

ARTÍCULO

## Variaciones temporales termo-halinas en la Cuenca de Colombia

### Termo-haline temporal variations in the Colombian Basin

Fecha recepción: 2009-08-28 / Fecha aceptación: 2009-10-28



**Carlos Alberto Andrade**, carlos.alberto.andrade@hotmail.com  
Grupo de Investigaciones Oceanológicas, Escuela Naval  
"Almirante Padilla" Cartagena de Indias, D. T. y C., Colombia.

### Resumen

Se utilizaron doce secciones de CTD hechas en los buques oceanográficos de la Armada Nacional durante 1997 en la Cuenca de Colombia, que se describen y se compararon con los datos históricos tomados por el R/V 'Atlantis' en 1933, el R/V 'Crawford' en 1958, los buques oceanográficos ARC "San Andrés" en 1969 y 1975, ARC "Providencia" en 1981 y el ARC "Malpelo" en 1993, para analizar y examinar tendencias termo-halinas de largo plazo. Se encontró una concentración significativa de Agua Subsuperficial Subtropical que se despliega hacia el sur y ocupa la totalidad de la Cuenca de Colombia debajo de la piconocline hasta 300 m con salinidades máximas de  $37 \pm 0.2$  ups. Análisis de datos históricos disponibles sugieren una escala de reemplazo de alrededor de 50 años con Aguas Centrales del Atlántico Sur en el mar Caribe suroccidental. El Agua Intermedia Antártica entra por la cuenca de Venezuela y se disemina hacia el norte y pasa al mar Caimán. El posible intercambio de masa de agua central detectado respondería a una tendencia de largo plazo que la convertirían en un factor de cambio climático frecuente para la cuenca.

**Palabras claves:** Mar Caribe suroccidental, masas de agua, índices termo-halinos, cambio climático.

### Abstract

Twelve oceanographic CTD sections made by the oceanographic ships of the Colombian Navy in the Colombian Basin are described and compared with historical data taken by R/V 'Atlantis' in 1933 and by the R/V 'Crawford' in 1958, the Colombian Oceanographic Ships ARC "San Andres" in 1969, 1975, ARC "Providencia" in 1981 and ARC "Malpelo" in 1993, to analyze and examine the long term thermo-haline tendencies. Subtropical Underwater mass was found displayed southward occupying the entire Basin below the piconocline down to 300 m with maximum salinities of  $37 \pm 0.2$  psu. Analysis of historical data available suggests the possible replacement with South Atlantic Central Water Mass in the South West Caribbean and a time scale of

about 50 years. Intermediate Antarctic Water comes from the Venezuela Basin and it is driven northward passing to the Cayman Sea. It is possible that the intermittent replacement of water mass would respond to a long term tendency that poses it as a frequent climatic change factor for the basin.

**Key words:** Caribbean sea, water masses, thermo-haline circulation, climatic change, Ocean basins.

## Introducción

La Cuenca de Colombia se encuentra limitada en el Este por la cordillera Beata en el Caribe central e incorpora el sector profundo del océano (>4000 m) entre las masas de tierra de Sur y Centroamérica. La elevación centroamericana está fracturada por algunos pasajes profundos y van desde 1800 m entre Banco Pedro y Banco Serranilla a algunos pocos metros sobre la plataforma continental de Honduras (Figura 1a). Esta incluye las plataformas continentales de Colombia, Panamá, Nicaragua y el este de Honduras. El límite norte está definido por la presencia de Española y Jamaica. Los bajos y cayos del Archipiélago de San Andrés y la elevación centroamericana cierran esta cuenca, separándola del mar Caimán (figura 1b).

En la Cuenca de Colombia la intensa interacción océano-atmósfera a través del estrés del viento y forzamiento termo-halino (más “halino” debido a la extraordinariamente alta precipitación y descarga fluvial), maneja flujos energéticos y cambiantes en el tiempo, la corriente del Caribe, la recirculación en el Caribe suroccidental llamada el Giro de Panamá-Colombia [1] y su brazo costero, la contracorriente Panamá-Colombia [2]. Estos rasgos han sido analizados con base en las trayectorias de boyas de deriva [3], [4] y altimetría [5], [6]. Además, la estructura termo-halina en la Cuenca de Colombia ha sido estudiada de manera esporádica [7], [8], [9] estableciendo la presencia de las distintas mezclas y su relación con los fenómenos regionales, sin que se hayan determinado cambios temporales en las masas de agua presentes en las cuencas.

Estudios anteriores en el Caribe central fueron considerados como referencias en el límite oriental de la Cuenca de Colombia y fueron comparados con los hechos para este estudio en 1997. Las observaciones

hechas dentro de la cuenca nos dieron nuevas perspectivas de características poco documentadas de la oceanografía física del Caribe suroccidental. En esta cuenca, la temperatura superficial del agua varía entre 26 °C en la estación de vientos (al final del invierno boreal) hasta 29 °C durante la época de lluvias (al final del otoño boreal). Las aguas superficiales tienen salinidades típicas de 36 ups con variaciones estacionales [10].

Las aguas costeras en la costa colombiana están fuertemente afectadas por la descarga fluvial del río Magdalena, el mayor contribuyente de aguas continentales al Caribe, localizado en la costa sur. Los ríos Atrato y Sinú afectan significativamente la región costera durante la estación de lluvias (ver figuras 1a y 1b) y una gran precipitación ocurre a lo largo de la costa centroamericana [5]. La relación T-S en la Cuenca de Colombia parece afectarse por estos forzamientos, así como por la variabilidad climática que no ha sido estudiada anteriormente y fue estimada utilizando datos históricos.

En este contexto, se quiso analizar la condición de la mezcla de Agua Subsuperficial Subtropical (también conocida como Agua Central del Atlántico Norte) utilizando los datos históricos que se pudieron obtener de los atlas hechos a principios del siglo pasado y de los datos oceanográficos de los cruceros realizados por la Armada Nacional de Colombia desde los años 1960s, para efectuar una comparación de las observaciones en el largo plazo.

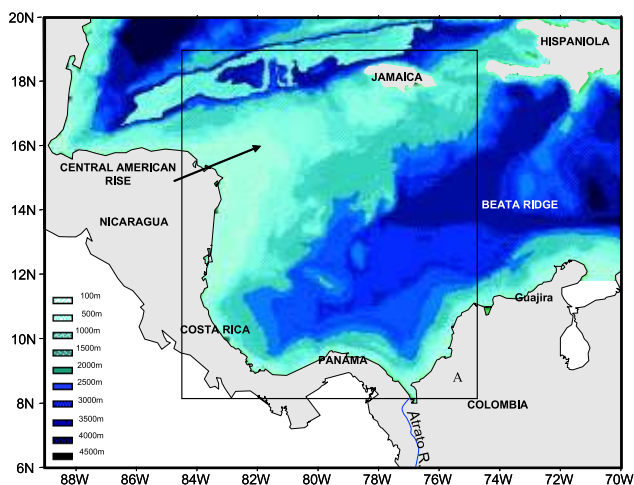
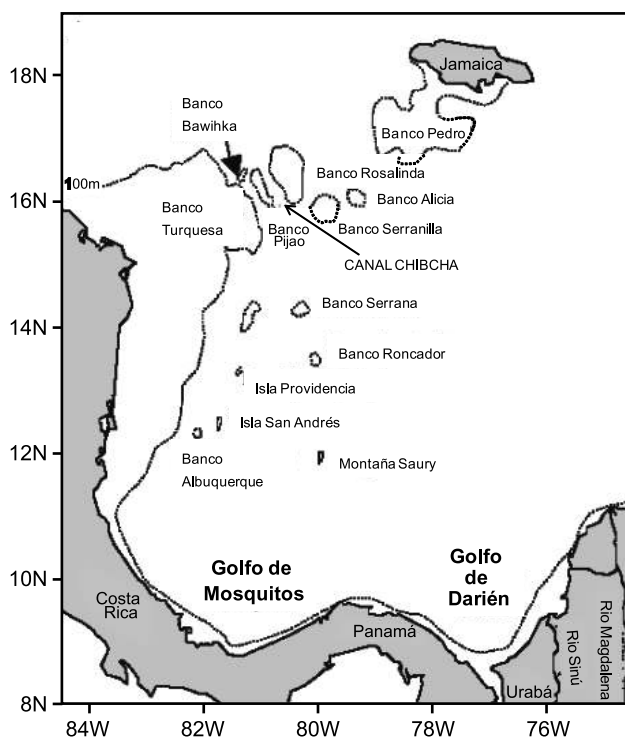


Figura 1a. La topografía submarina.



**Figura 1b.** Detalles geográficos del mar Caribe suroccidental.

## Metodología

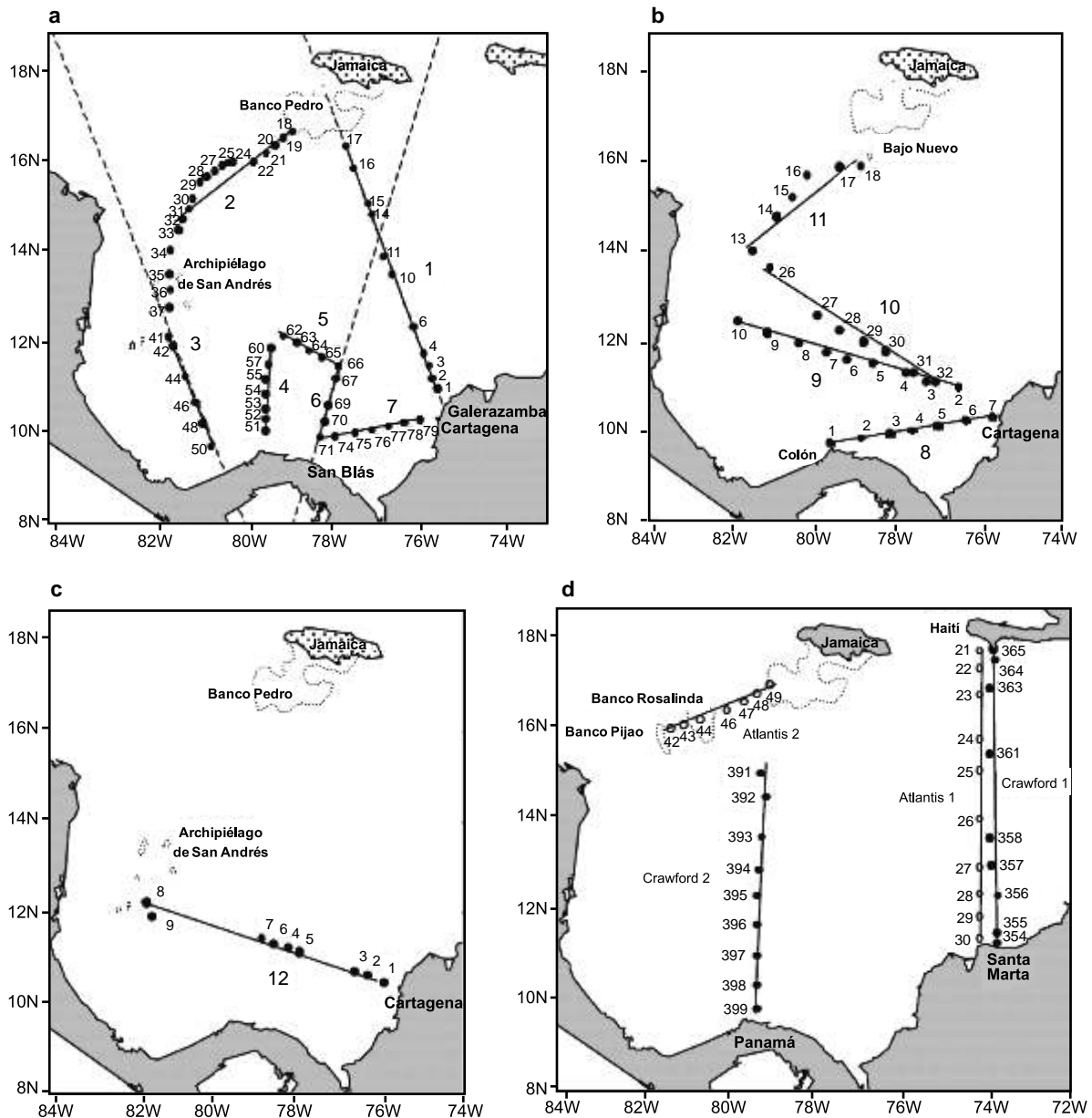
Para explorar las características oceánicas de la Cuenca de Colombia se organizaron una serie de observaciones oceanográficas y se tomó ventaja de la navegación rutinaria de los buques oceanográficos colombianos para efectuar siete secciones de CTD en junio-julio de 1997 durante el “veranillo”, cubriendo la totalidad de la cuenca (figura 2a). Cuatro transeptos fueron hechos en septiembre-octubre de 1997 durante la estación de lluvias (figura 2 b) y una sección más en noviembre de 1997 al inicio de la estación de vientos (figura 2c). Los datos históricos comprenden los tomados por el R/V 'Atlantis' en 1933, [11] y durante 1958 por el R/V 'Crawford', [12], los buques oceanográficos ARC “San Andrés” en 1969, 1975, el ARC “Providencia” en 1981 y el ARC “Malpelo” en 1993, y se utilizaron para analizar y examinar tendencias de largo plazo (figura 2 d).

Las secciones 1, 3 y 6 fueron realizadas a lo largo de las trayectorias de las órbitas del satélite TOPEX-Poseidón con propósitos comparativos. Las estaciones

de la sección 2 fueron hechas entre los bancos y bajos a través de la elevación Centroamericana, perpendicular a la corriente dominante. En las secciones 4 y 7, las estaciones fueron hechas perpendiculares a la plataforma continental centroamericana. Las secciones 5, 8, 9 y 12 fueron realizadas a lo largo de la ruta entre Cartagena y San Andrés, la sección 10 a lo largo de un segmento de la elevación Centroamericana y la sección 11 entre Colón (Panamá) y Cartagena. Las estaciones fueron hechas hasta la máxima profundidad posible con el cable disponible.

Las variables oceánicas *in situ* fueron observadas con un perfilador CTD SeaBird, calibrado en la fábrica justo antes del crucero de julio de 1997. Las mediciones del CTD fueron probadas contra los valores obtenidos en una estación oceanográfica de control hecha con doce botellas Nansen en profundidades estándar afuera de la Bahía de Cartagena cada vez que el buque zarpaba. Los índices de error fueron tomados por la comparación de los datos del CTD con los termómetros de inversión y salinómetros de inducción Beckman con un error medio de 0.03 °C y 0.005 ups respectivamente. En ambos casos, la media fue considerada suficientemente pequeña que no se consideró necesario hacer ninguna corrección adicional a los datos del CTD. Los datos fueron tratados mediante el programa SEASOFT y los modos gráficos fueron hechos por los programas de Golden Software Inc. ® SURFER y GRAPHER para Windows.

Una imagen de temperatura superficial del mar del AVHRR en baja resolución del mar Caribe para julio 1997 fue obtenida del sitio web de NASA-JPL. Para obtener una mejor resolución en el Caribe suroccidental, se obtuvieron imágenes con datos en HRPT del sensor AVHRR de los satélites NOAA. Los datos fueron capturados en la antena del CIOH y del programa CARIACO en Venezuela cuando las condiciones de recepción fueron mejor allá. Se utilizó el algoritmo triple-multicanal-noche para las imágenes nocturnas y el multicanal para las imágenes de día, [13]. La temperatura superficial del mar fue calculada con una precisión de cerca de 0.5 °C. Las imágenes fueron graficadas en una proyección Mercator con una resolución de 1 km por píxel.



**Figura 2.** La posición geográfica de las estaciones utilizadas en el análisis. Un total de 130 estaciones de CTD fueron realizadas en 1997 como sigue: a) 79 estaciones hechas en junio-julio en 7 secciones en la totalidad de la cuenca, b) 42 estaciones hechas en septiembre-octubre entre Cartagena y la isla de San Andrés y entre Colón y Cartagena y c) 9 estaciones hechas en noviembre, d) Los datos tomados fueron comparados con dos secciones hechas por el R/V 'Atlantis' en 1933 (círculos abiertos) y otras dos secciones hechas por el R/V 'Crawford' en 1958 (círculos cerrados).

## Resultados

### Distribuciones horizontales

La temperatura superficial del mar desde el AVHRR

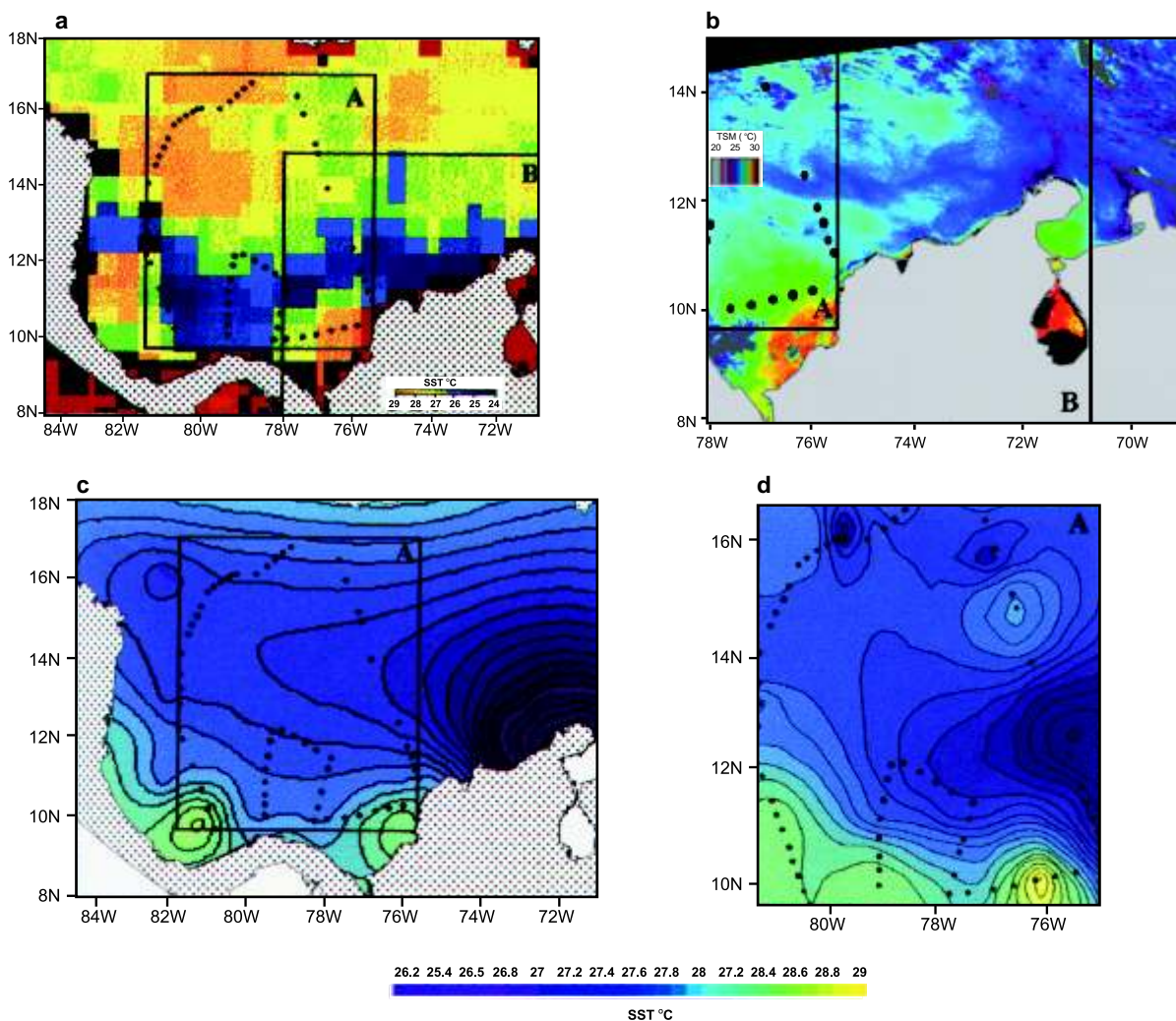
para la época del crucero de junio-julio de 1997 (figuras 3a y 3b) mostró una lengua fría ( $<27^{\circ}\text{C}$ ) extendiéndose hacia el oeste desde la zona de afloramiento en el Caribe central y dos áreas de aguas más cálidas ( $>28^{\circ}\text{C}$ ) en la parte sur. Una estaba en el

golfo del Darién, una piscina cálida que incorpora las plumas de los ríos Magdalena, Atrato y Sinú y la otra en el golfo de Mosquitos. Las observaciones de la temperatura superficial del mar *in situ* (figura 3c) corroboraron estos campos y añadieron rasgos más detallados, que fueron anomalías tanto más frías como más calientes. El campo de temperatura superficial fue similar a los valores climáticos en el Atlas NOAA World Ocean Data, [14] para esta época (figura 3d).

En cuanto a la salinidad, los valores en el atlas mencionado se encuentran entre 32.0 ups (unidades prácticas de salinidad) a 36.5 ups con un fuerte gradiente meridional desde 35.0 ups, hacia la costa sur

(figura 4a). Las salinidades en superficie son similares al promedio en la mayor parte del área excepto en el suroeste. Los valores máximos de salinidad (36.4 ups) se encontraron cerca de 12° N, 78° W, en el golfo del Darién. Las salinidades mínimas de cerca de 35.4 ups se encontraron en las estaciones próximas a las costas de Colombia y Panamá (figura 4b). Las observaciones mostraron un gradiente meridional generalizado así como un fuerte frente zonal en el Caribe central.

Típicamente la salinidad mostró un máximo subsuperficial. Para la profundidad de máxima salinidad de cada perfil (figura 4c) la tendencia meridional es evidente con valores más profundos en



**Figura 3.** La temperatura superficial del mar en el Caribe suroccidental desde (a) Imagen de baja resolución del AVHRR del 8 de julio de 1997, (b) Imagen del AVHRR de alta resolución del 5 de julio de 1997, (c) Valores climáticos de superficie del Atlas del Océano [14] y (d) Los contornos de los datos *in situ* para junio-julio 1997.

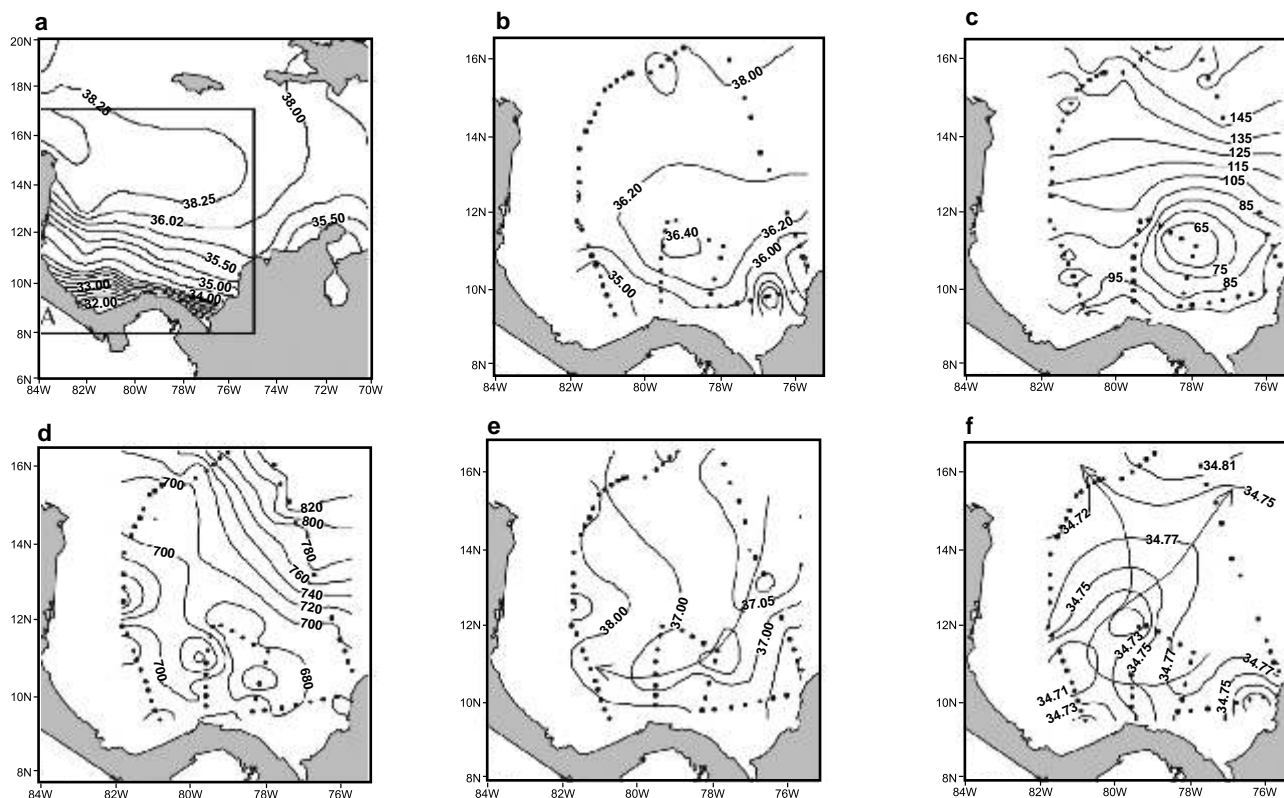
la parte norte alcanzando los 150 m. Las mínimas profundidades de 50 m ocurrieron en la misma área donde la capa de mezcla fue más somera y hubo máxima salinidad en la superficie en el golfo del Darién.

Un mínimo de salinidad se encontró entre 650 y 820 m, el núcleo del Agua Intermedia Antártica en el área, [15]. Las isóbatas en el Caribe central se asomaron hacia la elevación centroamericana (figura 4d). Los contornos muestran la profundidad de máxima salinidad sugiriendo que la actividad de media escala en el área sur puede causar esta distribución.

Conocimiento de la circulación subsuperficial puede también ser obtenida mediante la aplicación del método de núcleo [16] contorneando las más altas concentraciones de una variable en una capa específica, con las salinidades máximas y mínimas en el área. Los máximos valores se encontraron en el área

noreste con una extensión hacia el suroeste. Cerca de las costas, los máximos valores nunca llegaron a 37.0 ups. Los mínimos valores se encontraron en la parte norte mostrando como la elevación centroamericana limita la circulación del Agua Subtropical Subsoperficial hacia el mar Caimán (figura 4e) a través de los angostos pasos de dicha elevación.

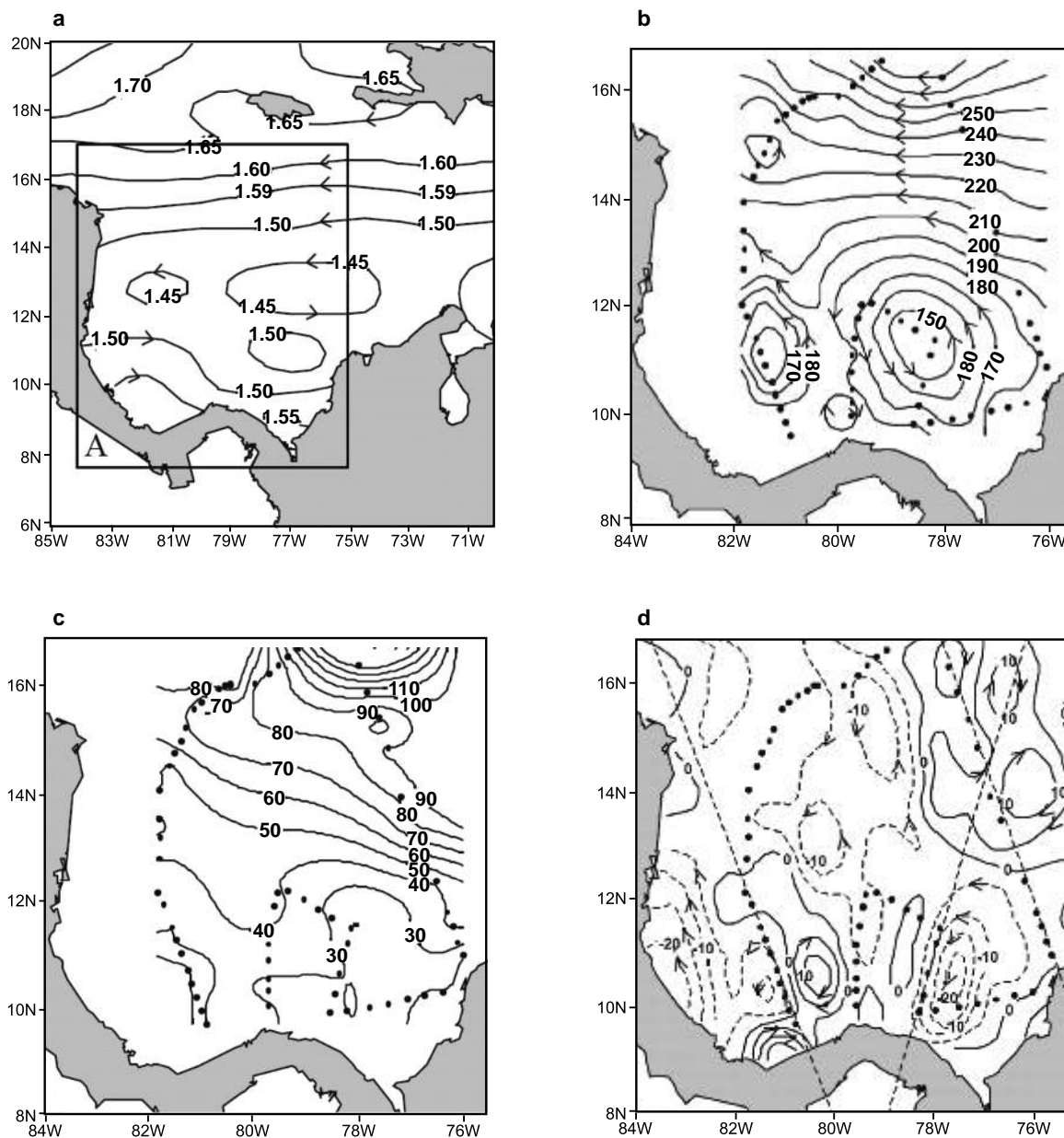
Siguiendo el núcleo de mínima salinidad, se puede seguir la influencia del Agua Intermedia Antártica en la Cuenca de Colombia. Los valores más bajos se encontraron en la parte sur y el agua se dispersa hacia el norte con salinidades más bajas de 34.8 ups pasando al mar Caimán como una delgada lengua que cruza el canal Chibcha en la elevación de Centroamérica. Estudios anteriores encontraron que las salinidades más altas de 34.75 ups estaban restringidas al Este de 75° N [16] pero estos valores se encontraron llenando la totalidad de la Cuenca de Colombia en 1997 (figura 4f). La topografía dinámica media de superficie calculada



**Figura 4.** Características de la salinidad en el Caribe suroccidental durante junio-julio de 1997 (a) Contornos de la salinidad de los valores climáticos en el Atlas del Océano (NOAA World Ocean Data [14], (b) La salinidad superficial medida *in situ*, (c) La profundidad de máxima salinidad, (d) La profundidad de mínima salinidad, (e) El núcleo de máxima salinidad y (f) El núcleo de mínima salinidad. Las flechas indican la evolución de los núcleos.

desde los valores climáticos del atlas [14], muestran rasgos conocidos de la circulación en superficie, como es el constante flujo hacia el oeste en la parte norte,

una circulación ciclónica en el golfo en el suroeste con un flujo hacia el Este y una contracorriente a lo largo de la costa colombiana (figura 5a).



**Figura 5.** (a) Topografía dinámica junio-julio calculada desde los datos climáticos (1900-1993) de la región, basada en los datos del Atlas de NOAA [14], (b) Topografía dinámica de la superficie referenciada a 1200 dbar calculada con los datos el crucero de junio-julio de 1997, (c) La profundidad de la capa de mezcla del mismo crucero y (d) Contornos de la anomalía del nivel del mar desde los datos del TOPEX-Poseidón y ERS-2 adaptado del CCAR para el 3 de julio de 1997.

## Estructura de los perfiles verticales

La topografía dinámica de superficie (figura 5b) fue calculada relativa a 1200 dbar, teniendo en cuenta que no se debe esperar un flujo puramente geostrofico debido al esfuerzo adicional del estrés del viento en la capa de Ekman. El relieve total fue de unos 50 centímetros dinámicos. El flujo en la parte norte fue generalmente al oeste pero contenido a seguir los rasgos topográficos del fondo: por ejemplo en Banco Pedro y girando hacia el noroeste hacia el mar Caimán. En la parte sur, aparecen dos remolinos ciclónicos, uno en el golfo de Mosquitos y otro, del doble de tamaño, en el golfo del Darién. El flujo hacia el oeste interactúa con estos remolinos con meandros. En el sureste el flujo ciclónico forma parte de la contracorriente Panamá-Colombia a lo largo de la costa colombiana. Un rasgo anticiclónico más pequeño se observó cerca de Panamá.

La profundidad de la capa de mezcla (figura 5c) varió entre 10-20 m en el centro del golfo del Darién hasta 160 m al sur de Jamaica. Esto muestra el flujo al oeste de la corriente del Caribe en la presencia del movimiento ciclónico en el Darién como los demás patrones han mostrado. Por otro lado, la anomalía del nivel del mar calculado desde los datos de la altimetría de los satélites TOPEX-Poseidón y ERS-2 (figura 5d) contienen rasgos encontrados en la topografía dinámica como el meandro anticiclónico que produce un flujo hacia el norte saliendo de la Cuenca de Colombia y el ciclón en el golfo del Darién. También tiene otros rasgos como el remolino ciclónico que abandona el Caribe por la elevación centroamericana hacia el mar Caimán y una señal ciclónica hacia la costa de Costa Rica. Las similitudes entre los campos observados y las anomalías altimétricas significan que antes que los patrones medios de la corriente, los rasgos de media escala dominan el comportamiento de la corriente en el Giro Panamá-Colombia.

Perfiles característicos de estaciones en diferentes regiones fueron graficados para contrastar sus comportamientos: estación 3, costa afuera de Colombia; estación 16 en la parte norte; estación 21 sobre la elevación centroamericana; estación 50 en el golfo de Mosquitos; y estación 63 en el golfo del Darién.

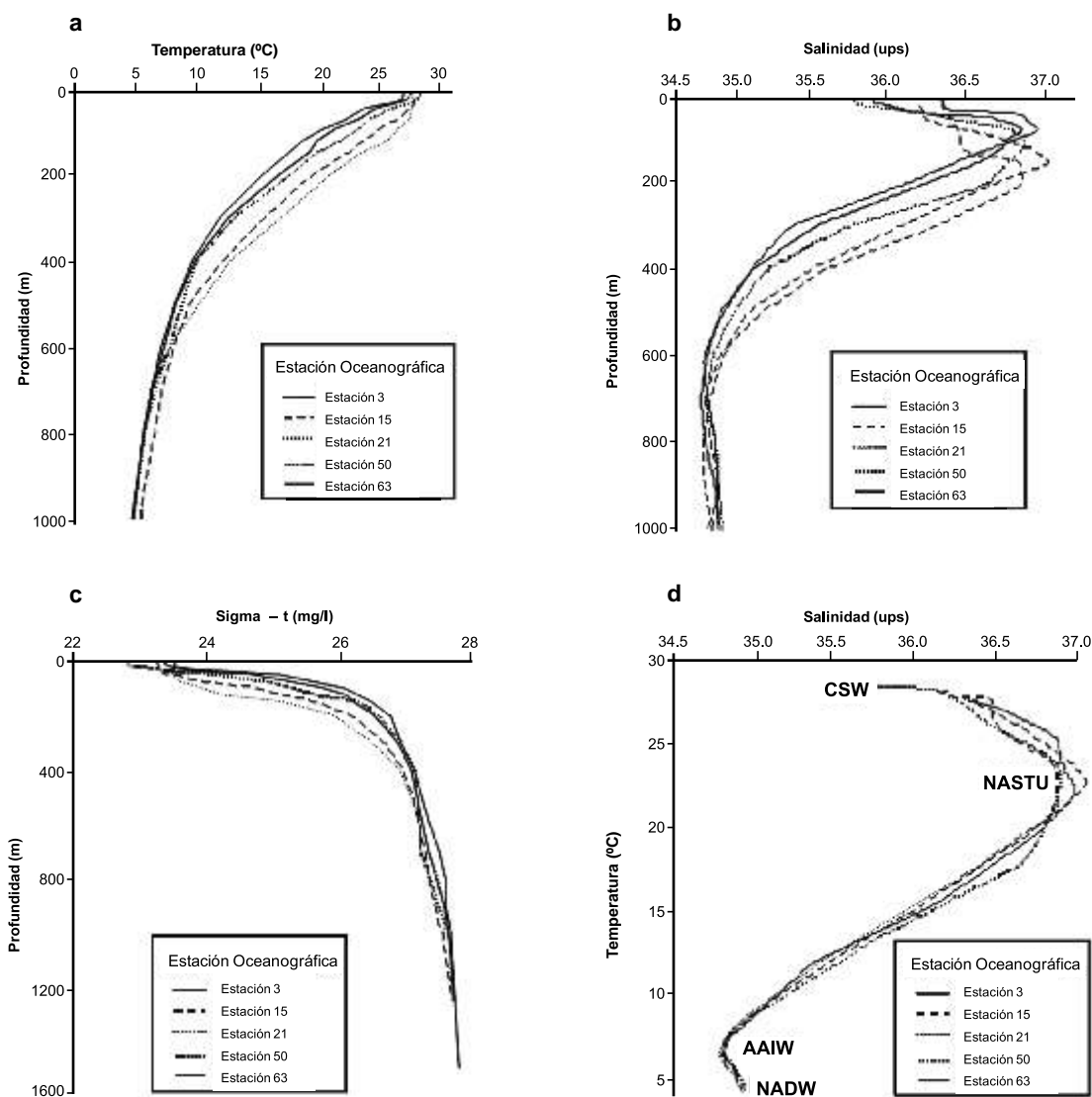
Los perfiles de temperatura de las estaciones en el área de estudio mostraron valores típicos ( $>27.3$  °C) en la capa de mezcla (figura 6a). La gran variación de la profundidad de la capa de mezcla en el área es causada por el fuerte gradiente meridional del estrés del viento. La menor profundidad de la capa de mezcla ( $<30$  m) ocurre cerca de las costa de Sur y Centroamérica mientras que las estaciones del norte tienen la profundidad de capa más profundas ( $<120$  m). Los perfiles típicos tienen una termoclina de cerca de doce grados desde alrededor de  $27.5$  °C hasta cerca de  $15$  °C en un intervalo de profundidad de 200 m. Debajo de 600 m de profundidad se detectó muy poca variación entre las estaciones.

La salinidad en la capa de mezcla varió desde 35.6 a 36.4 ups. Las aguas se encontraron más 'saladas' que en los valores climatológicos en la parte sur del área (figura 6b). El incremento que ocurre en la haloclina es mayor de 0.5 ups. La máxima salinidad de 37.1 ups ocurrió a 170 m en la estación 16 ( $17^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{W}$ ), en el centro del Caribe. Valores ligeramente menores de 37.0 ups se encontraron en la misma profundidad en otras estaciones. Debajo de 600 m la estructura vertical de la salinidad no mostró variaciones significativas.

La densidad, como sigma-t, mostró un rango considerable en los valores de superficie directamente relacionados con la salinidad superficial, pero la pycnoclina fue claramente controlada por los perfiles de temperatura (entre 30 y 120 m). Un amplio rango de temperatura y salinidad ocurrió en la capa de mezcla pero hubo pocos cambios debajo de 600 m (figura 6c).

La relación de temperatura-salinidad demuestra que el área estaba ocupada por Agua Superficial del Caribe (CSW) por siglas en inglés, debajo de la cual se encontró Agua Subtropical Subsuperficial del Atlántico (NATSU) [17], marcada por las máximas salinidades entre el fondo de la capa de mezcla y 300 m. Agua Intermedia Subantártica (AAIW) se encontró entre 300 y 800 m con mínimos valores de salinidad de 34.73 ups en la parte este. El Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW) se encontró debajo de esa profundidad (figura 6d) hasta la profundidad máxima de los perfiles que fue menor de 2000 m.



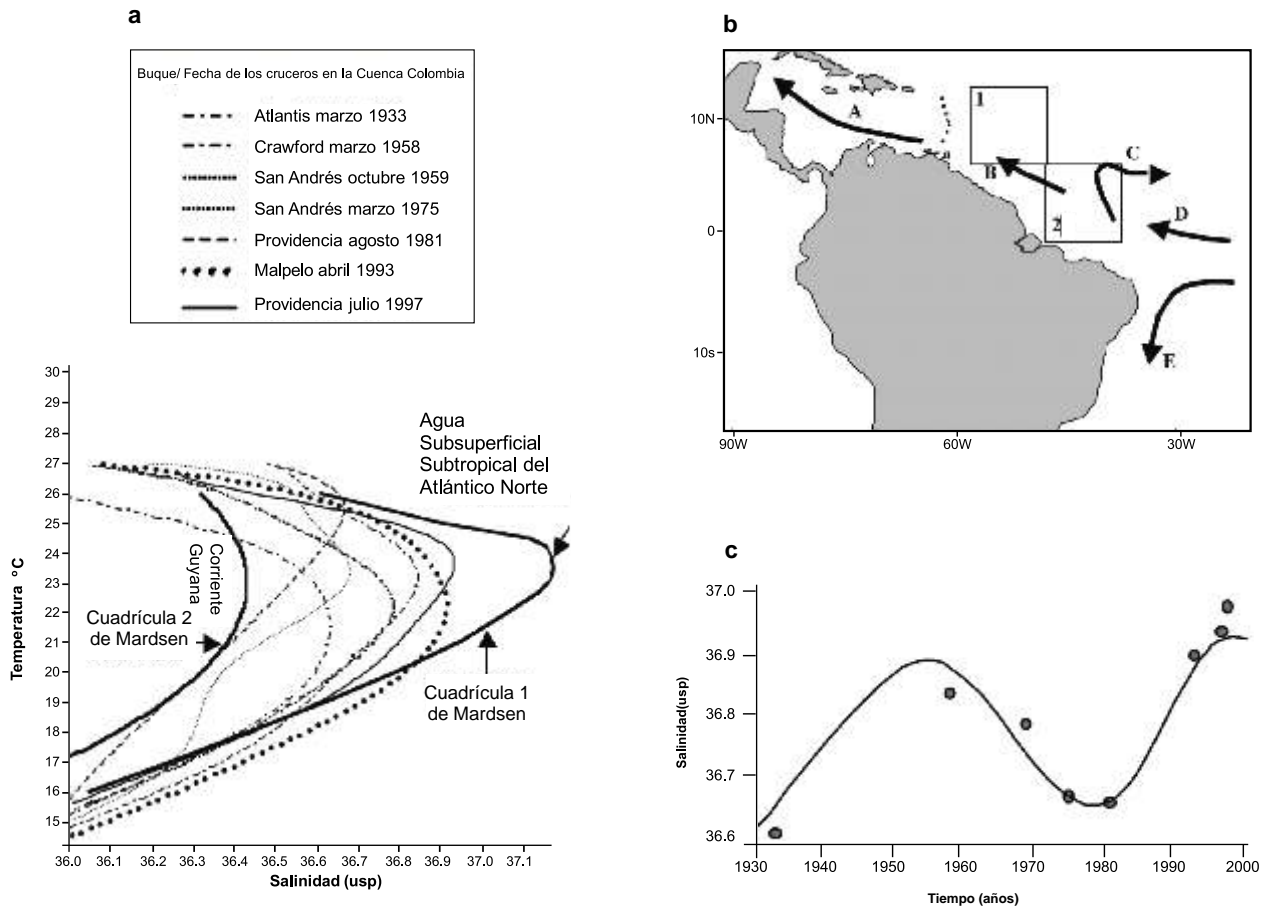


**Figura 6.** Perfiles característicos de los diferentes sectores de la región. La costa colombiana –estación 3-, el norte del Caribe –estación 15-, la elevación de Centro América –estación 21-, el golfo de Mosquitos –estación 50 y el golfo del Darién –estación 63-, de (a) Temperatura, (b) Salinidad, (c) Densidad (sigma-t) y (d) La relación T-S mostrando la presencia de Agua Superficial del Caribe (CSW), Agua Subtropical Subsoperficial del Atlántico Norte (NASTU), Agua Intermedia Antártica (AAIW) y Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW).

### Variabilidad de las masas de agua centrales

Las relaciones T-S muestran cambios significativos en las capas superiores de las masas de agua del Caribe. Observaciones hechas por el B.O. 'Atlantis' en marzo de 1933 muestra salinidades más bajas en los primeros 300 m cuando se comparan con las medidas hechas en

el B.O. 'Crawford' en febrero-marzo de 1958, las cuales a su vez mostraron más bajas salinidades a las medidas en junio-julio de 1997 (figura 7). Por esa razón, los datos históricos de otras fuentes fueron examinados para inferir posibles tendencias de esa variación.



**Figura 7.** (a) Las líneas gruesas muestran los perfiles T-S medios para las dos masas de agua que producen la mezcla que ocupa la Cuenca de Colombia – las líneas punteadas son perfiles medios T-S por cada crucero. (b) Mapa esquemático que muestra la corriente del Caribe (A), la corriente de Guyana (B), la región de la Retroflexión de la Corriente Norte del Brasil (C) [23], la corriente Norte del Brasil (D) y la corriente Sur del Brasil (E). Los números 1 y 2 en el mapa denotan las cuadrícula de Madsen desde la cual se tomaron cada uno de los perfiles medios T-S). (c) La serie de tiempo de máxima salinidad mostrando un ciclo de 50 años en la cual la máxima ocupación del Agua Subsuperficial Subtropical del Atlántico Norte está ocurriendo ahora.

Los perfiles T-S de 1997 en la Cuenca de Colombia exhibieron un máximo de salinidad subsuperficial consistente con un alto porcentaje de NASTU, más altos que los observados anteriormente en la región [11], [15], [18]-[20]. Las máximas salinidades próximas a 37.0 ups fueron medidas en la totalidad de la cuenca alrededor de 100 m, justo debajo de la termoclina y nunca se habían medido salinidades mayores a 36.85 ups antes de esta década.

En un intento por identificar la fuente y la variabilidad de la masa de agua central en la Cuenca de Colombia, se añadieron a los datos utilizados en el presente estudio los datos hidrográficos tomados en octubre de 1969, marzo de 1975, agosto de 1981 y abril de 1993, del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos. Los datos fueron analizados y comparados con los del Centro Nacional de Datos Oceanográficos de los Estados Unidos (NODC) en la cuadrícula Madsen de

10° mostrada en la figura 7a. Los cuadros Mardsen 1 y 2 cubren la región afuera del mar Caribe oriental desde 10°- 20°N donde las principales corrientes alimentan la Cuenca y el área influenciada por la descarga del río Amazonas y la Corriente del Norte del Brasil desde el Ecuador hasta 10°N.

Basado en los primeros 500 m de los perfiles T-S medios de cada crucero examinado (figura 7b), sobrepuesto a los perfiles T-S medios climáticos obtenidos de los datos del NODC en los cuadros Mardsen mencionados, calculados con los datos de CTD de 1969-1988 solamente [21], las salinidades máximas del Atlántico Norte en la vecindad del mar Caribe están próximas a 37.1 ups mientras que las máximas salinidades de las aguas venidas del sur fueron de alrededor de 36.5 ups.

Todos los perfiles T-S de la Cuenca de Colombia están limitados por los perfiles medios T-S del cuadro Mardsen 1, con la más alta salinidad máxima correspondiendo a NATSU (el perfil en negrilla de la derecha) y por el correspondiente al cuadro Mardsen 2 para las aguas traídas por la corriente de Guyana hacia las Antillas Menores con la mínima salinidad máxima (el perfil en negrilla de la izquierda). Este comportamiento limitado significa que la Cuenca de Colombia se encuentra ocupada por la mezcla de estas dos masas de agua distintas y que la proporción de la mezcla varía con el tiempo.

La temperatura correspondiente al máximo de salinidad varía unos 5 °C afectada por las señales estacionales e interanuales. El análisis de la variación de la temperatura superficial en el Caribe entre 1964 y 1982 también tuvo valores mínimos a mediados de la década de 1970 [22].

Una serie de tiempo del máximo de salinidad cercano a la superficie en la Cuenca de Colombia (figura 7c) muestra un patrón de oscilación. Los cruces realizados en 1969, 1975 y 1981 muestran consistentemente máximos de salinidad relativamente bajos como también ocurrió en 1933. Los cruces hechos después de 1991 muestran cada vez mayores salinidades máximas que en 1958. Los cruces hechos en 1994, 1997 y 1998 mostraron valores máximos sin precedentes en la cuenca cercanos a los 37.0 ups. Una curva polinomial ajustada a estos valores indica vagamente un ciclo de 50 años con una

mínima en los 1930s y 1970s y máximas en los 1950s y 1990s.

## *Análisis y discusión*

Los modelos tempranos sugieren que la corriente de Guyana recibe aguas transportadas por la corriente Norte del Brasil desde el hemisferio sur y la introduce en el mar Caribe, [16]. Recientemente, ha sido notado que el Agua Central del Atlántico Sur (SACW) llega a las Antillas Menores por la separación de anillos de la Retroflexión de la Corriente Norte del Brasil [23], [24], [21], [25] pero se ha percibido muy poco flujo entrando al Caribe [26]. Esto es consistente con las altas salinidades máximas que ocupan la Cuenca de Colombia en los años 1990s.

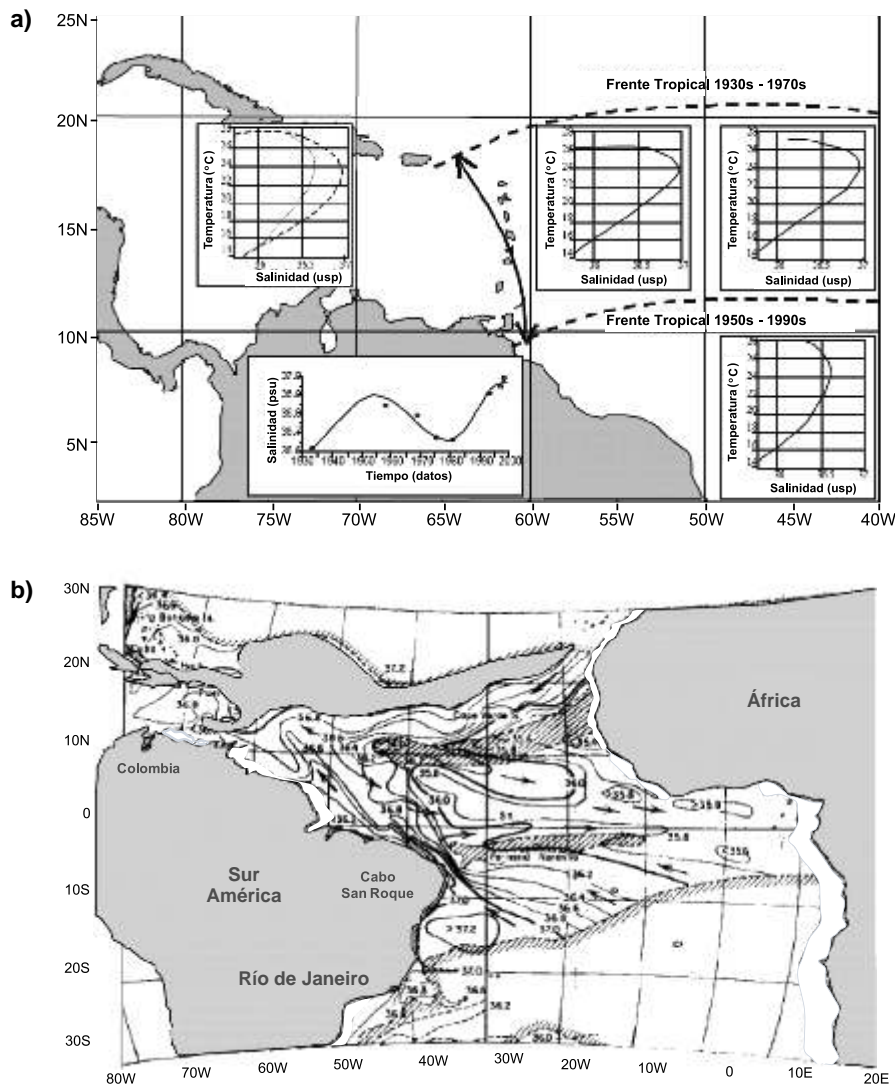
El reemplazo intermitente de Aguas Subsuperficial Subtropical con Agua Central del Atlántico Sur entre la picnoclina y 400 m encontrados en el Caribe suoriental sugieren la posibilidad de que la zona frontal ecuatorial que divide la influencia oceánica de los hemisferios norte y sur tenga un ciclo multidecadal (figura 8a). Este frente puede moverse al norte de 15°N permitiendo alcanzar los pasos de las Antillas Menores a las aguas menos saladas del Atlántico sur como paso en los años 1930s y 1970s. Durante esos años la salinidad máxima en el Caribe suoccidental nunca sobrepasó los 36.7 ups.

Otra manera de identificar el cambio se encuentra en los gráficos de mediados del siglo pasado (p.e) Defant [27] que graficó la isohalina de 37.0 ups afuera de las Antillas (figura 8b) y en contraste, las mediciones hechas en los años 1990s muestran que toda la Cuenca de Colombia se encuentra ocupada por aguas centrales con salinidades mayores a 37.0 ups. En esta época, el frente ecuatorial debió desplazarse al sur de 10°N, permitiendo ocupar el Caribe suoccidental por las aguas más saladas del Agua Subsuperficial Subtropical del Atlántico Norte en los años 1950s y desde los años 1990s. Actualmente, la máxima salinidad en la columna de agua en cualquier parte del Caribe colombiano es mayor de 37.0 ups. El escaso muestreo de grandes intervalos indica una escala de tiempo de alrededor de 50 años.

Este análisis sugiere la ocurrencia de cambios climáticos de corto plazo en las máximas salinidades traídas por la variabilidad interanual de la circulación del Atlántico norte y el Atlántico sur y su interacción.

Esto también sugiere que los cambios en la circulación del Atlántico ecuatorial (la interfase entre las dos circulaciones hemisféricas) influyen en el Caribe, exponiendo la cuenca a la ocupación alternada de aguas de origen totalmente diferente. Es posible que la naturaleza, del muestreo pueda ocultar algunos otros ciclos más cortos o variabilidad irregular debida por ejemplo a la entrada por las Antillas Menores de los remolinos anticiclónicos e.g. [5], que vienen de la

retroflexión del Amazonas [28], pero pareciera improbable que las masas de agua centrales del Caribe puedan ser 'reemplazadas' con aguas de una mezcla significativamente diferente a una rata más rápida, lo que resulta en una hipótesis provocativa para ser explorada con modelos para examinar cambios en estas escalas de tiempo. El análisis de la anomalía de la temperatura superficial del mar para todo el océano Atlántico mostró una periodicidad similar [29].



**Figura 8.** a) Comparación de los diagramas T-S medios en las cuadrículas Madsen afuera del Caribe (datos de NOAA World Ocean Data, 1994) y la isolínea T-S media encontrada en la Cuenca de Colombia desde noviembre de 1933 (punteada) y abril de 1994 (rayada). La variación en la mezcla del Agua Subsuperficial Subtropical (más salada) y el Agua Subsuperficial del Atlántico Sur (menos salada) es evidente. El muestreo muestra un ciclo de alrededor de 50 años (ver 7c). Esta variación puede ser causada por el movimiento latitudinal del frente ecuatorial (la línea rayada afuera del Caribe) entre estas dos masas de agua. b) Las máximas salinidades superficiales en el Atlántico central, tomada de Defant (1936) en [27].

## Conclusiones

La cuenca de Colombia fue examinada a través de la estación de lluvias desde el 'veranillo' en julio hasta el principio de la estación de vientos en noviembre de 1997. Se encontró una concentración significativa de Agua Subsuperficial Subtropical con salinidades de 37 ups que se despliega hacia el sur y ocupa la totalidad de la cuenca debajo de la piconclina hasta 300 m. Esta concentración fue la más alta que se ha reportado ocupando la totalidad de la cuenca, que también fue alta en 1958, pero bajas en 1933 y en 1981. Esta oscilación tiene una amplitud de alrededor de 50 años desde los datos disponibles.

El Agua Intermedia Antártica entra por la cuenca de Venezuela y se disemina hacia el norte y pasa al mar Caimán solamente a través del canal Chibcha. En el norte de la Cuenca de Colombia existe un flujo subsuperficial hacia el Este en el Agua Intermedia (>600 m) mostrando un despliegue hacia el noreste en sentido contrario a la corriente del Caribe, al sur de las Antillas Mayores.

## Agradecimientos

Se presenta un sincero agradecimiento al Sr. Capitán Juan David Múnera, Comandante del ARC "Providencia" y al Sr. Capitán Orlando Solórzano, Comandante del ARC "Quindío" y sus tripulaciones por su esfuerzo y profesionalismo en la toma de los datos durante las campañas de 1997 y al personal del CIOH que de una u otra forma colaboraron en la obtención de los datos del CECOLDO. Especialmente al Dr. Eric Desmond Barton por sus consejos y oportunos comentarios al análisis y al manuscrito y a Jakeline Benavides por su ayuda en la elaboración de las figuras. El presente trabajo hace parte del proyecto financiado por COLCIENCIAS No.1126-425-20164 y la Escuela Naval en el área del Archipiélago de San Andrés.

## Referencias bibliográficas

- [1] Mooers, C.N.K. y G.A. Maul, Intra-Americas Sea Circulation, en: *The Sea*, editores. K. H. Brink and A. R. Robinson, 1062 pp., Wiley, New York, 1998.
- [2] Andrade, C.A., E.D. Barton y C.N.K. Mooers, Evidence for an Eastward Flow along the Central and South American Caribbean

Coast, *Journal of Geophysical Research*. Junio, 2003. 108 (C6): 3185.

[3] Andrade, C.A. Las corrientes superficiales en la Cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Septiembre, 2001. 25 (96): 321-335.

[4] Leaman, K.D. y W.D. Wilson, Physical Variability of Surface Currents in the Panama-Colombia Gyre: Nature, causes and comparisons with a high resolution numerical-model. First Biennial IASI Science Meeting - noviembre 9-11 (abstract), 1999.

[5] Andrade, C.A. y E.D. Barton, Eddy development and motion in the Caribbean Sea, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, (C11.): 26,191-26,201, noviembre, 2000.

[6] Nystuen, J.A. y C.A. Andrade, Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using GEOSAT altimetry, *J. Geophys. Res.*, 1993. (98): 8389-8394.

[7] Urbano, J., Análisis de masas de agua del Caribe colombiano, *Boletín Científico CIOH*, 1993. (13).

[8] Cabrera, E. y M.C. Donoso, Características oceanográficas del Caribe colombiano, región III, Zona 1, PDCTM, *Boletín Científico CIOH*, 1993. (13):19-32.

[9] Giraldo, L., Análisis de las masas de agua y control de calidad de la información oceanográfica, *Boletín Científico*. 1994. (15): 17-38.

[10] Hastenrath, S. y P.J. Lamb, *Climatic Atlas of the Tropical Atlantic y Eastern Pacific Oceans*: Madison, University of Winsconsin Press, 25, 97 planos, 1977.

[11] Parr, A.E., A contribution to the Hydrography of the Caribbean y Cayman Seas, based upon the observations made by the Research Ship 'Atlantis', 1933-1934. *Bull. Bingham Oceanogr. Collect.*, 1936. 5(4).

[12] Fuglister, F.C., *Atlantic Ocean Atlas of Temperature y Salinity profiles and data from the International Geophysical year of 1957-1958*, Woods Hole Oceanography Institute, Atlas Series, 1, 209 pp., junio 1960.

[13] McClain, E.P. Operational implementations of AVHRR only Multi-channel Sea surface temperature products. Documento sin publicar presentado a la 32a. reunión del Panel de Investigación de NOAA/NESS SST, 1982.

[14] NOAA/NESDIS/NODC/Ocean Climate Laboratory, *World Ocean Data*, CDROM data set, 1994.

[15] Wust, G., Stratification and circulation in the Antillean-Caribbean Basins, Part I, Spreading y Mixing of the Water Types with an Oceanographic Atlas. Columbia Univ. Press, New York, 20 pp. + apéndices, 1964.

[16] Wust, G., On the stratification and the circulation in de cold water sphere of the Antillean-Caribbean basin. *Deep Sea Res.* 1963. (10): 165-187.

[17] Worthington, L.V., *On the North Atlantic Circulation*. The John Hopkins University Press, Baltimore, Md., 120pp., 1976.

[18] Herrera, L.E. y G. Febres-Ortega, Thermohaline characteristics of the surface waters from the southeastern part of the Caribbean Sea during the rain season. *Bol. Inst. Oceanogr., Univ. Oriente, Cumaná*, 1976. 5(1): 97-114.

[19] Morrison, J.M. y W.D. Nowlin, Jr., General distributions of water masses within the Eastern Caribbean Sea during the winter of 1972 and fall of 1973, *J. Geophys. Res.*, 1982. (87): 4207-4229.

[20] Gonzáles, E., *Oceanografía física descriptiva del Archipiélago de San Andrés y Providencia, con base en el análisis de los cruceros OCEANO VI a IX, Boletín Científico CIOH*, 1987. (7): 73-100.

[21] Stansfield, K.L., M.J. Bowman, S.J. Fauria, y T.C. Wilson, Water mass and coastal current variability near to Barbados, West Indies, *J. Geophys. Res.*, 1995. 100(C12): 24819-24830.

[22] Winter, A., C. Goenaga y G.A. Maul, Carbon and Oxygen Isotope Time Series From an 18-year Caribbean Reef Coral, *J. Geophys. Res.*, 1991. 96(C9): 16673-16678.

[23] Richardson, P.L. y D. Walsh, Mapping climatological seasonal variations of surface currents in the Tropical Atlantic using ship drifts, *J. Geophys. Res.*, 1986. (91): 10537-10550.

[24] Didden, N. y F. Schott, Eddies in the North Brazil Current retroflection region observed by Geosat altimetry, *J. Geophys. Res.*, 1993. 98(20): 20121-20131.

[25] Limeburner, R., R.C. Beardsley, I.D. Soares, S.J. Lentz y J. Candela, Lagrangian flow observations of the Amazon River discharge into the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 1995. 100(C2): 2401-2415.

[26] Wilson, W.D., E. Johns y R.L. Molinari, Upper layer circulation in the Western Tropical North Atlantic Ocean during August 1989, *J. Geophys. Res.*, 1994. 99(C11): 22513-22523.

[27] Defant, A., *Physical Oceanography*, Pergamon Press, pp.1319, 1961.

[28] Johns, W.E., T.N. Lee, F.A. Schott, R.J. Zantopp and R.H. Evans, The North Brazil Current Retroflection: seasonal structure and eddy variability. *J. Geophys. Res.*, 1990. 95, 22, 103-120.

[29] Landsea, C.W., R. Pielke, A.M. Mestas-Nuñez y J.A. Knaff, Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes, in *Climatic Change*, 42, 89-129, Kluwer, Academic Publishers, 1999.