et al.*, 1977). Esta intermitencia se refleja en un flujo opuesto de la corriente, el cual puede tener efectos profundos en la dinámica de la cadena alimenticia de estos ecosistemas. Por ejemplo, durante el periodo de surgencias débiles o posibles hundimientos, la respuesta biológica del ecosistema cambia el dominio del fitoplancton (de diatomeas a dinoflagelados y flagelados), lo que provoca una reducción de biomasa y productividad, asociada con agua cálida baja en nutrientes y clorofila (Walsh *et al.*, 1977). En la escala diaria el periodo de luz, el campo de viento, las mareas y las ondas internas son responsables en gran medida de los cambios de la productividad orgánica primaria.

November. During November, December and January, the intensity of upwelling decreases as a result of relaxation of the winds, and the Davidson Current flows northward along the west coast of North America from Cabo San Lucas, B.C.S., to at least the Columbia River off the coasts of Oregon and Washington (Sverdrup *et al.*, 1942).

As the northerly winds intensify in February and March, the Davidson Current dissipates and the California Current reappears flowing southward along the coast, with pockets of upwelling beginning behind prominent capes jutting out into the stream (Reid *et al.*, 1958; LaFond and LaFond, 1971). The populations found in areas where upwellings occur seasonally seem to be adapted and structured to withstand variations in the availability of food (Whitledge, 1981). For example, in Baja California the red crab, *Pleuroncodes planipes*, is probably the dominant herbivore during the upwelling season (Walsh *et al.*, 1977), and during the upwelling relaxation season changes its feeding strategy from pelagic to benthic, mainly feeding on bottom detritus (Boyd, 1962).

On a time scale of days, relaxation of upwelling is produced by intermittency in the wind field at periods longer than days but shorter than months. In Baja California, periods of upwelling typically occur for intervals of 1-3 weeks (Walsh *et al.*, 1977). This intermittency is reflected in a reversal of the flow of the current, and may have profound effects on the food chain dynamics of these ecosystems. For example, during the period of weak upwelling or possible downwelling, the biological response of the ecosystem shifts the dominance of the phytoplankton (from diatoms to dinoflagellates and flagellates), resulting in a reduction in biomass and productivity, associated with warm water low in nutrients and chlorophyll (Walsh *et al.*, 1977). On a daily scale, the period of light, wind field, tides and internal waves are largely responsible for the changes in primary organic production.

The aim of this work is to describe the hydrographic conditions associated to biological variables such as abundance and distribution of zooplankton biomass, with emphasis on the structure of the taxocenosis of copepods. The results are analysed and compared with previously recorded upwelling events in the area (Walsh *et al.*, 1974, 1977).

El presente trabajo tiene como propósito describir las condiciones hidrográficas asociadas a variables biológicas como la abundancia y distribución de biomasa zooplanctónica, con énfasis en la estructura de la taxocenosis de copépodos. Los resultados son analizados y comparados con las condiciones oceanográficas de surgencia registradas previamente en la localidad (Walsh *et al.*, 1974, 1977).

MATERIALES Y METODOS

El estudio se efectuó a bordo del buque oceanográfico *El Puma*, del 22 al 24 de junio de 1989, en el área costera de Bahía San Hipólito, B.C.S., México, entre los 26°58' y 26°23' de latitud norte, y 113°42' y 114°31' de longitud oeste (Fig. 1). Se cubrió una red de 35 estaciones hidrográficas separadas 9.3 km (5 millas marinas), divididas en cinco transectos (390, 395, 400, 405 y 410 en sentido latitudinal) a profundidades estándar de 0, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200 y 300 m (de acuerdo con la batimetría de la estación).

Los registros de dirección y velocidad del viento se obtuvieron en cada estación de muestreo directamente de los reportes meteorológicos del barco. Los cálculos de transporte y profundidad de la capa de Ekman se efectuaron de acuerdo con la metodología propuesta por Pond y Pickard (1978), y la estimación del ascenso de las aguas de surgencia, según Yoshida (1955).

Las variables hidrológicas determinadas fueron: temperatura, con termómetros reversibles; salinidad, por conductividad electrolítica (Brown y Hamon, 1961); oxígeno disuelto, nitratos y fosfatos, de acuerdo con los métodos indicados por Strickland y Parsons (1972).

Las recolecciones de zooplancton se hicieron mediante el arrastre oblicuo de una red gemela tipo bongo de 0.6 m de diámetro y mangas de 3.5 m con mallas de 500 y 333 μm , con flujómetros digitales en la boca. La obtención, preservación y análisis de la biomasa zooplanctónica se realizaron de acuerdo con Smith y Richardson (1977). La identificación de los copépodos, así como la determinación de su distribución y abundancia, se llevó a cabo según lo informado por Hernández-Trujillo (1987, 1989), con los organismos capturados en la malla de 505 μm .

MATERIAL AND METHODS

The study was conducted on board the R/V *El Puma* from 22 to 24 June, 1989, in the coastal area off Bahía San Hipólito, Baja California Sur, Mexico, between 26°58'-26°23' N and 113°42'-114°31' W (Fig. 1). A grid of 35 hydrographic stations was covered, spaced 9.3 km (5 nautical miles) apart, divided into five transects (390, 395, 400, 405 and 410 in a latitudinal direction) at standard depths of 0, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200 and 300 m (according to the bathymetry of the station).

Wind direction and speed were obtained at each station directly from the meteorological reports of the vessel. Transport and depth of the Ekman layer were calculated according to Pond and Pickard (1978), and upwelling velocity was estimated according to Yoshida (1955).

The hydrological variables determined were: temperature, with reversing thermometers; salinity, by electrolytic conductivity (Brown and Hamon, 1961); dissolved oxygen, nitrates and phosphates, according to Strickland and Parsons (1972).

Zooplankton samples were obtained from oblique hauls with a bongo net having 0.6 m diameter, 3.5 m length and 500 and 333 μm meshes, equipped with digital flowmeters at the mouth. The collection, preservation and analysis of the zooplankton biomass were made in accordance with Smith and Richardson (1977). Copepods, obtained using a 505 μm mesh, were identified and their distribution and abundance determined according to Hernández-Trujillo (1987, 1989).

RESULTS AND DISCUSSION

Wind direction was predominantly W-NW and speed ranged from 2 to 15 m s^{-1} (Fig. 2). On average, wind direction and speed in the study area were 309°NW and 6.7 m s^{-1} , respectively. Considering that the surface wind stress and associated upwelling velocity vary as the square of wind velocity (Yoshida, 1955), and using average wind direction and speed data, an upwelling velocity of 5.3 m d^{-1} was estimated for the study period. Values of 10 m d^{-1} and 21.6 m d^{-1} have been determined for March 1972 and April 1973, respec-

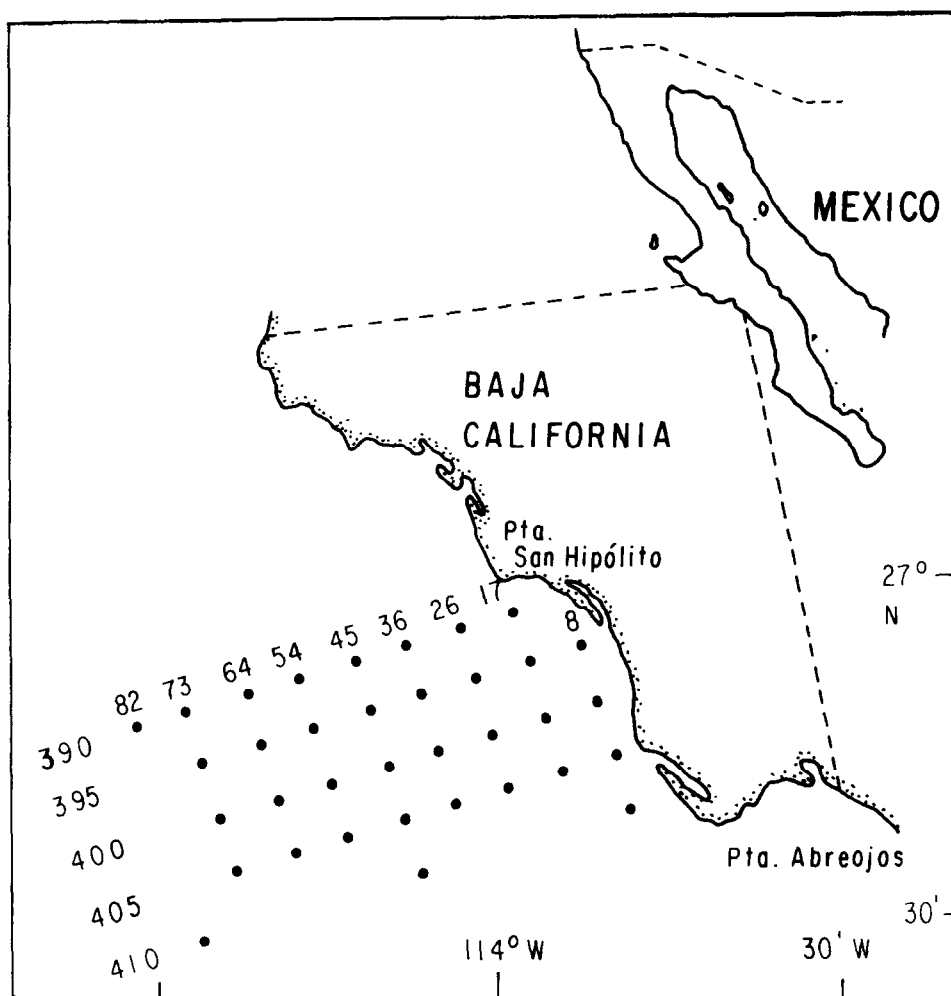


Figura 1. Área de estudio. El número de las estaciones en sentido este-oeste representa la distancia de la costa, en kilómetros.

Figure 1. Study area. The E-W number of the stations represents the distance, in kilometres, from the coast.

RESULTADOS Y DISCUSION

La dirección del viento fue predominantemente oeste-noroeste y el intervalo de velocidad estuvo entre 2 y 15 m s^{-1} (Fig. 2). En promedio, la dirección y velocidad del viento en el área de estudio fueron 309°NO y 6.7 m s^{-1} , respectivamente. Considerando que la variación del esfuerzo del viento superficial y la velocidad de surgencia asociada varían con el cuadrado de la velocidad del viento

tivamente, under conditions of steady northerly winds (Walsh *et al.*, 1974, 1977). According to Walsh *et al.* (1977), an upwelling velocity of 10 m d^{-1} may be an appropriate estimate for the March 1972 and April 1973 upwelling states, so during this study period upwelling velocity was approximately half.

A T-S diagram was plotted to characterize the water masses in the study area (Fig. 3). California Current water (with temperature and salinity lower than 20°C and 34°oo ,

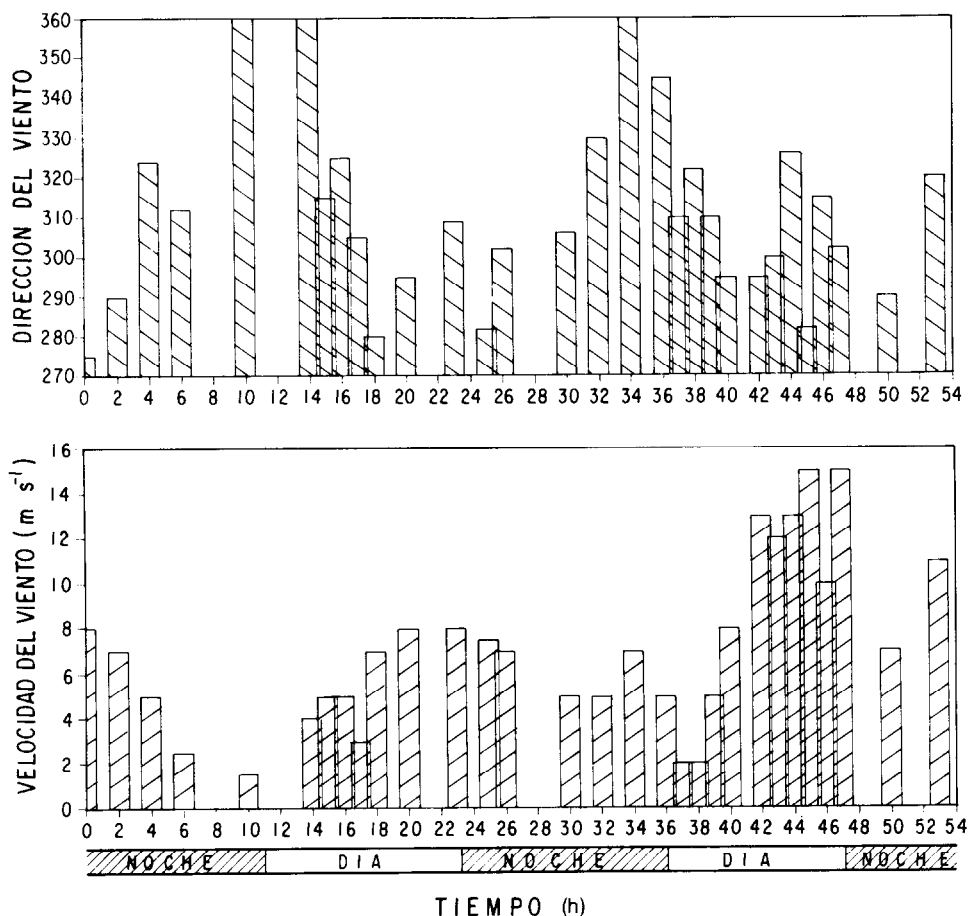


Figura 2. Registros de dirección y velocidad del viento medidos en el área de estudio.
Figure 2. Wind direction and speed recorded in the study area.

(Yoshida, 1955), y utilizando los datos de dirección y velocidad promedio del viento, se estimó que la velocidad de ascenso de la surgencia en el periodo de estudio fue de 5.3 m d^{-1} . Los valores determinados en marzo de 1972 y abril de 1973 fueron 10 m d^{-1} y 21.6 m d^{-1} , respectivamente, bajo condiciones constantes de viento del norte (Walsh *et al.*, 1974, 1977). De acuerdo con Walsh *et al.* (1977), una velocidad de ascenso de 10 m d^{-1} se estima como apropiada para los estados de surgencia de marzo de 1972 y abril de 1973, por lo que durante el periodo de estudio la velocidad de ascenso resultó de aproximadamente la mitad.

respectively) was recorded at the northernmost stations. Most of the records corresponded to California Current water modified by lateral mixing (Tibby, 1941) and, to a lesser extent, to subtropical subsurface water.

Studies carried out in mid-March 1972 off Punta San Hipólito indicate that the source of upwelled water is California Current water (Walsh *et al.*, 1974), whereas in June and July the source of upwelled water is apparently from the 100-200 m depth of subtropical subsurface water (or equatorial water as defined by Longhurst, 1967). Salinity and temperature in the nucleus of the California Current off Baja California are typically

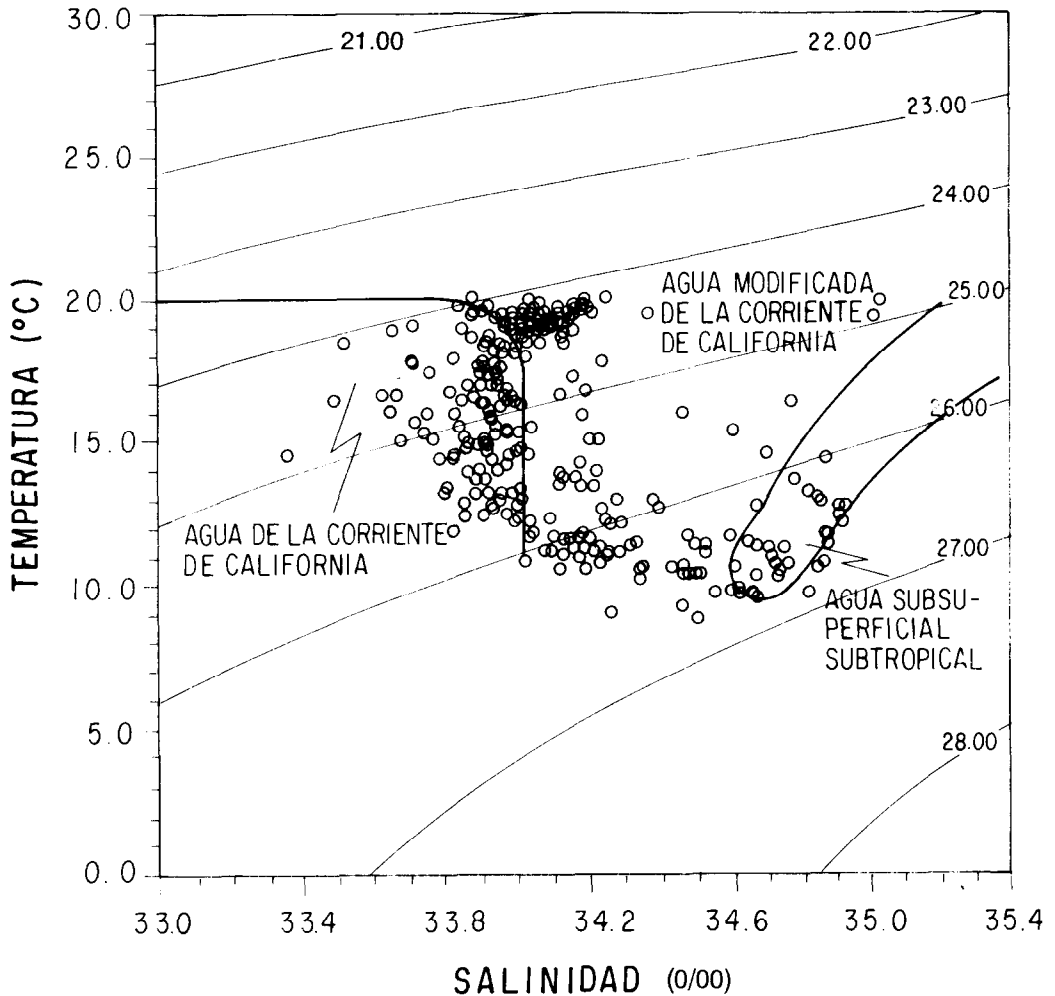


Figura 3. Diagrama T-S de 0-300 m (modificado de la Fig. IV-3 de Baumgartner, 1987).
Figure 3. T-S diagram for 0-300 m (modified from Fig. IV-3 in Baumgartner, 1987).

Para caracterizar las masas de agua en el área de estudio se realizó un diagrama T-S (Fig. 3). De acuerdo con los datos, se registró agua de la Corriente de California (con temperaturas y salinidades menores de 20°C y 34‰, respectivamente) en las estaciones más al norte. La mayoría de los registros correspondió al agua de la Corriente de California modificada por mezcla lateral (Tibby, 1941) y, en menor proporción, al agua subsuperficial subtropical.

34.6‰ and 9.5°C, respectively (Hickey, 1979). The T-S diagram shows, contrary to Longhurst's (1967) results, that the source of upwelled water is mainly modified California Current water.

Temperature and sigma-t at transects 390 and 410 (extreme ends of the study area) have a similar distribution (discussed below) over a distance of little more than 37 km (20 nautical miles) (Fig. 4). This also occurs at transects 395 and 400 (in front of the bay),

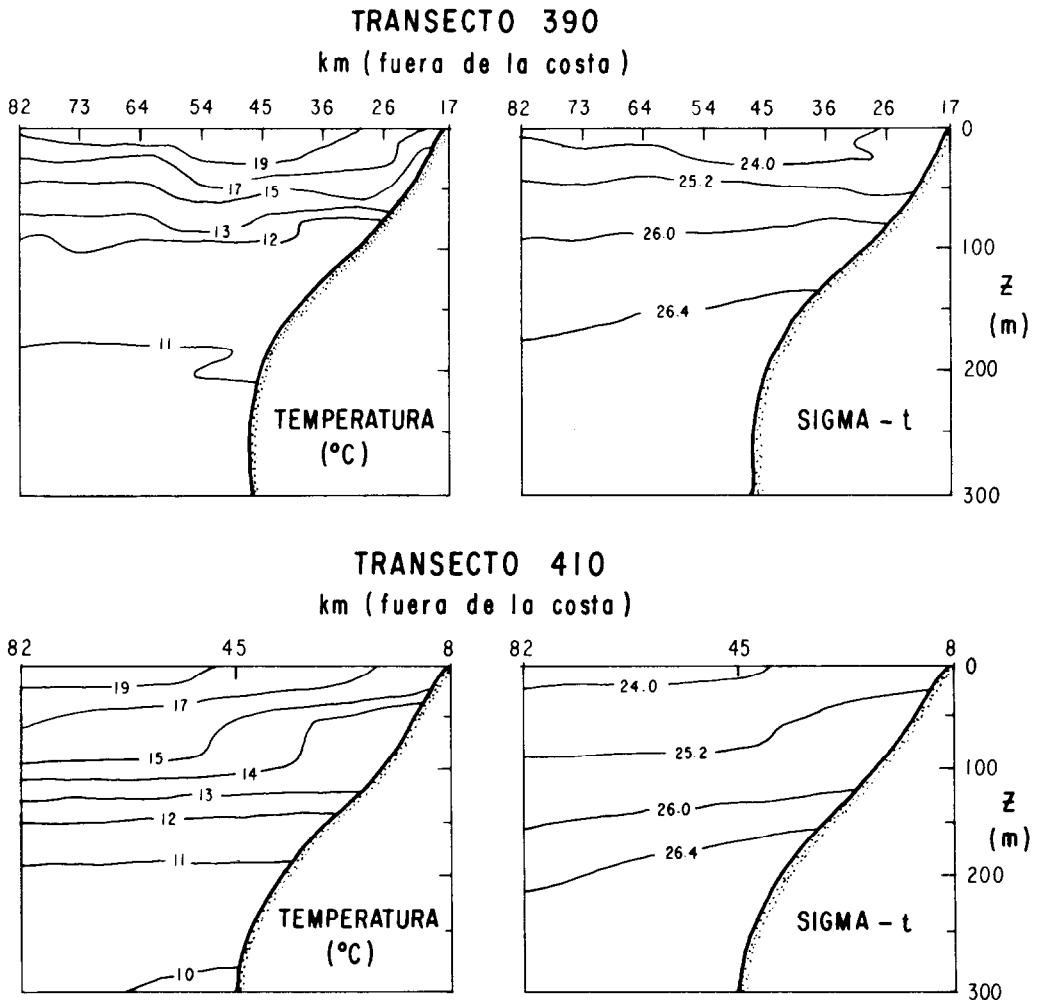


Figura 4. Distribución vertical de temperatura y sigma-t en los transectos 390 y 410 (extremos norte y sur, respectivamente, del área de estudio).

Figure 4. Vertical distribution of temperature and sigma-t at transects 390 and 410 (northern and southern ends, respectively, of the study area),

De acuerdo con otros estudios realizados a mediados de marzo de 1972, cerca de la costa (fuera de Punta San Hipólito), el origen del agua de surgencia es de la Corriente de California (Walsh *et al.*, 1974), mientras que en junio y julio los afloramientos provienen aparentemente de 100 a 200 m de agua de origen subsuperficial subtropical (o agua ecuatorial según la definición de Longhurst, 1967). La salinidad y temperatura características en el núcleo de la Contracorriente de California

but the slopes are steeper at the stations nearest to shore (Fig. 5).

At transect 405, the offshore vertical profile of temperature was stratified and the presence of coastal upwelling water (13-15°C) and subtropical subsurface water (<11°C and 34.8‰) was evident near the coast (Fig. 6a). The offshore distribution of salinity is not as uniform as that of temperature. However, near the coast, the salinity of upwelled water is greater than 34.0 but lower than 34.6‰

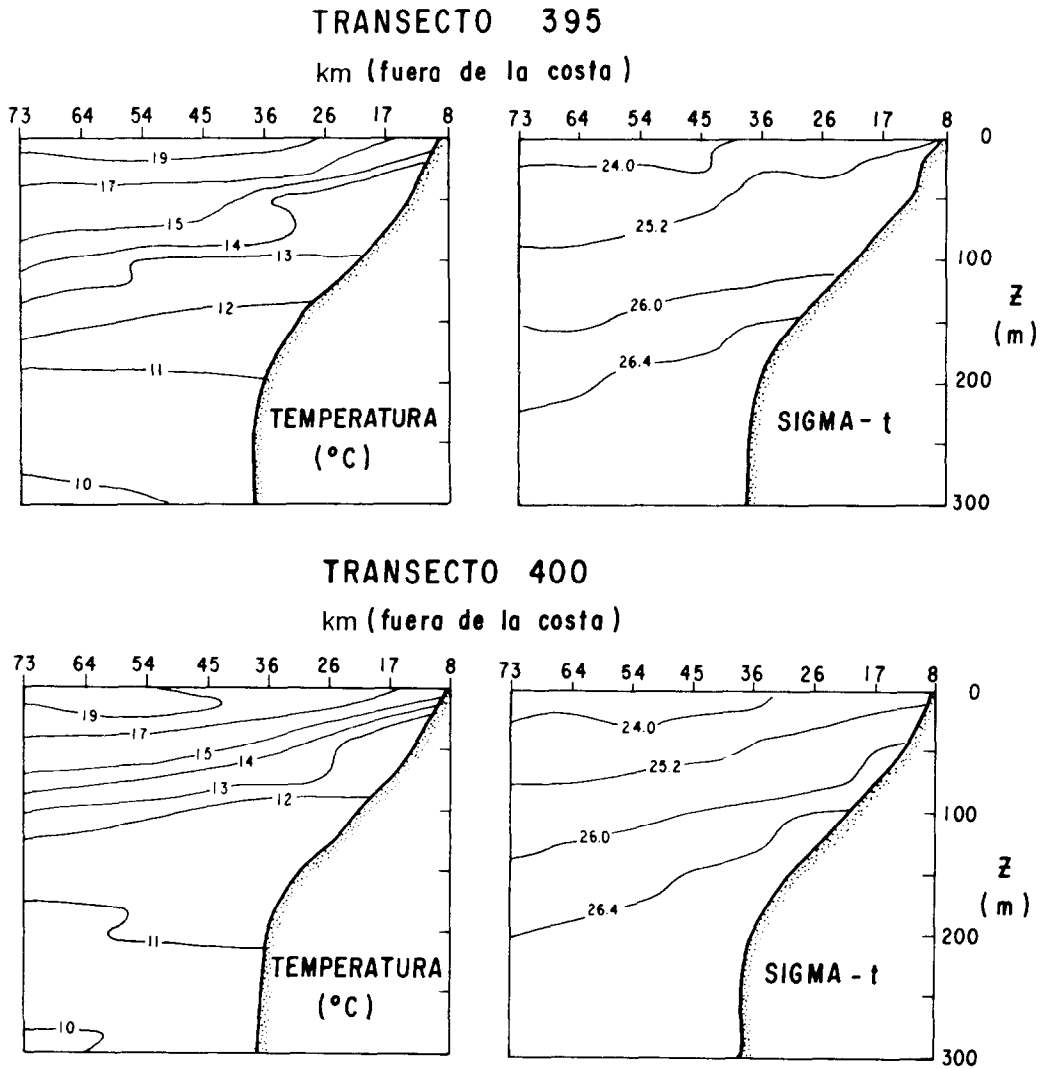


Figura 5. Distribución vertical de temperatura y sigma-t en los transectos 395 y 400 frente a la bahía.

Figure 5. Vertical distribution of temperature and sigma-t at transects 395 and 400 in front of the bay.

frente a Baja California son $34.6^{\circ}/\infty$ y 9.5°C , respectivamente (Hickey, 1979). Los resultados del diagrama T-S muestran, a diferencia del trabajo de Longhurst (1967), que el origen del agua de surgencia es principalmente de la Corriente de California modificada.

Las distribuciones de temperatura y sigma-t en los transectos 390 y 410 (extremos del área de estudio) muestran similitud en su

(Fig. 6b). The vertical distribution of sigma-t is similar to that of temperature, with values higher than 26.5 as a result of the influence of the California Countercurrent, whereas in the 24.5-26.0 range the water rises to the euphotic zone (Fig. 6c).

Nitrates and phosphates had fluctuating distributions characteristic of upwelling areas (Fig. 6d, e). In the first 150 m the concentra-

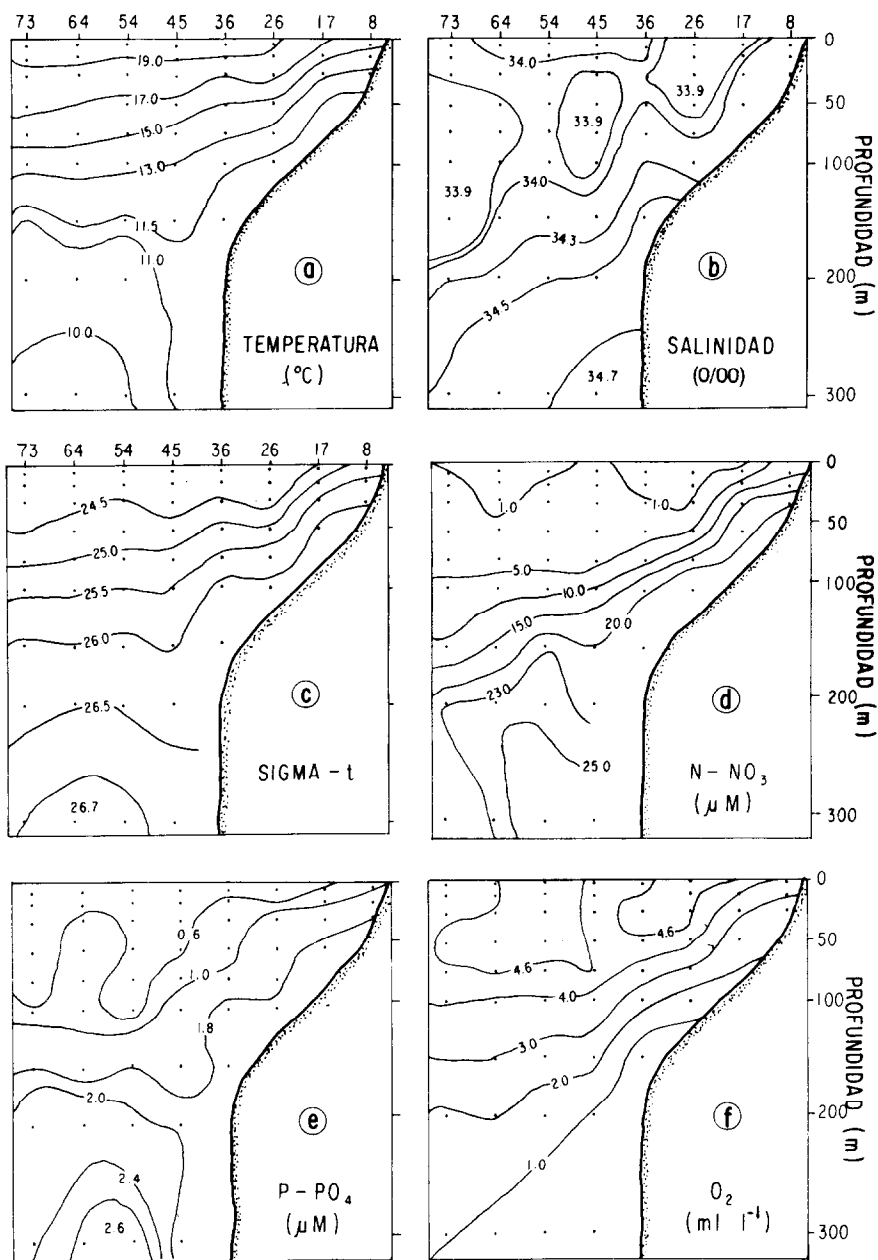


Figura 6. Distribución vertical de las variables hidrológicas medidas en el transecto 405. El eje superior indica la distancia de la costa en kilómetros.

Figure 6. Vertical distribution of the hydrological variables measured at transect 405. The top axis indicates the distance from the coast in kilometres.

distribución (discutida más adelante) a través de una separación de poco más de 37 km (20 millas marinas; Fig. 4), de la misma manera que en los transectos 395 y 400 (frente a la bahía); sin embargo, las pendientes son mayores en las estaciones más cercanas a la costa (Fig. 5).

En el transecto 405 el perfil vertical de temperatura fuera de la costa se estratificó, con evidente presencia de aguas de surgencia costera (13-15°C) y aguas subsuperficiales subtropicales (<11°C y 34.8‰; Fig. 6a) cerca de la costa. La distribución de salinidad fuera de la costa no es tan uniforme como la de temperatura; sin embargo, cerca de la costa la salinidad de las aguas de surgencia es mayor de 34.0 pero menor de 34.6‰ (Fig. 6b). La distribución vertical de sigma-t es muy similar a la de temperatura, con valores mayores de 26.5, como resultado de la influencia de la Contracorriente de California, mientras que en el intervalo de 24.5 a 26.0 las aguas ascienden a la zona eufótica (Fig. 6c).

Las distribuciones de nitratos y fosfatos presentaron oscilaciones también características de las zonas de surgencia (Fig. 6d,e). En los primeros 150 m las concentraciones ascienden hacia la zona eufótica (5 a 15 μM de NO_3^{-1} y 1.0 a 1.8 μM de PO_4^{-3} , respectivamente). Debajo de 150 m, en distancias a 45 km de la costa y cerca del talud continental, las isolíneas tendieron a descender, con concentraciones mayores de 23 y 2.0 μM de NO_3^{-1} y PO_4^{-3} , respectivamente, por influencia de una corriente subsuperficial con dirección norte (Yoshida y Tsuchiya, 1958; Torres-Moye y Acosta-Ruiz, 1986), o agua subsuperficial subtropical.

Las concentraciones de oxígeno de 3.0 a 4.0 ml l^{-1} se pueden relacionar con el ascenso de aguas de surgencia. Su distribución en profundidad cerca del talud mostró un ascenso probablemente debido a la influencia de la contracorriente que, según Reid *et al.* (1958), posee bajo contenido de oxígeno disuelto (Fig. 6f). Fuera de la costa el ascenso de las isolíneas no debe interpretarse como surgencia de aguas oceánicas, sino como respuesta a factores meteorológicos (vientos, radiación solar, etc.) y/o biológicos (respiración y fotosíntesis) sobre el contenido de oxígeno en las capas superficiales (Fig. 6f) (Torres-Moye y Acosta-Ruiz, 1986). Las concentraciones de oxígeno disuelto a profundidades mayores de

tions rise toward the euphotic zone (5-15 μM of NO_3^{-1} and 1.0-1.8 μM of PO_4^{-3} , respectively). Below 150 m, 45 km offshore and near the continental slope, the isolines tended to drop, with concentrations higher than 23 and 2.0 μM of NO_3^{-1} and PO_4^{-3} , respectively, due to the influence of a northward subsurface current (Yoshida and Tsuchiya, 1958; Torres-Moye and Acosta-Ruiz, 1986) or subtropical subsurface water.

Oxygen concentrations of 3.0-4.0 ml l^{-1} can be related to the rising of upwelled water. Its distribution in depth near the slope showed a rise, probably due to the influence of the countercurrent that, according to Reid *et al.* (1958), has low dissolved oxygen content (Fig. 6f). Offshore, the rise of the isolines should not be interpreted as upwelling of oceanic waters, but rather as a response to the influence of meteorological (wind, solar radiation, etc.) and/or biological (respiration and photosynthesis) factors on the oxygen content in surface layers (Fig. 6f) (Torres-Moye and Acosta-Ruiz, 1986). The concentrations of dissolved oxygen at depths below 200 m, near the coast, were lower than 1.0 ml l^{-1} but never as low as those described by Walsh *et al.* (1974) for Baja California at 30° latitude (0.2 to 0.3 ml l^{-1} between 200 and 220 m depth).

Taking the depth of the 14.5°C isotherm in the study area as indicator of upwelled water, its distribution at 10 m depth is not homogeneous. This fact is probably related to the influence of the points and the topography (Fig. 7). Other studies have reported high nutrient concentrations off Punta San Hipólito and Punta San Pablo (Walsh *et al.*, 1974) and ciliate blooms of *Mesodinium rubrum* in April 1973 (Packard *et al.*, 1978), related to the intensity of upwelling, topography and circulation of the water.

Walsh *et al.* (1974) suggested that the synoptic relative height of the 13.5°C isotherm can be considered an index of the intensity of upwelling. At the end of March 1972 and beginning of April 1973, the depth of the 13.5°C isotherm was approximately 25 m, 5 km off Punta San Hipólito (Walsh *et al.*, 1974). In this study, the 13.5°C isotherm was recorded below 45 m depth, which can be considered an index of less intense upwelling at this time of year. Furthermore, on comparing the distribution of nitrates obtained in this

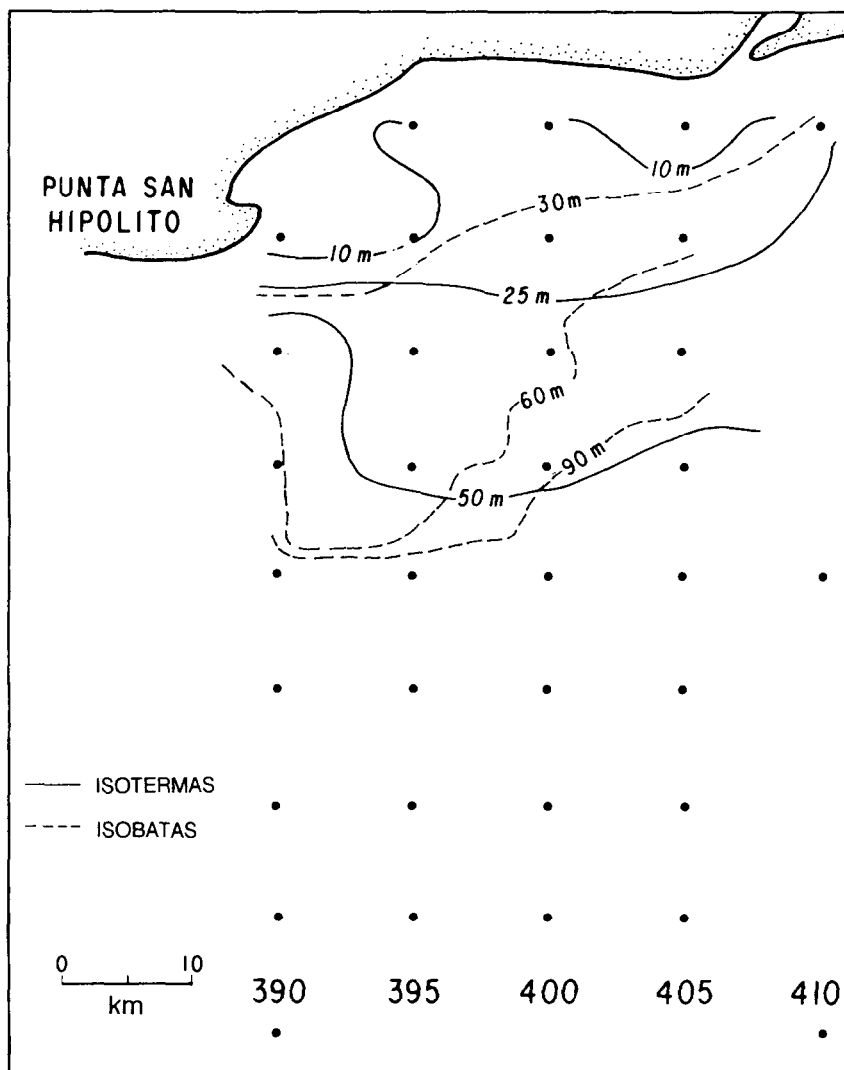


Figura 7. Profundidad de la isoterma de 14.5°C como indicador de las aguas de surgencia en el área de estudio.

Figure 7. Depth of the 14.5°C isotherm as indicator of upwelled water in the study area.

200 m, cerca de la costa, son menores de 1.0 ml l^{-1} pero nunca tan bajas como las descritas por Walsh *et al.* (1974), en Baja California a 30° de latitud (de 0.2 a 0.3 ml l^{-1} en profundidades entre 200 y 220 m).

Tomando la profundidad que tuvo la distribución de la isoterma de 14.5°C en el área de estudio como indicador de las aguas de surgencia, se observó que su distribución a

work with that of previous studies (Walsh *et al.*, 1974), it was found that, like temperature, the $15 \mu\text{M}$ nutricline can be used as an index of upwelling (table 1).

According to Wang and Walsh (1976), from the analysis of nutrients measured along the water column off Baja California in March 1972, in the 25.0-26.0 sigma-t density range (that rises to the euphotic zone) silicate is a

10 m de profundidad no es homogénea. Este hecho probablemente está relacionado con la influencia de las puntas y la topografía (Fig. 7). Otros estudios han informado de núcleos de altas concentraciones de nutrientes fuera de Punta San Hipólito y Punta San Pablo (Walsh *et al.*, 1974) y florecimientos de ciliados de *Mesodinium rubrum* en el mes de abril de 1973 (Packard *et al.*, 1978), relacionados con la intensidad de la surgencia, la topografía y la circulación de las aguas.

Walsh *et al.* (1974) sugirieron que la altura relativa sinóptica de la isoterma de 13.5°C puede ser utilizada como índice de intensidad de surgencia. A fines de marzo de 1972 y principios de abril de 1973, la isoterma de 13.5°C se localizó aproximadamente a 25 m de profundidad, a 5 km frente a Punta San Hipólito (Walsh *et al.*, 1977). En el presente estudio la isoterma de 13.5°C se registró a una profundidad mayor de 45 m, lo cual se puede considerar como índice de menor intensidad de surgencia en esta época del año. Asimismo, al comparar la distribución de nitratos obtenida en este trabajo con la de los estudios anteriores (Walsh *et al.*, 1977), se encontró que la nutriclina de 15 μM puede utilizarse, al igual que la temperatura, como índice de surgencia (tabla 1).

De acuerdo con Wang y Walsh (1976), a partir del análisis de nutrientes medidos en la columna de agua (fuera de Baja California, en marzo de 1972), en el intervalo de densidad de sigma-t 25.0 a 26.0 (que asciende a la zona eufótica), el silicato es elemento conservativo debido a que aparentemente no es utilizado por el dinoflagelado *Gonyaulax polyedra* (especie dominante en ese periodo de estudio). Asimismo, la correlación encontrada entre este intervalo de densidad y los nutrientes individuales (PO_4^{-3} , SiO_2 y NO_3^{-1}) fue alta ($r = 0.90$), lo cual refleja, de acuerdo con estos autores, el dominio de los procesos advectivos en la distribución de nutrientes. La correlación entre sigma-t y la concentración de NO_3^{-1} obtenida en este trabajo fue de 0.67. Esta es menor que la reportada por Wang y Walsh (1976) en marzo de 1972 ($r = 0.94$), lo cual se considera resultado de su desigual asimilación en la zona eufótica y el origen propio de las aguas (Fig. 8).

Con un intervalo de velocidad de ascenso de la surgencia entre 10 y 20 m d^{-1} y una concentración de nitratos de 20 μM debajo de

conservative element since it is apparently not used by the dinoflagellate *Gonyaulax polyedra* (dominant species during that study period). Likewise, the correlation found between this density range and the individual nutrients (PO_4^{-3} , SiO_2 and NO_3^{-1}) was high ($r = 0.90$), which according to these authors reflects the dominance of advective processes in the distribution of nutrients. The correlation between sigma-t and NO_3^{-1} concentration obtained in this work was 0.67. This is lower than that reported by Wang and Walsh (1976) for March 1972 ($r = 0.94$), which is considered a result of its unequal assimilation in the euphotic zone and the source of the water (Fig. 8).

With an upwelling velocity between 10 and 20 m d^{-1} and a nitrate concentration of 20 μM below 50 m, Walsh *et al.* (1977) calculated a transport of nitrates of 200-400 millimoles of $\text{NO}_3^{-1} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ during March 1972. In this work, considering an upwelling velocity of 5.3 m d^{-1} and concentrations of 15 μM of nitrates transported to the euphotic zone, near the coast, a transport of 80 millimoles of $\text{NO}_3^{-1} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ was estimated, which is lower than that reported for March 1972. The calculation of new production by carbon was 6.4 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, using the Redfield particulate C:N ratio (6.6). This value of productivity is lower than that reported by Walsh *et al.* (1974), 7.1 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, for March in Bahía San Hipólito. However, it is considered high relative to other upwelling areas.

In general, the highest concentration of zooplankton biomass was recorded at the inshore stations and drastically decreased towards the oceanic region (table 2). For example, at transect 390, the volume of zooplankton was greater (194 $\text{cm}^3/1,000 \text{m}^3$) in the most inshore haul and at lesser depth; however, this was a diurnal haul (07:10 hours) whereas the other two were nocturnal and at greater depth (table 2). At transect 410, the hauls were made during the night and greater biomass also corresponded to the station nearest the coast (526.6 $\text{cm}^3/1,000 \text{m}^3$) and lesser depth. At the two remaining offshore stations, even though the hauls were made at similar depths, the difference in the volume of zooplankton was large (86.6 and 25.9 $\text{cm}^3/1,000 \text{m}^3$; table 2). Whitledge (1981) reported that higher zooplankton biomasses in

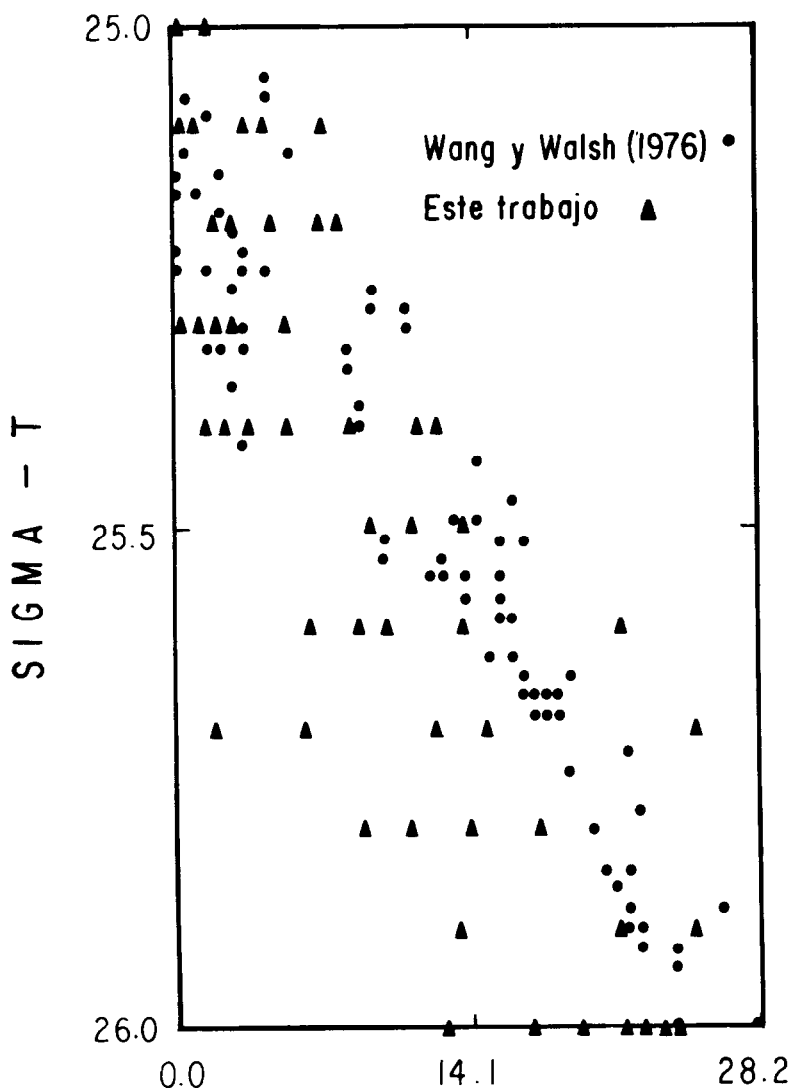


Figura 8. Concentraciones de nitratos (μM) vs. sigma-t registradas en el intervalo de densidad de 25.0 a 26.0.

Figure 8. Nitrate concentrations (μM) vs. sigma-t recorded in the 25.0-26.0 density range.

50 m, Walsh *et al.* (1977) calcularon un transporte de nitratos de 200 a 400 milimoles de $\text{NO}_3^{-1} \text{ m d}^{-1}$ durante marzo de 1972. En este trabajo, considerando una velocidad de ascenso de la surgencia de $5.3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y concentraciones de $15 \mu\text{M}$ de nitratos transportados a la zona eufótica, cerca de la costa,

upwelling areas occur near the edges of the plumes, although part of the zooplankton is found in recently upwelled waters and their number increases (together with chlorophyll content) until the nutrients are reduced to low levels. This coincides with that observed in this study, in which higher biomasses were

Tabla 1. Comparación de valores promedio de temperatura y concentración de nitratos registrados del 19 al 23 de marzo de 1972 (nueve estaciones en la plataforma continental a 5 km de Bahía San Hipólito), del 28 de marzo al 6 de abril de 1973 (diez estaciones a 5 km de Bahía San Hipólito; modificado de la tabla 1 de Walsh *et al.*, 1977) y del 22 al 24 de junio de 1989 (catorce estaciones, con profundidades menores de 100 m).

Table 1. Comparison of average values of temperature and nitrate concentration recorded from 19-23 March, 1972 (nine stations on the continental shelf, 5 km from Bahía San Hipólito), from 28 March to 6 April, 1973 (10 stations 5 km from Bahía San Hipólito) (modified from table 1 in Walsh *et al.*, 1977), and from 22-24 June, 1989 (14 stations less than 100 m in depth).

Profundidad (m)	Temperatura (°C)			Nitratos (μM)		
	Marzo 1972	Abril 1973	Junio 1989	Marzo 1972	Abril 1973	Junio 1989
0	14.32	14.02	17.71	3.09	7.47	2.54
10	14.04	13.80	16.47	3.69	8.14	4.42
25	13.03	13.14	14.89	9.22	13.08	9.68
50	12.14	11.75	13.29	25.04	21.82	13.62

se estimó un transporte de 80 milimoles de $\text{NO}_3^- \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, el cual es menor que el determinado en marzo de 1972. El cálculo de producción nueva por carbono fue de $6.4 \text{ g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, empleando la razón de Redfield (6.6) para C:N particulado por peso. Este valor de productividad es menor al indicado por Walsh *et al.* (1974), de $7.1 \text{ g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, durante el mes de marzo en Bahía San Hipólito; sin embargo, se considera alto en relación con otras zonas de surgencia.

En general, la mayor concentración de biomasa zooplanctónica se ubicó en localidades costeras y disminuyó drásticamente hacia la región oceánica (tabla 2). Por ejemplo, en el transecto 390, el volumen zooplanctónico fue mayor en el lance más costero ($194.4 \text{ cm}^3/1,000 \text{ m}^3$) y de menor profundidad; sin embargo, este lance se efectuó de día (07:10 horas), en contraste con los otros dos arrastres efectuados a mayor profundidad y durante la noche (tabla 2). En el transecto 410 los arrastres fueron realizados durante la noche, y de igual manera la mayor biomasa correspondió a la estación más cercana a la costa ($526.6 \text{ cm}^3/1,000 \text{ m}^3$) y de menor profundidad de arrastre. En las dos estaciones restantes fuera de la costa, a pesar de haber sido efectuados los arrastres a una profundidad muy semejante, la diferencia en volumen de zooplancton fue muy grande (86.6 y

found in colder waters (14.5°C near the coast; Fig. 4 and table 2). According to Hernández-Trujillo *et al.* (1987), in the area between Punta Eugenia and Punta Abrejos, the volume of zooplankton remains relatively constant at different times of the year, with values ranging from 101 to $500 \text{ cm}^3/1,000 \text{ m}^3$. However, during recent upwelling events (May 1985) and because of the effects of the Ekman transport, these values were as low as $1-50 \text{ cm}^3/1,000 \text{ m}^3$ (Hernández-Trujillo *et al.*, 1987).

A total of 33 copepod species were identified. The dominant species was *Calanus pacificus* (91%), followed by *Pleuromamma abdominalis* (6.2%) and *Calanus minor* (0.7%). The highest density of *C. pacificus* was recorded at inshore stations, $105,453$ and $74,457 \text{ cm}^3/1,000 \text{ m}^3$ in transects 390 and 410, respectively, with the magnitude of the abundance decreasing offshore (table 2). This species has high fecundity and growth potential when food is abundant, which increases its relative importance with respect to the other zooplankton animals with which it co-occurs (Landry, 1981).

In Baja California Sur, between 1982 and 1986, the highest densities of *Calanus pacificus* were recorded in February, March and May and this can be considered a biological indicator of the California Current

Tabla 2. Abundancia de copépodos por transecto y estación (el número después del punto representa la distancia de la costa, en kilómetros).**Table 2.** Abundance of copepods per transect and station (the number after the point indicates the distance, in kilometres, from the coast).

AFINIDAD BIOGEOGRAFICA	Transectos					
	390.17	390.45	390.82	410.8	410.45	410.82
Transicional	105628	774	129	74552	19988	556
Tropical	135	765	45	90	193	356
Ecuatorial	194	137	447	399	58	0
Templado	369	508	663	0	397	412
Templado-tropical	97	1765	1226	135	503	10656
Total	106423	3949	2510	75176	21139	11980
ESPECIES						
<i>Calanus pacificus</i>	105453	766	126	74457	19843	556
<i>Pleuromamma abdominalis</i>	0	1612	1106	130	503	10281
<i>Calanus minor</i>	97	121	615	0	397	290
<i>Acartia clausi</i>	272	387	31	0	0	113
<i>Eucalanus attenuatus</i>	194	0	0	394	58	0
Resto de especies	407	1063	632	195	338	740
Total de especies/estación	10	15	17	8	11	16
Shannon-Wiener	0.099	2.568	2.1871	0.091	0.47	0.97
Prof. real de arrastre (m)	0-12	0-51	0-175	0-59	0-228	0-224
Hora de arrastre	07:10	03:24	20:08	01:55	22:28	19:03
Biom. zoopl. cc/1,000 m ³	194.4	44.3	61.5	526.6	86.6	25.9

25.9 cm³/1,000 m³; tabla 2). De acuerdo con Whitley (1981), las mayores biomásas de zooplankton en zonas de surgencia están cerca de los bordes de las "plumas", aunque parte del zooplankton se localiza en aguas recién surgidas e incrementa su número (junto con el contenido de clorofila) hasta que los nutrientes son reducidos a niveles bajos. Lo anterior coincide con lo observado en este estudio, en el que las mayores biomásas se localizaron en las aguas más frías (14.5°C cerca de la costa; Fig. 4 y tabla 2). De acuerdo con los resultados de Hernández-Trujillo *et al.* (1987), en el área entre Punta Eugenia y Punta Abreojos el volumen zooplanktonico se mantiene relativamente cons-

(Hernández-Trujillo, 1991). However, in the San Hipólito ecosystem, this species was found to be the dominant herbivore during summer upwellings (Longhurst, 1967) and, according to Walsh *et al.* (1974), its occurrence in the water column marks the transition of the food chain from March to June. On the other hand, *Pleuromamma abdominalis* and *Calanus minor* were only found at five stations and in lower densities at offshore stations, in both cases.

Specific richness per station was noticeably greater at offshore stations for both transects. The complexity of the taxocenosis, according to the Shannon-Wiener diversity index, was greater at the offshore stations in transect 390 ($H' = 2.18, 2.57$) than in transect

tante en diferentes épocas del año, con valores que van de 101 a 500 cm³/1,000 m³; sin embargo, bajo condiciones de surgencia muy reciente (mayo de 1985) y por efectos del transporte de Ekman, estos valores pueden ser tan bajos como de 1 a 50 cm³/1,000 m³ (Hernández-Trujillo *et al.*, 1987).

Se identificaron un total de 33 especies de copépodos, entre las que predominaron *Calanus pacificus* (91%) y, con menor abundancia, *Pleuromamma abdominalis* (6.2%) y *Calanus minor* (0.7%). La mayor densidad de *Calanus pacificus* se encontró en las estaciones costeras, 105,453 y 74,457 cm³/1,000 m³, en los transectos 390 y 410, respectivamente, y la magnitud de la abundancia disminuyó al alejarse de la costa (tabla 2). Esta especie tiene un alto potencial de crecimiento y fecundidad cuando el alimento es abundante, lo que aumenta su importancia relativa respecto a los demás animales zooplanctónicos con que los que coexiste (Landry, 1981).

De acuerdo con Hernández-Trujillo (1991), en Baja California Sur durante el periodo de 1982 a 1986, las densidades máximas de *Calanus pacificus* se registraron en los meses de febrero, marzo y mayo, y pueden ser consideradas un indicador biológico de la Corriente de California. Sin embargo, en el ecosistema de San Hipólito se ha observado que dicha especie es el herbívoro dominante durante las surgencias de verano (Longhurst, 1967) y, de acuerdo con Walsh *et al.* (1974), su ocurrencia en la columna de agua marca la transición de la cadena alimenticia de marzo a junio. En cambio, *Pleuromamma abdominalis* y *Calanus minor* se encontraron sólo en cinco estaciones y con densidades mayores en estaciones oceánicas, en ambos casos.

La riqueza específica por estación fue sensiblemente mayor en estaciones oceánicas para ambos transectos. La complejidad de la taxocenosis, de acuerdo con el índice de diversidad de Shannon y Wiener, fue mayor en el transecto 390 en las estaciones oceánicas ($H' = 2.18, 2.57$) en comparación con el transecto 410 ($H' = 0.1$ a 1.0). La taxocenosis presentó en su conjunto el dominio de fauna de transición (91.12%), superior a la registrada globalmente en aguas de Baja California Sur (Hernández-Trujillo *et al.*, 1987). Además, se registraron en menor porcentaje organismos de afinidad templado-tropical (6.5%).

A partir del análisis de las condiciones de surgencia de junio de 1989, se considera

410 ($H' = 0.1$ to 1.0). The copepod composition indicated a predominantly transitional fauna (91.12%), higher than that recorded for Baja California Sur waters (Hernández-Trujillo *et al.*, 1987). A lower percentage of temperate-tropical organisms was also recorded (6.5%).

The June 1989 upwelling state is considered to have been less intense than the March 1972 and April 1973 events and therefore contributed less nutrients to the euphotic zone. However, the new production calculated is high and apparently maintains high zooplankton biomass at inshore stations.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Gilberto Gaxiola Castro and an anonymous referee for their valuable comments on the first version of this work. This study was financed by the Instituto Politécnico Nacional (project DEPI-893811).

English translation by Christine Harris.

que ésta fue menos intensa que la de marzo de 1972 y abril de 1973, y por ello aportó menos nutrientes a la zona eufótica. Sin embargo, la producción nueva calculada es alta y aparentemente mantiene altas biomásas de zooplancton en las estaciones más cercanas a la costa.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Gilberto Gaxiola Castro y a un revisor anónimo sus valiosas críticas de la primera versión de este trabajo; sus sugerencias mejoraron considerablemente el manuscrito. La investigación fue financiada por el Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto DEPI-893811.

REFERENCIAS

- Bakun, A. and Nelson, C. (1975). Climatology of the upwelling related processes off Baja California. *CALCOFI Rep.*, XIX: 107-127.
- Barber, R.T. and Smith, R.L. (1981). Coastal upwelling ecosystems. In: A. Longhurst (ed.), *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press, New York, pp. 31-68.

- Baumgartner, T. (1987). High-resolution paleo-climatology from the varved sediments of the Gulf of California. Ph.D. thesis, **Oregon State Univ.**, Corvallis, 287 pp.
- Boyd, C.M. (1962). The biology of a marine decapod crustacean, *Pleuroncodes planipes* (Stimpson, 1860). Ph.D. thesis, **Univ. California, San Diego**, 123 pp.
- Brown, N.L. and Hamon, B.V. (1961). An inductive salinometer. **Deep Sea Res.**, 8(1): 65-75.
- Cushing, D.H. (1969). Upwelling and fish production. **FAO Fisheries Technical Paper**, No. 84, 40 pp.
- Cushing, D.H. (1975). Ciclos de producción en áreas de afloramiento. **Ecología marinay pesquerías**, Ed. Acribia, pp. 23-39.
- Hernández-Trujillo, S. (1987). Los copépodos del Pacífico Sudcaliforniano (1982-1983). **Mem. Simp. Inv. Biol. Oceanogr. Pesq. en México**, 1987, La Paz, B.C.S., pp. 171-177.
- Hernández-Trujillo, S. (1989). Variación de la distribución de los copépodos en el Pacífico de Baja California Sur. Tesis de maestría, **CICIMAR-IPN**, 90 pp.
- Hernández-Trujillo, S. (1991). Patrones de distribución y abundancia de *Calanus pacificus* en relación a la temperatura superficial en el Pacífico de Baja California Sur, México (1982-1986). **Rev. Inv. Cient.**, 2(1): 56-64.
- Hernández-Trujillo, S., Esquivel, A. y Saldierna, R. (1987). Biomasa zooplanctónica en la costa oeste de Baja California Sur (1982-1985). **Mem. Simp. Inv. Biol. Oceanogr. Pesq. en México**, 1987, La Paz, B.C.S., pp. 161-169.
- Hickey, B.M. (1979). The California Current system - hypothesis and facts. **Prog. Oceanogr.**, 8: 191-279.
- Husby, D.M. and Nelson, C.S. (1982). Turbulence and vertical stability in the California Current. **CALCOFI Rep.**, 19: 128-137.
- LaFond, E.C. and LaFond, K.G. (1971). Oceanography and its relation to marine organic production. In: J.D. Costlow (ed.), **Fertility of the Sea**, v. 1. Gordon and Breach, pp. 241-266.
- Lyr, M.R. (1981). Switching between herbivory and carnivory by the planktonic marine copepod *Calanus pacificus*. **Marine Biology**, 65: 77-82.
- Longhurst, A.R. (1967). Diversity and trophic structure of zooplankton communities in the California Current. **Deep Sea Res.**, 14: 393-408.
- Packard, T.T., Blasco, D. and Barber, T. (1978). *Mesodinium rubrum* in the Baja California upwelling system. In: R. Boje and M. Tomczac (eds.), **Upwelling Ecosystem**. Berlin: Springer, 1978, pp. 73-89.
- Pond, S. and Pickard, G.H. (1978). **Introductory Dynamic Oceanography**. Pergamon Press.
- Reid, J.L., Roden, G.I. and Willie, J.G. (1958). Studies of the California Current system. **CALCOFI Rep.**, VI: 27-56.
- Smith, E.P. and Richardson, S.L. (1977). Standard techniques for pelagic fish eggs and larva surveys. **FAO Tech. Pap.**, No. 175, 75 pp.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972). A Practical Handbook of Seawater Analysis. **Bull. Fish. Res. Bd. Canada** No. 167 (second edition), 310 pp.
- Sverdrup, H.U., Johnson, M.W. and Fleming, R.H. (1942). **The Oceans**. Prentice-Hall.
- Tibby, R.B. (1941). The water masses off the west coast of North America. **J. Mar. Res.**, 4(2): 112-121.
- Torres Moye, G. y Acosta Ruiz, M.J. (1986). Algunas propiedades químicas indicadoras de eventos de surgencias costeras y de la corriente subsuperficial en el área cercana a Punta Colonet, Baja California. **Ciencias Marinas**, 12(3): 10-25.
- Walsh, J.J., Kelley, J.C., Whitledge, T.E. and MacIsaac, J.J. (1974). Spin-up of the Baja California upwelling ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, 19(4): 553-572.
- Walsh, J.J., Whitledge, T.E., Kelley, J.C., Huntsman, S.A. and Pillsbury, R.D. (1977). Further transition states of the Baja California upwelling ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, 22(2): 264-280.
- Wang, D.P. and Walsh, J.J. (1976). Objective analysis of the upwelling ecosystem off Baja California. **J. Mar. Res.**, 34(1): 43-60.
- Whitledge, T.E. (1981). Nitrogen recycling and biological populations in upwelling ecosystems. Coastal upwelling. **Coast. Estuar. Sci.**, No. 1, pp. 257-273.
- Yoshida, K. (1955). Coastal upwelling off the California coast. **Rec. Oceanogr. Works Japan**, 2(2): 8-20.

- Yoshida, K. and Tsuchiya, M. (1958). Northward flow in lower layers as an indicator of coastal upwelling. **Rec. Oceanogr. Works Japan**, 4(1): 14-22.