

|                     |                         |        |              |             |                |
|---------------------|-------------------------|--------|--------------|-------------|----------------|
| Bol. Cient.<br>CIOH | Cartagena<br>(Colombia) | No. 12 | Sep.<br>1992 | Pág. 3 - 12 | ISSN 0120 0542 |
|---------------------|-------------------------|--------|--------------|-------------|----------------|

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CAPA DE MEZCLA EN UN AREA DEL PACIFICO COLOMBIANO Y SU COMPARACION CON UN MODELO NUMERICO UNIDIMENSIONAL

Por:  
CC. Edgar Cabrera Luna\*

### RESUMEN

La estructura térmica del océano en su capa superior estratificada, conocida como capa de mezcla, produce un impacto en una gama importante de actividades como predicción del tiempo, clima y operaciones navales.

El presente documento resume los resultados de un proyecto de investigación adelantado a partir de 1988, en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y pretende, a través de la utilización de un "Modelo Numérico", estudiar la evolución de la capa superior del océano en un área del Pacífico Colombiano.

En el estudio se utilizaron los datos obtenidos en el área escogida para el experimento, durante tres cruceros oceanográficos (PACIFICO ERFEN), procesando la información con base en las fórmulas descritas por UNESCO (1984).

El Modelo de simulación fue desarrollado para ser utilizado en microcomputadores tipo PC.

### ABSTRACT

*The thermal structure of the Ocean in its stratified upper mixed layer causes an impact on a wide important spectrum of activities such as weather forecast, climate and naval operations.*

*This document is the result of a research project undertaken at the Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH (Oceanographic and Hydrographic Research Center) the purpose of this work, is to use a numerical model, to study the behavior of the upper mixed layer of the ocean around an specific area of the Colombian pacific.*

*The data used in the study was collected during three Oceanographic cruises (PACIFICO-ERFEN). The processing of the information is based on the formulae described by UNESCO. (1984).*

*The simulation Model was developed for a microcomputer PC-IBM-Compatible.*

---

\* Ocenógrafo Físico, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH. A.A. 982. Cartagena Colombia.

## INTRODUCCION

Las diversas actividades marítimas se ven afectadas por los procesos físicos que caracterizan al océano, especialmente por aquellos que tienen lugar en la región de interacción océano - atmósfera.

La representación sinóptica en tiempo real, precisa y confiable de la estructura térmica del océano, es de gran utilidad debido a la importancia e impacto que ejerce sobre un número destacado de procesos físicos.

El experimento desarrollado se enmarca dentro del contexto de la puesta en marcha de un Sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas y meteorológicas para las unidades de la Armada Nacional, cubriendo inicialmente áreas de interés estratégico.

Con base en el conocimiento climático general del área escogida se programó el experimento para cubrir las dos épocas definidas como: seca y lluviosa, utilizando los datos obtenidos durante los cruces oceanográficos:

|               |            |              |                 |
|---------------|------------|--------------|-----------------|
| PACIFICO XI   | ERFEN VIII | Noviembre 87 | ARC Malpelo     |
| PACIFICO XII  | ERFEN IX   | Marzo 88     | ARC Providencia |
| PACIFICO XIII | ERFEN X    | Noviembre 88 | ARC Providencia |

El objetivo propuesto fue el de comparar el perfil vertical de temperatura observado y el calculado por un modelo numérico unidimensional. Con base en el cálculo de balance de calor, se establece si el océano ganó o perdió calor y se observan las variaciones en la profundidad de la capa de mezcla.

Este artículo describe el sitio de estudio, presenta el modelo de simulación y los resultados obtenidos.

## AREA DE ESTUDIO

Para el experimento se escogió un sitio de estudio localizado al oeste de Bahía Málaga (Figura 1), en el Pacífico Colombiano, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud 03° 50' 00" N

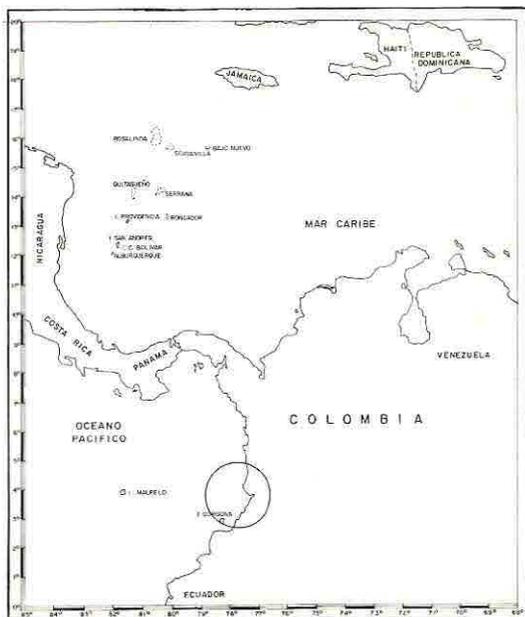
Latitud 77° 40' 00" W

La región se caracteriza por estar influenciada por dos periodos climáticos definidos como: seco/húmedo. Los estudios de los parámetros meteorológicos, basados en datos obtenidos de las estaciones costeras del HIMAT, indican que los mismos inciden en forma cíclica en las condiciones físicas del océano.

Como consecuencia de la presencia de un núcleo nuboso localizado sobre el centro y sur de la costa del Pacífico Colombiano, durante el período de estudio (Noviembre, 1988), la radiación media fue muy escasa. Paralelamente, el estado del mar de acuerdo a la escala Beaufort fue 2 y 3 (Herrera, 1988).

El análisis de los campos de temperatura y salinidad, a través de las curvas T/S establece la presencia de las siguientes masas de agua en la región estudiada del Pacífico Colombiano (Mendoza y Vanegas, 1988):

| <b>Agua Superficial</b>                          |  |
|--|--|
| De la superficie a 75 metros                     | Influenciada por la corriente de Colombia, aportes continentales y fenómenos meteorológicos.<br>Índices termohalinos: 27.87°, 30.12 ppm  |
| <b>Agua Subsuperficial</b>                       |  |
| De 75 metros a la máxima profundidad de muestreo | Utilizando el método de Enfield y comparando los resultados con los índices encontrados por Sverdrup (1942) se estableció que la mayor proporción de agua proviene del Pacífico Central.<br>Índices termohalinos 16.10°, 34.68 ppm |



**Figura 1** Area experimento Bahía Málaga

Se indica solamente las masas de agua superficial y subsuperficial, por cuanto son las únicas a tomar en consideración en el análisis de la evolución de la capa de mezcla.

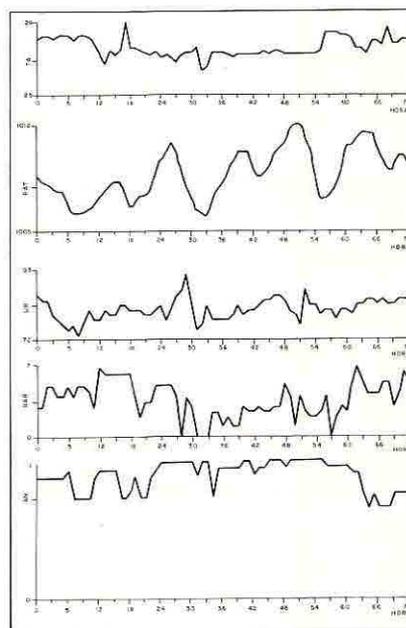
### EQUIPOS Y METODOS

El experimento tuvo una duración de 48 horas. Durante el mismo se registraron en forma horaria diferentes parámetros oceanográficos y meteorológicos de superficie.

La evolución de estos parámetros se muestra en la Figura 2

El procesamiento de la información se realizó con base en las fórmulas descritas por UNESCO (1984).

Debido a restricciones de equipo, se tomaron registros en forma alternativa con el XBT y el CTD. A fin de permitir la correlación de los perfiles de temperatura vs profundidad, se interpolaron los datos de CTD por el método cúbico "Cubic Spline".



**Figura 2.** Parámetros Atmosféricos durante el ejercicio.

### MODELO DE SIMULACION

Para simular el proceso de evolución de la capa de mezcla superior del océano (CMS) se desarrolló un programa en FORTRAN, que se identifica como "MODELO". Este programa tiene su base en el método usado por Thompson (1973) incluyendo las modificaciones introducidas por Mascarenhas (1982) referentes a los flujos de calor. El software se desarrolló para computadores tipo PC (Cabrera et al, 1989).

### Conceptos

La capa de mezcla está caracterizada por su turbulencia y la cuasi-homogeneidad de parámetros físicos escalares, como temperatura y salinidad. La homogeneidad del campo de velocidad no ha podido establecerse.

Esta característica de homogeneidad física no implica la constancia virtual de la velocidad del sonido, por lo que su propagación en la capa de mezcla no es uniforme en todos los sentidos, aumen-

| PARAMETRO       | SENSOR  |
|-----------------|---|
| Relación T/S    | CTD, Neil Brown, cada dos horas a partir de las 01:00       |
| Perfiles de °T  | XTB, Plessey Sippican, cada dos horas a partir de las 00:00 |
| Radiación solar | Radiómetro  |
| Presión atm.    | Barómetro Aneroide en milibares                             |
| Temp. aire      | Termómetro seco/húmedo                                      |
| Viento          | Anemómetro  |
| Nubosidad       | Visual  |

tando con la presión.

La "profundidad de capa" varía de cerca a la superficie hasta los 150 metros (Urick, 1982). El proceso de variación temporal de la profundidad se asocia con el balance de energía cinética y potencial en la capa superior del océano, a través de la superficie del mar.

En la figura 3 se observa un corte esquemático con tres sectores definidos así:

- Sector superior, en el cual las tensiones de cizallamiento producidas a raíz de la corriente  $\partial u / \partial z$  (current shear) generada por el viento, constituyen la fuente de energía más importante.

- Sector intermedio, homogéneo.

- Sector inferior afectado por el fenómeno de "entrainment" (arrastre), por medio del cual, aguas de características diferentes a la capa de mezcla (calmas y más densas) son atraídas y mezcladas en la capa superior turbulenta (Phillips, 1960).

Los mecanismos que producen el efecto de "entrainment", se encuentran aún en proceso de investigación experimental.

El proceso turbulento generado por "entrainment" es difícil de modelar, matemática o físicamente, en forma explícita.

Para calcularlo y estudiarlo, debe entonces, parametrizarse. Las variables independientes han sido deducidas por medio del análisis dimensional, corrigiendo sus constantes en forma experimental (Kitaigorodskii, 1960).

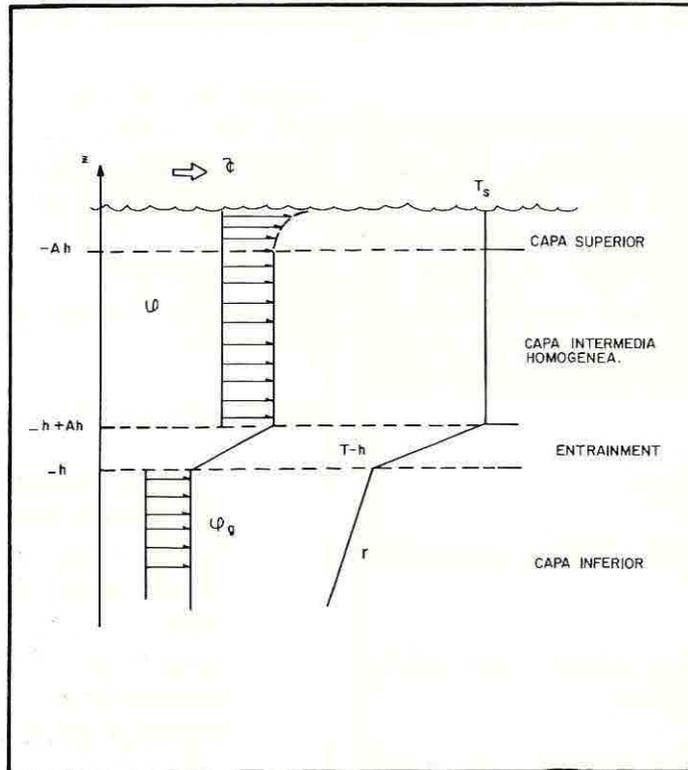
Kato y Phillips (1969), Kantha (1975), Kanta y Phillips (1977) presentan las siguientes relaciones entre la velocidad de "entrainment"  $W_e$  y la velocidad de fricción  $U_*$ .

$$W_e / U_* = f(Ri)$$

donde el número de Richardson Global  $Ri$  es:

$$Ri = g \frac{\Delta \rho h}{\rho_0 U_*^2}$$

- $U_*$  = velocidad de fricción
- $\Delta \rho$  = salto de densidad a través de la termoclina
- $\rho_0$  = densidad de referencia
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $h$  = profundidad de la capa



**Figura 3** Representación Teórica de las tres regiones de la capa de mezcla

Las suposiciones consideradas para modelar la capa de mezcla son:

- Despreciar el efecto de convección y difusión horizontal
- Suponer como turbulenta la capa superior del océano, despreciando la advección horizontal turbulenta y parametrizando los términos de Reynolds.
- Considerar sólo variaciones en densidad debido a la temperatura.

Con el fin de permitir la integración de las ecuaciones básicas de conservación de energía y turbulencia, los modelos de capa de mezcla consideran una capa superior del océano con homogeneidad aparente. Los transportes turbulentos se expresan en términos de cantidades promedio medias y forzantes externas.

Al suponer los procesos de difusión despreciables se obliga a considerar el "entrainment" como único factor de mezcla.

El "entrainment" está asociado con el hundimiento de la capa de mezcla, cuando la capa se erosiona éste desaparece.

La tasa "entrainment" se reduce a:

$$We = dh/dt, \text{ para } dh/dt > 0 \text{ y}$$

$$We = 0, \text{ para } dh/dt < 0.$$

La característica del modelo es el criterio de mezcla simple o sea, el número de Froude para la capa:

$$F = \frac{u^2 + v^2}{g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} h}$$

donde u, v, son las componentes horizontales de la velocidad si el número de Froude es  $> 1$ , la turbulencia arrastrará consigo más fluido del estra-

to inferior, por lo tanto la capa de mezcla se profundizará.

La prueba de los modelos de capa de mezcla exige un período de observaciones en un lugar fijo del océano. Al no contar con estaciones fijas que permitan observaciones meteorológicas y oceanográficas continuas se utilizaron las plataformas oceanográficas, permaneciendo en el área durante los días y épocas de medición considerados en el experimento objeto del presente trabajo.

### **Modelo de Simulación**

El diagrama de bloques del modelo se presenta en la Figura 4.

El programa "MODELO" asume un perfil inicial de temperatura en el océano.

La simulación se inicia mediante el cálculo de los flujos de calor para determinar el balance energético del océano.

Seguidamente el programa calcula el espesor de la capa de mezcla. Mediante un proceso iterativo se verifica el espesor de la capa de mezcla. Como parámetro indicador se usa el número de Froude "FROUDE" de tal forma que  $0 < \text{FROUDE} < 1$ .

Este proceso se repite para el número de horas especificadas previamente para la simulación.

Los datos de salida se presentan en forma tabular. Una primera tabla presenta las condiciones generales simuladas para cada hora, indicando la profundidad de la capa en metros, su temperatura en °C y su velocidad en cm/seg, en la dirección "X", "u" y "Y", "v".

La segunda tabla resume las características caloríficas y de radiación computadas con base en

los datos atmosféricos de entrada. Para cada hora se calcula el calor sensible "HS", calor latente "HL", radiación de onda larga "QN", radiación de onda corta "IZ1", radiación atmosférica difusa "QA", radiación de cuerpo negro "QB" y radiación global que llega a la superficie "IZ".

La última tabla presenta la evolución del perfil de temperatura desde la superficie hasta la profundidad especificada.

Los datos de entrada que requiere el modelo son:

- Localización geográfica: Latitud, longitud, indicando hemisferio.
- Fecha y hora de inicio de la simulación.
- Estación del año húmeda/seca.
- Tiempo de simulación en horas.
- Temperatura en °C de la superficie al inicio de la simulación.
- Parámetros ópticos del tipo de agua (Figuras 5 y 6)
- Perfil inicial dado en función de la profundidad en metros y la temperatura en °C.
- Presión atmosférica, en milibares
- Humedad relativa.
- Dirección del viento, en grados sexagesimales.
- Velocidad del viento en m/seg.
- Cobertura de las nubes, en décimos.

Las siguientes subrutinas se usan en el programa "MODELO".

|          |   |
|----------|---|
| CALFLU   | Calcula los flujos de calor                       |
| RADEEP   | Calcula la radiación solar que penetra al océano. |
| LEARQ    | Subrutina para leer los datos de entrada          |
| GRAVEARQ | Subrutina para grabar los resultados.             |



|                          | R    | $\xi$ 1(M) | $\xi$ 2(M) |
|--------------------------|------|------------|------------|
| AGUA CLARA (Krous 1972). | 0.4  | 5          | 40         |
| TIPO 1 (Jørlav, 1968)    | 0.58 | 0.35       | 23         |
| TIPO 1 (50m Superiores)  | 0.68 | 1.20       | 28         |
| TIPO 1A                  | 0.62 | 0.60       | 20         |
| TIPO 1B                  | 0.67 | 1.00       | 17         |
| TIPO II                  | 0.77 | 1.50       | 14         |
| TIPO III                 | 0.78 | 1.40       | 7.9        |

Tabla 1. Valores de los parámetros R,  $\xi$  1  $\xi$  2 para diferentes tipos de agua.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con base en los datos de entrada registrados que resumen las forzantes atmosféricas incidentes (Figura 2.) y los datos oceanográficos tipo observados, se formula el siguiente análisis comparativo con la simulación de la evolución horaria del perfil de temperatura desde la superficie hasta los 150 metros así como la radiación e intercambio de calor diario, efectuada por el modelo (Cabrera E. et al, 1989):

La variación de temperatura superficial calculadas por el modelo varían de 27°C a 30°C. La Figura 6

muestra el desarrollo en el tiempo de la CMS, las variaciones de la temperatura superficial e isoterma de la capa en el océano.

La profundidad de capa varía de 48 metros a 5 metros (superficie de sonar). Las componentes de la velocidad horizontal van aumentando en el tiempo y a medida que el espesor de la capa de mezcla decrece, esto debido a la consideración de que no hay flujo de agua a través de los límites de la capa.

Se utilizó el método aerodinámico de volúmen "bulk aerodynamic method" y en los datos meteorológicos de superficie, se simuló el intercambio de calor estableciéndose la ganancia o pérdida de calor en

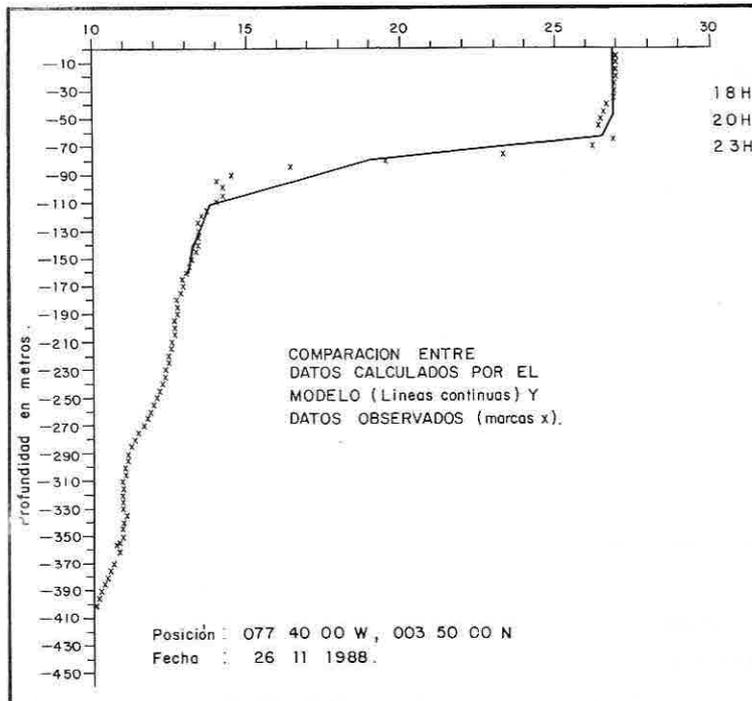


Figura 6. Evolución del perfil de temperatura. (Perfil de temperatura en °C).

el océano.

Se pudo apreciar una buena coincidencia entre los datos observados y los calculados (Figura 6).

El gradiente de temperatura en la termoclina, bajo la capa, es significativo. Se observa un decrecimiento de cerca de 10°C, debido a la presencia de la masa de agua inferior fría, definida como Masa de Agua Central del Pacífico Norte.

La salinidad del agua de mar varió de 16 p.p.m. en superficie, debido a la marcada incidencia de los aportes fluviales y pluviométricos en la zona, a cerca de 30 p.p.m., en profundidad

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Analizados los resultados obtenidos y los objetivos propuestos al inicio del presente trabajo, se efectúan las siguientes consideraciones a manera de conclusiones y recomendaciones:

a. Se comprobó la utilidad del "Modelo"; los resultados permiten observar una buena concordancia entre el cálculo efectuado por la simulación presentado en forma gráfica y los registros obtenidos durante el crucero oceanográfico, en concepto de la evolución de la CMS.

b. Los flujos de calor y de cantidad de movimiento usados para la previsión de la capa de mezcla, deberían ser medidos pero esto es casi imposible. La única situación satisfactoria y disponible en el momento es la suministrada por las fórmulas volumétricas aerodinámicas "bulk aerodynamic" que usan mediciones meteorológicas de superficie.

c. Como limitación se observa que la aproximación empleada por el "Modelo" para las variaciones de densidad considera únicamente, por medio de una regresión lineal, su relación con respecto a la densidad inicial y un factor correspondiente a la unidad más el coeficiente de dilatación térmica por variación de temperatura.

d. Se requiere efectuar nuevos experimentos en áreas de interés para la Armada Nacional de acuerdo a un plan ordenado y continuado. Un mejoramiento en esos aspectos depende principalmente de la continuación de programas y del mejor entendimiento de los procesos turbulentos dentro de la capa de mezcla.

e. La resolución del "Modelo" debe ser mejorada para la región del Pacífico, en la cual las variaciones de salinidad, temperatura y densidad del agua de mar, son significativas en la termoclina.

### BIBLIOGRAFIA

CABRERA, E. et al, 1989: "Estudio del Comportamiento de la Capa de Mezcla en un Area del Pacífico Colombiano, frente a Bahía Málaga, Informe Técnico sin publicar, CIOH, Colombia (2 Volúmenes).

CABRERA E. et al, 1989: "Programas en FORTRAN utilizados Experimento Océano - Atmósfera" Informe Técnico sin publicar, CIOH, Colombia.

CANE, M.A., and R.S. SCHOPH, 1983: "On Equato-

rial Dynamics, Mixed layer Physics and Sea Surface Temperature", J. Phys Oceanogr., 13, 915 - 935.

ELSBERRY, R.L., and N.T. CAMP, 1978: "Oceanic thermal response to strong atmospheric forcing events", J. Phys. Oceanography, 8, 206 - 214.

FRANKIGNOUL, C and K. HASSELMANN (1977): "Stochastic climate models, Part II Application to sea surface temperature anomalies and thermo-

- cline variability", *tellus*, 29, 289 - 305.
- HERRERA, J. 1989: "Informe de Comisión. Desarrollo del programa de Meteorología del Pacífico XIII-ERFEN X, HIMAT Colombia.
- KANTHA, L.M., 1975: "Turbulent entrainment at the density interface of two layer stably stratified fluid system", *Geophysical Fluid mech*, 79, 753 - 768.
- KANTA, L.H., O.M. PHILLIPS and R.S. AZAD, 1977: "On turbulent entrainment at a stable density interface", *J. Fluid mech.*, 79, 753 - 768.
- KATO, H., O.M. PHILLIPS, 1969: "On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid", *J. Fluid Mech.*, 37, 643 - 655.
- KITAIGORODSKII, S.A. 1960: "On the computation of the thickness of the wind mixing layer in the ocean" *Izv. Akad. Nauk. S.S.S.R., Geophys Serv* 3. 284 - 287.
- KRAUS, E. B., and J.S. TURNER, 1967: "A one dimensional model of the seasonal thermocline", *Il Tellus* 19, 98 - 105.
- MASCARENHAS, Jr.,A., 1984: "Os modelos unidimensionais de camada de mistura". *Anais do I Seminario de Modelagem Numerica do Mar*, INPE, Sao Jose dos Campos, 1 - 30.
- MASCARENHAS, Jr.,A., 1985: "Una revisao sobre o calculo da tensao de cisalhamento do vento sobre oceano", *Boletin do Instituto Oceanografico da USP*, 1 - 10.
- MENDOZA, L y L. VANEGAS, 1988: "Estudio de las Condiciones oceanográficas del Pacífico Colombiano durante 1987". Tesis Oceanógrafo Físico. Escuela Naval "Almirante Padilla". Colombia.
- MUNK, W.H., and A. ANDERSON, 1948: "Notes on a theory of the thermocline. *J. Mar. Res.* 7, 276 - 295.
- MUNK, W.H., and A. ANDERSON, 1948: "Measurements of the Turbulent heat flux over the sea". *J. mar. Res.*, No. 7 U.S.A. Naval Operation Analysis (1972). Second Edition. Naval Institute press. Annapolis, Maryland. 372 pp.
- PAULSON, C.A., y SIMPSON, J. J., 1977: "Irradiance Measurements in the Upper ocean". *J. of Phys Oceanogr*, No. 7 U.S.A.
- PHILLIPS, O.M., 1977: "Entrainment", in 'Modeling and predictions of the Upper Mixed layers of the Ocean', E.B. Krauss, ed., pergamon Press, New York, 325 p.
- THOMPSON, R.O.R.Y., 1974: "Predicting the characteristic of the well-mixed layer". Wood Hole Oceanographic Institution. Technical report WHOI-74 - 82.
- THOMPSON, R.O.R.Y., 1976: "Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean". *Journal of Physical Oceanography*, 6, 496 - 503.