



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**VARIABILIDAD ESTACIONAL E INTERANUAL DE
LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN EL
GOLFO DE URABÁ**

Autor(es)

Cristian Ferney Álvarez Bedoya

Juan Sebastián Ruiz Vivares

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental

Turbo, Colombia

2021



Variabilidad estacional e interanual de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Urabá.

Cristian Ferney Álvarez Bedoya
Juan Sebastian Ruiz Vivares

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Oceanográfico

Asesores (a):

PhD. Vladimir G. Toro Valencia (Universidad de Antioquia)

PhD. Manel Grifoll (Universidad Politécnica de Cataluña)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental
Turbo, Colombia
2021

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a nuestras familias y amigos, quienes fueron un pilar importante durante toda nuestra etapa formativa. A nuestros asesores, Vladimir Toro y Manel Grifoll por la confianza y disposición durante todo el trabajo. Gracias por brindarnos el conocimiento y las herramientas necesarias para llevar a cabo toda esta investigación.

Hacemos especial mención al Profesor Frank C. Olaya, por los algoritmos aportados durante su curso que fueron fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Como también a nuestro colega Giner Jiménez, por brindarnos los datos *in situ* usados en esta investigación, al igual que a todas las personas que hicieron parte de la recolección de estos.

Por último y no menos importante a la Universidad de Antioquia, a todos los docentes que nos formaron y aportaron en nuestro desarrollo integral, junto a nuestros compañeros que hicieron todo esto posible.

RESUMEN

La temperatura de la superficie del mar (TSM) es un fuerte indicador de la contaminación y la productividad del océano. Asimismo, es un importante impulsor del cambio climático, por lo que su monitoreo continuo nos permite comprender los procesos oceanográficos y meteorológicos de corto a largo plazo. Con el propósito de avanzar en los procesos físicos en el Golfo de Urabá (GU) Colombia, este aporte caracteriza la variabilidad estacional e interanual de la TSM, así como su relación con los índices del fenómeno El Niño (ENOS) región 3 y 3.4. GU, ubicada en el suroeste del Mar Caribe, tiene unos 80 km de largo y 24 km de ancho. La SST del producto GHRSSST, que tiene una resolución espacial de 1 km durante un período de 18 años (2003-2020), se analizó mediante una descomposición aditiva. Los resultados muestran una variabilidad estacional sustancial con temperaturas más altas durante septiembre (temporada de lluvias), con un promedio de $29,3^{\circ}\text{C}$. La TSM más baja se observó en marzo (estación seca) con un promedio de $27,4^{\circ}\text{C}$. El valor medio de TSM por todo el período fue de $28,6^{\circ}\text{C}$. La variabilidad espacial muestra pequeñas variaciones con mayor temperatura en el norte (diferencias del orden de $0,1^{\circ}\text{C}$). Los residuos de temperatura se calculan extrayendo la tendencia y el ciclo estacional de la serie de tiempo original. Se encuentran correlaciones insignificantes entre ENSO y residuos (0.25 y 0.21, para región 3 y 3.4, respectivamente), así como ENSO y anomalías (0.34 y 0.35, por región 3 y 3.4, respectivamente). Estos resultados sugieren que ENSO no modula la SST en GU y su variabilidad responde principalmente a procesos estacionales. En trabajos futuros, se espera corroborar las correlaciones entre El Niño y La Niña y valores residuales, y posible proceso de transporte de Ekman.

Palabras clave: temperatura superficial del mar, Golfo de Urabá, ENOS, ciclos estacionales.

ABSTRACT

Sea Surface Temperature (SST) is a strong indicator of pollution and ocean productivity. Likewise, it is an important driver of climate change, so its continuous monitoring allows us to understand oceanographic and meteorological processes from short to long term. With the purpose of advancing in the physical processes in the Gulf of Urabá (GU) Colombia, this contribution characterizes the seasonal and interannual variability of the SST, as well as its relationship with the indexes of El Niño phenomenon (i.e. ENSO) sector 3 and 3.4. GU, located in the south-western of Caribbean Sea, is about 80 km long and 24 km wide. SST from the GHRSSST product, which has a spatial resolution 1 km over a period of 18 years (2003-2020), was analyzed using an additive decomposition. Results shows a substantial seasonal variability with highest temperatures during September (wet season), with an average of 29.3 °C. The lowest SST was observed in March (dry season) with an average of 27.4 °C. The mean value of TSM by the entirely period was 28.6°C. Spatial variability show small variations with higher temperature at north (differences of the order 0.1 °C). Temperature residuals are calculated extracting trend and seasonal cycle from the original time-series. Negligible correlation are found between ENSO and residuals (0.25 y 0.21, by region 3 y 3.4, respectively), as well as ENSO and anomalies (0.34 and 0.35, by region 3 and 3.4, respectively). These results suggest that ENSO does not modulate the SST in GU and its variability respond mainly to seasonal processes. In future work, it is expected to corroborate the correlations between El Niño y La Niña and residuals values, and possible Ekman transport process.

Keywords: sea surface temperature, Gulf of Urabá, ENSO, seasonal cycles.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	9
2	OBJETIVOS	12
	2.1 Objetivo General	12
	2.2 Objetivos Específicos.....	12
3	MARCO TEÓRICO.....	13
	3.1 Temperatura superficial de mar (TSM)	13
	3.2 Datos satelitales	13
	3.3 Fenómeno de El Niño y La Niña (ENSO)	16
4	ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	18
	4.1 Área de estudio	18
	4.2 Metodología	19
	4.2.1 Datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM).....	19
	4.2.2 Datos del índice oscilación del sur- El Niño	20
	4.2.3 Datos in situ.....	21
	4.2.4 Productos y/o cálculos estadísticos	22
5	RESULTADOS.....	24
	5.1 Campos espaciales de la TSM a partir de datos satelitales.....	25
	5.2 Patrones espaciales y temporales de la TSM a partir de los datos satelitales	30
	5.3 Posibles relaciones del fenómeno ENSO con la TSM del golfo	34
6	CONCLUSIONES	37
7	TRABAJOS FUTUROS	38
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

9 ANEXOS 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Gradiente de temperatura cerca de la superficie. Tomado de Minnett & Kaiser-Weiss (2012).</i>	15
Figura 2. <i>Regiones del Pacífico donde se hace seguimiento del fenómeno ENSO. Tomado de IDEAM (2010).</i>	17
Figura 3. <i>Área de estudio del Golfo de Urabá. Fuente: Propia</i>	18
Figura 4. <i>Puntos de los datos in situ. (a) Sitios de medición durante época seca medidos por Calderón (2019). (b) Sitios de medición durante época húmeda medidos por Velásquez y Guevara (2018).</i>	22
Figura 5. <i>Gráfica de dispersión de datos de la TSM medidos in situ y obtenidos satelitalmente, recuadro naranja datos tomados en época seca, recuadro rojo datos tomados en época húmeda</i>	24
Figura 6. <i>Campos espaciales de promedios mensuales multianuales de TSM en el GU para el periodo 2003-2020.</i>	27
Figura 7. <i>Campos espaciales mensuales multianuales de anomalía de TSM en el GU para el periodo 2003-2020.</i>	29
Figura 8. <i>Serie de tiempo estacional promedio de la TSM para el GU.</i>	30
Figura 9. <i>Calculo de los residuales de la serie de TSM. (a) Serie de tiempo de TSM en el centro del GU. (b) Valores de tendencia para la serie temporal. (c) Valores de la componente estacional. (d) Residuos de la serie.</i>	32

Figura 10. (a) *Serie temporal de residuales de la TSM (rojo) y serie con una media móvil de 3 meses (azul)* (b) *Serie temporal de anomalías de la TSM (verde) y serie con una media móvil de 3 meses (magenta)*..... 33

Figura 11. (a) *Grafica de media móvil de los residuos de la TSM (negra), y los índices de El Niño de la región 3 (rojo) y región 3.4 (azul)* .(b) *Correlación cruzada entre los índices de El Niño región 3(azul) y región 3.4(naranja) con los residuales de la serie de TSM para un rezago de 24 meses.* 34

Figura 12. *Correlación cruzada entre los índices de El Niño región 3(azul) y región 3.4(naranja) con las series temporales de los residuos suavizado y la correlación cruzada entre la anomalía suavizada de la serie de TSM y los índices de El Niño región 3 (amarilla) y región 3.4 (morada) para un rezago de 24 meses.*..... 35

1 INTRODUCCIÓN

La temperatura superficial del mar (TSM) es una de las variables oceánicas que sirven como indicador del cambio climático (Ortiz, 2019). Esta variable está relacionada con procesos físicos como intensidad de las corrientes marinas y los vientos superficiales, dinámica de la capa de mezcla, precipitación, intensidad de la radiación solar, surgencias y cambios del nivel del mar (Bernal *et al.*, 2006). Por otro lado, su variabilidad puede modular los ciclos de vida de organismos biológicos. Por lo tanto, su estudio y monitoreo permanente, permite avanzar en el entendimiento y pronóstico de procesos oceanográficos, biológicos y meteorológicos. (Hernández, 2002; Iglesias *et al.*, 2010; Sohou *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

La variabilidad estacional e interanual de la TSM, ha sido ampliamente estudiada en el mar Caribe (CC) y Pacífico colombiano (PC). En la región del PC la TSM promedio es de 28.2°C, con valores mínimos de 27.8°C en noviembre y máximos de 28.5°C en marzo. Giraldo (2008), en campañas de muestreo entre septiembre del 2007 y marzo del 2008 y utilizando datos de 24 estaciones encontró valores entre 26,8°C y 28,6°C.

El IDEAM (2010) usando la base de datos del centro NOAA, para el periodo de 1971 a 2000, determinó un promedio de TSM para la región del Caribe colombiano (entre 8°N y 15°N; entre 84°W y 70°W) de ~27.7°C. En esta zona la TSM estuvo caracterizada predominantemente por un comportamiento estacional bimodal con dos picos máximos de 28.1°C y 28.6°C, en junio y octubre, respectivamente (época húmeda). Y una temperatura mínima de 26.6°C en febrero (época seca). La época húmeda para la región del CC se presenta entre mayo y noviembre, cuando los vientos alisios son débiles y la contracorriente superficial Panamá-Colombia está más

desarrollada. Durante la época seca, diciembre a abril, los vientos alisios del NE son más intensos (Poveda *et al.*, 1999; Bernal *et al.*, 2006; Serna *et al.*, 2018).

Respecto al Fenómeno Oscilación del Sur (ENSO), en CC se han encontrado anomalías positivas de la TSM (Hernández 2002; IDEAM, 2010; González *et al.*, 2015). De acuerdo con Poveda *et al.* (1997), encontró un rezago de máxima correlación entre 5 y 6 meses para la TSM y el ENSO. De igual manera el IDEAM (2010), encontró valores de correlación entre 0.4 y 0.5, con un rezago positivo entre 5 y 8 meses. Estos resultados muestran como en el CC los efectos sobre la TSM se presentan con un retraso promedio de 6 meses respecto al fenómeno ENSO (Bernal *et al.*, 2006). De igual manera Montoya (2014), analizó el intercambio de calor en el CC, utilizando información medida y modelada. Encontró una correlación significativa entre los valores de anomalías del ENSO y el contenido de calor, con rezagos de hasta 4 meses.

En lo que respecta al golfo de Urabá (GU), la TSM varía entre 26.5 y 31.5°C con dos épocas climáticas bien definidas (Calderón, 2019; Mercado y Hernández, 2020). La época seca (diciembre-abril), dominada por vientos intensos del Norte y Noreste, con una TSM promedio de 27°C y la época húmeda (mayo-noviembre) con vientos débiles predominante del Sur con una TSM promedio de 28.5°C (Chevillot *et al.*, 1993; Bernal *et al.*, 2005). Estos valores son similares a los reportados por INVEMAR (2007). Estos autores interpolaron datos de 79 estaciones de medición de dos cruceros oceanográficos realizados en febrero de 2003 y octubre de 2004. Los valores promedios son 28.5°C en época húmeda y 27.5°C en época seca.

Utilizando información satelital, se han realizado caracterizaciones de las condiciones de la TSM en el GU. Pacheco (2018), utilizó datos de MODIS (resolución espacial de 4 km) entre el 2003-2017 para caracterizar la distribución espacial de la clorofila y la TSM. Calculó campos

mensuales promedios, aunque con variaciones significativas entre los meses de diciembre-enero y abril-mayo. Con el fin de avanzar en el conocimiento de los procesos físicos en el GU, y de manera específica en lo relacionado con TSM se propone el uso de la base de datos ERDDAP para el periodo 2003-2020. Esta base de datos tiene una resolución espacial 1km y una resolución temporal diaria o mensual. Los datos medidos de manera satelital se compararán con datos medidos *in situ*, y se calcularán los promedios mensuales de la TSM y su posible relación con el fenómeno del ENSO. Nuestra hipótesis de trabajo, es que precisamente la TSM es afectada por procesos interanuales y estacionales.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la temperatura superficial del mar en el golfo de Urabá.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los patrones espaciales y temporales de la TSM en el GU a partir de los datos satelitales e *in situ*.
- Definir los valores de tendencia y estaciones de las series de datos de TSM analizados.
- Proponer las posibles relaciones del fenómeno ENSO con la TSM del GU.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Temperatura superficial de mar (TSM)

La TSM es considerada una variable climática y oceanográfica de gran importancia ya que puede afectar físicamente las masas de agua, cambiando por ejemplo su densidad. Esta temperatura es modificada por el intercambio de temperatura entre la atmósfera y la capa superficial del océano. Sus variaciones tienen un alcance importante en las predicciones climáticas, en la formación de huracanes y por supuesto en el clima regional y global. De igual manera en la expansión termal del océano que modula el aumento del nivel del mar.

Asimismo tiene un gran efecto en la biología marina ya que muchos microorganismos pueden verse afectados en sus tasas de crecimiento. Se ha vinculado el aumento en la TSM con el blanqueamiento coralino al igual que con los afloramientos de algas marinas nocivas y con ciertas migraciones de vertebrados marinos. De otro lado, algunos procesos químicos puede verse afectados por cambios en la TSM, así como el intercambio continuo de gases entre el océano y la atmósfera

De la capa superficial del océano es posible obtener datos de la temperatura por medio de mediciones satelitales de la radiación termal captadas por los radiómetros infrarrojos (Minnet & Barton, 2010). Estas mediciones satelitales presentan pequeñas diferencias con respecto a las mediciones *in situ*, por lo que estas mediciones han adquirido gran importancia en la actualidad.

3.2 Datos satelitales

En los análisis de variabilidad espacial y temporal de la TSM, numerosos autores han utilizado datos satelitales. Algunas de estas investigaciones realizaron comparaciones con datos *in situ*, con el fin de entender de manera adecuada procesos espaciales (Goubanova *et al.*, 2013;

Moradi & Kabiri, 2015; Brewin *et al.*, 2017; Cepeda-Morales *et al.*, 2017; Brewin *et al.*, 2018; Pacheco, 2018; Ortiz, 2019; Quispe *et al.*, 2019; Vanhellemont, 2020).

Con las mediciones satelitales es posible calcular las temperaturas irradiadas por la capa límite del mar (skin layer) la cual tiene menos de 1mm de grosor (Hanafin, 2002). Esta capa no es representativa de toda la capa superficial, ya que su temperatura puede ser un poco más fría que el agua que está debajo. Esto debido a procesos de transferencia de calor que generalmente es del océano a la atmosfera, la interacción con el viento, radiación reflejada y la evaporación en la superficie (Minnett & Barton, 2010; Ortiz, 2019). De acuerdo con Robinson (2004) existen tres grandes debilidades en las comparaciones de datos satelitales con datos *in situ*: (i) los sensores de las boyas no toman datos de la capa limite si no de la capa que está debajo de esta; (ii) es imposible tener mediciones *in situ* de todas las partes del océano; (iii) la precisión de los valores de la capa limite son derivados de ecuaciones empíricas basadas en los mismos datos medidos por las boyas. En el caso de los satélites hay ciertos inconvenientes como la presencia de nubosidad que impiden la recepción adecuada de las ondas generando vacíos de información.

En la Figura 1 se presenta un esquema con los gradientes de temperatura en la capa superficial para el día y la noche hasta los primeros 10 metros de la columna de agua. Autores como (Minnet *et al.*, 2019) consideran que el valor más representativo de la TSM se encuentra en estos primeros 10 metros de profundidad. De acuerdo con Minnett & Barton (2010), esos gradientes se producen debido a tres procesos: absorción de la radiación solar, el intercambio de calor entre océano y atmosfera y los niveles de turbulencia en la capa limite.

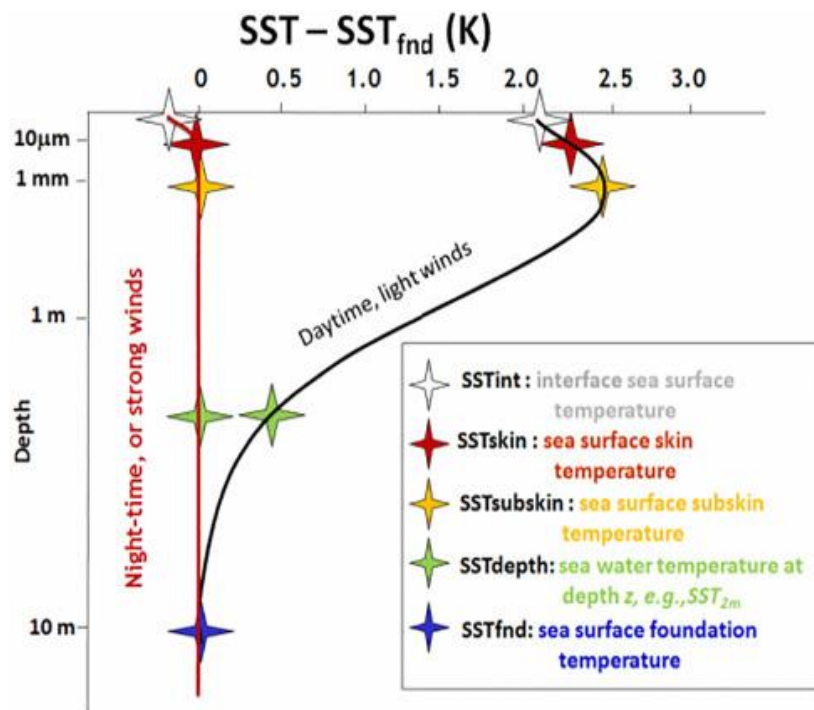


Figura 1. Gradiente de temperatura cerca de la superficie. Tomado de Minnett & Kaiser-Weiss (2012).

Con el fin de realizar estudios adecuados del ambiente térmico del océano, es importante contar con información de alta calidad combinando datos satelitales, mediciones *in situ* y datos de modelos numéricos (Donlon *et al.*, 2002). En el repositorio de bases de datos satelitales de libre acceso, se encuentran diversas plataformas de las cuales es posible acceder a datos de la TSM. En estas bases de datos se encuentran datos medidos por diferentes satélites equipados con sensores que obtienen información de numerosas variables oceanográficas. Cepeda-Morales *et al.* (2017) con el objetivo de analizar la variabilidad estacional de la clorofila y la temperatura usaron dos bases de datos para diferentes periodos con el fin de obtener una serie continua de datos. Los periodos utilizados fueron 1985 a 2009, con los datos medidos por el sensor AVHRR-Pathfinder y 2010 a 2014 con las mediciones realizadas con sensor MODIS. Ambos datos analizados tenían una resolución espacial de ~4km.

En el caso de Quispe *et al.* (2019) utilizaron múltiples bases de datos satelitales (AVHRR oiv2, MW-only, MW-IR-oi, NAVO, MUR) con diferentes periodos de tiempo y con resoluciones espaciales desde $\frac{1}{4}$ de grado a $\frac{1}{90}$ de grado. Estos autores realizaron una comparación con datos *in situ* medidos en campañas oceanográficas realizadas entre los años 2013 y 2016. De otro lado, Ortiz (2019) llevo a cabo el análisis de la variación de la TSM utilizando datos satelitales en la bahía de Mozambique durante el periodo de tiempo 2010 a 2019. Los datos utilizados fueron de GHRSSST, tienen una resolución de $\sim 1\text{km}$ y un nivel de procesamiento L4. Los datos fueron comparados con mediciones de CTD realizadas en 2017 y 2019.

3.3 Fenómeno de El Niño y La Niña (ENSO)

En Colombia en los años noventa los impactos ocasionados por el fenómeno ENSO afectó de manera importante la economía. Desde entonces, se empezaron a generar investigaciones orientadas a conocer de manera adecuada la física de estos fenómenos, y sus posibles efectos sobre el medio ambiente y los sectores productivos. Hasta ahora las investigaciones sugieren que el ENSO es uno de los principales moduladores de la variabilidad climática interanual en la franja tropical del océano Pacífico.

Las dos fases oceánicas del ENSO, El Niño y La Niña, están relacionados con la presencia de anomalías de las aguas superficiales relativamente más cálidas ($+0,5^{\circ}\text{C}$) y más frías ($-0,5^{\circ}\text{C}$) respecto a los valores promedio del Pacífico tropical central y oriental, respectivamente. Estas alteraciones de la estructura térmica del océano al parecer están asociadas con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del oeste al centro del Océano Pacífico tropical. Por lo tanto, los valores de TSM son una valiosa herramienta en el seguimiento y vigilancia de los fenómenos El Niño y La Niña (IDEAM, 2001). Con fines de

seguimiento y vigilancia del fenómeno ENSO, la comunidad científica internacional determinó 4 regiones del Pacífico, conocidas como Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 (Figura 2).

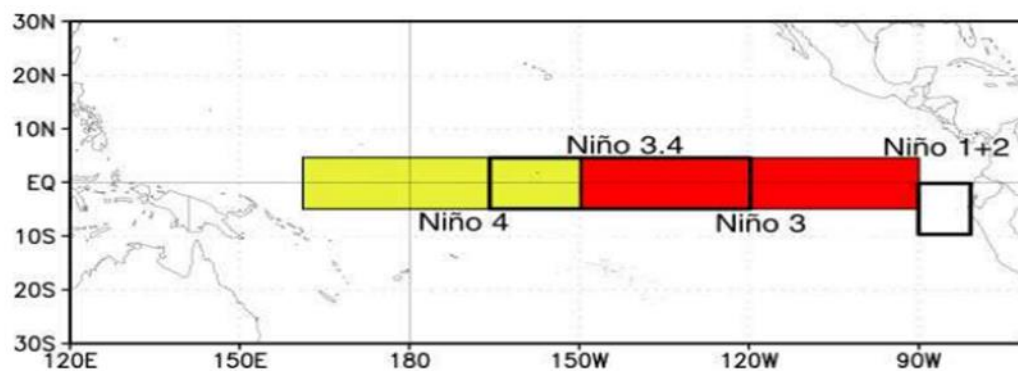


Figura 2. Regiones del Pacífico donde se hace seguimiento del fenómeno ENSO. Tomado de IDEAM (2010).

En cada una de estas regiones se mide la TSM y se determinan sus anomalías con respecto a valores promedio mensuales. El IDEAM (2007) sugiere los índices de la región Niño 3 ya que al parecer es una región con una alta dinámica oceánica, y en donde la diferenciación de las fases del Niño y Niña son más notorias. Para establecer plenamente la ocurrencia del Niño o La Niña, el índice definido debe registrar anomalías superiores a una desviación estándar durante un periodo de 3 meses consecutivos, es decir el 50% de la duración promedio de los eventos.

4 ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El golfo de Urabá (GU), es un estuario semicerrado, ubicado en el extremo occidental de la costa Caribe Colombiana. Tiene un ancho promedio oeste-este de aproximadamente 25km, 80 km en sentido sur-norte y profundidades que oscilan desde 5 a 70 m (INVEMAR, 2005; Bernal *et al.*, 2005) (Figura 3). La franja costera del golfo tiene jurisdicción de los departamentos de Antioquia y Chocó, con una extensión cercana a 543 km entre Cabo Tiburón y Puerto Rey (García y Sierra, 2007). El principal afluente que desemboca dentro del GU es el río Atrato el cual tiene una descarga promedio de 3500 m³/s, siendo el segundo río con mayor aporte de agua y sedimentos al mar Caribe (Restrepo y Kjerfve, 2000).

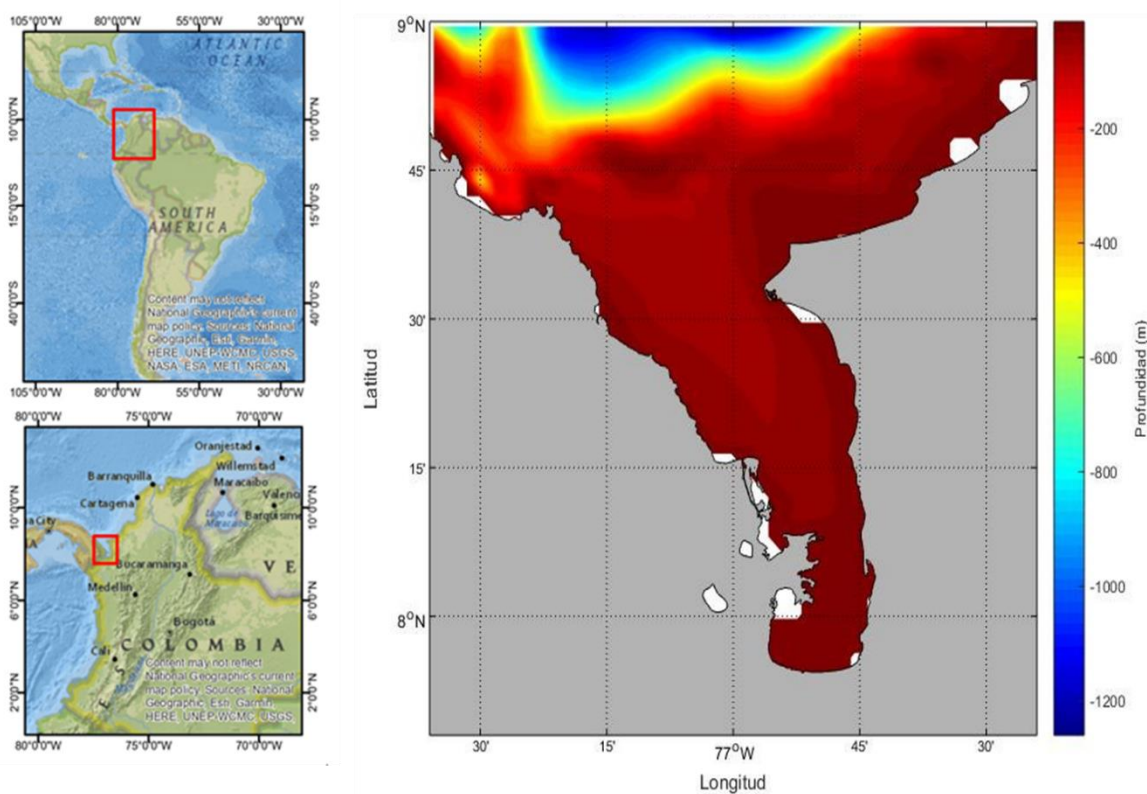


Figura 3. Área de estudio del Golfo de Urabá. Fuente: Propia

Teniendo en cuenta su ubicación geográfica, el GU presenta un clima afectado por la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ZCIT alcanza su posición más meridional entre los meses de diciembre y marzo, lo cual permite la configuración de la época seca y su posición más septentrional entre los meses de mayo y noviembre conformando la época húmeda. De acuerdo con Montoya, *et al* (2007), la época seca se caracteriza por vientos intensos (10 m/s) desde el norte y noreste y lluvias débiles y escasas. La época húmeda coincide con los vientos del suroeste con intensidades de magnitud de 2 m/s.

En la zona la radiación solar promedio es de 330 W/m², con valores máximos diarios de 694 W/m² y 841 W/m² en los meses de abril y septiembre, respectivamente. Se presenta una alta humedad relativa mensual entre 79% y 89% y una precipitación anual que varía entre 4500 mm y 1500 mm (INVEMAR, 2005).

4.2 Metodología

En este trabajo se busca ampliar el conocimiento sobre la variabilidad estacional e interanual de TSM en el GU. Con este fin se realizará el procesamiento y análisis de datos satelitales e *in situ*, generando así campos espaciales y series temporales. Además se calcularon los residuos y anomalías de las series temporales y sus correlaciones con el índice del Niño región 3 y 3.4. A continuación se describirán el procesamiento y análisis de esta información.

4.2.1 Datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM)

Desde el sitio web del *Environmental Research Division's Data Access Program* (ERDDAP, por sus siglas en inglés) se obtuvieron datos de TSM del producto de *Group for High Resolution Sea Surface Temperature* (GHRSSST, por sus siglas en inglés). Estos datos son editados por el *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC, por sus siglas en

inglés) desde el año 2002 hasta la actualidad con una resolución espacial y temporal de 1km y con datos promedio diarios y mensuales. Los datos analizados son de nivel 4(L4) y combina mediciones satelitales e *in situ*, de sensores tipo Aqua/MODIS, Aqua/AMSR-E, CORIOLIS/WINDSAT, Terra/MODIS y NOAA-19/AVHRR-3 (JPL MUR Measures Project, 2015). Estos datos han sido utilizados en más de 31 publicaciones científicas. Uno de ellos, Vasquez *et al.* (2017) para la costa de Baja California, comparó los datos de GHRSSST y un Vehículo de Superficie no tripulado (USV, por sus siglas en inglés), llamado Saildrone, el cual tomó datos de TSM y la Salinidad Superficial del Mar (SSM) durante 60 días. Sus resultados obtuvieron un sesgo de 0.3° C para la TSM, diferencia fue explicada debido a la variabilidad de las mediciones del USV diurnas y nocturnas.

Para el propósito de este estudio se utilizaron promedios diarios y mensuales de TSM entre enero del 2003 y diciembre del año 2020. El sector escogido fue entre las latitudes de 7°84' y 9°25'N y longitudes -77°77' a -76°36'W. El conjunto de datos que pueden ser consultados y bajados por medio del siguiente link <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/jplMURSST41mday.html>.

4.2.2 Datos del índice oscilación del sur- El Niño

El índice de El niño es calculado con base en la diferencia de algunas variables climáticas y oceánicas entre sitios a diferentes longitudes sobre el océano Pacífico. El IDEAM (2007), sugiere la utilización del índice de la región 3 para los estudios de la influencia del Niño, ya que esta refleja de una manera más adecuada las anomalías del ENSO sobre el Caribe Colombiano. Con el fin de tener una comparación más adecuada con los datos de TSM se utilizó el índice de la región 3.4. Los datos de los índices 3 y 3.4 de El Niño fueron tomados de https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/.

4.2.3 *Datos in situ*

Los datos *in situ* utilizados en este trabajo corresponden a valores de temperatura medidos en campañas oceanográficas donde fueron utilizado un CTD Cast-Away. Las campañas de medición fueron realizadas durante los años 2017 medidos por Velásquez y Guevara (2018) y 2018, medidos por Calderón (2019). Para el propósito de este estudio solo se utilizaron los datos de temperatura medidos en un intervalo entre la superficie y un 1 metro de profundidad.

Velásquez y Guevara (2018), realizaron dos campañas, la primera el 23 de junio de 2017 y la segunda el 13 de Julio del mismo año, ambas durante la época húmeda. Se utilizaron de la segunda campaña mediciones de dos transeptos este-oeste con 1 km de distancia. Calderón (2019), realizó dos campañas en época húmeda (02 de junio de 2018). Los datos utilizados en esta investigación corresponden a datos medidos en 4 transeptos medidos en la época seca (marzo 2018). Se destaca que las estaciones de estas dos campañas coinciden con las estaciones establecidas por la REDCAM para el GU. Con el fin de comparar los datos *in situ* con los datos satelitales, se seleccionaron los datos satelitales que coincidieran espacialmente. Con estos datos se obtuvo el diagrama de dispersión. En la Figura 4, se presenta el mapa con la ubicación de los sitios de medición mencionados. En recuadro naranja se encuentran los datos medidos por Calderón (2019) y en el recuadro rojo los datos medidos por Velásquez y Guevara (2018).

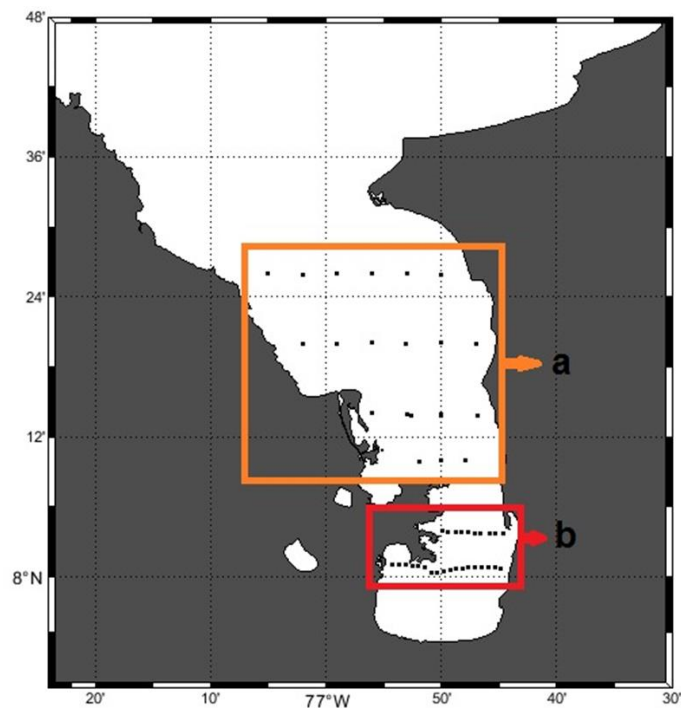


Figura 4. *Puntos de los datos in situ. (a) Sitios de medición durante época seca medidos por Calderón (2019). (b) Sitios de medición durante época húmeda medidos por Velásquez y Guevara (2018).*

4.2.4 *Productos y/o cálculos estadísticos*

Con el fin de obtener los campos espaciales de TSM, se calculó su promedio mensual multianual para el periodo entre enero 2003 y diciembre 2020. Con este fin se utilizaron los datos mensuales de la base de datos GHRSSST. Se calculó un promedio general con los datos mensuales. Con ese campo promedio general se calcularon las anomalías mensuales multianuales.

Se analizaron series de datos ubicados en diferentes sitios sobre el GU. Se compararon series ubicadas a diferentes latitudes con el fin de encontrar posibles diferencias espaciales. Se encontró diferencias menores a $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que considera que no hay diferencias espacial significativas. Por lo tanto, de aquí en adelante solo se analizó una serie de datos ubicada en la zona central del GU. Las series de datos analizadas se muestran en el Anexo B.

Se realizó un análisis de la serie de datos mencionada, en donde fue calculada la tendencia y la componente estacional. Al restar estos valores de la serie original, fueron obtenidos los residuales de la serie. La serie de anomalías de TSM, se calculó restando el promedio mensual multianual al mes correspondiente de la serie de datos de TSM. Sobre esta serie de anomalías se utilizó el método de medias móviles para obtener una serie más suavizada. Esta última serie, fue comparada con el índice del niño regiones 3 y 3.4. La comparación de estas dos series permitieron calcular su correlación en con desfases hasta en 24 meses

5 RESULTADOS

En primer lugar, se hizo una comparación de los valores obtenidos de los satélites y los datos medidos *in situ*. Los datos satelitales corresponden al valor del promedio del día y fueron seleccionados aquellos más cercanos a los sitios de las mediciones. Los valores de las mediciones corresponden al valor promedio entre la superficie y 1 m de profundidad. Las comparaciones se hicieron con los datos medidos en las campañas oceanográficas realizadas en los años 2017-2019 hechos por Guevara y Velásquez (2018) en la época húmeda y Calderón (2019) en la época seca. La Figura 5, muestra el gráfico de dispersión entre los datos de GHRSSST e *in situ* y en recuadros rojos y naranjados se presentan las campañas de 2018 y 2019, respectivamente.

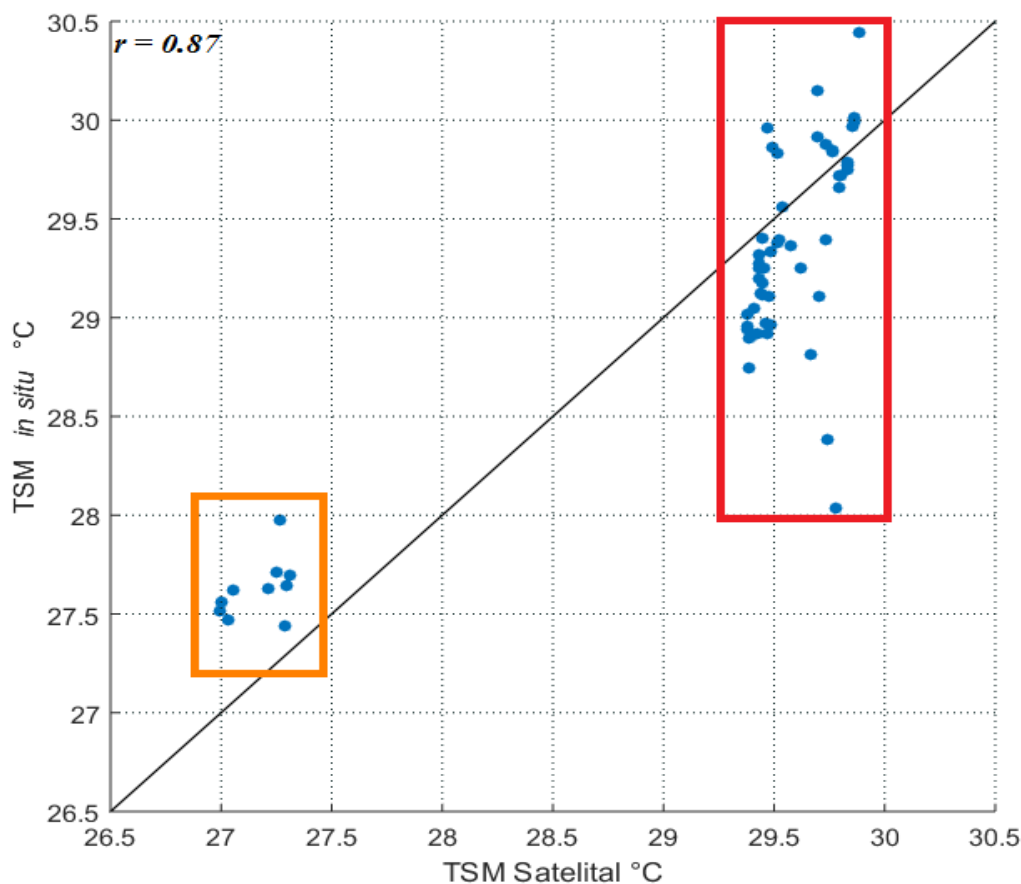


Figura 5. Gráfica de dispersión de datos de la TSM medidos *in situ* y obtenidos satelitalmente, recuadro naranja datos tomados en época seca, recuadro rojo datos tomados en época húmeda

Se calculó el coeficiente de correlación entre los datos satelitales e *in situ*, obteniéndose un valor de 0.87, lo cual sugiere una correlación significativa. Para los datos ubicados al norte se encontraron las diferencias entre 0.5 y 1.3 °C. En la parte media y sur los datos las comparaciones presentan diferencias entre 0.04 y 1 °C. Estos resultados sugieren que al interior del golfo los valores satelitales e *in situ* son similares con diferencias máximas de 0.48 °C aproximadamente. Adicionalmente se observa una diferencia entre los valores comparados en época seca (diciembre a abril) y época húmeda (mayo a noviembre), los primeros muestran valores de 27.3 °C y los segundos de 29.7 °C. Una mayor cantidad de campañas de medición permitirán realizar una comparación más adecuada entre los datos satelitales e *in situ*. Las diferencias entre los datos se pueden atribuir al hecho que los datos de satélites utilizados corresponden al promedio del día en el cual se hicieron las mediciones. Mientras que los valores *in situ*, son datos puntuales tomados a cierta hora del día.

5.1 Campos espaciales de la TSM a partir de datos satelitales.

Utilizando los datos satelitales del periodo de 2003-2020, se calcularon los promedios mensuales multianuales de TSM (Figura 6). Los campos espaciales de la TSM se construyeron utilizando la escala uniforme de 26°C a 30°C. Los resultados sugieren que los meses con el promedio de temperatura más frías se presenta entre diciembre y marzo (Figura 6), coincidiendo con la época seca con un valor mínimo de 27.5°C. En abril aumentan las temperaturas hasta el mes de julio hasta lograr el promedio máximo de TSM mensual en septiembre con un valor máximo de 29.2°C. Luego las temperaturas decrecen hasta noviembre culminando, periodo correspondiente a la época húmeda.

Entre enero y septiembre se presenta un ligero gradiente entre la costa oeste y este, siendo menores las temperaturas en la costa oeste. Esta variabilidad se puede relacionar principalmente con la intensidad de los vientos alisios del norte y nor-este en la época seca lo que podría provocar este descenso en la TSM (Bernal et al., 2006; Toro et al., 2019). Entre octubre y diciembre el gradiente es sur-norte, siendo los valores menores en el sur cuando dominan los vientos débiles del sur. (Toro, et al., 2019). Los resultados sugieren un marcado comportamiento estacional de la TSM en el GU con diferencias relativamente bajas no mayores a 4°C.

Durante los meses de mayo y noviembre, la variabilidad espacial de la TSM en el GU fue mínima, con una diferencia de $\sim 0.32^{\circ} \text{C}$. Estos meses son llamados meses de transición de época seca/húmeda y húmeda/seca por diversos autores (Chevillot et al, 1993; Toro, et al., 2019). La mayor variabilidad espacial se presentó en enero con un valor $\sim 0.88^{\circ} \text{C}$. Lo anterior sugiere que la variabilidad espacial en GU no varía significativamente.

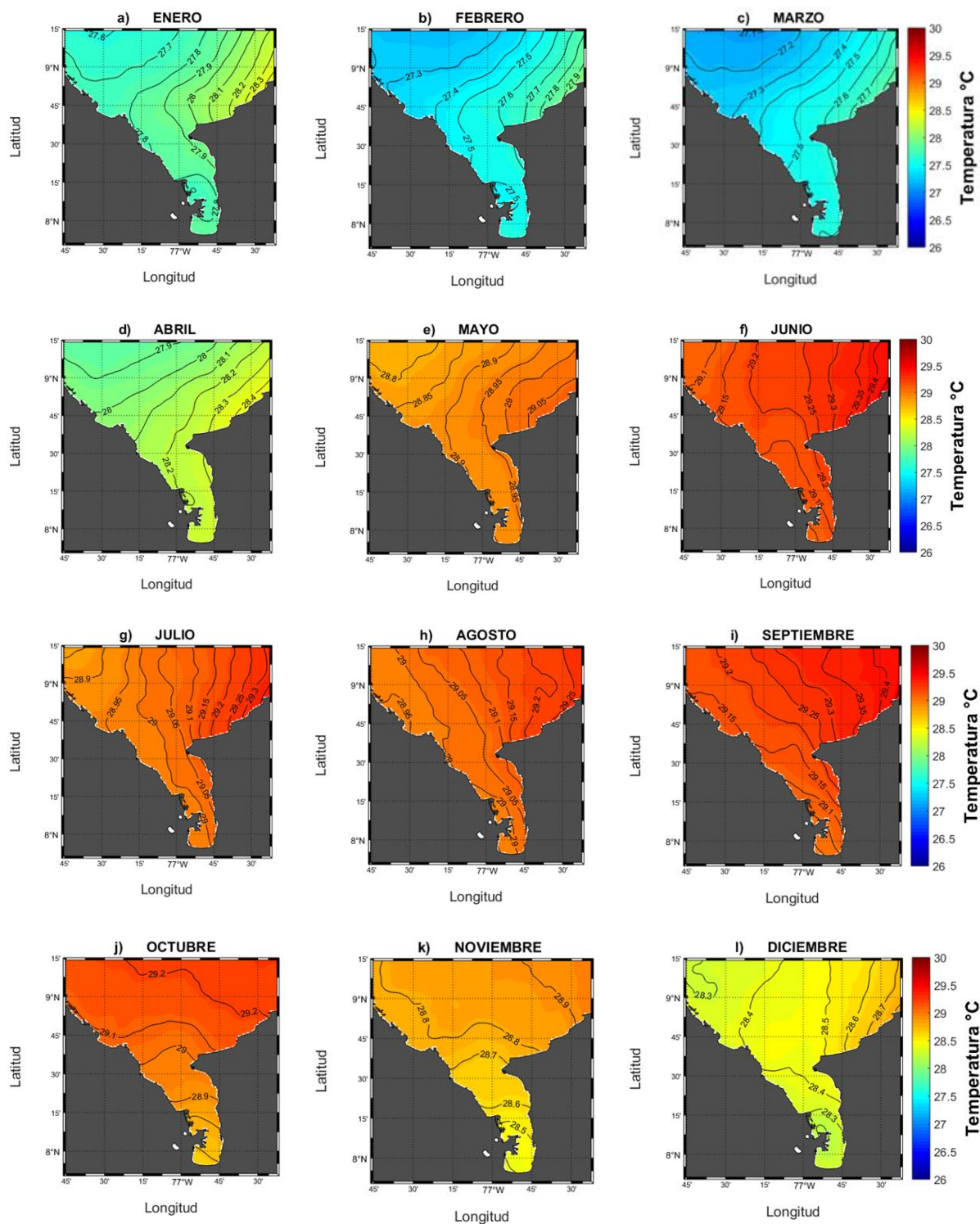


Figura 6. Campos espaciales de promedios mensuales multianuales de TSM en el GU para el periodo 2003-2020.

Se calcularon los campos de anomalías mensuales multianuales de la TSM para el periodo mencionado (Figura 7). Estos campos se construyeron usando una escala uniforme entre -1.3 y 1.3 $^{\circ}\text{C}$. Los resultados sugieren que los meses con anomalías de TSM más bajas, correspondientes a los meses más fríos de todo el periodo, son febrero y marzo con valores entre -1.3 y -0.6 $^{\circ}\text{C}$ y -1.5 y -0.7 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Los meses con las anomalías más altas, correspondientes a los meses más cálidos, son junio y septiembre con valores entre 0.5 y 0.9 $^{\circ}\text{C}$ y 0.4 y 0.9 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Era de esperar que al igual que en los campos promedios mensuales se presentarían gradientes verticales entre los meses de enero y septiembre y gradientes verticales entre los meses de octubre y diciembre. Esto debido en parte al comportamiento de los campos de vientos como se discutió anteriormente. Quedan sin embargo, preguntas abiertas sobre la posibilidad de la generación de bombeo de Ekman, cuando el viento sople en promedio desde el norte.

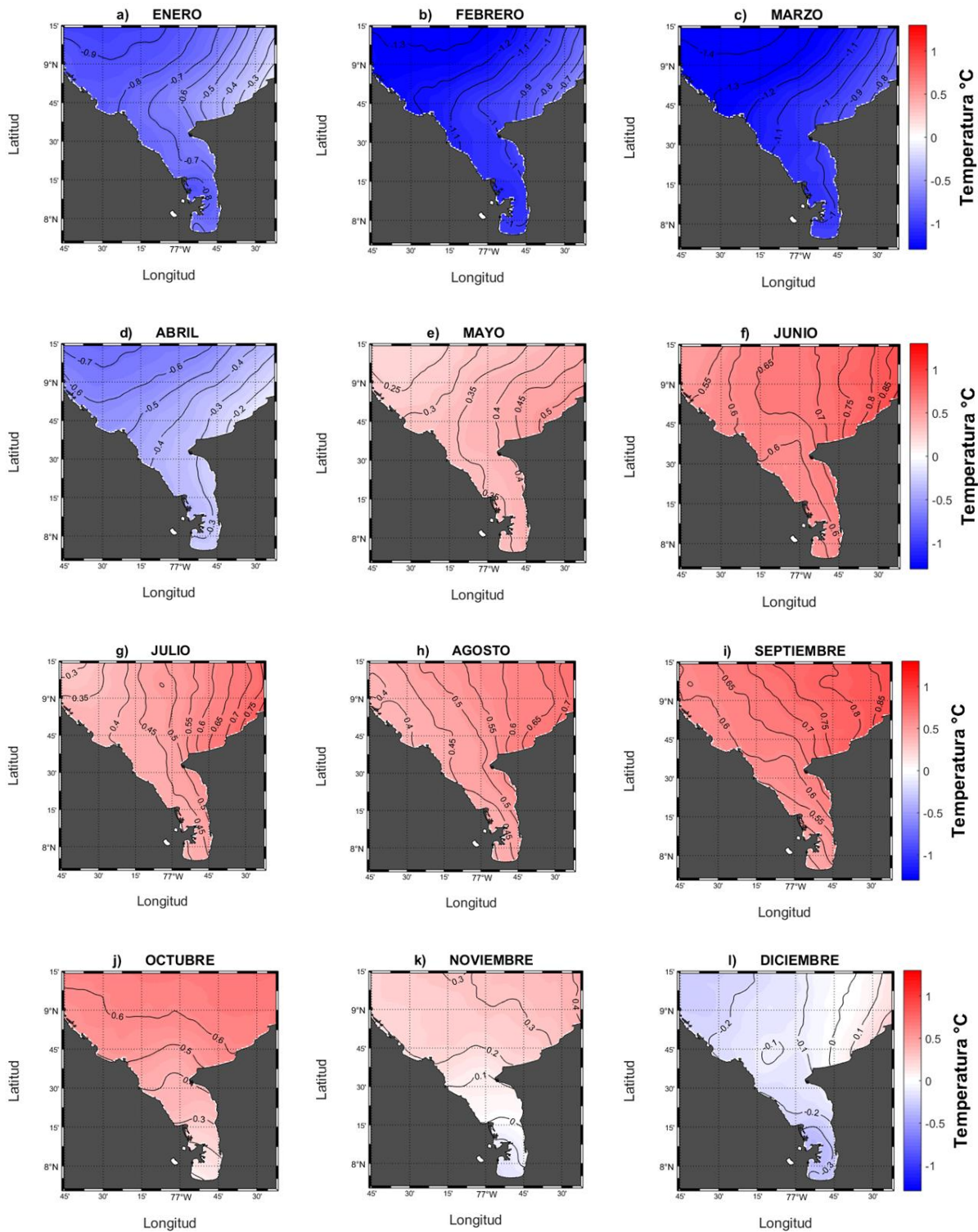


Figura 7. Campos espaciales mensuales multianuales de anomalía de TSM en el GU para el periodo 2003-2020.

5.2 Patrones espaciales y temporales de la TSM a partir de los datos satelitales

Con el propósito de establecer el comportamiento estacional de la TSM para la zona de estudio, se calcularon los promedios mensuales multianuales (Figura 8). Estos valores corresponden al promedio de todos los valores espaciales durante el periodo 2003-2020. Los resultados sugieren que los meses de junio y septiembre registran los valores más altos (29.2 °C y 29.3 °C, respectivamente) y los valores más bajos en el mes de marzo 27.4 °C. Esto sugiere un comportamiento bimodal, con un periodo de valores mínimos de solo 3 meses (enero a abril) y valores máximos de hasta 5 meses (julio a octubre). En general el promedio de valores de la TSM para el GU es ~ 28.6 °C.

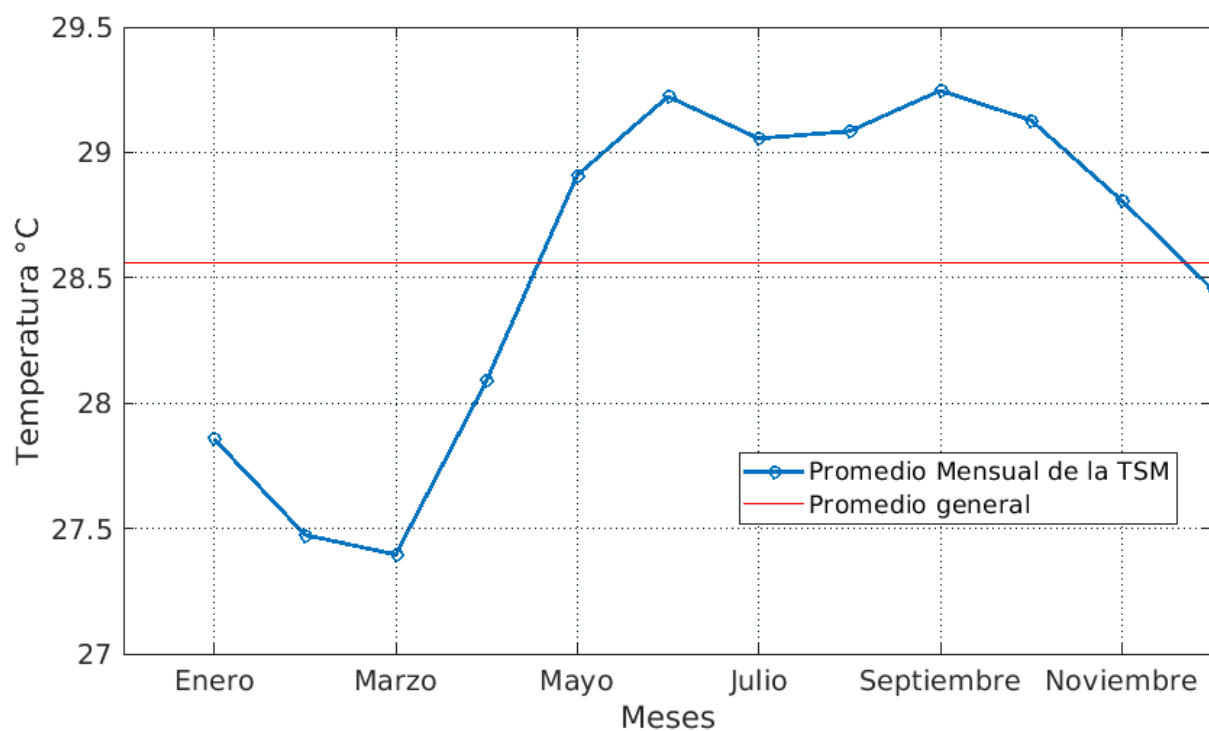


Figura 8. Serie de tiempo estacional promedio de la TSM para el GU.

De acuerdo al comportamiento espacial de la TSM en el GU, se realizaron análisis de series de tiempo en 3 latitudes. Se realizaron cálculos de las diferencias entre las series de tiempo y se encontraron valores menores a $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ver Anexo B). Por lo tanto, se calculó el promedio mensual de la serie de datos obteniendo así una serie de tiempo con el fin de realizar los análisis presentados a continuación.

A esta serie de tiempo, se le calcularon la tendencia mensual, la cual registró valores de incremento anuales promedio de $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que se traduce en un incremento de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para todo el periodo de tiempo (Figura 9b). Según IDEAM (2010) en el caribe colombiano la TSM tiene una tasa de incremento de $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año. Estos resultados sugieren que el GU aumenta de temperatura a una razón de $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, por encima del promedio del mar caribe.

De igual manera se calcularon los valores de tendencia estacionales por medio de un filtro pasa medias (Figura 9c). Estas series muestran cómo varían las magnitudes de la temperatura durante el año. Los resultados muestran una fuerte presencia de estacionalidad cíclica con el aumento de temperatura en los meses de abril a noviembre y disminución de ésta en los meses de diciembre a marzo, coincidiendo con los análisis anteriores.

Finalmente con el fin de eliminar las tendencias y los patrones temporales y dejar aquellos que son estacionarios, a la serie original (Figura 9a) le fue restada la serie de tendencia y estacional, siguiendo lo propuesto por Brockwell y Davis (2016). Los valores obtenidos son los residuales de la serie original y se muestran en la Figura 9d.

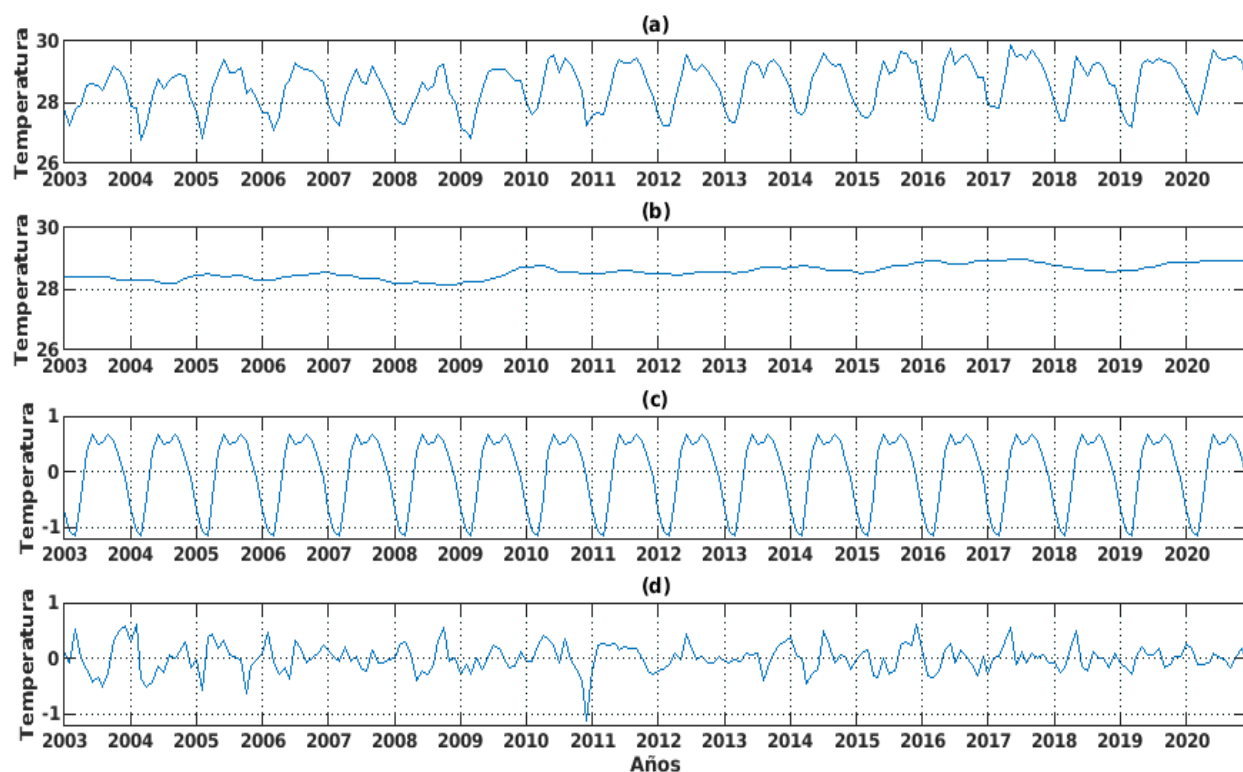


Figura 9. *Calculo de los residuales de la serie de TSM. (a) Serie de tiempo de TSM en el centro del GU. (b) Valores de tendencia para la serie temporal. (c) Valores de la componente estacional. (d) Residuos de la serie.*

La serie de residuos fue suavizada por medio de una media móvil de 3 meses, esto con el fin de reducir el ruido y apreciar de una mejor manera la variabilidad de la misma. En la Figura 10a se observan las dos series de tiempo de TSM residuales, la original (línea roja) y la suavizada (línea azul). Se puede apreciar sobre la serie de residuos un valor negativo asociado a un evento frío que sucede durante el periodo de 2010-2011, con un valor de hasta -1.2°C . Por otro lado, se observan tres valores positivos, asociados a eventos cálidos, en 2004 (0.61°C), en 2016 (0.56°C) y 2017 (0.55°C).

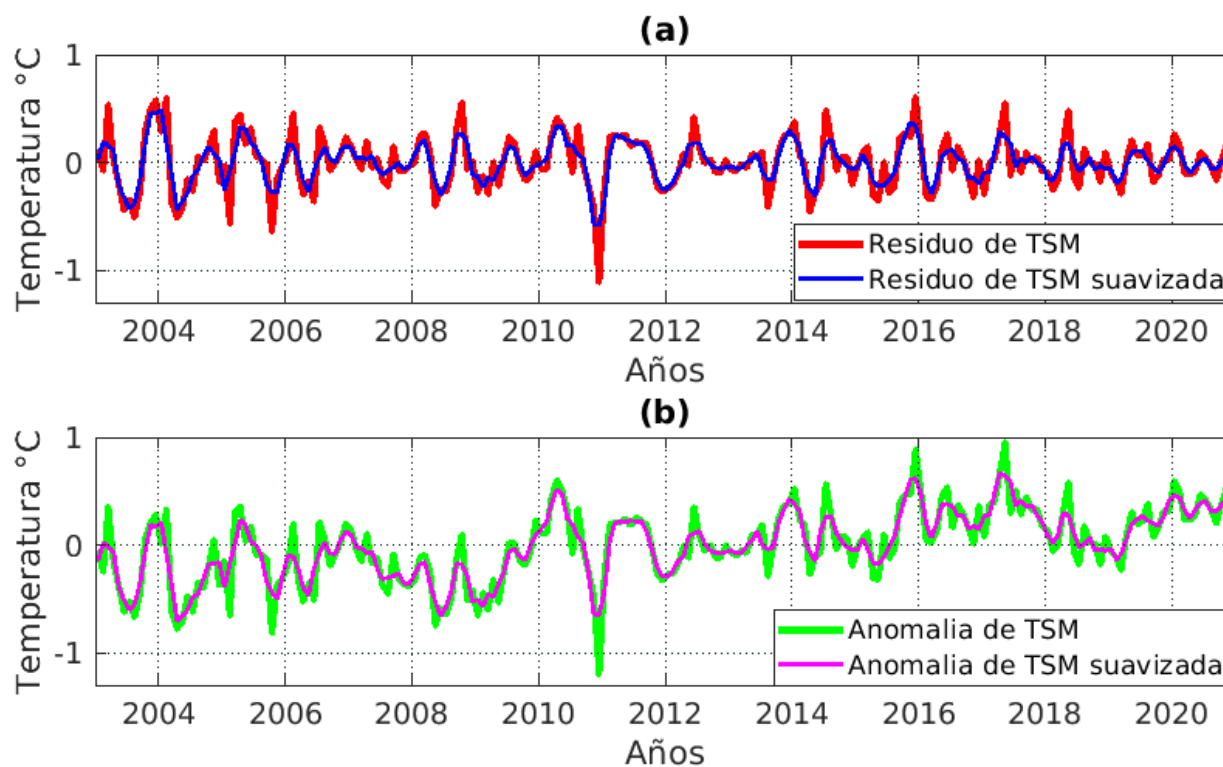


Figura 10. (a) Serie temporal de residuales de la TSM (rojo) y serie con una media móvil de 3 meses (azul) (b) Serie temporal de anomalías de la TSM (verde) y serie con una media móvil de 3 meses (magenta)

De igual manera se calculó las anomalías mensuales de la TSM, las cuales son el resultado de restar las temperaturas mensuales multianuales a sus meses correspondientes para todo el periodo de tiempo de 2003 a 2020 y posteriormente se suavizó con una media móvil de 3 meses. En la Figura 10b se observan las dos series de tiempo de anomalía de TSM, la original (línea verde) y la suavizada (línea magenta). Se puede apreciar sobre la serie original de anomalías como los valores negativos asociados a los eventos fríos suceden durante los años 2003, 2004, 2006, 2008 y 2009 y 2011, siendo este último el más frío, con un valor de hasta -1.2°C . Por otro lado, se observan tres periodos positivos, asociados a eventos cálidos, en 2010 (0.6°C), desde 2013 al 2014 (0.57°C) y entre 2017 y 2018 (0.96°C). En el siguiente apartado las series de tiempo de residuos

y de anomalías con media móvil de 3 meses se analizarán correlacionando con el fenómeno de El Niño para encontrar si existe una posible relación con los índices del Niño región 3 y 3.4.

5.3 Posibles relaciones del fenómeno ENSO con la TSM del golfo

Para analizar la posible relación entre el fenómeno El Niño y los residuos de la TSM y a su vez con la anomalía de TSM en el GU, se seleccionaron el índice del Niño región 3 y 3.4. En la Figura 11, se presentan las series de tiempo para el periodo de los años del 2003 al 2020 de los residuos (línea naranja) y las anomalías (línea magenta) de TSM con media móvil de 3 meses y los índices del Niño región 3 y 3.4, representados por las líneas azul y negra, respectivamente. Los resultados sugieren momentos con desfases en el comportamiento de la serie de anomalía respecto a los índices de el Niño.

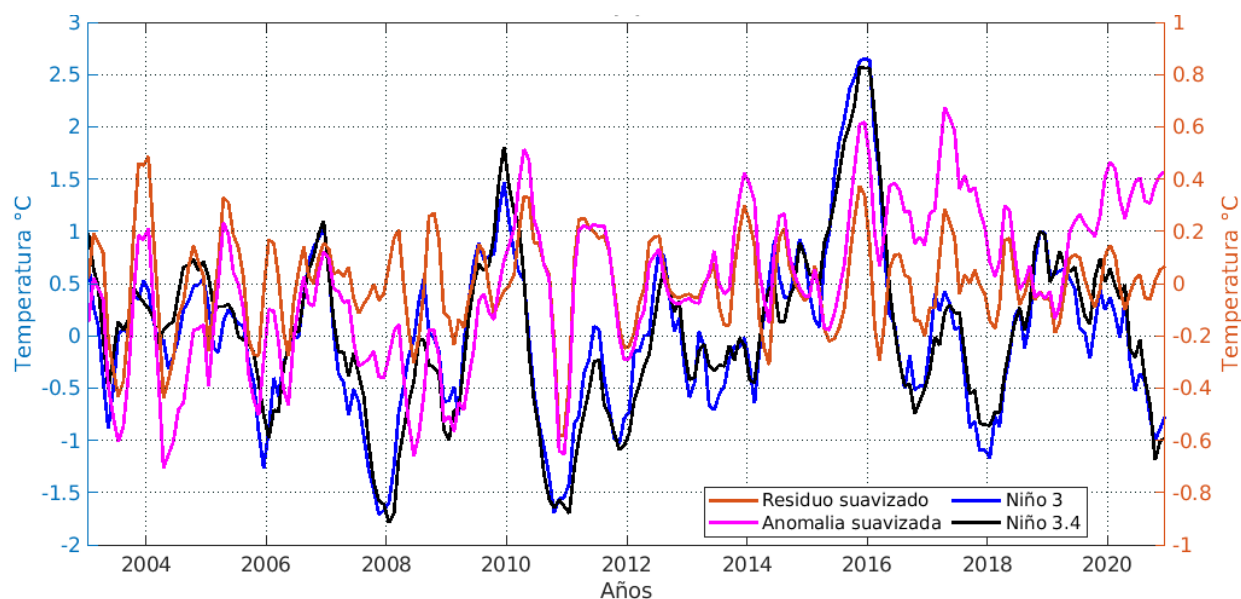


Figura 11. (a) Gráfica de media móvil de los residuos de la TSM (negra), y los índices de El Niño de la región 3 (rojo) y región 3.4 (azul). (b) Correlación cruzada entre los índices de El Niño región 3 (azul) y región 3.4 (naranja) con los residuales de la serie de TSM para un rezago de 24 meses.

Se calculó la correlación cruzada entre los residuos de TSM con media móvil de 3 meses con los índices del Niño región 3 (línea azul) y 3.4 (línea naranja) (Figura 12). Los resultados sugieren una correlación máxima respecto al Niño 3 y 3.4 de 0.25 y 0.21 respectivamente, con un rezago de 1 a 2 meses, valores por debajo a los calculados en la correlación cruzada entre la anomalía de TSM con media móvil de 3 meses con los índices del Niño región 3 (línea amarilla) y 3.4 (línea morada), cuyos resultados muestran correlación máxima respecto al Niño 3 y 3.4 de 0.34 y 0.35 con un rezago de 2 meses. Luego con un rezago de 16 meses se presentan de nuevo valores máximos de correlación para el Niño 3 y 3.4 esta vez de 0.33 y 0.29 respectivamente. Además suponemos que los valores de correlación da mayor con la serie temporal de anomalías, porque al quitarle la tendencia y la estacionalidad a la serie original puede ser que parte de la señal de El Niño 3 y 3.4 está contenida en estas.

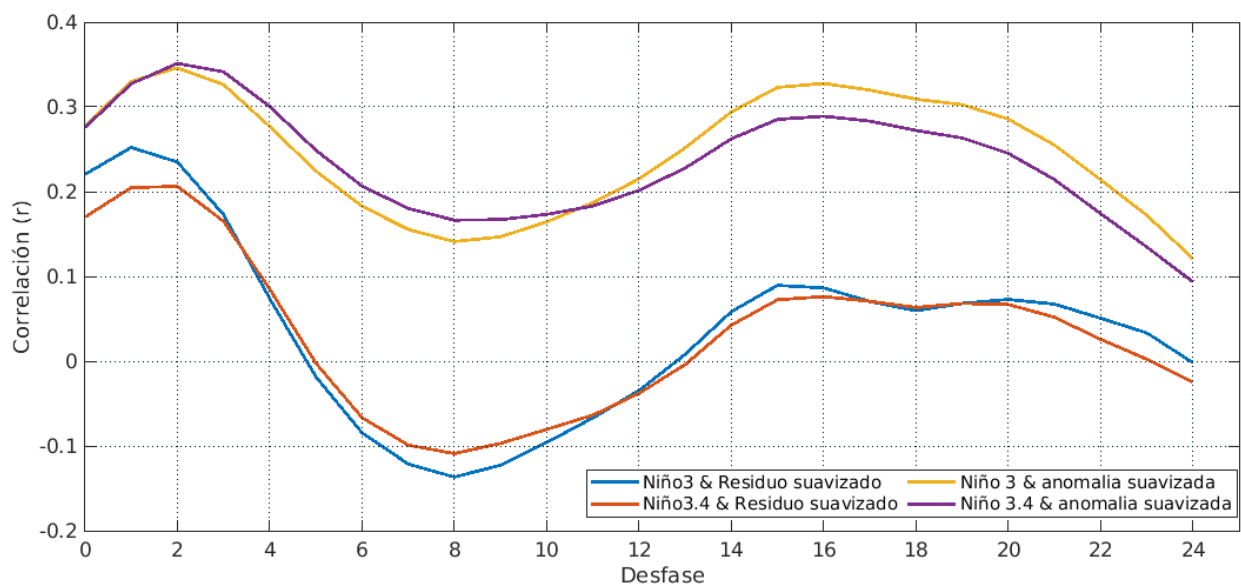


Figura 12. Correlación cruzada entre los índices de El Niño región 3 (azul) y región 3.4 (naranja) con las series temporales de los residuos suavizado y la correlación cruzada entre la anomalía suavizada de la serie de TSM y los índices de El Niño región 3 (amarilla) y región 3.4 (morada) para un rezago de 24 meses.

De acuerdo con el IDEAM (2010), para el CC las correlaciones entre El Niño 3 y las anomalías de TSM tienen coeficientes de correlación entre 0.4 a 0.5 con rezagos de 5 a 8 meses (IDEAM, 2010). De igual manera, Montoya (2014) obtienen valores significativos de correlación entre el contenido de calor y el fenómeno ENSO para rezagos de hasta 4 meses. Los valores máximos de correlaciones encontradas para el mes 16 queda como una pregunta por resolver.

6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad de la TSM en el GU relacionada principalmente con las épocas climáticas anuales. La TSM aumenta en época húmeda cuando los vientos alisios del NE están debilitados y dominan los vientos del SW y disminuye en época seca, cuando los vientos alisios del NE son más intensos. El promedio de TSM para todo el periodo es 28.6°C. Las comparaciones entre los datos satelitales e *in situ* presentan valores similares, principalmente en la zona central del GU.

La variabilidad estacional de la TSM tiene un comportamiento bimodal, con dos máximos en los meses de junio y septiembre con valores promedio 29.2°C y 29.3°C respectivamente. Y valores mínimos en el mes de febrero con un valor de 27.4 °C. Se encontró que existe una ligera variabilidad espacial de la TSM en el GU con diferencias máximas entre la zona oeste y este y entre el norte y sur de hasta 0.1°C y 0.3 ° C para los meses de enero y septiembre, respectivamente. Esto sugiere que la TSM del GU tiende a ser homogénea espacialmente durante el periodo de 2003 al 2020. Las anomalías de la TSM presentaron patrones similares a los descritos con los promedios mensuales multianuales.

Al analizar la tendencia de la serie de tiempo se obtuvo que la TSM ha venido aumentando a una razón de 0.03°C/año en los últimos 18 años para un total de 0.5 °C. Las anomalías de TSM encontradas sugieren que el año con valores más bajos de TSM fue el 2011 y el año con valores mayores fue el 2017. La comparación entre la anomalía y los índices del Niño región 3 y 3.4, presentaron un rezago de 2 meses con valores de correlación cruzada máxima de 0.34 y 0.35, respectivamente. Estos resultados sugieren una modulación menor del fenómeno ENSO respecto a los valores de TSM en el GU.

7 TRABAJOS FUTUROS

Para trabajos futuros se sugieren las siguientes actividades:

1. Determinar las correlaciones entre el fenómeno ENSO y la TSM para periodos específicos del Niño y la Niña.
2. Realizar correcciones a los datos medidos in situ de acuerdo con lo expuesto con Minnett & Kaiser-Weiss (2012) con el fin de realizar una comparación más adecuada. Unido a esto continuar con la comparación entre datos satelitales e *in situ*.
3. Explorar posibles mecanismos de generación del bombeo de Ekman a partir de análisis espaciales de la TSM y campos de vientos.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernal G., G. Poveda, P. Roldán & C. Andrade (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115): 195- 208. 2006. ISSN 0370-3908.
- Calderón, Y. (2019). Variabilidad espacio temporal del potencial energético salino por medio de mediciones in situ en el golfo de Urabá, mar caribe Colombiano. Trabajo de pregrado. Universidad de Antioquia. Corporación Académica Ambiental.
- Campillo, L., y Jiménez G. (2020). Caracterización termohalina de las masas de agua del golfo de Urabá. Caso específico desembocadura del río León y el río Atrato. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería.
- Cepeda, J., Hernández, F., Rivera, J., Romero, C., Inda, E., y Hernandez, O. (2017). Variabilidad estacional de clorofila y temperatura superficial del mar satelital en la plataforma continental de Nayarit, México. CONACYT.
- Chevillot, P., Giraldo, L., Molina Márquez, C., & Molina Márquez, A. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá.
- Donlon, C., Minnett, P., Gentemann, C., Nightingale, T., Barton, I., Ward, B., & Murray, M. (2002). Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4), 353-369.
- Giraldo López A. (2008). Variabilidad espacial de temperatura, salinidad y transparencia en el ambiente pelágico del PNN Gorgona durante septiembre 2007 y marzo 2008. *Boletín Científico CIOH*, (26), 157-163. <https://doi.org/10.26640/22159045.192>

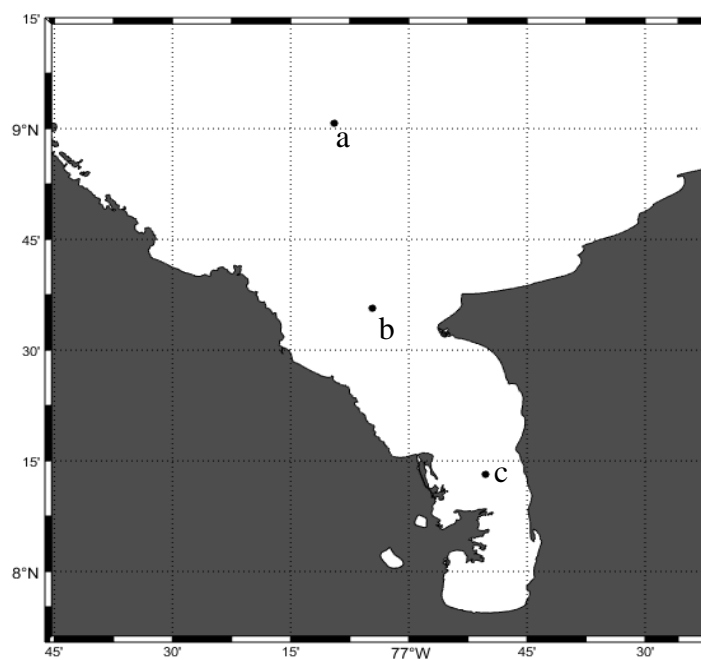
- Goubanova, K., Illig, S., Machu, E., Garçon, V., & Dewitte, B. (2013). SST subseasonal variability in the central Benguela upwelling system as inferred from satellite observations (1999–2009). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4092-4110.
- Guevara, J., y Velasquez, A., (2018). Caracterización termohalina de la región central del golfo de Urabá, apartir de la descarga del río atrato. Trabajo de Pregado. Universidad de Antioquia Seccional de Urabá Ciencias del Mar. Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.
- Hanafin, J., (2002). On sea surface properties and characteristics in the infrared. University of Miami.
- Hernández, B. (2002). Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Investigaciones marinas*, 30(2), 21-31.
- Hernández, D., Villegas, N., Málikov, I., (2008). Respuestas de las temperaturas superficiales del mar y del aire de la cuenca del pacífico colombiano producido por el niño oscilación del sur. *Ingeniería de Recursos Naturales del Ambiente*, núm. 7.
- IDEAM, (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM - Subdirección de Meteorología Bogotá, D.C., Diciembre 31 de 2007.
- IDEAM, (2010). Estudio sobre la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el Caribe Colombiano. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D.C.* IDEAM-METEO/002-2010.

- Iglesias, I., Lorenzo, M., Gómez, M, Es I. (2010) La temperatura superficial del mar como herramienta de predicción climática. Environmental Physics Laboratory, Facultade de Ciencias. ACT 1, 95-108.
- INVEMAR, (2007). Atlas del golfo de Urabá una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. *Serie Publicaciones Especiales N°12* p.p. 98.
- Kennedy, J., Smith, R., & Rayner, N. (2012). Using AATSR data to assess the quality of in situ sea-surface temperature observations for climate studies. *Remote Sensing of Environment*, 116, 79–92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.021>
- Malikov, I., y Villegas, N. (2005). Construcción de series de tiempo de temperatura del mar de las Zonas Homogéneas del Océano Pacifico Colombiano. *Boletín Científico*. pp.79-93.
- Mercado, A., y Hernández, T. (2020). Estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el distrito de Turbo, Colombia. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia. Facultad ingeniería
- Minnett, J., & Barton, I. (2010). Remote Sensing of the Earth's Surface Temperature. *Radiometric Temperature Measurements: II. Applications*, 333–391. doi:10.1016/s1079-4042(09)04306-9
- Minnett, P., Alvera, A., Chin, T., Corlett, G., Gentemann, C., Karagali, I., & Vazquez, J. (2019). Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111366.
- Minnett, P., & Kaiser, A. (2012). Near-surface oceanic temperature gradients. *GHRSSST Discussion Doc*, 7.
- Moradi, M., & Kabiri, K. (2015). Spatio-temporal variability of SST and Chlorophyll-a from MODIS data in the Persian Gulf. *Marine pollution bulletin*, 98(1-2), 14-25.

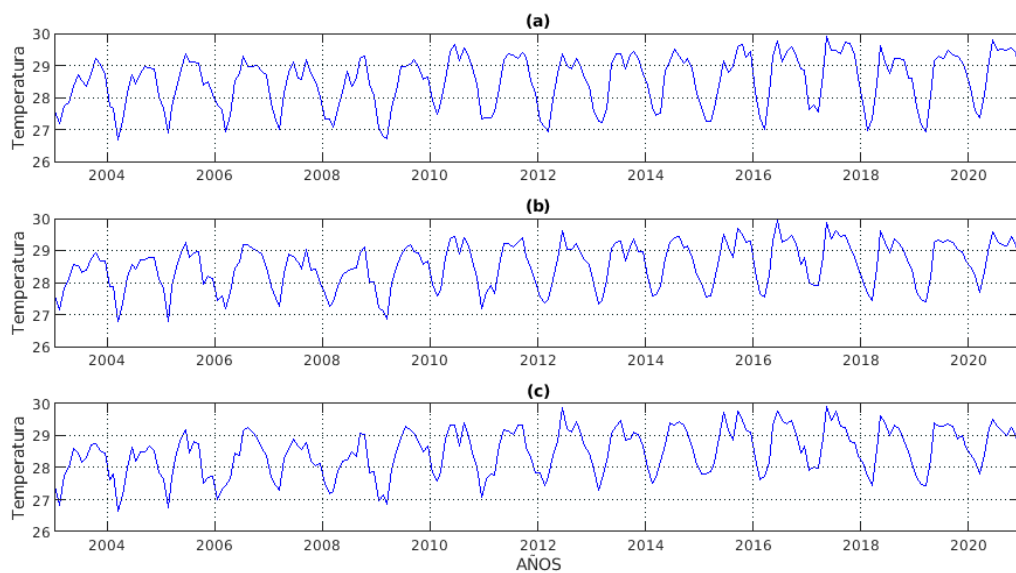
- Ortiz, C. (2019). Seasonal and inter-annual variability of sea surface temperature and sea surface winds in Inhambane Bay (Mozambique) (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Pacheco, F. (2018). Variabilidad estacional de la clorofila-a satelital, en el sur occidente del caribe colombiano. Trabajo de pregrado. Universidad de Antioquia Seccional de Urabá Ciencias del Mar. Corporación ambiental.
- Poveda, G., & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 23(89), 517-528.
- Quispe, D., Gutiérrez, D., y Vásquez, L. (2019). Validación de información satelital de temperatura superficial del mar con registros in situ dentro de las 60 millas del mar del Perú.
- Restrepo, J., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of hydrology*, 235(1-2), 137-149.
- Restrepo, J., y Correa, I., Ed. (2002). Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral pacífico Colombiano. Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín. 221 P.
- Robinson, I., (2004). Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography. Springer Science & Business Media.
- Serna L, Arias P, Vieira S. (2018). Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 410, 42(165).

- Sohou Z, Koné V, Da-Allada Y, Djakouré S, Bourlès B, Racape V, Degbe G, Adje C (2020). Seasonal and inter-annual ONSET Sea Surface Temperature variability along the northern coast of the Gulf of Guinea. *Regional Studies in Marine Science*, 101129, p.p. 35. *Doi.10.1016/j.rsma.2020.101129*.
- Toro, V., Mosquera, W., Barrientos, N., Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Boletín Científico*. Vol. 38, No 2, 2019,26-35.
- Wang, Y., Yu, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Chai, F. (2020). Distribution and variability of sea surface temperature fronts in the South China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 240(2020).

9 ANEXOS



Anexo A. *Ubicación latitudinal de los puntos utilizados para el análisis de espacial de la serie de datos. (a) punto ubicado en la coordenada de latitud 9,01 y longitud -77,15, (b) punto ubicado en la coordenada de latitud 8,59 y longitud -77,07, (c) punto ubicado en la coordenada de latitud 8,21 y longitud -76,83.*



Anexo B. *Graficas series de tiempo para los puntos a, b y c para el periodo de 2003 a 2020*