



ARTÍCULO

Características de las zonas de surgencia de la cuenca del Pacífico colombiano y su relación con la zona de convergencia intertropical

Characteristics of the upwelling areas in the Colombian Pacific Ocean and their relationship with the intertropical convergence zone

Fecha recepción: 2008-08-28 / Fecha aceptación: 2008-09-25

Diana Díaz G., dianac.diaz@utadeo.edu.co
Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 # 22-61. Bogotá.

Igor Málíkov, ig_nan@yahoo.com
Grupo de Investigación CENIT.

Nancy Villegas, nvillegasb@unal.edu.co
Dpto. de Geociencias. Facultad de Ciencias.
Universidad Nacional de Colombia, Cr. 30 # 45-01,
Ed. Manuel Ancizar. Of 203. Bogotá

Resumen

Se identifica la relación entre dos conjuntos de datos promediados del período 1971-2000 que representan a la migración de la zona de Confluencia Intertropical y a las zonas de surgencia de la Cuenca del Pacífico colombiano. Se encuentra que las características de las zonas de surgencia de la CPC a nivel superficial varían en magnitud y extensión espacial durante el año. El promedio de la velocidad vertical de surgencia presenta un foco principal de ascenso de aguas alrededor de 3°N y 82°W. El análisis de cluster del promedio de las tres variables meteorológicas: temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento meridional, que caracterizan a la migración de la zona de confluencia intertropical, muestra la presencia de 6 masas de aire. Mediante el análisis de correlación canónica se estudia la relación entre el conjunto de los datos meteorológicos mencionados y el de las variables oceanológicas, que caracterizan a las aguas localizadas alrededor de los focos de surgencia: temperatura superficial del mar, salinidad superficial del mar y velocidad vertical de surgencia. Los coeficientes de correlación entre las variables oceanológicas de las estaciones con mayor velocidad vertical de surgencia y las meteorológicas de las 6 masas de aire, son superiores a 0.9, sobresaliendo la correlación con la masa de aire sobre aguas del sector central y siendo la velocidad vertical de surgencia, humedad relativa y velocidad del viento meridional las variables con mayor peso dentro de la correlación, es decir que los procesos de interacción océano-atmósfera entre estas variables tienen la mayor fuerza explicativa de la posible correlación entre la presencia de focos de surgencia, su desplazamiento y el paso de la Zona de Confluencia Intertropical.

Palabras claves: Surgencia, zona de confluencia intertropical, sistema océano-atmósfera, análisis de correlación, temperatura superficial, Colombia.

Abstract

The relationship between two data sets representing the migration of the Inter-tropical convergence zone (ZCIT) and the upwelling of the Colombian Pacific Basin (CPC) are identified. The characteristics of the upwelling areas of the CPC at the surface vary in magnitude and spatial extent during the year. The cluster analysis of the

average annual upwelling of Vertical Velocity (VZ, cm / s) presents a main upwelling centre around the 3° N and 82° W. The cluster analysis of the annual average of three meteorological variables that characterize the migration ZCIT, Air Temperature (Ta, C), relative humidity (RH,%) and South Wind speed (VWD, m / s) shows 6 air masses. Through canonical correlation analysis the relationship between the meteorological data set mentioned and that set regarding the Oceanology variables, that characterize the waters localized around the upwelling centres, sea surface temperature (SST, C), the Sea Surface Salinity (SSM), and VZ is studied. The coefficients of correlation between variables of Oceanology stations with greater Vz and the meteorology ones of the 6 air masses, are over 0.9, especially the correlation with the mass of air above the waters of central sector, and being Vz, Hr and Vw the variables with higher weight in the correlation, that is to say that the ocean-atmosphere interaction processes among these variables have the strongest explanation of the possible correlation among the upwelling centres, their displacement, and the passage of the ZCIT.

Key words: Upwelling, inter-tropical convergence zone, ocean-atmosphere system, correlation analysis, surface temperature, ocean basin, Colombia.

Introducción

La climatología de la Cuenca del Pacífico Colombiano (CPC) está dominada por los desplazamientos Sur-Norte-Sur de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) [1], esto hace que haya una abundante formación de nubes por convección, con vientos débiles y variables y alta pluviosidad. La ZCIT se desplaza latitudinalmente sobre el segmento del océano Pacífico oriental, correspondiente al territorio colombiano entre 1° y 7° de latitud Norte en promedio, sin embargo, durante eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) esta posición extrema puede alcanzar los 5° de latitud Sur aproximadamente [2]. En estudios específicos sobre el viento meridional y zonal en la CPC algunos autores han determinado que durante el primer semestre, predominan los vientos Alisios del Norte y Noroeste, con intensidades promedio entre los 5 y 7 m/s, junto al Jet de Panamá que regula también las condiciones

oceanográficas de la CPC y predominio de vientos del Sur y Suroeste en el segundo semestre, debido a que la ZCIT permanece ausente sobre la CPC [3]. Por otra parte, análisis preliminares sugieren una estrecha relación entre el desplazamiento de la ZCIT y la distribución espacial y temporal de los focos de surgencia en la CPC, debido al comportamiento del campo de vientos característico del sistema atmosférico al cruzar esta región del país [4 y 5]. Tomando como referencia el conocimiento previo sobre la dinámica atmosférica de la CPC, se presentan las zonas de surgencia encontradas y se comparan con el desplazamiento de la ZCIT analizando el comportamiento de las variables meteorológicas que indican su paso sobre la CPC.

Materiales y métodos

Las coordenadas de la región de estudio son 1°30' - 7°10'N y 77° 40' - 82°00'W que corresponden a los límites de la CPC (figura 1). Se utilizó información meteorológica y oceanográfica del período 1971-2000. Para la delimitación de zonas de ascenso de aguas se utilizaron los datos oceanográficos: Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Salinidad Superficial del Mar (SSM) tomados del World Ocean Atlas [6], y la Velocidad Vertical de Surgencia (Vz) estimada por simulación a partir de un modelo hidrodinámico no lineal, el cual se detalla en los trabajos [7, 8 y 9]. Para determinar las masas de aire que caracterizan el desplazamiento de la ZCIT, se utilizaron las variables meteorológicas: Temperatura del aire (Ta), Humedad Relativa (Hr) y Viento Meridional (Vw) de la base de datos del NCEP/NCAR del mismo período seleccionado. Luego de tener los datos organizados se prosiguió a aplicar el método de análisis de cluster (AC) con el Software Statgraphics, donde se eligió la métrica euclidiana y el método de Ward's [10]. Así fue posible hacer una aproximación al análisis de la varianza para evaluar la distancia entre clusters, intentando minimizar la suma de los cuadrados de los residuos de cada dos hipotéticos clusters que pueden ser formados en cada paso. Finalmente se aplicó el método de análisis de correlación canónica (ACC) para establecer la posible relación entre los conjuntos de datos que representan a la migración de la (ZCIT) clasificados en masas de aire y a las zonas de surgencia con mayor velocidad vertical de ascenso de la CPC.

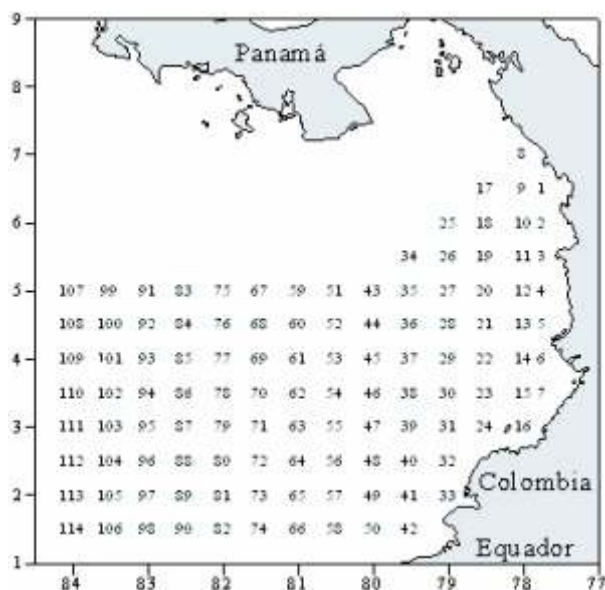
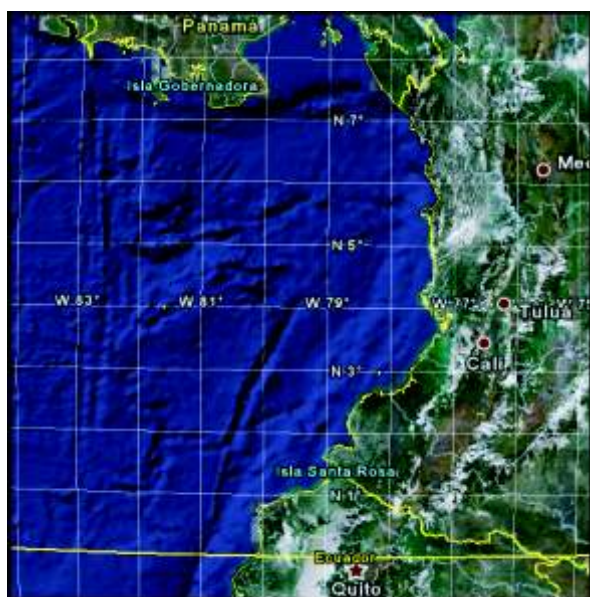


Figura 1. Derecha: Ubicación geográfica de la Cuenca del Pacífico colombiano. Izquierda: Malla utilizada.

Resultados

Masas de aire indicadoras del desplazamiento de la ZCIT

Por medio del análisis de cluster se estableció la migración de la ZCIT de acuerdo con las masas de aire conformadas teniendo en cuenta la información mensual multianual y el promedio anual del período 1971-2000 de Ta, Hr y Vw. Esta información permitió obtener doce clasificaciones de masas de aire que representan al desplazamiento de la ZCIT, una para cada mes del año climatológico y una clasificación promedio de los 30 años evaluados. Este último resultado se presenta en la figura 2 y los respectivos centroides en la tabla 1.

Se observa que en promedio hay seis áreas sobre la CPC que mantienen características uniformes en cuanto a la Ta, Hr y Vw. Las primeras tres se ubican de norte a sur al lado este de la región de estudio, comenzando desde la costa y llegando hasta aguas centrales o de mezcla. Las masas cuatro y cinco abarcan la parte central de la región cubriendo las aguas de mezcla. La sexta masa se localiza sobre las aguas oceánicas en la parte oeste. La primera masa comienza entre los 77°30'W y 6°30'N, continúa hacia el oeste y sur, finalizando entre los 79°30'W y 1°30'N. La segunda es la de menor área y se posiciona a la

izquierda de la primera, cubriendo zonalmente la región entre los 78° y 78°30'W y meridionalmente entre los 4°30' y 7°N. La tercera masa es más central y se ubica entre los 79° y 81°W nuevamente de norte a sur. La cuarta masa inicia al norte entre los 5°30'N y 79°30'W en el centro de la CPC hasta el área entre los 81°30'W y 4°N. El quinto cluster es el más occidental y está ubicado al sur entre los 80°30'W y 83°30'W y entre 1°30'y 3°30'N. Finalmente, en la región restante se encuentra el sexto cluster.

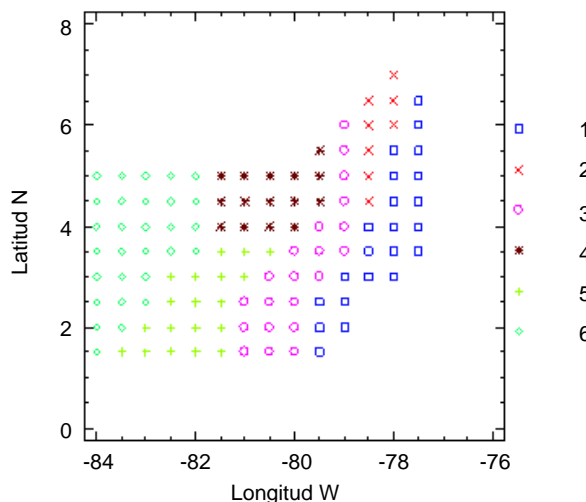


Figura 2. Masas de aire del promedio 1971-2000 representativas del desplazamiento de la ZCIT sobre la CPC.

Durante todo el año, independientemente de los valores, es mayor el contenido de Hr en la atmósfera localizada sobre la parte costera, que la ubicada sobre la oceánica, esto posee sentido físico si se tiene en cuenta que la topografía de zona montañosa (Serranía del Baudó y Cordillera Occidental) es responsable del incremento de la Hr en el litoral del Pacífico colombiano, haciendo de esta región una de las más húmedas del mundo, todo esto controlado en gran parte por la anclada de Panamá. Como es de esperarse, la Ta presenta un comportamiento opuesto al de la Hr, lo cual se aprecia en la tabla 1, donde los valores de los centroides de Este a Oeste y Noroeste aumentan para la Ta y disminuyen para la Hr. En cuanto a la dirección del Vw, aunque son vientos débiles en general, la magnitud es mayor a medida que se avanza de las primeras masas de aire hacia las últimas.

Tabla 1. Centroides de las masas de aire del promedio 1971 2000 representativas del desplazamiento de la ZCIT sobre la CPC.

Cluster (Masas de aire)	Ta (°C)	Hr (%)	Vw(m/s)
1	23.2	91	0.2
2	24.5	90	0.1
3	24.7	87	0.9
4	25.4	84	1.9
5	26.3	84	1.1
6	26.1	82	2.4

En cuanto a Ta se registran los valores más bajos en la parte costera, al Sureste de la CPC donde los rangos de Ta van desde los 22 a 24°C. A medida que se avanza hacia el Oeste y Noroeste los valores se incrementan llegando hasta los máximos desde 27 hasta 28°C. Dentro de los sistemas atmosféricos que ayudan a determinar este comportamiento de la Ta en la CPC se encuentra principalmente la presencia de la baja presión del Darién o baja presión anclada de Panamá que se hace presente sobre la Serranía del Darién entre los 7° y 10°N y entre los 76° y 80°W desde mayo hasta noviembre.

Zonas de surgencia

El análisis de las zonas de surgencia se realizó para la capa 0-10 metros. Se graficaron los valores de Vz en la CPC y, como en el caso anterior, el procedimiento se realizó para cada mes y para el promedio anual. Los resultados se presentan en las figuras 3, 4 y 5.

En enero (figura 3) se presentan zonas de surgencia sobre gran parte de la CPC. El ascenso de aguas se extiende desde los 79°W hasta los 83°30'W entre los 1° 30' y 6°N, cubriendo toda la parte central de la CPC. Se presenta un foco de surgencia que tiene mayor Vz alrededor de los 81°30'W y 2°N.

En el mes de febrero (figura 3) se conserva una amplia zona de surgencia que cubre gran parte de la CPC. Se extiende desde los 79°W con 6°N hasta los 83°30'W con 1° 30'N cruzando de Norte a Sur al sector central de la CPC. A diferencia de enero se observa la presencia de dos focos de surgencia, cuyas coordenadas son: 83°W-3°N y 81° W-2°N. Es decir, que la región que tiende a tener mayor Vz se encuentra en el Suroeste y Sur de la CPC. Esta distribución de las zonas de surgencia en febrero puede deberse a que en este mes la ZCIT se encuentra al Sur de la CPC, por tanto, en el Norte se encuentran los vientos del Norte y Noreste y en el Sur, los vientos del Sur y Suroeste, haciendo que esta configuración de vientos permita la generación de un segundo foco apreciable y la concentración de las zonas de ascenso hacia el centro y Sur Occidente de la CPC.

En el mes de marzo (figura 3) las zonas de surgencia se ubican de forma similar a las de febrero pero con un ligero aumento en las dimensiones del área cubierta, especialmente en la región Noroeste. Los dos focos observados en febrero se conservan en las coordenadas 83°W-3°N y 81° W-2°N, aunque son menos apreciables, y se distinguen dos nuevos focos, uno entre los 83°W y 2°N y otro entre los 78°W y 6°N de menor intensidad. En el sector central costero se observan zonas de agua en descenso, sin embargo marzo es el mes en el cual el área de downwelling es menor respecto a los demás meses. Para esta época del año, al Norte de la CPC, los vientos del Norte y Noroeste se presentan con menor intensidad debido al desplazamiento de la ZCIT hacia mayores latitudes, mientras que al sur de la CPC son los vientos del Sur y Suroeste los que se presentan [3]. En este mes se observan cuatro focos o puntos de afloramiento, que aunque no tienen la mayor intensidad registrada, demuestran que en este mes la dinámica de las aguas

de la CPC es diferente y compleja, esto puede deberse a la baja presión atmosférica asociada al paso de la ZCIT que en esta época no permite la intensificación de los vientos, y por tanto no favorece los movimientos de ascenso pero sí altera el comportamiento de la capa superficial. Esta idea será retomada más adelante en la sección de correlación canónica entre las masas de aire que representan el paso de la ZCIT y las zonas de surgencia.

En abril (figura 3) las zonas de surgencia en conjunto parecen desplazadas ligeramente hacia el Este en el Sur de la CPC. Los focos vistos en marzo son menos distinguibles, solo sobresale uno ubicado entre 80°W y $2^{\circ}30'\text{N}$. En forma similar a febrero y marzo, en el mes de abril la mayor velocidad de ascenso se detecta al Sureste y, a lo largo del meridiano $81^{\circ}30'\text{W}$ la línea de surgencia se hace más visible.

En mayo (figura 4) las dimensiones de las zonas de ascenso de aguas disminuyen y éstas retornan hacia el sector central de la CPC. Se pueden distinguir dos puntos de surgencia a lo largo del meridiano 82°W . En mayo la ZCIT pasa sobre Panamá, por tanto los vientos del Suroeste se encuentran actuando entre las latitudes 2° y 6°N desplazando aguas de Oeste a Este de la CPC. La zona de ZCIT comienza a hacerse más amplia y se extiende hacia el Sur y centro de la región de estudio.

En el mes de junio (figura 4), las zonas de surgencia tienen menores dimensiones que las de mayo. Se observa un foco de surgencia principal entre los 83°W y $4^{\circ}30'\text{N}$. La ZCIT al estar más hacia el Norte ocasiona que sobre la CPC prevalezcan los vientos del Sur y Suroeste que lentamente empiezan a ser más fuertes que en los meses anteriores [3], por tanto es de esperarse que continúe ampliándose el área de movimientos descendentes en el Este de la CPC.

En julio (figura 4) la posición del foco sigue siendo la misma y no hay una variación considerable del área, el cambio se aprecia especialmente en la magnitud de la Vz, la cual se hace mayor alrededor del foco. La ZCIT continúa incrementándose de acuerdo con el comportamiento del campo de vientos para esta época del año. De agosto a noviembre (figura 5) las zonas de ascenso son semejantes entre sí, pero difieren de los demás meses analizados, dado a que la ZCIT cambia nuevamente su desplazamiento.

En estos meses la zona de surgencia que sobresale se localiza entre los meridianos 81°W y 83°W y entre los

paralelos 3°N y 5°N . A medida que transcurre el tiempo el ascenso de aguas disminuye gradualmente. En agosto y septiembre (figura 4) se observan dos focos, uno principal entre los 82°W y 3°N y otro menor entre los 80°N y 4°N aproximadamente.

En octubre (figura 5) continúa observándose el foco principal, pero el proceso dominante en gran parte de la CPC es el de confluencia, quizás por el hecho que entre agosto y septiembre la ZCIT se encontraba lejos de la región en su posición Norte más extrema, y comienza ahora su retorno hacia el Sur [3 y 4].

En noviembre y diciembre (figura 5) inicia una nueva etapa en la distribución de las zonas de surgencia, la cual se modifica por el siguiente desplazamiento de la ZCIT, presentando una configuración compatible con la descrita en los primeros meses, lo que muestra una periodicidad tanto en la variación de la distribución de zonas de ascenso y descenso de las aguas en la CPC, como en la variación de la intensidad de la Vz. El principal cambio se observa en el aumento de las regiones con velocidades verticales características del ascenso de aguas (valores negativos de Vz) y la consecuente disminución de la región con velocidades de descenso de aguas (valores positivos de Vz).

En noviembre y diciembre la distribución de los focos es similar, pero en diciembre son más apreciables. En estos dos últimos meses del año el desplazamiento de la ZCIT tiene sentido de Norte a Sur a la CPC, osea que está regresando a la CPC y esta dirección de los vientos permite que aumente nuevamente el área de ascenso de aguas.

En la figura 6 se aprecia el promedio anual del período 1971-2000 de la Vz.

El foco de surgencia principal promedio (figura 6), que se ha observado en cada mes del año según lo descrito anteriormente, presenta una posición entre la longitud 82°W y la latitud 3°N . Alrededor de este foco principal se ve claramente una amplia región de ascenso de aguas con altos valores de Vz. Esta región, que se extiende desde la latitud 3°N hasta la latitud 6°N , presenta la mayor amplitud en la latitud 4°N desde la longitud $80^{\circ}20'\text{W}$ hasta la longitud $83^{\circ}20'\text{W}$. También es visible en forma general, que existe surgencia en gran parte de la CPC, exceptuando la zona costera alrededor de los 4°N y entre los $79^{\circ}30'\text{W}$ y $81^{\circ}30'\text{W}$ alrededor de las latitudes $1^{\circ}30'\text{N}$ y 2°N .

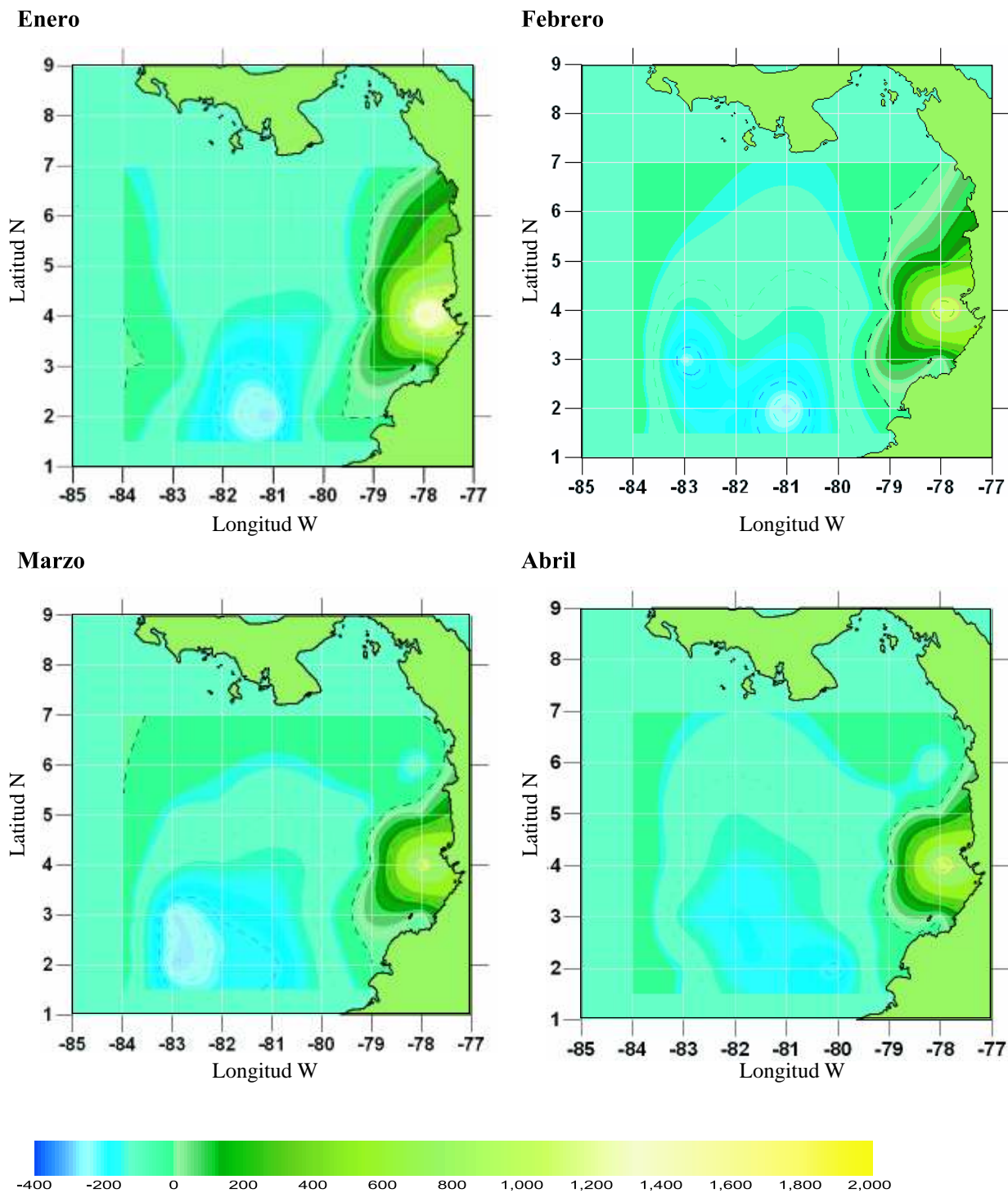


Figura 3. Velocidad vertical de surgencia ($\cdot 10^5$ cm/s) entre enero y abril sobre la CPC: promedio 1971-2000.

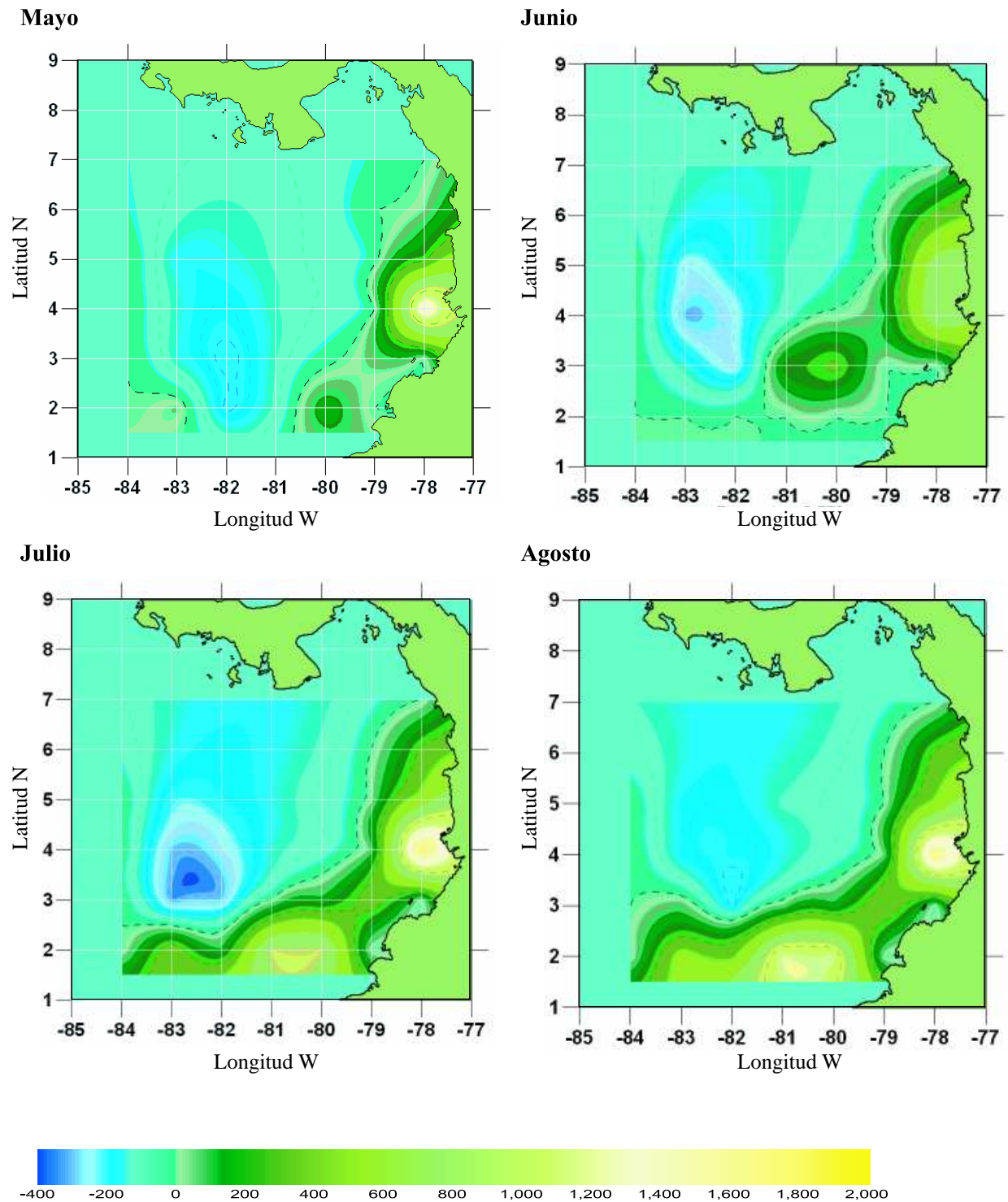


Figura 4. Velocidad vertical de surgencia ($\times 10^5$ cm/s) entre mayo y agosto sobre la CPC: promedio 1971-2000.

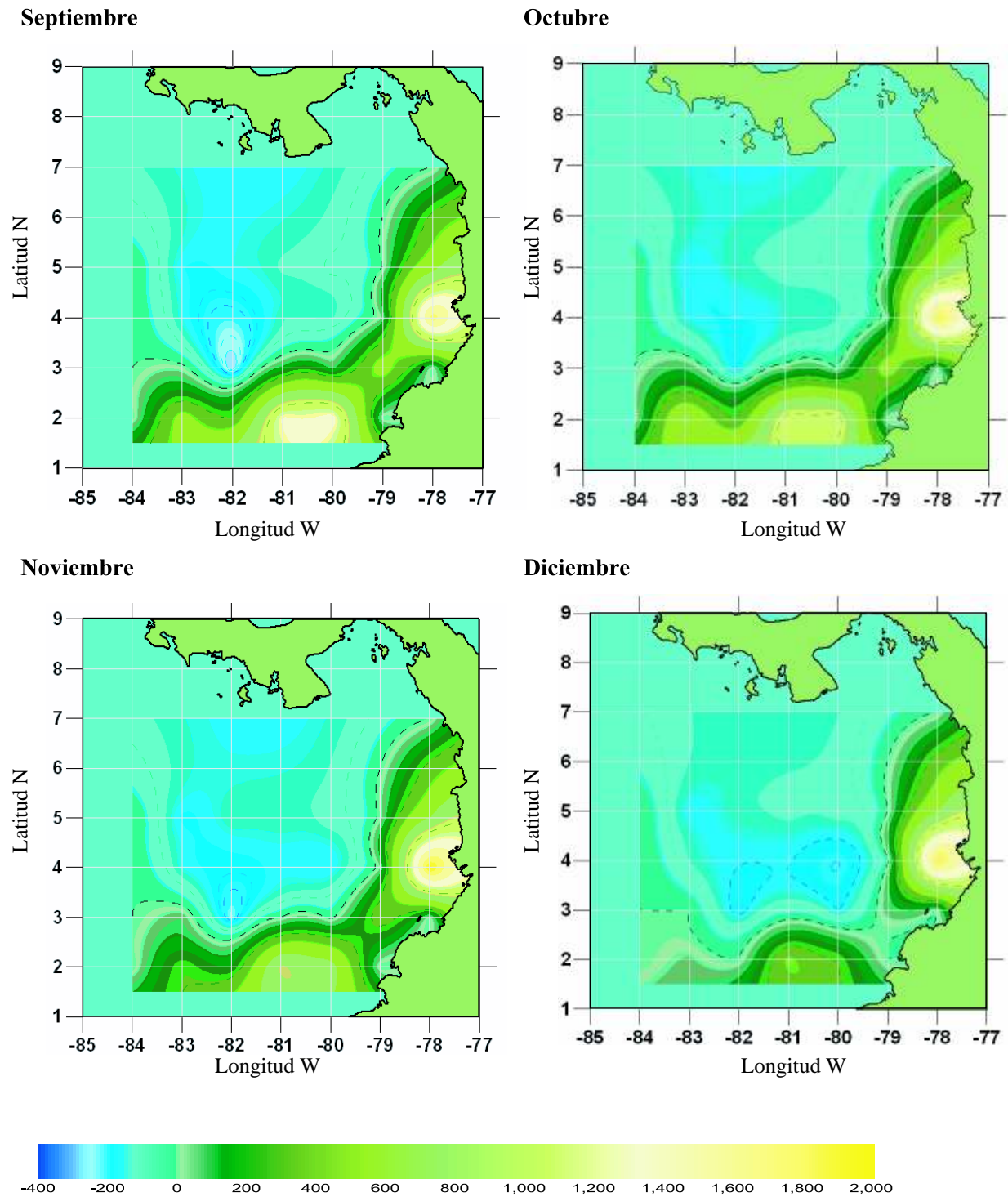


Figura 5. Velocidad vertical de surgencia ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) entre septiembre y diciembre sobre la CPC: promedio 1971-2000.

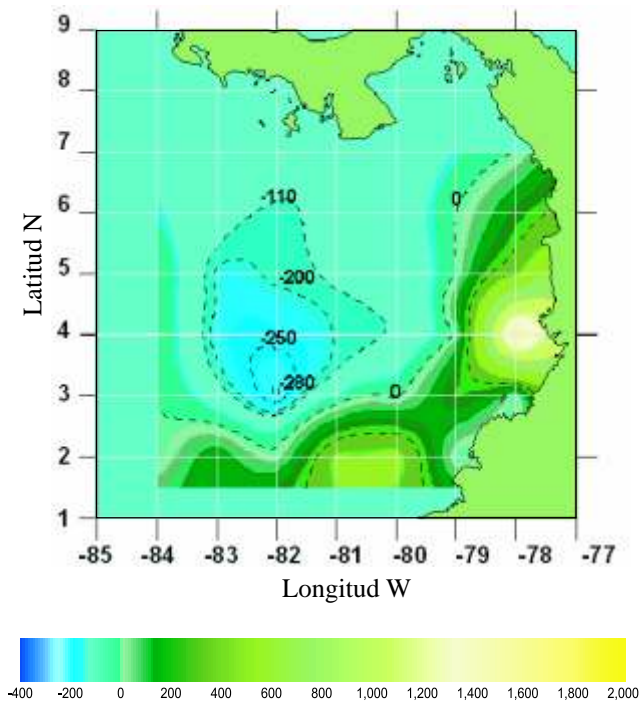


Figura 6. Promedio anual de la velocidad vertical de surgencia ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) sobre la CPC, período de premediación 1971-2000.

Relación entre el desplazamiento de la ZCIT y la distribución de zonas de surgencia

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al ACC entre variables meteorológicas relacionadas con las masas de aire que representan al desplazamiento de la ZCIT sobre la CPC y variables oceanológicas relacionadas con las masas de aguas que representan a las zonas de surgencias encontradas en la región de estudio.

El ACC también se realizó entre la información mensual y entre los datos promedio y, con el fin de presentar los resultados más claramente, en este trabajo se dan a conocer en la tabla 2 los pesos obtenidos de las variables canónicas utilizadas del período (1971-2000), que representan en forma general la influencia del desplazamiento de la ZCIT (6 masas de aire promedio) y la distribución de las zonas de surgencia en la CPC basados en el foco principal promedio de surgencia que se localiza entre los 82°W y 3°N (1 masa de agua de surgencia promedio).

En la primera columna de la tabla 2 se observan las variables canónicas de cada masa de aire identificadas por subíndices de 1 a 6 y las variables oceanológicas del foco principal con el subíndice 1. Como se observa en la tabla 2, en términos generales, la máxima correlación entre las masas uno, dos y tres y el respectivo foco de surgencia se debe principalmente a los coeficientes correspondientes a la variable meteorológica Hr y la oceanológica Vz, y para las masas cuatro, cinco y seis el peso de la variable Vw se incrementa. En la mayoría de los casos la Vz es la más ponderada.

Tabla 2. Pesos de las variables canónicas dentro de la correlación canónica promedio (1971 - 2000) entre las masas de aire que representan al desplazamiento de la ZCIT y la masa de agua que representa a la zona de surgencia principal sobre la CPC.

Variables	Peso	Variables	Peso
Hr_1	-3.48	Hr_4	3.26
Ta_1	-1.30	Ta_4	2.78
Vw_1	-2.87	Vw_4	2.83
S_1	0.04	S_1	-0.01
TSM_1	0.16	TSM_1	-0.14
Vz_1	0.97	Vz_1	1.01
Hr_2	-2.63	Hr_5	-1.05
Ta_2	-0.66	Ta_5	-0.50
Vw_2	-1.77	Vw_5	0.29
S_1	-0.82	S_1	0.13
TSM_1	-0.78	TSM_1	0.11
Vz_1	0.83	Vz_1	1.03
Hr_3	-0.92	Hr_6	0.15
Ta_3	-0.92	Ta_6	0.35
Vw_3	0.08	Vw_6	1.24
S_1	-0.02	S_1	-0.21
TSM_1	0.01	TSM_1	0.05
Vz_1	0.99	Vz_1	0.91

Es decir, que las variables canónicas que tienen el mayor poder explicativo del alto grado de correlación entre el desplazamiento de la ZCIT y la distribución e intensidad de las zonas de surgencia sobre la CPC, son: la Hr, la cual varía de acuerdo al paso de la ZCIT, y la Vz, la cual varía según la cantidad de Hr dada por el desplazamiento de la ZCIT. Para todos los casos los coeficientes de correlación son mayores a 0.9 y explican entre un 60 y 83% la correlación de la variabilidad de la información utilizada a manera de promedio en la CPC.

Estos resultados reflejan que el cambio en el comportamiento de las variables meteorológicas debido a la migración de la ZCIT sobre la CPC tiene un efecto apreciable sobre los parámetros oceanológicos, en particular sobre la Vz. Si bien hay una mayor frecuencia de acople entre algunas variables, no es posible decir que solo un mecanismo domine la dinámica de las aguas de la CPC, pues todas las seis variables estudiadas participan en los procesos de interacción océano-atmósfera y, por lo tanto, tienen un peso importante en el análisis de correlación canónico, mostrado además en el hecho de que la diferencia entre los pesos no es muy amplia. De esta forma se verifica que el origen termohalino del ascenso de aguas es reforzado por el factor eólico en las capas superiores, es decir que la distribución e intensidad de los ascensos de agua presentan concordancia con el desplazamiento de los campos de viento propios de la ZCIT.

Discusión

Debido a que la Vz presenta rangos de valores muy pequeños, todavía no es posible obtener este dato a través de medición directa y, aunque no existe aún información suficiente como para identificar plenamente este proceso y caracterizar su comportamiento a nivel espacial y temporal, sí se han hecho algunos estudios a partir del modelamiento matemático y de la escasa información real de los campos de temperatura del mar (T) y salinidad de mar (S) en la región. Los estudios de las zonas de surgencia sobre la CPC iniciaron en 1995 con la aplicación de un modelo no lineal de cálculo de Vz basado en la integración de la tercera ecuación de movimiento en la columna de agua, el cual fue validado para la CPC [11]. Luego de esta experiencia, la presencia de zonas

de surgencia en la región fueron analizadas buscando en forma visual la relación de su aparición con fenómenos de interacción océano-atmósfera como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) [8 y 12] y el desplazamiento de la ZCIT [5 y 7]. De estos trabajos, se determinó que en general se presentan zonas de surgencia a lo largo de todo el año en la CPC, con mayores intensidades y extensiones en los meses de febrero-abril y noviembre-diciembre, y con mínimos observados entre agosto y octubre. La distribución e intensidad de las zonas de surgencia parecen estar correlacionadas con la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). A pesar de que estas surgencias no sean tan intensas como las de las costas peruanas, se considera que tienen un efecto significativo sobre la dinámica de la CPC [5, 7, 8, 12]. La utilización del modelamiento y del análisis de datos para la búsqueda de la relación entre fenómenos atmosféricos y la dinámica de las aguas de la CPC por medio de correlación estadística, se incrementó en el Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia (UN) luego de su participación en el programa de UNESCO/IOC Baltic Floating University realizado en el 2007, con el fin de aplicar los conocimientos adquiridos con casos reales [13], donde se logró mostrar e intercambiar experiencia acerca de los estudios que actualmente se realizan en la UN sobre la CPC. Entre los últimos trabajos, se tienen resultados de las relaciones entre las zonas de surgencia de la CPC y la migración de la ZCIT a partir de los cálculos de los movimientos verticales de las aguas de la CPC [9], y de la determinación de zonas de surgencia en superficie y capas más profundas correspondientes a los 010 y 5001000m respectivamente, estableciendo la existencia de ciclos de ascenso del agua a través del año a partir de un análisis preliminar sobre la influencia de la presencia y desplazamiento de la ZCIT con la distribución espaciotemporal de los focos de surgencia encontrados [14]. Las corrientes verticales determinadas por simulación a través de un modelo hidrodinámico no lineal [9], también fueron analizadas en [15] teniendo en cuenta valores mínimos de radiación de onda larga (ROL). Aunque en [15] los resultados indicaron la inexistencia de zonas de surgencia costeras debido a la baja resolución en la información inicial de aguas cercanas al litoral del Pacífico colombiano utilizada para el modelo, se encontró, que sí existe una relación entre la ZCIT y las surgencias en la CPC, con la verificación de que éstas son de origen

termohalino en las capas inferiores, y que son reforzadas por el factor eólico en las capas superiores. Sobre este mismo tema de búsqueda de las relaciones entre las zonas de surgencia de la CPC y la migración de la ZCIT en [16] se identifica la relación entre dos conjuntos de datos que representan a la migración de la ZCIT y a las surgencias de la CPC, encontrando que las características de las zonas de surgencia de la CPC a nivel superficial varían en magnitud y extensión espacial durante el año. En [16] por medio de la correlación canónica se estudió la relación entre dos conjuntos: uno con los datos meteorológicos T_a , H_r y V_w representativas del paso de la ZCIT y, el segundo con variables oceanológicas, que caracterizan a las aguas localizadas alrededor de los focos de surgencia: TSM, SSM y V_z . Se encontró que los coeficientes de correlación entre variables oceanológicas de las estaciones de mayor V_z y las meteorológicas de las 6 masas de aire, son superiores a 0.9, sobresaliendo la correlación con la masa de aire que se ubica sobre aguas del sector central. Al considerar a V_z como única variable oceanológica, los coeficientes son prácticamente iguales, mostrando muy buena correlación entre la aparición de los focos de surgencia, su desplazamiento y el paso de la ZCIT.

En los trabajos mencionados realizados anteriormente y en el presente estudio, se ha encontrado que la distribución espacial durante el año de los focos de surgencia obedece principalmente a la influencia de los sistemas atmosféricos característicos de la CPC y la inestabilidad de los vientos que permite dividir en etapas al comportamiento de los movimientos verticales de surgencia en la región. Una de las formas de evaluar esta relación ha sido estudiando cuál es la ubicación del principal sistema atmosférico, la ZCIT, que domina la variabilidad climática de la región y, para ello, en cada trabajo se ha demostrado que el paso de la ZCIT es verdaderamente influyente en la dinámica de las aguas de la ZCIT, en especial a través del campo de vientos.

Esto significa que los resultados corresponden a los procesos físicos de interacción que se conocen entre océano y atmósfera, pues mientras vientos en calma asociados con la ubicación de la ZCIT permanezcan sobre las aguas de la CPC el número de focos de surgencia que se tienen disminuyen, por el contrario, en los meses en los cuales la ZCIT está más alejada a la región de estudio, las condiciones son favorables para

el surgimiento de aguas a la superficie y, así mismo hay variación en la intensidad de la V_z . Esto se debe principalmente a uno de los mecanismos de respuesta entre dos variables acopladas que son la TSM y el V_w . En un proceso de retroalimentación positiva el cambio en TSM intensifica el gradiente de presión, lo que a su vez incrementa los vientos hacia el Norte, que luego refuerzan entonces la surgencia de aguas profundas de menor temperatura a capas superficiales y el ciclo vuelve a empezar. Una de las razones por las cuales se cree existe una diferencia considerable de las surgencias en la CPC respecto a las más fuertes dadas en costas peruanas se debería principalmente a la diferencia en las propiedades físicas y químicas del agua en esta parte del océano, dada por la posición geográfica de la región, que a su vez causa una compleja interacción con las corrientes superficiales provenientes de sectores cercanos a ella [17, 18]. Es importante decir que estos resultados son preliminares y ajustes al modelo deben ser realizados comparando con trabajos de otros investigadores y con mayor información *in situ*. Sin embargo es un intento importante por conocer más a fondo la dinámica de las aguas de la CPC.

Conclusiones

Se identificaron en promedio seis masas de aire que representan el paso de la ZCIT sobre la CPC.

Los centroides de las 6 masas de aire muestran que de Este a Oeste y Noroeste la T_a aumenta y la H_r disminuye. En cuanto a la dirección del viento su magnitud se hace más fuerte a medida que se avanza desde las primeras masas de aire (costeras) hacia las últimas (mar abierto), pero siguen siendo vientos débiles. Se registran los valores más bajos de T_a en la parte costera, al Sureste de la CPC con rangos de 22 a 24°C. A medida que se avanza hacia el Oeste y Noroeste los valores se incrementan llegando hasta rangos de 27 a 28°C.

En la CPC se observan ascensos de agua durante todo el año con un foco principal de surgencia localizado entre los 82°W y 3°N. La distribución de las zonas de surgencia y la variación de los valores de V_z tanto en ascenso como en descenso está de acuerdo con la variación de los campos de vientos presentes en la CPC que se modifican por el paso de la ZCIT. Los

vientos influyen favoreciendo a los movimientos verticales de surgencia y atenuándolos cuando la ZCIT se encuentra sobre la CPC.

La mayor extensión de las zonas de surgencia se aprecia en los primeros meses del año con focos de surgencia de mayor intensidad en el sector Sur, Suroeste y central de la CPC, especialmente en el periodo marzo-abril. En mayo las zonas de afloramiento empiezan a disminuir y son menores entre agosto-octubre, cuando los focos de surgencia se concentran en el centro al Este de la CPC. En noviembre y diciembre empiezan nuevamente a distribuirse hacia el Sur y ampliamente sobre la CPC.

La máxima correlación entre las masas uno, dos y tres (costeras) y el respectivo foco de surgencia se debe principalmente a los coeficientes de la H_r y V_z . Para las masas cuatro, cinco y seis (mar abierto) el peso de la V_w se incrementa.

Se verifica que el origen termohalino del ascenso de aguas es reforzado por el factor eólico en las capas superiores, es decir que la distribución e intensidad de los ascensos de agua presentan concordancia con el desplazamiento de los campos de viento propios de la ZCIT.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología Francisco José de Caldas (COLCIENCIAS), el cual, a través de la "Convocatoria Nacional para la Financiación de Proyectos de Investigación Año 2007, Modalidad Recuperación Contingente" apoyó al proyecto "Relación de la Distribución de Clorofila-*a* y de las Zonas de Surgencia de la Cuenca del Pacífico Colombiano con la Migración de la Zona de Convergencia Intertropical" con recursos financieros que hicieron posible la complementación del material presentado en este artículo. Así mismo agradecemos a la Dirección del Departamento de Geociencias y a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia Bogotá, por el apoyo en la realización de investigaciones sobre la Cuenca del Pacífico Colombiano.

Referencias

- [1] Prah HV, Cantera J, Contreras R. Pacífico colombiano, Fondo para la protección del medio ambiente. FEN-Bogotá, Colombia; 1990.
- [2] Zea J, Eslava JA, León GE. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología colombiana*; 2000:31-38.
- [3] Rueda G, Rodríguez E. Dinámica del campo de vientos superficial de la Cuenca Pacífica colombiana y el golfo de Panamá a partir de sensores remotos. *Memorias Congreso Colombiano de Meteorología*; Quibdó, Colombia; [CD ROM, ISBN 978-958-97585-5]. 2007.
- [4] Rodriguez E, Stuardo J. Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific and its relationship with the wind field using ADEOS-I data. *Earth and Planetary Sciences. Bangalore* - 560080, India. 2002; 111 (3):227-236.
- [5] Villegas N. Evolución mensual de las corrientes verticales y zonas de surgencia en la Cuenca del Pacífico colombiano CPC. *Boletín Científico CCCP*. 2002; (9):34-44.
- [6] [Http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/tr_woa05.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/tr_woa05.html).
- [7] Karlin L, Villegas N. Modelación de circulación vertical y upwelling del Océano Pacífico colombiano con un modelo de diagnóstico. *Materiales de sección final Cons. Cient.* 2728 enero 2003. II Oceanología, Ecología y Física medio natural. St. Petersburg.: RSHU 2003:29-31.
- [8] Villegas N. Estudio del movimiento vertical de las aguas en la región Este de la Cuenca del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* 1997; (6):71-80.
- [9] Villegas N, Málikov I. Software aplicativo para el cálculo de corrientes verticales de la Cuenca del Pacífico colombiano: Estructura Vertical de las Aguas EVA. V.1. Certificado de registro de soporte lógico libro 13, Tomo 20, partida 210. Dirección Nacional del Derecho de Autor Bogotá. 2008.
- [10] Statgraphics Plus 5.1. Professional Edition. Copyright 1994-2001. Statistical Graphics Corp.
- [11] Villegas N. Aparición del fenómeno El Niño en los campos dinámicos del Pacífico colombiano. Trabajo de grado para la obtención del título de Ingeniero Oceanólogo; Instituto Estatal Hidrometeorológico de Rusia. RSHI 1995:100.
- [12] Villegas N. Movimiento vertical de las aguas en el Pacífico colombiano durante junio y octubre de 1996. *Boletín Científico CCCP* 1997; (6):81-93.
- [13] Villegas N. Participation of the Department of Geosciences of the Universidad Nacional de Colombia in the UNESCO/IOC programme "Baltic Floating University" onboard the sailing catamaran Centaurus II. *BFU Research Bulletin, RSHU. St. Petersburg.* 2008; (10): 40-42.

[14] Díaz D, Villegas N, Málikov I. 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 a la Zona de Convergencia Intertropical. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó. Universidad Tecnológica del Chocó* 2008; 27(2):200-206.

[15] Díaz D, Villegas N. Focos de surgencia en la Cuenca del Pacífico colombiano y su relación con los valores mínimos de radiación de onda larga asociados a la posición de la ZCIT. *Memorias XV Congreso Brasileiro de Meteorología 24 y 29 de Agosto del 2008. Sao Paulo Brasil. 2008.*

[16] Díaz D. Migración de la Zona de Convergencia Intertropical y su posible relación con las Zonas de Surgencia en la Cuenca del Pacífico colombiano. Tesis para la obtención del título de Magíster en Ciencias Meteorología. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2009:100.

[17] Villegas N, Málikov I. Modelación de la estructura dinámica de las aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* 2006;(13):97-114.

[18] Villegas N, Málikov I. Atlas de las características termohalinas y dinámicas de las aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano: con base en simulación matemática. Editorial UNIBLIOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá 2009: 207.