

Variabilidad intra-anual del régimen climático en sectores de surgencia en el sudeste del Mar Caribe, usando ERA Interim

Intra-annual variation of climate regime on upwelling zones in the Southeast Caribbean Sea

Ricardo A. Sarmiento-Devia¹, Águeda Vásquez López-Escobar², Miguel Bruno Mejías², Paola M. Dávila³ y Andrés Franco-Herrera⁴

¹Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Sistemas Marino-Costeros, Universidad de Antofagasta, Av. Universidad de Antofagasta 02800, Antofagasta, Chile. ricardo.sarmiento@uantof.cl

²Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Av. República Saharaui, s/n., 11510, Puerto Real, Cádiz, España. agueda.vazquez@uca.es, miguel.bruno@uca.es

³Departamento de Ciencias Acuáticas y Ambientales, Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Biológicos, Universidad de Antofagasta, Av. Universidad de Antofagasta 02800, Antofagasta, Chile. pdavila@uantof.cl

⁴Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Sede Santa Marta, CR. 2 No 11-68 Edificio Mundo Marino, El Rodadero, Santa Marta, Colombia. andres.franco@utadeo.edu.co

Abstract.- The relationship between climatic periods and intensity of 2 upwelling cores located in the Colombian Caribbean from the time analysis of climatic indicators and sea surface temperature (SST) for the period 1990-2009 were analyzed. Four climatic seasons are described for this region with differences and similarities between points located in front of the Guajira Peninsula and Tayrona National Natural Park (PNNT). Spectral analysis of the Ekman transport and differences of SST with the furthest points of the coast estimates, as indicators of the wind stress and the magnitude of the upwelling along the studied period, allow establishing a direct correspondence between the season and the upwelling regime. In the case of surface water off the Guajira Peninsula, there are some oscillations periods that not correspond with wind regime in the area. These oscillations could be influenced by the behavior of the Caribbean Current and/or upwelling cores off Venezuela and/or Trinidad and Tobago. According to the spectral and descriptive analysis applied to ERA Interim data, these reflect well the behavior of the climate in the area, despite their low temporal and spatial resolution.

Key words: Precipitation, zonal and meridional wind, Ekman transport, spectral analysis, sea surface temperature

Resumen.- Se analizó la relación entre las épocas climáticas y la intensidad de 2 centros de surgencia localizados en el Caribe colombiano a partir del análisis temporal de indicadores climáticos y la temperatura superficial del mar (TSM), para el período 1990-2009. Se describen 4 épocas climáticas en la región con diferencias y similitudes entre puntos localizados frente a la Península de la Guajira y en cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT). El análisis espectral de las estimaciones de transporte de Ekman y diferencias de TSM, con los puntos más alejados de la costa, como indicadores del esfuerzo del viento y la magnitud de los afloramientos a lo largo del período estudiado, indica una correspondencia directa entre la época climática y el régimen de surgencia. En el caso de las aguas superficiales frente a la Península de la Guajira, se encuentran períodos de oscilación en la TSM distintos al régimen de vientos en la zona. Estas oscilaciones podrían estar influenciadas por el comportamiento de la corriente del Caribe y/o focos de surgencia frente a Venezuela y/o Trinidad y Tobago. De acuerdo al análisis espectral y descriptivo realizado a los datos de ERA Interim, estos reflejan bien el comportamiento del clima en la zona, a pesar de su baja resolución temporal y espacial.

Palabras clave: Precipitación, componentes zonal y meridional del viento, transporte de Ekman, temperatura superficial del mar, análisis espectral

INTRODUCCIÓN

El ascenso de masas de agua subsuperficiales, usualmente con alto contenido de nutrientes y menor temperatura, ocasionado por el esfuerzo del viento superficial favorable a la surgencia, y el efecto de Coriolis, ocurre con mayor intensidad en los bordes orientales de los océanos como en el sistema de California, de Humboldt (Chile-Perú), de

Benguela (África) y Canarias (Mann & Lazier 2006). También se tiene registro de la ocurrencia de procesos de surgencia en otro tipo de borde donde se manifiestan condiciones de viento favorables a la surgencia, como es el caso del extremo norte de Sudamérica en el Caribe colombiano, frente a la Península de la Guajira y en las

cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona-PNNT (Bula-Meyer 1990, Arévalo & Franco 2008). Allí se desarrollan procesos de surgencia de tipo mesotrófico, que se manifiestan por un leve incremento de la biomasa fitoplanctónica en las capas superficiales, generado por el ascenso del Agua Intermedia del Atlántico Norte (AIAN) proveniente del mar de Noruega (Franco-Herrera 2005).

Hasta ahora se tienen múltiples aproximaciones sobre los efectos de la surgencia en esta zona (Fajardo 1978, Corredor 1979, Andrade & Barton 2005, Lonin 2010), y especialmente sobre sus comunidades planctónicas y/o el régimen de productividad primaria (Corredor 1979 por Álvarez-León 1995). También se ha estimado la relación directa de los vientos Alisios del noreste y de los vientos locales, con intensidades superiores a 4 m s^{-1} y de dirección predominante suroeste, con la ocurrencia de estos procesos de surgencia costera (Márquez 1982, Franco-Herrera 2005). Sin embargo, existen pocos estudios de su comportamiento a escala interanual (Ruiz-Ochoa *et al.* 2012).

El objetivo de este estudio, fue analizar la variabilidad intra anual de los eventos de surgencia en el Caribe colombiano, en función del comportamiento atmosférico local (precipitación y componentes meridional y zonal del viento) y condiciones oceanográficas (Temperatura Superficial del Mar, TSM). Para ello se emplean datos del reanálisis del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA Interim*¹ (Simmons *et al.* 2006, Dee *et al.* 2011) para el período 1990-2009. En este sentido, se comparó descriptivamente la similaridad de los datos generados por ERA Interim como herramienta para aproximarse al régimen climático de la zona, a pesar de su baja resolución temporal y espacial, con datos de una estación meteorológica local. Así se analiza el comportamiento de la surgencia costera en función del régimen climático en el sector frente al PNNT y frente a la Península de la Guajira, estableciendo diferencias y semejanzas entre ambos focos.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El Caribe colombiano corresponde al extremo noroccidental de Sudamérica, abarcando una línea de costa de 1937 km (INVEMAR 2005) en el centro del Mar Caribe. Al sudeste de la cuenca Colombia (Fig. 1) se ubica

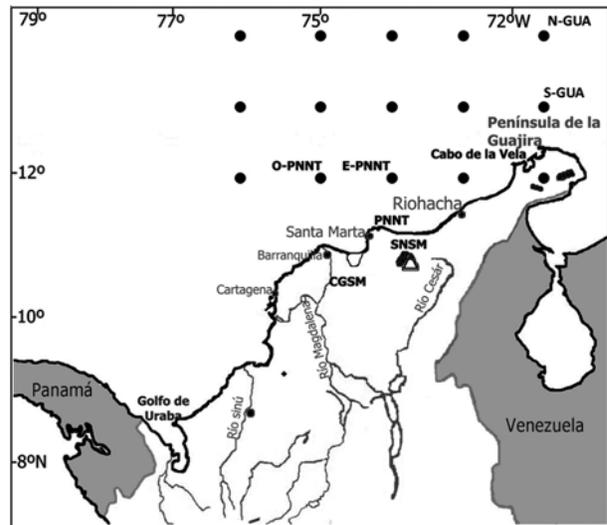


Figura 1. Sudeste de la cuenca Colombia, en el mar Caribe, principales accidentes costeros de la zona, junto a los nodos considerados en este estudio. SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta; CGSM: Ciénaga Grande de Santa Marta; PNNT: Parque Nacional Natural Tayrona; GUA: Península de la Guajira. Modificado de IGAC (2010) / Southeast of Colombian Basin, at the Caribbean Sea, main coastal features next to the nodes in this study. SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta, CGSM: Ciénaga Grande de Santa Marta, Tayrona National Natural Park; GUA: Guajira Peninsula. Modified from IGAC (2010)

la Península de la Guajira, una planicie amplia donde sobresale una montaña costera (a 42 km del litoral) denominada Sierra Nevada de Santa Marta, considerada la más alta del mundo (5775 msnm) (Lonin *et al.* 2010). En esta zona, la plataforma continental varía en extensión desde lugares donde casi está completamente ausente, como en Cabo San Agustín y los alrededores del PNNT, hasta sectores con más de 40 km de ancho, entre el Cabo de la Vela y Riohacha (Álvarez-León *et al.* 1995). También destaca la presencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta y varios deltas, siendo el más importante el del río Magdalena, con una cuenca de 257000 km² y un caudal medio multianual de 7000 m³ s⁻¹. Estos tienen influencia tanto en la dinámica como en las concentraciones de sedimentos y materia orgánica en las aguas costeras de la región (Andrade 2003).

La variabilidad climática de esta región depende de la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), una banda longitudinal formada por la convección de masas de aire de los hemisferios norte y sur, y a su vez relacionada con la presencia de nubes de máximo

¹http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily

desarrollo vertical (cúmulos nimbos), y abundantes precipitaciones (IDEAM-UPME 2006). Su presencia genera una disminución de los vientos Alisios y una inversión de la corriente superficial en sentido oeste-este (Domínguez 2002, Andrade 1993 y Donoso 1990 *vide* Mejía 2008). La ZCIT se localiza al norte del Ecuador durante diciembre-febrero y a mediados de marzo toma dirección sur (Lonin *et al.* 2010).

Hasta ahora se han definido 4 períodos climáticos típicos para el Caribe colombiano: Época Seca Mayor (diciembre-abril), caracterizada por la presencia de los vientos Alisios del Noreste de mayor intensidad (Márquez 1982, Bula-Meyer 1990); Época Lluviosa Menor (mayo-junio), cuando los vientos se ven debilitados; Época Seca Menor o 'Veranillo de San Juan' (julio-agosto), y finalmente la Época de Lluvias Mayor (septiembre-noviembre), donde se produce la mayor proporción de lluvias a lo largo del año (Bula-Meyer 1990, Corredor 1992, Andrade 1993, Franco-Herrera 2005). A mayor escala, la fase cálida del ENOS genera incrementos en la temperatura de la Época Seca (diciembre-abril), y retrasos en el inicio de la Época de Lluvias (mayo-junio) (Lozada *et al.* 2002), produciendo incluso eventos de extrema sequía en la Península de la Guajira (Álvarez-León *et al.* 1995).

La componente zonal del viento está dominada por los Vientos Alisios con velocidades de 5 a 11 m s⁻¹ (IDEAM-UPME 2006). El viento en esta región varía con el lugar y la época del año, dependiendo de la orografía de la zona y el desplazamiento de la ZCIT. Su presencia reduce la temperatura superficial del mar cerca de la costa a valores mínimos en la Época Seca Mayor (Corredor 1992, Arévalo & Franco 2008, Morales *et al.* 2001), mientras que su poca incidencia durante la Época de Lluvias, sumada al mayor aporte de masas de agua cálida del oeste y suroeste, genera incrementos de la temperatura en la zona costera (Morales *et al.* 2001).

Las aguas litorales son altamente estratificadas especialmente en las desembocaduras de los ríos, presentando valores de densidad superficial (σ_t) entre 16 y 23 kg m⁻³, mientras que sobre la plataforma continental superan los 28 kg m⁻³ (Fajardo 1979, Bula-Meyer 1990, Cabrera & Donoso 1993, Álvarez-León *et al.* 1995, Arévalo & Franco 2008, INVEMAR-ANH, 2009). En la porción noreste del Caribe colombiano se localiza una

capa de mezcla estrecha y somera, entre 15 y 20 m de espesor y temperatura promedio de 25,5°C, por encima del Agua Subtropical Sumergida (ASS), que se ubica entre los 100 y 200 m de profundidad (Fajardo 1979), con temperaturas de 21 a 24°C, salinidades entre 36,5 y 37,2, y densidades cercanas a 1024 kg m⁻³ (Morales *et al.* 2001, Fajardo 1979, Bula-Meyer 1990, Cabrera & Donoso 1993).

La circulación oceánica en esta área está dominada por 3 corrientes que resultan del flujo de agua a través de las Antillas Menores desde el Atlántico hacia el Mar Caribe: la corriente del Caribe (0-160 m de profundidad), la contracorriente del Darién o contracorriente Panamá - Colombia, de dirección Este y velocidad máxima de 10 cm s⁻¹ (a 180 m de profundidad) sobre el borde de la plataforma continental; y la corriente profunda del Caribe, que fluye hacia el Este sobre el talud y fondos abisales (4000 m de profundidad) (Andrade *et al.* 2003). Además, en superficie se presentan remolinos de giro ciclónico y anticiclónico, de tamaño variable entre decenas hasta aproximadamente 700 km de diámetro, con velocidades de desplazamiento entre 20-30 cm s⁻¹, desde la cuenca de Venezuela o del paso de las Antillas hacia el centro del Caribe, persistiendo hasta alrededor de 4 meses (Andrade & Barton 2000).

En la región se ha identificado un foco de surgencia al norte de la Península de la Guajira, entre Cabo de la Vela y Punta Gallinas, cuya extensión espacial está determinada por la intensidad de los vientos Alisios (Corredor 1992, Morales *et al.* 2001, Andrade & Barton 2005), teniendo magnitudes de transporte de volumen cercanas a 1 Sv por 1000 km de costa durante la Época Seca (Andrade & Barton 2000), cuando puede extenderse hasta el oeste de Santa Marta (11°N; 74°O) (Arévalo & Franco-Herrera 2008). Más recientemente, Páramo *et al.* (2011) describen otros centros de surgencia en la zona entre Puerto Bolívar y Cabo de la Vela.

ORIGEN DE LOS DATOS ANALIZADOS

Se trabajó con datos oceanográficos y atmosféricos obtenidos en formato numérico del re-análisis ERA Interim² del Centro Europeo para La Predicción del Clima a Mediano Plazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF*). Esta tiene una resolución temporal de 12 h y espacial 1,5 x 1,5° de Latitud-Longitud.

²<http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

ERA Interim es el tercero de los re-análisis realizados por el ECMWF, posterior a ERA - 15 (1979-1993) y ERA - 40 (1957-2002). Abarca el período 1989-2012, incluyendo información obtenida de bases de datos de los trabajos anteriores. Además, cuenta con adelantos como el uso del sistema de asimilación de datos en 4 dimensiones 4D-Var, que utiliza las observaciones de las 12 h anteriores para proveer la mejor condición inicial en la predicción de la siguiente hora para cualquier variable.

Esta herramienta es esencial para la asimilación de datos en zonas donde existe una cobertura reducida de sistemas de medición atmosférica como el hemisferio sur, siendo aplicada en la validación de modelos a largo plazo para sistemas de predicción como el *Ensemble Prediction System*.

En este estudio se analiza la precipitación total y las componentes zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) del viento (10 msnm), y la temperatura superficial del mar (TSM) para el período 1990-2009. Para cada variable se seleccionaron nodos cercanos al centro de surgencia frente a la Península de la Guajira (10°23'-12°28'N; 71°06'-73°39'O), y en el departamento del Magdalena, en cercanías del PNNT (11°16'N; 74°03'O), y entre las coordenadas 12-15°N y 72-78°O área referida para efectos de este trabajo como Caribe colombiano.

PRECIPITACIÓN Y COMPONENTES DEL VIENTO

Para cada una de las componentes del viento se estimó el promedio semi-diario en el período de estudio (1990-2009), en cada uno de los puntos de interés, resultando en series de 730 datos. En el caso de la precipitación total, se estimó el promedio mensual (240 datos). Así por ejemplo, para un punto A el promedio semi-diario de la componente zonal del viento (U_A), a las 0:00 horas del 1 de enero fue igual a:

$$\frac{\text{Viento } U_{A_{00:00:1-\text{enero}}}}{\text{Viento } U_{A_{00:00:1-1990}} + \text{Viento } U_{A_{00:00:1-1991}} + \dots + \text{Viento } U_{A_{00:00:1-2009}} \Big/ 20}$$

y para el promedio de la precipitación mensual en el punto A, en enero tendría:

$$\frac{\text{Prec. mensual } A_{\text{ene.1990-2009}}}{\text{Prec.Total } A_{\text{ene.1990}} + \text{Prec.Total } A_{\text{ene.1991}} + \dots + \text{Prec.Total } A_{\text{ene.2009}} \Big/ 20}$$

Así, se describen las épocas climáticas predefinidas en función del comportamiento promedio de cada variable a lo largo del año. Además, se calculó el módulo del viento en los puntos de interés, a partir de las series completas de ambas componentes, en el período de estudio.

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM)

Para esta variable se calculó el promedio semi diario para los nodos considerados en cada sector (Fig. 1), PNNT (E-PNNT y O-PNNT) y frente a la Península de la Guajira (N-GUA y S-GUA), así como la diferencia de temperatura entre estos nodos y aquellos más alejados de la costa. Se consideró que los valores negativos en la diferencia de temperatura superficial (dTSM), corresponden a condiciones de surgencia cerca de la costa.

TRANSPORTE DE EKMAN

En procesos de surgencia, el volumen de agua desalojado y cuyo reemplazo ocasiona el ascenso de agua subsuperficial cerca de la costa, está directamente relacionado con la magnitud del esfuerzo del viento sobre la superficie de la zona costera. Este empuje, junto con el efecto de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis), desvía el agua de la capa afectada por el viento a 90° de la dirección del viento, en el caso del hemisferio Norte (Mann & Lazier 2006). El transporte de Ekman se reflejará por tanto en la diferencia de temperatura superficial entre las aguas costeras y aquellas más alejadas.

Se calculó el Transporte de Ekman [(kg m⁻¹ s⁻¹) Stewart 2008], considerando el espesor de la capa de Ekman obtenido a partir de la intensidad del viento, la densidad del aire (1,2 kg m⁻³) y la densidad del agua (1024 kg m⁻³). Previamente se calculó la componente del viento paralela a la costa, derivada de la rotación del sistema de ejes. Por tanto el transporte de masa aquí estimado representa el desplazamiento de agua debido al viento paralelo a la costa.

ESTACIÓN COMARTA

Los datos de viento de ERA Interim fueron contrastados con datos de la Estación Meteorológica de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, Sede Santa Marta, (11°12.11'N, 74°13.54'O, Equipo Davis Advantage Pro2), administrada por el Centro de Observación Marina Tadeista-COMARTA. Éstos cuentan con una resolución temporal de 30 min, y corresponden al período del 6 de noviembre 2009 al 6 de enero 2012.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Se aplicó un análisis espectral al transporte de Ekman y a las diferencias de temperatura, considerando la resolución temporal original de los datos (cada 12 h). También se aplicaron filtros de Fourier para suavizar la variabilidad de alta frecuencia en cada serie. Este mismo análisis se realizó para los datos de viento colectados en la estación meteorológica COMARTA (Santa Marta, Colombia).

RESULTADOS

ÉPOCAS CLIMÁTICAS: PRECIPITACIÓN TOTAL Y COMPONENTES DEL VIENTO

De acuerdo a la variabilidad temporal del viento y de la precipitación, se pueden distinguir 4 épocas climáticas (Fig. 2), iniciando con la Época Seca Menor, de diciembre a enero, con valores de precipitación por encima de 10 mm y vientos intensos para ambas componentes, meridional ($>1,61 \text{ m s}^{-1}$) y zonal ($8,26 \text{ m s}^{-1}$). Esta es seguida por la Época Seca Mayor, de febrero a abril, donde la precipitación es mínima, mientras se presentan vientos máximos que provienen del Este. Le sigue una Época de Transición, entre mayo y agosto, cuando se incrementan las precipitaciones sucesivamente, en especial en los puntos más alejados de la costa, y los vientos se reducen hasta casi desaparecer. Finalmente se identifica la Época de Lluvias Mayor, de septiembre a noviembre, donde los valores promedio de precipitación mensual varían entre 40 y 50 mm, e incluso pueden llegar a duplicar los estimados para meses anteriores. Además, la componente zonal del viento se reduce a cero, mientras el flujo en dirección Norte-Sur (V) rodea los 4 m s^{-1} . Así se evidencia la dominancia de la componente zonal del viento, muy por encima de la componente meridional, que presenta valores positivos casi en todo momento, acentuándose a fines de junio e inicios de julio. Esta condición se conoce como 'Veranillo de San Juan' (Franco & Arévalo 2008).

La precipitación mensual presentó un comportamiento altamente variable, con valores entre 0,053 y 92,49 mm, mientras que el valor promedio oscila entre $1,61 (\pm 1,91)$ para febrero en el nodo E-PNNT (Fig. 1), y 47,21 mm para octubre en el mismo punto. Con respecto al viento, la componente zonal presentó valores máximos de $15,11 \text{ m s}^{-1}$, mientras que para la componente meridional se estiman promedios semi-diarios de hasta $7,43 \text{ m s}^{-1}$, observando un rango de oscilación mucho menor al flujo en dirección este-oeste.

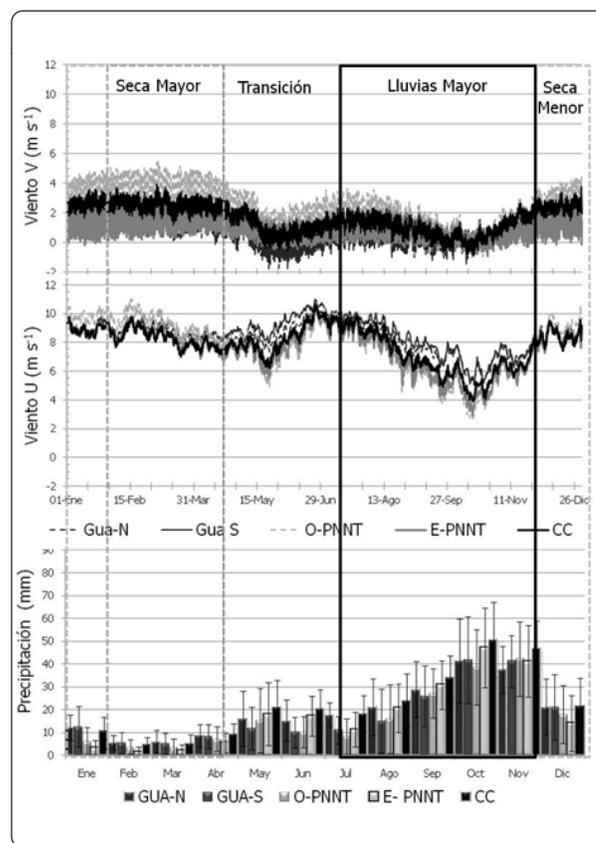


Figura 2. (Superior y Medio). Promedio semi-diario del viento meridional (v) y zonal (u); (Inferior) Precipitación mensual en la franja $12-15^{\circ}\text{N}$, $78-72^{\circ}\text{O}$, (CC) y puntos escogidos frente a la Península de la Guajira (GUA-N y GUA-S) y en cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona (O-PNNT y E-PNNT), para el período 1990-2009 / (Top and Middle). Semi-daily average speed of the meridional (v) and zonal (u) wind, (Bottom) Monthly average rain for $12-15^{\circ}\text{N}$, $78-72^{\circ}\text{W}$ (CC), and selected points in front of the Guajira Peninsula (GUA-S and GUA-N) and close to the Tayrona National Natural Park (O-PNNT and E-PNNT) for the 1990-2009 period

Al considerar el promedio de la precipitación mensual para el período de estudio en el norte de la Península de la Guajira, el punto más cercano a la costa muestra una variabilidad mucho mayor que el nodo ubicado en la zona oceánica, a pesar de presentar magnitudes muy similares entre sí. Sólo de diciembre a abril ambos nodos mantienen una mayor similitud con el promedio para toda la zona de estudio (Fig. 2). Se sugiere que el régimen de precipitación frente a la Península de la Guajira está mejor relacionado con el comportamiento de esta variable sobre la superficie continental que con el resto de la cuenca del Caribe. La

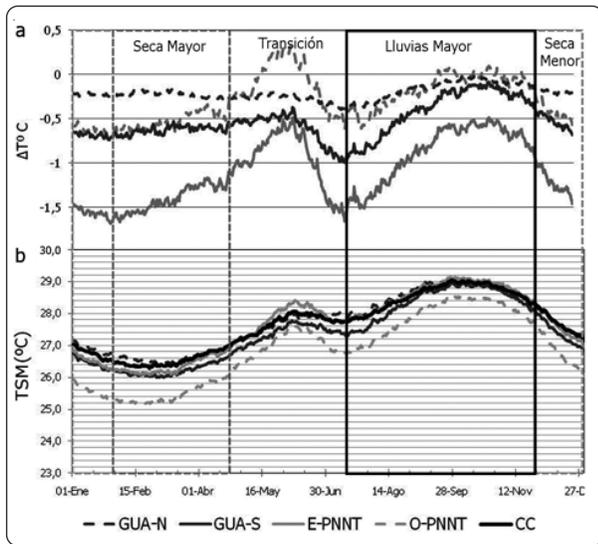


Figura 3. a) Diferencias de TSM entre puntos localizados frente a la Península de la Guajira (GUA-N y GUA-S) y las cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona (O-PNNT y E-PNNT), y los puntos más alejados de la costa, para el período 1990-2009. b) Promedio semi-diario multianual de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) para la franja 12-15°N, 78-72°O, (CC) / a) SST Differences between points located off the Guajira Peninsula (GUA-N and GUA-S) and close to the Tayrona National Natural Park (O-PNNT and E-PNNT), and the farthest off points, for the period 1990-2009. b) Multi-year semi-daily average of the Sea Surface Temperature (SST) for to the 12-15°N, 78-72°W area (CC)

precipitación en los nodos en cercanías al PNNT conserva el patrón antes descrito, mostrando en todos los meses valores por debajo del promedio para el área de estudio, aunque las diferencias con este valor se reducen durante septiembre-noviembre.

A su vez, la componente meridional del viento exhibe pocas diferencias entre los nodos en la Península de la Guajira y PNNT, y entre estos y el resto de la zona considerada, si bien el viento en el nodo O-PNNT resulta más intenso que el promedio estimado para toda la zona de estudio, especialmente durante el primer semestre del año. La componente zonal es dominante en promedio para el Caribe Colombiano, mientras que la componente meridional mantiene una diferencia positiva cercana a 1 m s⁻¹ con respecto a los nodos en cercanías de PNNT (Fig. 2).

El módulo del viento para el período de estudio (1990-2009) osciló entre velocidades de 0,04 y 17,69 m s⁻¹, ubicándose las máximas intensidades en los nodos frente a la Península de la Guajira (Fig. 4). A escala interanual, se puede apreciar la variabilidad estacional y una intensificación de los valores mínimos cada 4 años, aproximadamente.

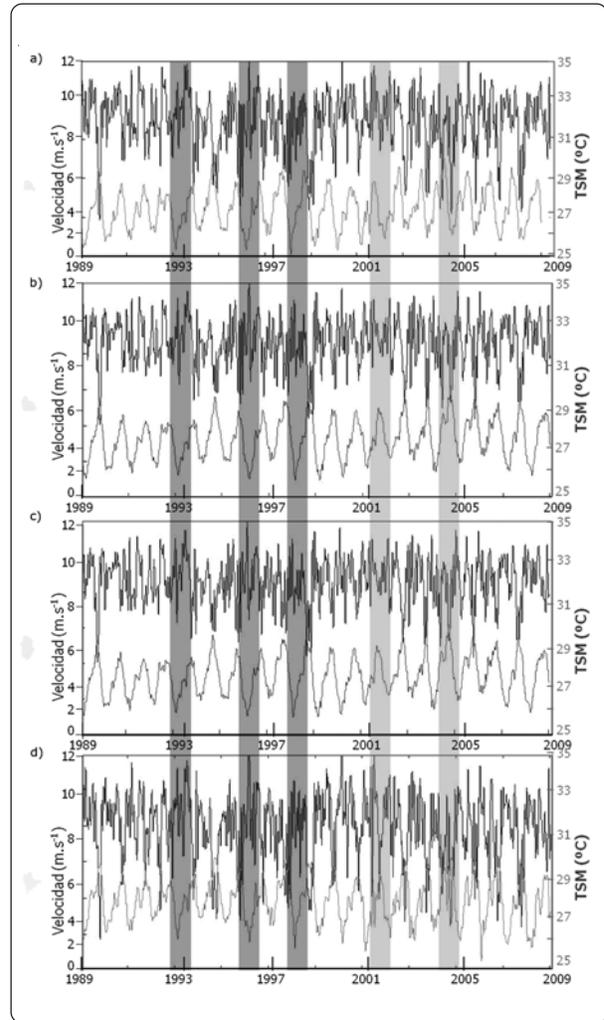


Figura 4. Series de Velocidad del Viento (m s⁻¹) y Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C) en 2 puntos al norte de la Península de la Guajira (72°O, 15°N; y 72°O, 13,5°N; a y b), y otros 2 nodos localizados en cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona (75°O, 12°N; y 73,5°O, 12°N; c y d), para el período 1990-2009, según datos provistos por ERA Interim (ECMWF Data Server)², suavizados eliminando frecuencias de oscilación por debajo de período mensual. Las zonas oscuras resaltan los períodos de máxima intensidad del viento y menor TSM, y las más claras destacan períodos de poco viento y mayor TSM / Series of Wind Speed (m s⁻¹) and Sea Surface Temperature (TSM, °C) at 2 points at north of the Guajira Peninsula (72°W, 15°N, and 72°W, 13.5°N, a and b), and other 2 nodes located close to Tayrona National Natural Park (75°W, 12°N, and 73.5°W, 12°N, c and d), for the period 1990-2009, according to data provided by ERA Interim (ECMWF Data Server)², softened eliminating oscillation frequencies below the monthly period. The high shaded areas highlight periods of peak wind intensity and lower SSTs, and low high shaded highlight periods of low wind intensity and warmer SSTs

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM)

Según los datos de Era Interim, el promedio semi diario de TSM para los nodos en la franja considerada en el período 1990-2009, osciló entre 25,5 y 30,1°C. Estos se mantienen por debajo de los 27°C desde inicios de diciembre hasta la tercera semana de abril, coincidiendo con la mayor intensidad del viento meridional durante las Épocas Seca Mayor y Seca Menor. Sin embargo, la TSM se incrementa gradualmente a partir de marzo y hasta el inicio de junio, donde registra un leve declive que se prolonga por un par de semanas. Luego los valores reactivan su incremento en forma regular, alcanzando su máximo al final de septiembre, en la Época de Lluvias Mayor (Fig. 3).

En el caso de la Península de la Guajira, la TSM de los nodos considerados mantiene este comportamiento sinusoidal, con mínimos entre febrero y marzo, y máximos en septiembre y octubre, mientras que sus valores promedio oscilan entre 25,9°C y 29,1°C. Sólo el nodo más cercano a la costa (GUA-S) permanece un par de décimas de grado por debajo del promedio estimado para toda la zona. Esto podría tomarse como un indicador típico de la condición de surgencia permanente al frente de la Península de la Guajira (Fig. 3).

En el nodo O-PNNT se observa un rango de oscilación mucho más amplio que el estimado para el resto del Caribe o para la Península de la Guajira, a pesar de mostrar una tendencia general similar con mínimos concentrados hacia finales de abril, y máximos entre octubre y noviembre (Fig. 3). Por su parte, el nodo E-PNNT presenta un comportamiento similar al de los demás nodos considerados.

Los valores más bajos de TSM se ubican en los nodos cerca del PNNT mientras los máximos se localizan en la Guajira. Esta serie no presenta alguna tendencia interanual exceptuando la cercanía en magnitud entre los valores máximos de cada año (Fig. 4). Aproximadamente cada cuatro años, durante la Época Seca Mayor, el mínimo de TSM se intensifica. Así mismo, se puede apreciar la disminución típica debida al Veranillo de San Juan durante la Época de Transición, aunque puede no estar presente.

En este estudio se calculó la diferencia de TSM entre cada punto de interés y el punto más alejado de la costa. Por ejemplo en el caso del nodo norte frente a la Guajira (GUA-N), este se comparó con el nodo en las coordenadas 16,5°N y 70,5°O. Para este indicador (dTSM) el nodo localizado al Este del Parque Nacional Tayrona (E-PNNT) presentó el rango de oscilación más amplio (Fig. 3). El promedio semi diario de las diferencias

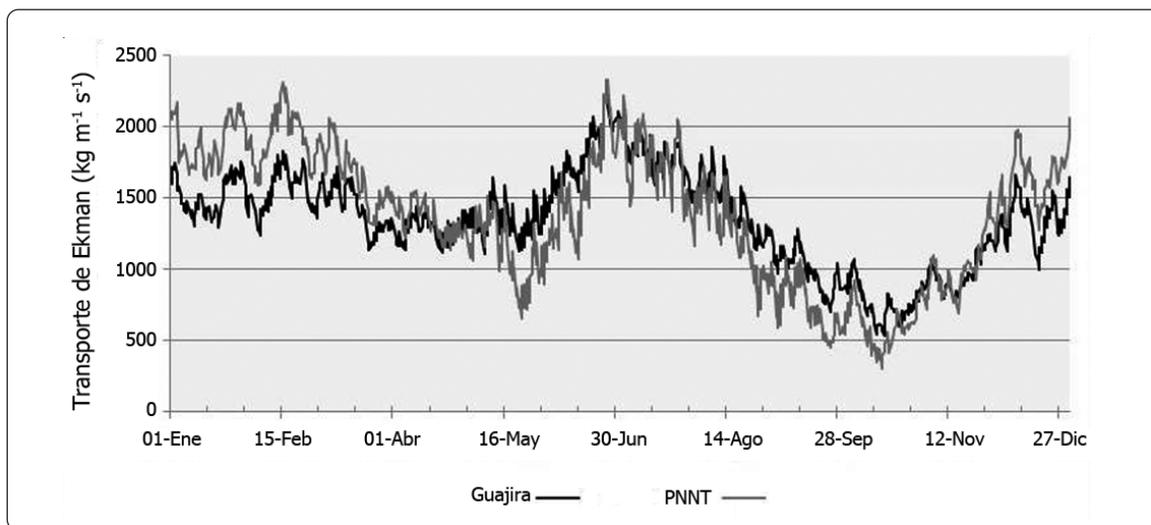


Figura 5. Transporte de Ekman promedio semi-diario interanual en puntos frente al PNNT y al norte de la Península de la Guajira para el período 1990-2009, estimado a partir del promedio de las componentes del viento, según datos provistos por el proyecto ERA-Interim del ECMWF / Twelve hours annual average Ekman transport in PNNT and the Guajira Peninsula points north for the period 1990-2009, based on average wind components, according to data provided by the ECMWF ERA-Interim project

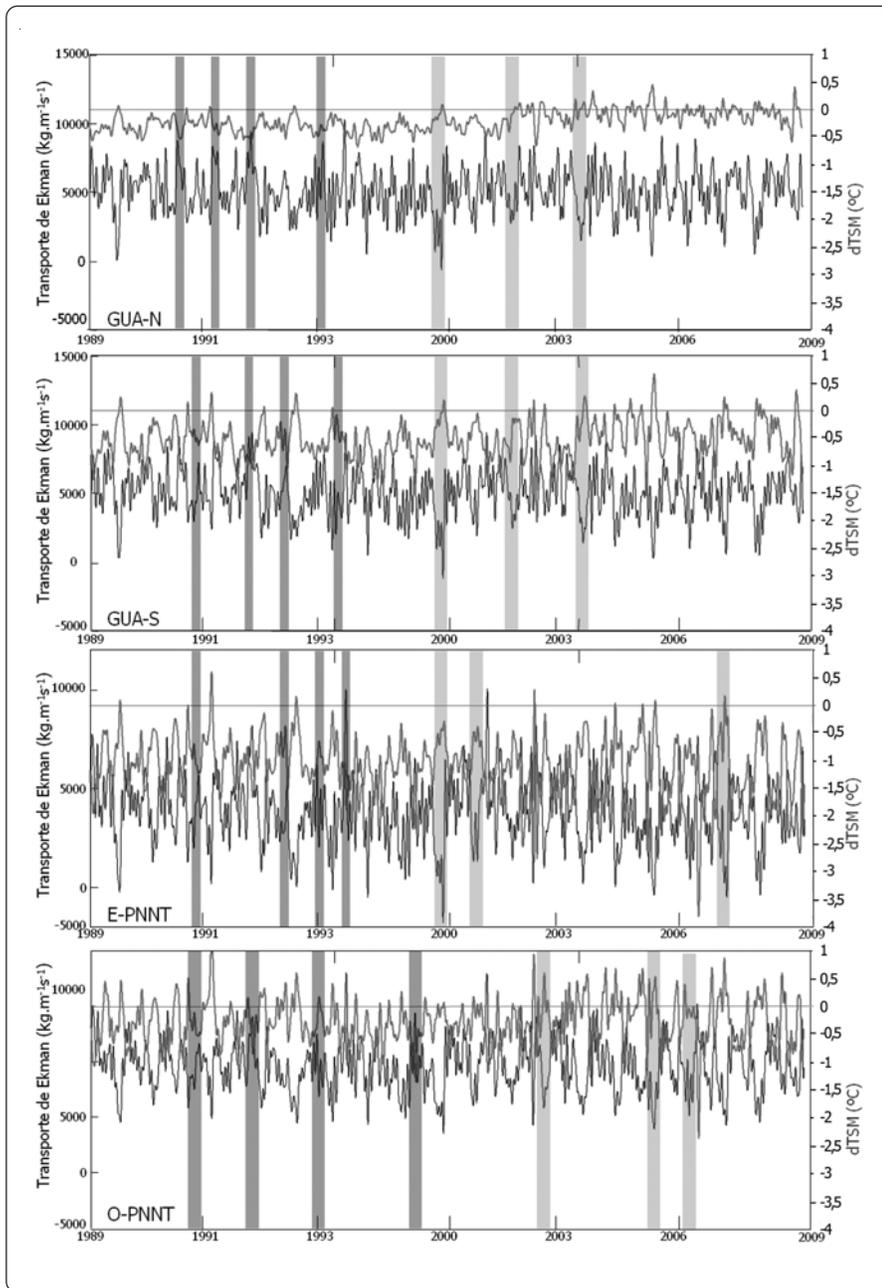


Figura 6. Transporte de Ekman ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), estimado a partir de las componentes del viento en superficie, y diferencias de Temperatura Superficial del Mar (dTSM, $^{\circ}\text{C}$), en 2 puntos al norte de la Península de la Guajira (72°O , 15°N ; y 72°O , $13,5^{\circ}\text{N}$; GUA-N y GUA-S), y otros 2 nodos localizados en cercanías del Parque Nacional Natural Tayrona (75°O , 12°N ; y $73,5^{\circ}\text{O}$, 12°N ; O-PNNT y E-PNNT), para el período 1990-2009, según datos provistos por ERA Interim (ECMWF Data Server)², suavizados eliminando frecuencias de oscilación por debajo del período mensual. Las zonas oscuras resaltan los períodos de máximo Transporte de Ekman y mayor enfriamiento del agua superficial, y las más claras destacan períodos de poco transporte y menor enfriamiento / Ekman transport ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), based on components of surface wind, and differences of Sea Surface Temperature (dTSM, $^{\circ}\text{C}$) at 2 points north of the Guajira Peninsula (72°W , 15°N , and 72°W , 13.5°N ; GUA-N and GUA-S), and other 2 nodes located close to Tayrona National Natural Park (75°W , 12°N , and 73.5°W , 12°N ; O-PNNT and E-PNNT) for the 1990-2009 period, according to data provided by ERA Interim (ECMWF Data Server)², smoothed eliminating oscillation frequencies under the monthly period. The high shaded areas highlight periods of high Ekman transport and higher shallow cooling, and low high shaded areas highlight periods of low transport and fewer shallow cooling

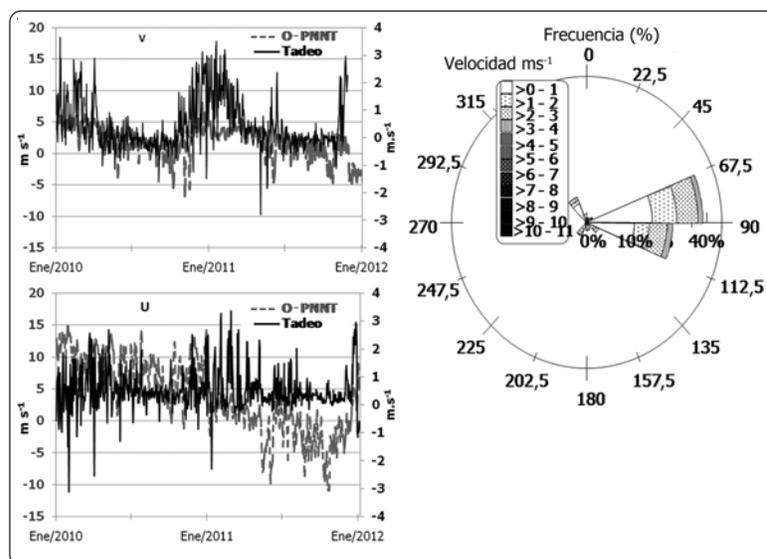


Figura 7. (Izquierda) Componentes meridional (v) y zonal (u) del viento en superficie según datos de la estación Meteorológica del COMARTA (Santa Marta), y datos provistos por ERA Interim del (ECMWF Data Server)³, para el nodo al Oeste del Parque Nacional Tayrona (O-PNNT), para el período enero 2010-enero 2012. (Derecha) Rosa de los vientos obtenida según datos de la estación Meteorológica del COMARTA (Santa Marta) para el mismo período / (Left) Meridional (v) and zonal (u) wind components according to data from COMARTA Meteorological Station (Santa Marta) and data from ERA Interim project provided by (ECMWF Data Server)³, at west of the Tayrona National Natural Park (O-PNNT) for the period January 2010-January 2012. (Right) Wind Rose obtained according to the Meteorological Station COMARTA (Santa Marta) for the same period

de TSM oscila entre $-1,68$ y $0,36^{\circ}\text{C}$. Llama la atención el enfriamiento más intenso observado en el nodo E-PNNT, que incluso en la Época de Lluvias mantiene una diferencia mayor respecto a la observada en los demás puntos de interés. Por su parte, dTSM para el punto O-PNNT resulta semejante al comportamiento observado en los nodos cercanos a la Península de la Guajira, aunque presenta un cese abrupto en la relajación del enfriamiento entre finales de mayo e inicio de junio (Fig. 3a).

TRANSPORTE DE EKMAN

El transporte de Ekman ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) en promedio es máximo en el primer semestre del año, especialmente a mediados de febrero y finales de junio, con poca diferencia entre los sectores considerados (Fig. 5). Sus valores mínimos y máximos parecen corresponderse con las diferencias de temperatura (dTSM), a pesar de que ambas señales presentan bastante ruido (Fig. 6).

COMPARACIÓN DEL VIENTO SEGÚN ERA INTERIM CON VIENTO *IN SITU*

El viento de la estación COMARTA para el período noviembre 6 2009 - enero 19 2012, presentó valores de hasta $6,3 \text{ m s}^{-1}$, con dirección predominante Este-Noreste. El promedio diario presenta máximos al inicio del año y mínimos entre septiembre y noviembre, un comportamiento similar al observado en los datos de Era Interim en el nodo O-PNNT (Fig. 7). Si bien el rango de oscilación para cada una de las componentes calculadas a partir estos datos es mucho menor al obtenido con ERA Interim, en general se mantiene una tendencia sinusoidal en estas variables. Esto demuestra que ERA Interim refleja las características atmosféricas de esta área.

ANÁLISIS ESPECTRAL

La descomposición de los armónicos de las series suavizadas de Transporte de Ekman (Myy) y diferencias

³<http://www.ecmwf.int/products/data/>

de Temperatura Superficial del Mar (dTSM), para los nodos en la Península de la Guajira y frente a PNNT, permitió distinguir períodos de 9 (0,0037 ciclos día⁻¹) y 4 meses (0,0077 ciclos día⁻¹) para ambas variables (Fig. 8). Estos probablemente corresponden a la transición de la Época de Lluvias a la Época Seca (9 meses), y al período de desplazamiento de los remolinos (4 meses) que se forman en el Caribe Colombiano.

Esto permite relacionar numéricamente el enfriamiento superficial en las aguas costeras y el transporte de Ekman debido a la acción de los vientos en la zona. Por otra parte, estos 2 períodos también son observados en el espectro obtenido para los datos de la Estación COMARTA (Fig. 9) lo que reafirma que los datos de ERA Interim reflejan el comportamiento atmosférico de la zona.

Por otra parte, el espectro de las diferencias de temperatura para los nodos de la Península de la Guajira muestra un tercer período de variación equivalente a 3 meses (0,0109 ciclos día⁻¹), que no es tan evidente en lo obtenido para PNNT (Fig. 10). Dado que este período de oscilación en la temperatura no se observa en el espectro del transporte de Ekman, se sugiere que existe una fuente accesoria de variabilidad para el enfriamiento superficial en esta área, no asociada al patrón de vientos.

DISCUSIÓN

ERA Interim se genera a partir de diferentes bases de datos. Entre estas se incluyen ERA-40 para el período 1990-2001, que a su vez se basó en estimaciones semanales del NCEP 2DVAR (2D *Variational analysis*) para el período 1982-junio de 2001; y el NCEP OISST V2, para julio-diciembre de 2001. El período enero 2002-junio 2009, por su parte, está basado en el producto NCEP RTG, mientras que desde febrero 2009, se utilizan los resultados del modelo OSTIA, que a su vez tienen origen en la misión EUMETSAT OSI-SAF⁴. Estas diferencias en el origen de las bases de datos de las estimaciones se ven reflejadas en la intensidad del ‘ruido’ en las distintas porciones de las series, tanto de TSM como del transporte de Ekman estimado a partir de la componente del viento paralela a la costa, que se incrementa a partir de 2001 (Fig. 4).

Al considerar la baja resolución espacial y temporal de ERA Interim, además del ruido asociado a las bases de datos que utiliza, se puede pensar que los datos de este

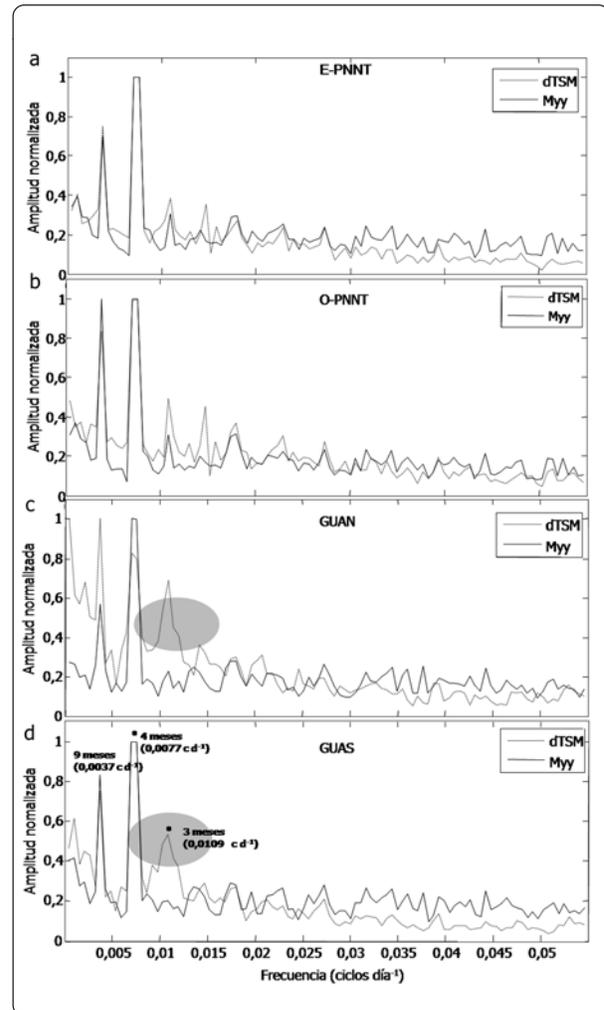


Figura 8. Análisis espectral de las diferencias de Temperatura Superficial (dTSM) con los puntos más alejados de la costa y el Transporte de Ekman (Myy) debido a la componente zonal (u) del viento en Superficie, estimados según datos provistos por ERA Interim, para 2 nodos en cercanías al Parque Nacional Natural Tayrona (a. O-PNNT, b. E-PNNT) y 2 nodos frente a la Península de la Guajira (c. GUA-S, y d. GUA-N) en el período 1990-2009 / Spectral Analysis of Surface Temperature differences (dTSM), with the most landward sites, and Ekman Transport (Myy), due to the zonal component (U) Surface wind, estimated from data provided by ERA Interim for 2 nodes located close the Tayrona National Natural Park (a. O-PNNT, b. E-PNNT) and 2 nodes off the Guajira Peninsula (c. GUA-S and d. GUA-N) in the 1990-2009 period

⁴<http://www.osi-saf.org/>

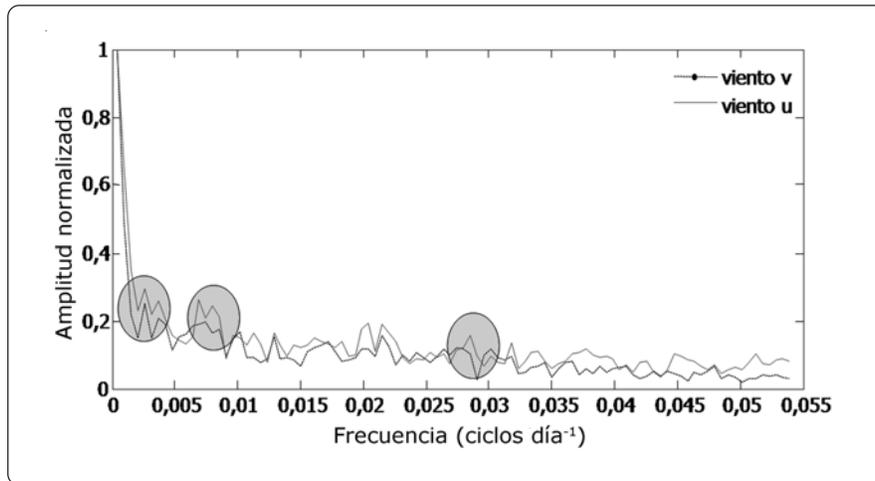


Figura 9. Análisis espectral de componentes meridional (u) y zonal (v) del viento estimadas según datos obtenidos en la estación Meteorológica del COMARTA (Santa Marta-Colombia), período enero 2010-enero 2012 / Spectral analysis of southern (u) and zonal (v) wind components, estimated from based from data obtained in COMARTA Meteorological Station (Santa Marta-Colombia), January 2010-January 2012

re-análisis no reflejan la variabilidad del comportamiento climático en una localidad particular (Simmons *et al.* 2011). Sin embargo, este estudio evidencia como los datos de ERA Interim manifiestan el comportamiento típico del viento y precipitación a lo largo del año en la zona costera del Caribe colombiano. Los resultados concuerdan con la síntesis de Arévalo-Martínez *et al.* (2008), registrando máximos en la intensidad del viento en el primer cuatrimestre del año y máximos de precipitación alrededor de octubre. Sin embargo, las 4 épocas climáticas descritas en este estudio resultan similares, pero no iguales a las referidas por estos autores. La época Seca Mayor (diciembre-abril) descrita por Arévalo-Martínez *et al.* (2008), en este estudio se divide en Época Seca Menor (diciembre- enero) y Época Seca Mayor (febrero-abril) considerando la presencia de lluvias en el último y primer mes del año muy superiores a las estimadas para febrero-abril.

El período mayo-junio, referido por Arévalo-Martínez *et al.* (2008) como Época Lluviosa Menor o de Transición y caracterizado por la reducción de los vientos, también se puede distinguir en estos resultados. Sin embargo, si bien se encuentra una disminución en la componente meridional (v) del viento, también se ubica el valor máximo del promedio interanual de la componente zonal (u), por un breve período (~ 2 semanas). Este hecho cobra importancia dado que es esta componente la que favorece los procesos de surgencia por transporte de Ekman en la zona. El período en el cual ocurre el incremento en la

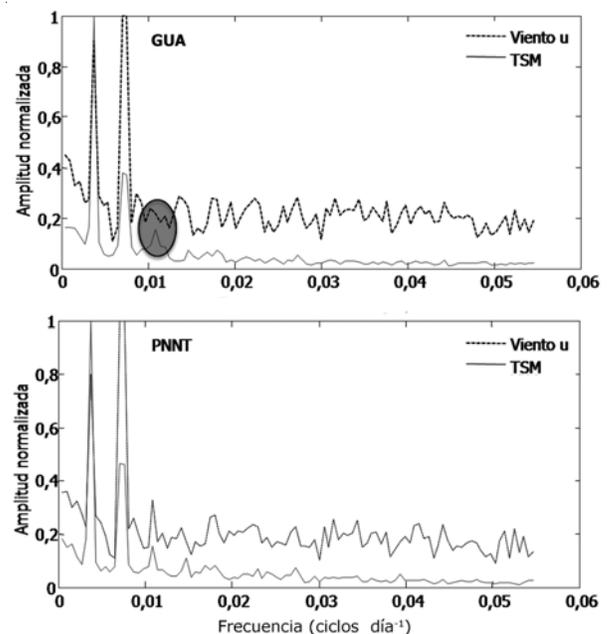


Figura 10. Análisis espectral promediado a 3 bandas de las componentes meridionales (u) del viento y valores de Temperatura Superficial del Mar (TSM), estimadas según datos de ERA Interim, para un nodo en cercanías al Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT) y otro frente a la Península de la Guajira (GUA) en el período 1990-2009 / Spectral analysis of zonal (v) wind component and Sea Surface Temperature (SST), estimated based on data from ERA Interim for a nodes located close the Tayrona National Natural Park (PNNT) and other off Guajira Peninsula (GUA) in the 1990-2009 period

intensidad del viento Este-Oeste, que coincide con una leve disminución de la TSM, corresponde al denominado 'Veranillo de San Juan', referido por Arévalo-Martínez *et al.* (2008). Estos autores ubican este fenómeno entre julio y agosto, y no entre mayo y junio como muestran nuestros resultados, de forma que los datos aquí considerados evidencian variaciones temporales en su ocurrencia. Estas variaciones probablemente están asociadas a fenómenos de escala interanual. Al respecto, Roger (1988) planteó para esta región una diferenciación clara entre épocas climáticas bajo el efecto de 'El Niño' y aquellas bajo la influencia de 'La Niña', cuando el extremo norte de Sudamérica presenta precipitaciones más intensas, junto a la altísima variabilidad que caracteriza a esta zona. En este sentido surge la necesidad de realizar nuevas aproximaciones que determinen la variabilidad en la localización temporal del 'Veranillo de San Juan', en relación con procesos de escala interanual.

Por otra parte, los resultados muestran como la Época de Lluvias mayor no se caracteriza sólo por presentar la mayor precipitación de todo el año, como refieren Arévalo-Martínez *et al.* (2008), sino también por la casi absoluta ausencia de vientos. La poca intensidad de los vientos en septiembre-noviembre es explicada por la presencia de la ZCIT en esta región (IDEAM-UPNE 2006). Finalmente, el rango de velocidades, así como la dinámica del viento aquí estimada, concuerdan con los promedios mensuales obtenidos para Santa Marta y Riohacha. Allí el régimen de viento, con máximos en diciembre-abril y mínimos en octubre y noviembre, es explicado en relación al desplazamiento de la ZCIT en dirección sur (IDEAM-UPNE 2006).

Así también, este estudio consideró el comportamiento de la TSM como elemento para describir las épocas climáticas. Los resultados para esta variable mantienen las tendencias descritas por Ruíz-Ochoa *et al.* (2012) quien se basa en datos satelitales de TSM (AVHRR), para diferenciar los meses de máxima y mínima temperatura encontrando diciembre-febrero como los meses con los valores más bajos de TSM y septiembre-noviembre como los meses más cálidos. De acuerdo a estos autores, frente a la Guajira la temperatura del agua se explica por la variabilidad estacional (75%), mientras que esta relación se reduce a un poco menos de la mitad en el Golfo de Darién (40%). Es decir, y de forma concordante con los resultados (período de 9 meses en análisis espectral de dTSM y Myy), la surgencia en el extremo norte de la Península varía particularmente por el régimen climático, mientras que más al sur y hacia Panamá, los vientos

continentales y descargas de agua dulce son factores que también influyen en la TSM (Ruíz-Ochoa *et al.* 2012). Sin embargo, llama la atención en sus resultados que localizan el mayor enfriamiento en diciembre-febrero, y no en febrero-abril (Época Seca Mayor según este estudio), que son los meses donde se encuentran los valores máximos de viento para la componente zonal en esta zona. Por su parte Rueda & Müller (2013), coincidiendo con estos resultados, localizan el principal enfriamiento en diciembre-abril, con 2 a 4 pulsos de surgencia y máximos detectados durante febrero-marzo. Luego de un leve incremento de la TSM en mayo, observan un enfriamiento secundario en junio-agosto, el cual podría ser explicado por el 'Veranillo de San Juan' aquí descrito. Si bien, las conclusiones de Ruiz-Ochoa *et al.* (2012) identifican las diferencias espaciales en la influencia climática sobre los regímenes de surgencia, no muestran el período de oscilación particular aquí observado (3 meses) en el análisis espectral para la diferencias de TSM frente a la Península de la Guajira.

De igual forma, los resultados se ajustan al comportamiento descrito para la TSM en puntos cercanos a la costa registrados por Páramo *et al.* (2011) con valores por debajo de los 24°C, en diciembre de 2005, y de 27°C, en febrero de 2006; y con lo descrito por Cañón (2001), según imágenes satelitales del NOAA/AVHRR para todo el Caribe, donde registran valores mínimos en la zona litoral durante marzo junto con la presencia de filamentos de surgencia bien definidos que se extienden hacia el centro de la cuenca.

Teniendo en cuenta el comportamiento del viento en la zona en relación con el desplazamiento en dirección norte de la ZCIT, nuestros resultados permiten distinguir claramente la dominancia de la componente zonal y su variación estacional, que además coincide con la reducción de las lluvias al inicio del año. Ambas variables, viento y precipitación, a su vez responden a las tendencias observadas en la TSM en cercanías del PNNT y de la Península de la Guajira, con mínimos en la mitad de abril y máximos hacia finales de octubre. Esto indica la fuerte relación del aumento de los vientos con la disminución de la TSM, a causa del ascenso de aguas sub superficiales. Sin embargo, para el caso de la Península de la Guajira, nuestros resultados indican variaciones que no se relacionan con el comportamiento de los vientos en la zona, lo que lleva a plantear la necesidad de nuevos estudios enfocados a determinar el origen de estas oscilaciones y el rango espacial de sus efectos, ya sea que estén asociados al comportamiento atmosférico en la

zona o a la oscilación de otros focos de surgencia en Venezuela (Romero *et al.* 2009), cuya influencia puede extenderse ocasionalmente hasta las costas de Colombia.

Sobre las diferencias espaciales en la surgencia en el Caribe Suroriental, Rueda-Roa & Muller-Karger (2013) analizan el comportamiento de los focos de surgencia en todo el borde continental entre Colombia y Trinidad y Tobago. Frente a las costas de Trinidad la termoclina (*e.g.*, isoterma de 22°C) se encuentra a menor profundidad (78 m), a causa de la presencia de una plataforma continental más ancha, lo que favorece el ascenso de agua de menor temperatura. Además los vientos son de dirección predominante Este, lo que coincide con la orientación del borde costero. En contraste, en la Península de la Guajira la termoclina a mayor profundidad (120 m), aún en presencia de un régimen de vientos más intenso, ocasiona una elevación de aguas más cálidas hacia la superficie. Así mismo, Rueda Roa & Muller Karger (2013) plantean que la mayor productividad primaria en conjunto con una baja turbulencia de la columna de agua en la zona frente a Trinidad, permiten una mayor producción de peces en esta zona respecto al resto del Caribe Suroriental. Estos autores proponen que la surgencia costera puede ser perturbada por vientos locales perpendiculares a la costa, especialmente entre Colombia y Venezuela. De acuerdo con este trabajo, la intensidad del enfriamiento de las capas superficiales en esta área depende de la profundidad del Agua Subsuperficial Subtropical, que a la vez está determinada por la intensidad de la corriente del Caribe. La isoterma de 22°C es más somera durante el máximo estacional, en intensidad, de la corriente del Caribe (Rueda Roa & Muller Karger 2013). Si la profundidad del Agua Subsuperficial Subtropical frente a la Península de la Guajira depende la intensidad de la Corriente del Caribe, esta última podría explicar variaciones en la temperatura superficial en esta región que no se relacionan con el viento. En segundo lugar, el mayor enfriamiento de las aguas frente a Venezuela y Trinidad podría tener efectos en la zona frente a la Guajira, a través del transporte de aguas recién emergidas en dirección oeste por la Corriente del Caribe. Esto plantea la necesidad de análisis de la variabilidad de la Corriente del Caribe, en relación con los regímenes de los focos de surgencia en el área.

Por último, se debe resaltar cómo el comportamiento aquí descrito a partir de los datos de ERA Interim para las variables atmosféricas es validado por datos *in situ* de la estación COMARTA, a pesar de que las estimaciones difieren en magnitud. En este sentido se abren nuevas

perspectivas de investigación que conduzcan al desarrollo de factores de corrección locales, para el uso de datos de estos re-análisis en el desarrollo de modelos oceánico atmosféricos para esta región.

Las condiciones de surgencia en el Caribe colombiano durante la Época Seca incluyen aguas superficiales frías (21-24°C), de alta salinidad (36,5-37,2), sub-saturadas de oxígeno (< 90%) en las capas superficiales, con concentraciones de Cl-a ($0,59 \pm 0,55 \text{ mg m}^{-3}$) superiores a las de feo-pigmento ($0,48 \pm 0,85 \text{ mg m}^{-3}$), y comunidades zooplánctónicas más diversas y densas, en comparación con las observadas durante la Época de Lluvias (Franco *et al.* 2005; Arévalo-Martínez *et al.* 2008). Estas características son propias de la masa de agua emergida (Agua Subtropical Sub-superficial) de temperaturas entre 19 y 25°C, salinidad por encima de 36,5 y densidad (σ_t) de aproximadamente 24 kg m^{-3} (Fajardo 1979). Aunque para esta zona no se ha establecido una intensidad de viento mínima específica para la ocurrencia de los procesos de surgencia, se estima que estos ocurren bajo predominio de vientos noreste superiores a 4 m s^{-1} , García-Hoyos *et al.* 2010) que generan un desplazamiento del cuerpo de agua por encima de la termoclina (40-50 m) (Fajardo 1979, Márquez-Calle 1982, Blanco 1988, Bula-Meyer 1990, Corredor 1992, Cabrera & Donoso 1993, y Arévalo-Martínez & Franco-Herrera 2008).

En el Caribe colombiano se encuentran evidencias que relacionan la época climática con la ocurrencia de procesos de surgencia, en términos de la intensidad de las componentes del viento y la TSM en sectores cercanos a la costa. Durante diciembre-marzo, a medida que aumenta la intensidad del viento en su componente zonal, la TSM se reduce, y por el contrario, en septiembre-noviembre, las aguas costeras se calientan al tiempo que el viento se reduce tanto en frecuencia como en intensidad. Sin embargo, las descripciones recientes de las épocas climáticas para el Caribe no consideran el comportamiento de la TSM cerca de la costa o la presencia de lluvias leves en diciembre-enero. Por otro lado, sitúan el denominado 'Veranillo de San Juan' entre finales de julio y comienzo de agosto, y no entre mayo y junio, como indican nuestros resultados. En este sentido se propone modificar la descripción de las Épocas climáticas para la región, considerando diciembre-enero como Época Seca Menor, dada la presencia leve de lluvias y la presencia de vientos intensos, aunque no máximos, en este período del año. Así mismo, el 'Veranillo de San Juan', debe ser descrito como un evento breve cuya fecha de ocurrencia puede variar, localizándose desde finales de mayo a inicios de agosto, de acuerdo a descripciones

anteriores y nuestros resultados del régimen climático de la zona.

En una escala intra-anual, los períodos de oscilación del viento y la TSM, así como el transporte de Ekman y el enfriamiento del agua superficial derivados de estas variables, demuestran la interacción de la atmósfera y el mar en esta región. No obstante, en el sector frente a la Península de la Guajira, el enfriamiento de las aguas superficiales sugiere la influencia de una forzante distinta al régimen de viento local probablemente relacionada con la intensidad de la corriente del Caribe y el comportamiento de focos de surgencia en otros sectores del Caribe suroriental.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Fundación Carolina y la Universidad de Cádiz, programa de Becas de Maestría en Oceanografía 2010, el Doctorado en Ciencias Aplicadas M/Sistemas Marinos-Costeros de la Universidad de Antofagasta proyecto MECE 07-11, y el Centro de Observación Marina Tadeista (COMARTA) en Santa Marta, Colombia. Los autores expresan sus agradecimientos a dos revisores anónimos asignados por la revista, por todas las sugerencias y recomendaciones dadas durante la evaluación del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-León R, R Aguilera-Quiñones, C Andrade-Amaya & C Nowak. 1995.** Caracterización general de la zona de surgencia en la Guajira colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* 19: 679-694.
- Andrade CA. 2003.** Sobre variaciones del nivel del mar en la zona costera colombiana. En: *Seminario Internacional de Geología Marina*, INVEMAR, Cali, 15 pp.
- Andrade C & E Barton. 2000.** Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research* 105: 191-202.
- Andrade C & E Barton. 2005.** The Guajira upwelling system. *Continental Shelf Research* 25: 1003-1022.
- Andrade C, E Barton & C Mooers. 2003.** Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research* 108: 3185.
- Arévalo-Martínez D & A Franco-Herrera. 2008.** Características oceanográficas de la surgencia frente a la Ensenada de Gaira, Departamento de Magdalena, Época Seca Menor de 2006. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 37: 131-162.
- Bula-Meyer G. 1990.** Oceanografía. En: Jimeno MC (ed). *Caribe de Colombia*, pp. 135-153. Fondo José Celestino Mutis, Bogotá.
- Cabrera E & M Donoso. 1993.** Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, región III, Zona 1, PDCTM. *Boletín Científico CIOH* 13: 19-32.
- Corredor J. 1979.** Phytoplankton response to low level nutrient enrichment through upwelling in the Colombian Caribbean Basin. *Deep-Sea Research* 26: 731-741.
- Corredor J. 1992.** Dinámica espacio-temporal de la surgencia de la Guajira. En: *Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar y Congreso Centroamericano y del Caribe en Ciencias del Mar*. Santa Marta 1: 206-221.
- Críaes-Hernández MI, CB García & M Wolff. 2006.** Flujos de biomasa y estructura de un ecosistema de surgencia tropical en La Guajira, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical* 54: 1257-1282.
- Dee DP, SM Uppala, J Simmons, P Berrisford, P Poli, S Kobayashi, U Andrae, M Balmaseda, G Balsamo, P Bauer, P Bechtold, CM Beljaars, L Van DeBerg, J Bidlot, N Bormann, C Delsol, R Dragani, M Fuentes, J Geer, L Haimberger, S Healy, H Hersbach, E Hólm, L Isaksen, P Kállberg, M Köhler, M Matricardi, P McNally, B Monge-Sanz, J Morcrette, B Park, C PeubeY, P DeRosnay, C Tavolato, J Thépaut & F Vitart. 2011.** The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137: 553-597.
- Fajardo G. 1979.** Surgencia costera en las proximidades de la Península Colombiana de la Guajira. *Boletín del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas* 2: 7-19.
- Franco-Herrera A. 2005.** Una aproximación a la oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más allá que un centro turístico, 58 pp. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 58 pp. Santa Marta.
- García-Hoyos L, A Franco-Herrera, J Ramírez-Barón & D López-Cerón. 2010.** Dinámica océano-atmósfera y su influencia en la biomasa fitoplanctónica, en la zona costera del departamento del Magdalena, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 39(2): 293-320.
- Hagen E, R Feistel, JJ Agenbag & T Ohde. 2001.** Seasonal and interannual changes in Intense Benguela Upwelling (1982-1999). *Oceanologica Acta* 24: 557-568.
- IDEAM & UPNE. 2006.** Atlas de viento y energía eólica de Colombia, 186 pp. Imprenta Nacional, Bogotá.
- IGAC. 2010.** Mapas de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. <<http://www.igac.gov.co/igac>>
- INVEMAR. 2005.** Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: Año 2005. Serie de Publicaciones Periódicas, INVEMAR 8: 1-360, Santa Marta.

- Lonin SA, JL Hernández & DM Palacios. 2010.** Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southwestern Caribbean. *Journal of Geophysical Research* 115: 17 pp. <doi: 10.1029/2008JC005100>
- Lozada B, A Prela & P Sentelhas. 2002.** Estudio de la influencia de los fenómenos del Niño y La Niña en la precipitación de la región Centro occidental de Venezuela. *Agronomía Tropical* 10: 317-322.
- Mann K & J Lazier. 2006.** Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans, 496 pp. Blackwell Publishing, Oxford.
- Márquez-Calle G. 1982.** Los sistemas ecológicos marinos del sector adyacente a Santa Marta, Caribe colombiano II: Sistemas Pelágicos *Ecología Tropical* 2: 19-23.
- Mejía-Ramírez L. 2008.** Variabilidad estacional de la clorofila a y temperatura superficial en aguas costeras y oceánicas del Departamento del Magdalena, Caribe colombiano, utilizando datos satelitales de los sensores remotos SeaWiFS y Modis Aqua, Período 1997-2006. Tesis Biología Marina, Universidad de Bogotá, Jorge Tadeo Lozano, 419 pp.
- Morales R, M Cañón & M González. 2001.** Caracterización oceanográfica y meteorológica del Caribe colombiano, 114 pp. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH, Armada Nacional, Cartagena de Indias.
- Rogers J. 1988.** Precipitation variability over the Caribbean and Tropical Americas Associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 1: 172-182.
- Romero OE, R Thunell, Y Astor & R Varela. 2009.** Seasonal and interannual dynamics in diatom production in the Cariaco Basin, Venezuela. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56: 571-581.
- Rueda-Roa DT & FE Muller-Karger. 2013.** The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 78: 102-114.
- Ruiz-Ochoa M, E Beier, G Bernal & ED Barton. 2012.** Sea surface temperature variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 64: 43-53.
- Simmons A, S Uppala, D Dee & S Kobayashi. 2007.** ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110: 25-35.
- Stewart R. 2008.** Introduction to physical oceanography, 353 pp. Texas A & M University, College Station.

Recibido el 19 diciembre de 2012 y aceptado el 3 de septiembre de 2013

Editor: Claudia Bustos D.