

**ESTUDIO DEL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS) A TRAVÉS DE LA
VARIABILIDAD EN LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL OCÉANO
PACÍFICO Y SU MODELACIÓN FRACTAL-MULTIFRACTAL.**

PRESENTADO POR

ARVEY FERNANDO TORRES GUERRERO

ID 000271279

MARIA PAULA SANABRIA PINZÓN

ID 000291870

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2020

**ESTUDIO DEL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS) A TRAVÉS DE LA
VARIABILIDAD EN LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL OCÉANO
PACÍFICO Y SU MODELACIÓN FRACTAL-MULTIFRACTAL.**

**PROPUESTA DE PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIEROS CIVILES**

PRESENTADO POR

ARVEY FERNANDO TORRES GUERRERO

ID 000271279

MARIA PAULA SANABRIA PINZÓN

ID 000291870

DIRECTOR ACADÉMICO

DAVID JOSEPH SERRANO SUAREZ IC MSc



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2020

Nota de aceptación:

Firma Presidente del Jurado

Firma Jurado N°1

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Enero de 2020

DEDICATORIA

Desde el Cielo, a aquella persona capaz de entenderme, guiarme y transmitir toda la sabiduría puesta por el Padre Celestial del Universo y aquella Familia Rodríguez que me ha guiado en este plano terrenal distorsionado por la falta de amor y de una familia.

“De lo infinito y confuso nace una nueva idea.”

Fernando Torres Guerrero

DEDICATORIA

A la familia Sanabria Pinzón, Sierra Galvis y Álvarez Linch, por haberme permitido crecer como su hija.

A mis hermanos Scouts por darme la chispa de ver el mundo y la naturaleza de manera distinta.

A Maria Isabel por haber sembrado una pasión y un camino.

A Laura y Sergio por su amor, complicidad y apoyo incondicional a lo largo de los años.

A Dios por otorgarnos la sabiduría y un lenguaje para entender su obra.

Maria Paula Sanabria

AGRADECIMIENTOS

Esta curva de aprendizaje nace desde el 2014 con ayuda de una persona muy especial y quien es la responsable del amor por la investigación: Duwamg Alexis Prada, de ahí, encontramos en el camino personas con un gran carisma y un don por hacer que el conocimiento trascienda y esté a disposición de los demás: David Joseph Auresy I.C. M. Sc, Victor Manuel Peñaranda Velez I.C. M.Sc. Ph.D., Carlos Puente I.C. M.Sc. Ph.D y Mahesh Maskey I.C. M.Sc. Ph.D, grandes personas colmadas de conocimiento y un amplio recorrido en la academia.

Al semillero de investigación en Modelación Matemática MODMAT por darnos un espacio de pensamiento y fascinación por los fractales.

A cada momento de la vida con todos su pormenores y aprendizajes marcados con nuevos conocimientos y guía de aquellas personas que con pequeñas acciones contribuyeron al éxito de esta investigación.

Fernando Torres
Maria Paula Sanabria

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	7
TABLA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	13
LISTA DE ANEXOS	14
RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO	15
GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE	16
1 INTRODUCCIÓN.....	17
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 EL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS).....	19
3.1.1 Identificación de eventos El Niño y La Niña.....	21
3.2 TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL OCÉANO	24
3.3 MÉTODO ESTADÍSTICO DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL.....	26
3.3.1 Interpretación geométrica del DVS.....	28
3.4 MODELO GEOMÉTRICO APROXIMACIÓN FRACTAL - MULTIFRACTAL (FM)	29
3.4.1 Medida Multifractal (Parámetro intermitencia)	32
3.4.2 Parámetros Localización & Parámetros de regularidad	34
3.4.3 Modelo de Optimización	36
3.4.4 Función Objetivo	36

4	METODOLOGÍA.....	36
4.1	RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN	36
4.2	DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA Y GEOMÉTRICA DE LOS DATOS	37
4.3	IMPLEMENTACIÓN TECNICA DESCOMPOSICIÓN VALORES SINGULARES.....	38
4.4	CONEXIÓN DE RESULTADOS OBSERVADO/SIMULADO	38
5	ALCANCE DEL PROYECTO.....	39
6	ANÁLISIS DE DATOS	40
6.1	FUENTE, TIPO Y RESOLUCIÓN DE LA INFORMACIÓN	40
6.2	DESCRIPCIÓN ESTADISTICA Y GEOMETRICA DE LOS DATOS	43
6.2.1	En función de la variable tiempo.....	43
6.2.2	En función de las variables espacio-temporales.....	47
6.3	DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL: MÉTODO DE FILTRADO PARA HOVMÖLLER	48
6.4	MODELO FRACTAL – MULTIFRACTAL (FM).....	50
6.4.1	Optimización por Enjambre de Partículas.....	51
7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
7.1	DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA Y GEOMÉTRICA DE LOS DATOS	53
7.1.1	Ciclo Anual y Anomalías de la TSO.....	53
7.1.2	Diagramas Hovmöller	57
7.1.3	Identificación de eventos El Niño y La Niña por medio anomalías y diagramas Hovmöller	63
7.2	IMPLEMENTACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL PARA HOVMÖLLER	68

7.3	MODELACIÓN FRACTAL-MULTIFRACTAL.....	71
8	CONCLUSIONES.....	77
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
10	ANEXOS.....	81

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Regiones el Niño, definidas por la comunidad científica internacional con fines de seguimiento y vigilancia de los Fenómenos del Ciclo ENOS.[1].	21
Figura 2. Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño clasificados por intensidad y duración de acuerdo con la magnitud de las anomalías positivas del Temperatura Superficial del océano registrada en el océano Pacífico central (Región Niño 3).[7].	23
Figura 3. Épocas de ocurrencia de fenómenos La Niña clasificados por intensidad y duración de acuerdo con la magnitud de las anomalías positivas del Temperatura Superficial del océano registrada en el océano Pacífico central (Región Niño 3).[7].	23
Figura 4. Evolución de intensidades de la precipitación.[14].	31
Figura 5. Concentraciones de contaminantes en medios porosos.[14].	31
Figura 6. Construcción de un proceso multiplicativo binomial. A la izquierda, se observa la medida incremental del conjunto $\mu(x)$ y a la derecha, la medida acumulada $M(x)$ del mismo con parámetro $p = 0.3$. [16].	34
Figura 7. Construcción de una función de interpolación fractal que pasa por los puntos $(0,0)$, $(0, \frac{1}{2})$ y $(1,0)$. [16].	35
Figura 8. Representación gráfica del espacio geográfico donde se encuentra el registro histórico de la variable TSO.	41
Figura 9. Lectura horaria de la Temperatura superficial del Océano mensual en °C del día 30 septiembre 1981, a partir de la construcción y organización de la información obtenida del ECMWF.	42
Figura 10. Representación enero 1988 fase fría en la costa sur América por debajo del promedio, a lo que se refiere La Niña.	44
Figura 11. Representación junio 2015 aumento considerable (este) de la TSO, lo cual se refiere a la fase cálida ó El Niño.	45

Figura 12. Representación del Índice Oceánico del Niño (ONI) desde Enero 1950 – hasta 2017, el cual se calcula como la media de 3 meses consecutivos de las anomalías de la temperatura superficial del océano medidas por el sensor ERSST.v3 en la región 3.4 del Niño. [19].....	46
Figura 13. Diagrama Hovmöller Anomalías espacio de cuadrícula 5° con un registro 39 años.[21].....	48
Figura 14. Representación primeros modos de variabilidad longitudinal resultado de la Descomposición en Valores Singulares.	49
Figura 15. Representación primeros modos de variabilidad latitudinal resultado de la Descomposición en Valores Singulares.	49
Figura 16. Ciclo medio anual de la serie de registro TSO entre 1979 y 2017, organizados en un rango de valores temperatura en grados Celsius que varían 22°C – 30°C.	54
Figura 17. Anomalías TSO en °C para el año 1999.	56
Figura 18. Anomalías TSO en °C para el año 2000.	57
Figura 19. Diagrama Hovmöller en dirección longitudinal [160E – 110W] para registro histórico de 39 años TSO.....	58
Figura 20. Diagrama Hovmöller en dirección latitudinal [10N – 10S] para registro histórico de 39 años TSO.	60
Figura 21. Grafica Correlación espacial de Pearson para matriz Hovmöller longitudinal.	62
Figura 22. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1997-1998.	64
Figura 23. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1997-1998.	66
Figura 24. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1988-1989.	67

Figura 25. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 2010-2011.	68
Figura 26. Representación del diagrama Hovmöller con (15) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.	69
Figura 28. Representación del diagrama Hovmöller con (200) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.	70
Figura 27. Representación del diagrama Hovmöller con (80) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.	70
Figura 29. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°389 del modelo FM (derecha).	72
Figura 30. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°213 del modelo FM (derecha).	73
Figura 31. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°612 del modelo FM (derecha).	74
Figura 32. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°994 del modelo FM (derecha).	75
Figura 33. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°995 del modelo FM (derecha).	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los Fenómenos El Niño con base en diferentes rangos de anomalías de la Temperatura Superficial del Océano (TSO).[4]	22
Tabla 2. Parámetros del Modelo Fractal-Multifractal en 2D dimensiones.	51
Tabla 3. Resultados del cálculo Coeficiente de Pearson, para diferentes distancias entre longitudes.	61
Tabla 4. Criterios de análisis para coeficiente de Pearson.	62
Tabla 5. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°389 ...	72
Tabla 6. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°213 ...	73
Tabla 7. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°612 ...	74
Tabla 8. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°994 ...	75
Tabla 9. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°995 ...	76

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Graficas anomalías TSO para el registro de 39 años en el área del Océano Pacífico.....	81
Anexo 2. Código para la descripción geométrica de la variable oceánica TSO, representación graficas de diagramas hovmöller y Descomposición en valores singulares.	100
Anexo 3. Código para generar grafica ciclo anual TSO.....	106
Anexo 4. Código para representación gráfica de anomalías de la variable temperatura superficial del océano (ATSO).	111

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTUDIO DEL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS) A TRAVÉS DE LA VARIABILIDAD EN LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL OCÉANO PACÍFICO Y SU MODELACIÓN FRACTAL-MULTIFRACTAL

AUTOR(ES): Arvey Fernando Torres Guerrero
Maria Paula Sanabria Pinzón

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): David Joseph Serrano Suarez IC MSc

RESUMEN

Este trabajo engloba la descripción del fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENOS) a través de la Temperatura Superficial del Océano Pacífico (TSO), concretamente, en el área comprendida entre las latitudes (10°N a 10°S) y longitudes (160°E a 100°W), a lo largo de 39 años de registros obtenidos del Centro Europeo para Pronóstico Meteorológico de Mediano Alcance (ECMWF). Esto anterior se logra, gracias al uso de técnicas estadísticas y modos de representación hidrometeorológica bajo el desarrollo del ciclo anual y el cálculo de las anomalías de la TSO, la organización de registros mediante Diagramas Hovmöller y la implementación de la Descomposición Espectral de Valores Singulares (DVS). Igualmente, de manera exploratoria se propone el uso del modelo Fractal - Multifractal para la representación de patrones espaciales y abrir la posibilidad de nuevas aplicaciones en su configuración 2D. Los resultados obtenidos muestran una fuerte relación entre la descripción estadística y geométrica de la TSO y los eventos históricos del fenómeno ENOS. En los diagramas Hovmöller se presentan tramas de información densas donde se hace poco evidente corroborar con los acontecimientos históricos de la zona, para lo cual se desarrolla la técnica descomposición en valores singulares donde se encontró etapas de fase normal y eventos próximos a la ocurrencia de un evento, finalmente, el modelo Fractal - Multifractal desde la configuración de la función objetivo no evidencia aproximación al diagrama observado en este caso, debido a la complejidad que hoy representa la simulación bajo este modelo.

PALABRAS CLAVE:

El Niño-Oscilación Sur, Temperatura Superficial Océano, Diagramas Hovmöller, Modelo Fractal-Multifractal

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: STUDY OF EL NIÑO-SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) THROUGH VARIABILITY IN THE SURFACE TEMPERATURE OF THE PACIFIC OCEAN AND ITS FRACTAL-MULTIFRACTAL MODELING

AUTHOR: Arvey Fernando Torres Guerrero
Maria Paula Sanabria Pinzón

FACULTY: Civil Engineering Faculty

DIRECTOR: David Joseph Serrano Suarez IC MSc

ABSTRACT

This work encompasses the description of the El Niño - Southern Oscillation (ENSO) phenomenon through the Pacific Ocean Surface Temperature (TSO), specifically in the area between latitudes (10° N to 10° S) and longitudes (160° E at 100° W), over 39 years of records obtained from the European Center for Medium Range Meteorological Forecast (ECMWF). This is achieved, thanks to the use of statistical techniques and hydrometeorological representation modes under the development of the annual cycle and the calculation of the TSO anomalies, the organization of records using Hovmöller Diagrams and the implementation of the Spectral Decomposition of Singular Values (DVS). Similarly, the use of the Fractal - Multifractal model for the representation of spatial patterns and to open up the possibility of new applications in its 2D configuration is proposed in an exploratory manner. The results obtained show a strong relationship between the statistical and geometric description of the TSO and the historical events of the ENSO phenomenon. In Hovmöller diagrams, dense frames of information are presented where it is unclear to corroborate with the historical events of the area, for which the decomposition technique in singular values is developed where normal phase stages and events close to the occurrence of a Eventually, the Fractal - Multifractal model from the configuration of the objective function does not show an approximation to the diagram observed in this case, due to the complexity that today represents the simulation under this model.

KEYWORDS:

El Niño-Southern Oscillation, Surface Ocean Temperature, Hovmöller Diagrams, Fractal-Multifractal Model.

V° B° DIRECTOR OF DEGREE WORK

“Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las costas no son círculos, y las cortezas de los árboles no son lisas, ni los relámpagos viajan en una línea recta.”

-Benoit Mandelbrot

1 INTRODUCCIÓN

Ante la creciente necesidad del ser humano por el entendimiento de los sistemas dinámicos y caóticos que le afectan, han nacido las ciencias climatológicas como desarrollo de las ciencias exactas que en un principio brindaban una perspectiva demasiado abstracta del lenguaje de la naturaleza, en consecuencia al inicio para atribuir aleatoriedad a fenómenos que en realidad no la poseían y en búsqueda de solventar esta conjetura errónea, se ha venido optando por modelos cada vez más ajustados a la realidad que permitan la identificación de patrones dentro de lo aparentemente imprevisible.

Sin embargo, resulta complicado concebir las metodologías hoy empleadas fuera de su concepción matemática, es por ello que surgen conceptos aliados como aquellos propuestos por el análisis estadístico avanzado y un modelo geométrico Fractal - Multifractal para conseguir este fin. A lo largo del presente trabajo se hace una caracterización estadística en el tiempo mediante el desarrollo del ciclo anual y anomalías de registros de 39 años, los diagramas Hovmöller pertenecen a un análisis espacio - temporal evolutivo de la variable Temperatura Superficial del Océano y como método de filtrado descomposición en valores singulares. Por último lograr hacer una conexión mediante simulaciones controladas a lo largo de la aplicación del modelo Fractal – Multifractal.

Lo anterior, funcionará de marco metodológico y teórico para el estudio del Fenómeno del Niño-Oscilación sur que tiene origen en el Océano Pacífico Tropical, siendo enmarcado en treinta y nueve años de recopilación de datos satelitales (1979 - 2017), usados para examinar el comportamiento de la temperatura superficial del océano (TSO) siguiendo las coordenadas geográficas [10°N – 10°S 160°E – 110°W].

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Interpretar la dinámica del ENOS a través de la Temperatura Superficial del Océano Pacífico, mediante el modelo Fractal – Multifractal (FM) para la descripción de patrones observados antecedido por una técnica avanzada para el tratamiento de datos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Describir estadística y geométricamente la variable de temperatura superficial del Océano Pacífico como modo de organización espacial del patrón climático El Niño Oscilación Sur (ENOS).
- ❖ Implementar una técnica espectral como método de simplificación para analizar la variable atmosférica u oceánica en el tiempo - espacio.
- ❖ Conectar los resultados para posibilitar aplicaciones de modelación hidrometeorológica bajo la aproximación de la técnica Fractal – Multifractal (FM) en dos dimensiones.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este apartado se presenta el desglose de conceptos relevantes para el entendimiento del fenómeno de estudio, partiendo de la variable seleccionada para tal fin, su distribución espacial, además de la base teórica que soporta las técnicas y metodologías detalladas en el capítulo siguiente, que funcionan como descripción estadística y geométrica por medio de la modelación matemática y el uso del recurso computacional para procesos iterativos.

3.1 EL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS)

El termino ENOS está relacionado con una serie de eventos oceánicos (fase cálida ó fase fría) y atmosféricos (presión barométrica bimodal), caracterizados por el anómalo calentamiento del océano pacifico ecuatorial, el cual no tiene un periodo exacto de ocurrencia[1].

Las componentes oceánicas del fenómeno, corresponden en términos generales, a la aparición cíclica en tiempo de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal, en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y Sur de Colombia.

Por otra parte, la componente atmosférica del ENOS[2], conocida como Oscilación Sur corresponde a la variación interanual del campo de presión atmosférica cerca de la superficie, en la región del Pacífico centro-occidental. Durante algunos años la presión atmosférica en el Pacífico central es mayor que en el occidental, mientras que en otros años ocurre el caso contrario; esta alternancia interanual de las anomalías positivas y negativas de la presión atmosférica ha sido comprobada mediante la correlación inversa de los valores de presión atmosférica en Tahití (isla localizada en el centro del Pacífico) y Darwin (nororiente de Australia), a esto se le conoce como el nombre de Índice Oscilación del Sur (IOS).

En condiciones normales el océano pacifico presenta una distribución de temperatura caliente en los trópicos y fría en los polos, puesto que la cantidad de radiación solar que llega al planeta es mayor (por unidad de área) en la zona tropical, que en los polos debido a la esfericidad del planeta y también, por la inclinación del

eje de rotación del mismo[2], para entender la distribución de temperatura a lo largo del ecuador, en el océano pacífico se hace necesario introducir el concepto de los vientos superficiales del pacífico ó vientos alisios.

Los vientos alisios en su comportamiento habitual toman dirección de este a oeste, estos empujan la corriente oceánica de la costa Suramérica en su dirección de viaje, y de esta manera, el agua desplazada se acumula al lado oeste del océano pacífico, alrededor de Oceanía y Asia, mientras en Suramérica, desde el fondo del océano, asciende corriente de agua fría. Esto se conoce como corriente de Humboldt, la cual genera una diferencia de temperatura a través de todo el océano pacífico que se podría entender como agua caliente a un lado y agua fría a la costa de Suramérica, en la parte de Oceanía el agua caliente al evaporarse y condensarse le da un clima tropical favoreciendo las lluvias, esto da como resultado un sistema de circulación de aire que empuja las aguas cálidas hacia el oeste.

Durante un evento de El Niño (fase cálida), los vientos alisios del este que convergen a través del Pacífico ecuatorial se debilitan. Esto a su vez ralentiza la corriente oceánica que aleja las aguas superficiales de la costa occidental de América del Sur y reduce la afluencia de agua fría y rica en nutrientes del océano más profundo, alisando la termoclina y permitiendo que el agua superficial cálida se acumule en la parte oriental del Océano Pacífico.

Asimismo, monitoreo de las condiciones de ENOS en su componente oceánico se enfoca principalmente en las anomalías de la temperatura de la superficie del Océano (TSO) en cuatro regiones geográficas del Pacífico ecuatorial[3] como se muestra en la (Figura 1):

Región Occidental (Región Niño 4): Entre las latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 160° Este y 150° Oeste.

Región Central (Región Niño 3): Entre las latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 90° y 150° Oeste.

Región Centro-Occidental (Región Niño 3-4): Entre las Latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 120° y 170° Oeste.

Región Oriental (Región Niño 1+2): Entre las Latitudes 0° y 10° Sur y las Longitudes 90° y 80° Oeste.

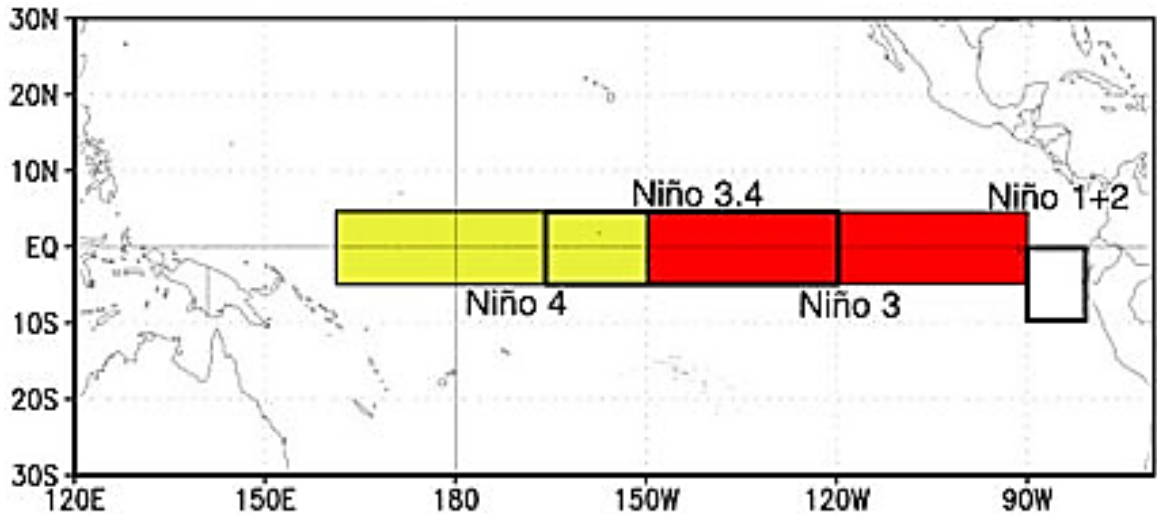


Figura 1. Regiones el Niño, definidas por la comunidad científica internacional con fines de seguimiento y vigilancia de los Fenómenos del Ciclo ENOS[1].

3.1.1 Identificación de eventos El Niño y La Niña

Otro aspecto importante en el análisis de este fenómeno es su categorización con base en la intensidad del mismo. La intensidad es fiel reflejo de la magnitud de las anomalías que se registran. Se puede obtener una clasificación de los eventos, como débiles, moderados o fuertes, con base en la desviación estándar (σ) de la serie de anomalías de la temperatura superficial del océano en la región Niño 3, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los Fenómenos El Niño con base en diferentes rangos de anomalías de la Temperatura Superficial del Océano (TSO)[4].

Categoría	Anomalía
Cálido fuerte	Mayor o igual a +1,4
Cálido moderado	Mayor que +0,9 y menor que +1,4
Cálido débil	Mayor que +0,5 y menor que +1,0
Neutro	Mayor que -0,5 y menor que +0,5
Frío débil	Menor que -0,5 y menor -0,9
Frío moderado	Menor que -1,0 y menor que -1,5
Frío fuerte	Menor o igual que -1,5

Un ejemplo significativo viene a ser el evento ocurrido entre los años 1997/1998, uno de los más pronunciados de los últimos 150 años[5], el cual inició en marzo 1997 y finalizó en el mes de junio de 1998.

Cada ENOS es una manifestación diferente entre cada evento[6], tienen su propia personalidad con características particulares como: iniciación, duración, finalización del evento, intensidad, localización de las anomalías e impacto socio económico lo que ha llevado a que se establezcan dichas clasificaciones como la anterior mostrada.

En las figuras 2 y 3 se muestran las épocas de ocurrencias de fenómenos El Niño – La Niña en el océano Pacífico central (Región Niño3) ocurridos desde 1951 hasta 2011. De esto se encontró una relación coherente que permite identificar adecuadamente el fenómeno ENOS.



Figura 2. Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño clasificados por intensidad y duración de acuerdo con la magnitud de las anomalías positivas del Temperatura Superficial del océano registrada en el océano Pacífico central (Región Niño 3)[7].



Figura 3. Épocas de ocurrencia de fenómenos La Niña clasificados por intensidad y duración de acuerdo con la magnitud de las anomalías positivas del Temperatura Superficial del océano registrada en el océano Pacífico central (Región Niño 3)[7].

Según el informe sobre el desarrollo del actual fenómeno cálido del pacífico, su efecto hidroclimático sobre el país, impactos socioeconómicos y la proyección sobre el posible efecto en los próximos meses[7], 1998 emitido por la IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) se manifestó un déficit acumulado de lluvia, principalmente en las regiones Andina, Caribe y Orinoquia.

Así mismo, en gran parte de Colombia estuvo afectado por altas temperaturas del aire durante las horas del día y la temperatura superficial en el pacífico sur colombiano (3°N 83°W) durante el año de 1997, aumentó desde 25 °C en enero hasta 28.5 °C hacia mediados de año y posteriormente asciende hasta 29.9°C en mayo de 1998 lo cual representa una oscilación de 5°C; cesa el calentamiento de las aguas marinas y la TSO inicia un proceso de descenso en sus calores entre mayo y septiembre la temperatura baja de 29.9°C a 26°C.

Al final el informe muestra que este tipo de evento tiene un impacto socioeconómico importante en la alteración de la disponibilidad del recurso hídrico, abastecimiento de agua potable para la población, graves consecuencias para el sector agrícola y el sector energético.

3.2 TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL OCÉANO

El sistema climático se deriva de procesos que controlan directa o indirectamente el ambiente atmosférico de toda la humanidad y los ecosistemas, así mismo se puede encontrar los dos principales componentes del sistema: los estados hidrológicos y termodinámicos de la atmósfera y del océano [libro], la temperatura superficial del océano (TSO) o sus siglas en inglés (OST) siendo una variable oceánica al estar en la interfaz océano-atmósfera es una variable fundamental para comprender, monitorear y predecir comportamientos que determinan interacciones complejas.

Los registros de datos climáticos de TSO son esenciales para monitorear y comprender la variabilidad climática, las interacciones de los ecosistemas climáticos como la salud de los arrecifes de coral, gestión sostenible de la pesca, problemas

críticos como el aumento del nivel del océano y el cambio en el patrón del hielo marino entre otros.

En oceanografía, la TSO y Sub- Superficie temperatura tienen connotaciones diferentes, una razón para esto es que la TSO es la interfaz mediante la cual la atmósfera y el océano intercambian energía y agua dulce, mientras Sub-superficie Temperatura es lo interno del océano[8], adicional a esto la TSO puede ser fácilmente observada mediante barcos, boyas, satélites de modo que se pueden derivar estimaciones útiles de la media, así como su variabilidad en periodos de siglos, décadas, años, meses o días.

El equipo científico de GHR SST junto con CF Conventions and Metadata acordaron nombres estándares a los diferentes tipos de TSO como se detallan[8] :

Sea Surface Temperature Ocean (TSO): Es la temperatura del agua del océano cerca de la superficie (incluida la parte debajo del hielo marino, si corresponde), y no la temperatura de la interfaz atmosfera-océano.

Sea Surface Skin Temperature (Tsoskin): La temperatura de la Tsoskin de la superficie del océano es la temperatura medida por un radiómetro infrarrojo que funciona normalmente en longitudes de onda en el rango de 3.7 a 12 micrómetros. Representa la temperatura dentro de la subcapa dominada por difusión conductora a una profundidad de aproximadamente 10 a 20 micrómetros por debajo de la interfaz aire-océano.

Sea Surface Subskin Temperature (Tsosubskin): La temperatura de la TSOsubskin de la superficie del océano es la temperatura en la base de la subcapa laminar conductora de la superficie del océano, es decir, a una profundidad de aproximadamente 1 a 1,5 milímetros por debajo de la interfaz aire-océano.

De la misma forma, resulta relevante la evolución a lo largo de la historia, de las metodologías empleadas para recolección de la información; poco antes del año 1980 estos registros eran producto de instrumentos ubicados en las costas, barcos y boyas, unos de los primeros métodos automatizados para la recolección fue la medición del agua que fluye a través de los puertos de los buques que navegaban

en aguas internacionales, para ese entonces la cantidad de datos obtenida fue significativa y útil, aunque la profundidad de los puertos puede variar de un barco a otro y en un océano estratificado, ese cambio de profundidades significan diferencias entre temperatura, al final, la escasez de la información sobre los océanos del mundo era evidente[9].

A partir del año 1980 y hasta el presente[9], la gran mayoría de los datos TSO provienen de observaciones satelitales de misiones como TERRA, AGUA, GHRST, S-NPP de la NASA, que orbitan alrededor de la tierra equipadas con instrumentos como el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), el cual entrega la temperatura de la superficie del océano (TSO), la temperatura atmosférica, la temperatura de la nube, la altitud de la nube, el vapor de agua, el color del océano y los datos de aerosol. Estos instrumentos MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua EOS logran adquirir datos con cobertura global cada 1-2 días.

3.3 MÉTODO ESTADÍSTICO DE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL

El crecimiento tecnológico y la facilidad de adquirir y procesar grandes bancos de datos en todas las ciencias, ha estimulado el desarrollo y utilización del análisis estadístico en muchas disciplinas, en ingeniería[10], ha sido especialmente empleado para el desarrollo de modelos hidrometeorológicos que ayudan a entender interactivamente el comportamiento de fenómenos naturales, de forma que, para describir una determinada serie de registros empleando un modelo, se ha hecho importante conocer el dominio de análisis. Este puede ser dominio del tiempo o dominio de la frecuencia.

Cuando el interés se centra en la manera que evoluciona el proceso a través del tiempo y se desea llegar a construir un modelo de carácter histórico, se utiliza como herramienta diagnóstica la función de auto correlación muestral, lo que define un análisis en el dominio del tiempo. Ahora, cuando se centra el estudio en las propiedades de frecuencia de los datos, se utiliza la herramienta diagnóstica por

función de densidad espectral, que hace referencia análisis en el dominio de la frecuencia, el cual será el campo de acción para este trabajo[11].

Por su parte, el análisis de series o registro de variables climatológicas en el dominio de la frecuencia es objeto de la Descomposición Espectral, la cual se puede definir como la partición de la muestra en sus componentes de frecuencia básicos, cada uno de estos de los cuales explica una determinada cantidad de la variancia total de la muestra, esto parte del propósito fundamental del análisis de la serie temporal en el dominio de la frecuencia. Teniendo en cuenta que las variables climatológicas varían en el espacio y tiempo lo que se busca es la construcción de una técnica modelo que describa el proceso que pudo haber generado el conjunto de la muestra observado[11].

El análisis por descomposición espectral es comúnmente conocido como una técnica de estadística avanzada que ha desarrollado diversas aplicaciones en campos del intelecto que intervienen con el tratamiento de datos y procesamiento de la información, siendo la compresión de imágenes (sintéticas o reales) una de las principales, dando ventajas en liberación de espacio de almacenamiento y tiempo de procesamiento para abarcar ya sea un conjunto más robusto de datos o dar lugar a otro tipo de información de mayor alcance; de manera general este logra una depuración de datos conservando un espectro relevante o representativo que mantiene las mismas propiedades que la muestra original.

La técnica utilizada en el presente proyecto y con la cual se desarrolló el algoritmo es la Técnica Descomposición en Valores Singulares (En adelante DVS). El método DVS puede considerarse como una generalización a matrices rectangulares de la diagonalización de cualquier $m \times n$ rectangular matriz [12]; esto es usado para identificar patrones espaciales y su variación temporal, la matriz no necesita ser cuadrada ya que en campo pueden definirse en un número diferente de puntos de cuadrícula pero si dependiente del espacio y el tiempo.

La matriz A $m \times n$ puede ser descompuesta como [13]:

$$A = U \Sigma V^T$$

Donde:

1. U y V son $m \times m$ y $n \times n$ matrices ortonormales.
2. Las m columnas u_k de U son llamados vectores singulares izquierdos, también son los vectores propios de la matriz AA^T simétrica $m \times m$.
3. Las n columnas v_k de V son llamados vectores singulares derechos, también son los vectores propios de la matriz $A^T A$ simétrica $n \times n$.
4. Σ es la matriz diagonal $m \times n$ con elementos σ_k llamados valores singulares que son no- negativos y organizados de mayor a menor.
5. $Av_k = \sigma_k * u_k$ y $A^T u_k = \sigma_k * v_k$.

3.3.1 Interpretación geométrica del DVS

La DVS se aplica tanto a matrices reales o complejas, pero en una interpretación real $A \in \mathcal{R}^{m \times n}$ y con S la esfera unitaria en $\mathcal{R}^n$.

Definición 1: Llamamos hiperelipse en $\mathcal{R}^m$, a la superficie obtenida deformando la esfera unitaria a lo largo de direcciones ortogonales $u_1, u_2, \dots, u_n$ de $\mathcal{R}^m$, en magnitudes $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ (eventualmente cero).

Esto es, la hiperelipse de semiejes $\sigma_1 u_1, \dots, \sigma_m u_m$ es:

$$[x \in \mathcal{R}^m : x = \sum_{j=1}^m c_j * \sigma_j * u_j \wedge \sum_{j=1}^m c_j^2 = 1]$$

Como los u_i son versores, los vectores $\{\sigma_i u_i\}$ tienen longitud $\sigma_1 u_1, \dots, \sigma_m u_m$ respectivamente y se los denomina los semiejes principales de la hiperelipse. Si S es la esfera unitaria en $\mathcal{R}^n$ su imagen por cualquier transformación $A \in \mathcal{R}^{m \times n}$, es una hiperelipse en el subespacio imagen de A . En efecto, denotemos por $v_1, \dots, v_n$ las columnas de V .

$$AS = [Ax : x \in \mathcal{R}^n \wedge \|x\|_2 = 1] = \sum_{j=1}^n c_j * Av_j : \sum_{j=1}^n c_j^2 = 1 = \sum_{j=1}^n c_j * \sigma_j * u_j : \sum_{j=1}^n c_j^2 = 1$$

Puesto que un cálculo muestra que $Av_j = \sigma_j * u_j, j = 1 \dots n$. sea $m \geq n$ por simplicidad $\text{rango}(A) = n$

Definición 2: Los valores singulares de A son las longitudes de los n semiejes principales de AS numerados de tal modo que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_j \geq 0$.

Definición 3: Los vectores singulares a izquierda de A son los vectores unitarios $[u_1, u_2, \dots, u_n]$. Geométricamente son direcciones de los semiejes principales de AS y numerados en correspondencia con los valores singulares, es decir $\sigma_i u_i$ es el i -ésimo semieje principal de AS .

Definición 4: Los vectores singulares a derecha de A son los vectores unitarios $v_1, v_2, \dots, v_n \in S$. Estos vectores son pre imágenes de los semiejes principales de AS . Puesto que $Av_j = \sigma_j u_j$, $1 \leq j \leq n$.

En notación matricial, si $V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathcal{R}^{n \times n}$,

$U = [u_1, u_2, \dots, u_n] \in \mathcal{R}^{m \times n}$, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \in \mathcal{R}^{n \times n}$, la expresión $Av_j = \sigma_j u_j$, $1 \leq j \leq n$ se escribe:

$$A = U \Sigma V^T$$

Esta factorización de la matriz A se llama descomposición en valores singular (DVS), donde las columnas de U son n vectores ortonormales en un espacio de dimensión m , por lo tanto si $m > n$ no constituyen una base; sin embargo es posible agregarle $m - n$ columnas de manera que la matriz resultante U es ortogonal.

3.4 MODELO GEOMÉTRICO APROXIMACIÓN FRACTAL - MULTIFRACTAL (FM)

De manera general, en el modelo de Aproximación Fractal – Multifractal (FM) en tres dimensiones los patrones observados son estimados a partir de construcción de una función de interpolación fractal, que puede expresar como una combinación de $N + 1$ datos de puntos $\{(x_m, y_m, z_m): x_0 < \dots < x_N; n = 0, 1, \dots, N\}$, y el conjunto de N funciones elementales de la forma[14]:

$$w_n \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_n & c & 0 \\ c_n & d_n & h_n \\ k_n & l_n & m_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_n \\ f_n \\ g_n \end{pmatrix}, \quad n = 1, \dots, N$$

Tal que:

$$A_n = \begin{pmatrix} d_n & h_n \\ l_n & m_n \end{pmatrix}$$

$$w_n \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ z_{n-1} \end{pmatrix}, \quad w_n \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}; \quad n = 1, \dots, N$$

Ahora, aparece un 'cable' tridimensional $G = w_1(G) \cup \dots \cup w_N(G)$, que es el atractor único de las asignaciones $\{w_1, \dots, w_N\}$, y la gráfica de una función determinista continua desde $[x_0, x_N]$ al plano yz . La construcción deja (4) parámetros libres por mapa de transformación con a_n, c_n, e_n, f_n, g_n y k_n todos determinados en términos de d_n, h_n, l_n, m_n y $N + 1$ datos de puntos. Transformándola a coordenadas polares, se refine la submatriz A_n .

$$A_n = \begin{pmatrix} d_n & h_n \\ l_n & m_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_n \cos \theta_n & -r_n \sin \theta_n \\ r_n \sin \theta_n & r_n \cos \theta_n \end{pmatrix}$$

Las entradas en estas matrices y los puntos de datos de interpolación constituyen el conjunto de parámetros que caracteriza completamente una función de interpolación F , si la magnitud de los parámetros de escala r_n son todos menores que uno, entonces hay un conjunto de atracción G único con las propiedades deseadas[15]. Además, el atractor G se convierte en fractal a medida que la magnitud de los parámetros de escala aumenta hacia uno[15].

Por su parte, este modelo en vez de utilizar ecuaciones diferenciales parciales que describen la dinámica, estudia la evolución en el espacio de los parámetros geométricos del modelo Aproximación Fractal Multifractal (FM). En el caso de la figura 4 y la figura 5 [13], se muestran dichas evoluciones en el tiempo de estos patrones, correspondientes en este ejemplo: a las intensidades de la lluvia y concentraciones de contaminantes en un medio poroso, respectivamente; Los patrones obtenidos a través del modelo FM (las simulaciones varían en el sentido de las agujas del reloj) se deben a la variación de ocho parámetros, lo que detalla

que un cambio pequeño en un parámetro otorga una variación respecto del resultado final original, esto implica que debería ser capaz de codificar patrones cercanos (en el tiempo) por medio de combinaciones Fractales- Multifractales que tienen parámetros similares.



Figura 4. Evolución de intensidades de la precipitación.[14].

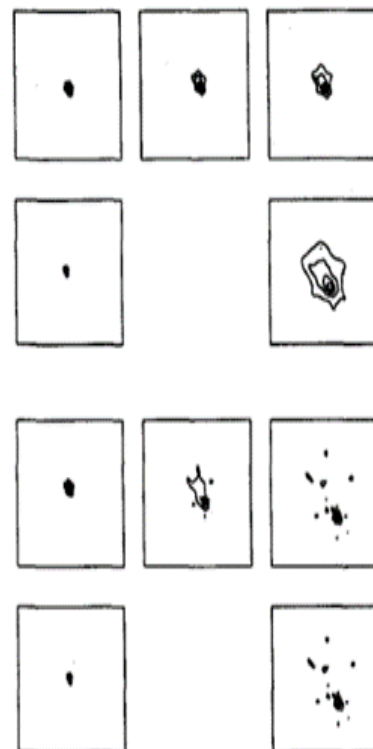


Figura 5. Concentraciones de contaminantes en medios porosos.[14].

Siendo así los parámetros que dan una descripción del modelo Fractal Multifractal (FM) que deben especificarse para una iteración son [13]:

- Las cantidades que dictan cómo construir recursivamente la medida multifractal (parámetros de intermitencia).
- Los puntos por los cuales pasa la función de interpolación fractal (Parámetros de localización).

- Las secuencias de altibajos y su magnitud (parámetros de regularidad z_n, dn, rn, θ_n).

3.4.1 Medida Multifractal (Parámetro intermitencia)

Cada vez se identifican más medidas fractales como modelos relevantes de fenómenos físicos, especialmente en circunstancias relacionadas con la turbulencia [13]. Siendo el multifractal entendido como la representación de un objeto geométrico en términos de subconjuntos fractales entrelazados y tiene diferentes secuencias de altibajos y magnitudes[16].

Una medida multifractal puede ser descrita por un proceso multiplicativo binomial de una (1D) dimensión este puede estar conformada por N celdas sobre un segmento de línea $S = [0,1]$ cada celda de longitud $\delta = 2^{-n}$ ($n = \text{numero de generación}$), tal que $N = 2^n$ celdas necesarias para rellenar el segmento de línea S [16], cada celda perteneciente a la generación está marcada con los índices $i = 0, 1, 2, \dots, N$.

La distribución sobre la línea es especificada en la resolución δ , por el número Ni de cada celda en la i -ésima celda. La fracción total $\mu_i = Ni/N$ es una medida conveniente para el contenido de la celda i . El conjunto M da una completa descripción de la distribución de la medida $\mu_i = Ni/N$ en la resolución δ .

$$M = \{\mu_i\}_{i=0}^{N-1}$$

A manera de ejemplo en la construcción de un proceso multiplicativo binomial donde p es igual 0.3, en un intervalo unitario $S = [0,1]$, en este proceso primero se divide S en dos partes iguales de longitud $\delta = 2^{-1}$. A la mitad de la izquierda le es dada una fracción p de la población de tal forma que éste segmento tiene una medida $u_0 = p$ al segmento de la derecha le es dada la fracción restante para tener una medida $u_1 = 1 - p$. Incrementando la resolución hasta $\delta = 2^{-2}$, el proceso multiplicativo divide los segmentos de la primera generación en la misma forma como anteriormente se procedió, de esta forma cada generación con su conjunto M se representaría:

$$M_1 = \{\mu_i\}_{i=0}^{2^{-1}-1} = u_0 u_0, u_1 u_1$$

$$M_2 = \{\mu_i\}_{i=0}^{2^{-2}-1} = u_0 u_0, u_0 u_1, u_1 u_0, u_1 u_1$$

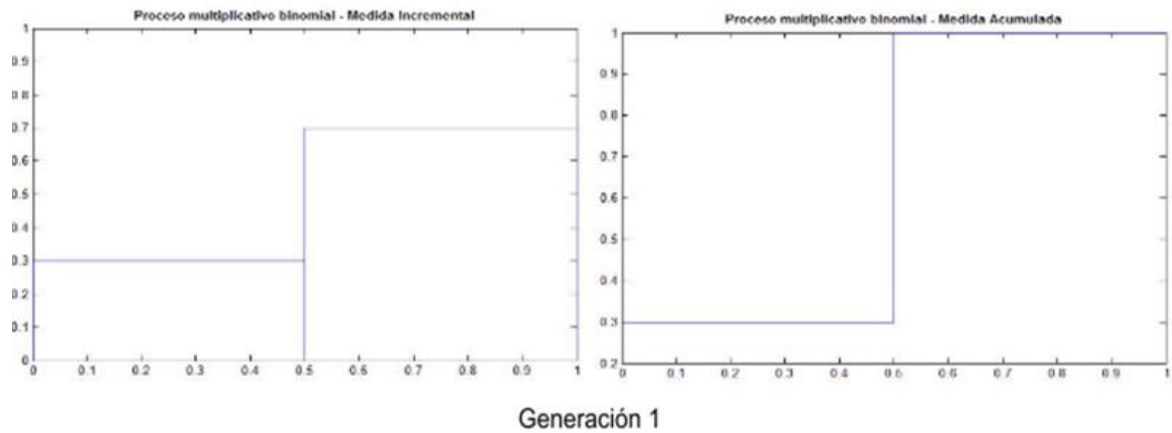
$$M_3 = \{\mu_i\}_{i=0}^{2^{-3}-1} = \begin{cases} u_0 u_0 u_0, u_0 u_0 u_1, u_0 u_1 u_0, u_0 u_1 u_1 \\ u_1 u_0 u_0, u_1 u_0 u_1, u_1 u_1 u_0, u_1 u_1 u_1 \end{cases}$$

Al ser un proceso iterativo, un número mayor de generaciones lleva a segmentos más cortos con mediada menor. De esta forma podría ser generalizada la medida multifractal y la longitud de la n-ésima celda por [16]:

$$M(x) = \sum_{i=0}^{x*2^N} \mu_i$$

$$u_i = u_0^k u_1^{(n-k)}$$

Donde k es el número de ceros en la representación de la fracción binaria del número $x = i/2^n$.



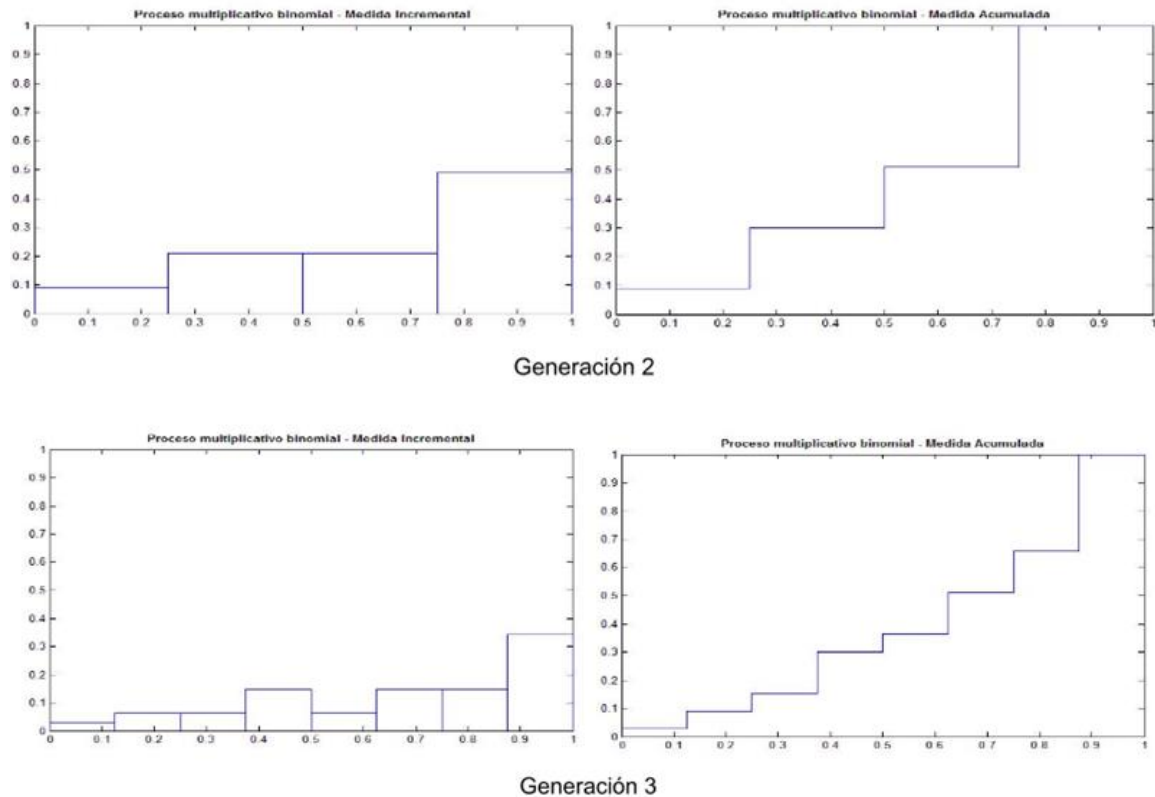


Figura 6. Construcción de un proceso multiplicativo binomial. A la izquierda, se observa la medida incremental del conjunto $\mu(x)$ y a la derecha, la medida acumulada $M(x)$ del mismo con parámetro $p = 0.3$. [16].

3.4.2 Parámetros Localización & Parámetros de regularidad

La figura 7 muestra un ejemplo de la noción para una función fractal que interpola tres puntos ($n=0$) $\{(0,0), (1/2,1), (1,0)\}$ y con un parámetro real Z tal que $0 \leq Z < 1$, pudiéndose entender este como las medidas que se definen en el rango (eje y) cambian con este parámetro Z , en la generación $n=1$ (Fig 7), se dibujan dos líneas entre los puntos de interpolación ($n=0$) partiendo de la mitad de cada segmento del conjunto original de esta forma quedan dos nuevos puntos medios (hacia arriba y hacia abajo) y la distancia vertical tiene la estrecha relación del valor de Z . en la generación $n=2$ uniendo los nuevos puntos generados por $n=1$ se obtienen 4 nuevos segmentos de menor tamaño, así se localizan nuevamente los puntos

medios a cada segmento ahora con una distancia vertical Z^2 , en el momento que estas iteraciones tienden al infinito se adicionan en la n -ésima generación 2^n puntos medios con desplazamientos verticales de magnitud Z^n .

La dirección de los altibajos verticales (hacia arriba o hacia abajo) en la generación n son aquellos creados en la generación $n-1$ para la primera mitad y el reciproco de estos para la segunda mitad para un ejemplo en la tercera generación se tiene cuatro movimientos: $\{\uparrow \downarrow \downarrow \uparrow\}$ y por ende en la cuarta generación se tendrá ocho movimientos tales como: $\{\uparrow \downarrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \downarrow\}$.

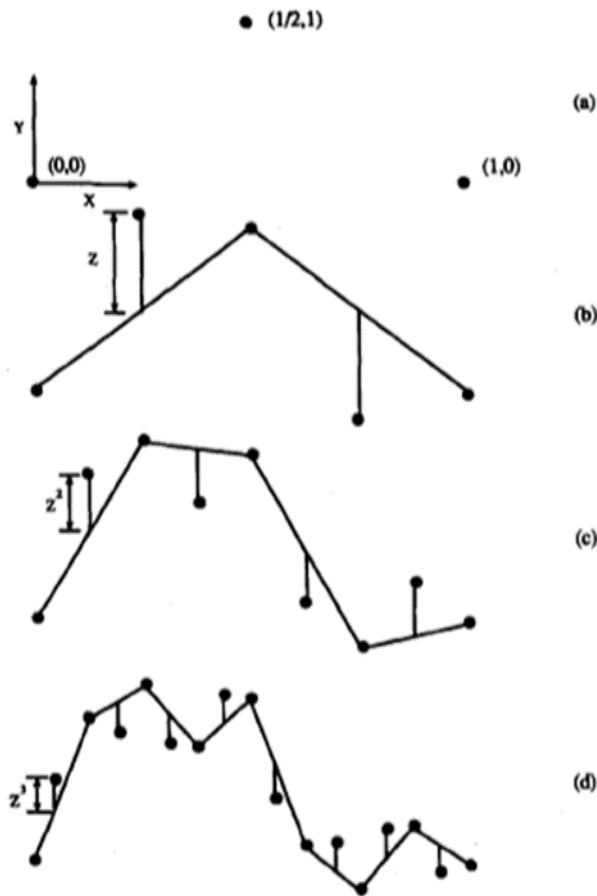


Figura 7. Construcción de una función de interpolación fractal que pasa por los puntos $(0,0)$, $(0,1/2)$ y $(1,0)$. [16].

3.4.3 Modelo de Optimización

Para la calibración del modelo, se emplea el algoritmo de búsqueda Particle Swarm Optimization[17] (en adelante PSO), el cual consiste en una técnica estocástica fundamentada en el movimiento de partículas inspirado por el comportamiento natural de poblaciones que simula un conjunto de enjambres, este concepto bioinspirado puede ser usado para la solución de problemas complejos de optimización[18].

3.4.4 Función Objetivo

Una parte también relevante que ayuda al modelo FM a aproximarse en una nube de puntos para lograr la simulación, aun cuando carece de un sentido físico que lo argumente, son el conjunto de parámetros como los mencionados en el apartado anterior, los cuales van a ir modificando bajo proceso iterativo el resultado final. Sin embargo, debe de adicionarse una sección que permita obtener un rango de tolerancia dentro del cual se logre dicha aproximación bajo un concepto establecido como “aceptable” previamente definido por el usuario.

Es precisamente por medio de la función objetivo donde el modelo logra adquirir esta característica, para de manera general comparar valores simulados respecto de los observados. No obstante, autores que han venido trabajando este tipo de algoritmos incluidos al modelo FM sugieren la necesidad de versiones sofisticadas de este concepto[16].

4 METODOLOGÍA

A continuación, se expone el conjunto de procedimientos empleados a lo largo del proyecto:

4.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Construcción del estado del arte, por medio de una revisión sistemática de la información que abarque tópicos que guíen hacia una organización correcta de los datos y su representación, al igual que la implementación de una técnica de descomposición espectral para registros de Temperatura Superficial del Océano y que finalmente, permita la exploración del modelo de Aproximación Fractal-

Multifractal, examinando avances realizados en revistas internacionales, artículos indexados, libros, proyectos de grado y tesis de autores destacados como Carlos E. Puente, Víctor M Peñaranda, German Poveda, Oscar Mesa, Michael Barnsley, entre otros.

Esta recopilación de archivos de datos en formatos NETCDF, deben contener registros referentes a la Temperatura Superficial del Océano extraídos de alguno de los siguientes bancos de información: Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno el Niño (CIIFEN), Organización Meteorológica Mundial (OMM), Centro Climáticos Mundiales (NOAA, ECMWF), Centro Nacional de Investigación Atmosféricas (NCAR), entre otros. Este tipo de entidades tienden a albergar y brindar acceso a archivos con datos oceánicos, atmosféricos y geofísicos completos, que van desde los registros de núcleos de hielo de millones de años de antigüedad hasta imágenes satelitales en tiempo real.

4.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA Y GEOMÉTRICA DE LOS DATOS

La reorganización de los datos del inciso anterior, fue necesaria debido al modo en el cual fueron encontrados originalmente, estos hacen referencia a valores producto de la reanálisis y de igual manera, series estructuradas bajo una frecuencia diaria, distribuidas en 4 lecturas desde las 00:00 horas hasta las 16:00 horas. En consecuencia, se contempló alguna metodología para visualizar el ENOS en toda su escala temporal.

Inicialmente se obtuvo mediante la representación gráfica de la TSO en función de tiempo y posteriormente describiendo la evolución espacio temporal de la siguiente manera:

La temperatura mensual, se desarrolla con los promedios de los registros diarios de TSO de cada día, para finalmente obtener 12 matrices mensuales por cada año de registro. Siguiendo lo anterior, se realiza la construcción gráfica del ciclo anual partiendo de los 39 valores medios de cada mes. Esto permite posteriormente el cálculo de anomalías, ya que facilita visualizar la varianza de la variable de estudio a través del tiempo.

Finalmente se presentan los datos empleando diagramas Hovmöller, los cuales se caracterizan por representar en una sola imagen (matriz): el espacio, el tiempo y una variable dependiente seleccionada (TSO).

4.3 IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA DESCOMPOSICIÓN VALORES SINGULARES

El desarrollo del apartado anterior puede representar una serie de eventos físicos y meteorológicos combinados, sin embargo, para una mejor búsqueda e identificación del ENOS, se emplea la metodología corresponde a la Descomposición Espectral mediante descomposición en valores singulares, bajo la cual se tantean los diversos modos de variabilidad que permiten su representación según los vectores propios seleccionados.

4.4 CONEXIÓN DE RESULTADOS OBSERVADO/SIMULADO

Exploración del modelo geométrico Aproximación Fractal Multifractal (FM), en busca de un modelo geométrico más acorde con los registros físicos, partiendo de los datos de entrada que se han obtenido a partir de los diagramas Hovmöller espacio –temporales, esto permitirá comparar los patrones observados y los obtenidos por el modelo FM gracias al empleo de un algoritmo de búsqueda, cabe destacar que esto podría llegar a otorgar un modelo iterativo mucho más eficiente, de modo que la evolución de los parámetros geométricos FM, representen la dinámica del fenómeno ENOS y permitan comprender la complejidad de la misma en el tiempo y el espacio.

Dentro de lo anterior, se incluye el desarrollo de un algoritmo debidamente programado y ejecutado por autores como Carlos Puente, ML Maskey entre otros, en Matlab r2018a, que servirá de conexión entre los datos resultantes del proceso de filtrado y la técnica FM, donde desde la fase exploratoria se conseguirán pasos importantes para posibilitar las aplicaciones en modelación hidrometeorológica.

5 ALCANCE DEL PROYECTO

En lo que respecta al fenómeno de estudio, este puede distinguirse entre sus causas y efectos por separado, logrando así, entender el proceso en el que se busca enfocar la metodología y el posterior análisis de resultados.

Por una parte, tenemos los datos de la temperatura superficial del Océano Pacífico que, producto de un cambio en la presión atmosférica de esta misma región, termina desenlazando el patrón climático conocido como El Niño-Oscilación Sur (ENOS), con sus respectivas fases: El Niño o La Niña, dependiendo de las tendencias descritas por estos parámetros.

Por otra parte, nos encontramos con las consecuencias de dichas fases meteorológicas en nuestra región, donde, por ejemplo, para el caso de Colombia El Niño se muestra como la disminución de las lluvias y, por ende, de los caudales medios de los ríos, siendo su contraparte (La Niña) caracterizada por un escenario contrario.

Sabiendo lo anterior, se distinguen varias posibilidades para el procesamiento de datos, ya que, dependiendo de la variable elegida para modelación, se puede estar hablando ya sea de las causas o los efectos del ENOS; para este proyecto en particular la generación de imágenes sintéticas (simuladas por el algoritmo FM) por medio de algoritmos computacionales, va a ser resultado de un histórico referente a las anomalías de la variable Temperatura Superficial del Océano, por lo que el énfasis es únicamente aquel que puede llegar a describir una de las causas del fenómeno, misma razón por la que el espacio al que pertenecen estos registros es específicamente, el Océano Pacífico, pues es donde tiene lugar esta anomalía climatológica.

Sin embargo, la extensión del océano puede llegar a ser lo suficiente amplia para abarcar tanto las anomalías mencionadas anteriormente, como otras zonas no relevantes o donde no se describe este fenómeno en particular, por lo que se hace necesario delimitar espacialmente los datos a procesar, buscando aquellos comprendidos entre coordenadas geográficas $[10^{\circ}\text{N} - 10^{\circ}\text{S} \ 160^{\circ}\text{E} - 110^{\circ}\text{W}]$, ya que

si bien dentro de los objetivos de este trabajo se encuentra incluido el tratamiento estadístico (antes de entrar al modelo de aproximación), su finalidad es diferente a la de aquellos métodos de normalizado de datos, caso similar ocurre al método de completado de series con registros faltantes, que no serán objeto de esta investigación.

6 ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se expone el camino conducente a la toma de información y su correspondiente análisis de la variable de estudio (TSO) empleando las metodologías descritas que siguen el siguiente orden: reajustar la organización de los datos encontrados, representar la variable de estudio en su escala temporal y espaciotemporal, continuando con el uso de técnicas estadísticas avanzadas que toman como base la matriz de conformación (resultado de los diagramas bidireccionales Hovmöller) y finaliza, con la proposición de un modelo geométrico determinista en busca la conexión con el fenómeno en estudio.

6.1 FUENTE, TIPO Y RESOLUCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Los datos empleados en la investigación pertenecen a mediciones de Temperatura Superficial del Océano, los cuales fueron tomados del Centro Europeo para Pronóstico Meteorológico de Mediano Alcance, con sus siglas en inglés (ECMWF), instituto de investigación y servicio operativo que provee predicciones numéricas globales del clima y otros datos para la comunidad en general, dicho centro cuenta con una de las mayores instalaciones de supercomputadoras y archivos de datos meteorológicos del mundo.

Por su parte, la información es un conjunto de datos allí encontrado, son el resultado de reanálisis empleado por el ECMWF mediante sus modelos de pronóstico y sistemas de asimilación de datos para procesar observaciones archivadas, creando conjuntos de datos globales que describen la historia reciente de la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos.

La descarga de los archivos en formato NETCDF se realizó manualmente y en orden cronológico desde la página web; desde allí se pide especificar año, mes,

numero de toma de datos/día, la variable temperatura superficial del océano (TSO), área (Pacífico Tropical) y el espacio de cuadrícula o grilla ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$) para su descarga.

Por su parte, el periodo de estudio seleccionado comprende 39 años de registros a una resolución de 6 horas (lecturas a las 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00), iniciando en enero 01 del año 1979 hasta el 31 de diciembre del año 2017. En coordenadas geográficas la variable TSO se enmarca entre las latitudes (10°N a 10°S) y en las longitudes (160°E a 100°W) delimitación geográfica que corresponde al Pacífico Ecuatorial. La resolución espacial es de 0.125° . En la figura 8 se muestra el área geográfica en la que se ha hecho la toma de datos histórica para la variable oceánica.

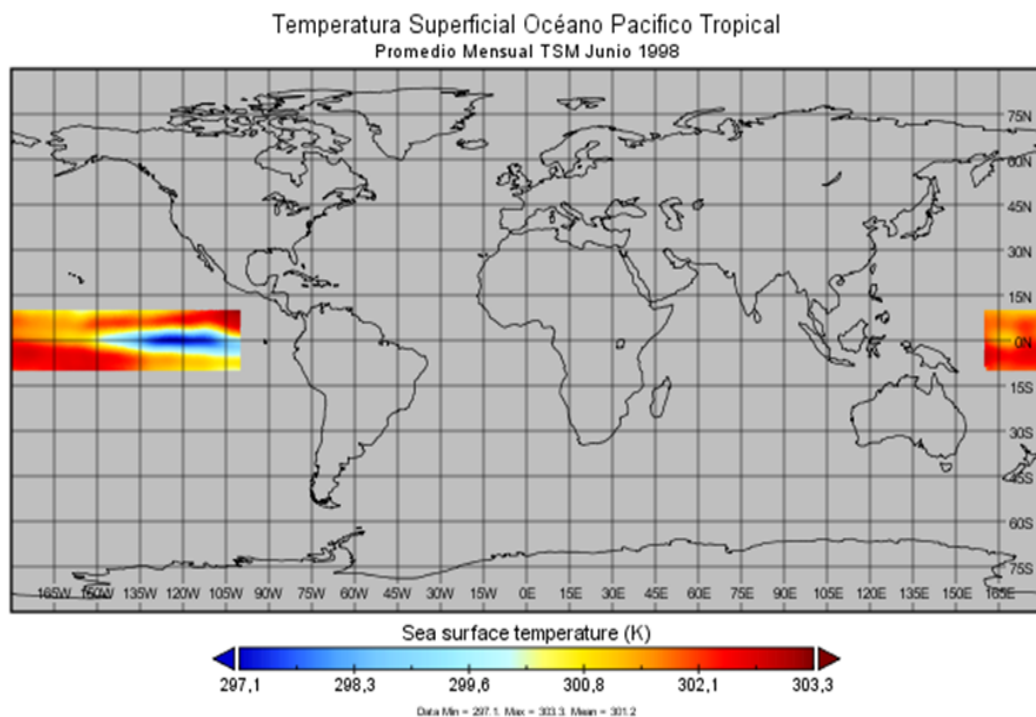


Figura 8. Representación gráfica del espacio geográfico donde se encuentra el registro histórico de la variable TSO.

Al final, la variable espacio-temporal TSO medida en M ubicaciones (espacial) y N veces (tiempo), puede ser descrita como una matriz base de datos ($M \times N$) cuyo

elemento (i, j) se refiere a la primera dimensión como ubicación y la segunda como tiempo, es decir, estadísticamente la información obtenida debe estructurarse para que en una dirección se represente el tiempo y en la otra la posición espacial, geoméricamente el objetivo es capturar cuantitativamente la mayor parte de la variabilidad en los datos como se muestra en la Figura 9.

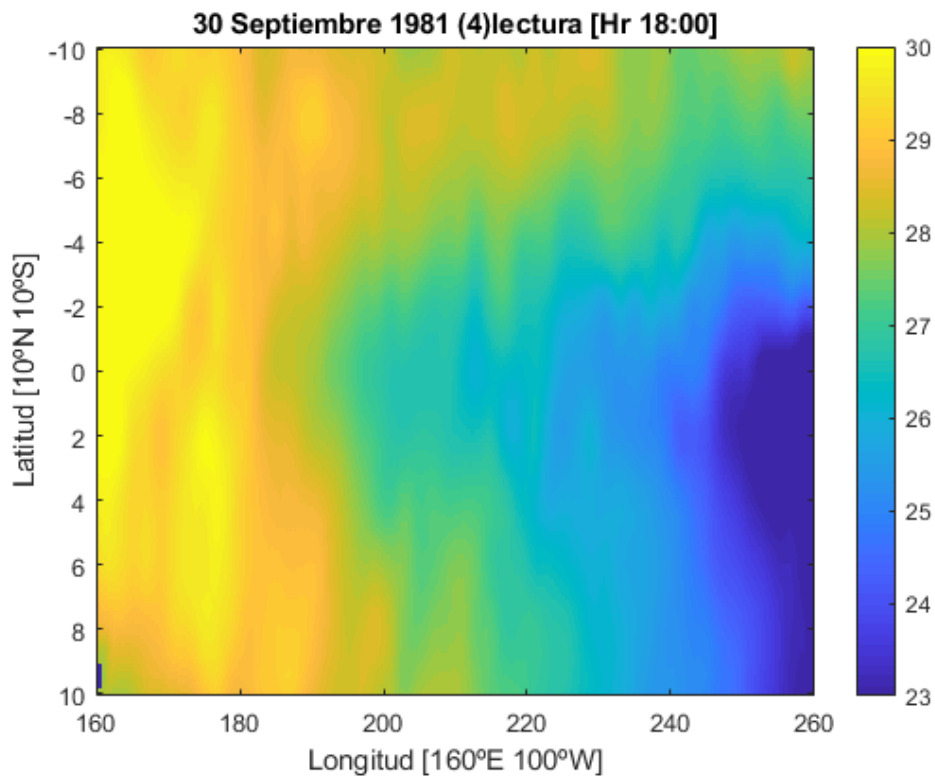


Figura 9. Lectura horaria de la Temperatura superficial del Océano mensual en °C del día 30 septiembre 1981, a partir de la construcción y organización de la información obtenida del ECMWF.

6.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA Y GEOMETRICA DE LOS DATOS

6.2.1 En función de la variable tiempo

6.2.1.1 *Representación de registros mensuales de la TSO*

Inicialmente la variable TSO corresponden a valores de reanálisis del Pacífico Tropical a través del sistema operativo OCEAN5, este proporciona una estimación del estado histórico del océano desde 1979 hasta el 2017 y un componente en tiempo real (RT), que proporciona las condiciones oceánicas más recientes para aplicaciones en diferentes campos de la ingeniería, oceanografía y meteorología; inicialmente los registros de cada mes están ordenados en un tamaño de matriz tridimensional (registros diarios), donde sus dos primeras dimensiones hacen referencias a la ubicación de cada registro, siendo la tercera dimensión el tiempo que enmarca el número de registros diarios tomados.

Para lograr estas representaciones mensuales se estimaron por medio de promedios en la tercera dimensión para el área comprendida del Pacífico Ecuatorial, al final la matriz "base" toma el tamaño: 161*801*468. A nivel general durante los 39 años el valor TSO mayor encontrado es 31.03°C y el menor valor 18.59°C registrado; el valor más frecuente registrado a lo largo de los años fue 25.84°, lo que se puede entender como la moda estadística.

Las figuras 10 y 11, su construcción hace parte del procesamiento de la información de la matriz "base" tridimensional ya mencionada, mediante el desarrollo de líneas de código y funciones que ha llevado a constatar el comportamiento de la temperatura superficial en el océano pacífico, la cual podemos comparar con fechas de los acontecimientos El Niño y La Niña, con frecuencia importantes en América del Sur.

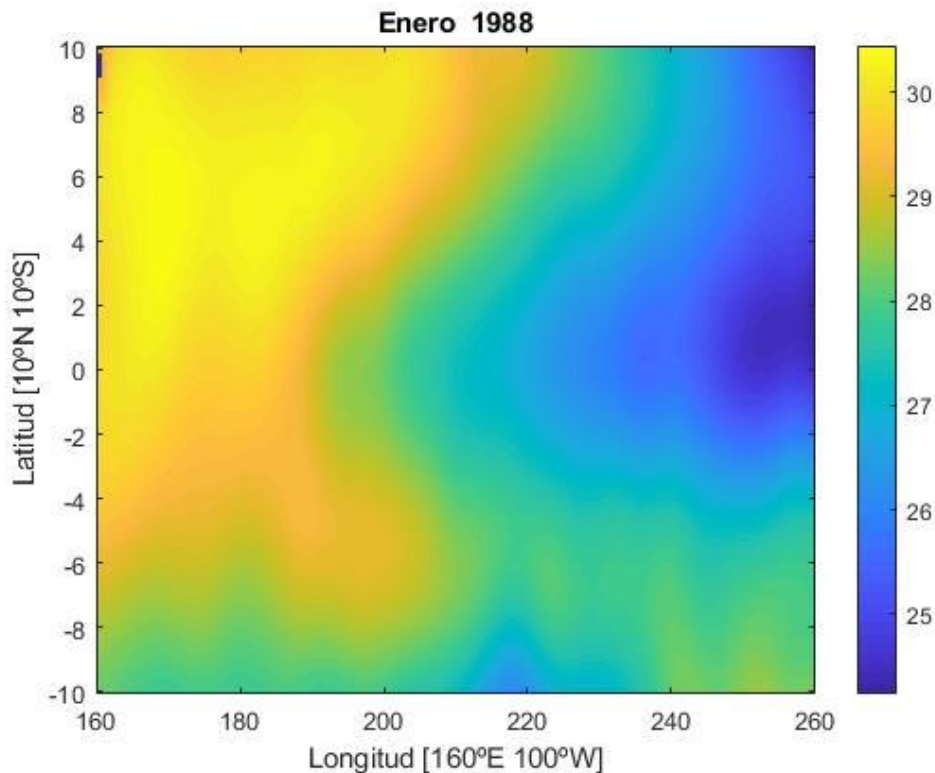


Figura 10. Representación enero 1988 fase fría en la costa sur América por debajo del promedio, a lo que se refiere La Niña.

En
la

figura 10, El fenómeno La Niña produce un cambio en las aguas costeras del Océano Pacífico Colombiano, que usualmente tiene temperaturas entre 26 y 28°C, por condiciones oceánicas de aguas más frías. La temperatura de la superficie del océano en el Océano Pacífico Colombiano presenta descensos importantes en épocas de fenómenos La Niña. Las anomalías de la temperatura superficial del océano, en amplias áreas del sur del Pacífico Colombiano, pueden alcanzar entre 1 y 1.5°C por debajo de lo normal[2].

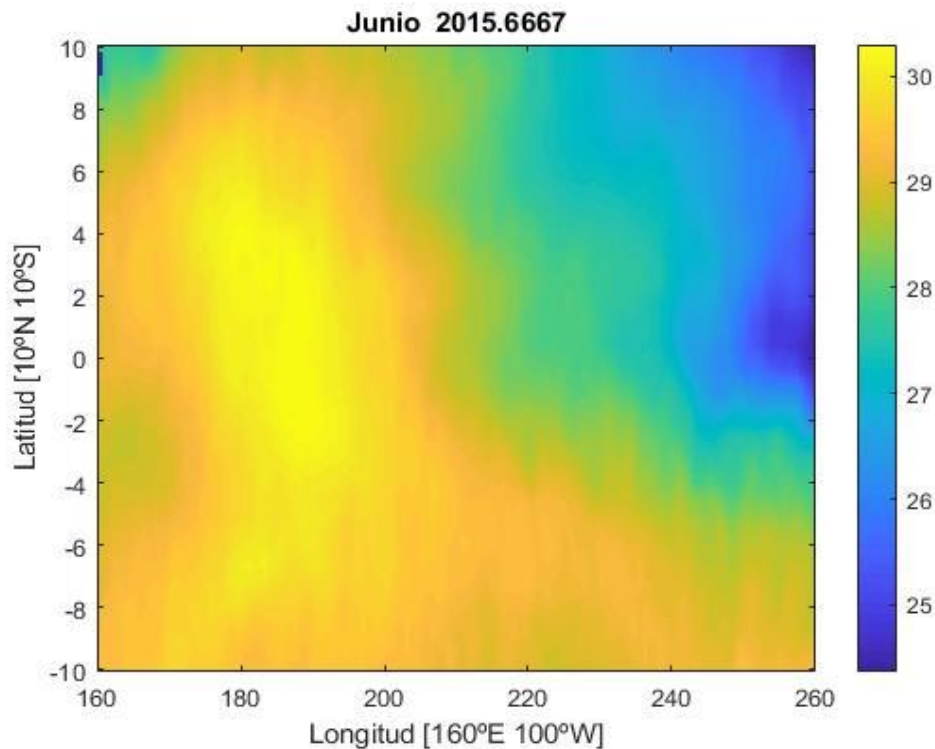


Figura 11. Representación junio 2015 aumento considerable (este) de la TSO, lo cual se refiere a la fase cálida ó El Niño.

En la figura 11, la mancha cálida que se desplaza desde indonesia y Australia producto del debilitamiento de los vientos alisios llegando a Suramérica aguas cálidas del Pacífico y desplazan las aguas frías de la corriente de Humboldt.

6.2.1.2 Representación del ciclo anual de la TSO

Los registros mensuales(°C) sirven para estimar las variaciones que se presentan en la variable Temperatura Superficial del Océano de año en año a lo que se refiere ciclo anual. Para lograr este apartado dentro de las líneas de programación se logró concatenar para cada mes del año un total de (39) matrices, por dar un ejemplo, se extrajeron los (39) eneros en concordancia con los años de registro, a posteriori se logró hallar una única matriz que representa el mes Enero promedio de los años de

registro, finalmente esta matriz representa el enero del ciclo anual presentado en la figura 16.

6.2.1.3 Representación de Anomalías de la TSO

La anomalía de temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) se definió como la matriz del ciclo anual de cada mes, menos la media mensual del mismo mes analizado, al final se obtiene 39 gráficas de anomalías anuales que representan la variación respecto a la media y como es el comportamiento en el tiempo de la variable en estudio. (Ver anexo 1)

Como método de análisis y verificación del correcto manejo y transformación del registro histórico obtenidos, se tomará como referencia el índice Oceánico del Niño (ONI), el cual puede entenderse como una medida de la condición de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y sus fases cálidas (El Niño) y fría (La Niña) en el Pacífico ecuatorial central. Es el promedio móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del océano, estimadas a partir del producto ERSST.v5 SST en la región Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120° - 170°W).

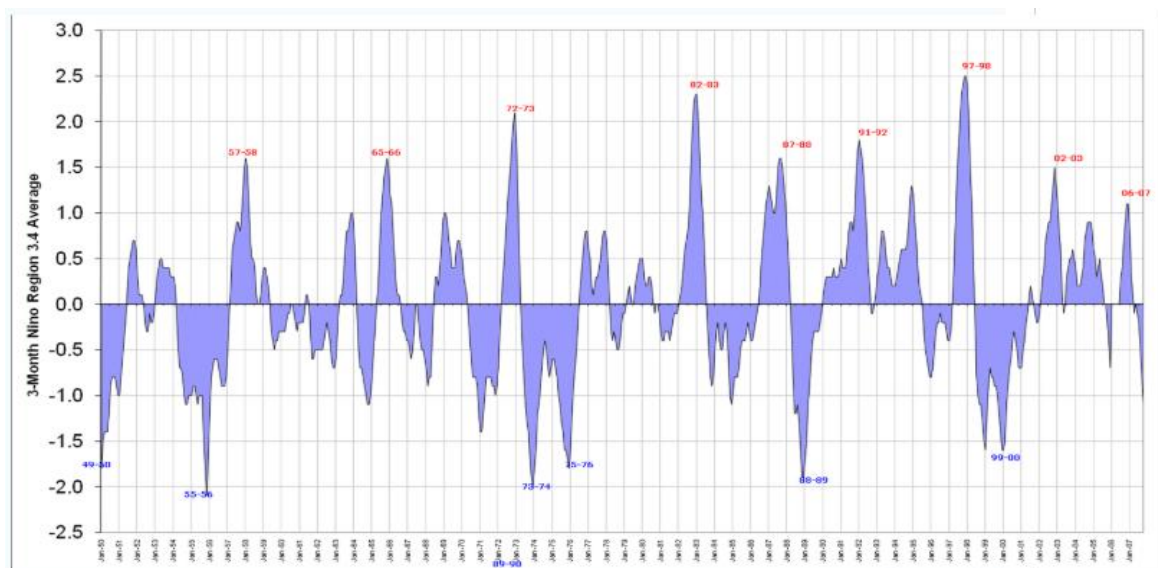


Figura 12. Representación del Índice Oceánico del Niño (ONI) desde Enero 1950 – hasta 2017, el cual se calcula como la media de 3 meses consecutivos de las anomalías de la temperatura superficial del océano medidas por el sensor ERSST.v3 en la región 3.4 del Niño. [19].

6.2.2 En función de las variables espacio-temporales

6.2.2.1 Diagramas Hovmöller

Se ha realizado diversos ajustes para llegar a la identificación del fenómeno de estudio utilizando los promedios mensuales en 2 direcciones: longitudinal y latitudinal, así se construyó el mapa Temperatura superficial del Océano, donde se utilizan diagramas latitud vs tiempo y longitud vs tiempo (diagramas Hovmöller) para representar la variabilidad temporal y espacial de la variable en estudio, en el área geográfica del pacifico tropical.

Los diagramas evolutivos Hovmöller bidireccionales presentan registros de temperatura superficial del Océano a lo largo de la región del Pacifico Tropical de datos generados mediante reanálisis por el ECMWF.

En estos diagramas Hovmöller se puede observar otros fenómenos que se relacionan con la variación de temperatura, como Oscilación de Madden - Julian que se caracteriza por anomalías en convección y vientos tropicales a escalas de tiempo intraestacionales entre 30 y 60 días[20], Sin embargo, existen otras características para el estudio del fenómeno ENOS, como la velocidad del viento, la presión atmosférica e índices desarrollados por centros de investigación meteorológicos.

En la primera etapa de la construcción del diagrama Hovmöller se enmarcan datos de anomalías sobre un área muy similar al descrito en los apartados anteriores, en la figura 13 se presenta la configuración Hovmöller obtenida.

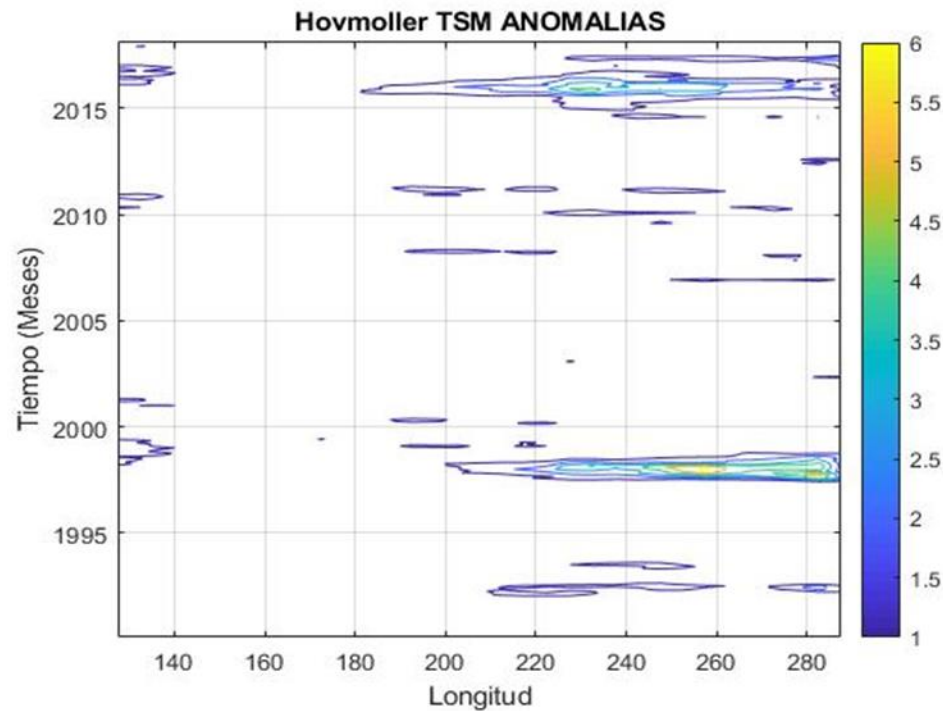


Figura 13. Diagrama Hovmöller Anomalías espacio de cuadrícula 5° con un registro 39 años.[21].

En la figura 13, el tamaño de la cuadrícula usado es de 5° en su descripción física muestran dos eventos históricos con una frecuencia fuerte para los años 1997-1998 para el fenómeno El Niño y 2015-2016 para el fenómeno La Niña, de aquí, es necesario obtener información con una grilla de menor tamaño y así poder identificar el componente oceánico del ENOS en épocas de ocurrencias al largo de los años. Al final, en pro de la correcta identificación de eventos ENOS, se desarrollan diagramas Hovmöller (figura19 – figura 20), para poder identificar la evolución del fenómeno en el espacio y tiempo para el registro de 39 años de la variable TSO en (°C).

6.3 DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL: MÉTODO DE FILTRADO PARA HOVMÖLLER

El objetivo del desarrollo mediante la descomposición de valores singulares (DVS) para este caso en particular, es poder utilizar las dos matrices obtenidas en los diagramas Hovmöller bidireccionales y extraer la información que contienen para

lograr identificar fenómenos físicos asociados al fenómeno El Niño Oscilación Sur. A continuación, se presentan los cinco primeros modos de variabilidad en cada dirección donde las columnas de la matriz U dan patrones espaciales, las columnas de V dan las series de tiempo correspondientes.

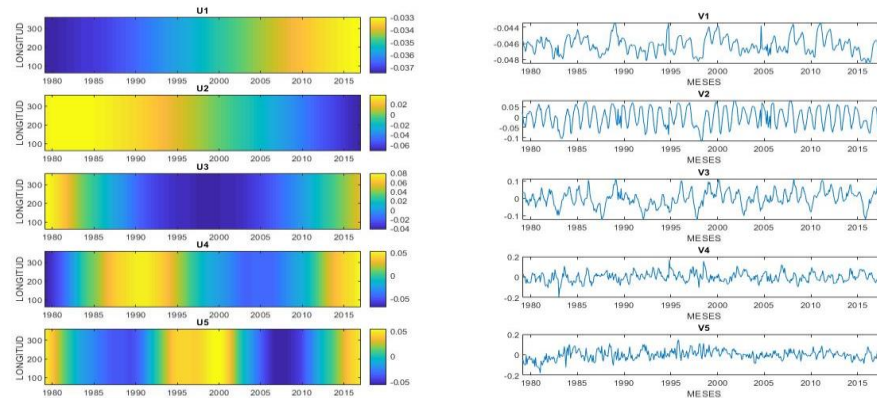


Figura 14. Representación primeros modos de variabilidad longitudinal resultado de la Descomposición en Valores Singulares.

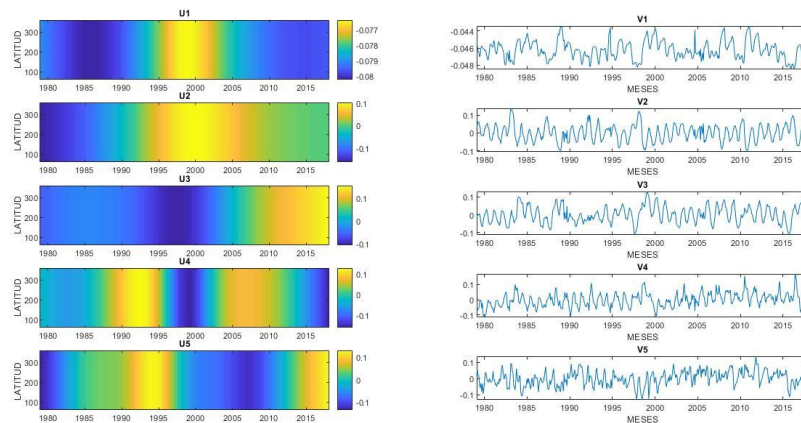


Figura 15. Representación primeros modos de variabilidad latitudinal resultado de la Descomposición en Valores Singulares.

Al seleccionar las primeras 5 columnas de U en los dos sentidos: longitudinal - latitudinal siendo los componentes principales más importante de los datos[22], se reduce la dimensión de los datos, al tiempo que se conserva una cantidad significativa de la varianza de los datos, tras la inspección, los mapas en las zonas de calor muestran ligeras variaciones en los centros durante diferentes épocas de los años. Esto corresponde con las variaciones en la temperatura del océano y, en consecuencia, con otras facetas importantes de la climatología que varían según la época de los años.

6.4 MODELO FRACTAL – MULTIFRACTAL (FM)

El modelo FM para esta aplicación se desarrolla mediante el mejoramiento del código de programación (ya existente), trabajado por los autores Carlos Puente y **Mahesh Maskey**; es de resaltar que las modificaciones de las líneas de programación para este trabajo fueron elaboradas por este último autor con motivo de esta investigación.

Para implementar el modelo como método de representación del fenómeno y lograr la conexión con los resultados de las matrices de los diagramas espaciotemporales, se toma la matriz Hovmöller latitudinal, la cual será la parte “observada”. Por otro lado, el algoritmo programado busca mediante modelaciones computacionales controladas generar el patrón estudiado, que será la parte “simulada”.

Para lograr el objetivo se requiere jugar con una serie de (27) parámetros, cada uno de estos posee un significado matemático y así mismo un rango de búsqueda donde se encuentran los mejores resultados.

Tabla 2. Parámetros del Modelo Fractal-Multifractal en 2D dimensiones.

Parámetro	Significado	Espacio de Búsqueda
X_0, X_1, X_2, X_3	Coordenadas de la función de interpolación	[0 , 1]
Y_0, Y_1, Y_2, Y_3	Coordenadas de la función de interpolación	[0 , 1]
Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4	Coordenadas de la función de interpolación	[0 , 1]
P_1	Parámetro de intermitencia	[0 , 1]
Q_1	Parámetro de intermitencia	[0 , 1]
$R_1^{(1)}, R_1^{(2)}, R_1^{(3)}$	Parámetro de escalamiento	[0 , 1]
$T_1^{(1)}, T_1^{(2)}, T_1^{(3)}$	Ángulo de proyección	[0 , 1]
$R_2^{(1)}, R_2^{(2)}, R_2^{(3)}$	Parámetro de escalamiento	[0 , 1]
$T_2^{(1)}, T_2^{(2)}, T_2^{(3)}$	Ángulo de proyección	[0 , 1]

El problema de calibración trata de estimar el conjunto de parámetros óptimo de la aproximación FM, de tal forma que la diferencia entre los registros de temperatura normalizados reales y la medida generada por el modelo, esté dentro de un rango de tolerancia, la cual previamente, ha sido definida por el usuario. El problema de estimación del conjunto de parámetros óptimos requiere de la implementación de un algoritmo de calibración la cual incorpora una función objetivo por resolver.

6.4.1 Optimización por Enjambre de Partículas

Los algoritmos de búsqueda pretenden alejarse de mínimos locales para lograr encontrar mínimos globales que representen la solución adecuada al problema de calibración. El enjambre, en exploración del óptimo global de una función objetivo, inicialmente se presenta disperso por el espacio de sondeo, pero con el tiempo las partículas convergen hacia una zona reducida del espacio en donde incrementan la búsqueda de la mejor solución.

Esto anterior, sucede gracias a que cada partícula logra modificar su dirección, teniendo un historial de la mejor posición en el pasado y dependiendo a su vez de tres factores: su conocimiento del entorno, el barrido histórico y la experiencia con

los individuos (puntos) más cercanos. Adicionalmente, otra variable que influye en el funcionamiento del algoritmo, es la velocidad con la cual realiza los desplazamientos el punto o partícula, cambiada a medida que se cumplen las iteraciones.

Partiendo de lo anterior, la búsqueda del modelo PSO se compone matemáticamente de:

$$\overrightarrow{X}_i^d = [x_i^d, y_i^d, z_i^d, \dots]$$

Según esto, cada punto del enjambre define su posición según las coordenadas requeridas por cada dimensión de trabajo para un vector X en el instante d . Para lograr actualizar dicha ubicación resulta necesario definir la dirección y la rapidez del movimiento por medio del vector Velocidad, como se muestra a continuación:

$$\overrightarrow{V}_i^{d+1} = 2r_1\overrightarrow{V}_i^d + 2r_2(\overrightarrow{P}_i^d - \overrightarrow{X}_i^d) + 2r_3(\overrightarrow{G}^d - \overrightarrow{X}_i^d)$$

Este se encuentra definido por tres componentes: la velocidad actual, la mejor solución local y la mejor solución global, los cuales son utilizados para encontrar la distancia del punto del enjambre a la ubicación del mejor local P y mejor global G .

Con la velocidad para el instante siguiente, la posición en ese nuevo momento puede ser calculado como se muestra:

$$\overrightarrow{X}_i^{d+1} = \overrightarrow{X}_i^d + \overrightarrow{V}_i^{d+1}$$

La posición del instante siguiente, es entonces, el resultado de la ubicación actual sumado a la velocidad del instante consecutivo.

Por su parte, la función objetivo incluida en el algoritmo de búsqueda en este caso corresponde a la siguiente:

$$\min f(d, \theta) \therefore \theta \in S \text{ y } d = |DYZ_{sim} - DYZ_{obs}|$$

Donde,

$f(d, \theta)$: es la función objetivo.

d : es la distancia entre la serie simulada y la serie observada.

S : representa el rango factible de los parámetros de θ .

Siendo,

$$d = \frac{\text{centroide}(X,Y)_{sim} - \text{centroide}(X,Y)_{obs}}{\text{centroide}(X,Y)_{obs}}$$

Donde,

$(X,Y)_{obs}$: son las coordenadas del centroide de los datos de registro.

$(X,Y)_{sim}$: son las coordenadas del centroide DYZ .

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presenta el desarrollo práctico que permite dar cumplimiento a los objetivos planteados al inicio del proyecto, realizando la caracterización del fenómeno El Niño Oscilación Sur, a partir los resultados obtenidos de los procedimientos del capítulo anterior.

7.1 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA Y GEOMÉTRICA DE LOS DATOS

7.1.1 Ciclo Anual y Anomalías de la TSO

Según el registro histórico de datos, el ciclo anual de la TSO en el pacífico tropical (Figura 16) muestra una variabilidad consiste con la climatología y oceanografía de la región.

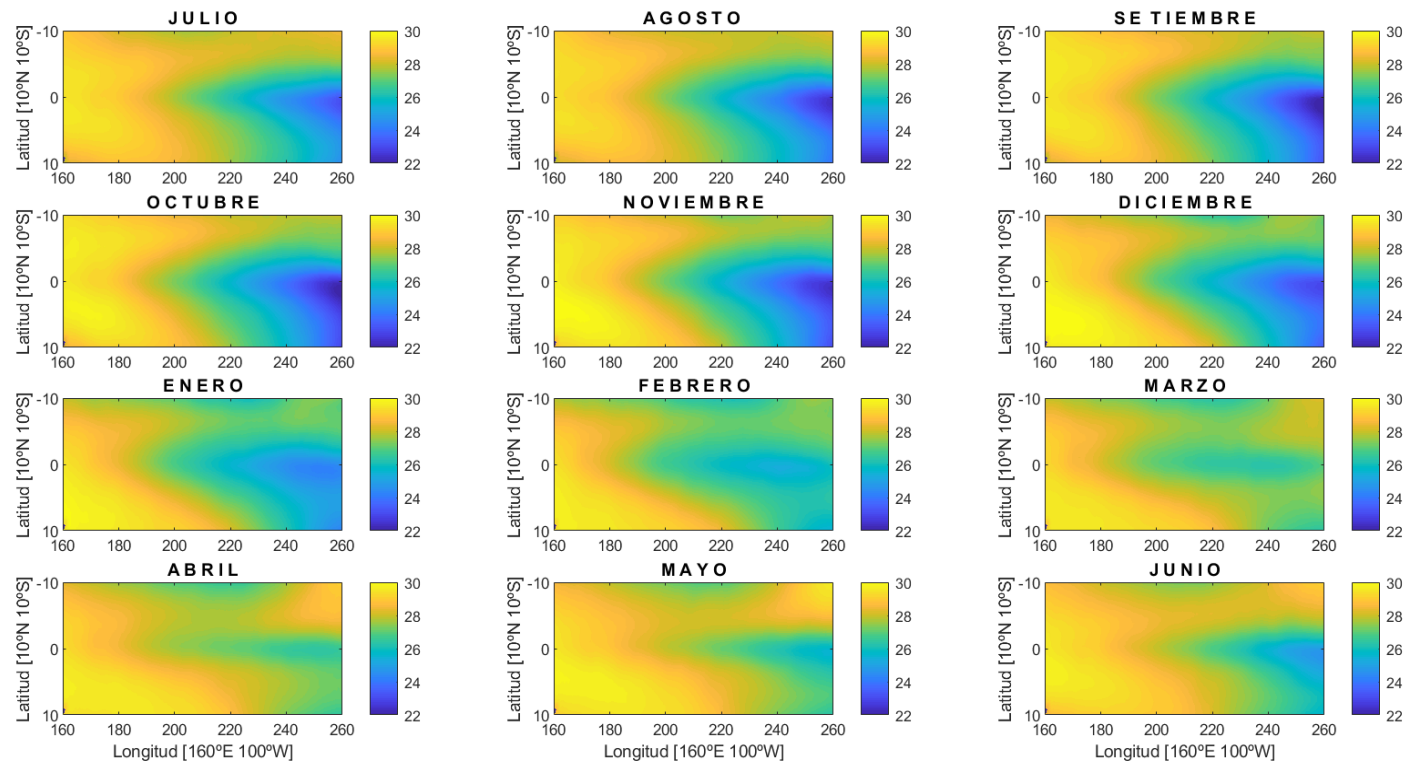


Figura 16. Ciclo medio anual de la serie de registro TSO entre 1979 y 2017, organizados en un rango de valores temperatura en grados Celsius que varían 22°C – 30°C.

El ciclo normal de la TSO en el océano pacifico se puede identificar en los meses julio hasta diciembre cuando parte del recorrido de los vientos alisios de mayor velocidad transitan sobre el océano pacifico tropical, desde las costas Suramericanas hacia el continente Asiático, haciendo el empuje de aguas superficiales cálidas con destino a las costas de Australia, Indonesia y Filipinas; Mientras tanto, del lado este el agua fría es empujada desde los fondos oceánicos con la corriente de Humboldt cerca de las costa de Suramérica

Los meses de enero – febrero podrían denotarse como una fase de transición entre el ciclo normal y un comportamiento cálido en la zona de estudio.

En los meses comprendidos de marzo a junio las aguas oceánicas superficiales son más cálidas a lo largo de la zona del pacifico ecuatorial es especial la zona Norte – Este (NE) la cual tiene una variabilidad espacial de la temperatura diferente a la zona Sur- Este (SE) con relación a las condiciones normales de temperatura del área en estudio.

Por otro lado, la **variabilidad interanual** de cada mes es observada mediante las anomalías calculadas a partir de la TSO en los 39 años de registro como se muestra en el anexo (1).

Las correlaciones entre el índice oceánico del Niño (ONI) y las anomalías de TSO, mostró en general las intensificaciones de las fluctuaciones en los años donde el índice oceánico relata la presencia historia de eventos cálidos y fríos.

Para dar un ejemplo se muestra la figura 17 y 18, la correlación entre el ONI y las anomalías de los años 1999 – 2000 indicaron exactamente la aparición de un evento frio la Niña. Partiendo que el índice oceánico está calculado en la región 3.4 del Niño ($5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ} - 170^{\circ}\text{W}$), se puede apreciar que el enero 1999 contiene una mancha de anomalías negativas a lo largo de la región central (210 -240 ubicación región 3.4 en las gráficas).

Esta mancha toma valores de anomalías por debajo a los ($- 0.5^{\circ}\text{C}$) del valor promedio, la cual se puede apreciar hasta mediados de abril del mismo año, en los

meses posteriores las aguas tienden a tomar sus valores de temperatura promedios hasta finales del 1999; A comienzo del 2000 y hasta abril del mismo año se registran anomalías negativas importantes las cuales se correlacionan con los picos que se muestran en la gráfica de la Figura 12 del ONI para la misma fecha.

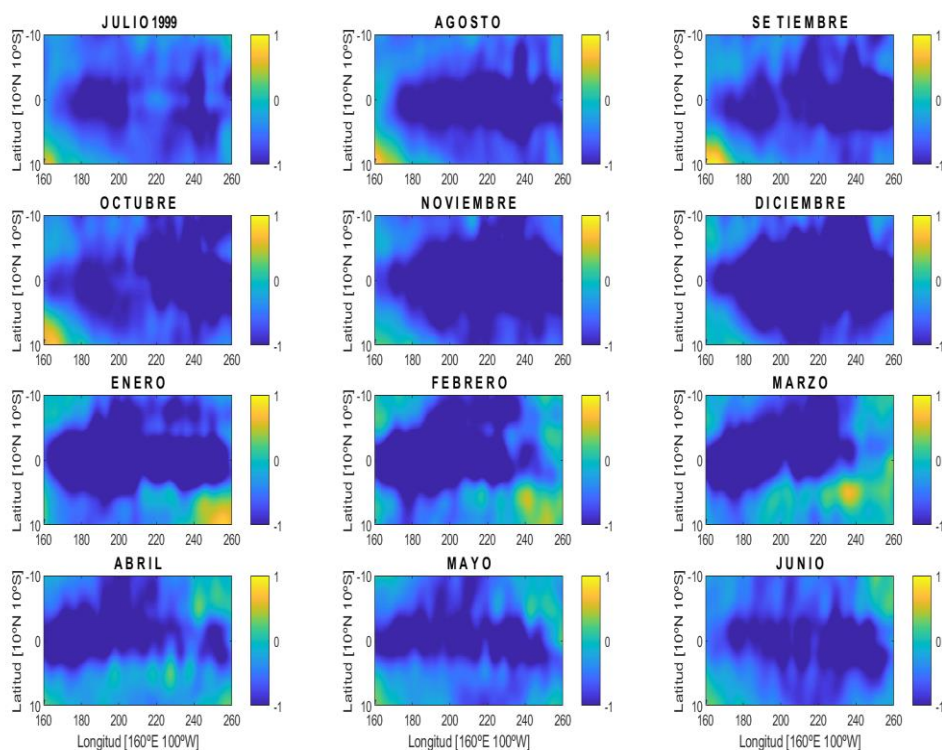


Figura 17. Anomalías TSO en °C para el año 1999.

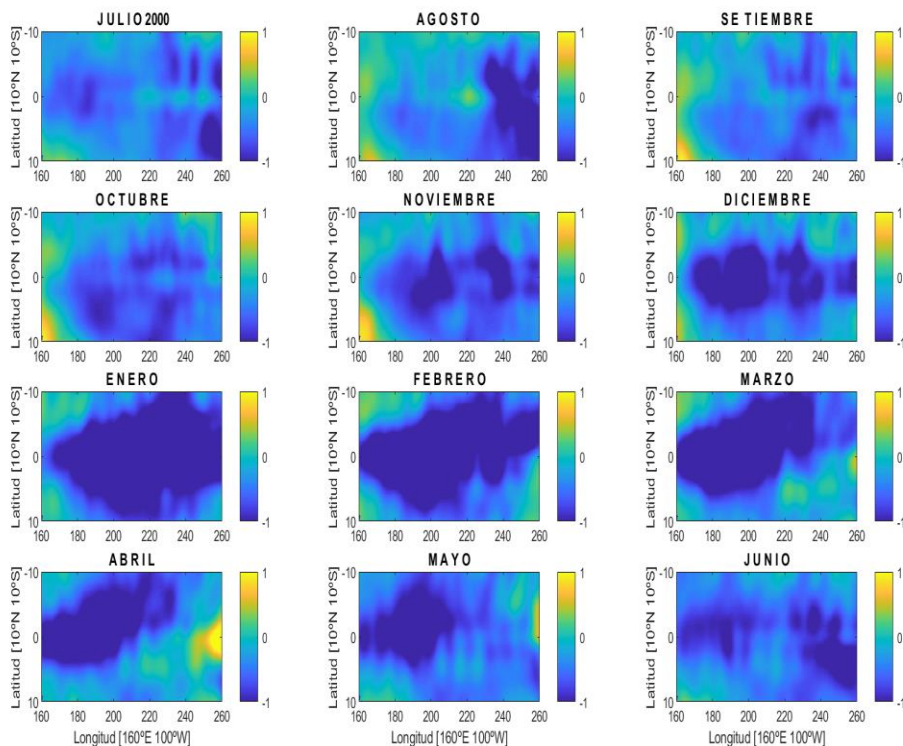


Figura 18. Anomalías TSO en °C para el año 2000.

7.1.2 Diagramas Hovmöller

Todo son señales, los cambios en las variables modifican el comportamiento en el continente, los científicos han analizado esto de diferentes formas, pero no han encontrado una opción de predecir esto; en esta investigación se analiza una variable del inconmensurable universo como un preámbulo para entender la evolución de la señal del fenómeno ENOS en sus dos etapas.

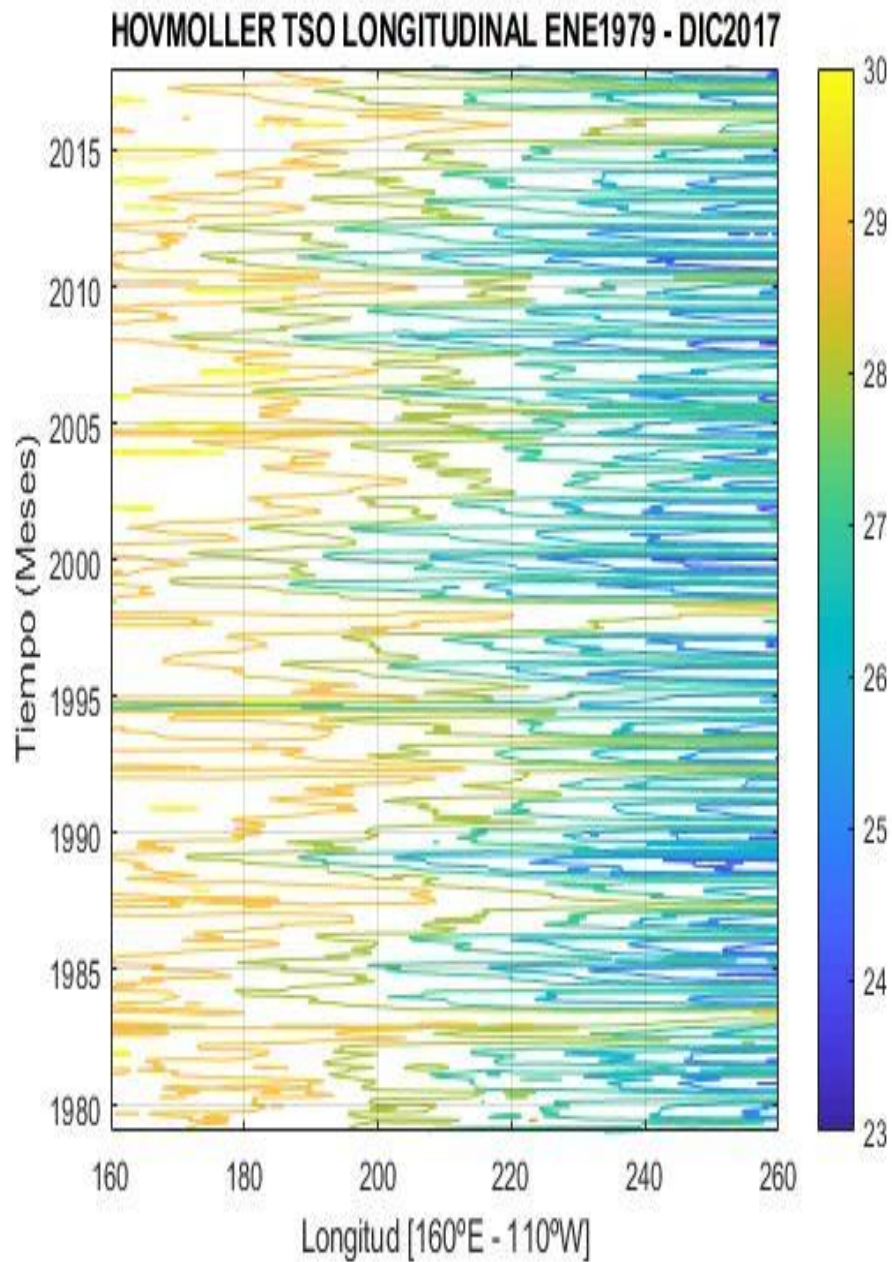


Figura 19. Diagrama Hovmöller en dirección longitudinal [160E – 110W] para registro histórico de 39 años TSO.

En el diagrama Longitudinal (figura 19), el fenómeno de El Niño especialmente con frecuencia fuerte está caracterizado por TSO caliente inusual en el océano Pacífico ecuatorial. Es una oscilación del sistema océano-atmósfera en el Pacífico tropical que tiene consecuencias importantes para el ambiente alrededor del mundo. Algunas de estas consecuencias son el aumento de pérdidas económicas y materiales por el incremento de lluvias, movimientos en masas e inundaciones, principalmente en Perú y las zonas bajas del ecuador, en Colombia el impacto predominante es la sequía, con mayores costos en la provisión de servicios básicos de electricidad y agua.

En el diagrama esas anomalías en el este con condiciones de El Niño fuerte, se producen debido a que los vientos alisios se relajan en la parte central y oeste del Pacífico debido a una diferencia negativa entre la presión atmosférica al nivel del océano en el oeste (Australia) y en el este (Chile). Con el debilitamiento de los vientos alisios se genera en el ecuador una onda Kelvin que se puede entender como un mecanismo eficaz para el transporte de energía en una dirección en particular, la cual se desplaza de la parte occidental del Pacífico hacia el oriente. Esto ocasiona la elevación del nivel del océano y el hundimiento en el este de la capa oceánica termoclina ya que esta cambia rápidamente con la profundidad o altura. El hundimiento de la termoclina en la parte más oriental del Pacífico ecuatorial reduce la eficiencia de las surgencias para acarrear agua fría a la superficie, esto da como resultado un aumento en la TSO.

En periodos donde la señal del fenómeno ENOS no existe, se puede representar la fase normal en el sector del océano pacifico, es decir, ver que las aguas cálidas permanecen en el oeste [160°E – 200°E] a lo largo de los años.

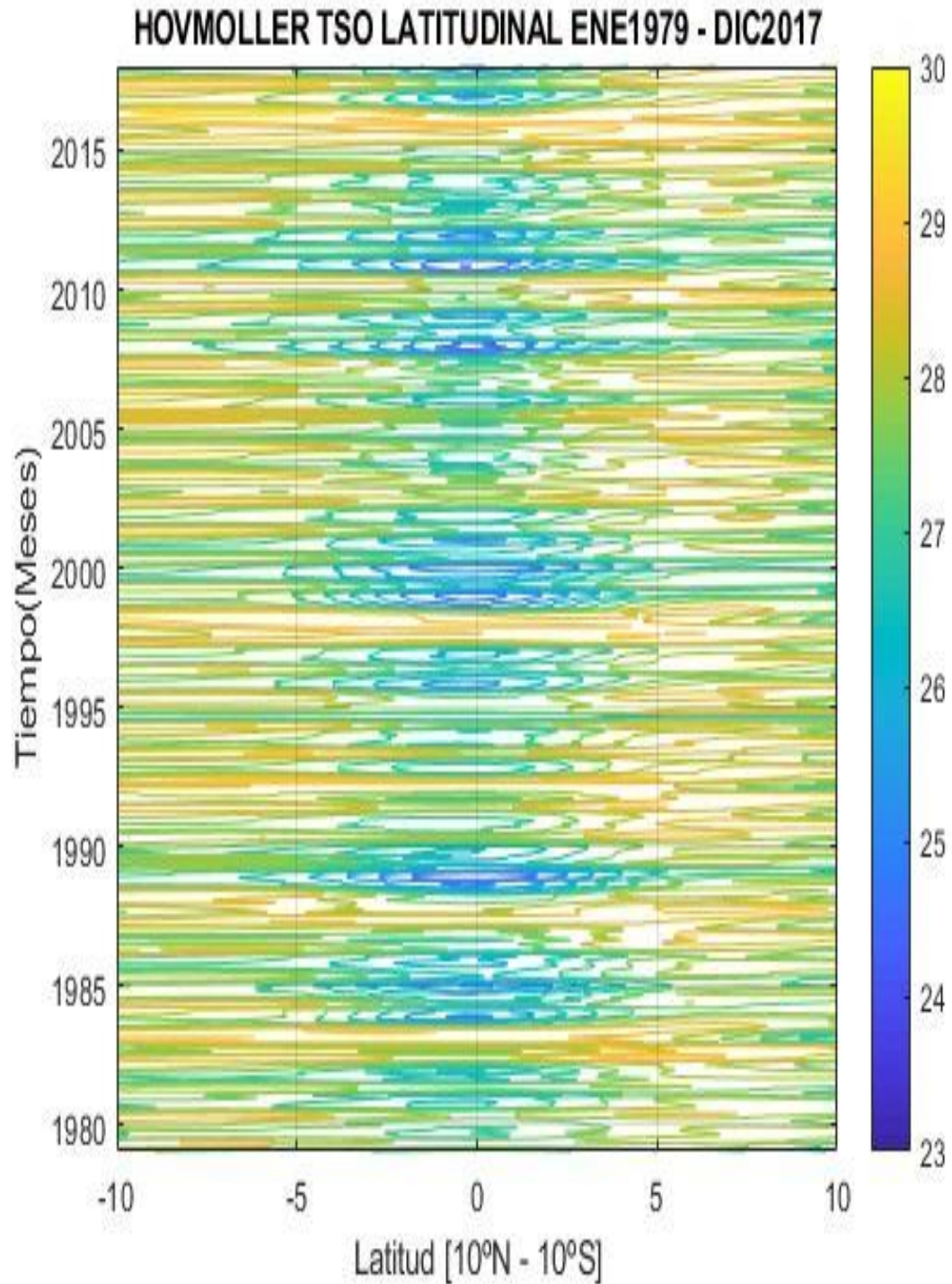


Figura 20. Diagrama Hovmöller en dirección latitudinal [10°N – 10°S] para registro histórico de 39 años TSO.

Del diagrama Latitudinal se presenta el comportamiento interanual de la TSO, en la información de los años 2010 – 2011, se puede apreciar un fuerte gradiente de valores de temperatura entre 23° a 24.5° que se generaliza como una señal para un evento frío entre latitudes $[5^{\circ}\text{N } 5^{\circ}\text{S}]$. Esto es una evidencia de la presencia del evento de La Niña, ya que a partir del mes de julio 2010 se asocia con su “fase madura” o de mayor intensidad. En mayo del 2011 empieza la fase de su decaimiento con el cual las aguas oceánicas empiezan a expandirse hacia el Oeste. La intrusión de un rango de valores de temperatura entre $[23^{\circ} - 24.5^{\circ}]$, es más evidente en latitudes $[5^{\circ}\text{N } 5^{\circ}\text{S}]$.

Por otra parte, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida considerablemente utilizada en diversas áreas del quehacer científicos, en este apartado se toman vectores (filas) de la matriz Hovmöller longitudinal a diferentes distancias, se calcula el coeficiente de Pearson y los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del cálculo Coeficiente de Pearson, para diferentes distancias entre longitudes.

Distancia entre Longitudes	Coef. Pearson
1	0,9999
2	0,9999
5	0,9996
10	0,9958
50	0,9746
80	0,9517
100	0,8833
150	0,690
200	0,577
300	0,357
801	-0,263

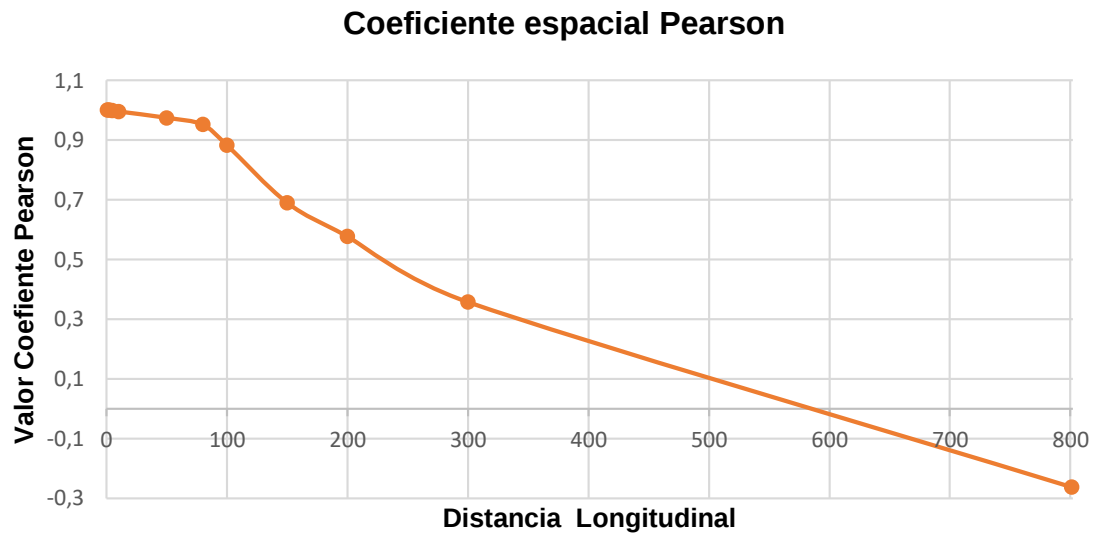


Figura 21. Grafica Correlación espacial de Pearson para matriz Hovmöller longitudinal.

La tabla 4 [23], muestra el criterio para los valores de correlación obtenidos:

Tabla 4. Criterios de análisis para coeficiente de Pearson.

Valor	Criterio
$R = 1,00$	Correlación grande, perfecta y positiva
$0,90 \leq r < 1,00$	Correlación muy alta
$0,70 \leq r < 0,90$	Correlación alta
$0,40 \leq r < 0,70$	Correlación moderada
$0,20 \leq r < 0,40$	Correlación muy baja
$r = 0,00$	Correlación nula
$r = -1,00$	Correlación grande, perfecta y negativa

Como análisis y según la tabla 4, la relación estadística entre la posición espacial de 160°E y 110°W, la cual hace referencia a los puntos en longitud más alejados con una distancia de 801 con relación a un tamaño de cuadrícula de 0.125°. dando como resultado una correlación negativa y muy baja, es decir, que a mayor distancia

la correlación espacial se pierde en la zona del pacifico ecuatorial en cuanto a valores de TSO se refiere. Dado que en condiciones normales en el oeste se acumulan aguas cálidas producto del empuje ocasionado por los vientos alisios alrededor de oceánica y Asia.

El grado de relación que se tiene entre dos espacios geográficos con una distancia 1(es decir 0.125°) se denota como alta, aquí se presume de la buena calidad del registro obtenido, pero también los valores de temperatura en magnitud varían cerca de 0.007%.

En general, este coeficiente es una medida que indica la situación relativa de los sucesos respecto a dos posiciones espaciales, es decir, representa la expresión numérica que indica el grado de correspondencia o relación que existe entre las posiciones longitudinales, estos números varían entre límites de +1 y -1.

7.1.3 Identificación de eventos El Niño y La Niña por medio anomalías y diagramas Hovmöller

Partiendo de las metodologías empleadas por los grandes centros de datos climatológicos del mundo para la identificación de las fases cálidas y frías de este fenómeno, se estableció como punto de referencia el valor de las anomalías de la TSO para la descripción tanto en intensidad (neutro, moderado, fuerte o débil) como de fase (fría - , cálida +)[4], con el objetivo de conectar los resultados de los registros históricos consignados en la figuras 2 y 3 con los obtenidos mediante las representaciones gráficas haciendo uso de los diagramas Hovmöller y del ciclo anual.

Entiéndase por anomalía como: “la separación respecto del valor promedio de cierto periodo de referencia”[24], utilizando para el caso del análisis de las Temperaturas Superficiales, lapsos mensuales. Lo anterior yace del conocimiento las dinámicas de los procesos climáticos, donde no es correcto usar valores de referencia anuales puesto que, los comportamientos de los meses son diferentes entre sí, por ejemplo, un enero especialmente cálido no será igual a un agosto particularmente frío, necesitando así, un cálculo mensual de cada mes por separado a lo largo de la

escala histórica empleada (ej: media de 20 años para el mes de febrero)[24]. Teniendo lo anterior, se presentan también los valores de las anomalías presentados para el ciclo anual según corresponde cada caso seleccionado como ejemplo para contrastar cada fase.

Por una parte, en las Figuras 22 y 23 se muestran los diagramas Hovmöller alusivos a algunos de los eventos cálidos representativos que tiene el fenómeno en su historia reciente, el primero corresponde al periodo 1997-1998 y el segundo (algo más extenso) 2014-2016.

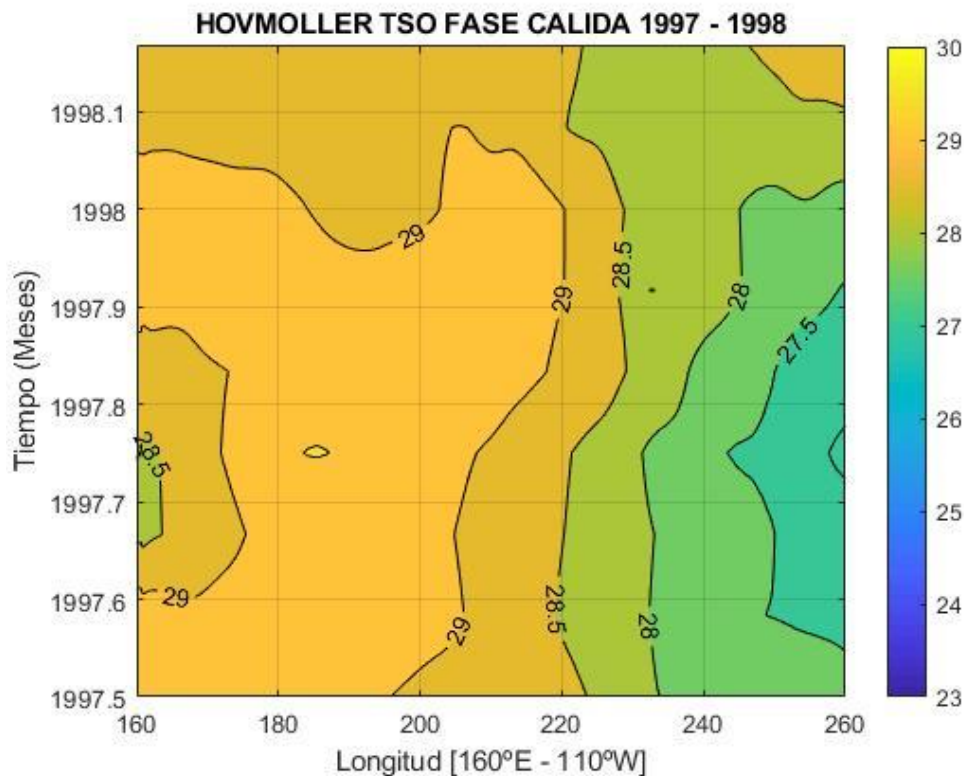


Figura 22. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1997-1998.

Si bien los valores de temperatura mostrados en la Figura 22 alcanzaron magnitudes superiores (29°C y 30°C entre junio de 1997 y enero de 1998), y esto puede ser indicio de la existencia del evento, no otorga suficiente información sobre

su intensidad, pero aun así permite establecer una tendencia positiva del aumento de la temperatura por encima de la media, por lo que admite relacionarse con una fase cálida o evento El Niño.

Para poder confirmar lo anterior y hacer una idea de la intensidad con la que se presentó el fenómeno, se debe remitir a las anomalías de la TSO para entender el comportamiento que están teniendo estos valores respecto del valor promedio histórico que tiene cada mes; es decir, imágenes como las expuestas en el (Anexo 1.19 - 1.20) para los años 1997 y 1998, son muestra de una inclinación positiva y fuerte en los meses de julio a diciembre de 1997 y menos pronunciadas entre abril y junio del siguiente año en mención.

Caso similar ocurre con la Figura 23, la cual denota un comportamiento análogo detallado de manera subsiguiente en las anomalías correspondientes a los años 2014 al 2016 (Anexo 1.36 – 1.38) donde, por ejemplo, noviembre y diciembre de 2014, el periodo de julio a diciembre de 2015 y de enero a abril de 2016 presentan las anomalías más pronunciadas.

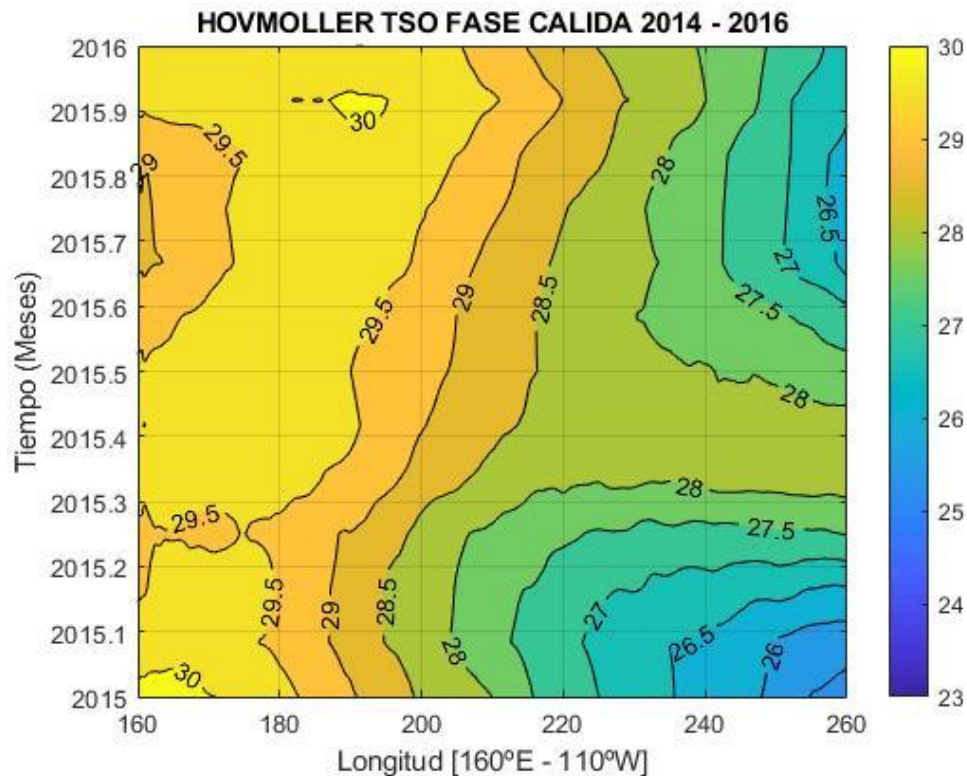


Figura 23. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1997-1998.

Por otra parte, puede darse el caso contrario como muestran las Figuras 24 y 25, atribuidas a fases frías del fenómeno que tienen lugar en los periodos 1988-1989 y 2010-2011 respectivamente; estos anteriores, a pesar de hacer referencia a eventos históricos registrados, no son claramente distinguidos bajo el análisis de la variable temperatura, puesto que, dichos diagramas son representaciones de los valores promedios longitudinales y es solo hasta que se realiza el desglose mensual y cálculo de los valores de anomalías que la fase y su intensidad se esclarece.

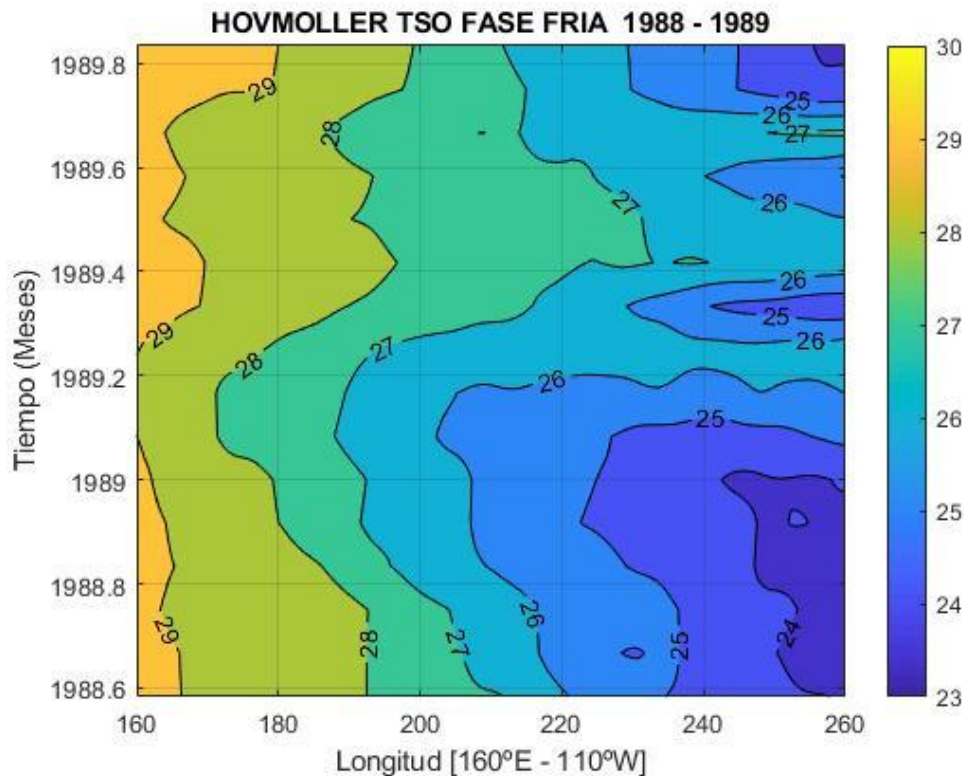


Figura 24. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 1988-1989.

Muestra de ello, es el comportamiento de las temperaturas en los meses de julio a diciembre de 1988 con una tendencia clara negativa, que se va atenuando después de marzo de 1989 pero de igual fase (Anexo 1.10-1.11), pudiendo vincularse entonces, con un evento La Niña.

Caso similar ocurre con la Figura 25, esta expresa un comportamiento semejante el cual solo permite ser detallado en las anomalías correspondientes a los años 2010 y 2011 (Anexo 1.32 - 1.33) donde, por ejemplo, de julio a diciembre de 2010 y extendiéndose hasta marzo del siguiente año, se presentan las anomalías negativas más pronunciadas, de las que no hay muestra de tendencia clara en el Hovmöller.

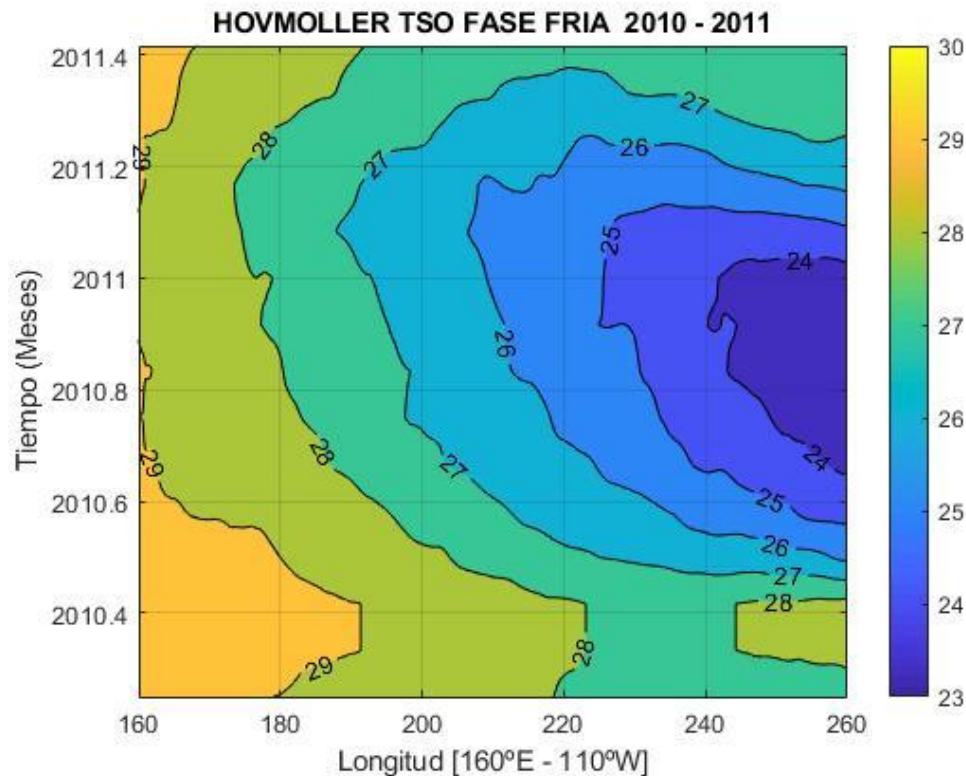


Figura 25. Temperaturas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial en el periodo 2010-2011.

7.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL PARA HOVMÖLLER

Como método de filtrado al diagrama Hovmöller latitudinal, se obtienen imágenes con patrones espacio temporales característicos del comportamiento normal de la temperatura en la zona del océano en el pacífico tropical, esto puede entenderse como una técnica que permite simplificar la rugosidad de la figura original del apartado anterior y de esta forma, llegar a visualizar la variación de los patrones de temperatura más relevantes a lo largo del registro histórico de los datos sin necesidad de presentar demasiada información que dificulte la lectura de los diagramas.

Las matrices de U y V obtenidas en la DVS tienen un tamaño U (801*468) y V (468*468), con las cuales se realiza la representación gráfica con diferentes modos

de variabilidad, es decir, tomando diferentes valores para la segunda dimensión de las matrices de U y V.

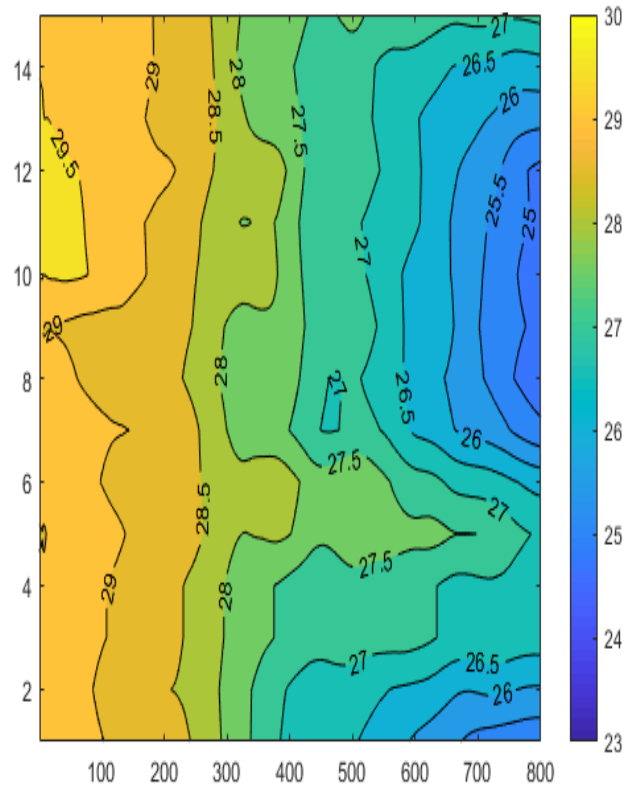


Figura 26. Representación del diagrama Hovmöller con (15) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.

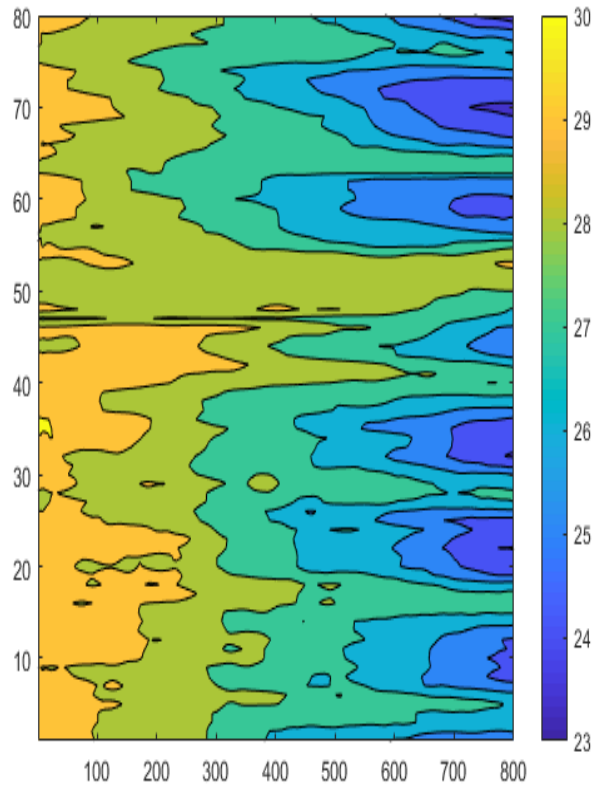


Figura 27. Representación del diagrama Hovmöller con (80) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.

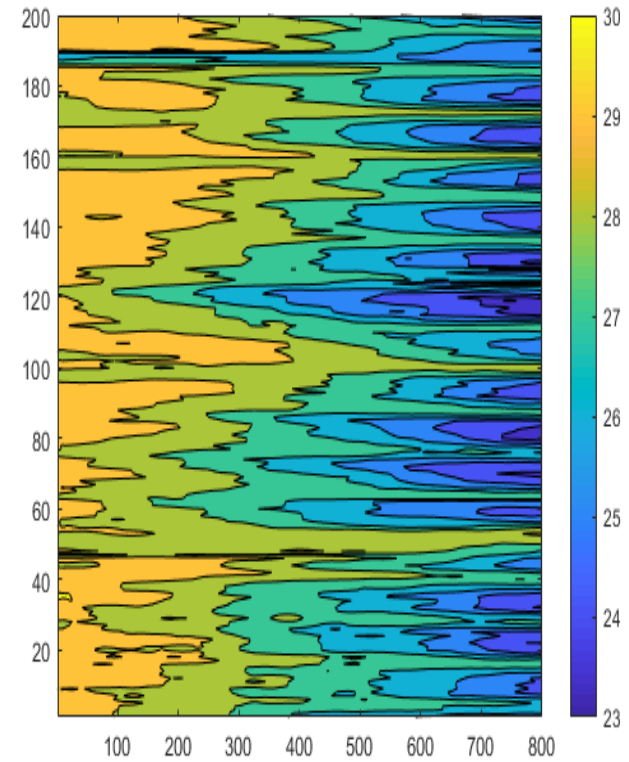


Figura 28. Representación del diagrama Hovmöller con (200) modos de variabilidad producto de la Descomposición de valores singulares.

En las figuras 26, 27 y 28 son seleccionados aquella cantidad de modos dentro de los 468 resultantes de la descomposición, que han sido revisados previamente de manera aleatoria hasta lograr una muestra de diagramas que denoten una diferencia significativa de variabilidad de la TSO. Esto conduce a pensar que a medida que van aumentando la cantidad de modos juntados, es más frecuente el cambio de valores en la temperatura de la región de estudio y, por lo tanto, muestra una textura más rugosa que conforme se va incrementando puede representar una fase de transición de estado normal (Figura 26), a uno donde se presente el fenómeno (Figura 28).

Al final, cada figura mostrada puede interpretarse como método de filtrado útil según el caso que se requiera para el análisis espacio-temporal por medio de diagramas Hovmöller, es así, como esta herramienta puede ayudar a encontrar efectivamente patrones pronunciados en los datos dependiendo del objetivo que sea planteado dentro de la investigación (nivel de detalle ideal).

7.3 MODELACIÓN FRACTAL-MULTIFRACTAL

El algoritmo computacional simuló un total de (1000) veces, las figuras (29 -33) obtenidas dan como resultado 3 tipos de gráficas, lo cual puede entenderse como el primer tipo donde se presentan franjas débiles ligeramente cruzadas de forma diagonal y vertical, el segundo tipo una nube de puntos muy densa que tiende a llenar el espacio, por ultimo graficas con nube de puntos densa, pero a su vez puede representar algún tipo de imagen.

“The deterministic fractal-multifractal (FM) approach and some of its variants is found to be useful describe and simulate natural records. While past research focused on one dimensional data sets, this notion can be extended to describe natural dynamics in space like holmograph. I am also happy to be a part of your team.”

-Mahesh Maskey

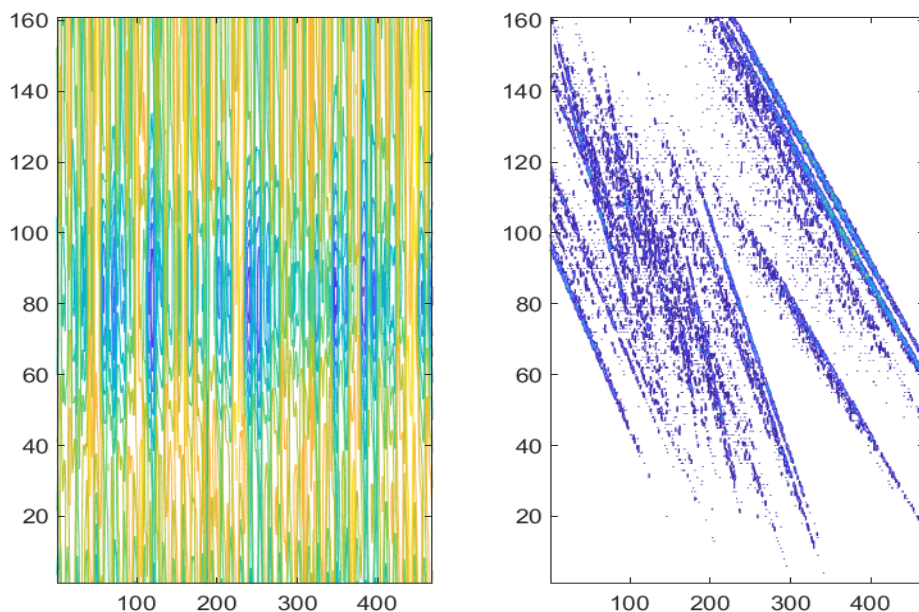


Figura 29. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°389 del modelo FM (derecha).

Tabla 5. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°389

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
X_0	0,86765	$R_1^{(2)}$	0,92711
X_1	0,25666	$R_1^{(3)}$	0,14429
X_2	0,80972	$R_2^{(1)}$	0,23448
X_3	0,768	$R_2^{(2)}$	0,49354
Y_0	0,87118	$R_2^{(3)}$	0,078478
Y_1	0,78457	$T_1^{(1)}$	0,26326
Y_2	0,26827	$T_1^{(2)}$	0,27261
Y_3	0,99998	$T_1^{(3)}$	0,51994
Z_0	0,99998	$T_2^{(1)}$	0,80006
Z_1	0,27597	$T_2^{(2)}$	0,8526
Z_2	0,99553	$T_2^{(3)}$	0,61741
Z_3	0,7693	P_1	0,37536
Z_4	0,084979	P_2	0,44688
$R_1^{(1)}$	0,1291		

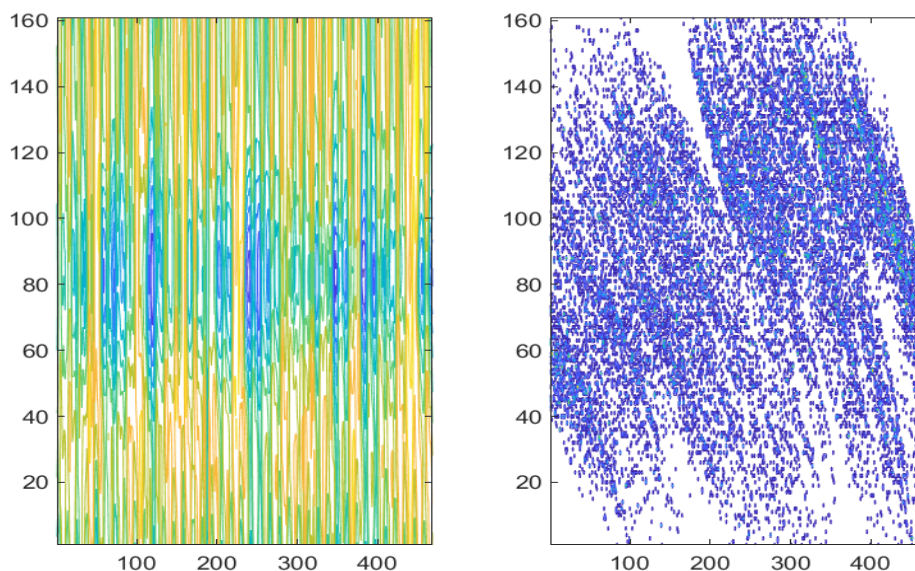


Figura 30. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°213 del modelo FM (derecha).

Tabla 6. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°213

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
X_0	0,91818	$R_1^{(2)}$	0,12609
X_1	0,23111	$R_1^{(3)}$	0,067414
X_2	0,74132	$R_2^{(1)}$	0,88506
X_3	0,84945	$R_2^{(2)}$	0,21997
Y_0	0,99983	$R_2^{(3)}$	0,20039
Y_1	0,23563	$T_1^{(1)}$	0,48331
Y_2	0	$T_1^{(2)}$	0,42796
Y_3	0,30546	$T_1^{(3)}$	0,43202
Z_0	0,74208	$T_2^{(1)}$	0,69455
Z_1	0,47124	$T_2^{(2)}$	0,70721
Z_2	0,60714	$T_2^{(3)}$	0,45799
Z_3	0,48912	P_1	0,50952
Z_4	0	P_2	0,62472
$R_1^{(1)}$	0,87499		

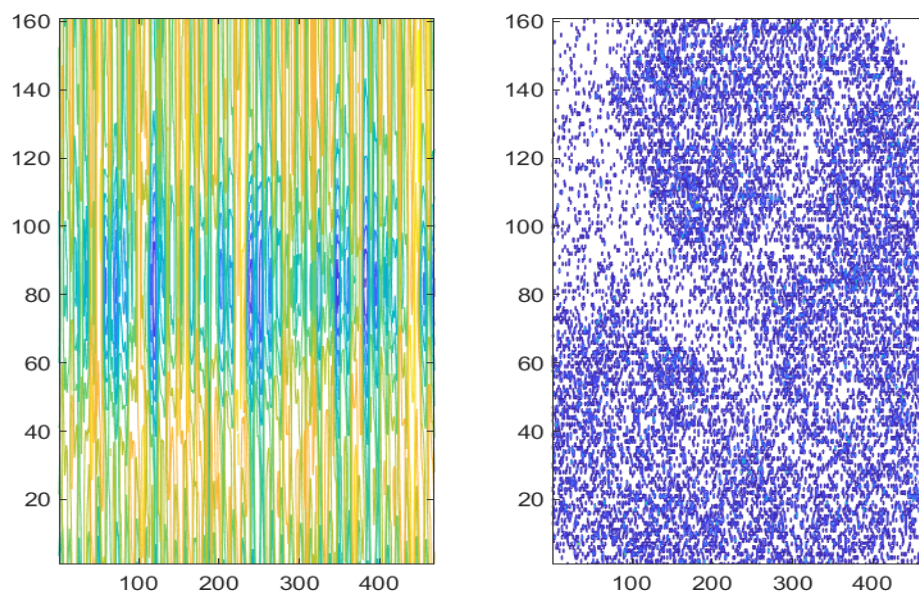


Figura 31. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°612 del modelo FM (derecha).

Tabla 7. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°612

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
X_0	0,88082	$R_1^{(2)}$	0,54731
X_1	0,34177	$R_1^{(3)}$	0,98058
X_2	0,72277	$R_2^{(1)}$	0,8276
X_3	0,83654	$R_2^{(2)}$	0,15207
Y_0	0,49922	$R_2^{(3)}$	0,23331
Y_1	0,44319	$T_1^{(1)}$	0,82301
Y_2	0,00013	$T_1^{(2)}$	0,6341
Y_3	0,65494	$T_1^{(3)}$	0,37314
Z_0	0,01600	$T_2^{(1)}$	0,75958
Z_1	0,7035	$T_2^{(2)}$	0,51168
Z_2	0,64774	$T_2^{(3)}$	0,37847
Z_3	0,88524	P_1	0,50917
Z_4	0,98896	P_2	0,65282
$R_1^{(1)}$	0,9112		

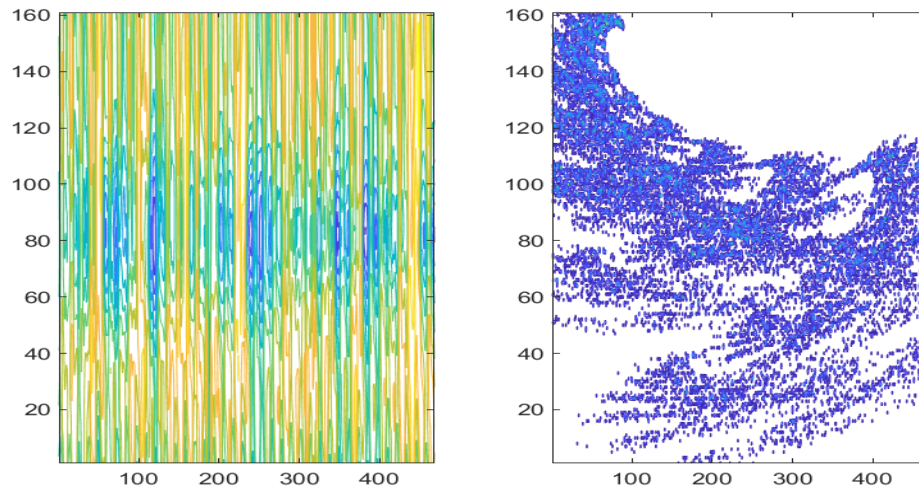


Figura 32. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°994 del modelo FM (derecha).

Tabla 8. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°994

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
X_0	0,22521	$R_1^{(2)}$	0,15055
X_1	0,60613	$R_1^{(3)}$	0,88623
X_2	0,66803	$R_2^{(1)}$	0,7753
X_3	0,98954	$R_2^{(2)}$	0,71824
Y_0	1	$R_2^{(3)}$	0,7824
Y_1	0,56878	$T_1^{(1)}$	1
Y_2	1,00000	$T_1^{(2)}$	0,58418
Y_3	0,013165	$T_1^{(3)}$	0,99993
Z_0	0,55486	$T_2^{(1)}$	0,92919
Z_1	0,0010656	$T_2^{(2)}$	0,66659
Z_2	1,7587E-06	$T_2^{(3)}$	0,00096498
Z_3	0,7158	P_1	0,44505
Z_4	0,95476	P_2	0,7
$R_1^{(1)}$	0,011473		

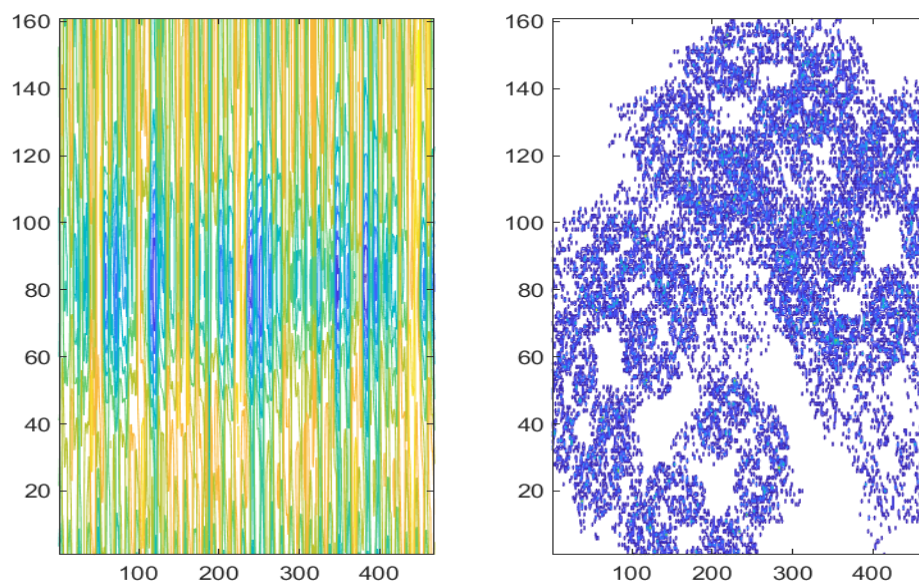


Figura 33. Comparativa de diagrama Hovmöller latitudinal (izquierda) con respecto de la simulación n°995 del modelo FM (derecha).

Tabla 9. Valores de los parámetros del modelo que arroja la simulación n°995

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
X_0	0,055253	$R_1^{(2)}$	0,92617
X_1	0,63096	$R_1^{(3)}$	0,054952
X_2	0,96818	$R_2^{(1)}$	0,59986
X_3	0,41877	$R_2^{(2)}$	0,22129
Y_0	0,99707	$R_2^{(3)}$	0,11124
Y_1	0,34629	$T_1^{(1)}$	0,92361
Y_2	0,00300	$T_1^{(2)}$	0,8601
Y_3	0,96325	$T_1^{(3)}$	0,001382
Z_0	0,05891	$T_2^{(1)}$	0,9449
Z_1	1	$T_2^{(2)}$	0,52438
Z_2	0,71732	$T_2^{(3)}$	0,86711
Z_3	0,73681	P_1	0,092937
Z_4	0,27906	P_2	0,29811
$R_1^{(1)}$	0,0088811		

Si bien, estas representaciones geométricas producto del proceso iterativo de la matemática computacional aplicada en este trabajo, no encuentra similitudes notables frente a los diagramas espacio-temporales (sin el método de filtrado (DVS)) comúnmente empleados para representación meteorológica, es un avance en materia al abrir la posibilidad de aplicación en éste fenómeno en específico y de igual forma, explorando una dimensión superior de un modelo en el que se pueden abarcar nuevas investigaciones.

Los inconvenientes que puede estar presentando el código propuesto, están relacionados con la incertidumbre de utilizar una dimensión superior de la hasta ahora comúnmente trabajada por los diversos autores de la materia, ejemplo de esto es el proceso de la función objetivo, donde en el uso de 2 dimensiones gráficas simplemente compara punto a punto, coordenada a coordenada, pero al subir de complejidad con una dimensión más, Maskey propone simplificar su procesamiento utilizando el cálculo del centroide de la matriz Hovmöller latitudinal, pudiendo causar valores aproximados entre dicho valor referente, más no al nivel de detalle deseado.

8 CONCLUSIONES

Los registros de la variable oceánica TSO, enlazados en una malla espacial 0.125° para el estudio del ENOS en el pacífico tropical, guardan información acerca del comportamiento del océano y aquellos eventos climáticos ocurridos. La descripción estadística general muestra en los registros el comportamiento para cuando se exhibe eventos de El Niño, así mismo los registros son poco correlacionados espacialmente a medida que su distancia aumenta, según lo denota el coeficiente de Pearson.

Los diagramas Hovmöller para esta investigación se utilizaron con el fin de trazar la evolución temporal del perfil escalar de la temperatura y así ilustrar el comportamiento y aparición del fenómeno del Niño Oscilación Sur en cualquiera de sus fases (cálidas o frías). Aquí se ha encontrado una relación moderada frente a los registros encontrados en la literatura del comportamiento histórico de esta zona,

esto sucede a causa de encontrar tendencias de temperaturas poco explícitas en algunos casos, al tratarse de representaciones de promedios aritméticos.

Esto anterior resalta la importancia de acompañar el estudio con el cálculo y la representación de la variabilidad de la TSO en el pacífico tropical, pues este ha sido por años la manera de medir la influenciada de la variable con la aparición de eventos del fenómeno en alguna de sus fases. Esto se pudo comprender con los ejemplos puntuales utilizados para identificación que presentaron incidencias fuertes y corroborado junto a otros modos de representación de los (39 años) con los diagramas de anomalías TSO.

El desarrollo de la técnica estadística avanzada DVS mostro patrones muy similares con la fase normal de la temperatura en el océano pacífico (temperaturas cálidas desplazándose de este a oeste) y algunas etapas tempranas de eventos del ENOS en sus dos fases; a manera de recomendación se deja abierta la posibilidad de un análisis más detallado en busca de patrones que describan eventos con frecuencia fuerte del ENOS a lo largo del registro histórico.

El código (Anexo 2-4) desarrollado mediante el lenguaje de programación Matlab R2018a que se planteó con el fin de reproducir la información contenida en los archivos netcdf obtenidos desde el portal web Centro Europeo para pronósticos meteorológicos de mediano alcance fue un éxito, gracias a que, fue posible la reproducción gráfica de la variable TSO para el registro de 39 años, la representación mediante Diagramas Hovmöller y la descomposición en valores singulares hace parte del desarrollo del mismo.

El modelo FM simulado bajo la modificación de 27 parámetros geométricos, se encuentra aún en una fase primaria que permita conseguir una similitud importante en comparación con los datos observados, debido a la necesidad de ahondar todavía más en la aplicación de las diversas metodologías de función objetivo para aplicaciones del modelo de 2 dimensiones gráficas.

Como planteamiento para nuevas investigaciones que deseen buscar mejores aproximaciones con este modelo FM, se recomienda la posibilidad de contemplar una simplificación, ayudando al algoritmo de búsqueda incluido en éste, a encontrar

los óptimos locales de una manera más rápida. Esto puede lograrse programando la búsqueda de máximos y mínimos por columnas, para que se encuentren previamente identificados y no requiera el uso de tanto recurso computacional, al tratarse de una matriz de datos de tamaño considerable y constituida por 3 variables.

Igualmente, el uso del diagrama Hovmoller resultante de la descomposición espectral, puede ayudar a reducir la cantidad de soluciones que debe evaluar el algoritmo de búsqueda, al filtrar los datos representados a una representación con menos ruido.

Para finalizar, como método de aprendizaje ha sido una experiencia confortable, esta investigación ha permitido conocer excelentes personas, con un sinfín de conocimiento y con muchas ganas de compartir aquella información, desde lo personal fue un reto adentrarse a campos donde aún hay mucho por investigar.

“En el camino de entender que lo que es arriba también es abajo, seguiremos estudiando Fractales.”

-David Joseph

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

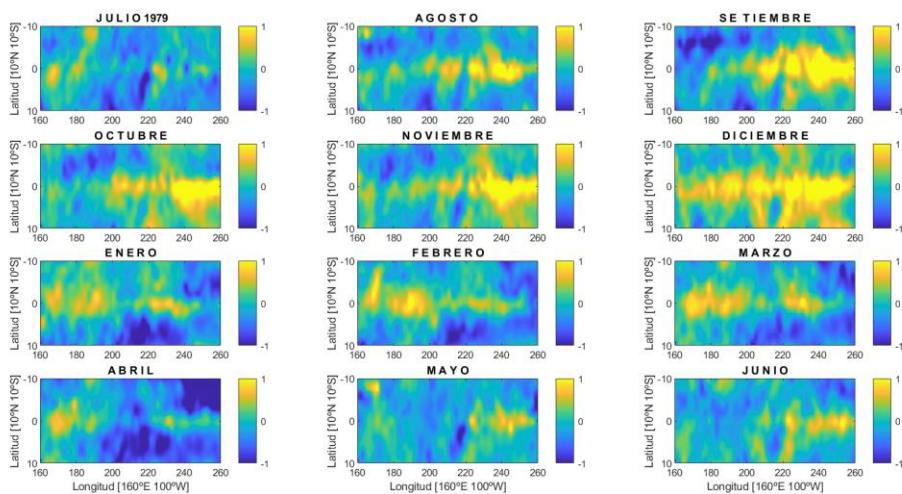
- [1] NOAA, “El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion.” [Online]. Available: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>. [Accessed: 13-Jul-2019].
- [2] J. Edgar and M. Bocanegra, “Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico.” Bogotá DC, 2014.
- [3] J. Edgar and M. Bocanegra, “Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia,” Bogotá DC, 2007.
- [4] SENAMHI and Dirección General de Meteorología, *Fenómeno EL NIÑO en el Perú*. Lima, 2014.
- [5] R. Sánchez, G. Vargas, H. González, and D. Pabón, “Los fenómenos Cálidos del Pacífico (El Niño) y Frio del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la

- estabilidad de laderas en Colombia,” III Simp. Panam. deslizamientos., 2001.
- [6] Eduardo Zambrano Q, “El Niño,” *Acta Ocean. del Pacífico*, pp. 1–4, 1996.
 - [7] Intituto de Hidrología - Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, “Informe resumido sobre el desarrollo del actual fenómeno Cálido del Pacífico, su efecto hidroclimático sobre el país, impactos socioeconómicos y la proyección sobre el posible efecto en los próximos meses,” Bogotá DC, 1998.
 - [8] The Group for High Resolution Sea Surface Temperature Science Team, “The Recommended GHR SST Data Specification (GDS) document revision 5,” *Science*, p. 123, 2011.
 - [9] Physical Oceanography distributed Active Archive Center PODAAC, “Sea Surface Temperature,” 2019. [Online]. Available: <https://podaac.jpl.nasa.gov/SeaSurfaceTemperature>.
 - [10] D. Peña, *Análisis de Datos Multivariantes*. 2002..
 - [11] J. A. Gras, *Diseños de Series Temporales: técnicas de análisis.*, EDICIONSS. Barcelona, España, 2001.
 - [12] H. Bjornsson and S. A. Vanegas, *A Manual for EOF and SVD Analysis of Climate Data*. McGill University, 1997.
 - [13] C. S. Bretherton, “Lecture 19: Multivariate data and the Singular Value Decomposition Standardizing incommensurate data,” U.S.A, 2015.
 - [14] C. E. Puente, “A new approach to hydrologic modeling: derived distributions revisited,” *J. Hydrol.*, vol. 187, no. 1–2, pp. 65–80, 1996.
 - [15] M. F. Barnsley, *Fractals Everywhere*, New Ed. Boston: Dover Publications, 1993.
 - [16] V. M. P. Vélez, “Representación Geométrica De Registros De Precipitación Puntual En Bogotá, Con El Modelo Fractal - Multifractal,” Universidad Nacional de Colombia, 2008.
 - [17] J. Kennedy, R. Eberhart, and B. Gov, “Particle Swarm Optimization,” pp. 1942–1948, 1995.
 - [18] L. Parraguez and J. E. Rengel, “Sobre PSO (Particle Swarm Optimization): una implementación paralela y distribuida,” *Rev. Científica Electrónica Ing. al Día*, vol. 1, pp. 86–102, 2015.
 - [19] Instituto de Tecnologías Educativas, “El fenómeno de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO).” [Online]. Available: https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion05/1_el_fenmeno_de_la_oscilacion_del_surel_nioenso.html. [Accessed: 08-Nov-2019].
 - [20] Grupo de Investigación en Meteorología, “Meteorología Colombiana,” *Univ. Nac. Colomb.*, vol. N° 5.

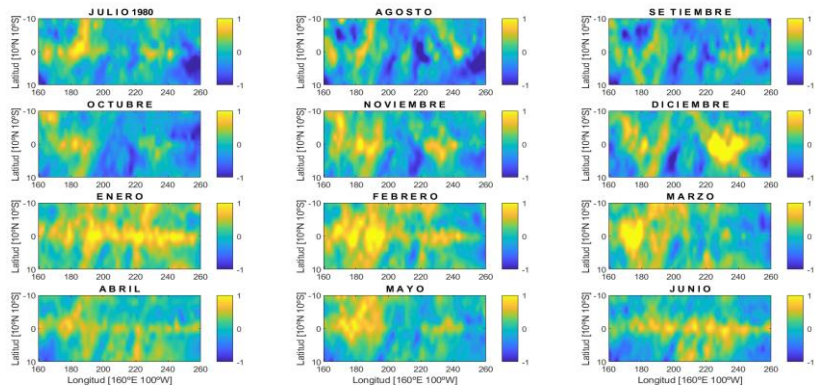
- [21] PODAAC, "The Group for High Resolution Sea Surface Temperature." [Online]. Available: <https://podaac.jpl.nasa.gov/GHRSST>. [Accessed: 21-Oct-2019].
- [22] J. M. Wallace, C. Smith, and C. S. Bretherton, "Singular Value Decomposition of Wintertime Sea Surface Temperature and 500-mb Height Anomalies," *Journal of Climate*, vol. 5, no. 6. pp. 561–576, 1992.
- [23] M. Doménech and M. D. Riba, *Métodos estadísticos: Modelo lineal de regresión.*, Herder. Barcelona, España, 1985.
- [24] I. Iglesias, M. N. Lorenzo, and M. Gómez-Gesteira, "La temperatura superficial del mar como herramienta de predicción climática," *ACT*, vol. 1, pp. 95–108, 2010.

10 ANEXOS

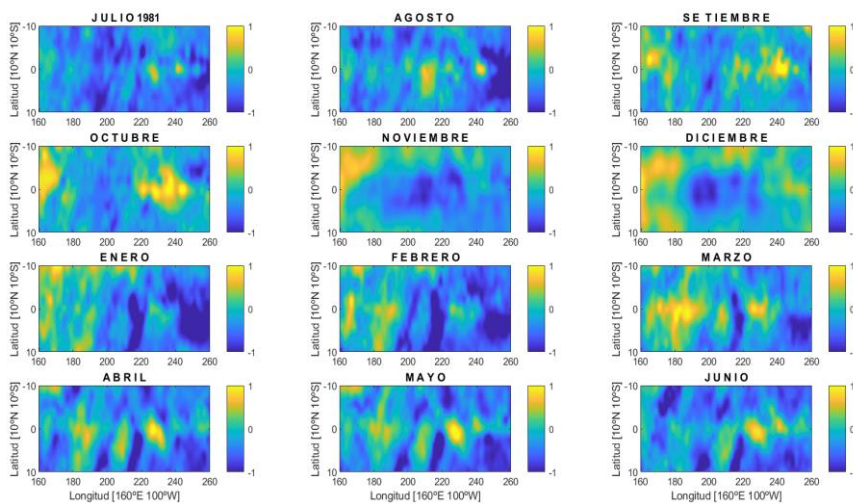
Anexo 1. Graficas anomalías TSO para el registro de 39 años en el área del Océano Pacífico.



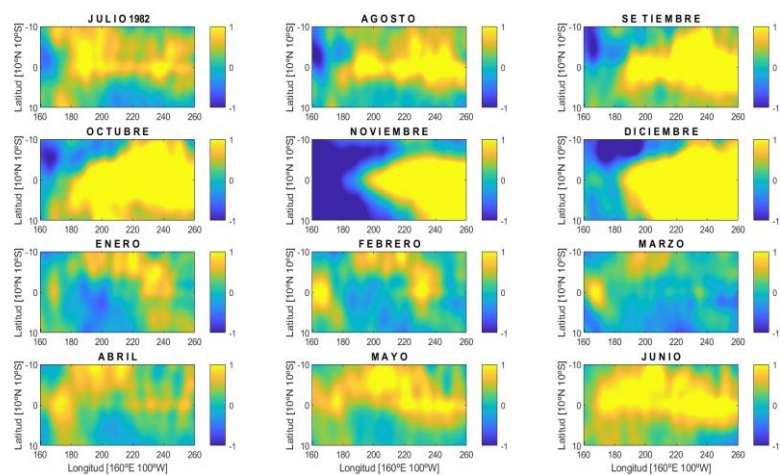
1.1 Anomalía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1979



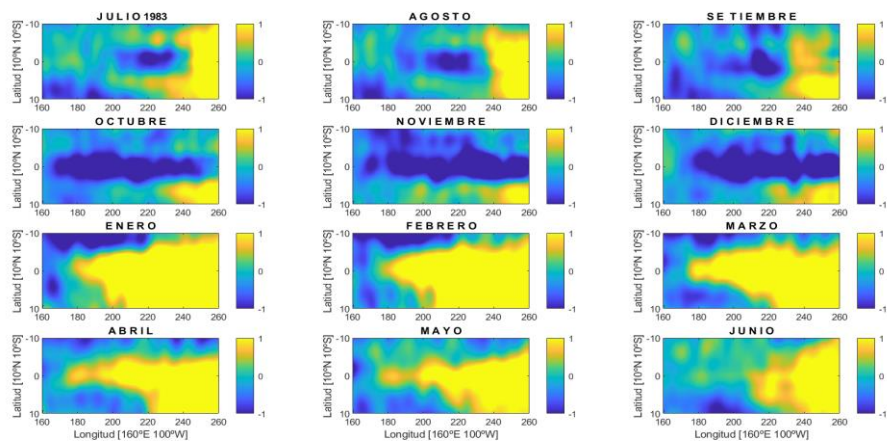
1.2 Anomalía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1980



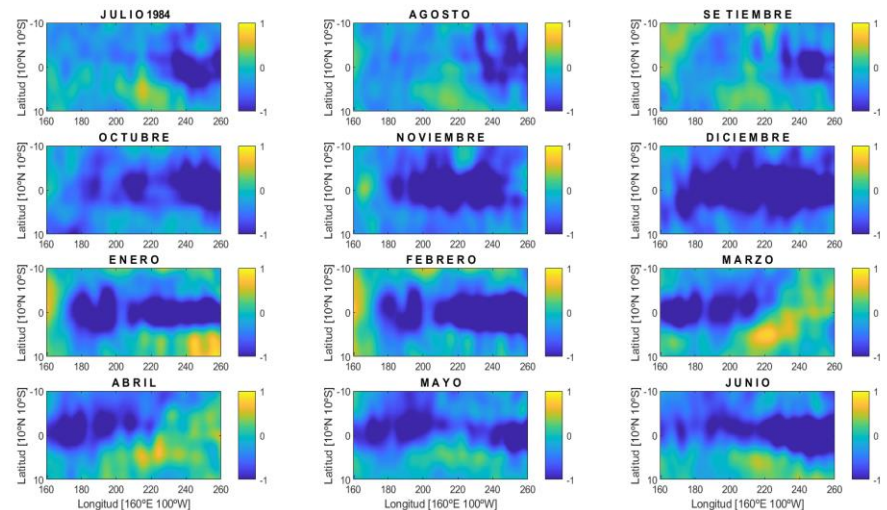
1.3 Anomalía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1981



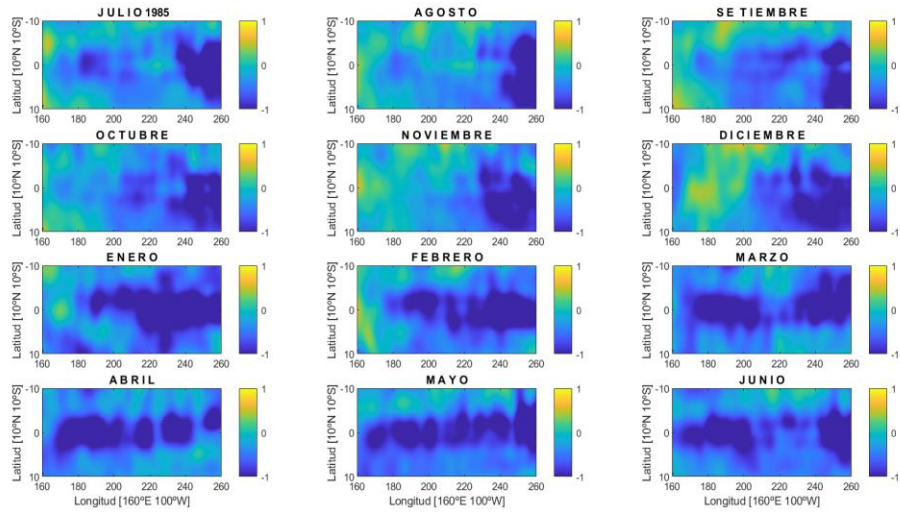
1.4 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1982



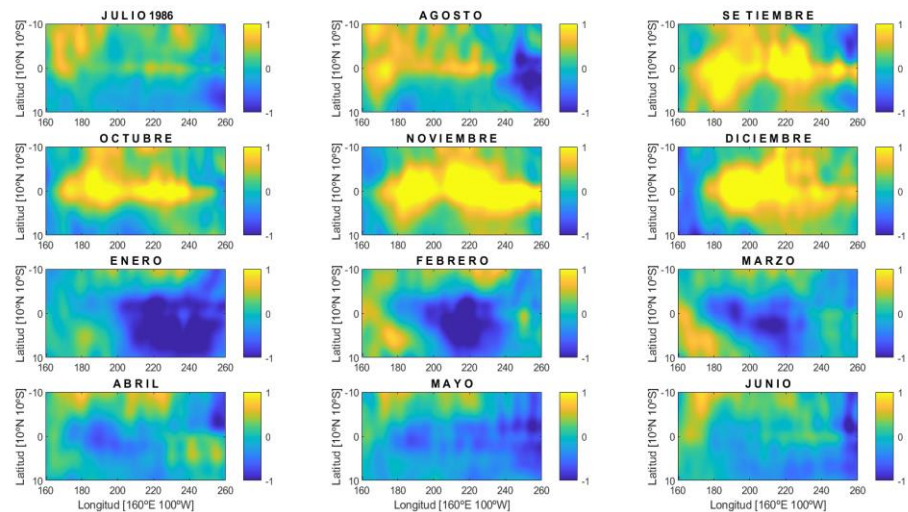
1.5 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1983



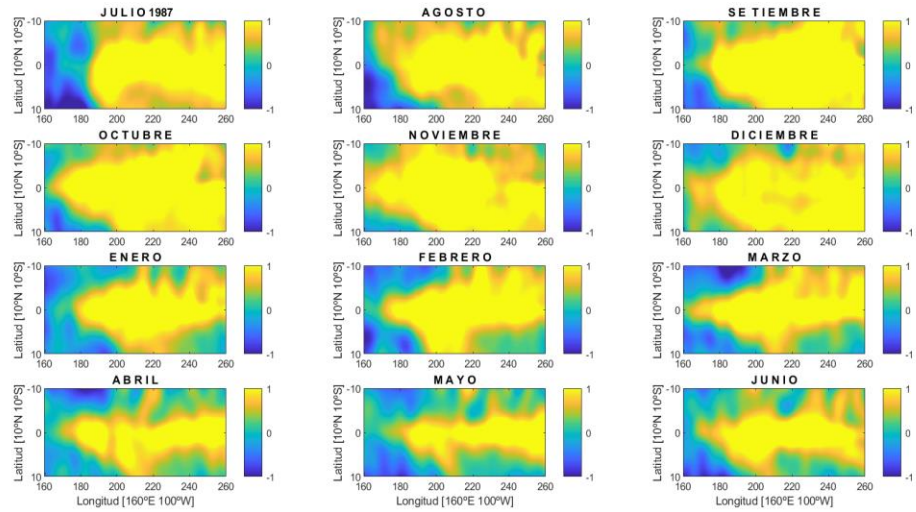
1.6 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1984



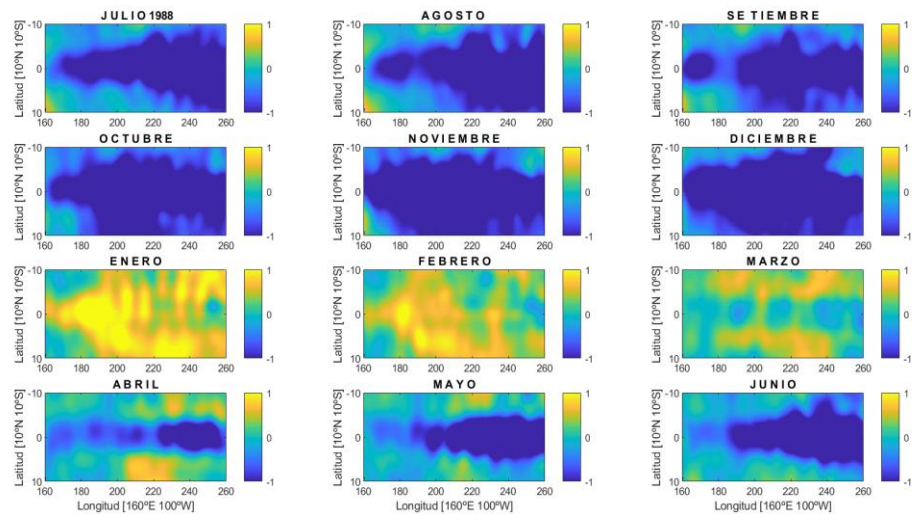
1.7Anomalía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1985



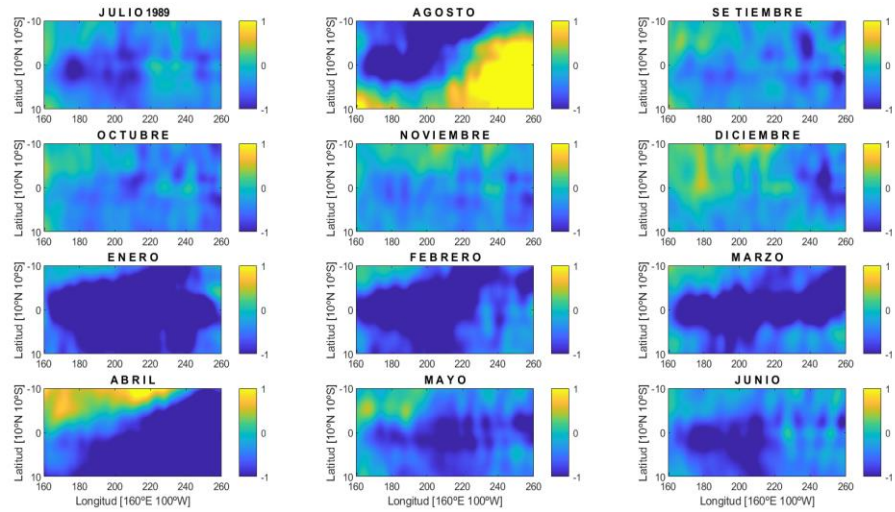
1.8Anomalía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1986



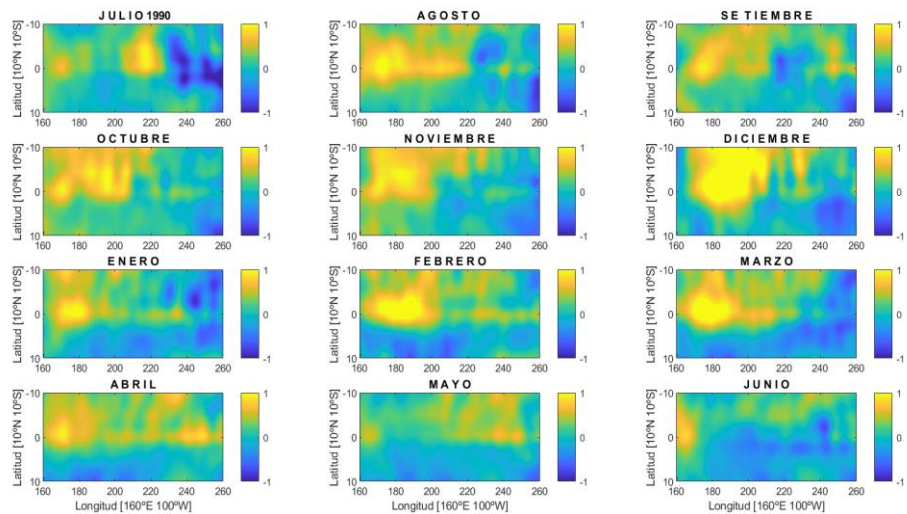
1.9 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1987



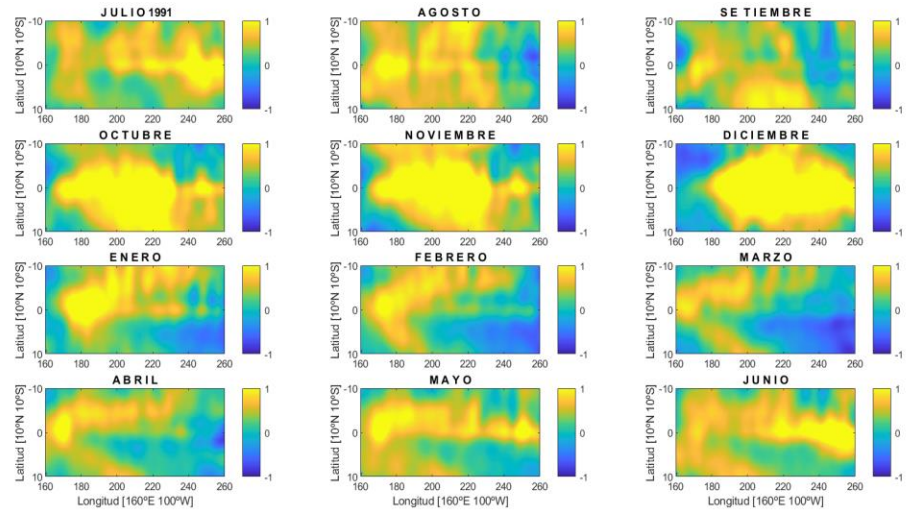
1.10 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1988



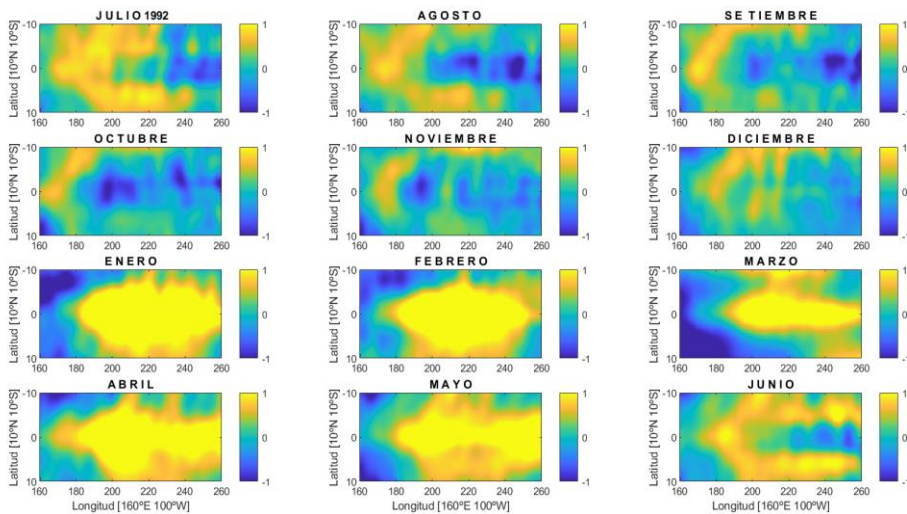
1.11 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1989



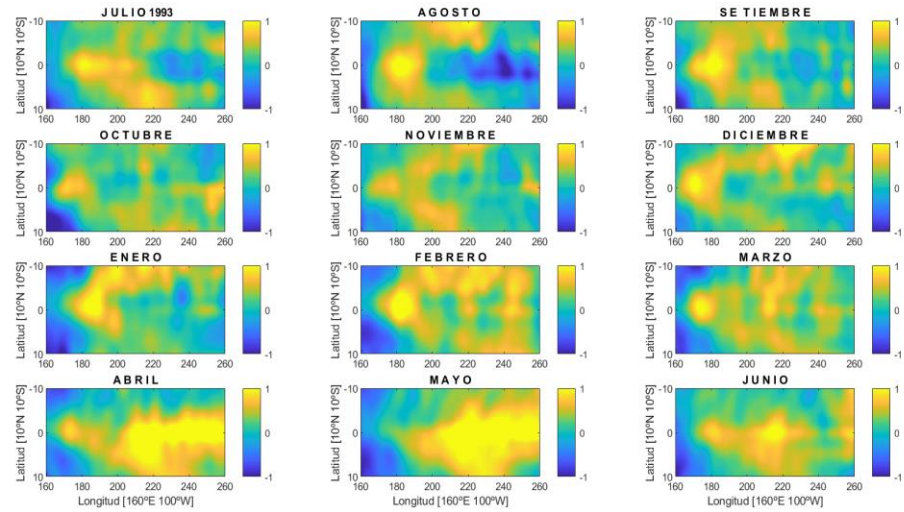
1.12 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1990



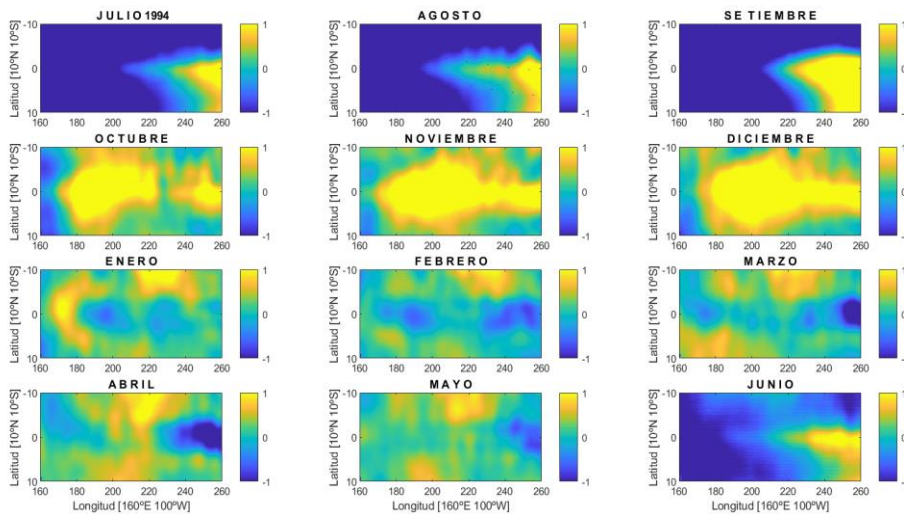
1.13 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1991



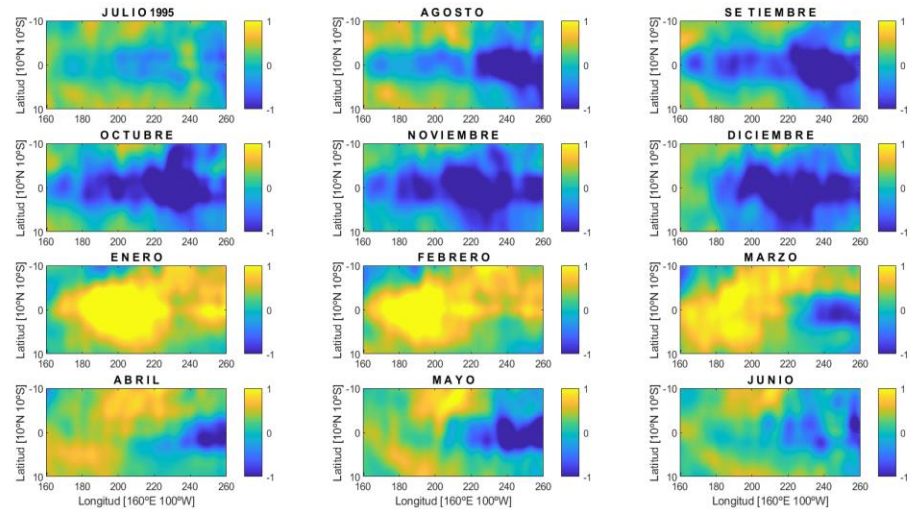
1.14 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1992



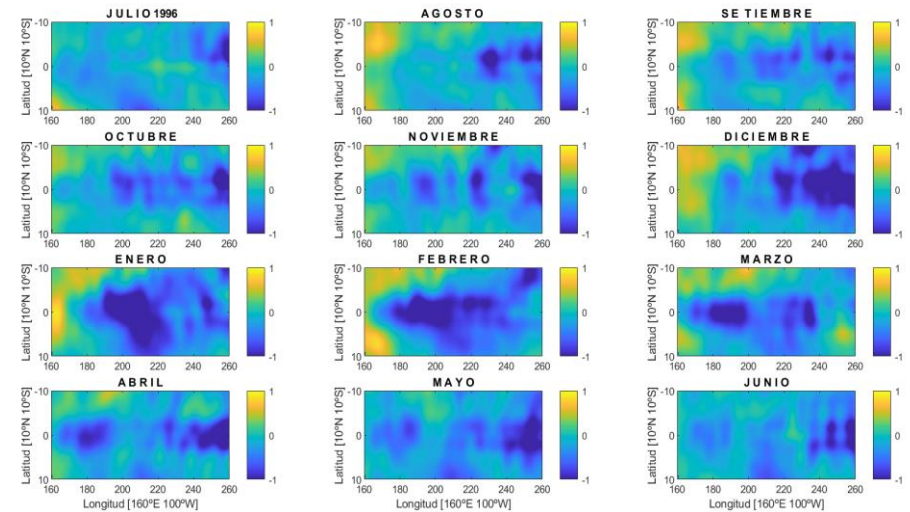
1.15 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1993



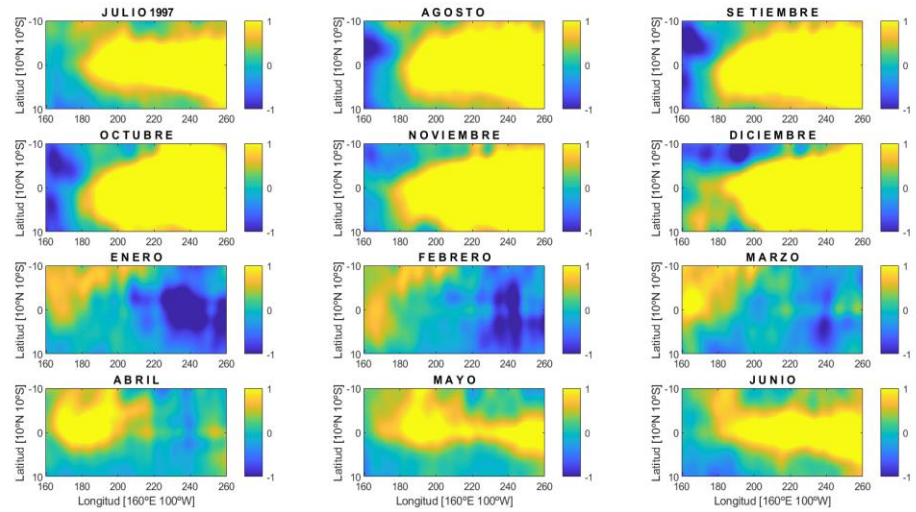
1.16 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1994



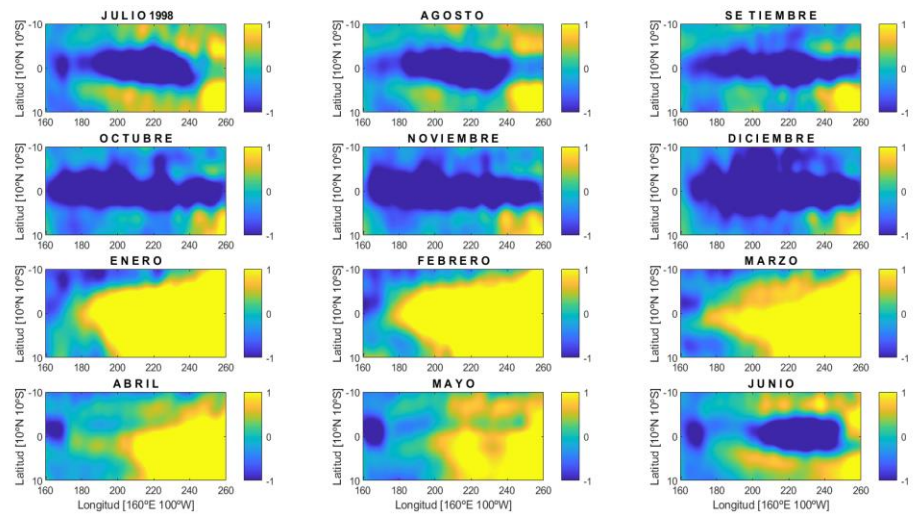
1.17 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1995



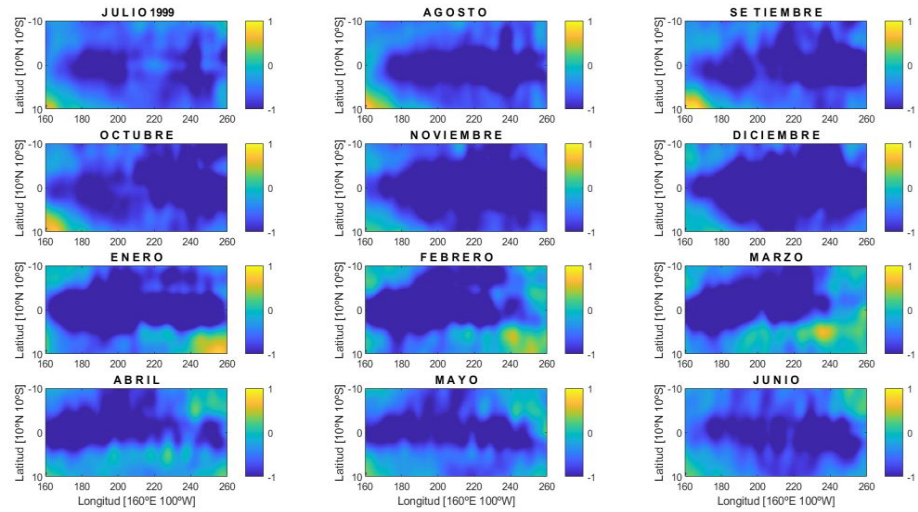
1.18 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1996



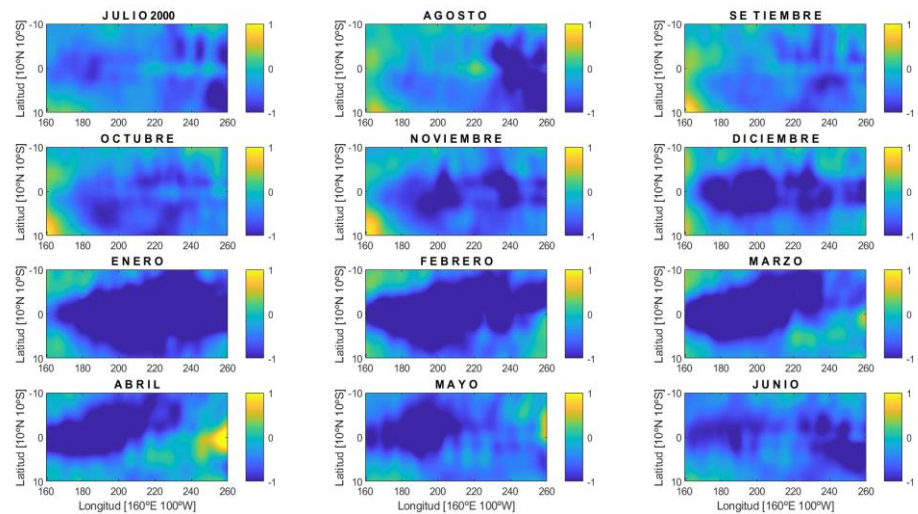
1.19 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1997



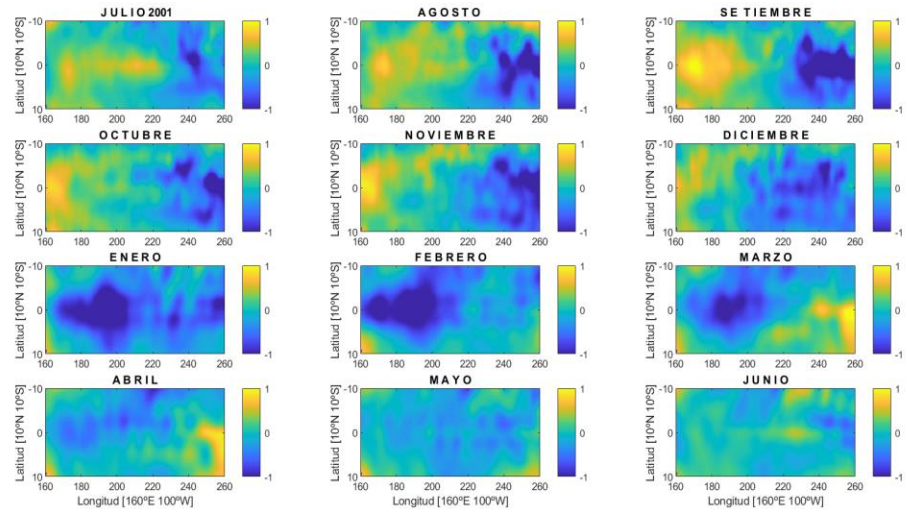
1.20 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1998



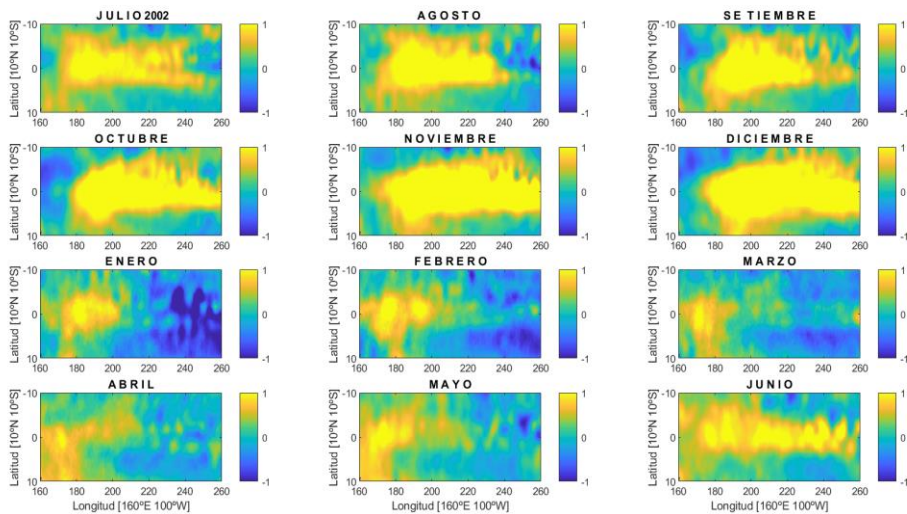
1.21 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 1999



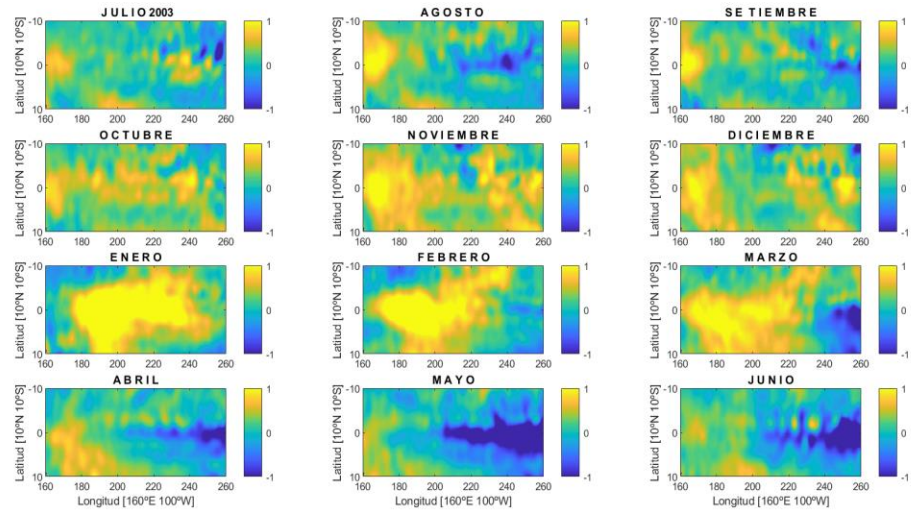
1.22 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2000



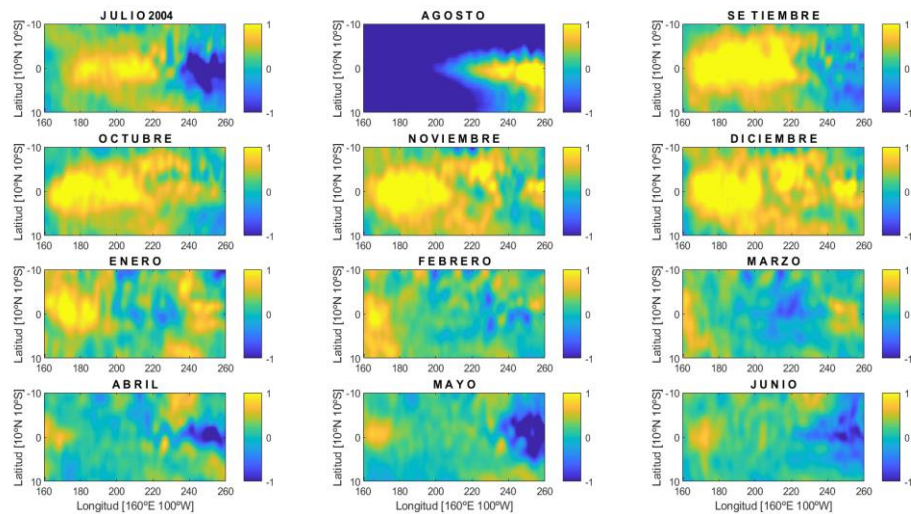
1.23 Anomía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2001



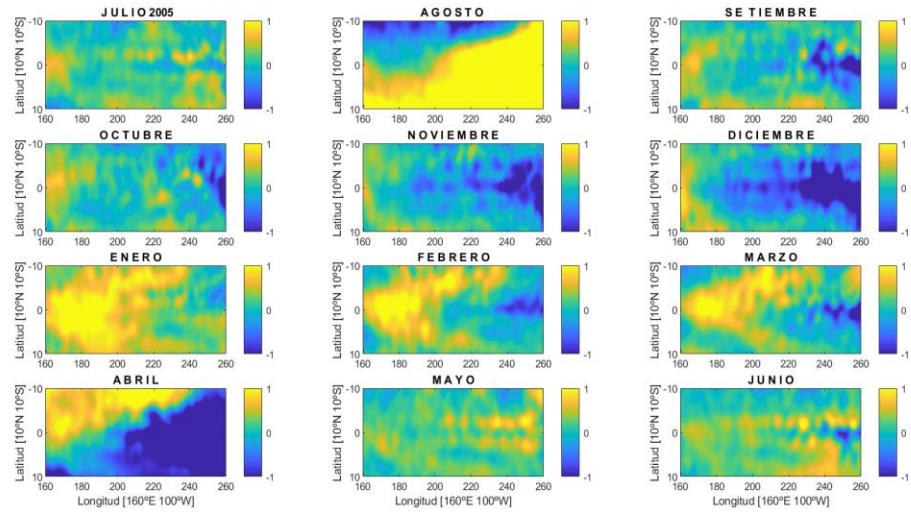
1.24 Anomía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2002



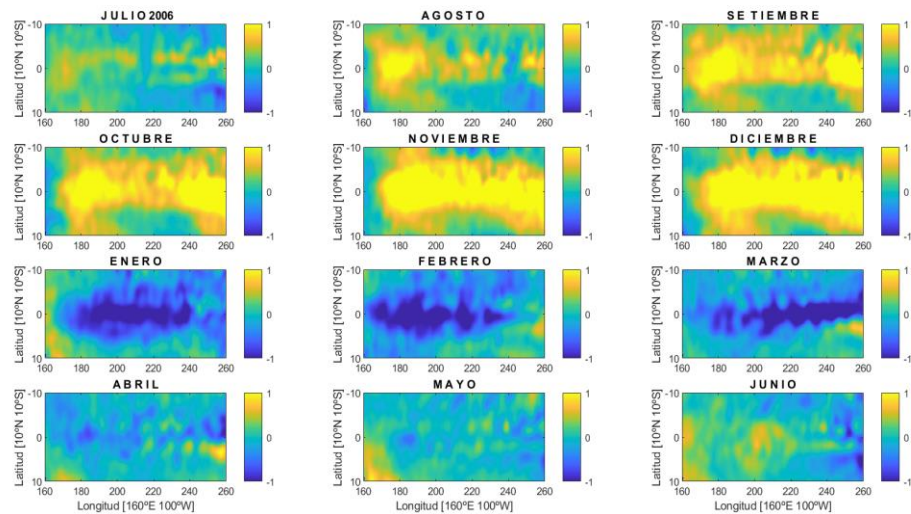
1.25 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2003



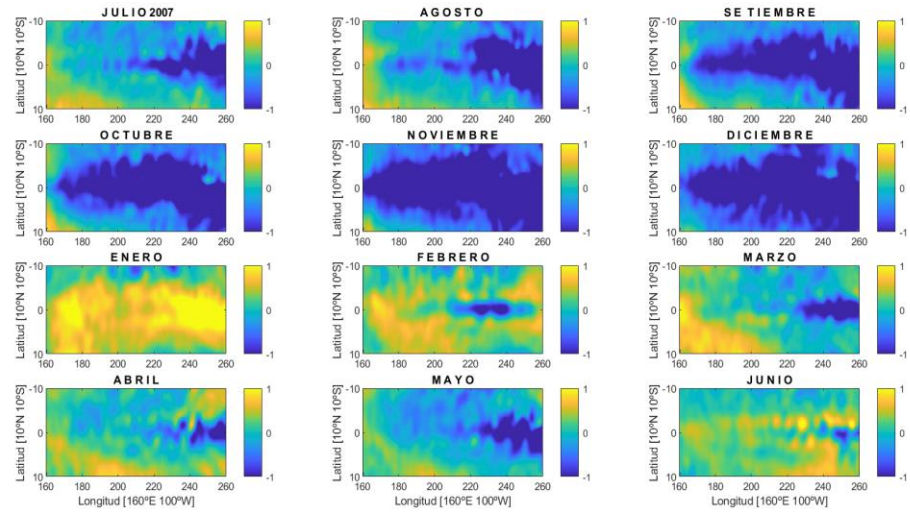
1.26 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2004



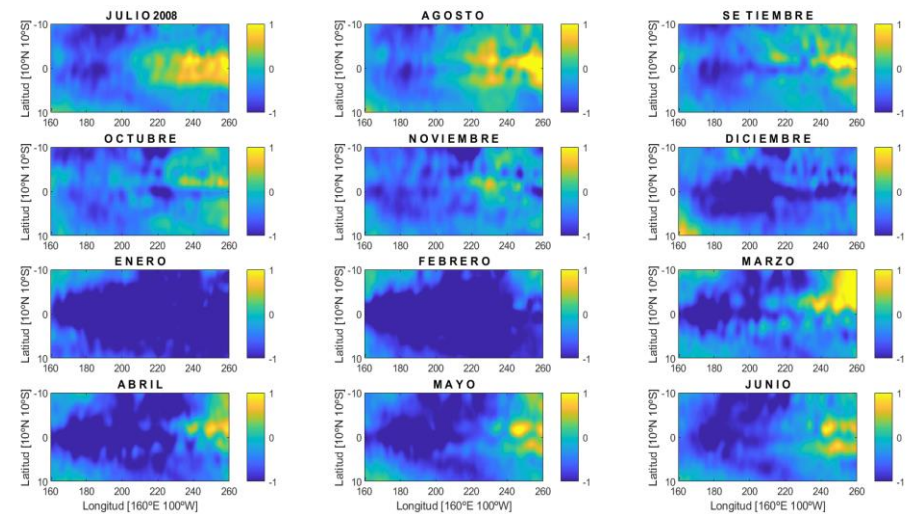
1.27 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2005



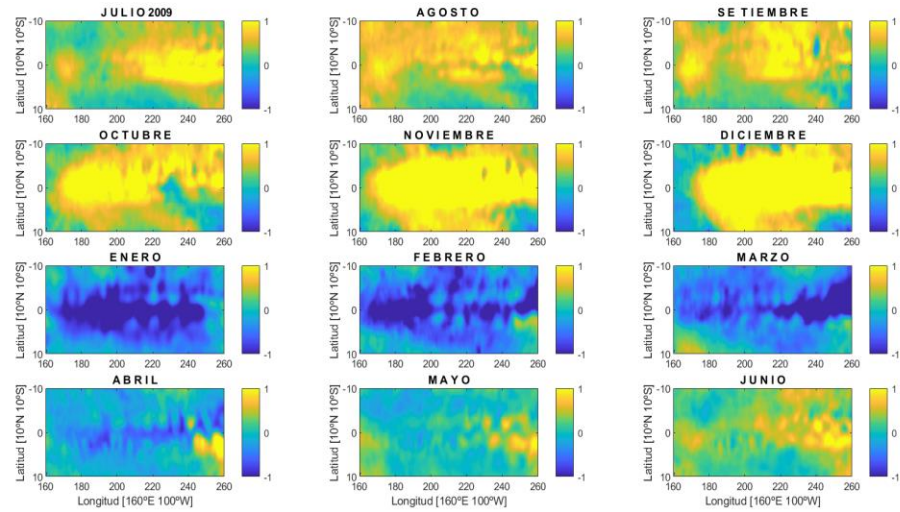
1.28 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2006



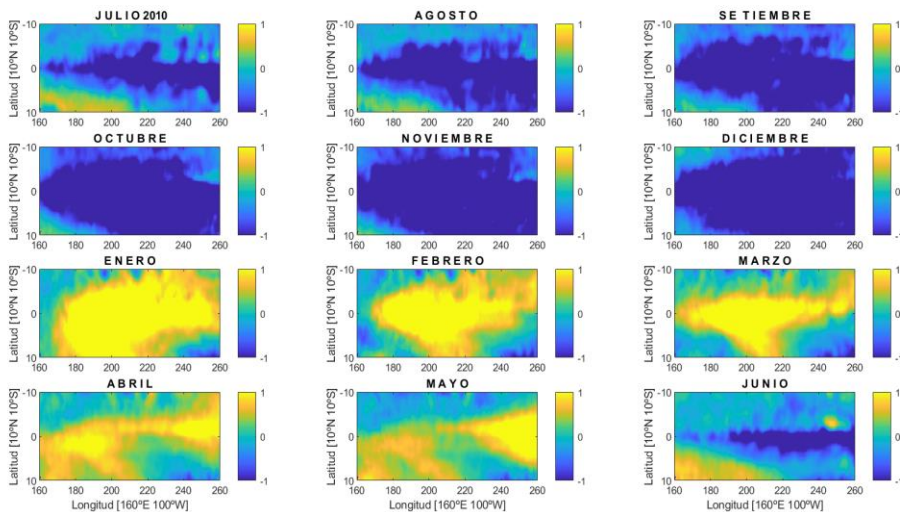
1.29 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2007



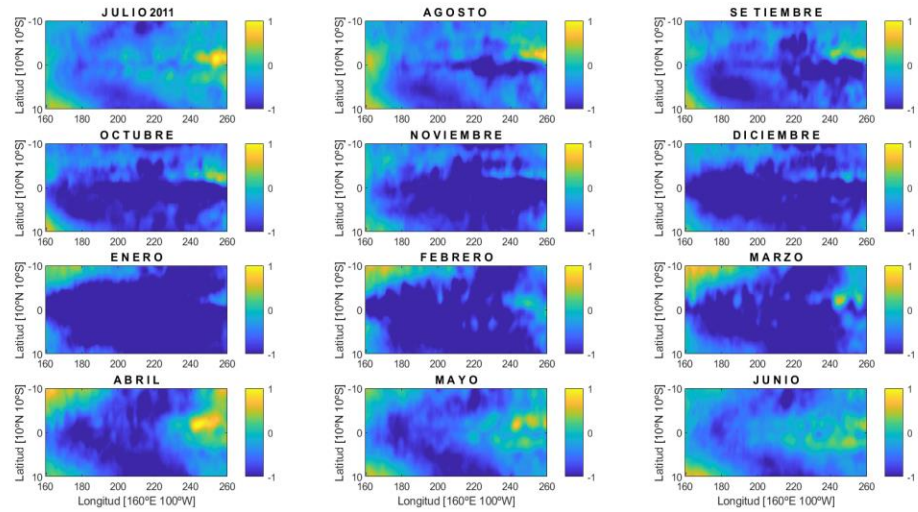
1.30 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2008



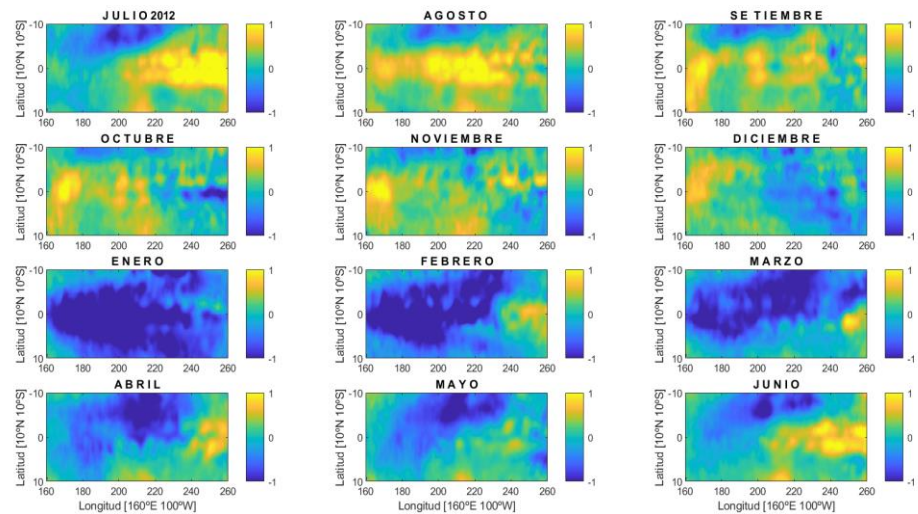
1.31 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2009



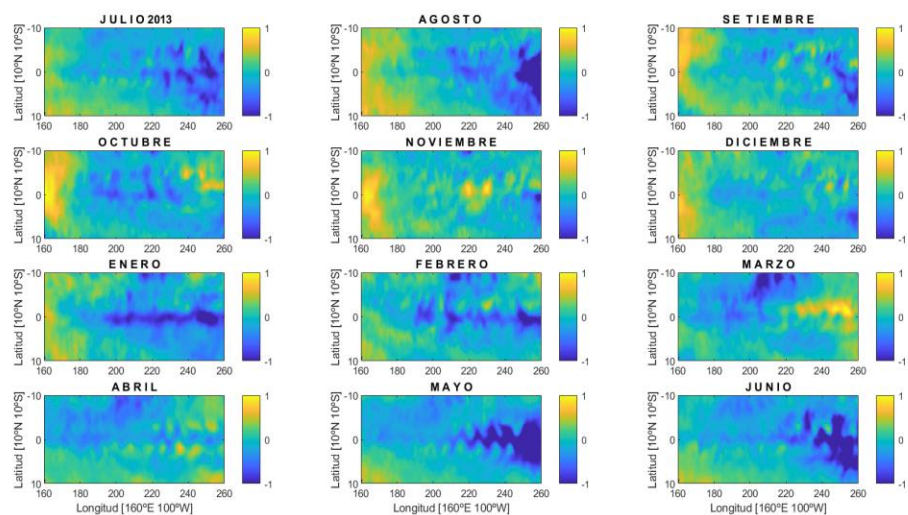
1.32 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2010



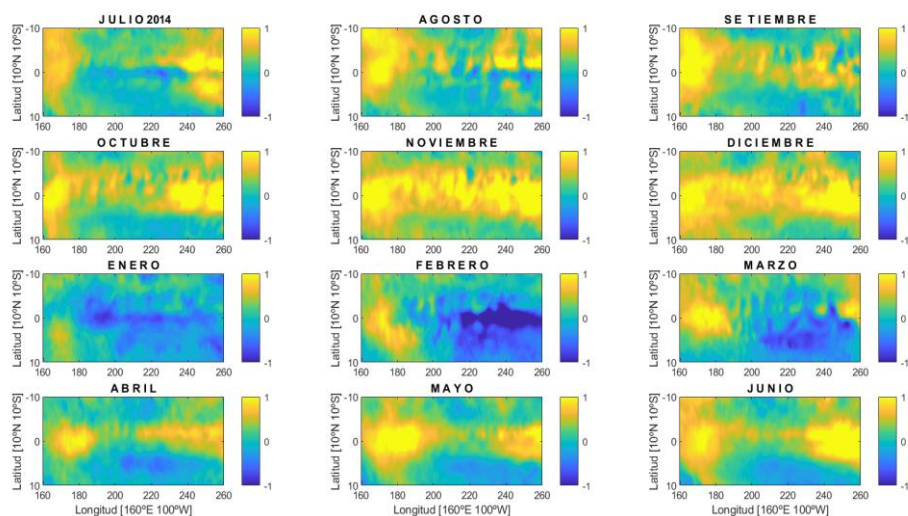
1.33 Anomía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2011



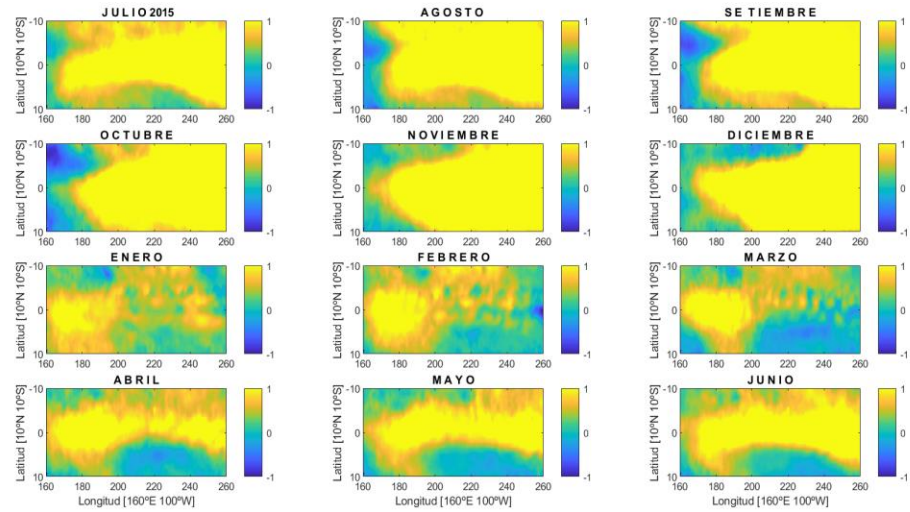
1.34 Anomía temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2012



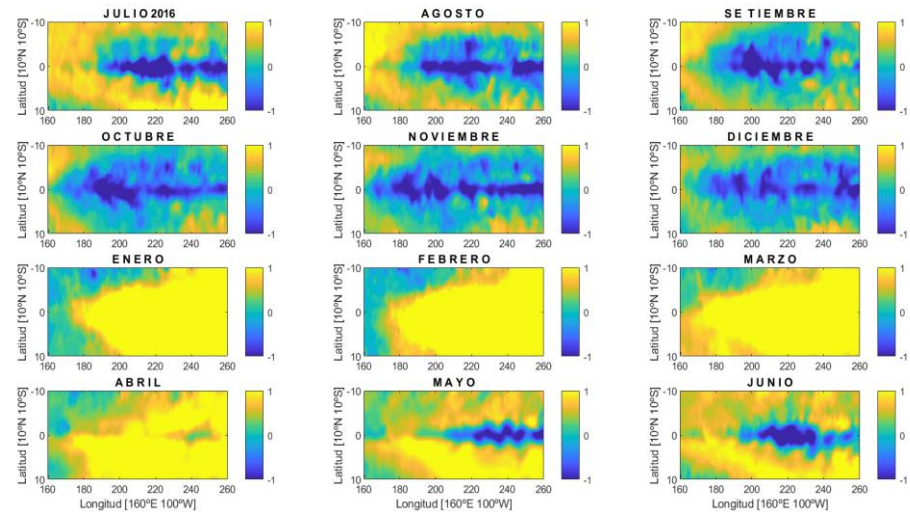
1.35 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2013



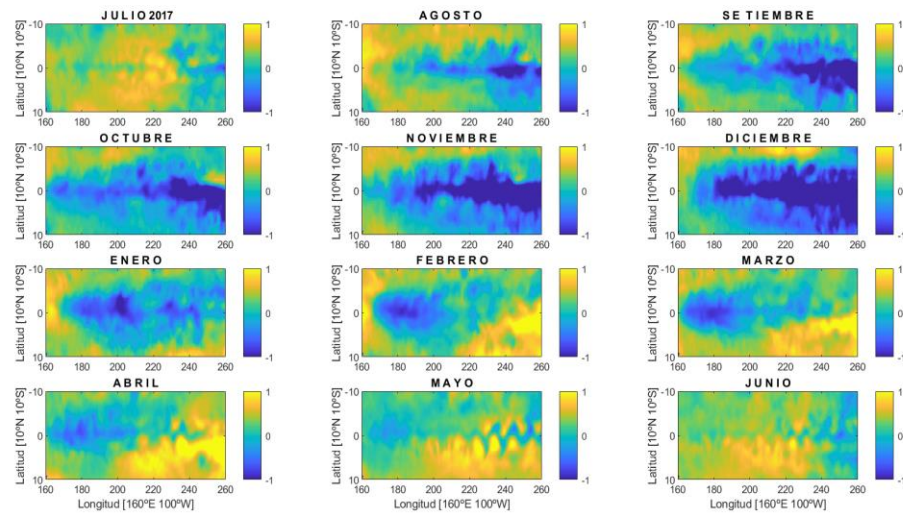
1.36 Anomalia temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2014



1.37 Anomalías de temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2015



1.38 Anomalías de temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2016



1.39 Anomalías de temperatura superficial del océano (ATSO) del año 2017

Anexo 2. Código para la descripción geométrica de la variable oceánica TSO, representación graficas de diagramas hovmöller y Descomposición en valores singulares.

```
% clear all;
```

```
% close all;
```

```
% clc;
```

```
% % % DATA : https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/
```

```
% % FUENTE: Centro europeo de pronósticos meteorológicos a medio  
plazo(ECMWF)
```

```
% % Autor : FernandoTorresGuerrero aftguerrero@gmail.com
```

```
%
```

```
% ruta = pwd; %ruta carpeta donde esta la data
```

```
% c = dir('????'); %#carpetas en la data
```

```
% for j = 3:length(c);
```

```
% h{j-2}= c(j).name; %tomo solo las carpetas con data, h me separa con ...
```

```
% %corchotes las carpetas/año con data
```

```
% end
```

```
% r=1;

% matriz_madre=[ ]; %matriz multidimensional con data

%

% for k = 1:length(h) %toma todas las carpetas/año con data
%     ruta1 = fullfile(pwd,h{k}); %acceso cada carpeta/año
%     cd(ruta1) %permite la entrada a cada carpeta
%
% a = dir([ruta1,'*.nc']); % toma archivos .nc en cada año/meses
% meses = { a(4).name a(5).name a(8).name a(1).name a(9).name a(7).name
a(6).name a(2).name a(12).name a(11).name...
%         a(10).name a(3).name }; %ordeno los años de Ene-Dic
% filename = meses{1};
% ncdisp(filename) ;
% latitude = ncread(filename,'latitude'); % EXTRAER VARIABLE LAT DEL ARCHIVO
NETCDF LATITUD 10N - -10S
% longitude = ncread(filename,'longitude'); %EXTRAER VARIABLE LON DEL
ARCHIVO NETCDF LONGITUD 160E - 260E
%
% %Este bucle extrae de cada archivo año/mes la variable SST, toma promedios
% %en la 3 dimensión y concatena progresivamente la matriz madre.
%
% for i = 1:length(meses) %#meses a tomar por año
%     filename = meses{i};
%     ncdisp(filename) ;
%     temp = ncread(filename,'sst'); %EXTRAER LA MATRIZ DATOS ORIGINAL
DE 3 DIMENSIONES DEL ARCHIVO NETCDF
%     temp1 = temp-273.15; % GRADOS KELVIN A GRADOS °C
```

```
%      suma = sum(temp1,3); %suma elemento a elemento en la tercera dimensión
%      promedio = suma/size(temp,3); %con la división obtenemos promedio, es
%      decir pasamos..

%      % 3 dimensión de SST (registros diarios) a 2 dimensión (registro
%      promedio mensual)

%      matriz_madre(:, :, r) = promedio;

%      r = r+1;

%      %pause(0.5)

% end

% cd .. %salida de la carpeta

% end

% matriz_madre; % matriz 3 dimensiones con promedios mensuales de SST.

%

% %% VECTOR TIEMPO REPRESENTADO EN MESES.

%

% time=[];

% for i=1:468

%     yd=1979+i * 1/12; %Acumulador de años

%     time = [time yd];

% end

% ntime = length(time); %tamaño vector tiempo

%

% %% GRAFICAMENTE PASO A PASO A TRAVÉS DEL TIEMPO LA SST

%

% % VALORES MAXIMOS Y MINIMOS DE LAS COORDENADAS
% GEOGRAFICAS.

%
```

```
% latmax = max(latitude);
% latmin = min(latitude);
% lonmax = max(longitude);
% lonmin = min(longitude);
% timemin = min(time)
% timemax = max(time)
% nlat = (latmax - latmin)/0.125 + 1;
% nlon = (lonmax - lonmin)/0.125 + 1;
% ns = nlat*nlon; %espacio cuadrícula
%
%
% % matriz_madre2=reshape(matriz_madre,[prod(size(suma)),468]) ;
% %
% % for i =440 %1:ntime
% %   SSTi = reshape(matriz_madre2(:,i),nlon,nlat);
% %   image([lonmin lonmax],[latmin latmax],SSTi,'CDataMapping','scaled')
% %   xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% %   ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% %   axis xy
% %   title(['Junio ' num2str(time(i))])
% %   colorbar
% %   getframe;
% %   pause(0.2)
% % end
%
% %% PROMEDIOS EN LAS DOS DIRECCIONES CON DIAGRAMAS
% HOVMÖLLER
```

```
%  
% array_meanlo=[];  
% for i=size(matriz_madre,2); %promedios en sentido longitudinal  
%   Meantemp = nanmean(matriz_madre,2); %promedios sin afectar por NAN  
%   array_meanlo = [array_meanlo Meantemp];  
% end  
%  
% % GRAFICA HOVMÖLLER LONGITUDINAL  
%  
% % [timex,longitudex]=meshgrid(time,longitude);  
% % % subplot(1,2,1)  
% % contour(longitudex,timex,squeeze(array_meanlo))  
% % xlim([lonmin lonmax]);  
% % caxis([23 30])  
% % colorbar  
% % ylabel('Tiempo (Meses)'); xlabel('Longitud [160°E - 110°W]')  
% % title('HOVMÖLLER TSO LONGITUDINAL ENE1979 - DIC2017')  
% % grid on  
%  
% % GRAFICA HOVMÖLLER LATITUDINAL  
%  
% array_meanl=[];  
% for i=size(matriz_madre,1); %promedios en sentido latitudinal  
%   Meantemp = nanmean(matriz_madre,1); %promedios sin afectar por NAN  
%   array_meanl = [array_meanl Meantemp];  
% end  
%
```

```
% % GRAFICA HOVMÖLLER LATITUDINAL
%
% % [timex,latitudex]=meshgrid(time,latitude);
% % % subplot(1,2,2)
% % contour(squeeze(latitudex),squeeze(timex),squeeze(array_meanl))
% % xlim([latmin latmax]);
% % caxis([23 30])
% % colorbar
% % ylabel('Tiempo(Meses)'); xlabel('Latitud [10°N - 10°S]')
% % title('HOVMÖLLER TSO LATITUDINAL ENE1979 - DIC2017')
% % grid on
%
% %% DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES LONGITUDINAL (DVS).
%
% % array_meanlo=reshape(array_meanlo,[801,468]);
% % [U,Sigma,V] = svd(array_meanlo,0);
% % s = diag(Sigma); % vector de valores singulares
% %
% % % ¿ VARIANZA ACUMULATIVA ??
% % plot(cumsum(s.^2)/(ns*ntime),'x');
%
% % % FRACCIÓN DE LA VARIANZA EXPLICADA POR LOS MODOS (1) Y (2)
%
% % varfrac1 = s(1)^2/sum(s.^2);
% % varfrac2 = s(2)^2/sum(s.^2);
% %% DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES LATITUDINAL (DVS).
%
```

```
% % array_meanl=reshape(array_meanl,[161,468]);
% % [U,Sigma,V] = svd(array_meanl,0);
% % s = diag(Sigma); % vector de valores singulares
% %
% % % ¿ VARIANZA ACUMULATIVA ??
% % plot(cumsum(s.^2)/(ns*ntime),'x');
%
% % % FRACCIÓN DE LA VARIANZA EXPLICADA POR LOS MODOS (1) Y (2)
%
% % varfrac1 = s(1)^2/sum(s.^2);
% % varfrac2 = s(2)^2/sum(s.^2);
```

Anexo 3. Código para generar grafica ciclo anual TSO.

```
% %% MATRIZ SEPADARO POR MESES
% meses={'enero_todo','febrero_todo','marzo_todo','abril_todo','mayo_todo',...
%       'junio_todo','julio_todo','agosto_todo','septiembre_todo',...
%       'octubre_todo','noviembre_todo','diciembre_todo'};
% for j=1:size(meses,2)
%     kk=1;
%     for k=j:12:size(matriz_madre,3)
%         eval([[meses{j}],'(:,',num2str(kk),')'],['=matriz_madre(:,',num2str(k),')']]);
%         kk=kk+1;
%     end
% end
% %% MATRIZ DE VALORES MEDIO POR MESES
% meses_promedio={'enero_prom','febrero_prom','marzo_prom','abril_prom',...
% 'mayo_prom','junio_prom','julio_prom','agosto_prom','septiembre_prom',...
```

```
% 'octubre_prom','noviembre_prom','diciembre_prom';
%
% for j=1:size(meses_promedio,2)
%     u=nanmean(eval(meses{j}),3);
%     eval([meses_promedio{j},'=' ,'u'])
% end
%
% %% GRAFICA DE CICLO ANUAL PARA 39 AÑOS TSO
% time=[];
% for i=1:468
%     yd=1979+i * 1/12; %Acumulador de años
%     time = [time yd];
% end
% latmax = max(latitude);
% latmin = min(latitude);
% lonmax = max(longitude);
% lonmin = min(longitude);
% timemin = min(time)
% timemax = max(time)
% nlat = (latmax - latmin)/0.125 + 1;
% nlon = (lonmax - lonmin)/0.125 + 1;
% ns = nlat*nlon; %espacio cuadrícula
%
%                                     subplot(4,3,1),image([lonmin      lonmax],[latmin
latmax],julio_prom','CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
```

```
% title([' J U L I O ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,2)
% image([lonmin lonmax],[latmax latmin],agosto_prom,'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' A G O S T O ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,3)
%
% image([lonmin lonmax],[latmin
latmax],septiembre_prom,'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' S E T I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,4)
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],octubre_prom,'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' O C T U B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
```

```
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,5)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],noviembre_prom','CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' N O V I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,6)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],diciembre_prom','CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' D I C I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,7)
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],enero_prom','CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' E N E R O ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
```

```
%  
  
% subplot(4,3,8)  
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],febrero_prom','CDataMapping','scaled')  
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')  
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')  
% title([' F E B R E R O '] %num2str(time(i))))  
% colorbar  
% caxis([22 30])  
  
%  
  
% subplot(4,3,9)  
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],marzo_prom','CDataMapping','scaled')  
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')  
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')  
% title([' M A R Z O '] %num2str(time(i))))  
% colorbar  
% caxis([22 30])  
  
%  
  
% subplot(4,3,10)  
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],abril_prom','CDataMapping','scaled')  
% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')  
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')  
% title([' A B R I L '] %num2str(time(i))))  
% colorbar  
% caxis([22 30])  
  
%  
  
% subplot(4,3,11)  
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],mayo_prom','CDataMapping','scaled')
```

```
% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' M A Y O '] %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
%
% subplot(4,3,12)
% image([lonmin lonmax],[latmin latmax],junio_prom','CDataMapping','scaled')
% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' J U N I O '] %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([22 30])
```

Anexo 4. Código para representación gráfica de anomalías de la variable temperatura superficial del océano (ATSO).

```
% %% HALLAR ANOMALIAS/MES PARA TODA LA DATA

% meses_anomalia={'enero_anom','febrero_anom','marzo_anom','abril_anom',...
% 'mayo_anom','junio_anom','julio_anom','agosto_anom','septiembre_anom',...
% 'octubre_anom','noviembre_anom','diciembre_anom'};

% for j=1:size(meses_anomalia,2)
%     v=eval(meses{j});
%     w=eval(meses_promedio{j});
%     q=v-w;
%     eval([meses_anomalia{j},'=q']);
% end
%
% %% IDENTIFICAR ANOMALIA MAX - MIN EN TODA LA DATA
```

```
% maximo=0; minimo=0;

% for j=1:size(meses_anomalia,2)

%   v=eval(meses_anomalia{j});

%   maximo1=max(max(max(v)));

%   minimo1=min(min(min(v)));

%   if maximo1>maximo

%       maximo=maximo1;

%   end

%   if minimo1<minimo

%       minimo=minimo1;

%   end

% end

% minimo

% maximo

%

% %% GRAFICAS ANOMALIAS PARA EL AÑO 1979

%           subplot(4,3,1),image([lonmin                lonmax],[latmin
latmax],julio_anom(:,1),'CDataMapping','scaled')

%   %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')

%   ylabel('Latitud [10°N 10°S]')

%   title([' J U L I O 1979']) %num2str(time(i)))

%   colorbar

%   caxis([-1 1])

%

%   subplot(4,3,2)

%           image([lonmin                lonmax],[latmin
latmax],agosto_anom(:,1),'CDataMapping','scaled')
```

```
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' A G O S T O ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,3)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],septiembre_anom(:,1),'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' S E T I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,4)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],octubre_anom(:,1),'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' O C T U B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,5)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],noviembre_anom(:,1),'CDataMapping','scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
```

```
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' N O V I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,6)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],diciembre_anom(:, :, 1), 'CDataMapping', 'scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' D I C I E M B R E ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,7)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],enero_anom(:, :, 1), 'CDataMapping', 'scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' E N E R O ']) %num2str(time(i)))
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,8)
%
%                                     image([lonmin          lonmax],[latmin
latmax],febrero_anom(:, :, 1), 'CDataMapping', 'scaled')
% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
```

```
% title([' F E B R E R O ']) %num2str(time(i)))

% colorbar

% caxis([-1 1])

%

% subplot(4,3,9)

%                                     image([lonmin           lonmax],[latmin
latmax],marzo_anom(:, :,1),'CDataMapping','scaled')

% %xlabel('Longitud [160°E 100°W]')

% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')

% title([' M A R Z O ']) %num2str(time(i)))

% colorbar

% caxis([-1 1])

%

% subplot(4,3,10)

%                                     image([lonmin           lonmax],[latmin
latmax],abril_anom(:, :,1),'CDataMapping','scaled')

% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')

% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')

% title([' A B R I L ']) %num2str(time(i)))

% colorbar

% caxis([-1 1])

%

% subplot(4,3,11)

%                                     image([lonmin           lonmax],[latmin
latmax],mayo_anom(:, :,1),'CDataMapping','scaled')

% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')

% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')

% title([' M A Y O ']) %num2str(time(i)))
```

```
% colorbar
% caxis([-1 1])
%
% subplot(4,3,12)
% image([lonmin lonmax],[latmin
latmax],junio_anom(:, :, 1), 'CDataMapping', 'scaled')
% xlabel('Longitud [160°E 100°W]')
% ylabel('Latitud [10°N 10°S]')
% title([' J U N I O '] %num2str(time(i))))
% colorbar
% caxis([-1 1])
```