

VARIACIONES ESTACIONALES DE TEMPERATURA Y SALINIDAD EN LA REGION COSTERA DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA

por

José Gómez-Valdés
Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada, B.C.
Espinoza No. 843
Ensenada, Baja California, México

y

Héctor S. Vélez-Muñoz
Escuela Superior de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado Postal 453
Ensenada, Baja California, México

RESUMEN

Utilizando la información CalCOFI del lapso 1950-1968 se examinan los cambios estacionales de temperatura y salinidad a 10 y 200 m de profundidad, en la región costera de la corriente de California. Las variaciones de temperatura superficial son determinadas solo parcialmente por el ciclo anual de radiación solar. Los cambios de salinidad superficiales son del orden de 0.3 ‰ entre 24 y 28°N, prácticamente nulos entre 28 y 35°N y del orden de 0.1 ‰ entre 36 y 43°N. La curva anual de ambos parámetros se puede explicar considerando las interacciones entre el flujo a lo largo de la costa y las surgencias costeras. A 200 m de profundidad, valores altos de temperatura (entre 13 y 8.2°C) y de salinidad (entre 34.8 y 34.1 ‰) se asocian a la influencia de la Contracorriente Subsuperficial.

ABSTRACT

The seasonal variations of temperature and salinity at 10 and 200 m depth in coastal waters of the California Current System were examined, using the CalCOFI data record for 1950-1968. Temperature variations at the surface, are determined only partly by the heating and cooling cycle. Salinity changes are on the order of 3.0 ‰ between 24 and 28°N, nearly zero between 28 and 36°N, and area on the order of 0.1 ‰ between 36 and 43°N. The annual variability of these parameters can be explained by the interaction between the alongshore flow and coastal upwelling. At 200 m depth, the high values of temperature (between 13 and 8.2°C) and salinity (between 34.8 and 34.1 ‰) are associated with the presence of the California undercurrent.

INTRODUCCION

Frente a las costas Oeste de Estados Unidos y Baja California, México, las características de la corriente de California (baja salinidad, baja temperatura) predominan en toda la zona. Sin embargo, cerca de la costa la masa de agua puede alterarse debido a surgencias y contraflujos (Wooster y Reid, 1963). Remolinos y meandros observados en la región (Bernstein et al., 1977), también pueden producir fluctuaciones.

Con la información obtenida por el programa California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI), en este estudio se examinan las variaciones estacionales de salinidad y temperatura a 10 y 200 m de profundidad en la región costera de la corriente de California, las surgencias y contraflujos que ocurren en ella.

AREA DE ESTUDIO Y TRATAMIENTO DE DATOS

La figura 1 muestra el área de estudio. La nomenclatura es la usada en el plan de estaciones CalCOFI, e.g., 15019 debe entenderse como la estación 19 de la línea hidrográfica 150. Las líneas hidrográficas son normales a la línea de costa local, la distancia entre ellas es aproximadamente de 444 km. La distancia entre estaciones de cualquier línea es tal que una unidad de diferencia en el número de la estación corresponde a 7.4 km (Eber et al., 1976). Las distancias entre las estaciones más cercanas a la costa y la costa son: 44 km, estación 15019; 37 km, estación 13030; 15 km, estación 11033; 4 km, estación 9028; 7 km, estación 7050 y 37 km, estación 5050.

Los datos empleados corresponden al período 1950-1968. En general, en la década 1950-59, los cruceros se realizaron mensualmente y trimestralmente en el período restante. Las muestras de agua fueron obtenidas por botellas reversibles Nansen y la temperatura por termómetros reversibles. La salinidad fué determinada con salinómetros de inducción. Las medidas de temperatura tienen un error de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ y las de salinidad ± 0.03 ‰ (Oceanic Observations of the Pacific, 1955, the Norpac Atlas). Se elige la profundidad de 10 m para analizar las amplitudes asociadas a procesos de período largo en la capa de mezcla, con el objeto de filtrar efectos por procesos de período corto que se pueden presentar en la superficie (Lynn, 1967).

Los promedios estacionales fueron calculados agrupando los meses correspondientes a cada estación del año. Los promedios anuales se obtuvieron del grupo de meses trabajados en cada estación hidrográfica.

La desviación típica de los promedios se obtuvo calculando la desviación típica del grupo de datos y dividiendo entre la raíz cuadrada del número de ellos. Para encontrar los errores de las desviaciones estacionales alrededor del promedio, se utiliza la expresión:

$$S_z = \left[(S_x)^2 + (S_y)^2 - 2C_{xy}S_{xy}S_y \right]^{1/2}$$

dada por Bevington (1977), donde:

S_z = error de la desviación estacional.

S_x = error del promedio estacional.

S_y = error del promedio anual.

C_{xy} = coeficiente de correlación entre las desviaciones alrededor del promedio estacional y del promedio anual.

RESULTADOS

Si bien en todas las líneas se analizaron tres estaciones (ver fig. 1), solamente se reportan los resultados de las dos estaciones que observaron condiciones extremas.

A macroescala, la región de la Corriente de California representa la zona de transición entre la Masa de Agua Ecuatorial y la Subártica (Svedrup et. al., 1942). Para la región de estudio de la zona de transición entre estas masas de agua, la representan las líneas hidrográficas 110 y 90; las líneas 150 y 130 representan la zona de dominio de la Masa de Agua Ecuatorial y las líneas 70 y 50 la zona de dominio de la Masa de Agua Subártica (Vélez-Muñoz, 1981).

En general, en todas las líneas la temperatura se incrementa de la costa hacia el mar y la salinidad disminuye en la misma dirección. Las desviaciones estacionales son más altas en la zona de dominio ecuatorial ($5.1 \pm 0.7^\circ\text{C}$; 0.35 ± 0.03 ‰) que en la subártica ($1.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$; 0.17 ± 0.03 ‰).

A) ZONA DE DOMINIO ECUATORIAL (LINEAS 150 y 130). Tanto en la temperatura como en la salinidad en primavera se presentan valores menores que el promedio anual respectivo (Tabla 1). Las desviaciones estacionales de temperatura son positivas en verano y otoño, y negativas en invierno. En salinidad, las desviaciones son positivas en otoño e invierno y negativas en verano.

Al comparar las magnitudes de las desviaciones estacionales entre estaciones de la misma línea hidrográfica se puede notar que en primavera la temperatura es más baja (del orden de 1°C) en la estación 15019, y en primavera y verano en la estación 13030. En primavera la salinidad es más baja (del orden de 0.1 ‰) en las estaciones 15030 y 13030.

B) ZONAS DE TRANSICION (LINEAS 110 y 90). (Tabla 2). Temperatura. Con respecto al promedio anual, se presenta alta en verano y otoño y baja en invierno y primavera. En todo el año, en las estaciones 11033 y 9028, se presenta del orden de 1.0°C más baja que en las estaciones 11040 y 9037.

VARIACIONES ESTACIONALES

Tabla 1. Zona de dominio ecuatorial. Promedios anuales (A) y fluctuaciones estacionales. P, significa promedio de primavera; V, promedio de verano; O, promedio de otoño e I, promedio de invierno.

Estaciones	Prom. anual (A)	P-A	V-A	O-A	I-A
TEMPERATURA °C					
15019	21.0-1.2	-5.1-0.7	-	-	-0.4-0.0
15030	22.2-0.9	-3.6-0.3	-	4.0-0.9	-0.8-0.2
13030	19.0-0.7	-4.1-0.2	0.0-0.4	3.5-1.1	0.0-0.1
13040	19.0-0.4	-2.6-0.1	1.0-0.4	3.3-0.7	-0.4-0.1
SALINIDAD o/oo					
15019	34.54-0.06	-0.21-0.05	-	-	0.02-0.00
15030	34.46-0.07	-0.31-0.02	-	0.16-0.14	0.04-0.00
13030	34.05-0.06	-0.35-0.03	-0.12-0.01	0.22-0.07	0.21-0.00
13040	33.90-0.05	-0.21-0.01	-0.21-0.01	0.12-0.1	0.24-0.04

Tabla 2. Zona de transición. Promedios anuales (A) y fluctuaciones estacionales. P, significa promedio de primavera; V, promedio de verano; O, promedio de otoño e I, promedio de invierno.

Estaciones	Prom. anual (A)	P-A	V-A	O-A	I-A
TEMPERATURA °C					
11033	15.7-0.4	-0.5-0.0	0.4-0.9	0.7-0.4	-0.9-0.1
11040	17.2-0.3	-1.5-0.0	1.5-0.2	2.2-0.2	-1.5-0.1
9028	16.5-0.4	-0.9-0.1	0.9-0.1	1.3-0.7	-1.2-0.2
9037	16.5-0.3	-1.5-0.1	1.9-0.2	2.5-0.2	-1.7-0.1
SALINIDAD o/oo					
11033	33.40-0.03	0.00-0.03	0.05-0.01	-0.02-0.03	-0.04-0.04
11040	33.56-0.03	-0.06-0.02	0.01-0.02	0.09-0.02	-0.02-0.01
9028	33.55-0.05	-0.04-0.01	-0.02-0.02	0.03-0.01	0.04-0.02
9037	33.55-0.02	-0.04-0.01	0.07-0.01	0.05-0.03	0.05-0.01

Salinidad. En general, las desviaciones se presentan más bajas que en la zona discutida anteriormente. En la línea 90 prácticamente los gradientes son nulos, y en primavera la desviación estacional es negativa. En la estación 11040, la salinidad es más baja en primavera y más alta en otoño.

Para analizar con más detalle esta zona, se arreglaron los promedios estacionales de cada una de las estaciones hidrográficas formando una tabla de dos entradas. Tal análisis conduce a separar el efecto de posición y el efecto estacional (Tukey, 1977). Con los datos de temperatura resulta: para las estaciones más cercanas a la costa, residuos negativos altos (desminución de temperatura) en verano y otoño (el máximo ocurre en verano), y residuos positivos (incremento de temperatura) en primavera e invierno. Estos resultados muy probablemente están relacionados a intensificaciones de surgencias en verano y otoño.

C) ZONA DE DOMINIO SUBARTICO (LINEAS 70 y 50). Se observa que las fluctuaciones estacionales de salinidad (Tabla 3) son más grandes que en la región sur próxima. También que en verano la temperatura se presenta abajo del promedio anual en las estaciones hidrográficas 7051 y 5050 y, en invierno, en la 7051, la temperatura observada resulta arriba del promedio.

Haciendo la tabla de dos entradas para la distribución de promedios de temperatura, se encuentran también residuos negativos altos en verano y otoño, pero en la estación 5050, el residuo negativo de otoño resulta un máximo.

POLIGONOS ESTACIONALES A 200 M. Con el fin de observar las magnitudes de las fluctuaciones en las capas superficiales se grafican los promedios estacionales a 200 m. en un diagrama de correlación temperatura-salinidad (Fig. 2). En esta gráfica se debe tener en cuenta que las líneas que unen los puntos estacionales no representan una curva T-S, sino una indicación de la secuencia cronológica de los cuatro puntos. El área encerrada por el polígono así generado, representa una medida del grado de variabilidad T-S en la profundidad de observación. Se elige una profundidad de 200 m por representar una profundidad típica de influencia de la Contracorriente Subsuperficial (Wyllie, 1966). No obstante que para todas las estaciones hidrográficas se obtuvieron polígonos T-S, solo algunos se presentan (Vélez-Muñoz, 1981, presenta una información más completa).

Un rasgo sobresaliente de la distribución espacial T-S, lo representa la ocurrencia en primavera del mínimo en temperatura en todas las líneas. La ocurrencia de los máximos es más esporádica. En la zona de dominio ecuatorial la conjugación de temperatura y salinidad altas se presenta en verano; en la línea 110 en otoño; en las líneas 90 y 70 en invierno y en la línea 50 las fluctuaciones observadas son prácticamente nulas.

VARIACIONES ESTACIONALES

Tabla 3. Zona de dominio subártico. Promedios anuales (A) y fluctuaciones estacionales. P, significa promedio de primavera; V, promedio de verano; O, promedio de otoño e I, promedio de invierno.

Estaciones	Prom. anual (A)	P-A	V-A	O-A	I-A
TEMPERATURA °C					
7051	11.04-0.4	-0.5-0.4	-0.7-0.2	0.5-0.3	1.4-0.3
7060	13.8-0.2	-1.6-0.1	0.3-0.0	0.9-0.0	-0.2-0.0
5050	11.7-0.4	-0.7-0.1	-0.2-0.1	1.7-0.4	-0.2-0.3
5070	13.4-0.5	-1.8-0.4	0.6-0.3	2.2-0.3	-1.7-0.3
SALINIDAD o/oo					
7051	33.58-0.05	0.04-0.05	-0.04-0.03	-0.01-0.05	-0.03-0.01
7060	33.27-0.03	0.03-0.03	-0.07-0.02	0.09-0.02	-0.06-0.02
5050	32.91-0.06	-0.17-0.03	0.00-0.03	0.05-0.14	0.12-0.14
5070	32.76-0.05	0.07-0.01	0.01-0.01	-0.25-0.01	0.05-0.01

Tabla 4.- Comparación entre los Indices de Bakun (IB) (tomados de Bakun, 1973) y los residuos de temperatura del análisis de dos entradas. I, P, V y O se toman en la Tabla 1, la temperatura en oC y IB en m3 S-1 por 100 m de línea de costa.

	IB	15019	15030	IB	11033	11040	IB	5050	5070
I	55	-0.9	0.3	27	0.1	-0.7	5	2.8	-0.3
P	117	-2.5	0.0	193	1.1	0.0	76	0.5	0.2
V	74	0.3	0.0	252	-0.3	0.7	163	-0.8	0.4
O	57	1.6	0.0	78	-0.4	0.0	25	-2.0	0.7

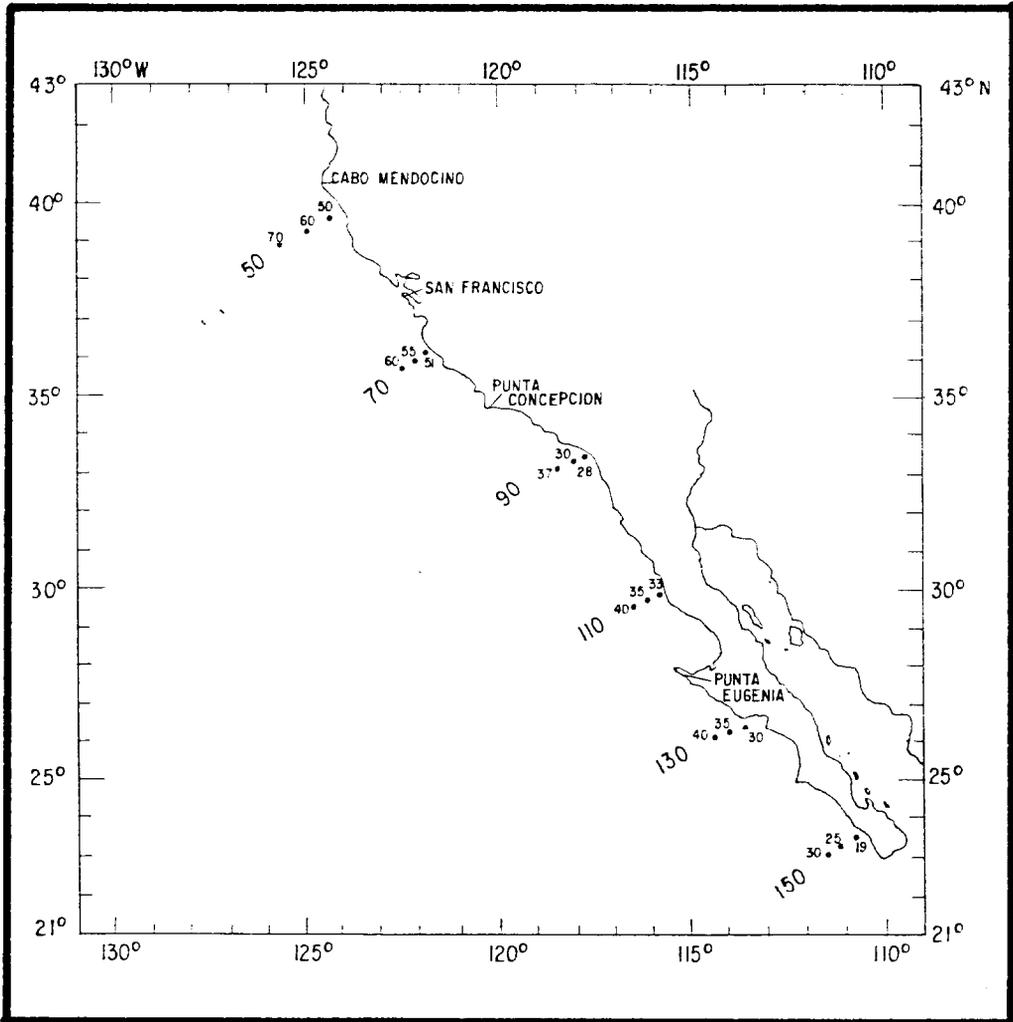


Figura 1. Area de estudio. Los números grandes señalan las líneas hidrográficas y los números pequeños las estaciones hidrográficas.

VARIACIONES ESTACIONALES

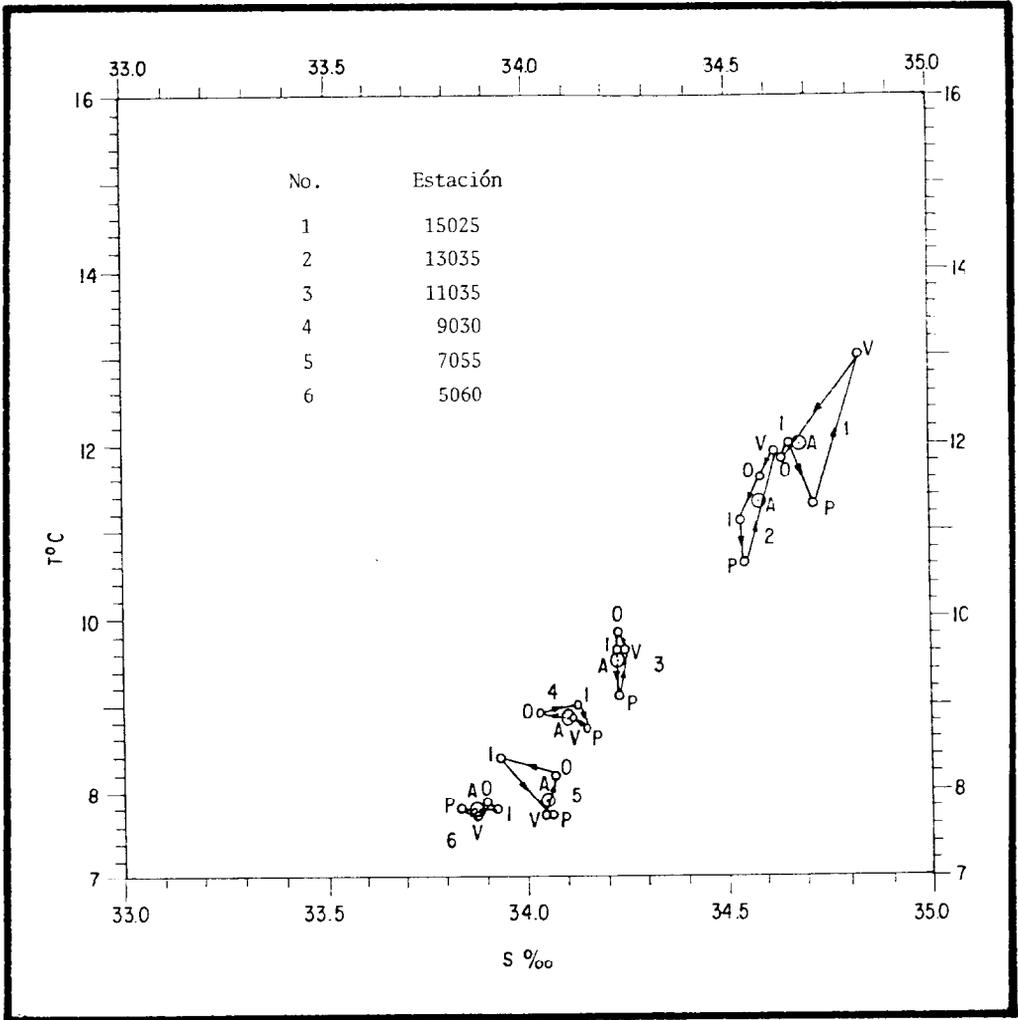


Figura 2. Polígonos estacionales T-S a 200 m de profundidad. A, significa promedio anual; P, promedio de primavera; V, promedio de verano; O, promedio de otoño; I, promedio de invierno.

DISCUSION

Es de esperar que en respuesta al ciclo calentamiento-enfriamiento, la temperatura superficial sea mínima en invierno, aumente en primavera, sea máxima en verano, disminuya en otoño para volver a ser mínima en invierno. No obstante, como se ha observado en los resultados, la marcha anual de temperatura no sigue este patrón. Por otro lado, como de 24 a 36°N el factor evaporación menos precipitación es pequeño y no hay aporte de agua dulce considerable (Roden, 1959), los cambios superficiales de salinidad estarán relacionados en mayor grado a las variaciones de los procesos de mezcla y advección. También, los cambios de temperatura y de salinidad en masas de agua subsuperficiales (y profundas) están relacionados al balance entre la advección y la difusión de calor y sal. Así los patrones observados pueden explicarse básicamente por las variaciones espacio-temporales de la Corriente de California, del fenómeno de surgencias y de la Contracorriente Subs superficial que ocurren en el área de estudio.

La Corriente de California es un flujo de Norte a Sur, ancho (del orden de 1000 km), somero (del orden de 500 m) y lento (del orden de 25 cm S⁻¹); se ha mostrado en cartas de deriva superficial, en cartas de topografía dinámica y en mediciones directas (Wooster y Reid, 1963; Wyllie, 1966). Hay evidencias que cerca de la costa, la Corriente de California posee un componente cuya variación estacional está relacionada a la variación estacional de la componente a lo largo de la costa del esfuerzo del viento (Hickey, 1978). De tal forma que cuando el esfuerzo del viento se dirige hacia el Sur, persistencias de agua fría y poco salada deben manifestarse en los resultados aquí presentados.

Por otro lado, estudios de la variación estacional y espacial de las surgencias frente a la Costa Oeste de América del Norte han mostrado que los valores máximos se observan en los primeros meses del año en el Sur y migran hacia el Norte conforme avanza el año (Reid et al., 1958; Bakun, 1973). Puede notarse que estos estudios se manifiestan en los resultados, observando el patrón de temperatura: en primavera es muy baja en la zona de dominio ecuatorial (Tabla 1); los gradientes horizontales son altos en verano y otoño en la zona de transición (Tabla 2); las desviaciones de verano son negativas en la zona de dominio subártico y además, el análisis de dos entradas, para esta zona, predice baja temperatura en las estaciones más costeras en otoño.

Los valores bajos de temperatura y salinidad observados (a 10 y 200 m) en primavera en toda la región de estudio, muy probablemente se originan por la ocurrencia en esta época, de magnitudes altas del esfuerzo del viento hacia el ecuador (Nelson, 1977). Tales características del esfuerzo del viento pueden ocasionar que el transporte de masa del Norte (Agua Subártica) sea mayor, las surgencias se intensifiquen y la Contracorriente Subs superficial se inhiba o se desplace fuera de la influencia del núcleo principal de la Corriente de California.

VARIACIONES ESTACIONALES

En particular, se puede hacer una correlación entre la distribución de los mínimos de temperatura superficiales de las estaciones más cercanas a la costa y los índices de surgencias máximo de Bakun (1973), encontrándose mejor correspondencia con estas estaciones que con los mínimos de las estaciones más alejadas de la costa (ver Tabla 4); de tal forma, que en cierto grado, las sugerencias costeras son el causante principal de las bajas temperaturas costeras.

Los valores altos de temperatura y salinidad superficiales se presentan en una relación más directa con el ciclo de radiación solar, excepto el máximo de temperatura observado en invierno de la estación 7051 (Tabla 3), el cual puede asociarse a la influencia de la Corriente de Davidson (Reid et al., 1958).

La magnitud de las fluctuaciones en la zona de dominio ecuatorial puede ser un efecto de los cambios estacionales en el Sistema Frontal que ocurre cerca de Cabo San Lucas (Griffiths, 1965). Por lo regular, en la zona de dominio Subártico en invierno y primavera la precipitación excede a la evaporación y el rango estacional de radiación solar es el máximo del área de estudio (Roden, 1959). Estas características, más la ocurrencia de la Corriente de Davidson, que introduce agua de Sur a Norte, pueden ocasionar que la magnitud de las fluctuaciones estacionales en esta zona, sean mayores que en la zona de transición donde por otro lado, se observa que en la capa de mezcla los efectos estacionales salinos del agua Ecuatorial y Subártica prácticamente se cancelan.

A través de la Contracorriente Subsuperficial se transporta agua de Sur a Norte con temperatura y salinidad altas. En los resultados observados se nota que la influencia de la Contracorriente a la profundidad de 200 m es más conspicua en verano en la zona de dominio ecuatorial, en otoño e invierno en la zona de transición y la línea 70, y en la línea 50 prácticamente no se observan fluctuaciones estacionales. Estos resultados coinciden con lo reportado por Hickey (1978).

CONCLUSIONES

A 10 y 200 m de profundidad los rangos estacionales de temperatura y salinidad se presentan más altos en la zona de dominio ecuatorial. En la zona de transición (28-36°N) prácticamente no se observan fluctuaciones estacionales de salinidad a 10 m de profundidad. Haciendo un análisis de dos entradas para cada línea, se puede separar el efecto de la Corriente de California y el efecto de las surgencias costeras.

Los efectos de surgencias y contracorriente se observan más conspicuamente en:

	SURGENCIAS	CONTRACORRIENTE
Línea 150	Primavera	Verano
Línea 130	Primavera	Verano
Línea 110	Verano-Otoño	Otoño
Línea 90	Verano-Otoño	Invierno
Línea 70	Verano-Otoño	Invierno
Línea 50	Otoño-Verano	

AGRADECIMIENTOS

A Joseph L. Reid Jr., por haber facilitado los datos y haber participado en la revisión de la tesis de la cual emana este trabajo.

A Berenice Cornejo, secretaria de la División de Oceanología del CICESE.

LITERATURA CITADA

- BAKUN, A., 1973. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-1971. NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF-671. 103 pp.
- BERNSTEIN, R.L., L. Breaker y R. Whritner, 1977. California current eddy formation: ship, air and satellite results. *Science* 195:353-359.
- BEVINGTON, P.R., 1977. Data reduction and error analysis for the physical sciences. McGraw-Hill, New York, 336 pp.
- EBER, L.E. y N. Wiley, 1976. A retrieval and display system for the CalCOFI oceanographic data file. National Marine Fisheries Service: Southwest Fisheries Center; Admin. Rep. No. LJ-76-16. 15 pp.
- GRIFFITHS, R.C., 1965. A study of ocean fronts off Cape San Lucas, Lower California. U.S. Fish. Wild. Serv. Spec. Sci. Rept.: Fish., (499):1-54.
- HICKEY, B.M., 1979. The California current system - hypothesis and facts. *Prog. Oceanogr.* 4:169-179.
- LYNN, R.J., 1967. Seasonal variation of temperature and salinity at 10 meters in the California current. *CalCOFI Rep.* II, 157-186.
- NELSON, C.S., 1976. Wind stress and wind stress curl over the California current. NOAA Technical Report NMFS SSRF-714, U.S. Department of Commerce, 89 pp.
- REID, J.L., Jr., G.I. Roden y J.G. Willie, 1958. Studies of the California current system. *CalCOFI Progress Rep.*, 1 July 1959 - January 1958, 28-56.

VARIACIONES ESTACIONALES

- RODEN, G.I., 1959. On the heat and salt balance of the California current region. *Mar. Res.*, 18(1):36-61.
- SVEDRUP, H.V., M.W. Johnson y R.H. Fleming, 1942. *The Oceans: Their physics, chemistry and general biology*. Prentice-Hall, Inc., New York, 1087 pp.
- TUKEY, W.J., 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Publishing. U.S., 668 pp.
- VELEZ-MUÑOZ, H.S., 1981. Análisis cuantitativo de la variabilidad estacional y espacial de las masas de agua de 0 a 500 m en la región de la Corriente de California. Tesis Profesional, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, 165 pp.
- WOOSTER, W.S. y J.L. Reid Jr., 1963. Eastern boundary currents. En: *The Sea*, Vol. II. (M.N. Hill, ed.). Interscience Publ., New York, pp. 253-280.
- WYLLIE, J.G., 1966. Geostrophic flow of the California current at the surface and at 200 m. *CalCOFI Atlas No. 4*, 288 pp.