

CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA DEL PERFIL COSTERO ECUATORIANO A TRAVÉS DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS APLICADOS A LAS ESTACIONES FIJAS DE MONITOREO DEL INOCAR, SERIE A PARTIR DE 1981

Carlos Perugachi-Salamea¹

Mariela González-Narváez²

Johnny Pambabay-Calero²

Isabel García-Arévalo²

Freddy Vargas-Ayala²

Gabriel Shigla-Cuji²

Jorge Nath-Nieto³

RESUMEN

El presente estudio describe el comportamiento oceánico a lo largo de la costa ecuatoriana utilizando técnicas matemáticas y estadísticas.

En la primera parte de este artículo se realiza una introducción de las condiciones oceánicas Ecuatoriales, se mencionan los distintos parámetros que son de interés en el estudio, se detallan las características- ubicación de las estaciones fijas de Esmeraldas, Manta, La Libertad y Puerto Bolívar que el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) monitorea, y de donde proceden los datos con los que se efectúan los análisis y se describe la data utilizada. Se presenta el análisis de climatología, basado en el procedimiento normado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), a la par que se explican los hallazgos encontrados.

Posteriormente se presentan dos análisis estadísticos multivariados; las Curvas de Andrews para hallar relaciones de comportamiento entre las variables monitoreadas de las distintas estaciones fijas, agrupadas por su naturaleza: meteorológicas y oceánicas del cual se consigue definir la segmentación del perfil costero ecuatoriano en dos grupos claramente demarcados entre la región norte y sur, y las Componentes Principales para poder interpretar las condiciones oceánicas a partir del menor número de factores posibles, obteniendo una serie que denota el comportamiento de estacionalidad del fenómeno identificando las estaciones secas y lluviosa y otra serie que evidencia los años en que se declararon los eventos Niño y Niña.

Se emplea también el análisis de Periodograma para obtener los espectros de las señales de ambos parámetros océano- atmosférico y su respectiva dominancia, concluyendo un periodo de ocurrencia de alta frecuencia de la temperatura del mar y precipitaciones costera que coincide con los espectros de los índices ENOS.

¹ Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador. Departamento de Ciencias del Mar. Guayaquil, Ecuador.

² Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Proyecto índices ENOS – Componente INOCAR. Guayaquil, Ecuador.

³ Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador. Departamento de Hidrografía. Guayaquil, Ecuador.

ABSTRACT

The present study describes the oceanic behavior along the Ecuadorian coast using mathematical and statistical techniques.

In the first part of this paper an introduction of the Equator oceanic conditions is made, the various parameters that are of interest in the study mentioned, detailed specs - fixed location stations Esmeraldas, Manta, Puerto Bolivar and La Libertad the Oceanographic Institute of the Navy (INOCAR) monitors, and from which the data that tests are carried out and the data used is described. Weather analysis, based on the procedure regulated by the World Meteorological Organization (WMO), at the same time explains the findings is presented.

Subsequently, two multivariate statistical analysis presented; Curves Andrews to find behavioral relationships between monitored variables of different fixed stations, grouped by their nature: weather and ocean which is achieved by defining the segmentation of the Ecuadorian coastal profile in two clearly demarcated groups between the northern and southern region, Principal Component and to interpret oceanic conditions from the lower number of possible factors, obtaining a number that denotes the seasonal behavior of the phenomenon by identifying the dry and rainy seasons and a series that shows the years in which the Niño events were reported and girl.

Periodogram analysis is also used to obtain the spectra of the signals of both ocean-atmospheric parameters and its respective dominance, identifying that the period of high frequency of occurrence of the sea surface temperature and coastal precipitation spectra matches ENSO indices.

INTRODUCCIÓN

Estudios acerca de las características oceánicas de la zona costera no es algo nuevo en el país, puesto que constituye un factor importante para la navegación, para desarrollo de pesquerías, entre otros. El estudio: Caracterización oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la Punta del Morro y Jaramijó, es una muestra de los esfuerzos científicos realizados en Ecuador, sin embargo en el presente artículo se amplía el área de estudio, abarcando todo el perfil costero y analizando datos distintos de olas y corrientes que son presentados en el estudio en mención al cual se hace referencia.

Mediante el presente trabajo se pretende describir el comportamiento de las variables de las estaciones meteorológicas y mareográficas que mantienen el Instituto Oceanográfico de la Armada a lo largo de la costa ecuatoriana; para ello se identificaron las relaciones existentes entre los distintos parámetros oceánicos y atmosféricos que son monitoreados constantemente en estas estaciones costeras.

La importancia de la investigación realizada radica en el desarrollo y empleo de herramientas que permitan generar información para el asesoramiento en la toma decisiones relevantes en términos de prevención ante amenazas de origen océano-atmosféricas, para ello es vital encontrar correlaciones que nos indiquen el nivel de dependencia que hay entre los parámetros analizados, permitiendo de esta manera caracterizar la relación de los parámetros con frecuencias mensuales y anuales, incluyendo años de ocurrencia de eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS).

A partir del empleo de herramientas estadísticas se propone determinar el comportamiento de las condiciones océano-atmosféricas de las costas ecuatorianas; las condiciones oceánicas monitoreadas en las estaciones a 10 millas costa afuera son influenciadas directamente por las diferentes corrientes marinas en

diferentes épocas del año; por la Corriente Fría de Humboldt y la Corriente Cálida de Panamá; provenientes del sur y el norte del país respectivamente, las mismas que producen condiciones diferentes según las temporadas, generando características particulares de temperaturas tanto del aire como del mar, humedad relativa, vientos, presión atmosférica, nivel medio del mar, entre otras variables, que hacen que dos diferentes regiones geográficamente separadas se comporten de una manera muy similar entre sí, y que la región norte sea muy diferente de la región sur en condiciones oceanográficas.

El análisis de datos de mediciones convencionales de variables oceanográficas y atmosféricas, recolectadas de cuatro estaciones costeras ubicadas en: Esmeraldas, Manta, La Libertad y Puerto Bolívar ayudará a tener una visión general de las características principales del perfil costero en las diferentes épocas del año, evidenciando las características principales de estas variables y la interacción de las mismas frente a eventos cálidos como El Niño y fríos como La Niña.

DATOS Y MÉTODOS.

Descripción de las estaciones costeras de monitoreo INOCAR y parámetros.

Las variables oceánicas y meteorológicas utilizadas para los análisis que se presentarán posteriormente provienen de las estaciones costeras detalladas en la Tabla 1 con sus respectivas ubicaciones geográficas:

Tabla 1 Ubicaciones geográficas de las estaciones costeras de monitoreo INOCAR

ESTACIONES COSTERAS			
LUGAR	PROVINCIA	LATITUD	LONGITUD
MANTA	MANABI	00°56'06" S	80°43'222W
ESMERALDAS	ESMERALDAS	00°59'00" N	79°39'00W
LA LIBERTAD	GUAYAS	02°12'58"S	80°43'22"W
PUERTO BOLIVAR	EL ORO	03°16'0"S	80°00'00"W

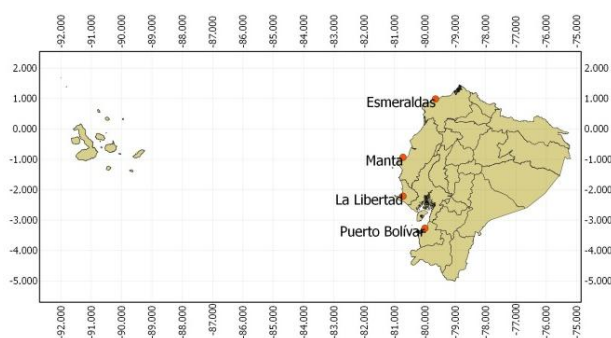


Figura 1 Ubicación geográfica de las estaciones costeras de monitoreo INOCAR.

La estación costera de Esmeraldas cuenta con datos desde diciembre de 1948 hasta agosto de 2013, por su parte Manta consta de una base desde enero de 1949 hasta agosto de 2013, por otro lado la estación ubicada en La Libertad posee datos desde octubre de 1948 hasta agosto de 2013, finalmente la estación de Puerto Bolívar contiene datos desde enero 1952 hasta agosto de 2013. Todas las estaciones presentan ausencia de datos por día, semanas, meses e incluso años, este documento se detalla la manera cómo se lidió con este inconveniente.

Los parámetros utilizados para los análisis efectuados y que provienen de las estaciones en mención son detallados en la Tabla 2 con sus respectivas nomenclaturas y unidades de medición:

Tabla 2 Detalles de parámetros, nomenclaturas y unidades de medición

Variable	Descripción	Unidad de medición
TSM	Temperatura superficial del mar	°C (grados centígrados)
TSA	Temperatura superficial del aire	°C (grados centígrados)
HR	Humedad relativa	% términos porcentuales
Precipitación	Precipitación	mm (milímetros)
PSA	Presión atmosférica	mb (milibares)
NMM	Nivel medio del mar	m (metros)
VV	Velocidad del viento	k/h (kilómetros por hora)
DV	Dirección del viento	grados

Adicionalmente se utilizó los índices globales para realizar los análisis: Niño 1+2, Niño 3,

Niño 3.4 y Niño 4, provenientes de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Métodos de interpolación puntual.

Al trabajar con la data conformada por las variables oceánicas y meteorológicas provenientes de las distintas estaciones costeras mencionadas se evidenció ausencia de valores por lapsos cortos y largos de tiempo, por lo cual se decidió interpolar los datos faltantes en los casos en que se podía, para ello se utilizaron dos técnicas numéricas de interpolación puntual denominadas: Spline cúbico y Shaped Preserving interpolate, con la ayuda del software MATLAB 2013b (De Boor, 2001). Estos métodos tienen la particularidad de tomar dos puntos consecutivos e ir trazando segmentos de curvas polinómicas, en lo que respecta al Spline cúbico estas curvas son de grado tres; es decir estos métodos no generan únicamente un solo polinomio para interpolar toda la función, unen varios segmentos, los cuales están conformados a partir de intervalos, lo que conlleva a considerarlo ideal para la interpolación de datos oceanográficos.

Dado el comportamiento específico que presentan ciertas variables se decidió interpolar con uno u otro de los métodos antes mencionados, en el caso particular de la variable nivel del mar, se evidenció una tendencia de una curva sinusoidal muy bien marcada. Para ilustrar las bondades del método de interpolación Spline cúbico se escoge a los datos faltantes de esta variable para ser interpolados mediante el Spline cúbico, el resultado es una curva que preserva la forma sinusoidal de la serie.

En la variable Precipitación no se utilizó método de interpolación, debido a la naturaleza de ésta variable, ya que en el Ecuador el comportamiento de la misma es cambiante con respecto a las dos estaciones climáticas del país, por lo tanto, no se presenta un patrón definido.

A partir de las series de datos completadas en una frecuencia mensual, se computaron los valores promedio, valor máximo y valor mínimo del mes y año correspondiente a cada una de las variables analizadas. Para la variable Precipitación se presenta el valor acumulado mensual.

RESULTADOS

Análisis de Climatología: variables meteorológicas y oceánicas.

Para el desarrollo del análisis de climatología se utilizó el rango de años de 1981 al 2010, el mismo que corresponde a los últimos 30 años consecutivos que finaliza en un múltiplo de 10, procedimiento normado por la OMM (2007).

El análisis de climatología presentado corresponde a la de los parámetros detallados en la Tabla 2 y se la obtiene a través de los promedios mensuales de los últimos 30 años. Junto con los mínimos y máximos absolutos, y mínimos y máximos medios. Se normalizan los datos con la media obtenida del rango de años de la climatología. Para obtener las anomalías de los diferentes parámetros para cada estación se restaron los valores mensuales de la normal tomada del promedio de la climatología del rango de 30 años declarado por la OMM.

En el caso de las variables en que la información recolectada es anterior a 1981 se utilizó el rango de 1981-2010 para la determinación de la climatología. En cuanto a las variables con data inferior a los últimos 30 años, se tomaron los años disponibles hasta el año de cierre 2010.

Todas las climatologías de las variables provenientes la estación de La Libertad, con excepción de Nivel del mar, fueron obtenidas del rango de 1988-2010, debido a que desde inicios de 1988 se inició la toma de datos en mencionada Estación. Asimismo la climatología de la variable nivel del mar de la estación de Manta abarcó los años 1988 al 2010 y

temperatura superficial del aire en Manta desde 1984 al 2010.

Las climatologías de las variables en las 4 estaciones fijas se indican a continuación:

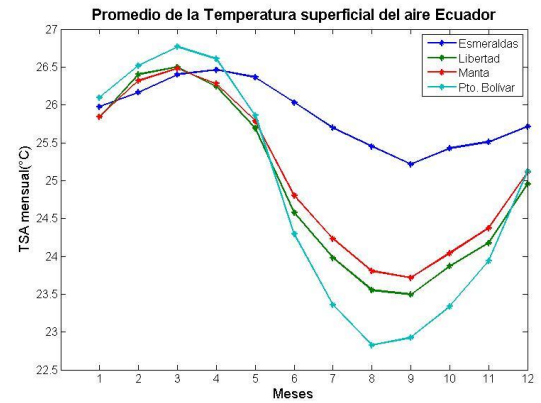


Figura 2 Climatología de la TSA de las estaciones fijas del INOCAR.

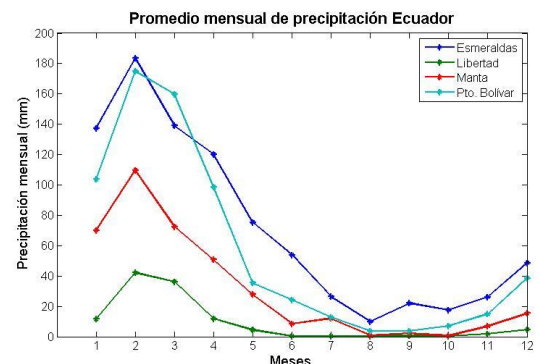


Figura 3 Climatología de la precipitación acumulada de las estaciones fijas del INOCAR.

En el caso de las variables meteorológicas temperatura superficial del aire y precipitación, todas las Estaciones presentan patrones similares en su climatología, siendo la Estación de Esmeraldas en la que se pueden observar valores superiores en la época seca a diferencia del resto de estaciones. La climatología de la precipitación de la Estación de Esmeraldas muestra un patrón diferente, probablemente debido a las diferentes condiciones que presenta por su ubicación geográfica. El mismo comportamiento se da en la climatología de las variables temperatura superficial del mar, dirección del viento y humedad relativa, que presenta su pico más alto en la temporada lluviosa.

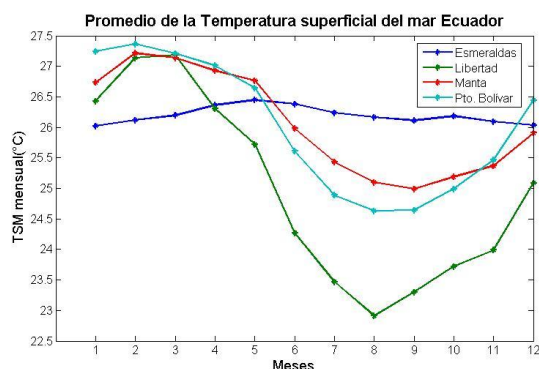


Figura 4 Climatología de la TSM de las estaciones fijas del INOCAR.

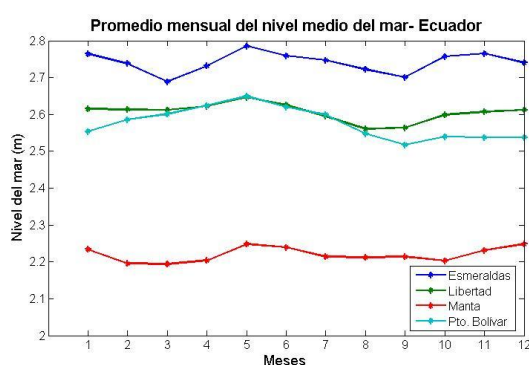


Figura 5 Climatología del nivel del mar de las estaciones fijas del INOCAR.

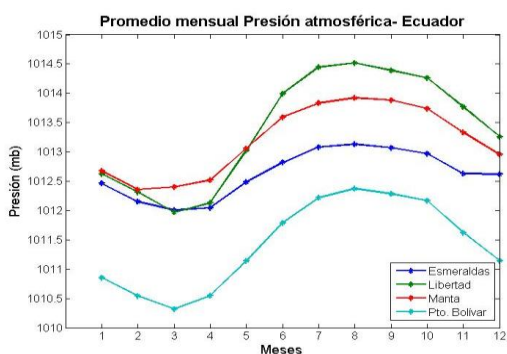


Figura 6 Climatología de la presión superficial del aire de las estaciones fijas del INOCAR.

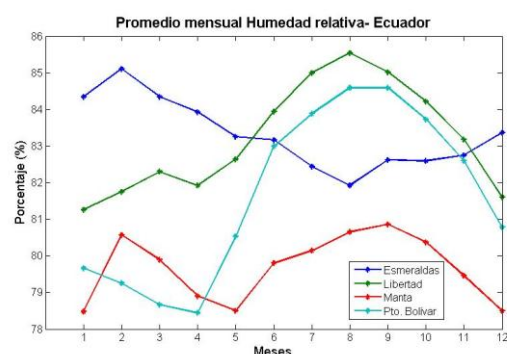


Figura 7 Climatología de la humedad relativa de las estaciones fijas del INOCAR.

Las Estaciones de Libertad, Manta y Puerto Bolívar presentan patrones similares en sus climatologías pese a que sus valores difieren. En el caso particular de la variable humedad relativa la Estación de Manta presenta picos en ambas temporadas, comportamiento que se asemeja al de Esmeraldas en la época lluviosa y al de Libertad en la época seca, resaltando la importancia de la variación de los sistemas climáticos dependiendo de su ubicación geográfica.

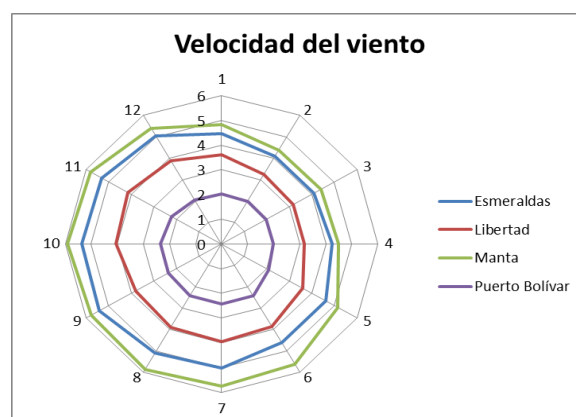


Figura 8 Climatología de la velocidad del viento de las estaciones fijas del INOCAR.

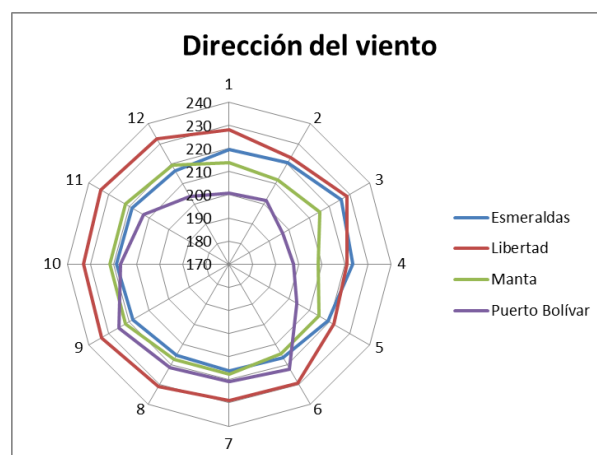


Figura 9 Climatología de la dirección del viento de las estaciones fijas del INOCAR.

Las climatologías de las variables velocidad del viento y presión atmosférica de la Estación de Puerto Bolívar presentan valores promedios inferiores en todos sus meses en comparación con el resto de Estaciones. Asimismo, se puede observar que en la Estación de Puerto Bolívar la variable dirección del viento posee un patrón diferente en su climatología, esto se puede deber a que los vientos provienen del Noroeste

en época seca, con una diferencia notoria en sus temporadas seca y lluviosa que en el resto de estaciones.

Análisis Multivariado de variables de estaciones fijas: Curvas de Andrews.

A través de técnicas de análisis multivariado se verifican las relaciones entre las distintas variables, agrupadas por su naturaleza: meteorológicas y oceánicas, en relación con la estación de donde se capturan los datos. Para el análisis del comportamiento de las variables en su conjunto por cada estación, recurrimos a un método potente para identificar agrupaciones entre observaciones denominado Curvas de Andrews. El Matemático Andrews en 1972 propuso este método para representar datos multivariados en dos dimensiones. Cada punto p – dimensional $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$, la dimensión la representa cada una de las variables en estudio en un tiempo determinado y es representado por la función:

$$f(t)_x = \frac{1}{2}x_1 + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots$$

Contenida en un rango desde $-\pi < t < \pi$. Las Curvas de Andrews son las componentes de Fourier de los datos y el resultado para cada observación es una onda formada por funciones de seno y coseno de sus componentes. Se puede demostrar que esta representación presenta a la distancia euclídea, considerando que a dos datos que registren valores similares de las variables le van a corresponder curvas próximas (Álvarez–Olguín *et al.*, 2011).

Debido a que cada variable tiene diferente unidad de medida se realizó la estandarización de los valores con la finalidad de poder efectuar comparaciones, este proceso de estandarización consistió en restarle a cada observación su media y dividirla para la desviación estándar.

Se obtienen curvas a dos dimensiones que denotan sus amplitudes y longitudes, en donde el color de cada curva nos indicará la estación fija de donde corresponde.

En la figura 10 se muestra el gráfico resultante del análisis multivariado curvas de Andrews realizado con las variables oceánicas estandarizadas: temperatura superficial del mar y nivel medio del mar de las Estaciones de Esmeraldas, Manta, Libertad y Puerto Bolívar. Mientras que en la figura 11 se muestra el gráfico de curvas de Andrews realizado las variables meteorológicas estandarizadas: precipitación acumulada, humedad relativa, temperatura superficial del aire, presión superficial del aire, dirección y velocidad del viento de las estaciones antes mencionadas.

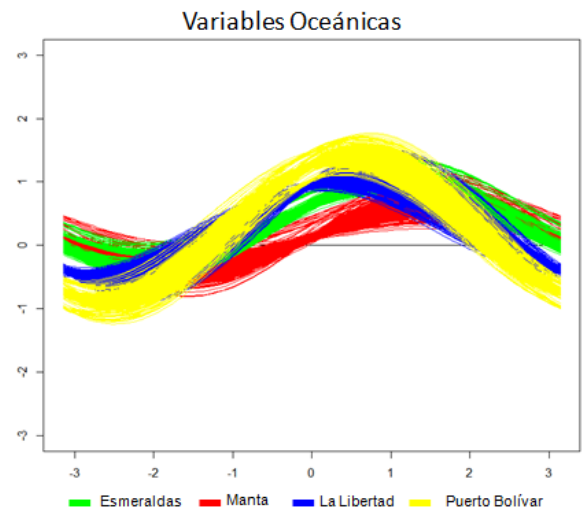


Figura 10 Curvas de Andrews: variables oceánicas.

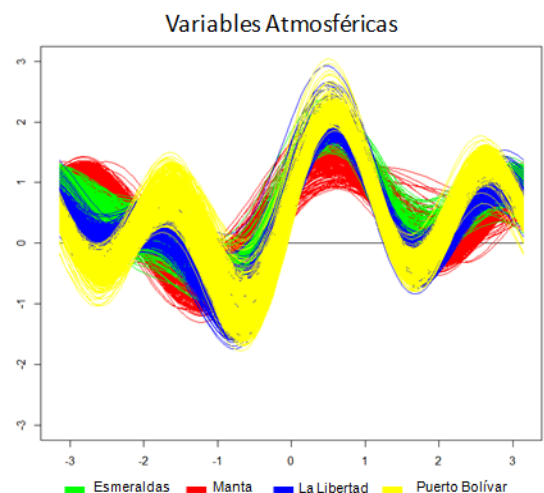


Figura 11 Curvas de Andrews: variables atmosféricas.

En las figuras 10 y 11 se observa que en lo que respecta a variables oceánicas y atmosféricas el comportamiento de las estaciones situadas al

norte del Ecuador (Esmeraldas y Manta) es similar entre sí, mientras que lo mismo ocurre con las estaciones del sur (La Libertad y Puerto Bolívar). Esto se debe a que el análisis de curvas de Andrews se lo realiza con el fin de identificar homogeneidad entre los valores de las estaciones en base a la similitud de sus curvas. Cabe recalcar que los hallazgos de este análisis tienen coherencia ya que se trabajó con las variables estandarizadas y no con las series originales.

Análisis Multivariados de variables de estaciones fijas y variables globales: Componentes Principales.

Luego de visualizar las relaciones existentes entre las distintas variables en estudio, se realizó el relacionamiento de las mismas variables junto con los parámetros globales. El método estadístico denominado Componentes Principales (Wilks, 2011) permitió una reducción en el número de variables con las que se ejecutó este análisis, pues se genera un nuevo grupo de variables denominadas Componentes Principales y cada una de estas resultan de la combinación lineal de las variables originales, con la particularidad que todas las componentes son ortogonales logrando así que no exista redundancia en la información en estos nuevos parámetros.

Previamente al uso de la técnica antes mencionada utilizamos el Análisis de Factor (Wilks, 2011), que es otro método estadístico que permite identificar un número relativamente pequeño de factores que pueden ser utilizados para representar la relación entre un conjunto de variables no correlacionadas. El modelo matemático que subyace a esta técnica es similar al de la regresión simple, es decir cada variable aparece como una combinación lineal de una serie de factores que no son observables hasta este momento. Se tiene que:

$$X_i = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \dots + A_{ik}F_k + U_i$$

Donde F_k son los factores comunes a todas las variables y U es el factor único referido a la

parte de la variable i que no puede ser explicada por los factores comunes. Los A_i son los coeficientes de cada uno de los factores. Los factores únicos se asume que no están correlacionados con el resto de los factores únicos y con los factores comunes.

Ahora para aplicar el método de Componentes Principales es necesario que exista relación entre las variables que se utilizarán para este estudio; y es así que interviene un primer índice llamado KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) (Wilks, 2011), que compara los coeficientes de correlación de Pearson de las variables de estudio con los coeficientes de correlación parcial entre variables, se obtiene de la siguiente manera:

$$KMO = \frac{r_{ij}^2; i \neq j}{r_{ij}^2 + a_{ij}^2; i \neq j}$$

Donde r_{ij} , es el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables i y j y a_{ij} , es el coeficiente de correlación parcial entre las variables i y j . Si los coeficientes de correlación parcial entre las variables son muy pequeños, quiere esto decir que la relación entre cada par de las mismas se debe o puede ser explicada por el resto y por tanto llevar a cabo un análisis factorial de los datos. Si la suma de los coeficientes de correlación parcial al cuadrado es muy pequeña, KMO será un índice muy próximo a la unidad y por tanto el análisis es un procedimiento adecuado. En cambio valores pequeños en este índice nos dan a entender todo lo contrario.

Para el caso de análisis este valor es de 0.770 y por tanto puede considerarse como factible la aplicación de éste análisis.

Otro indicador de que el análisis es procedente es el test de Bartlett (Härdle - Simar et. Al, 2007), este se utiliza para verificar si la matriz de correlaciones es una matriz de identidad. Este estadístico se obtiene a partir de la transformación χ^2 (Chi cuadrado) del determinante de la matriz de correlaciones y cuanto mayor sea y por tanto menor el grado de significancia,

más improbable que la matriz sea una matriz de identidad; en nuestro caso, con un valor de 7879,396 y un grado de significancia $p=0,00$ resulta evidente que no se trata de una matriz de identidad. Lo descrito se evidencia en la siguiente tabla:

Tabla 3 Análisis índice KMO vs Test de Bartlett

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)		,770
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	7879,396
	gl	153
	Sig.	,000

Las comunidades que se reflejan en la tabla 4, describen el porcentaje de aportación de cada variable:

Tabla 4 Porcentaje de aportación de cada variable de estación fija y variable global

Comunalidades		
	Inicial	Extracción
Esm_TSA	1,000	,788
Esm_HR	1,000	,409
Esm_VV	1,000	,641
Esm_PAS	1,000	,808
Esm_Pre	1,000	,664
Man_TSA	1,000	,878
Man_HR	1,000	,661
Man_VV	1,000	,655
Man_Pre	1,000	,820
PB_TSA	1,000	,923
PB_HR	1,000	,651
PB_VV	1,000	,789
PB_Pre	1,000	,787
LL_NMM	1,000	,695
Niño_12	1,000	,921
Niño_3	1,000	,894
Niño_34	1,000	,925
Niño4	1,000	,834

Una vez obtenidos los porcentajes de aportación individuales para cada variable, se procede a explicar en la tabla 5 el total de la varianza de cada factor o componente principal, es decir recoger en porcentajes individuales y acumulados, la proporción de varianza total explicada por cada factor.

Tabla 5 Porcentaje de aportación individual y acumulada de cada variable estación fija y variable global

Componentes	Autovalores iniciales		
	Valores Propios	% de la varianza	% acumulado
1	6,646	36,921	36,921
2	3,048	16,931	53,852
3	1,510	8,388	62,241
4	1,459	8,106	70,347
5	1,081	6,006	76,352
6	,964	5,355	81,707
7	,806	3,369	85,076
8	,544	3,025	88,101
9	,451	2,507	90,608
10	,377	2,092	92,700
11	,350	1,944	94,645
12	,314	1,746	96,391
13	,204	1,131	97,522
14	,202	1,123	98,645
15	,158	,876	99,521
16	,046	,253	99,774
17	,033	,185	99,960
18	,007	,040	100,000

Se nota que los 5 factores o componentes incluidos en el modelo son capaces de explicar exactamente 76 por 100 de la variabilidad total, lo que puede interpretarse como un porcentaje aceptable.

Una vez encontrado el número de factores que absorben una alta variabilidad del fenómeno en estudio, aplicamos un método de Rotación denominado VARIMAX (Wilks, 2011) con la finalidad de ayudar a interpretar la matriz de pesos factoriales no rotada, minimizando el número de variables que hay con pesos o saturaciones elevadas en cada factor.

La matriz rotada que se muestra en la tabla 6, refleja el número de componentes que explica de mejor manera la variabilidad del fenómeno, en este caso 5 factores.

Tabla 6 Matriz de componentes rotadas

Variables	Componente				
	1	2	3	4	5
PB TSA	,824	,257	-,247	,152	-,307
PB HR	-,800	,013	-,057	,052	-,075
Niño_12	,794	,315	-,287	,268	-,191
Man TSA	,759	,387	-,147	,185	-,312
Esm Pre	,528	,066	-,350	,508	,001
Niño_34	,196	,935	-,013	-,018	,105
Niño4	-,127	,839	,220	-,148	,208
Niño_3	,549	,733	-,193	,117	-,060
Esm TSA	,434	,711	,203	,161	-,166
LL NMM	,126	,632	-,052	,312	-,425
Esm VV	-,143	,039	,786	-,017	-,024
Man VV	-,084	,101	,753	-,131	,231
Esm PAS	,170	-,157	,634	-,068	,589
Esm HR	,117	-,047	-,615	,112	,046
Man Pre	,345	,116	-,218	,798	-,055
Man HR	-,271	-,097	,062	,747	-,129
PB_Pre	,426	,147	-,210	,734	-,039
PB_VV	-,327	,140	,044	-,093	,808

Cada uno de estos factores son expresados como una combinación lineal de las variables antes mencionadas con sus respectivas cargas (pesos) o aportaciones a cada factor. Las mismas que son presentadas a continuación:

$$F_1 = 0,824 * PB TSA - 0,8000 * PB HR + 0,794 * Ni\tilde{no}12 + 0,759 * Man TSA + 0,528 * Esm PRE$$

$$F_2 = 0,935 * Ni\tilde{no}34 + 0,839 * Ni\tilde{no}4 + 0,733 Ni\tilde{no}3 + 0,711 * Esm TSA + 0,632 * LLNMM$$

$$F_3 = 0,786 * Esm VV + 0,753 * Man VV + 0,634 * Esm PAS - 0,615 * Esm HR$$

$$F_4 = 0,798 * Man PRE + 0,747 * Man HR + 0,734 PB PRE$$

$$F_5 = 0,808 * PB VV$$

Finalmente graficamos las componentes principales obtenidas. En el caso de la primera componente principal mostrada en la figura 10 se denota la estacionalidad del fenómeno, es decir muestra claramente que se está representando las estaciones seca y lluviosa.

La segunda componente principal mostrada en la figura 12 denota los casos de eventos El Niño y La Niña, claramente definidos por los puntos más altos y más bajos del mismo, en los años 1982-1983, 1988-1989, y 1997-1998 y 1999-2000.

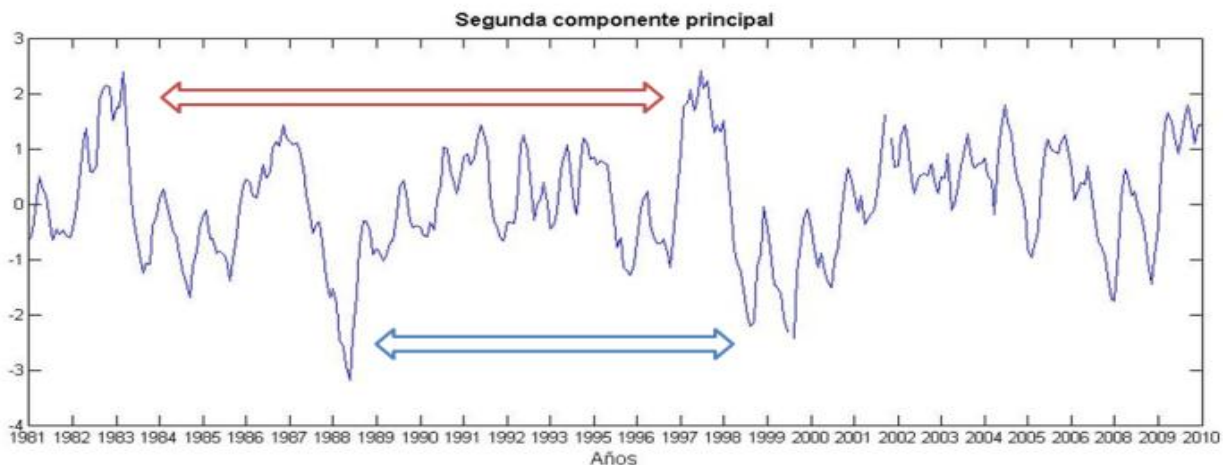


Figura 12 Gráfico de la segunda componente principal.

La primera y segunda componente principal contiene más del 50% de la varianza de los datos que representa, mientras que la tercera, cuarta y quinta componente principal denotan los ruidos de la matriz de datos.

Análisis de Periodograma.

Es un método matemático alternativo al trabajar con series temporales (y_t , $t=1, 2, 3, \dots$). Se trabaja en el dominio de la frecuencia de la serie en vez del dominio del tiempo.

Se parte del Análisis Armónico, que se fundamenta en que cualquier serie estacionaria, es decir su media y varianza no cambia en el tiempo y su covarianza sólo es función del rezago.

$$\begin{aligned} \text{Media } E y_t &= E y_{t+m} ; \forall_{t,m} \\ \text{Varianza } \text{Var } y_t &= \text{Var } y_{t+m} ; \forall_{t,m} \\ \text{Covarianza } \text{Cov } y_t, y_{t+m} &= \text{Cov } y_{t+m}, y_{t+m+k} ; \forall_{t,m,k} \end{aligned}$$

El Análisis Armónico, periódico o de Fourier como también se lo conoce, afirma que:

$$y_t = a_0 + \sum_{p=1}^{p=\frac{T}{2}} a_p \cos pw_0 t + b_p \sin pw_0 t$$

Donde:

T: Tamaño de la serie de tiempo.

w_0 : Es la frecuencia fundamental definida por $w_0 = 2\pi/T$.

p: Es el movimiento conformado por una onda de seno y coseno de la misma frecuencia.

t: Es una serie que toma valores enteros entre 1 y T.

a_p y b_p : Son parámetros a estimar.

En otras palabras, el análisis de frecuencia descompone la serie de tiempo como suma de componentes periódicas y determina la frecuencia y el período de esta.

Al estimar los parámetros a_p y b_p se puede conocer el poder explicativo de los ciclos a partir de:

$$R_p^2 = \frac{a^2 + b^2}{2}$$

La representación mediante una expresión pictórica, donde el eje “y” está dado por R_p^2 y en el eje “x” se representa a “p” se denominan **Periodograma** (Emery & Thomson, 2001). Es decir un Periodograma nos muestra cada frecuencia en el eje horizontal y su intensidad en el eje vertical.

Al observar un punto máximo en el Periodograma, en una frecuencia en particular, esto indica que en los datos de la serie de tiempo existe un enmascaramiento de un ciclo. En forma concreta el análisis espectral es una descomposición de la varianza, ya que al existir un máximo en una frecuencia, esto muestra que una parte importante de la varianza total de los datos, se explica por un ciclo.

Para realizar el análisis espectral antes descrito se procedió a trabajar con las anomalías de las estaciones meteorológicas de: Esmeraldas, Manta, La Libertad y Puerto Bolívar de Precipitación y Temperatura Superficial del Mar, asimismo con los datos de los índices oceánicos Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4, las mismas que se muestran en las figuras 13, 15 y 17.

Es importante resaltar que se trabajó con la serie de datos de las precipitaciones y temperatura superficial del mar de manera

mensual desde 1981 hasta 2010 y que ambas series cuentan con datos faltantes. Nótese que se incorpora una estación, la de Puerto Ayora (Galápagos), estación meteorológica que pertenece al Parque Nacional Galápagos. La idea de incorporarla es tratar de validar el procedimiento de imputación de datos que se explicará más adelante en especial en la variable de temperatura superficial del mar.

Valores faltantes de Precipitación.

Con relación a los datos de precipitación sólo se presentaron valores perdidos en la serie de datos de La Libertad para ser exactos 88. Como se indicó anteriormente el análisis de curvas de Andrews, realizado con las variables meteorológicas, determinó que existe un comportamiento similar entre las Estaciones de Libertad y Puerto Bolívar con base en la similitud entre sus curvas. Por tal motivo se procedió a imputar los valores de las anomalías de precipitación de la Estación de Puerto Bolívar en los vacíos de la serie de anomalías de precipitación de la Libertad.

Valores faltantes de Temperatura Superficial del Mar.

Con los datos de esta variable se presenta un escenario diferente al anterior, ya que sólo la serie de datos de Esmeraldas está completa en el horizonte de tiempo antes especificado (1981-2010).

Para la imputación de los datos faltantes de las estaciones de Manta, La Libertad y Puerto Bolívar se utilizaron los valores de anomalías de la grilla más cercana a las coordenadas de las estaciones fijas con la salida del modelo de asimilación de datos oceánicos Simple Ocean Data Assimilation (SODA), (Cartón y Giese, 2008), la versión 2.2.8 (SODA 2.2.8) con resolución de 0.5x0.5 grados para el periodo de datos 1981-2010. Esta versión SODA abarca un período comprendido entre 1846-2011, y es el promedio de un conjunto de 18 ensambles. La temperatura superficial del mar asimila

datos del International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS 2.5).

Periodograma de los datos observados.

Realizado el relleno de los datos faltantes de las series antes descrita se procede a realizar el estudio de análisis espectral, denotando que en el mismo se ha aislado la estacionalidad más significativa dentro de un período de un año. En los siguientes gráficos se visualizan las anomalías de las variables con sus respectivos Periodogramas.

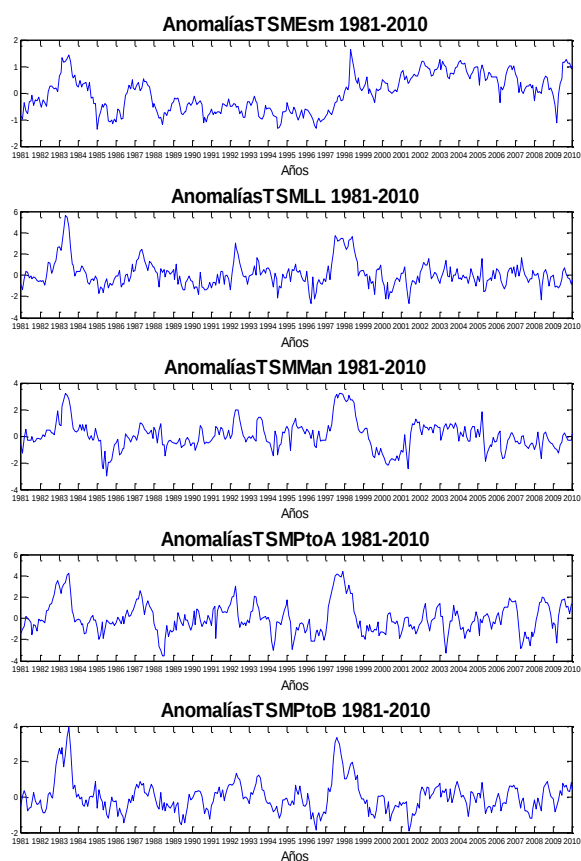


Figura 13 Gráficos de las anomalías de la TSM en las diferentes estaciones costeras.

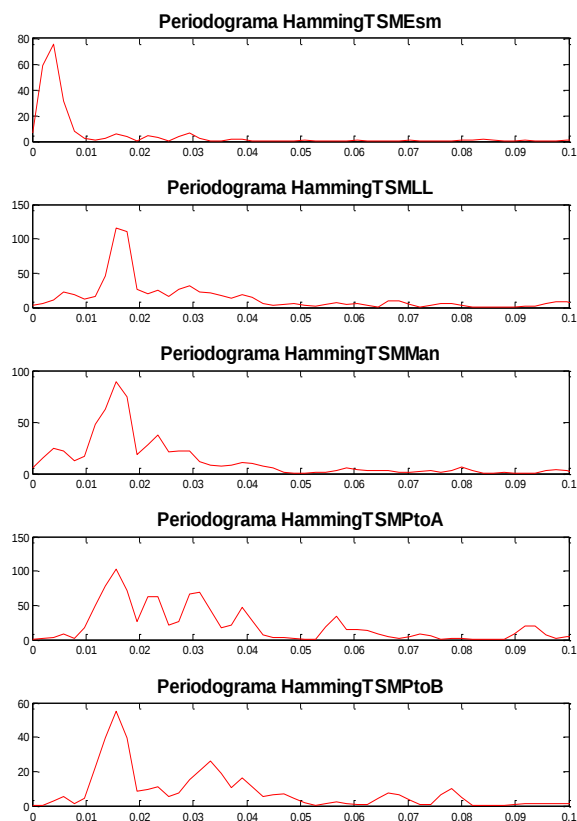


Figura 14 Gráficos de Periodogramas de la TSM en las diferentes estaciones costeras.

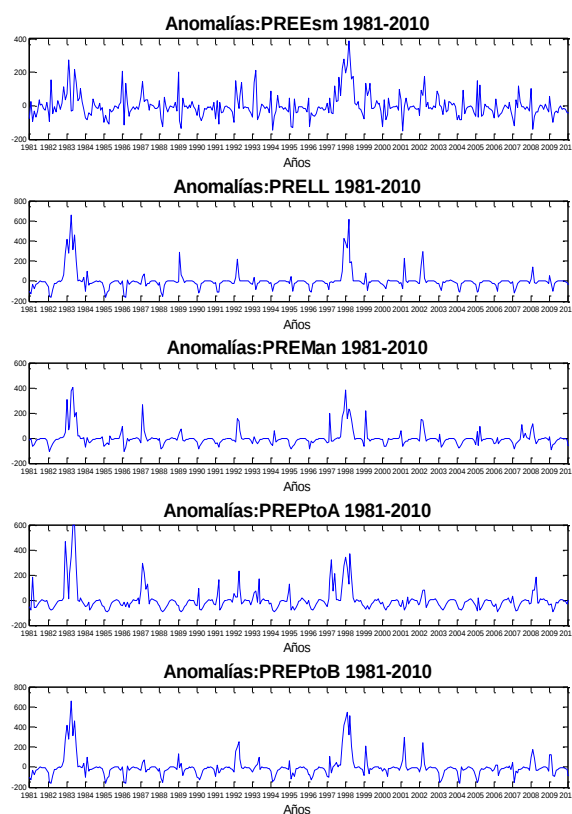


Figura 15 Gráficos de las anomalías de la Precipitación en las diferentes estaciones costeras.

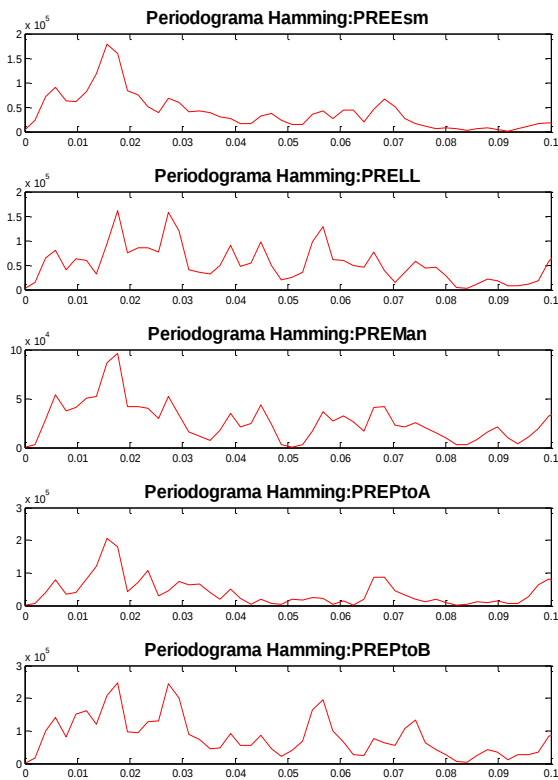


Figura 16 Gráficos de Periodogramas de la Precipitación en las diferentes estaciones costeras.

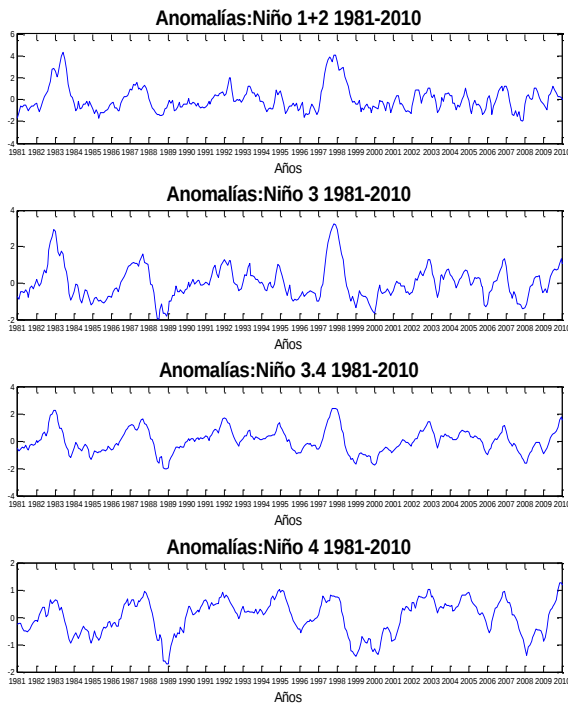


Figura 17 Gráficos de las anomalías de las variables globales en las diferentes estaciones costeras.

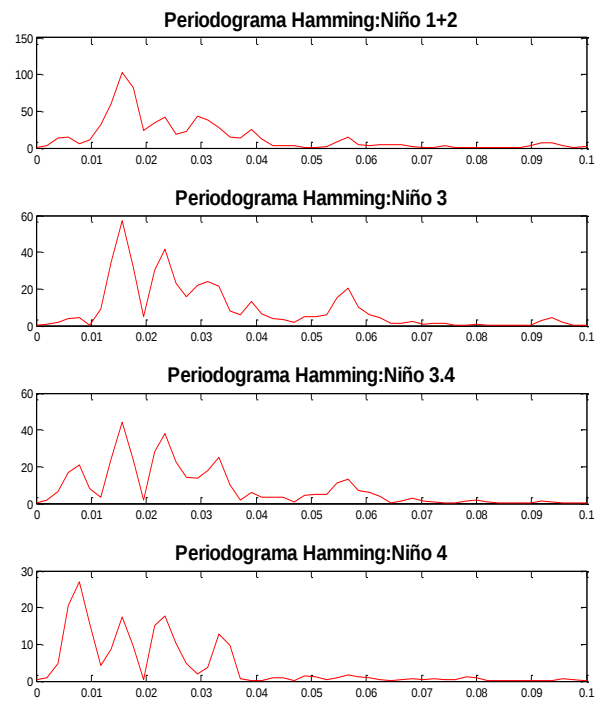


Figura 18 Gráficos de las anomalías de las variables globales en las diferentes estaciones costeras.

Lo más importante del análisis de Periodograma es localizar la frecuencia del ciclo (eje de ordenadas x) en el que se presenta la mayor proporción de varianza (eje de ordenadas y) y notar como se relacionan entre las estaciones costeras y los índices ENOS. Al observar la tabla 8 se nota que el ciclo de los índices ENOS coincide con los de la Temperaturas Superficial del Mar de La Libertad, Manta, Puerto Ayora y Puerto Bolívar; concomitantemente con las precipitaciones Esmeraldas y Puerto Ayora.

Tabla 7 Valores de frecuencias y períodos máximos de la TSM, Precipitación en las diferentes estaciones costeras y variables globales.

	'TSMEm'	'TSMML'	'TSMMan'	'TSMPTOA'	'TSMPTOB'
Valor Max PSD	75,701	115,890	89,635	102,336	55,091
Frec. Max. (Ciclo/Mes)	0,004	0,016	0,016	0,016	0,016
Período Max Año	21,333	5,333	5,333	5,333	5,333

	'PREEm'	'PRELL'	'PREMan'	'PREPtoA'	'PREPtoB'
Valor Max PSD	178075,449	160348,489	95870,5016	205880,015	246652,219
Frec. Max. (Ciclo/Mes)	0,016	0,018	0,018	0,016	0,018
Período Max Año	5,333	4,741	4,741	5,333	4,741

	'Niño 1+2'	'Niño 3'	'Niño 3.4'	'Niño 4'
Valor Max PSD	103,437	56,987	44,243	26,943
Frec. Max. (Ciclo/Mes)	0,016	0,016	0,016	0,008
Período Max Año	5,333	5,333	5,333	10,667

4. SUMARIO Y CONCLUSIONES

1. Para el presente estudio, el análisis de patrón del comportamiento de las variables océano-atmosféricas en el tiempo, y su representación gráfica contribuyeron a la determinación de los métodos de interpolación empleados, considerando en el caso de variables con un comportamiento periódico el método de Spline cúbico y para aquellas que presenten una forma sin un patrón bien definido se sugiere el empleo del método de Shaped Preserving interpolate. La variable Precipitación no se interpola en caso alguno.
2. En lo que respecta a las anomalías de las variables oceánicas y atmosféricas el comportamiento de las estaciones situadas al norte (Esmeraldas y Manta) son similares entre sí por presentar curvas de Andrews semejantes, de forma similar ocurre con las Estaciones del Sur del litoral Ecuatoriano (La Libertad y Puerto Bolívar) que se asemejan en comportamiento, permitiendo así constatar el frente ecuatoriano que demarca dos comportamientos disimiles en la región norte y sur del Ecuador. Las variables capturadas en las estaciones de monitoreo del INOCAR situadas al norte del Ecuador están relacionadas entre sí, de igual forma ocurre con las variables procedentes de las estaciones del sur.
3. El análisis de componentes principales permitió reflejar que la primera componente principal denota la estacionalidad del fenómeno, es decir, que para el presente estudio, muestra claramente que se está representando las estaciones seca y lluviosa.
4. La segunda componente principal denota los casos de eventos El Niño y La Niña claramente definidos por los picos más altos y más bajos de la curva de la componente.
5. Las componentes tres, cuatro y cinco denotan los ruidos de la matriz de datos.
6. Se observa que cada 5.33 años se produce un ciclo de ocurrencia en el espectro de las series de los índices ENOS, el cual coincide con la intensidad de los espectros de la serie de datos de temperatura superficial del mar y precipitación de las estaciones de Puerto Ayora, La Libertad, Manta y Puerto Bolívar.
7. El procedimiento del relleno de datos faltantes para la serie de TSM de las estaciones costeras con datos provenientes de SODA 2.2.8 es considerado válido ya que se observó que la mayor intensidad de los espectros de la TSM coinciden con la mayor intensidad de los espectros de los índices ENOS.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo, desean expresar sus sinceros agradecimientos a los directivos del Instituto Oceanográfico de la Armada, en especial al TNNV-TNC Willington Rentería y al personal técnico del departamento de Ciencias del Mar, quienes brindaron su apoyo y guía técnica para el desarrollo de los análisis realizados, durante el periodo en que se llevó a cabo el Proyecto ENOS julio 2013 a diciembre 2014.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez-Olgún, Hotait-Salas & Sustaita-Rivera, F. (2011) Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ing. Invest. ytecnol.* 2.
- Andrews, D. F. (1972) Plots of high-dimensional data. *International Biometric Society*, 18(1), 125-136.
- Box, G. & Hunter, W. (2006). - *Estadística para Investigadores*; España; Editorial Reverté. Primera edición.
- Correa, J. (2002) *Gráficos Estadísticos con R*; Colombia; Universidad Nacional sede Medellín. Pág.102-105.

De Boor, C. (2001) *A Practical Guide to Splines*.USA; Editorial Springer.

Emery W. & Thomson R. (2001). - *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*; USA; Editorial Elsevier. Segunda edición.

Härdle W. - Simar L. (2007) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Verlag Berlin Heidelberg; Editorial Springer.

Pérez, C.(2013)*Estadística con Matlab: ejemplos y ejercicios resueltos*.USA; Editorial Lexington.Primer edición.

Wilks, D. S. (2011) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*.USA; Editorial Elsevier. Tercera edición.