

# Proceso de mezcla vertical en las masas de agua de la Cuenca del Pacífico Colombiano y comportamiento anual de sus características termohalinas

*Vertical mixing process of water masses over the Colombian Pacific Ocean and the annual behavior of its thermohaline characteristics*

Igor Málikov & Nancy Villegas<sup>1</sup>

Grupo de Investigación en Oceanología CENIT. Departamento de Geociencias. Ciudad Universitaria. Carrera 30 No. 45 – 01, Ed. Manuel Ancizar. Of. 331. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Tel: 57-1- 3165000 Ext. 16544. Email: ig\_nan@yahoo.com, nlvillegasb@unal.edu.co

---

Málikov, Igor & Villegas, Nancy (2010): Proceso de mezcla vertical en las masas de agua de la cuenca del Pacífico Colombiano y comportamiento anual de sus características termohalinas. [*Vertical mixing process of water masses over the Colombian Pacific Ocean and the annual behavior of its thermohaline characteristics*]. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 35, pp. 102-112. Bogotá, Colombia.

---

**Artículo de Investigación Científica** Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2010; aceptado: 22 de noviembre de 2010.

## Resumen

La investigación se basó en 5 masas de agua identificadas previamente en la columna vertical de la Cuenca del Pacífico Colombiano (CPC): Agua Superficial Colombiana Ecuatorial Tropical; Agua Central Superior Ecuatorial del Pacífico; Agua Intermedia Antártica; Agua Antártica de Fondo o Circumpolar y Agua Profunda del Pacífico. Por medio del análisis realizado, se identificó el aporte de las masas de agua en el proceso de mezcla vertical en los transectos 2 y 4°N, se describió el desplazamiento de las masas de agua y el comportamiento anual de sus características termohalinas, se determinaron los potenciales sectores de surgencia en la región, se identificó la estabilidad en las aguas intermedias y se corroboró la homogeneidad propia de las aguas en capas inferiores, donde la CPC presentó lentos movimientos locales.

**Palabras clave:** Cuenca del Pacífico Colombiano, mezcla, isopícnas, masas de agua.

## Abstract

This study was based on 5 water masses previously identified over the Colombian Pacific Ocean (CPO): Colombian Tropical Equatorial Surface Water; Central Pacific Equatorial Superior Water; Antarctic Intermediate Water; Antarctic Circumpolar Water and Pacific Deep Water. The contribution of water masses in the process of vertical mixing in the transects 2 and 4° N was identified. The movement of water masses and the annual behavior of thermohaline characteristics were described. Potential upwelling areas in the region were determined. The stability of intermediate waters was identified. The homogeneity of the deep water in lower layers was confirmed, where the CPC presented slow local movements.

**Key Words:** Colombian Pacific Ocean basin, mixing, isopycnic, water masses.

## Extended Abstract

The 5 water masses previously identified over the CPO are shown for 2 and 4°N transects (figs. 1 and 2): Colombian Tropical Equatorial Surface Water (CTESW); Central Pacific Equatorial Superior Water (CPESW); Antarctic Intermediate Water (AIW); Antarctic Circumpolar Water (ACW) and Pacific Deep Water (PDW). The CPO is located in the Panama Bight region between 01° 30' and 07° 10' North and 77° 40' and 82° West (Fig. 3), where the distribution of vertical water masses, its monthly climatological displacement and the oscillation of its thermohaline characteristics were obtained through the analysis of water proportion in the mixing process, Helland Hansen's T-S diagrams and isopycnic curves. The comparison of mixing proportions between water masses over 2 and 4°N allows conclude that the Southern coast in 2°N transect and the central region in 4°N transect are predisposed to upwelling processes due to thermohaline circulation. The isopycnics identified for the analysis of the water masses movements at vertical level are: 22 isopycnic for the CTESW, the 23.5 for the PESW, the 25 for the AIW, the 27 for the ACW and 27.5 isopycnic for the PDW (Figs. 4 and 5). Following the annual behavior of 22 isopycnic it is observed that the influence of atmospheric dynamics in the air – water interphase allows the homogenization of the thermohaline characteristics in the surface layer during the year (Table 1). The analysis of the annual behavior of 23.5 isopycnic allows to see that in the mixing process between CPESW and AIW exists a proportional contribution of water. The same conclusion is obtained from the 25 isopycnic, in relation to the mixing between AIW and ACW. The comparison of 27 isopycnic with the T and S average values shows great stability of the thermohaline circulation in the ACW during the year (Table 1). The annual behavior of 27.5 isopycnic, T and S of the PDW reveals that practically there is no variation during the year, which is characteristic of deep layers (Table 1). In conclusion: 1) the chosen isopycnics for the study of the water masses movement during the year in the AIW and ACW allow to see a grand thermohaline stability in the intermediate layers of the CPO; 2) the deep waters present a low variability in their thermohaline characteristics showing homogeneity and more slow and local movements; 3) the upwelling processes over the CPO due to thermohaline circulation are presented in the Southern coast in 2°N transect and the central region in 4°N transect.

## Introducción

Las masas de agua marina mantienen constantes sus parámetros físicos durante un gran periodo, siendo así posible identificar las condiciones físico-geográficas de su región de origen (Malinin, 1998). Para definir los contornos extremos de masas de agua también se utilizan propiedades químicas como el oxígeno disuelto pero, debido a que esta propiedad no es conservativa y se ve influenciada por la actividad biológica y la disolución química de la materia orgánica que cae a través de la columna de agua, su utilización es limitada (Emery, 2001). Una masa de agua puede ser reconocida por tener un área de origen común, puede formarse por interacciones entre aire y mar o, por mezcla de dos o más cuerpos de agua. Una vez formadas, las masas de agua se hunden a una profundidad determinada según su densidad relativa a las aguas de más arriba y más abajo de ellas en la columna vertical (Panzarini, 1970). En sí, la importancia del estudio de masas de agua radica en la posibilidad de caracterizar los índices termohalinos del área de estudio y conocer la dinámica y el desplazamiento de aguas de una región a otra.

Miller *et al.* (2006) realizaron un compendio de estudios de la dinámica de las aguas sobre el Océano Pacífico Este, donde mostraron una amplia gama de trabajos investigativos de las aguas de Ecuador, Perú y Chile, pero muy pocos sobre las aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano (CPC). Se han estudiado masas de agua con datos de algunas de las expediciones oceanográficas llevadas a cabo en la CPC desde 1996, lo cual se encuentra en informes técnicos restringidos al público. En Moreno *et al.* (2008) se determinaron las masas de agua superficiales de la región y se analizó su distribución espacial climatológica mensual del período 1971-2000. En Villegas & Málikov (2009) se logró la definición de la estructura vertical de las masas de agua por transeptos latitudinales y longitudinales teniendo en cuenta valores mensuales climatológicos de temperatura (T) y salinidad (S) del mismo período. Lo que aún no se conoce en la región de estudio es el desplazamiento de la climatología mensual de las masas de agua a nivel vertical, ni la proporción de agua que aporta cada una en el proceso de mezcla. Este conocimiento, que depende especialmente del análisis de la densidad, es la base

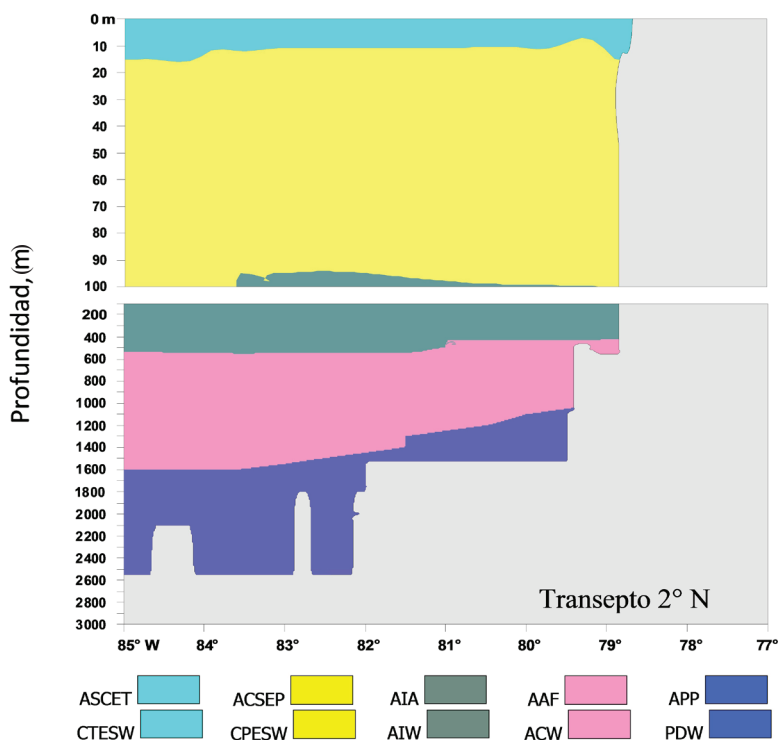
científica para el estudio de la circulación termohalina y para la inferencia de algunas otras características de las masas de agua, como su origen e incluso, sus propiedades biológicas (Barnes, 1973).

Los datos oceanográficos de la CPC que se tienen hasta el momento no son aún suficientes para caracterizar la circulación termohalina del área de estudio (Devis *et al.*, 2002), por lo tanto, es necesario utilizar información simulada por medio del modelamiento matemático.

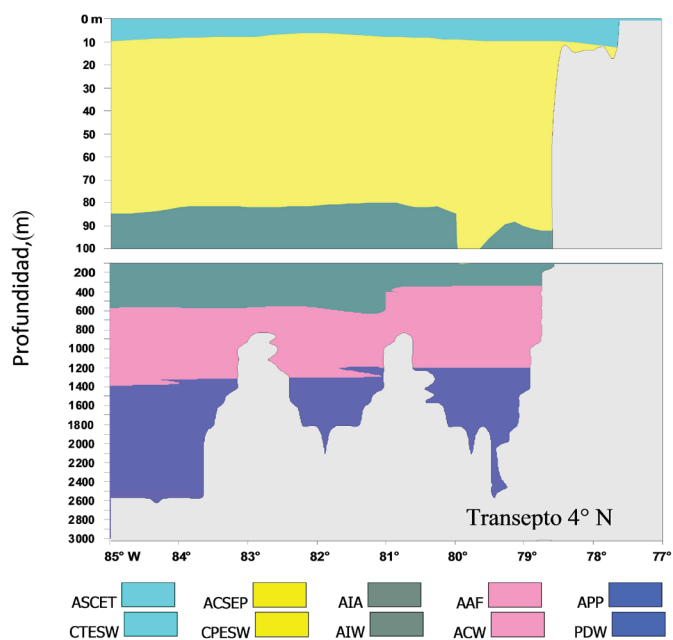
Con el Modelo Termodinámico Tridimensional (MT3D) realizado para la CPC a través de información atmosférica y oceanográfica global e información hidrográfica regional correspondiente a los ríos San Juan, Patía y Mira (Karlin & Villegas, 2004; Villegas & Málikov, 2006), se obtuvo suficiente información de promedios mensuales

de T y S para 50 años, validada con datos de cruceros oceanográficos, permitiendo además el diseño de un atlas climatológico de las características termohalinas y dinámicas de la región.

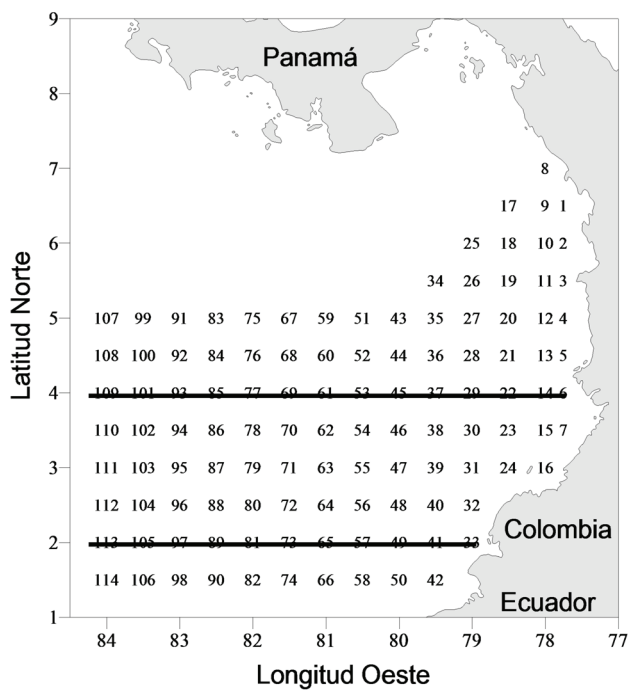
En el presente trabajo se utilizaron las 5 masas de agua verticales identificadas en el mencionado atlas (Villegas & Málikov, 2009) a fin de calcular la proporción del aporte de cada masa de agua en el proceso de mezcla en los transectos 2 y 4°N (figs. 1 y 2) y describir la climatología mensual del desplazamiento de las masas de agua en el período 1971-2000, teniendo en cuenta la oscilación de T, S y la profundidad, de acuerdo con isopiecnas de referencia escogidas para cada masa de agua. Los índices termohalinos obtenidos del análisis de la climatología mensual del desplazamiento de las masas de agua se presentan para todos los meses del año.



**Figura 1.** Masas de agua verticales en el transecto 2°N de la CPC. Fuente: Villegas & Málikov 2009.  
*Figure 1. Vertical Water Masses over 2°N transect of CPO.*



**Figura 2.** Masas de agua verticales en el transepto 4°N de la CPC. Fuente: Villegas & Málikov, 2009.  
*Figure 2. Vertical Water Masses over 4°N transept of CPO. Source: Villegas & Málikov, 2009.*



**Figura 3.** Cuenca del Pacifico Colombiano (CPC) con transeptos.  
*Figure 3. Colombian Pacific Ocean (CPO) with transepts.*

## Metodología

**Área de estudio y datos utilizados:** la CPC se sitúa en la región conocida como Panamá Bight entre los 01°30' y 07°10' N y los 77°40' y 82°00' O (Fig. 3).

Las series de tiempo mensuales de T y S utilizadas para la obtención de la climatología del período 1971–2000, son las resultantes del MT3D de la CPC, las cuales fueron validadas con información in situ de la región en Villegas (2003). El modelo, explicado en forma detallada en Villegas & Málíkov (2009), se realizó para el estudio de la formación y cambios de las características termodinámicas de las aguas de la CPC en diferentes escalas espacio – temporales para la región, tomando información atmosférica global del archivo NCEP-NCAR (Kalnay *et al.*, 2001), hidrológica regional (Vörösmarty *et al.*, 1996), batimetría marina de la CPC (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO5/TOPO/ETOPO5/>) y campos de T y S del World Ocean Atlas (WOA, 1994).

**Método de trabajo:** por medio del análisis de la proporción de mezclas, diagramas T-S de Helland Hansen y curvas isopícnicas (Valerianova & Zukov, 1974; Mamayev, 1975), se obtuvo la climatología mensual de la distribución de masas de agua verticales, su desplazamiento y el comportamiento de la oscilación de sus características termohalinas.

Para describir las masas de agua en términos de T y S el oceanógrafo Helland Hansen ideó el diagrama T-S, el cual relaciona a estas dos variables. El diagrama T-S provee un método gráfico para determinar la densidad de acuerdo con los correspondientes valores de T y S en cada profundidad, a través de trazos de líneas de igual valor de densidad (isopícnas) que puede ser expresada como peso específico relativo  $\sigma_t = 10^3 \left( \frac{\rho}{\rho_m} - 1 \right)$ , donde  $\rho$  es la densidad del agua marina en kg/m<sup>3</sup> y  $\rho_m$  es la densidad máxima del agua pura en kg/m<sup>3</sup>.

El diagrama T-S es un plano de coordenadas X-Y, donde en el eje de las X se localizan los valores de S, en el eje de las Y a los valores de T y, en el fondo del diagrama, se trazan las isopícnas. Seguidamente, se procede a ubicar los puntos de coordenadas T y S que representan a cada profundidad de una estación oceanográfica, los cuales se unen por una curva denominada curva T-S.

En el diagrama T-S, los valores están en una posición estable unos con respecto a otros cuando sus densidades aumentan a medida que aumente la profundidad. Además, el relativo grado de estabilidad de la estratificación puede inferirse de la relación entre el ángulo de las líneas de T y la pendiente de la curva T-S. Si las curvas se cortan con las isopícnas en ángulos grandes, la columna de agua cambia de densidad rápidamente. Esto significa que cambios menores de densidad no provocarán el hundimiento o movimiento del agua a gran distancia y, por lo tanto la columna de agua es estable (Malinin, 1998). Si las curvas hacen un ángulo pequeño con las isopícnas, el agua cambia de densidad sólo levemente con el aumento de la profundidad, así pequeños cambios de la densidad provocarán el movimiento del agua a diferentes profundidades más rápidamente (Doronin, 1980).

Al identificar las masas de agua mediante el diagrama T-S, se unen los puntos por orden de profundidad, siendo cada tipo de agua un punto en el diagrama y las observaciones situadas sobre la recta que une estos dos puntos, corresponderán a la mezcla de ambos tipos en distintas proporciones. Cuando dos tipos de agua A y B, son unidos por una recta, ésta representa a la mezcla entre dos masas de agua. En el estudio de la circulación termohalina, es habitual calcular la proporción que cada tipo de agua (A y B) aporta a la mezcla. Para ello, y debido a que la S y la T son propiedades conservativas, se pueden establecer las expresiones:

$T = T_{(A)} m_{(A)} + T_{(B)} m_{(B)}$  y  $S = S_{(A)} m_{(A)} + S_{(B)} m_{(B)}$ , donde  $m_{(A)}$  y  $m_{(B)}$  son la proporción de agua que intervienen en la mezcla de masas de agua A y B. En estas expresiones, la proporción o masa de aguas A y B está representada en tanto por uno, es decir,  $m_{(A)} + m_{(B)} = 1$ .

Así mismo, las observaciones que correspondan a la mezcla de tres tipos de agua en diferentes proporciones, aparecerán dentro del triángulo de mezcla definido por dichos tipos y un conjunto de mezclas de tales tipos en distintas proporciones será una curva dentro del triángulo. Se presentaría entonces un diagrama T-S de una estación hipotética, mostrando tres tipos de agua A (somero), B (intermedio) y C (profundo), que unidos forman un triángulo de mezcla que define todas las combinaciones posibles de mezcla entre los tres tipos. Las posibles rectas AB y BC serían casos particulares; entre ellas, los puntos experimentales en el interior del triángulo ABC corresponderían a una mezcla de los 3 tipos. De ellos, un punto n, más cercano y por tanto con una mayor proporción del tipo B, se denominaría núcleo de B y se describiría la proporción de cada masa de la siguiente manera:

$T = T_{(A)}m_{(A)} + T_{(B)}m_{(B)} + T_{(C)}m_{(C)}$  y  $S = S_{(A)}m_{(A)} + S_{(B)}m_{(B)} + S_{(C)}m_{(C)}$ , donde  $m_{(A)}$ ,  $m_{(B)}$  y  $m_{(C)}$  son la proporción de las masas de agua A, B y C, teniendo que  $m_{(A)} + m_{(B)} + m_{(C)} = 1$ . De la primera expresión se determinan los valores de T y S, correspondientes a cualquier punto de mezcla teniendo los datos de las masas de agua A y B. Los valores de T y S en un punto, están relacionados así:  $T = [(S_{(B)}T_{(A)} - S_{(A)}T_{(B)}) / (S_{(B)} - S_{(A)})] + [(T_{(B)}T_{(A)}) / (S_{(B)} - S_{(A)})]$ .

Al mismo tiempo, se puede determinar el porcentaje de aporte de cada una de las aguas de mezcla teniendo los índices termohalinos (Valerianova & Zukov, 1974). Para este fin es suficiente solucionar el sistema de dos ecuaciones lineales:  $T = T_{(A)}m_{(A)} + T_{(B)}m_{(B)}$  y  $m_{(A)} + m_{(B)} = 1$ , de donde se obtiene que  $m_{(A)} = (T - T_{(B)}) / (T_{(A)} - T_{(B)})$  y  $m_{(B)} = (T_{(A)} - T) / (T_{(A)} - T_{(B)})$ . De la misma manera, se determinan las características termohalinas de las masas de agua en el caso de tres masas de agua.

Finalmente, para el análisis del movimiento de masas de agua se tienen en cuenta las oscilaciones temporales de T, S y de la profundidad de isopícnas de referencia escogidas para cada masa de agua. Los índices termohalinos y la profundidad correspondiente a cada valor de la isopícnica se presentan en forma de tabla para la visualización del desplazamiento vertical de las masas de agua en el tiempo.

## Resultados y discusión

La estructura vertical de las masas de agua de la CPC identificadas en Villegas & Málikov (2009) se observan en las figuras 1 y 2, que representan a los transeptos 2°N y 4°N respectivamente. De las figuras se puede observar a la masa de Agua Superficial Colombiana Ecuatorial Tropical (ASCET), denominada así porque al comparar sus características termohalinas (Tab. 1), éstas no coinciden con las masas de agua mencionadas por Wyrski (1967) debiendo ser de una temperatura mayor a 25°C pero de salinidad menor a 33. Esta diferencia permite sugerir que se trata de una masa de agua propia de la región de estudio, además se conocen nombres universalmente aceptados para masas de agua oceánicas, que no tienen características similares a la mencionada y se denominan diferente en otras fuentes (Tomcsak & Stuart-Godfrey, 2001). En las figuras. 1 y 2 también se muestran a las masas de Agua Central Superior Ecuatorial del Pacífico (ACSEP), masa de Agua Intermedia Antártica (AIA), masa de Agua Antártica de Fondo o Circumpolar (AAF) y masa de Agua Profunda del Pacífico (APP). Cada masa de agua se diferencia con un color para un mejor análisis de su desplazamiento vertical a lo largo de los transeptos.

La diagramación del triángulo de mezcla mostró que en el transepto 2°N (Fig. 1) en la profundidad promedio 15m se lleva a cabo la mezcla de aguas entre el ASCET y el ACSEP, donde la proporción de masas de agua aportadas en el proceso de mezcla es igual a 30 y 70% respectivamente sobre el sector más cercano a la costa, 40 y 60% en el sector central y 50% en el sector oceánico. Esto indica un aumento de la predominancia del ASCET en el proceso de mezcla sobre el ACSEP con su alejamiento de la costa, corroborando resultados de la simulación matemática de la circulación de las aguas realizado en Villegas & Málikov (2006).

A los 100 m la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el ACSEP y el AIA es de 50 y 50% en el sector cercano a la costa, 46 y 54% en el sector central y 51 y 42% en el sector oceánico, mostrando prácticamente una igualdad en la predominancia de las dos masas de agua en el proceso de mezcla. A los 500 m la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el AIA y el AAF es de 50 y 50% cerca de la costa, 56 y 44% en la región central y 55 y 45% en la región oceánica, lo que también indica una igualdad promedio en las proporciones involucradas en el proceso de mezcla a lo largo de este transepto. A los 1400 m la proporción de aguas aportadas en la mezcla entre el AAF y el APP es de 30 y 70% en el sector cercano a la costa, 38 y 62% en el sector central y 40 y 60% en la región oceánica, determinando que en el proceso de mezcla de aguas en las capas inferiores predomina el APP el cual, aún siendo más denso que el AAF, tiene mayor predominancia convirtiéndose potencial para procesos de upwelling a lo largo del transepto 2°N, mostrado también en Díaz *et al.* (2008).

Para el transepto 4°N (Fig. 2) a los 10 m, la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el ASCET y el ACSEP es igual a 60 y 40% sobre el sector más cercano a la costa, 30 y 70% en la región central y 50 y 50% en la oceánica, ésta distribución indica que fenómenos de surgencia son menos probables en el sector costero de este transepto que en la región central. Para los 90 m la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el ACSEP y el AIA es de 49 y 51% en el sector cercano a la costa, 45 y 55% en el sector central y 47 y 53% en el oceánico, indicando una estabilidad promedio en la columna de agua en esta profundidad. A los 500 m, la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el AIA y el AAF es de 40 y 60% cerca de la costa, 60 y 40% en la región central y 50 y 50% en la región oceánica, mostrando potencial de inicio procesos de surgencia termohalina en el sector costero. A 1400 m la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el AAF y el

APP es de 52 y 48% en el sector cercano a la costa, 48 y 52% en el sector central y 50 y 50% en el oceánico, indicando una estabilidad promedio. Al comparar las proporciones de mezcla entre masas de agua en los dos transeptos se puede observar que en la CPC los sectores más predispuestos a procesos verticales de surgencia debido a la circulación termohalina son la costa sur a los 2°N y la región central a los 4°N, tal como fue descrito en Díaz *et al.* (2008).

En cuanto al desplazamiento de masas de agua a nivel vertical, el análisis se efectuó teniendo en cuenta las isopícnas promedio identificadas: la isopícnica 22 para el ASCET, la 23.5 para el ACSEP, la 25 para el AIA, la 27 para el AAF y la isopícnica 27.5 para el APP (figs. 4 y 5 y Tab. 1).

**Tabla 1.** Climatología mensual (1971-2000) de la profundidad (Z) de las isopícnas y de las características termohalinas (T y S) de las masas de agua en la CPC.

Table 1. Monthly climatology (1971-2000) of the thermohaline characteristics (T and S) and isopycnic depths (Z) in the water masses over the CPO.

| Isopícnas y masas de agua<br>Isopycnics and water masses | Características<br>Characteristics | Meses – Months |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  |                                    | E<br>J         | F<br>F | M<br>M | A<br>A | M<br>M | J<br>J | J<br>J | A<br>A | S<br>S | O<br>O | N<br>N | D<br>D |
| 22 – ASCET<br>CTESW                                      | Z, m                               | 0              | 0      | 0      | 0      | 0      | 5      | 5      | 8      | 10     | 10     | 10     | 5      |
|  | T, °C                              | 24,93          | 25,05  | 25,31  | 25,55  | 26,18  | 25,69  | 25,60  | 25,18  | 25,17  | 24,95  | 24,46  | 24,36  |
|  | S ‰                                | 33,41          | 33,57  | 33,85  | 33,91  | 33,88  | 33,88  | 33,83  | 33,77  | 33,69  | 33,62  | 33,57  | 33,45  |
| 23.5 – ACSEP<br>CPESW                                    | Z, m                               | 30             | 25     | 25     | 20     | 30     | 30     | 30     | 30     | 40     | 40     | 40     | 40     |
|  | T, °C                              | 21,10          | 21,14  | 20,78  | 21,57  | 20,34  | 21,31  | 21,65  | 21,89  | 21,01  | 21,30  | 21,23  | 20,80  |
|  | S ‰                                | 33,98          | 33,97  | 34,10  | 34,11  | 34,27  | 34,24  | 34,22  | 34,16  | 34,19  | 34,13  | 34,06  | 34,05  |
| 25 – AIA<br>AIW  | Z, m                               | 90             | 75     | 75     | 65     | 50     | 60     | 70     | 75     | 75     | 85     | 90     | 90     |
|  | T, °C                              | 16,10          | 16,52  | 16,24  | 16,32  | 17,01  | 16,87  | 16,61  | 16,45  | 16,99  | 16,76  | 16,54  | 16,48  |
|  | S ‰                                | 34,57          | 34,54  | 34,61  | 34,59  | 34,54  | 34,58  | 34,62  | 34,64  | 34,57  | 34,57  | 34,56  | 34,54  |
| 27 – AAF<br>ACW  | Z, m                               | 750            | 700    | 700    | 700    | 700    | 700    | 700    | 700    | 720    | 720    | 720    | 710    |
|  | T, °C                              | 7,09           | 7,44   | 7,39   | 7,34   | 7,36   | 7,36   | 7,39   | 7,44   | 7,41   | 7,43   | 7,46   | 7,51   |
|  | S ‰                                | 34,65          | 34,64  | 34,64  | 34,64  | 34,64  | 34,64  | 34,63  | 34,64  | 34,64  | 34,64  | 34,64  | 34,64  |
| 27.5 – APP<br>PDW  | Z, m                               | 1500           | 1400   | 1400   | 1400   | 1400   | 1400   | 1300   | 1400   | 1400   | 1450   | 1450   | 1400   |
|  | T, °C                              | 3,28           | 3,73   | 3,75   | 3,69   | 3,63   | 3,67   | 4,06   | 3,70   | 3,71   | 3,50   | 3,51   | 3,71   |
|  | S ‰                                | 34,68          | 34,69  | 34,69  | 34,69  | 34,68  | 34,68  | 34,69  | 34,69  | 34,69  | 34,69  | 34,69  | 34,69  |

La isopícnica 22 del ASCET en los primeros cinco meses (Fig. 4) se localiza a 0 m con un aumento paulatino de T y S. Desde junio se registra una profundización a los 5 m que se hace mayor llegando a 10 m en septiembre con un salto a 5 m nuevamente en diciembre, registrando disminución de T y S para el segundo semestre (Fig. 5). Este comportamiento se debe a los procesos de mezcla en el ASCET dados por la influencia de la dinámica atmosférica en la interfase mar – aire propia de la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante el año (Tab. 1).

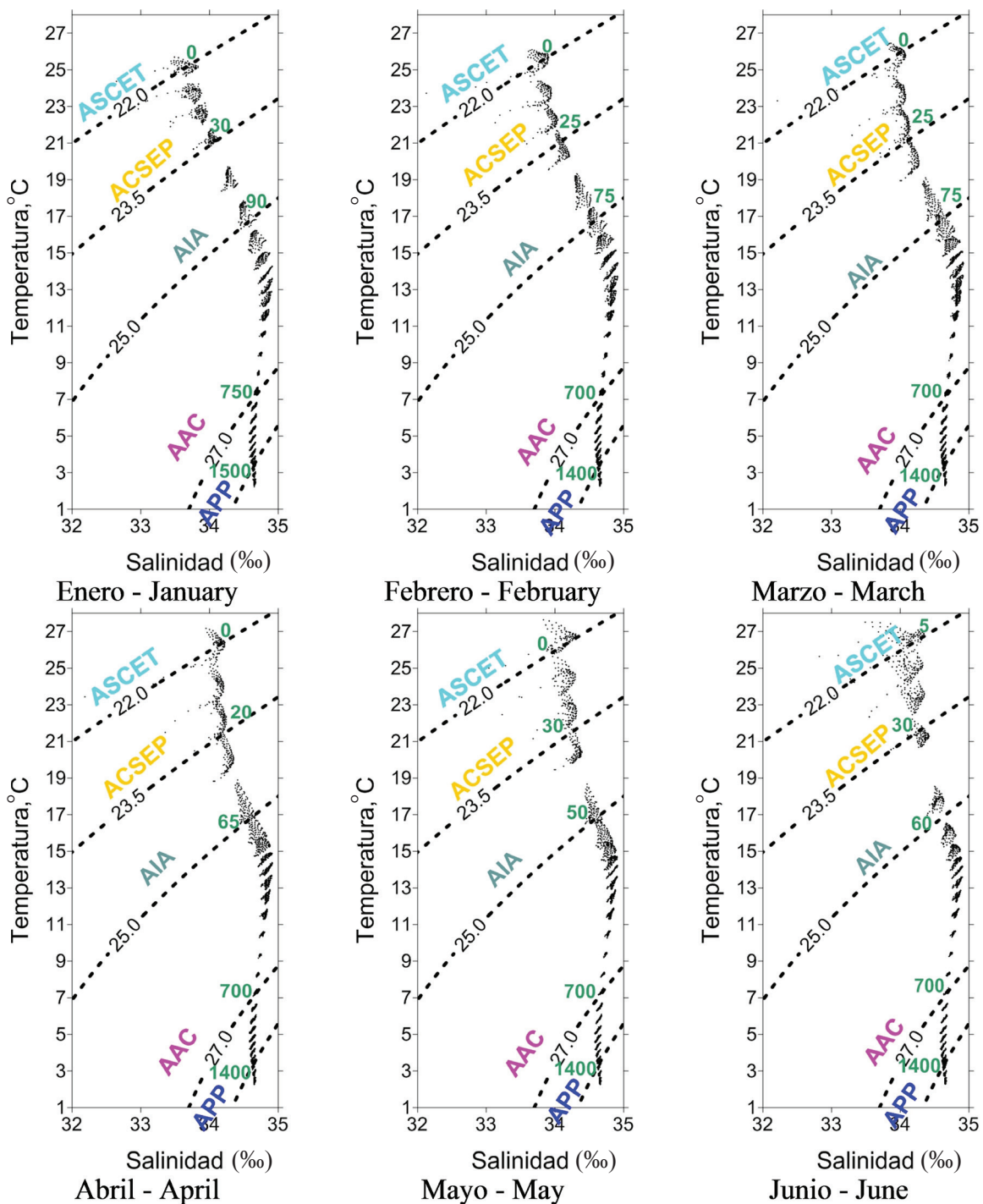
a los 90 m en diciembre (Fig. 5), acompañada de una oscilación estable de T y S (Tab. 1), lo que muestra la proporcionalidad de aguas aportadas en la mezcla de AIA y AAF.

La isopícnica 23.5 del ACSEP muestra un desplazamiento vertical de ascenso fluctuando desde 30 m en enero hasta 20 m en abril con una leve disminución de T y aumento de S (Fig. 4). A partir de mayo la isopícnica 23.5 inicia una profundización desde 30 m hasta los 40 m en septiembre, que permanece estable hasta diciembre de la misma manera como sucede con la T y la S, corroborando lo visto en el análisis de transeptos, donde se observó que entre esta masa de agua y la siguiente, el aporte de agua en el proceso de mezcla es prácticamente proporcional.

La isopícnica 27 del AAF se desplaza desde capas más profundas a partir de enero con 750 m (Fig. 4) hasta la capa de 700 m en agosto, donde inicia una fluctuación entre 720 y 710 hasta diciembre. Los valores promedio de T varían muy poco al igual que la S, la cual muestra gran estabilidad de la circulación termohalina en la AAF a lo largo del año (Tab. 1).

La isopícnica 25 del AIA se ubica en los 90 m en enero (Fig. 4) e inicia su desplazamiento hacia aguas más superficiales llegando a los 50 m en mayo donde la T es mayor y la S menor. En junio se observa su profundización a los 60 m que aumenta paulatinamente hasta llegar

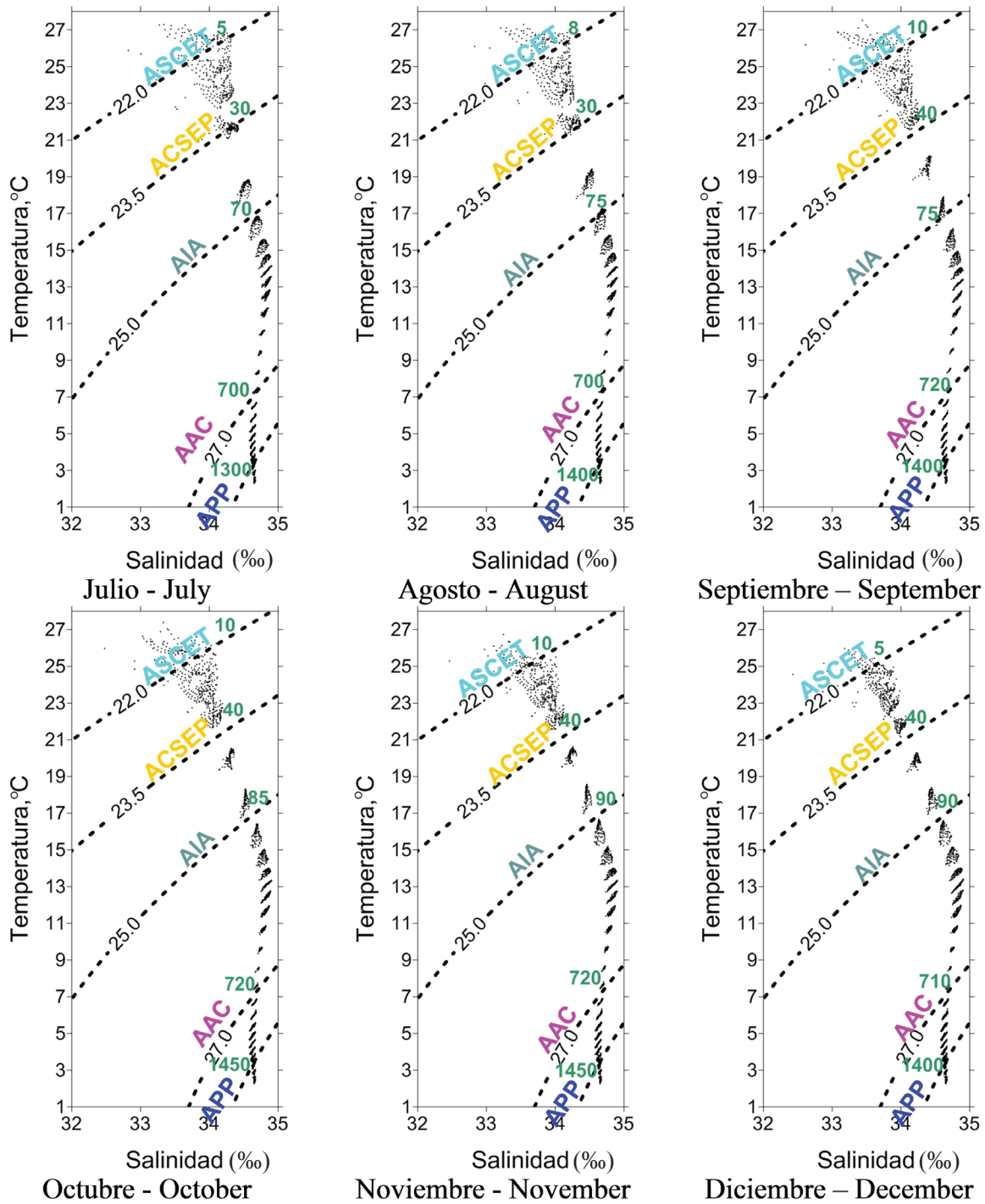
La isopícnica 27.5 del APP inicia en enero a los 1500m, asciende hasta 1300m al llegar a julio con el correspondiente aumento de T y disminución de S. A partir de agosto se profundiza a 1500m, luego a 1450m y vuelve a los 1400m en diciembre. La T y S prácticamente no varían como es característico de las aguas en capas inferiores (Tab. 1) y como se mostró en Villegas & Málikov (2006) y Villegas & Málikov (2009), donde debido a las cordilleras submarinas que se encuentran en la región, los movimientos en estas profundidades son mucho más lentos, homogéneos y locales, concordando con Lonsdale (1977), quien afirma que las características batimétricas obstaculizan la entrada de masas de agua profundas y de fondo hacia la CPC.



**Figura 4.** Curvas T-S de Helland – Hansen y desplazamiento de masas de agua de la CPC según isopicnas seleccionadas ASCET  $\sigma_t = 22$ ; ACSEP  $\sigma_t = 23.5$ ; AIA  $\sigma_t = 25$ ; AAC  $\sigma_t = 27$  y APP  $\sigma_t = 27.5$ . Primer semestre de la climatología mensual del periodo 1971-2000.

**Figure 4.** Helland – Hansen’s T-S curves and displacement of water masses over CPO according to selected isopycnics CTESW  $\sigma_t = 22$ ; CPESW  $\sigma_t = 23.5$ ; AIW  $\sigma_t = 25$ ; ACW  $\sigma_t = 27$  and PDW  $\sigma_t = 27.5$ . First semester of monthly climatology 1971-2000 period.





**Figura 5.** Curvas T-S de Helland – Hansen y desplazamiento de masas de agua de la CPC según isopícnas seleccionadas ASCET  $\sigma_t=22$ ; ACSEP  $\sigma_t=23.5$ ; AIA  $\sigma_t=25$ ; AAC  $\sigma_t=27$  y APP  $\sigma_t=27.5$ . Segundo semestre de la climatología mensual período 1971-2000.

*Figure 5.* Helland – Hansen's T-S curves and displacement of water masses over CPO according to selected isopycnics CTESW  $\sigma_t=22$ ; CPESW  $\sigma_t=23.5$ ; AIW  $\sigma_t=25$ ; ACW  $\sigma_t=27$  and PDW  $\sigma_t=27.5$ . Second semester of monthly climatology 1971-2000 period.

## Conclusiones

Del análisis realizado, se concluye que en el transepto 2°N, a medida que las aguas se alejan de la costa, existe un aumento de la predominancia de las masas de agua ASCET en el proceso de mezcla sobre el ACSEP. En cambio en las capas inferiores, las masas de agua APP predominan sobre las AAF en el proceso de mezcla, mostrando el potencial de ocurrencia de fenómenos de surgencia.

En el transepto 4°N la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el ASCET y el ACSEP indica que los fenómenos de surgencia son menos probables en el sector costero que en la región central. Por otro lado, en las capas inferiores, la proporción de aguas aportadas en el proceso de mezcla entre el AIA y el AAF muestra un potencial inicio de procesos de surgencia termohalina en aguas intermedias del sector costero.

El aporte principal de este trabajo radica en que se definió que en la CPC los sectores más predispuestos a procesos verticales de surgencia debido a la circulación termohalina son: la costa sur a los 2°N y la región central a los 4°N.

Por otro lado, se verificó que el comportamiento anual de las masas de agua en las capas superiores se debe a los procesos de mezcla activados por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En cambio las isopícnas escogidas para el estudio del desplazamiento de masas de agua durante el año en las AIA y AAF muestran gran estabilidad de la circulación termohalina en las capas intermedias de la CPC. Asimismo, las aguas inferiores muestran características termohalinas poco variables, lo cual, sumado al poco desplazamiento de la isopícnica escogida, muestra que los movimientos en estas profundidades son mucho más lentos, homogéneos y locales.

## Referencias

- BARNES, H. (1973): *Oceanography and Marine Biology*, Annual Review, **3**: 306-317.
- DEVIS, A., GARCÍA, I., MÁLIKOV, I. & N. VILLEGAS. 2002. *Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana*. DIMAR. Tumaco. 110 p.
- DÍAZ, D., VILLEGAS, N. & MÁLIKOV, I. (2008): Descripción de los ciclos de ascenso de las aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano durante el año y su relación con factores meteorológicos asociados con la Zona de Convergencia Intertropical. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó: Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*. **27** (2). 200 – 206.
- DORONIN, Y. (1980): *Dinámica del Océano*. Leningrado, Hidrometeoizdat. 304 p.
- EMERY, W. J. (2001): *Water types and water masses*. University of Colorado, Boulder, CO, USA. Academic Press. 3179 – 3187.  
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO5/TOPO/ETOPO5/>
- KARLIN, L. & VILLEGAS, N. (2004): Modelación de circulación y de estructura termohalina de las aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano. *Jóvenes científicos*. St. Petersburg. 116-125.
- KALNAY, E. R. KISTLER, COLLINS, W. S. SAHA, WHITE, G. J. WOOLLEN, CHELLIAH, M. W. EBISUZAKI, KANAMITSU, M. V. KOUSKY, VAN DEN DOOL, H. R. JENNE, FIORINO, M. (2001): *The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation*. Bull. Amer. Meteor. Soc. **82**: 247-268.
- KARLIN, L. & VILLEGAS, N. (2004): Modelación de la circulación y de la estructura termohalina de las aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano. Selección de trabajos de jóvenes científicos en Hidrometeorología. St. Petersburg. p. 116-125.
- LONSDALE, P. 1977. Inflow of bottom water to the Panama Basin. *Deep-Sea Research* **24**:1065-1101. (35, 36).
- MAMAYEV, O. (1975): *Temperature-Salinity analysis of world ocean waters*. Elsevier Oceanography Series. 374 p.
- MILLER, CH., D., QUADFASEL, FIEDLER P & LAVIN, M. (2006): *Progress in Oceanography*. A review of Eastern Tropical Pacific Oceanography. Vol.69. Nos. 2-4. Special Issue. Elsevier. 300 p.
- PANZARINI, R. (1970): *Introducción a la oceanografía general*. Universitaria de Bs. As. p. 67-70.

- PINEDA, A. (1997): La corriente de Cromwell durante el fenómeno La Niña de 1996 y el fenómeno El Niño de 1997, sobre la Cuenca del Pacífico Colombiano. *Boletín Científico CCCP* **6**: 109 – 122.
- MALININ, V. 1998. *Oceanología general I: procesos físicos*. RSHU. St. Petersburg. 342 p.
- MORENO, J., VILLEGAS N. & MÁLIKOV, I. (2008): Análisis de la relación entre masas de aire y masas de agua superficiales en la Cuenca del Pacífico Colombiano para el establecimiento de estaciones hidrometeorológicas de monitoreo. *Boletín Científico CIOH* **26**. 188 – 204.
- TOMCSAK, M. & STUART-GODFREY, J. (2001): *Regional oceanography: an introduction*. Division of Oceanography. Australia, pdf 1 version. 391 p.
- VALERIANOVA, M. & ZUKOV, L. (1974): *Trabajos prácticos en oceanología general*. LSHI. 93 p.
- VILLEGAS, N. 2003. *Leyes de formación de estructura termodinámica de la Cuenca del Pacífico Colombiano*. Tesis Doctoral para obtención del título de Ph.D. en ciencias físicas y matemáticas. Universidad Hidrometeorológica del Estado Ruso. San. Petersburgo, Rusia: RSHU. 189 p.
- VILLEGAS, N. & MÁLIKOV, E I. (2006): Modelación de la estructura dinámica de las Aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano. *Boletín Científico CCCP* **13**: 97-114.
- VILLEGAS, N. & MÁLIKOV, E I. (2009). *Atlas de las características termohalinas y dinámicas de las aguas de la Cuenca del Pacífico Colombiano: con base en simulación matemática*. Unibiblos Universidad Nacional de Colombia. 218 p.
- VÖRÖSMARTY, C.J., FEKETE, B. & TUCKER, B.A. (1996): *River Discharge Database, Version 1.0 (RivDIS v1.0), Volumes 0 through 6. A contribution to IHP-V Theme 1. Technical Documents in Hydrology Series*. UNESCO, Paris.
- WOA. (1994): NOAA/NESDIS/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER. 1994. *WORLD OCEAN ATLAS 1994. (WOA94)//CD-ROM Data sets Version 4.*– Washington: Ocean Climate Laboratory National Oceanographic Data Center USA, Department of Commerce, USA.
- WYRTKI, K. 1967. Circulation and water masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *J. Oceanology and Limnology*. **1** (2): 117-147.