

Análisis pasado y futuro de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte.

Trabajo fin de grado ciencias ambientales.

Enrique Prego Tabuyo.



Universidade de Vigo

María Teresa de Castro Rodríguez, profesora titular del área de física de la Tierra, del departamento de física aplicada de la Universidad de Vigo y Ramón Gómez Gesteira catedrático del área de física de la Tierra, del departamento de física aplicada de la Universidad de Vigo.

INFORMAN:

Que el trabajo titulado “Análisis pasado y futuro de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte” presentado por D Enrique Prego Tabuyo, con D.N.I.: 47403613S, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de física aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como Trabajo Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, de julio de 2018

María Teresa de Castro Rodríguez

Ramón Gómez Gesteira

Resumen.

Hoy en día existe un gran interés y preocupación por el cambio climático y por sus posibles efectos sobre la temperatura superficial de los océanos. Esto es debido al fuerte impacto que pequeños cambios en la temperatura superficial del mar pueden producir en los todos los ecosistemas, no solo los marinos y a los graves daños socioeconómicos que suelen conllevar para la sociedad actual. Debido a esto, en los últimos años los estudios sobre proyecciones climáticas se han centrado en analizar lo que ocurrirá con la temperatura superficial del océano alrededor de todo el mundo durante el siglo XXI.

En este estudio se analizan las proyecciones de 22 modelos procedentes del proyecto CMIP5, en el área del Atlántico Norte, y se comparan con los resultados ofrecidos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en su último informe AR5. Las proyecciones futuras de estos modelos se ejecutaron bajo el escenario RCP 8.5 de emisión de gases de efecto invernadero, escenario futuro más desfavorable. Este escenario presupone que se producirá un forzamiento radiativo (FR) de 8.5 W m^{-2} para finales del siglo XXI. La comparativa entre resultados se ha realizado en dos periodos de tiempo distintos. Entre el período 1900-2005, que se corresponde al periodo histórico, y el período 2006-2100 que se corresponde con las proyecciones futuras.

Índice.

1.Introducción.

- 1.1 El Cambio Climático.
- 1.2 La temperatura superficial del océano (SST).
- 1.3 El Atlántico Norte.
- 1.4 Modelos Climático-Globales (GCMs).
- 1.5 Objetivos.

2.Datos y Métodos.

- 2.1 Datos.
 - 2.1.1 CMIP5.
 - 2.1.2 Matlab.

- 2.2 Métodos.

3.Resultados.

- 3.1 Caracterización de la SST histórica.
- 3.2 Caracterización de la proyección futura de la SST.
- 3.3 Comparación entre la SST histórica y futura.
- 3.4 Evolución histórica de la SST.
- 3.5 Evolución futura de la SST.
- 3.6 Comparación entre la evolución histórica y futura de la SST.

4.Conclusiones.

5. Bibliografía.

6. Anexo.

- 6.1 Proyecciones.
- 6.2 Pretratamiento de datos.
- 6.3 Representación gráfica.

Introducción.

- **El Cambio Climático.**

Entendemos por Cambio Climático a la variación a escala global del clima, ya sea por causas naturales como antropogénicas. El estudio del clima es un campo muy complejo en el que intervienen gran cantidad de factores. Los cambios en el clima pueden ser a escalas temporales muy diferentes y para su estudio se valoran diferentes parámetros como pueden ser: temperatura, viento, precipitación, etc. Para la Organización Meteorológica Mundial (OMM) el clima es el promedio de diferentes estados del tiempo, en una determinada zona a lo largo de un periodo suficientemente largo, típicamente de varias décadas. Se considera al Sistema Climático como un sistema termodinámico cerrado, sujeto a forzamientos externos. Éste, está formado por cinco subsistemas abiertos con gran interacción entre ellos: la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera, la superficie terrestre y la biosfera. En particular, la hidrosfera ocupa dos tercios de la superficie terrestre y está formada por océanos, ríos, lagos, mares interiores y aguas subterráneas.

Para entender el Cambio Climático hay que estudiar los diferentes forzamientos radiativos de los principales productos de la actividad humana (Fig.1.1). El forzamiento radiativo permite cuantificar cambios en los flujos de energía. Valores positivos del forzamiento radiativo producen aumentos de temperatura en la superficie, mientras que valores negativos implican un enfriamiento. (Porras et al., 2014).

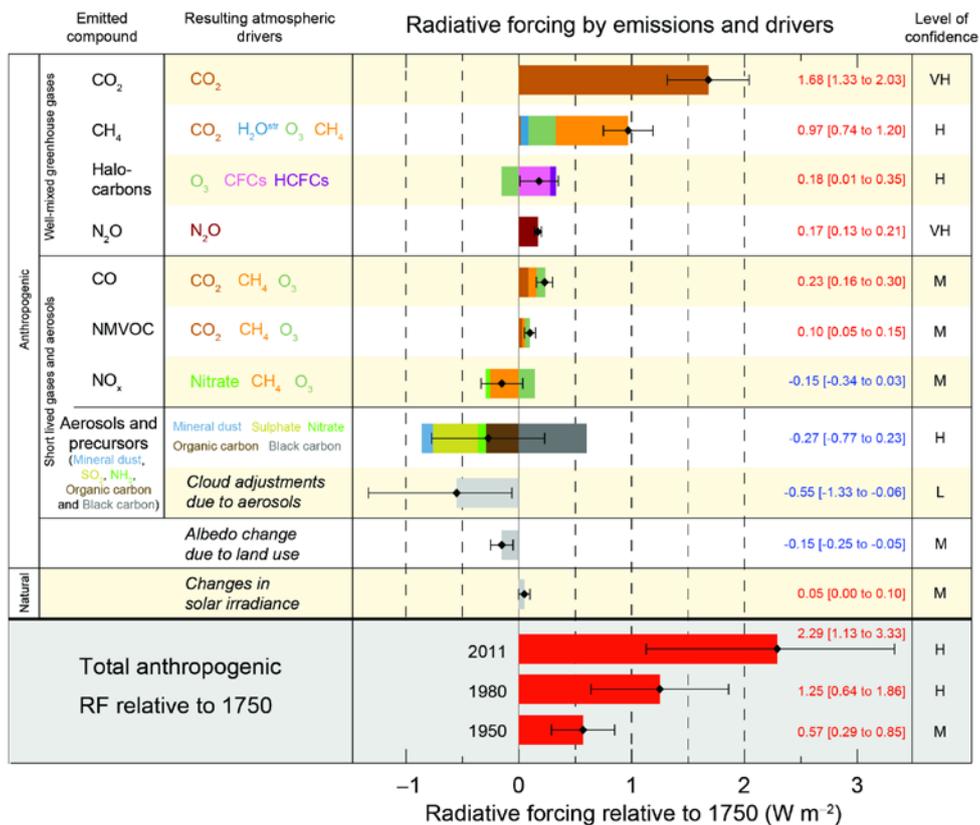


Fig1.1. Forzamiento radiativo e incertidumbre de los principales compuestos emitidos a la atmósfera, así como el albedo y los cambios en la radiación solar desde 1750. Expresado en $W m^{-2}$

En el último informe del IPCC (AR5) se establecen cuatro nuevos escenarios de emisión de dióxido de carbono, basados en las distintas trayectorias de concentración representativas (RCP). Cada una de las trayectorias viene caracterizada por su forzamiento radiativo total predicho para el año 2100 y de él recibe su nombre. Los rangos están comprendidos entre 2.6 W m^{-2} en el mejor de los casos y 8.5 W m^{-2} en el peor. En la Fig. 1.2 se muestran los distintos escenarios, así como la tendencia en las emisiones de dióxido de carbono y su concentración en atmósfera libre para el año 2100.

<i>RCP</i>	<i>FR</i>	<i>Tendencia del FR</i>	<i>[CO₂] en 2100</i>
RCP 2.6	2.6 W m^{-2}	Decreciente en 2100	412 ppm
RCP 4.5	4.5 W m^{-2}	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W m^{-2}	Creciente en 2100	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W m^{-2}	Creciente en 2100	936 ppm

Fig1.2 Escenarios de emisión (RCP) considerados en el nuevo informe AR5. Fuente IPCC Bases Físicas 2013.

De todas las variables que caracterizan el Cambio Climático, la temperatura del mar es uno de los indicadores más importantes y estudiados ya que el calentamiento del océano domina la cantidad mundial de cambio de energía, así como de su transporte en forma de calor de unos lugares a otros.

Según el último informe del IPCC, existe una alta confianza en que el calentamiento de los océanos representó alrededor del 93% del incremento de la energía de la Tierra entre 1971 y 2010. El calentamiento de la parte superior del océano (de 0 a 700 m) representa alrededor del 64% del total. El derretimiento del hielo (incluido el hielo marino en el Ártico, las capas de hielo y los glaciares) y el calentamiento de los continentes y la atmósfera dan cuenta del resto de la variación de la energía.

El océano se está calentando en muchas regiones, rangos de profundidad y períodos de tiempo, aunque ni en todas partes ni constantemente. La huella del calentamiento se observa con mayor claridad cuando se consideran escalas globales, o incluso cuencas oceánicas, y promedios que se expandan sobre períodos de tiempo de una década o más.

La temperatura del océano puede variar mucho con las estaciones, de año a año, o incluso de una década a otra, debido a variaciones en las corrientes oceánicas y al intercambio de calor entre el océano y la atmósfera.

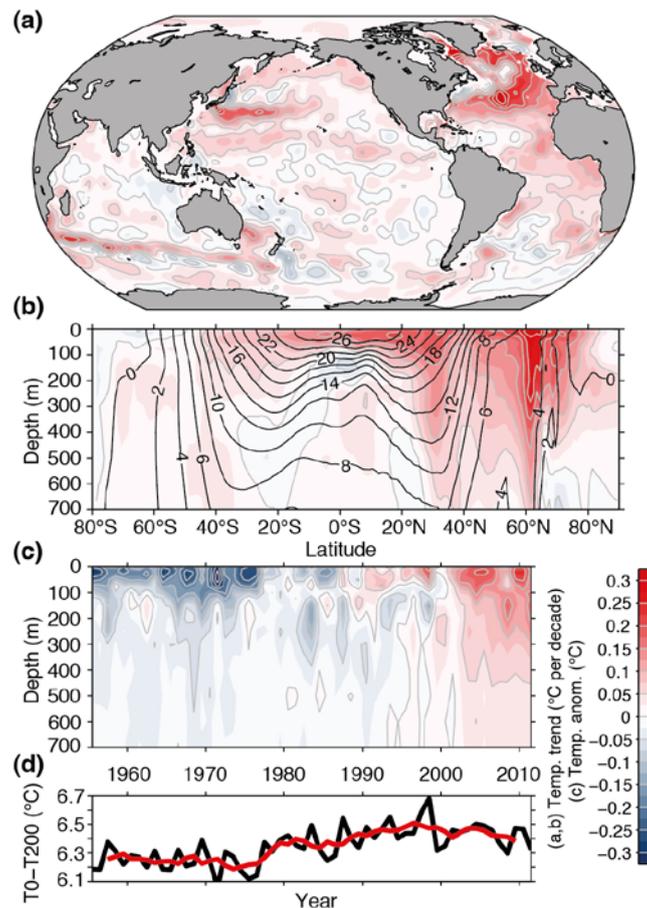


Fig1.3 (a) Tendencias en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ para los años 1971-2010 en el rango 0-700 m de profundidad. (b) Tendencias promediadas por punto (localización) en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ y temperaturas promedio, profundidad frente a latitud. (c) Tendencias promediadas globalmente en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, profundidad frente a latitud. (d) Diferencia de temperatura media global anual, entre superficie y 200 metros de profundidad (negro: diferencia anual, rojo: media 5 años) Fuente: IPCC AR5. Levitus et al. (2009).

Como podemos observar en la Fig 1.3 las temperaturas medias globales oceánicas subsuperficiales han aumentado durante las décadas de 1971 a 2010. Este calentamiento es un resultado robusto. Este aumento de temperatura no ha sido homogéneo en todas las regiones de los océanos y varía también con la profundidad. Así pues, los diferentes estudios realizados determinan que, para este período de tiempo, el aumento de temperatura media en los 75 metros más superficiales ha sido de $0.11\text{ }^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Entre 75 y 200 metros de profundidad, este aumento ha sido mucho menor, de unos $0.04^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Finalmente, entre 200 y 500 metros de profundidad, es donde menos aumento de temperatura se ha producido, según los estudios de menos de $0.02^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. (Levitus et al., 2009; Palmer et al., 2007; Durack and Wijffels, 2010; Gleckler et al., 2012;)

- **La temperatura superficial del océano (SST).**

La temperatura superficial del océano es la temperatura de la capa superior cuyo espesor varía en función del método de medición de temperatura utilizado. Puede variar entre el milímetro hasta los 20 metros de espesor.

La SST tiene una importancia enorme en las masas de aire de la atmósfera. Un claro ejemplo de esto son las ciclogénesis tropicales, causadas entre otras cosas, por temperaturas muy cálidas en la superficie de los océanos.

Mediante la SST también se pueden observar fenómenos meteorológicos como el paso de un ciclón tropical. Los fuertes vientos asociados a estos fenómenos producen una mezcla turbulenta del agua del océano de hasta 30 metros de profundidad que hace que la SST se enfríe, dejando a su paso una estela de agua fría.

Las oscilaciones térmicas diarias, semanales, mensuales y anuales de la SST son mucho más lentas que las del aire de la atmósfera que se encuentra justo encima. Esto se debe a que la inercia térmica del agua es mucho mayor que la del aire. Este factor, hace que sea más relevante un cambio en la SST a lo largo de diferentes períodos de tiempo, que un cambio de temperatura en la atmósfera, que tiene mucha menor inercia térmica, variaciones y desviaciones mucho más grandes que las del SST.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de estudiar la SST son las zonas costeras. En estas zonas pueden producirse afloramientos. En el hemisferio norte, el afloramiento costero se da cuando el viento sopla paralelo a la costa dejando la costa a su izquierda. Por la acción de Coriolis este viento arrastra el agua superficial hacía el océano produciendo el ascenso de aguas profundas, más frías y ricas en nutrientes, a la superficie dónde reciben la radiación solar. Si los vientos cambian en estas zonas los cambios en la SST pueden ser mucho más significativos que en el resto del océano.

En cuanto a la medición de la SST existen diferentes métodos. Por un lado, tenemos las mediciones directas mediante termómetros de mercurio, los primeros fueron los termómetros instalados en los grandes buques que recorrían todos los océanos e iban recogiendo datos con márgenes de error muy grandes debido al calor de los motores. Estas mediciones comenzaron en el siglo XIX. En 1940-1941 se registró un cambio repentino en la temperatura, posteriormente se documentó que este se debía a un cambio de procedimiento a la hora de tomar las medidas que no estaba documentado. Por otro lado, tenemos una red de bollas, tanto fijas como a la deriva, por todos los océanos del planeta que recogen datos de la SST y los transmiten de manera continua a los satélites. Esta red fue implementada posteriormente y no es hasta el siglo XXI cuando comienza a existir un número de boyas suficiente para tener bien documentado el océano. La contribución de cada uno de estos métodos de medición a la media de la SST así como la anomalía de la SST respecto al periodo 1961- 1990 se muestran en la Fig 1.4.

Otro método para la medición de la SST es mediante la composición de imágenes de satélite. Las primeras composiciones de satélite para SST datan de 1967 y es a partir de 1982 cuando se empieza a monitorizar de manera continua. En cuanto a los canales utilizados para medir estas temperaturas los más comunes son los infrarrojos ($3.7\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$). Con el paso de los años el problema surgido con las interferencias causadas por la atmósfera (principalmente nubes) en la señal obtenida por los satélites de la SST, se ha ido corrigiendo mediante composiciones de muchas imágenes o mediante la aparición de nuevos canales menos sensibles a interferencias con la atmósfera. El otro gran problema de la medición de la SST mediante satélites es que esta temperatura es la de la parte más superficial del océano, una capa de aproximadamente 0.1mm.

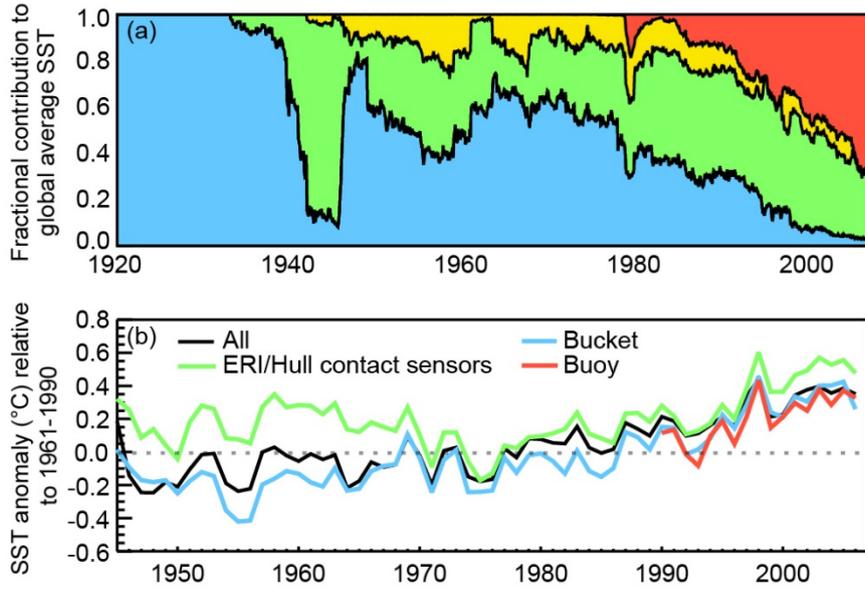


Fig1.4 (a) contribución a la medición media de la SST. (b) anomalías en los resultados de las mediciones de la SST respecto al período 1961-1990, por los diferentes métodos de medida. (Kennedy et al., 2011) Fuente: IPCC AR5.

En cuanto a las tendencias en el último siglo para la SST de todos los océanos del mundo se puede observar un aumento de la anomalía de la temperatura global en la Fig 1.5 relativa al periodo 1961- 1990.

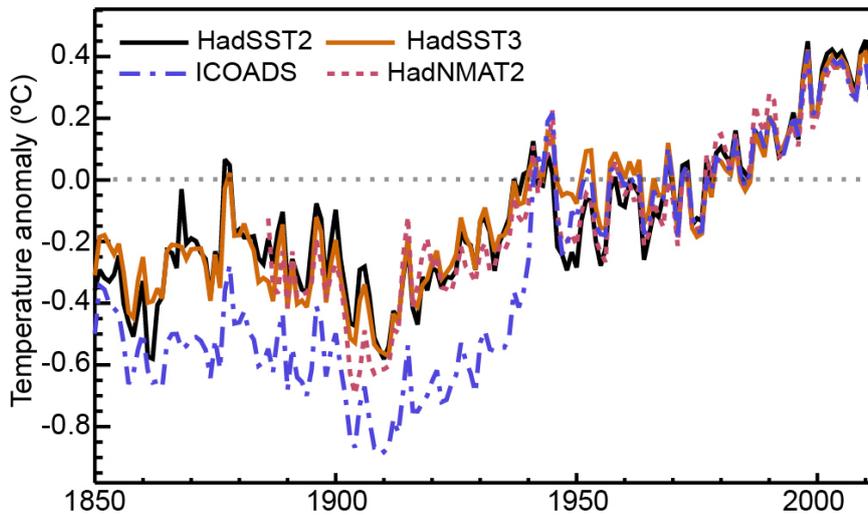


Fig1.5 Anomalía Media anual de la SST respecto al período 1961-1990. (NMAT2 temperatura marina superficial) Fuente: IPCC AR5.

En resumen, se puede afirmar que la SST media global se ha incrementado desde el comienzo del siglo XX, con unos márgenes de error suficientes para realizar esta afirmación.

- **El Atlántico Norte.**

El Atlántico Norte es una parte del océano Atlántico que se encuentra entre el Océano Ártico y el Ecuador. Está caracterizado por una circulación superficial que transporta agua de Sur a Norte. Las tres principales corrientes superficiales del Atlántico Norte son; la Corriente del Golfo, la Noratlántica y la de Noruega. Por otro lado, existen corrientes profundas que en el caso del Atlántico Norte transportan el agua más fría del Norte al Sur (Fig1.6 y Fig. 1.7).

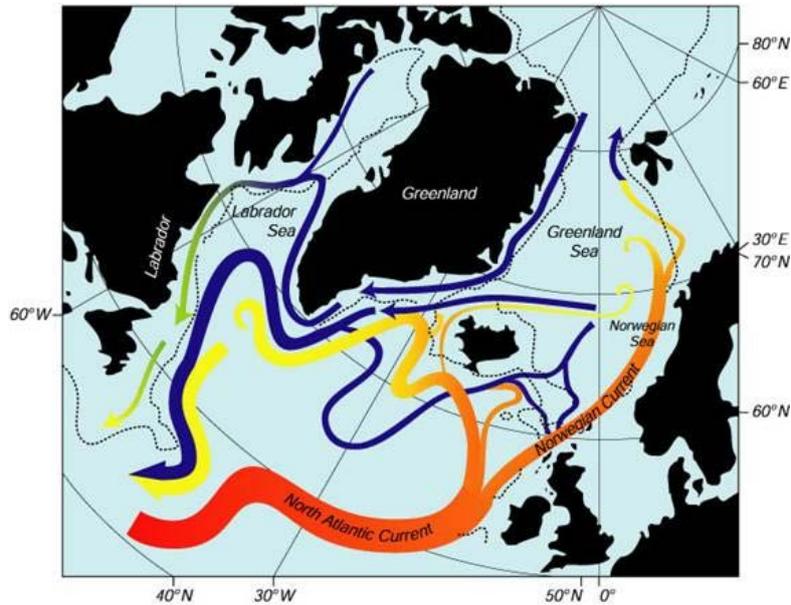


Fig1.6 Esquema de las corrientes del Atlántico Norte y del Océano Ártico. Woods Hole Oceanographic Institution.

Las corrientes superficiales son creadas principalmente por el arrastre de los vientos, mientras que las profundas se basan más en las diferencias de salinidad y densidad (diferencias termohalinas). En la formación de las corrientes superficiales tiene un papel muy importante la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) así como, la velocidad con la que se enfrían y se congelan estas aguas en su trayectoria hacia el norte. Este proceso de congelación de las aguas superficiales tiene una importancia vital durante el proceso de hundimiento y generación de agua profunda. Al congelarse la capa más superficial del océano, las moléculas de sal encerradas en esa parte del agua convertida en hielo se desplazan al agua que no se congela aumentando de esta manera su salinidad y, por lo tanto, su densidad, produciendo un hundimiento de agua que da inicio a la Circulación Termohalina. Este hecho es un proceso continuo.

Existen diferentes estudios que establecen que grandes variaciones en las concentraciones de CO_2 y, por lo tanto, en el forzamiento radiativo podrían llevar a un colapso en la circulación en el Atlántico Norte tal y como la conocemos actualmente (Lohmann et al., 2016; Patton et al., 2017). Un debilitamiento en la corriente del Golfo impediría a las aguas más cálidas llegar a latitudes altas en las costas europeas, permitiendo a su vez el descenso de las aguas polares (Bard et al., 1996). Este supuesto, ya sucedió a lo largo de la historia de la Tierra. Aproximadamente hace 12.900, tras el calentamiento conocido como Bølling-Allerød, se produjo un período frío donde las aguas polares bajaron de latitud en Europa, a este período se le denominó Younger Dryas. Esta transición se

produjo cuando gran parte del hielo que cubría el continente Laurentino (Norte América) se fundió y aportó grandes cantidades de agua dulce al Atlántico Norte, disminuyendo de esta manera su salinidad y densidad. Al mismo tiempo que aumentaba el deshielo y el aporte de agua dulce, la circulación meridional Atlántica se debilitaba, dando lugar a un clima más frío en las zonas afectadas por las aguas cálidas de la corriente del Golfo y la Noratlántica (Uriarte, 2009). Así mismo, el colapso en la circulación Noratlántica también tendría un efecto de retroalimentación positiva en cuanto a concentraciones de CO_2 en la atmósfera, puesto que las zonas de hundimientos funcionan como sumidero de CO_2 . Otra retroalimentación positiva de un aumento en la temperatura del océano sería la de la hipótesis del fusil de clatratos (Benton et al., 2003). Esta teoría científica establece que la fusión de los hidratos de metano (depósitos de hielo en el fondo de los océanos) por un aumento ligero en la temperatura del océano, liberaría de forma repentina grandes cantidades de metano a la atmósfera, disparando el efecto invernadero. Hay que tener en cuenta que el metano contribuye unas 30 veces más al aumento del forzamiento radiativo que el CO_2 , si bien, su tiempo de vida en la atmósfera es de décadas mientras que el del CO_2 es de siglos.



Fig1.7 Esquema general de corrientes superficiales en el Atlántico Norte. Flechas rojas implican corrientes cálidas y flechas azules corrientes frías. Fuente UPM

Otra de las zonas más importantes en el Atlántico Norte es la conocida como *Warm Pool* (AWP), que se define como la zona del océano donde la temperatura de la superficie (SST) es superior a los 28.5°C . Comprende las zonas del Golfo de México, el mar Caribe y la parte oeste del Atlántico tropical. Esta zona sufre variaciones en la temperatura tanto estacionales como multidecadales (Fig. 1.8) (Wang et al., 2008; Enfield and Cid-Serrano, 2010). Las variaciones en la temperatura de la AWP juegan un papel muy importante en los sistemas climáticos de las zonas cercanas. De esta manera afectan a los patrones de precipitación, así como a la actividad ciclónica tropical. (Wang et al., 2006). La AWP comienza a aparecer en junio y alcanza sus máximos de temperatura entre los meses de julio a octubre, a partir de octubre la temperatura decae rápidamente. Diferentes estudios, establecen que las variaciones en la AWP vienen condicionadas principalmente por forzamientos radiativos principalmente de onda corta (básicamente radiación solar), los flujos de calor latente tienen un papel más secundario, especialmente en la fase de enfriamiento (Chang et al. 2007, 2008; Richter and Xie 2008; Misra et al. 2009; Richter et al. 2012). Es por esto por lo que las dificultades de los modelos para predecir las

temperaturas en estas zonas vienen principalmente dadas por errores en los flujos radiativos debido a convecciones locales y coberturas nubosas.

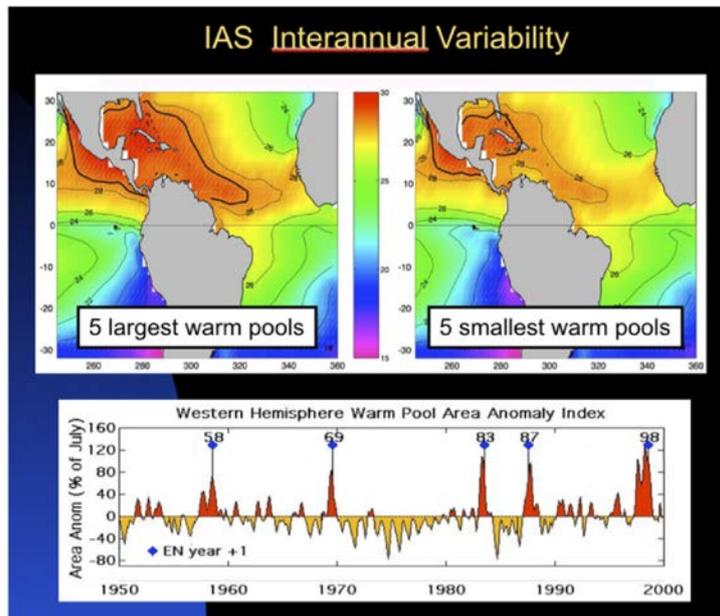


Fig1.8 Variaciones escalares y temporales de la *Warm Pool*. Fuente: Intra-Americas Study of Climate Processes.

También se ha comprobado la correlación entre esta zona y el resto del Atlántico Norte (Atlantic Meridional Gradient Mode, AMM), especialmente con el Atlántico Norte Tropical (NTA). Aunque es estadísticamente significativa, la correlación es menor entre AWP y AMM que entre ENSO y el AWP (Fig. 1.9) (Servain 1991; Chang et al., 1997; Xie et al., 1999; Enfield et al., 1999; Xie and Carton, 2004; Wang and Enfield, 2003).

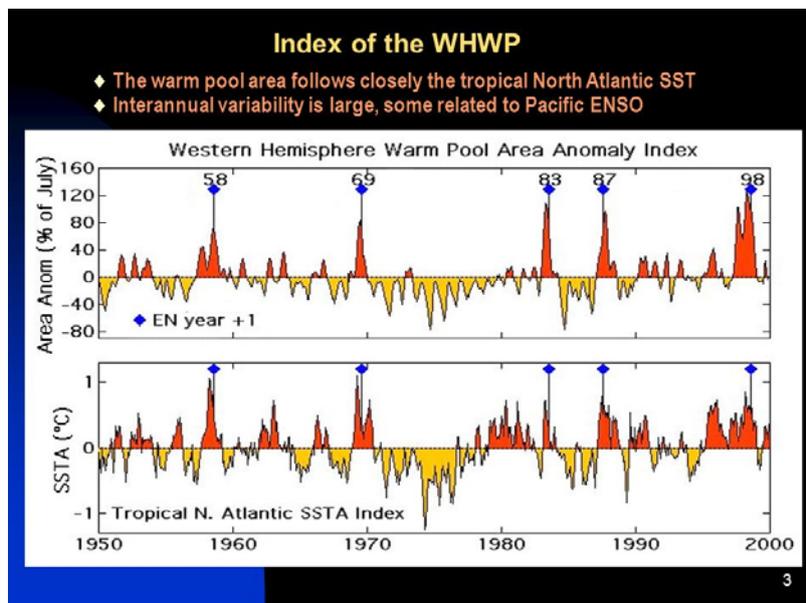


Fig1.9 Correlación entre la superficie del *Warm Pool* y la anomalía de la SST en el Atlántico Norte. Intra-Americas.

Como se puede observar en la Fig. 1.10 la *Warm Pool* sigue unos ciclos multidecadales de oscilación de temperatura superficial. Esto mismo ocurre con la SST en todo el

Atlántico Norte, es la conocida como Oscilación Multidecadal del Atlántico Norte (AMO). Fue identificada por Schlesinger y Ramankutty en 1994. Está bien documentado un período frío entre 1900 a 1925 seguido de un período cálido de 1930 a 1960. De los años 70 a los 90 se dio un período relativamente frío continuado por un rápido aumento de la temperatura hasta la actualidad. (Kushnir 1994; Schlesinger and Ramankutty, 1994; Enfield et al., 2001).

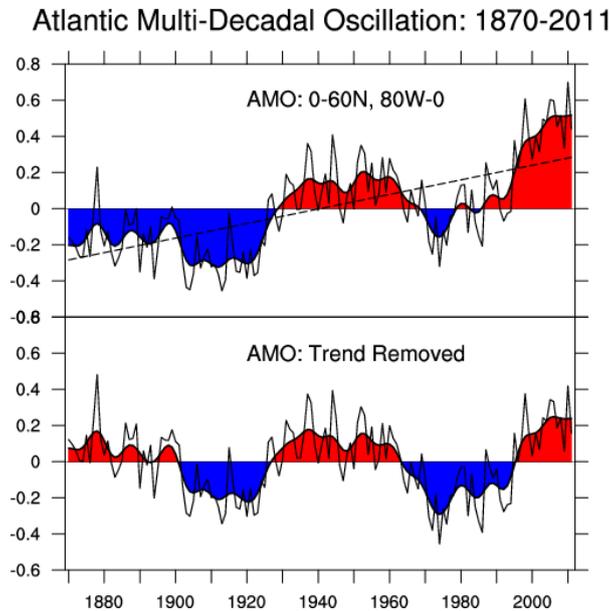


Fig1.10 AMO 1870-2011. Comparativa entre señal y SST Atlántico Norte.

En la Fig. 1.10 se pueden observar las diferencias entre las oscilaciones multidecadales con tendencias debidas a forzamientos externos, como pueden ser el aumento de gases de efecto invernadero de manera antropogénica o natural (gráfica superior) y sin una tendencia (gráfica inferior). En la segunda gráfica solo se tiene en cuenta la variabilidad en el comportamiento interno. Diferentes estudios han determinado que las oscilaciones de temperatura a causa de la AMO son de un rango de aproximadamente $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. También observan una anomalía positiva de temperatura durante el último siglo de $+0.4^{\circ}\text{C}$ para el Atlántico Norte (Enfield et al., 2001; Sutton and Hodson, 2005; Knight et al., 2006).

En el último informe del IPCC se pone de manifiesto las diferencias en las tendencias durante el último siglo, entre el aumento de temperaturas de la SST en el Atlántico Norte y en el resto de los océanos del planeta. De esta manera, mientras la SST ha aumentado en el resto de los océanos, existen regiones en el Atlántico Norte (regiones subpolares) dónde ha llegado a producirse un enfriamiento de la SST.

- **Modelos climáticos globales (GCMs)**

Los modelos climáticos globales (GCMs) han demostrado ser de vital importancia a la hora de simular y realizar distintas proyecciones del impacto del cambio climático en la SST para el siglo XXI (informes IPCC).

Para este propósito, se ejecutan los GCMs bajo distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, anteriormente explicados, considerados por el IPCC. Los distintos

resultados obtenidos siempre ofrecen ciertas incertidumbres que son tratadas en conjunto con el propósito de reducirlas lo máximo posible. De esta manera, los resultados obtenidos, están constituidos por gran cantidad de simulaciones de GCMs bajo distintos escenarios de emisión. Los GCMs han sido desarrollados en el marco de diferentes proyectos europeos, los más recientes el “Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)” fase 3 (CMIP3) y fase 5 (CMIP5). Los resultados son ofrecidos con resoluciones espaciales que oscilan entre los 100 y los 210 km. Además, el proyecto CMIP5 incluye nuevos componentes con el fin de describir interacciones con la atmósfera, el uso de la tierra, la vegetación, la química atmosférica, los aerosoles y los ciclos del carbono.

Objetivos.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar las tendencias de la SST del Atlántico Norte desde 1900 hasta 2005 y sus proyecciones futuras para el siglo XXI. Para ello se han utilizado proyecciones futuras de modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 bajo un escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5.

Con este fin, el presente trabajo consta de una introducción donde se desarrollan conceptos esenciales para poder entender los distintos factores que afectan a la temperatura superficial de los océanos y se describe el área de estudio, en concreto del Atlántico Norte. Posteriormente se presentan los distintos modelos que se utilizan en el trabajo y su procedencia, también las distintas herramientas matemáticas utilizadas para el análisis de la SST. Finalmente, se presentan los resultados y se comparan, tanto para la misma cuenca como para las demás cuencas oceánicas, con los recogidos el último informe del IPCC. (AR5). Por último, se realiza un resumen de los resultados obtenidos en el apartado conclusiones.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Datos

2.1.1 CMIP5.

CMIP5 engloba numerosas instituciones de todo el mundo que trabajan con GCMs. La principal finalidad de dicho proyecto es promover una serie de experimentos con tres objetivos principales: 1) evaluar los mecanismos responsables de las diferencias entre los modelos climáticos, generadas por mecanismos de retroalimentación (asociados al ciclo del carbono y a las nubes); 2) examinar cuán predecible es el clima a distintos rangos temporales y 3) determinar las diferencias entre las respuestas ofrecidas por los distintos modelos con un forzamiento similar.

En la tabla 2.1 se resumen los nombres de los modelos climáticos que se utilizaron en el presente trabajo, así como también los de las instituciones que los desarrollan, la resolución espacial y el rango de tiempo para el que se ejecutaron.

En este trabajo se han considerado los modelos anteriormente expuestos forzados bajo un escenario de emisión RCP 8.5 (“Trayectorias de emisión representativas”). Este escenario presupone unas medidas nulas de los gobiernos para paliar el cambio climático, así como un desarrollo económico basado en los combustibles fósiles. Estos gases de efecto invernadero derivados del consumo de combustibles fósiles, se han ido acumulando en la atmósfera a lo largo de los últimos decenios, y, según este escenario, seguirán produciéndose y acumulándose a un ritmo mayor durante lo que resta de siglo, produciendo un forzamiento radiativo (FR) de 8.5 W m^{-2} para finales de este siglo y como consecuencia un elevado aumento de la temperatura global.

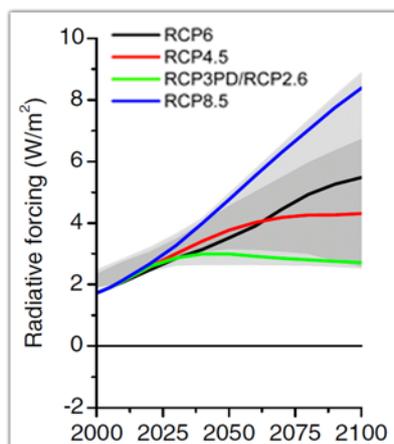


Figura 2.1. Forzamiento radiativo de los distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero para el siglo XXI. Fuente: IPCC.

Bajo esta premisa, la Tierra experimentaría un aumento medio de la temperatura global de unos 5 grados para el año 2100. (Fig. 2.1, IPCC).

Tabla 2.1. Características de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 utilizados.

Modelo	Nombre	Instituto	Resolución (lat, lon)	Rango de datos
1	ACCESS1.0	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	Malla variable	1850-2100
2	ACCESS1.3			
3	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.	(1, 1.4)	1850-2100
4	CCSM4	National Center for Atmospheric Research	Malla variable	1850-2100
5	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici.	(1, 1.4)	1850-2100
6	CMCC-CMS			
7	FGOALS-s2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	(0.5, 1)	1850-2100
8	GISS-E2-H-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies	(1, 1.25)	1876-2100
9	GISS-E2-R			
10	HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre.	(0.3-1, 1)	1850-2100
11	HadGEM2-ES			
12	INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	(0.5, 1)	1850-2100
13	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	Malla variable	1850-2300
14	IPSL-CM5A-MR			
15	IPSL-CM5B-LR			
16	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	(0.5, 1.4)	1850-2100
19	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Malla variable	1850-2100
20	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	(0.5, 1)	1850-2100
21	MRI-ESM1		(0.5-1.1, 1)	
22	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	Malla variable.	1850-2100

2.1.2 MatLab

MatLab es la abreviatura de *Matrix Laboratory*. Se trata de una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje propio (lenguaje M).

Las prestaciones más importantes de *MATLAB* son: la escritura del programa en lenguaje matemático; La implementación de las matrices como elemento básico del lenguaje, lo que permite una gran reducción del código, al no necesitar implementar el cálculo matricial; La implementación de aritmética compleja; Un gran contenido de órdenes específicas, agrupadas en *TOOLBOXES*; La posibilidad de ampliar y adaptar el lenguaje, mediante ficheros de script y funciones .m.

En cuanto a las principales funciones de Matlab se encuentran el procesamiento de señales, el diseño de sistemas de control, la simulación de sistemas dinámicos, la identificación de sistemas y la realización de redes neuronales. En el Anexo I se muestran los programas MATLAB empleados en este trabajo.

2.2 Métodos

La variable con la que se va a trabajar es la SST obtenida de los GCMs del proyecto CMIP5. Esta variable está en una escala mensual. Para cada modelo se extrajo un bloque de datos de SST que se corresponde con nuestra región de estudio (0°W-80°W; 18°N-60°N). Puesto que la resolución de cada uno de los modelos climáticos es diferente, tal y como se describió en la tabla 2.1, la SST de todos los modelos se interpoló a una malla con un origen común y de 1x1 de resolución espacial. Esto nos permite la comparación entre todos los modelos de cada punto de la malla. El método de interpolación usado fue bilineal y a los vecinos más próximos.

En cuanto a la escala temporal se consideró el rango de años que va de 1900 a 2005 como rango histórico y el que va de 2005 a 2099 como rango de proyecciones futuras. Posteriormente se realiza un promedio anual de los datos mensuales de SST.

Los resultados del estudio se presentaron para cada periodo (histórico y futuro) en forma de SST promedio con su desviación estándar y de tendencias caracterizadas con su fiabilidad estadística. La significancia estadística se calculó mediante la función de Spearman. Este coeficiente sirve para la correlación de dos variables aleatorias continuas.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d^2}{n(n^2 - 1)}$$

Dónde d es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden x – y y n el número de parejas de datos.

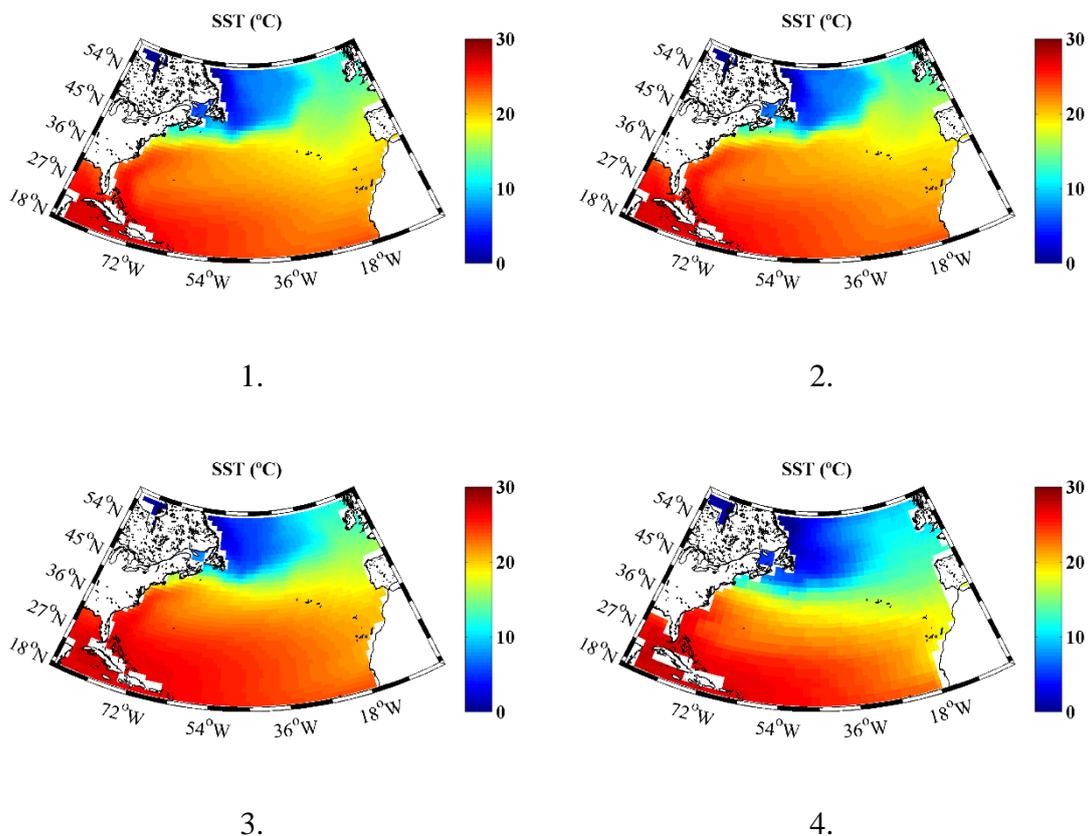
También se consideró el promedio a todos los modelos (multimodel) de la SST media y de su tendencia. El multimodel permite tener una incertidumbre menor que la de cualquier modelo de forma individual, minimizando los errores.

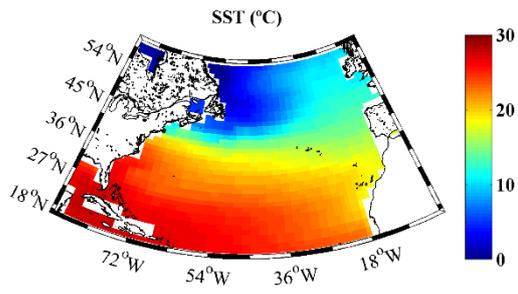
3. RESULTADOS.

En este apartado se caracterizará la SST y se analizará su evolución en el Atlántico Norte para dos periodos de tiempo, uno pasado (periodo 1900- 2005) y otro futuro (2006- 2099). Para ello se considerarán los valores de SST y sus proyecciones futuras obtenidos a partir de los 22 modelos climáticos globales, descritos en la tabla 2.1. Las proyecciones futuras analizadas están simuladas bajo un escenario de emisión de gases de efecto invernadero de 8.5 W m^{-2} tal y como se explicó en el capítulo de Datos y Métodos. Para caracterizar la SST tanto en el pasado como en el futuro se utilizarán los valores medios de SST mientras que para caracterizar como ha sido su evolución en el pasado y como será en el futuro se utilizarán tendencias lineales tal y como se describió en el capítulo anterior. Para finalizar, los patrones de SST obtenidos se compararán con los ofrecidos en el quinto informe del IPCC tanto para la misma región como para diferentes cuencas oceánicas.

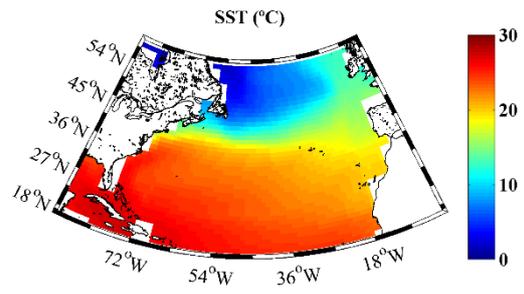
3.1 Caracterización de la SST histórica.

En la Fig.3.1 se muestran los valores medios de la SST para el Atlántico Norte durante el periodo 1900- 2005 para cada uno de los GCMs.

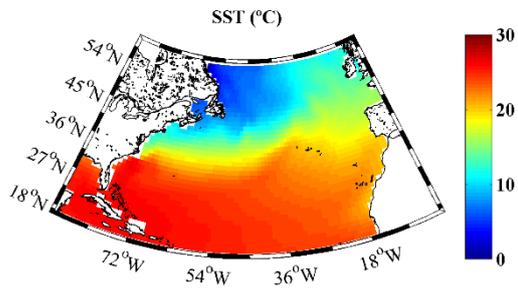




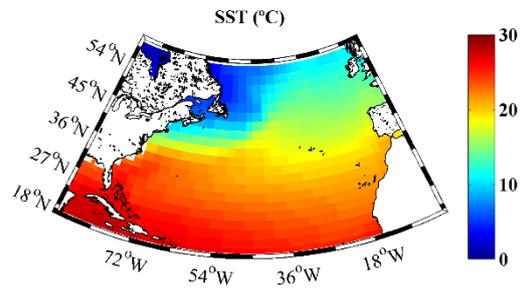
5.



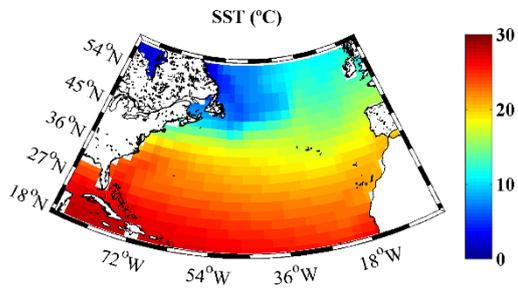
6.



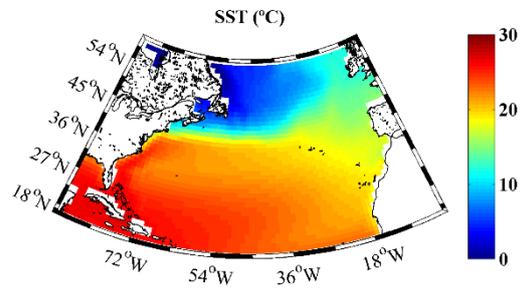
7.



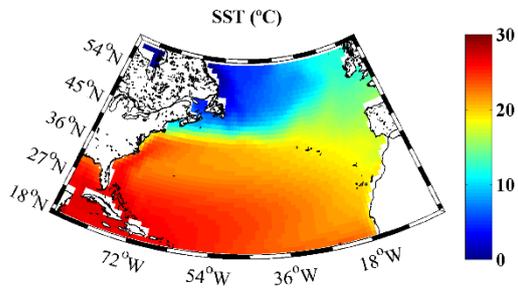
8.



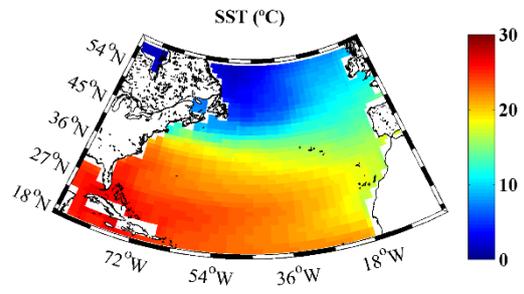
9.



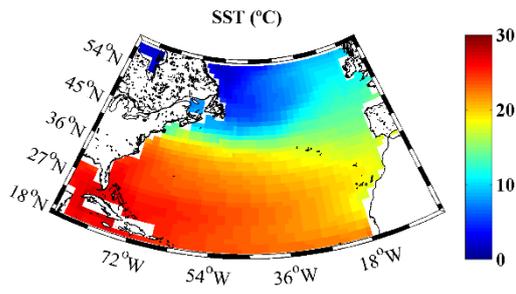
10.



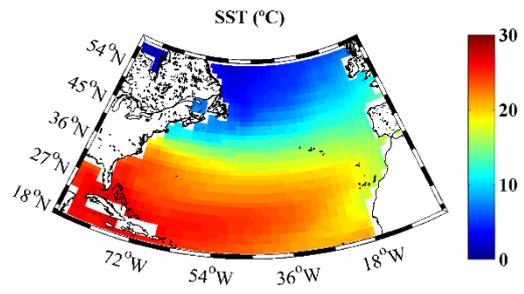
11.



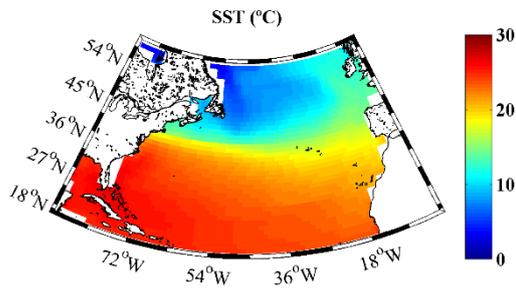
12.



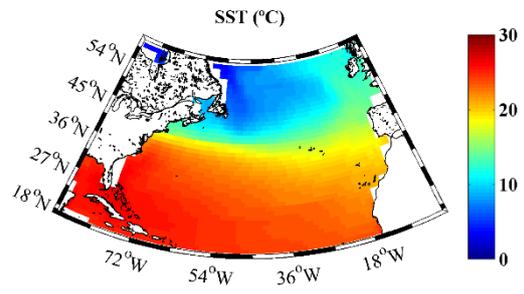
13.



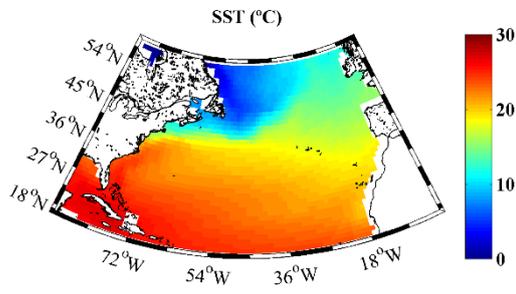
14.



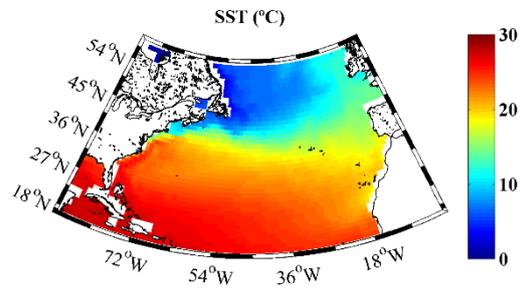
15.



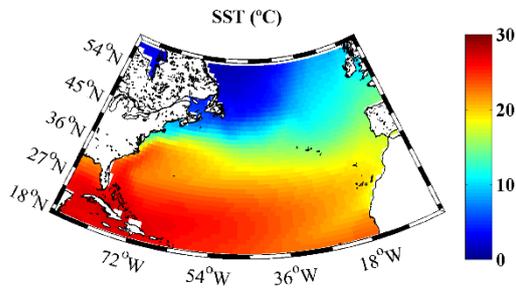
16.



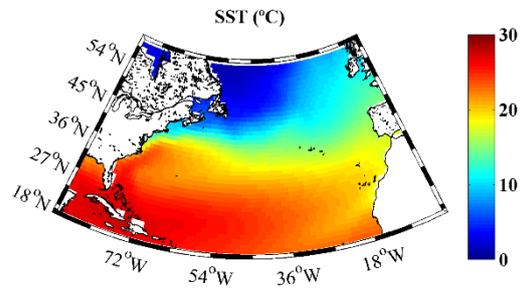
17.



18.



19.



20.

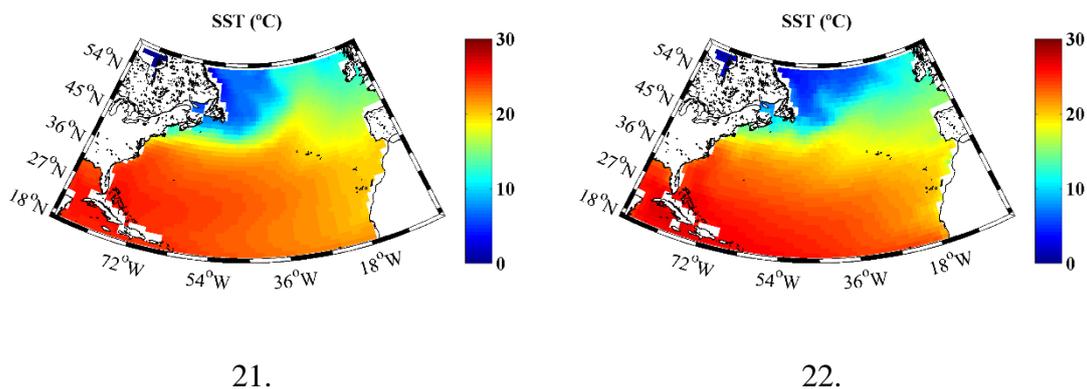


Figura 3.1. Promedio de la temperatura superficial del mar (SST, en °C) para el Atlántico Norte durante el periodo 1900- 2005 para cada uno de los 22 modelos climáticos globales descritos en la tabla 2.1.

Todos los modelos muestran unos patrones comunes de SST muy definidos. Lo más destacable es el gradiente de temperatura sur-norte (de mayor a menor) que puede observarse en toda la región. En latitudes bajas tenemos temperaturas superficiales, de en torno a los 25-30°C, mientras que en latitudes altas la temperatura oscila entre los 0-12°C. Este gradiente de temperatura es mucho mayor alrededor del paralelo 40°N, en esta zona el gradiente de la temperatura superficial es mayor que en el resto del Atlántico Norte. Se trata de la zona al norte de la Corriente del Golfo y la Corriente del Atlántico Norte.

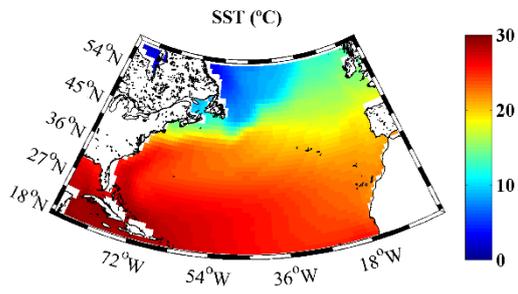
En todos los modelos se reconoce también la zona del *Warm Pool*. Recordemos que se trata de un área próxima al Mar Caribe donde se observan las SST más altas, de más de 28.5°C en media. Esta zona es clave en el desarrollo y el funcionamiento de la Corriente del Golfo, así como en la formación de huracanes en Centroamérica tal y como se comentó en la Introducción.

Por otro lado, en algunos modelos (Fig 3.1, modelos 13, 14, 19, 20) podemos apreciar un ligero afloramiento de aguas más frías en torno a las Islas Canarias debido a los vientos alisios predominantes en la zona.

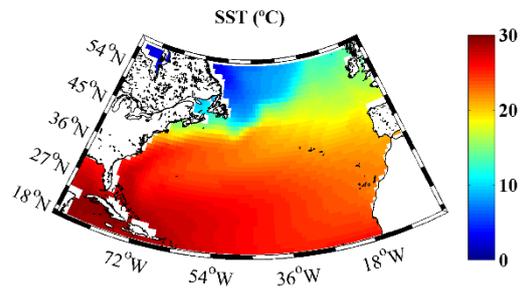
En general, a latitudes altas por encima de los 45°N, todas las simulaciones indican que el agua más fría se encuentra del lado oeste, cerca del continente americano, mientras que, al este, el agua se encuentra unos pocos grados más caliente. Esto puede ser debido a la ramificación norte de la Corriente del Atlántico Norte que aporta aguas más cálidas al oeste de las islas británicas.

3.2 Caracterización de la proyección futura de la SST.

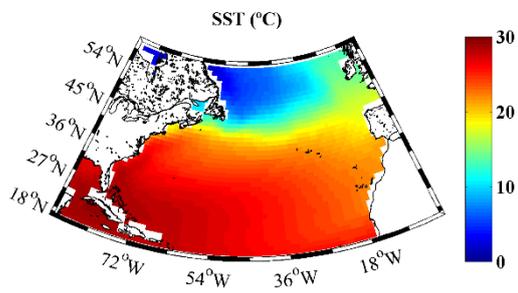
En la Fig. 3.2 se muestran los valores medios de las proyecciones futuras de la SST para el Atlántico Norte durante el periodo 2006- 2099 bajo un escenario de emisión de gases de efecto invernadero de 8.5 W m⁻².



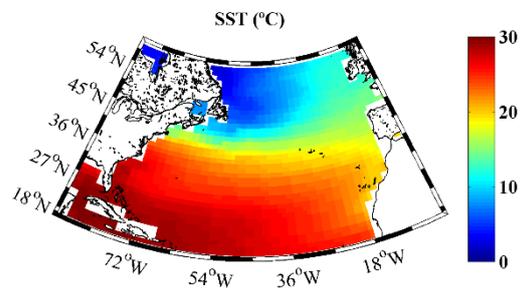
1.



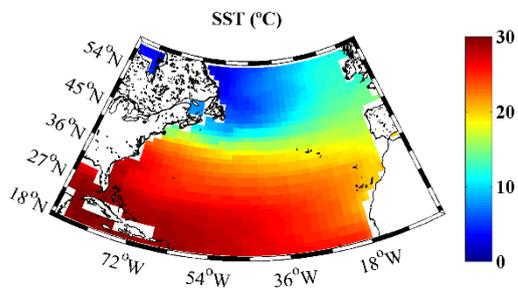
2.



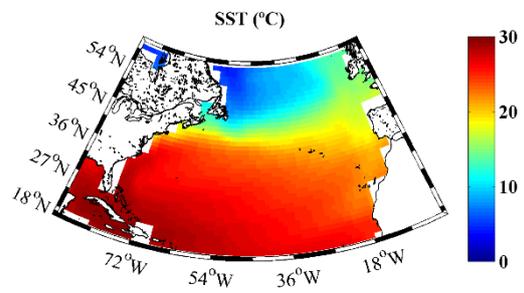
3.



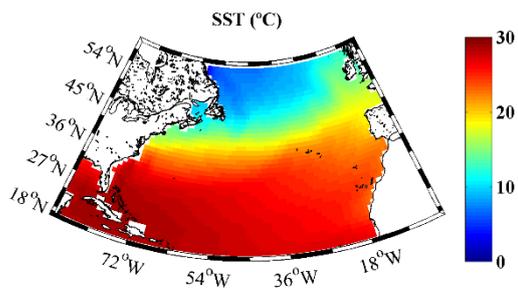
4.



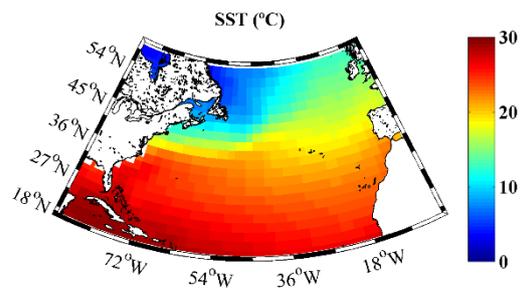
5.



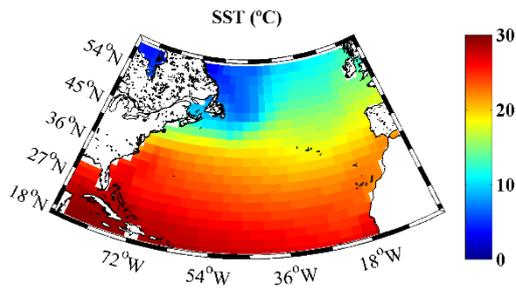
6.



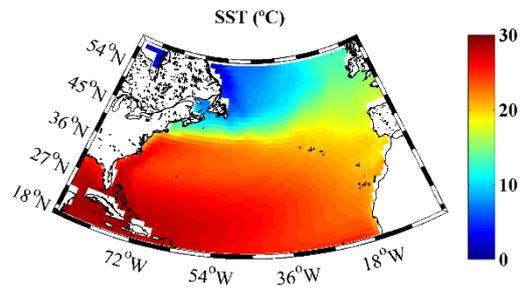
7.



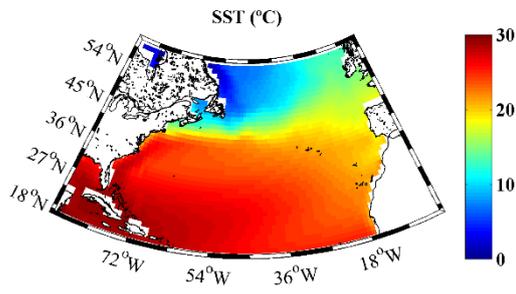
8.



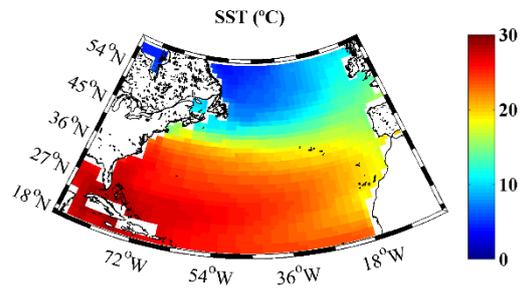
9.



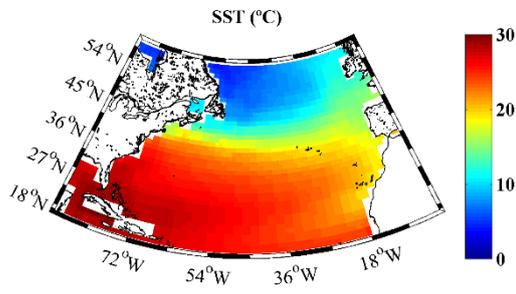
10.



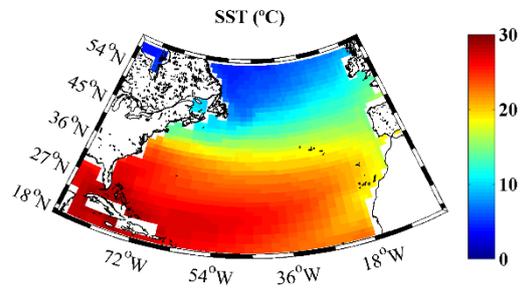
11.



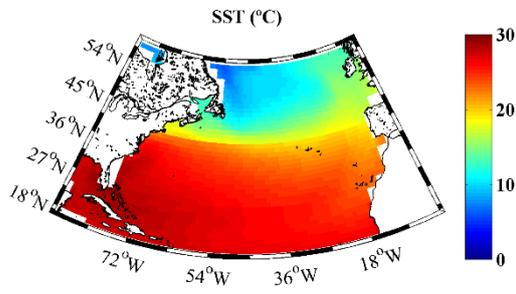
12.



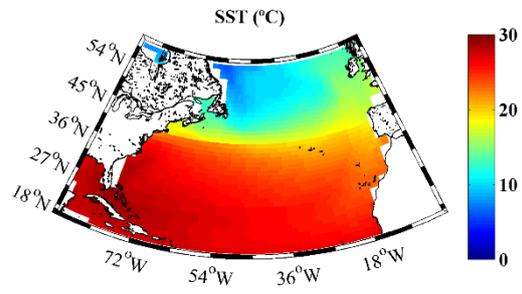
13.



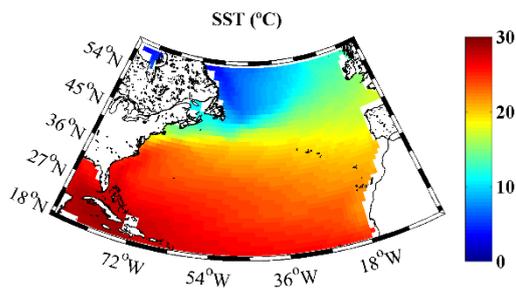
14.



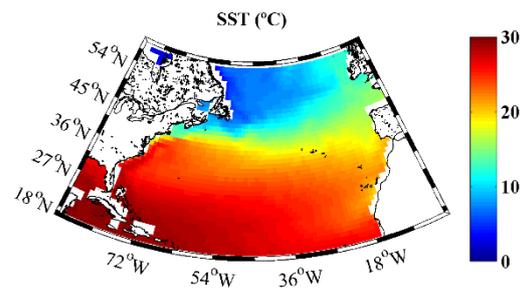
15.



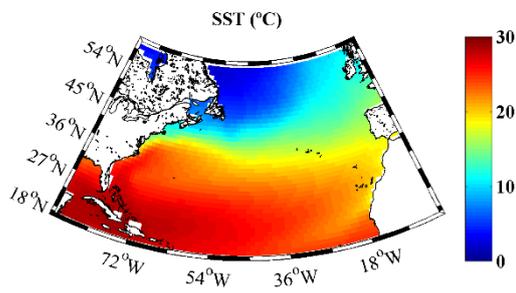
16.



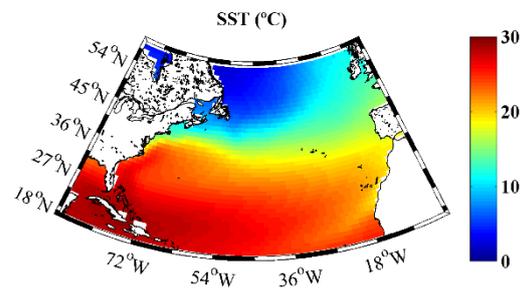
17.



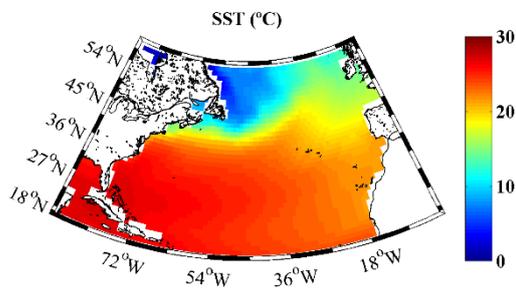
18.



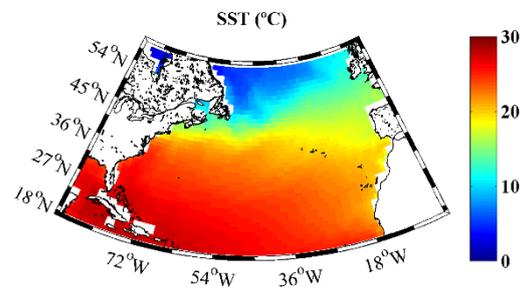
19.



20.



21.



22.

Figura 3.2. Promedio de las proyecciones futuras de la temperatura superficial del mar (SST, en °C) para el Atlántico Norte durante el periodo 2006- 2099 para cada uno de los 22 modelos climáticos globales descritos en la tabla 2.1. Las proyecciones futuras se realizaron bajo un escenario de emisión de gases de efecto invernadero de 8.5 W m^{-2} .

Las proyecciones futuras de los valores medios de SST de todos los modelos muestran unos patrones muy similares a los valores medios del pasado, aunque con un ligero y homogéneo aumento de la SST en todo el Atlántico Norte. Sólo en algunos modelos se puede destacar que las aguas más cálidas llegan a latitudes un poco más altas, sobre todo en la zona oeste del atlántico cerca de la costa americana (Fig. 3.2, modelos 3, 15, 16, 22).

3.3 Comparación entre la SST histórica y futura.

Dado que todos los modelos reproducen patrones muy similares y con valores muy parecidos de SST en la región de estudio tanto históricos como para el futuro, se construye un multimodel promediando a todos los modelos y considerando su desviación estándar.

De este modo, el multimodel del valor medio de la SST histórica (Figura 3.3(a)) muestra un patrón similar al anteriormente descrito para cada uno de los modelos.

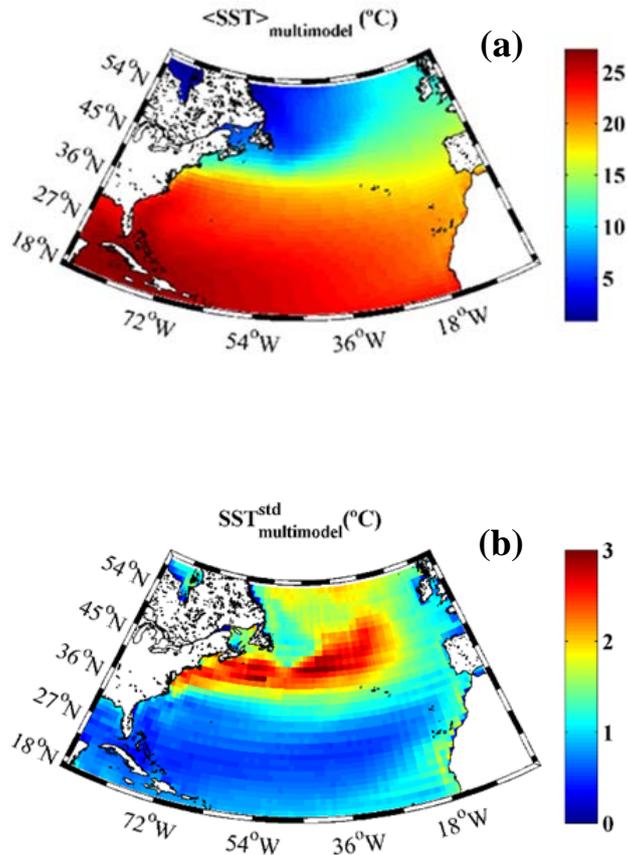


Figure 3.3. (a) Promedio de los valores medios de la SST a todos los modelos descritos en la tabla 2.1 para el periodo 1900- 2005. (b) Desviación estándar del promedio a todos los modelos.

En cuanto a las desviaciones entre modelos, la Fig. 3.3 (b) muestra que la región donde el gradiente N-S de SST varía más rápidamente tiene la mayor desviación estándar (~2.5°C). Esta región se corresponde con la zona de paso de la Corriente del Golfo. Pequeños cambios en dicha corriente dan lugar a que las simulaciones produzcan resultados diversos con lo que las desviaciones son mayores en esta zona. Entorno a Canarias se producen desviaciones del orden de 1.5°C debido a que el afloramiento depende del viento, tanto de su dirección como de su intensidad. El viento es una variable que fluctúa mucho más que la SST y como consecuencia de esa variabilidad, la desviación estándar aumenta en esta zona respecto a las regiones adyacentes.

El multimodel del valor medio de la SST en el futuro (Fig. 3.4 (a)) muestra un patrón muy parecido al del pasado en la Fig. 3.3(a).

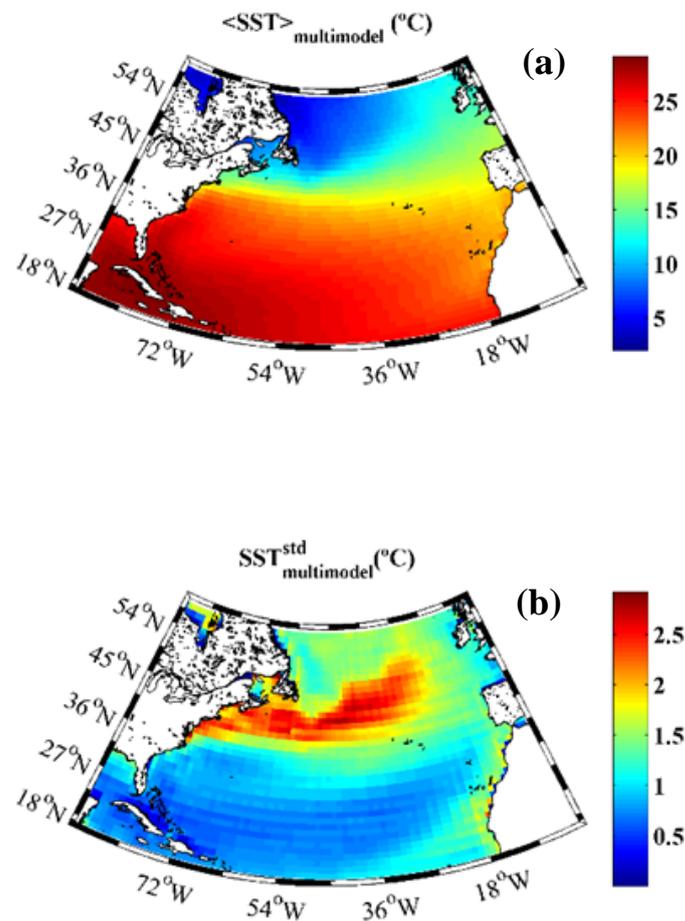
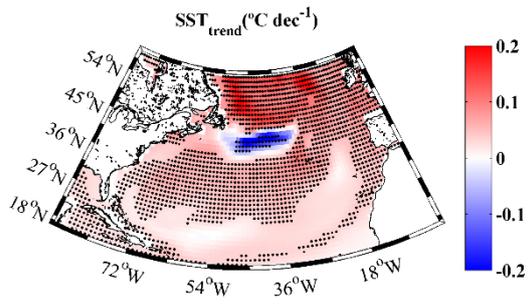


Figure 3.4. (a) Promedio de los valores medios de las proyecciones futuras de la SST a todos los modelos descritos en la tabla 2.1 para el periodo 2006- 2099. (b) Desviación estándar del promedio a todos los modelos.

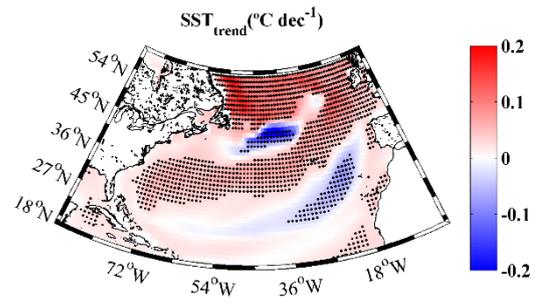
En cuanto a la dispersión de los modelos para las proyecciones futuras (Fig. 3.4(b)), podemos apreciar que macroscópicamente es similar a la obtenida para el periodo histórico con pequeñas diferencias a altas latitudes.

3.5 Evolución histórica de la SST.

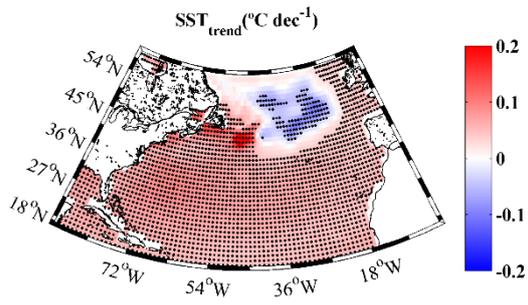
En la Fig.3.5 se muestran las tendencias de la SST para el periodo 1900- 2005. Las regiones con tendencias con una significancia >99% están marcadas con un punto negro.



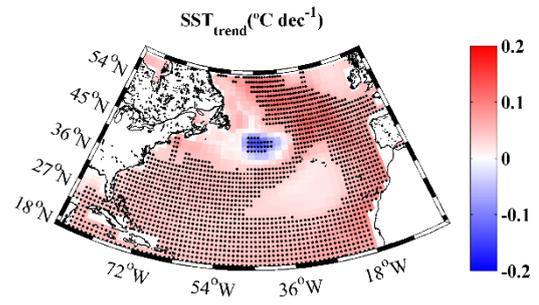
1.



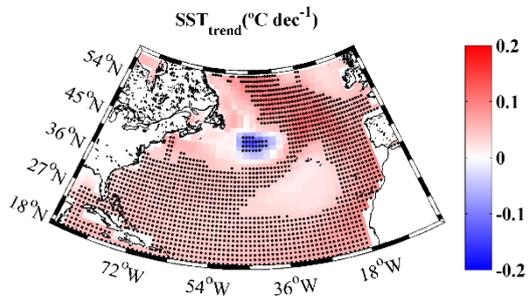
2.



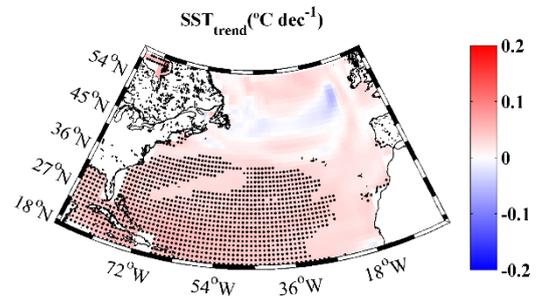
3.



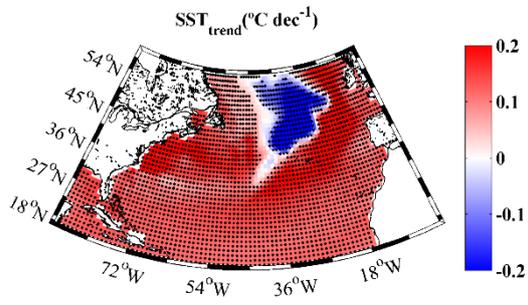
4.



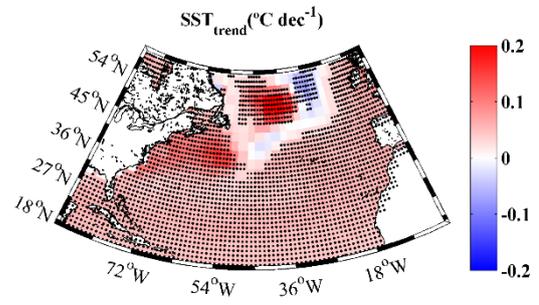
5.



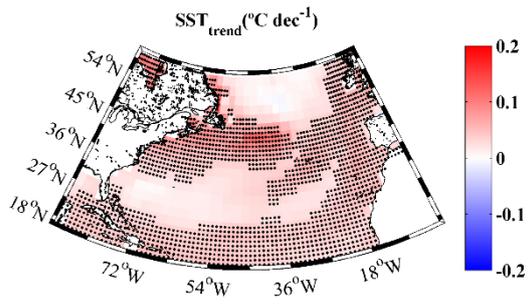
6.



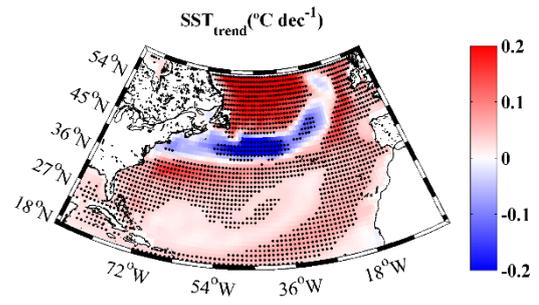
7.



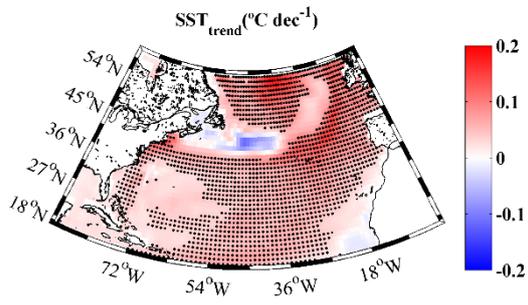
8.



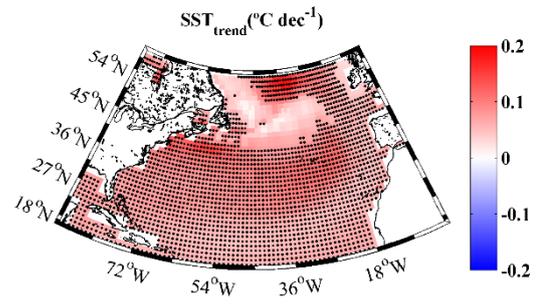
9.



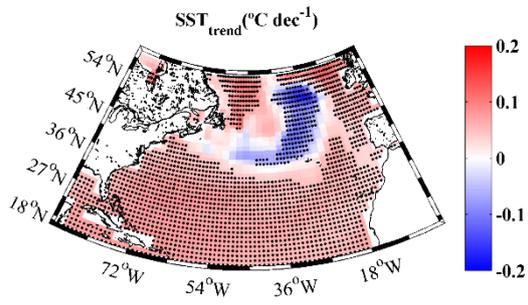
10.



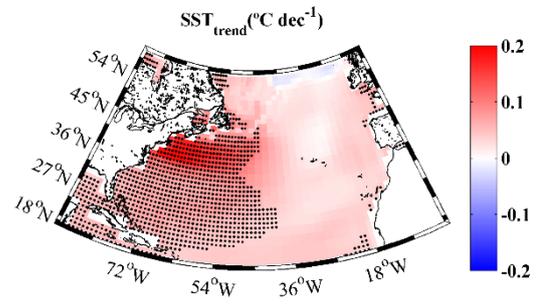
11.



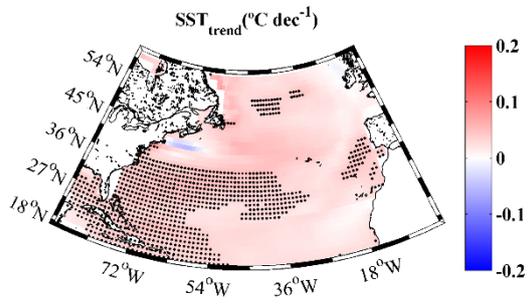
12.



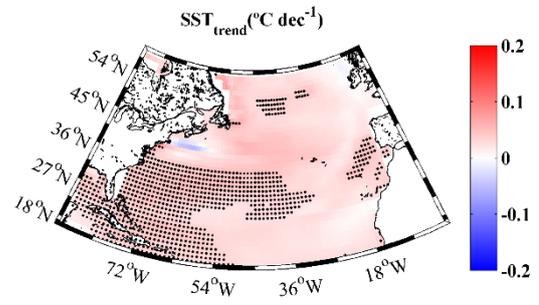
13.



14.



15.



16.

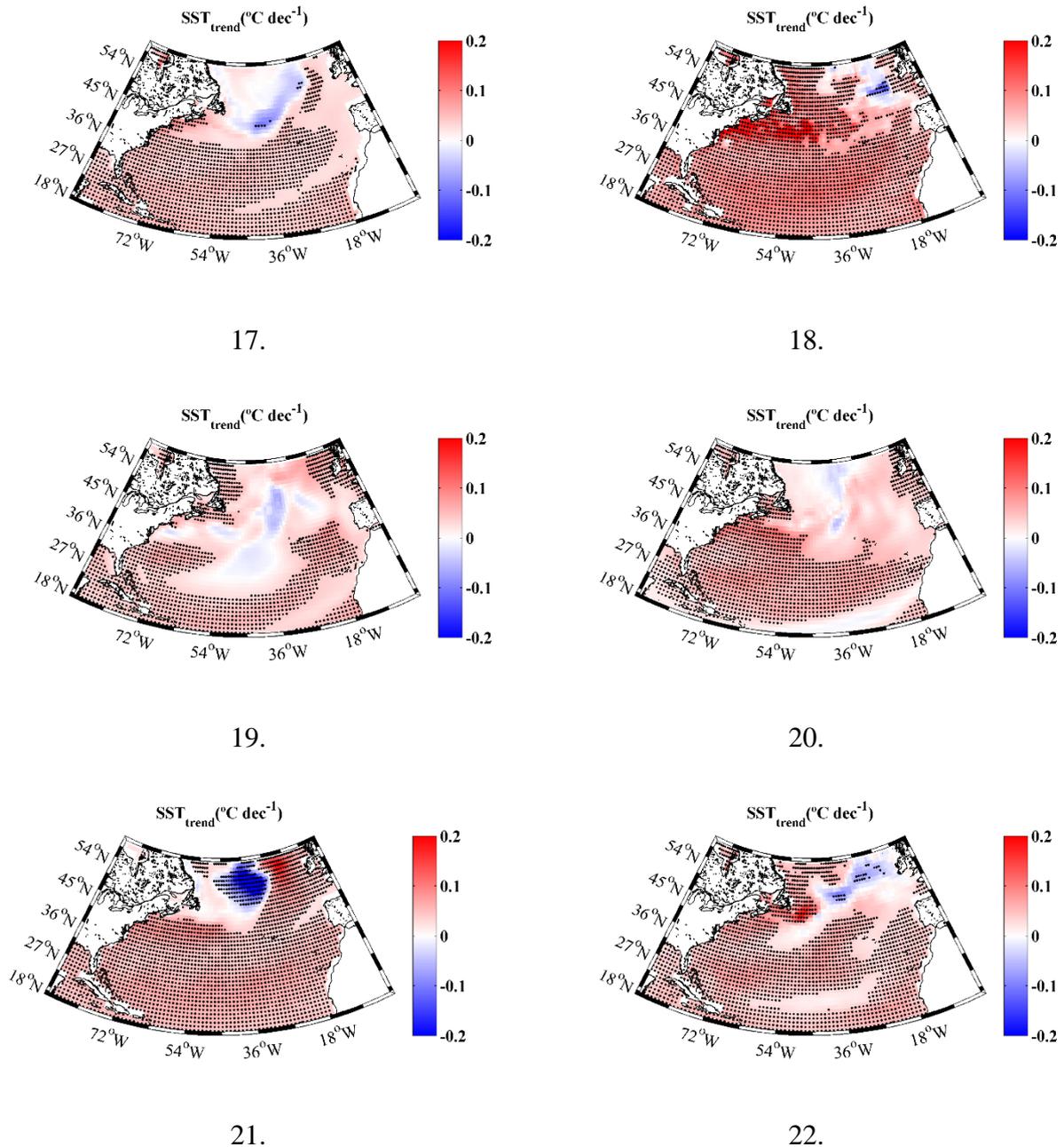


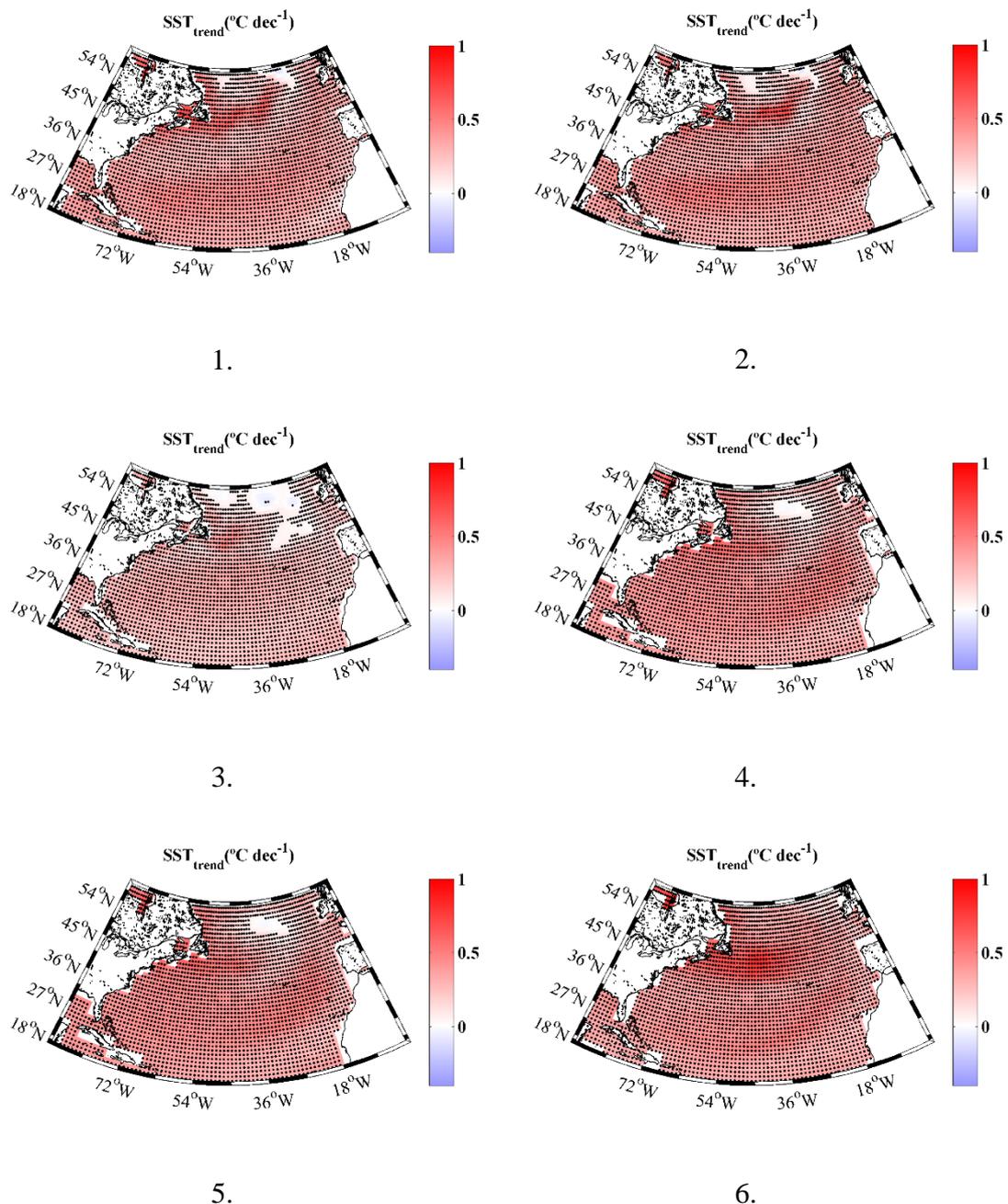
Figura 3.5. Tendencia de la temperatura superficial del mar (SST, en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$) para el Atlántico Norte durante el periodo 1900- 2005 para cada uno de los 22 modelos climáticos globales descritos en la tabla 2.1. Los puntos negros indican tendencias con una significancia $>99\%$.

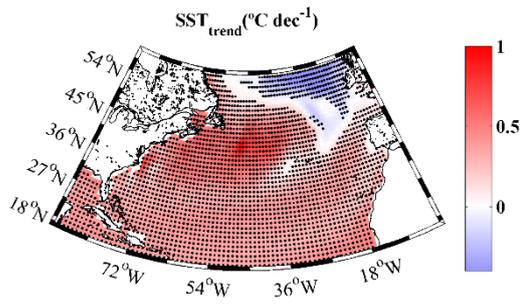
A pesar de que las tendencias históricas de la SST son más dispares entre los diferentes modelos que los valores medios se pueden detectar patrones comunes entre todos ellos. La tendencia general es de un aumento de temperatura de entre 0.05 y 0.2 $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, especialmente en latitudes menores a los 40°N . Además, también se puede observar en todos los modelos una zona en la cual se predice una disminución de hasta 0.2 grados. Aunque la posición y el tamaño de esta zona es bastante variable de unos modelos a otros, generalmente se encuentra en latitudes medias altas y en el centro del Atlántico Norte.

Las tendencias son significativas para amplias zonas del océano. Sin embargo, existen regiones en las cuales las tendencias son nulas o inferior a $0.1^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ que carecen de significancia estadística.

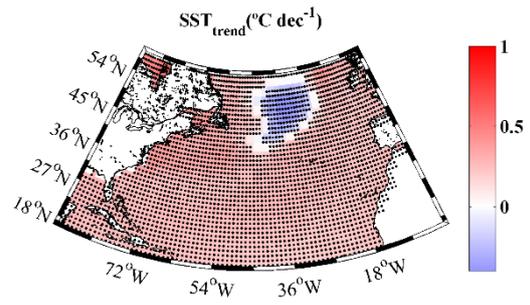
3.5 Evolución futura de la SST.

En la Fig.3.6 se muestran las tendencias de las proyecciones futuras de la SST para el periodo 2006- 2099. Las regiones con tendencias con una significancia $>99\%$ están marcadas con un punto negro.

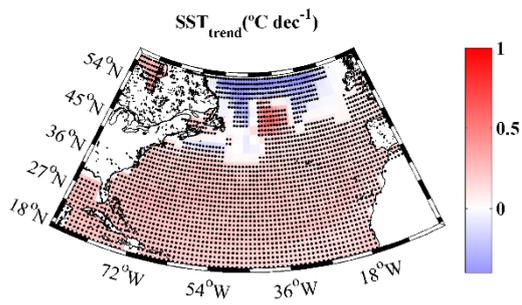




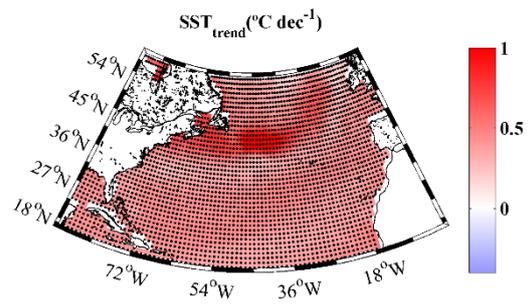
7.



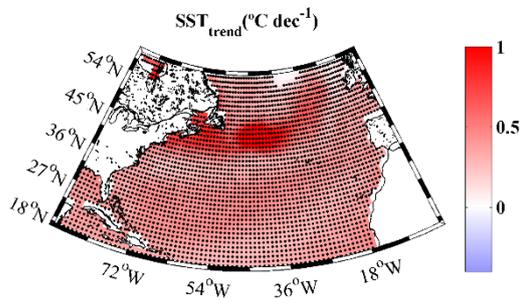
8.



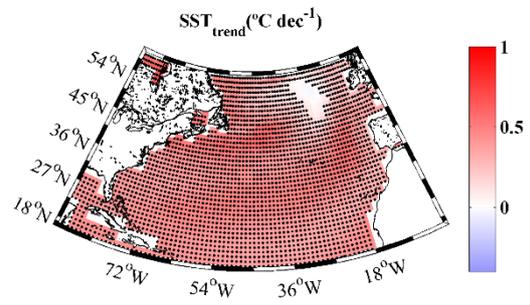
9.



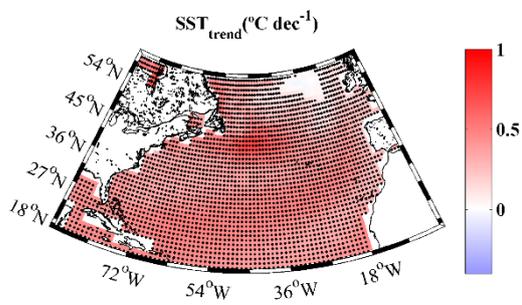
10.



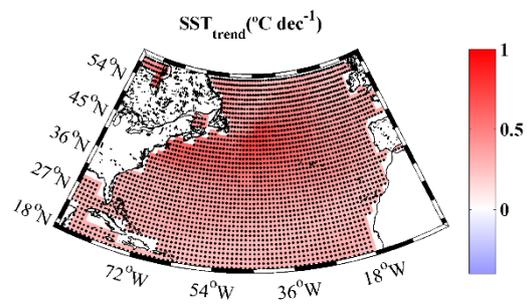
11.



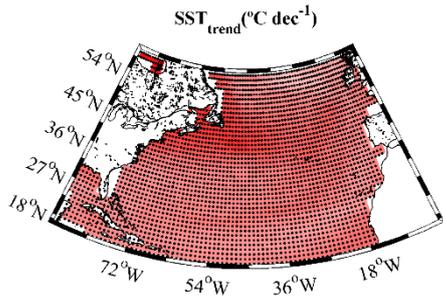
12.



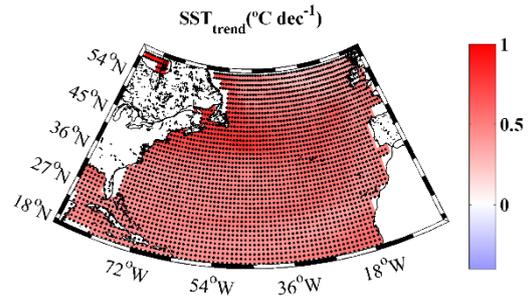
13.



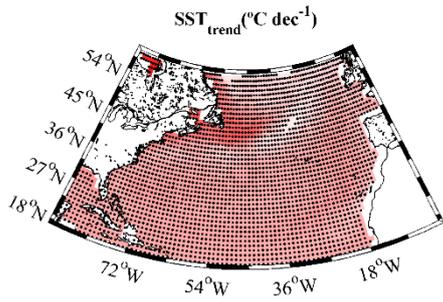
14.



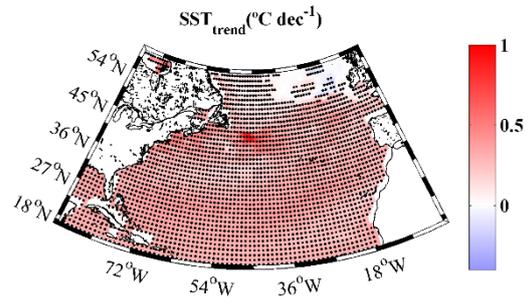
15.



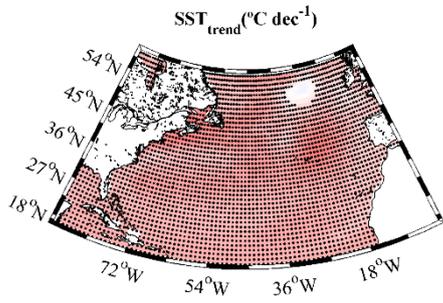
16.



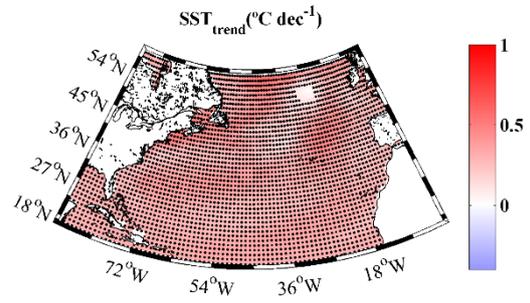
17.



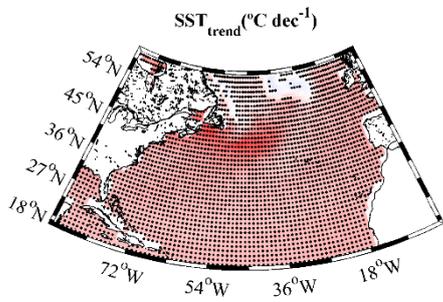
18.



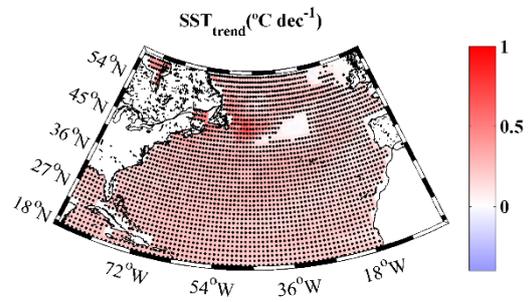
19.



20.



21.



22.

Figura 3.6. Tendencia de la temperatura superficial del mar (SST, en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$) para el Atlántico Norte durante el periodo 2006- 2099 para cada uno de los 22 modelos climáticos globales descritos en la tabla 2.1. Los puntos negros indican tendencias con una significancia $>99\%$.

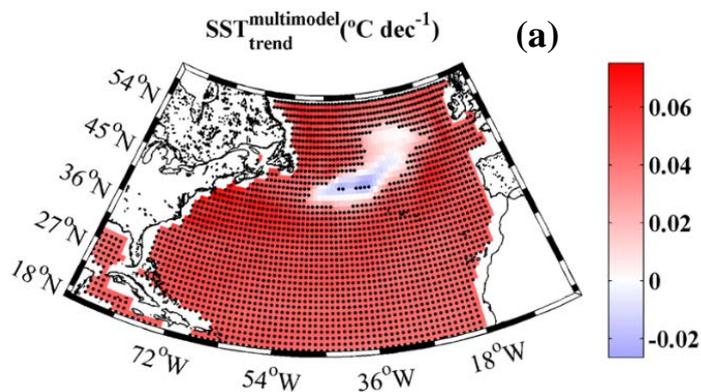
Las tendencias futuras obtenidas de los distintos modelos son mucho más homogéneas entre sí que las obtenidas para el pasado. Todos los modelos prevén un aumento de $0.5^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ para latitudes bajas en todo el Atlántico Norte. Para latitudes más altas solo tres modelos (7, 8, 9) muestran una zona en la cual la tendencia de la temperatura sería a disminuir $\sim -0.25^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Siguen un patrón similar a las simulaciones realizadas para el siglo pasado mostrando un enfriamiento en las latitudes altas del Atlántico Norte.

Las tendencias futuras son significativas en prácticamente todo el Atlántico Norte para prácticamente todos los modelos. Sólo en pequeñas regiones a altas latitudes dónde las tendencias son prácticamente nulas observamos significancias inferiores al 99%.

3.6 Comparación entre la evolución histórica y futura de la SST.

En la Fig. 3.7, se representa el multimodel de las tendencias de la SST histórica (Fig. 3.7(a)) y la proyectada para el futuro (Figura 3.7(b)).

Las tendencia histórica de la SST muestra un aumento significativo de la temperatura del orden de $0.06^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ prácticamente en todo el Atlántico Norte con la excepción de una pequeña región ($40^{\circ}\text{N} - 50^{\circ}\text{N}$ y $27^{\circ}\text{W} - 45^{\circ}\text{W}$) dónde no se aprecia tendencia o se observa un descenso de la temperatura de como mucho $-0.02^{\circ}\text{C dec}^{-1}$.



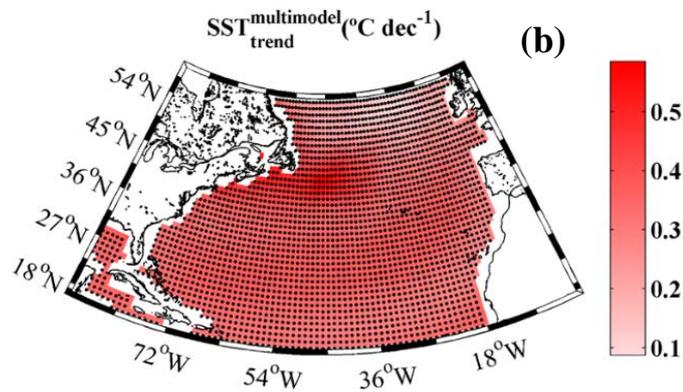


Figura 3.7. Multimodel de la tendencia de la temperatura superficial del mar (SST, en $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$) para el Atlántico Norte durante el periodo 1900- 2005 (a) y para el periodo 2006- 2099 (b). Los puntos negros indican tendencias con una significancia $>99\%$.

El multimodel para las tendencias futuras de SST es más homogéneo y un orden de magnitud más intenso que el observado para el periodo histórico. El aumento de la temperatura oscila entre $0.1^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ y $0.6^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Si distinguimos entre zonas, el mayor aumento se espera al este de la costa americana (entre 45°N y 50°N), mientras que el menor aumento se proyecta más al noreste de la zona anteriormente nombrada. En el resto del Atlántico Norte el aumento de la SST es homogéneo y está entre $0.2^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ y $0.4^{\circ}\text{C dec}^{-1}$.

3.7 Comparación con los resultados recogidos en el AR5 del IPCC.

Comparando las tendencias históricas obtenidas con los resultados mostrados el último informe del IPCC (AR5) sobre la temperatura superficial de los océanos en el último siglo (Fig. 3.8), se puede observar que, por norma general, las distintas bases de datos también visualizan una tendencia al incremento de la SST de en torno a los 0.8°C para todos los océanos de la Tierra desde 1900 a 2012 lo que supondría entorno a un aumento de $0.07^{\circ}\text{C dec}^{-1}$.

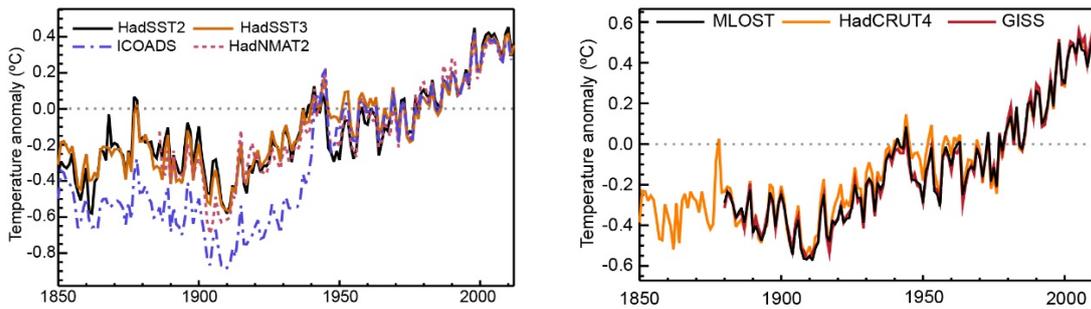


Figura 3.8. Anomálfa de la media anual de la SST ($^{\circ}\text{C}$) para todos los océanos del mundo desde 1900 a 2012 obtenida de diferentes bases de datos. Gráficas obtenidas del quinto informe del IPCC (AR5).

Fijándose en lo que establece el quinto informe de manera espacial para el Atlántico Norte (Fig. 3.9), se puede observar que las distintas bases de datos siguen un patrón bastante similar al obtenido en este estudio. Ha habido un calentamiento de la superficie con índices de fiabilidad bastante altos en latitudes bajas mientras que, a latitudes más altas, las diferentes bases de datos establecen que puede existir un pequeño descenso térmico en la superficie del océano, aunque sin fiabilidad estadística.

Debido a que en el quinto informe del IPCC no se facilita ninguna imagen con tendencias en la SST en el siglo pasado, se ha decidido escoger el mapa de la temperatura superficial del aire de la base de datos GISS que es la que ofrece una mayor cobertura de datos.

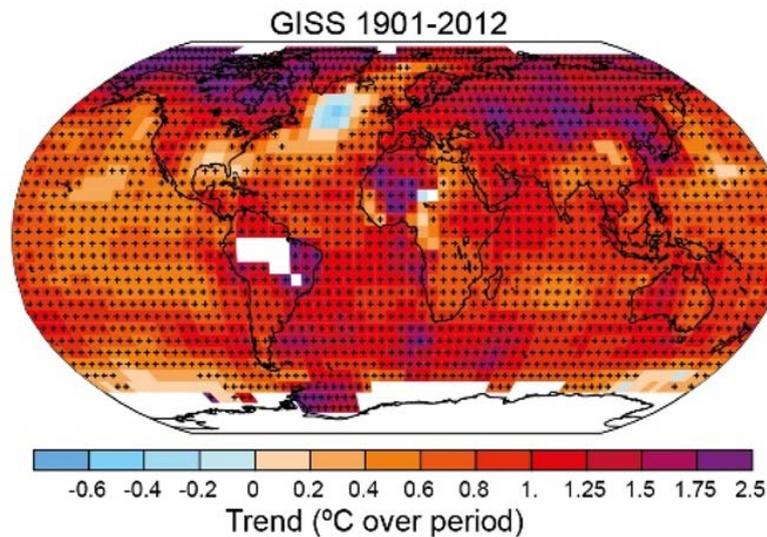


Figura 3.9. Tendencias anuales de la temperatura superficial del aire desde 1901 a 2012 obtenida de la base de datos GISS. Gráficas obtenidas del quinto informe del IPCC (AR5).

Este mapa muestra incrementos en la temperatura del aire de entre 0.04 y 0.06 $^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ para la región del Atlántico Norte con una región sin significancia estadística enfrente a la costa este americana dónde se observa una disminución de la temperatura superficial del aire de entorno a $0.02^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Pese a que no son completamente equivalentes la SST y la temperatura superficial del aire sus tendencias son muy similares (Fig. 3.7 a).

Si se comparan las proyecciones futuras de SST obtenidas en este estudio con los resultados del quinto informe del IPCC para el escenario RCP8.5, se puede observar que se espera un aumento de la temperatura superficial para todos los océanos del mundo de en torno $0.34\text{ }^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ (Fig. 3.9, línea roja). Este aumento, al igual que en este estudio, es un orden de magnitud mayor que el observado en todos los océanos del mundo durante el siglo pasado. Teniendo en cuenta la pendiente del incremento de SST bajo un escenario RCP8.5 (Fig. 3.9, línea roja), que se trata de un promedio a todos los océanos del mundo y que nuestro estudio se prolonga 40 años más, no parece extraño que se alcancen tendencias en las proyecciones futuras de SST de entorno a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ para el Atlántico Norte para finales del siglo XXI como las obtenidas en este estudio.

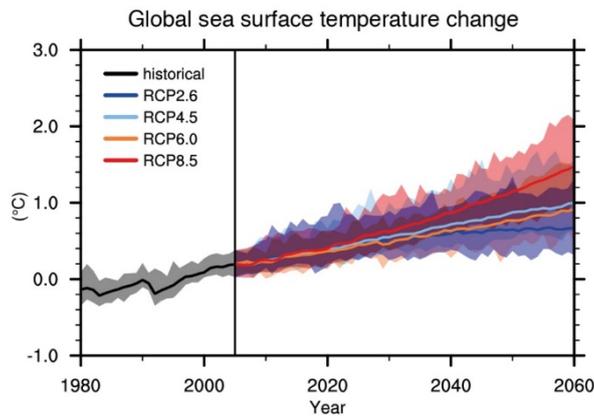


Figura 3.10. Evolución temporal de las proyecciones futuras de la SST global ($^{\circ}\text{C}$) bajo diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6 (2.6 W m^{-2}), 4.5 (4.5 W m^{-2}), 6.0 (6.0 W m^{-2}) y 8.5 (8.5 W m^{-2})). Gráfica obtenida del quinto informe del IPCC (AR5).

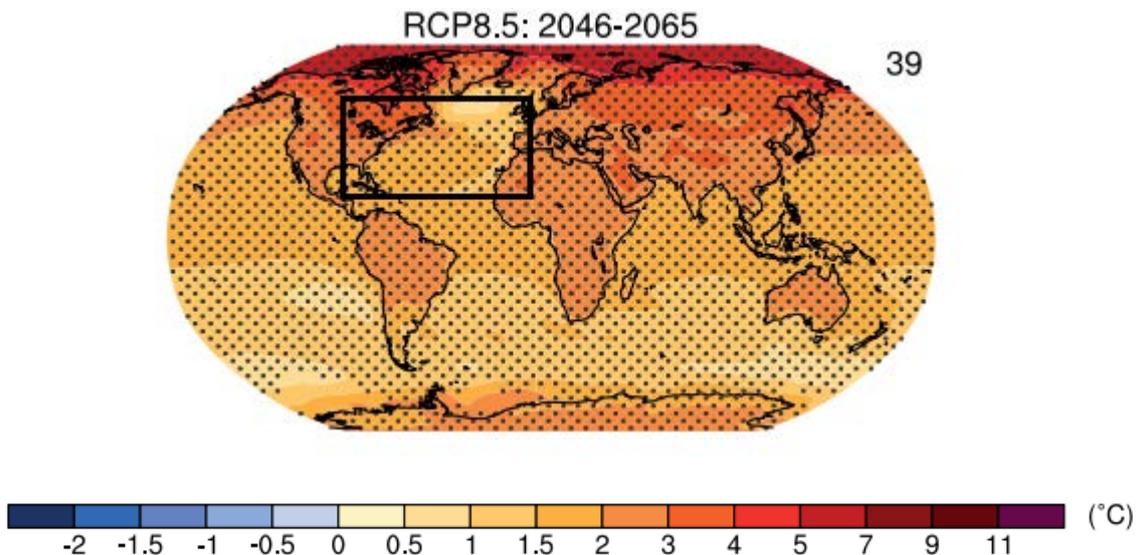


Fig3.11 Incremento de la temperatura superficial del aire ($^{\circ}\text{C}$) proyectada para el período 2046- 2065 respecto al periodo de referencia 1986-2005. Zona de estudio señalada. Fuente: IPCC.

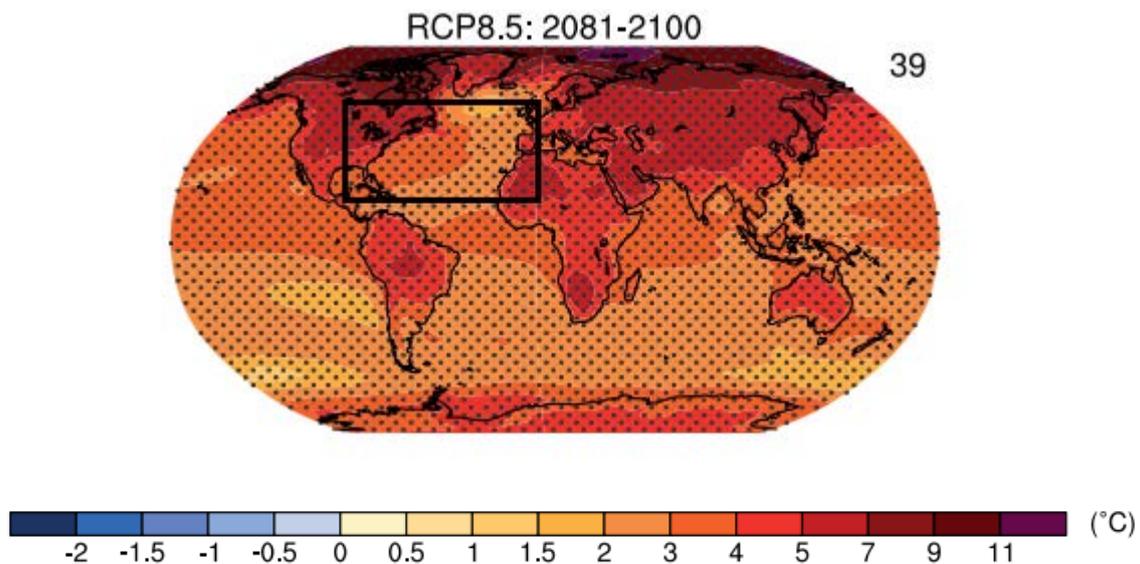


Fig.3.12 Incremento de la temperatura superficial del aire (°C) proyectada para el período 2081- 2100 respecto al periodo de referencia 1986-2005. Zona de estudio señalada. Fuente: IPCC.

Puesto que en el quinto informe del IPCC no se facilita ninguna imagen de proyecciones futuras de las tendencias de la SST, utilizamos las imágenes de los incrementos de temperatura superficial del aire sobre el océano, en un mismo período de tiempo, para compararlo con nuestros resultados. Los resultados ofrecidos por el IPCC para nuestra área de estudio (recuadro negro) muestran grandes similitudes con los obtenidos en nuestras proyecciones de la SST. Para el período 2046-2065 muestran aumentos de entre 0.5 y 1.5 grados. Fig.3.11. Para el período 2081-2100 el aumento es mayor de entre 1.5 y 3 grados. El patrón espacial de calentamiento es muy similar al obtenido en nuestras proyecciones a pesar de que estamos comparado variables distintas y de que en el IPCC se muestran diferencias entre los valores medios de la temperatura del período futuro y del de referencia (1986-2005), mientras que en el trabajo se dan tendencias en el aumento de temperatura por década.

Si se analizan las variaciones espaciales de las tendencias de las proyecciones futuras podemos observar que la temperatura de la superficie del Atlántico Norte habrá aumentado entre tres y cinco grados durante el siglo XXI. En el quinto informe del IPCC se estima que, para finales del siglo XXI, bajo un escenario de emisión RCP 8.5 la tendencia de la temperatura superficial de los océanos del mundo será a aumentar más de 3°C a lo largo de todo el siglo. Podemos afirmar, por lo tanto, que los resultados de la nuestra simulación van en concordancia con el último informe del IPCC.

Estudios recientes como el desarrollado por Caesar et al., (2018) intentan dar una explicación del por qué los modelos prevén un enfriamiento en esta zona tan concreta. El factor clave es el debilitamiento de la Corriente del Golfo y de la Corriente del Atlántico Norte, de hasta un 15% que haría que las aguas más calientes que llegaban desde latitudes

más bajas a esta zona dejarían de hacerlo en tal cantidad, lo que provocaría un enfriamiento del SST.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado la SST del Atlántico Norte obtenida mediante 22 modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 para dos periodos de tiempo: uno histórico (1900- 2005) y otro futuro (2006- 20199). Las proyecciones futuras de la SST se han realizado bajo el escenario de emisión de gases de efecto invernadero más desfavorable (RCP 8.5).

La SST promedio y la tendencia obtenida para cada modelo se ha analizado y comparado con el resto de los modelos encontrando patrones comunes de comportamiento en la región de estudio. Esto ha permitido considerar un promedio a todos los modelos (multimodel) que minimiza los errores particulares de cada modelo individual.

La tendencia histórica de la SST muestra un aumento significativo de la temperatura del orden de $0.06\text{ }^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ prácticamente en todo el Atlántico Norte con la excepción de una pequeña región ($40^{\circ}\text{N} - 50^{\circ}\text{N}$ y $27^{\circ}\text{W} - 45^{\circ}\text{W}$) dónde no se aprecia tendencia o se observa un descenso de la temperatura de como mucho $-0.02^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Los resultados obtenidos para este período concuerdan con los expuestos en el informe del IPCC tanto en la estimación del valor medio de la SST como de sus tendencias.

La tendencia futura de la SST para el siglo XXI muestra mayor homogeneidad para todas las áreas del Atlántico Norte que el observado para el periodo histórico. Además, también se ha obtenido que es un orden de magnitud más intensa.

La tendencia futura de la SST oscila entre $0.1^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ y $0.6^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. El mayor aumento se espera al este de la costa americana (entre 45°N y 50°N), mientras que el menor aumento se proyecta más al noreste de la zona anteriormente nombrada. En el resto del Atlántico Norte el aumento de la SST es homogéneo y está entre $0.2^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ y $0.4^{\circ}\text{C dec}^{-1}$. Estos resultados también se ajustan a los obtenidos en el último informe del IPCC que predice un aumento de la temperatura superficial de los océanos del mundo de algo más de 3°C a lo largo de todo el siglo.

Bibliografía.

- Porras, G.E.A., Delgado, J.D., Roa, A.O.R., Murcia, J.F.R. (2014). Informe de Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM. 9-11.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan and S.-P. Xie, (2013) Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 37-39. 53-57.
- Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 261-262
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 190-193.
- Peter J. Fawcett. Anna Maria Ágústsdóttir. Richard B. Alley and Christopher A. Shuman 1997 PALEOCEANOGRAPHY, VOL. 12, NO. 1, PAGES 23-38 The Younger Dryas termination and North Atlantic Deep Water formation: Insights from climate model simulations and Greenland ice cores.
- Hailong Liu Chunzai Wang Sang-Ki Lee and David Enfield 2012. Journals Online. Atlantic Warm Pool Variability in the CMIP5 Simulations <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00556.1>
- Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013: Near-term Climate

Change: Projections and Predictability. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 993-994

Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1062-1064.

Páginas web.

<http://hispanoteca.eu/Landeskunde-LA/Mapas/Corrientes%20oce%C3%A1nicas.htm>

<https://www.tiempo.com/ram/3905/las-aguas-fras-profundas-de-atlntico-norte-vuelven-a-la-vida/>

<https://cmip.llnl.gov/cmip5/availability.html>

MATLAB: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

Anexos.

Programas utilizados en MatLab.

1. Proyecciones.

```
% Variable SST
% Fuente CMIP5;
% Proyecciones futuras
clear all
close all
clc
fprintf(1, '\n Disco donde estan tools para mapas y bases de datos ?? \n');
unidad=input(' Introduce solo la letra ', 's');
fignome=[unidad, '\DATABASE\Matlab\Tools\m_map'];
addpath(fignome)

opt_tool=menu('Que Hacer?',...
    'Mapa medio de SST?',...
    'Trends de SST?');
opt_imprime=menu('Guarda tiff?',...
    'SI?',...
    'NO?');
opt_eje=menu('Escala Automática?',...
    'SI?',...
    'NO?');

TFG_pretratamiento(unidad,opt_tool,opt_imprime,opt_eje);
```

2. Pretratamiento de los datos.

```
function []=TFG_pretratamiento(unidad,opt_tool,opt_imprime,opt_eje);
nfig=1;
fiabilidad=99;
nomeb=input('Archivo base de datos de entrada ??','s');
path=['.\exe\'];
namec=[path nomeb];
nameF=sprintf('%s*',namec);
filesF=dir(nameF); %Miro los posibles ficheros historicos
numfilesF=numel(filesF);
named=['info_' nomeb];%nombre fichero con la información
nameinfo=[path named];
finfo=fopen(nameinfo,'w');

if opt_eje==1
    caxis1=1;
    caxis2=-1;
else
    caxis1=input('Valor minimo de la escala ?? ');
    caxis2=input('Valor maximo de la escala ?? ');
end
%Busca límite para interpolacion comun
%Es necesario cargar todos los modelos
lon_min=-999999999;
lon_max=999999999;
lat_min=-999999999;
lat_max=999999999;

for f=1:numfilesF
    fileF=[path filesF(f).name];
    load (fileF);
    fprintf(1,'Modelo %d %s lon %f %f lat %f %f \n',f,fileF,...
        min(min(meshlon)),max(max(meshlon)),...
        min(min(meshlat)),max(max(meshlat)));
    if meshlon(1,1)<=0 %Arregla si algun modelo tiene lon<0
        meshlon=360+meshlon;
        lon_i=360+lon_i;
        lon_f=360+lon_f;
    end
    dlon=meshlon(2,2)-meshlon(1,1);
    dlat=meshlat(2,2)-meshlat(1,1);
    % fprintf(1,'Dlon %f Dlat %f \n',dlon,dlat);
    lat_min=max(lat_min,lat_i);
    lon_min=max(lon_min,lon_i);
    lat_max=min(lat_max,lat_f);
    lon_max=min(lon_max,lon_f);

    clear meshlon meshlat
```

```

end

fprintf(1,'lon_min %f lon_max %f \n',lon_min,lon_max);
fprintf(1,'lat_min %f lat_max %f \n',lat_min,lat_max);
lon_int=lon_min:dlon:lon_max;
lat_int=lat_min:dlat:lat_max;
[meshlon_i,meshlat_i]=meshgrid(lon_int,lat_int);

%Selecciona grupo de años
anho_i=input('Año inicio ');
anho_f=input('Año final ');

for f=1:numfilesF
    fileF=[path filesF(f).name];
    load (fileF);
    %Corta los años de interés
    kval=find(t>=anho_i & t< anho_f+1);
    tv=t(kval);
    fprintf(1,'Modelo# %d %s \n', f,fileF); % escribe en pantalla lo que hace
    fprintf(finfo,'Modelo# %d %s\n',f,fileF);% escribe en un fichero info
    fprintf(finfo,'Tini %f Tfin %f T_selcini %f T_selecfin %f \n',...
        t(1),t(end),tv(1),tv(end));
    clear t;
    t=tv; clear tv;
    SSTn=SST(:,kval);clear SST;SST=SSTn;clear SSTn;

%   nini=(anho_i-floor(t(1)))*12+1
%   nfin=(anho_f-floor(t(1)))*12+12
%   ta=t(nini:nfin);
%   SSTc=SST(:,nini:nfin); clear SST;
%   SST=SSTc;
%   clear t; t=ta; clear ta;

if meshlon(1,1)<=0 %Arregla si algun modelo tiene lon<0
    meshlon=360+meshlon;
    lon_i=360+lon_i;
    lon_f=360+lon_f;
end

%Promedio anual. Así maneja menos datos
[nlon,nlat,nmes]=size(SST);
nanos=anho_f-anho_i+1;
for n=1:nanos
    SSTa(:,n)=nanmean(SST(:,:(n-1)*12+1:(n-1)*12+12),3);
    anno(n)=round(t((n-1)*12+1));
end

%Interpola el modelo a malla comun
for n=1:nanos
    VAL=SSTa(:,n);

```

```

    VALi=interp2(meshlon,meshlat,VAL,meshlon_i,meshlat_i);
    SSTi(:,:,n)=VALi;
end
SSTmodelos(:,:,f)=SSTi; %Acumula todos los modelos

if opt_tool==1 % Valor medio
    mag='SST (°C)';
    SST_promedio_i=mean(SSTi,3);

    [nfig]=Hazmapa(SST_promedio_i,meshlat_i,meshlon_i,...
        lat_min-1,lat_max+1,lon_min-1,lon_max+1,nfig,1,mag,...
        caxis1,caxis2,1,1)
    SST_todos(:,:,f)= SST_promedio_i;
    if opt_imprime==1
        nome_ima=['modelo_' num2str(f)];
        print ('-dtiff', '-r300', nome_ima);
        %Desde teclado print -dtiff -r300 nombre
    end
    clear SST SSTa SST_promedio SST_promedio_i t;
else %Tendencia
    mag='SST_{trend}(°C dec^{-1})';
    [nlon,nlat,nanos]=size(SSTi);
    for lo=1:nlon
        for la=1:nlat
            val=squeeze(SSTi(lo,la,:));
            if isnan(nanmean(val))==0 %no es todo NaN
                [coef]=polyfit(anno',val,1);
                SSTtrend(lo,la)=coef(1)*10; %tendencia por decada

                coefake=polyval(coef,anno); %significancia estadística
                    %(spearman)
                coefake=coefake';
                [valor,tn,p]=spear(val,coefake);
                fiab(lo,la)=100*(1-p);
            else % No es NaN
                SSTtrend(lo,la)=NaN;
                fiab(lo,la)=NaN;
            end
        end
    end
end

[nfig]=Hazmapa(SSTtrend,meshlat_i,meshlon_i,...
    lat_min-1,lat_max+1,lon_min-1,lon_max+1,nfig,1,mag,...
    caxis1,caxis2,2,1);
kk=find(isnan(fiab)==0 & fiab>=fiabilidad);
lo_fia=meshlon_i(kk);
la_fia=meshlat_i(kk);
m_plot(lo_fia,la_fia,'k. ');
if opt_imprime==1
    nome_ima=['Tend_modelo_' num2str(f)];

```

```

        print ('-dtiff', '-r300', nome_ima);
        %Desde teclado print -dtiff -r300 nombre
    end
    clear SST SSTa SSTi SSTtrend t fiab lo_fia la_fia;
end

end
fclose (finfo);
%Multimodel
caxis1=1; %siempre escala manual
caxis2=-1;

if opt_tool==1
    SSTmod=nanmean(SST_todos,3);
    SSTdes=nanstd(SST_todos,1,3);
    nfig=100;
    mag='<SST>_{multimodel} (°C)';

    [nfig]=Hazmapa(SSTmod,meshlat_i,meshlon_i,...
        lat_min-1,lat_max+1,lon_min-1,lon_max+1,nfig,1,mag,...
        caxis1,caxis2,1,1)

    if opt_imprime==1
        nome_ima=['Multimodel'];
        print ('-dtiff', '-r300', nome_ima);
    end

    mag='SST^{std}_{multimodel}(°C)';

    [nfig]=Hazmapa(SSTdes,meshlat_i,meshlon_i,...
        lat_min-1,lat_max+1,lon_min-1,lon_max+1,nfig,1,mag,...
        caxis1,caxis2,1,1)
    if opt_imprime==1
        nome_ima=['Multimodel_std'];
        print ('-dtiff', '-r300', nome_ima);
    end
end
else
    SSTmulti=squeeze(mean(SSTmodelos,4));
    mag='SST_{trend}^{multimodel}(°C dec^{-1})';
    [nlon,nlat,nanos]=size(SSTmulti);
    for lo=1:nlon
        for la=1:nlat
            val=squeeze(SSTmulti(lo,la,:));
            if isnan(nanmean(val))==0 %no es todo NaN
                [coef]=polyfit(anno',val,1);
                SSTtrend(lo,la)=coef(1)*10; %tendencia por decada

                coefake=polyval(coef,anno); %significancia estadística
                    %(spearman)
                coefake=coefake';
            end
        end
    end
end

```

```

        [valor,tn,p]=spear(val,coefake);
        fiab(lo,la)=100*(1-p);
    else % No es NaN
        SSTtrend(lo,la)=NaN;
        fiab(lo,la)=NaN;
    end
end
end

[nfig]=Hazmapa(SSTtrend,meshlat_i,meshlon_i,...
    lat_min-1,lat_max+1,lon_min-1,lon_max+1,nfig,1,mag,...
    caxis1,caxis2,2,1);
kk=find(isnan(fiab)==0 & fiab>=fiabilidad);
lo_fia=meshlon_i(kk);
la_fia=meshlat_i(kk);
m_plot(lo_fia,la_fia,'k.');
if opt_imprime==1
    nome_ima=['Tend_Multimodel'];
    print ('-dtiff', '-r300', nome_ima);
end
promedio= nanmean(nanmean(SSTtrend));
desviacion=nanstd(nanstd(SSTtrend));
fprintf(1,'Trend promedio %f +/- %f \n',promedio,desviacion);
end

```

3. Dibujar el mapa.

```
function [nfig]=Hazmapa(VAL,meshlat,meshlon,...
    lat_i,lat_f,lon_i,lon_f,nfig,parche,nombre,...
    caxis1,caxis2,tipon,zoom)
% Funcion que elabora mapa usando tools de m_map
% VAL: La variable a representar
% meshlon, meshlat: Latitudes y longitudes en forma de matriz
% lat_i,lat_f, lon_i,lon_f: Latitudes y longitudes máximas (_f)
% y mínimas (_i). Determinan la caja
% nfig: Numero de figura. Se le añade 1 al acabar
% patch: Pone patch en tierra si 1 y no lo pone si es otro número
% nombre: texto que va a poner como título de la Figura.
%
% caxis1,caxis2. Límites para caxis. Si caxis1>caxis2 lo recalcula
% usando caxis1=min(VAL), caxis2=max(VAL)
% tipo: tipo de representacion. Si (1) colormap(jet) si (otro) b2r
% nzoom: numero de ampliaciones (en pixels). Ej. Si 2 => dobla

% Argumentos
% figname=['.\m_map'];
% addpath(figname)

if nzoom>1
    [m,n]=size(meshlon);
    x=linspace(lon_i,lon_f,m*nzoom);
    y=linspace(lat_i,lat_f,n*nzoom);
    [x,y]=meshgrid(x,y);
    zi=griddata(meshlon,meshlat,VAL,x,y);
else
    x=meshlon;y=meshlat;zi=VAL;
end

figure(nfig)
clf
%
if parche==1 % Con Patch sobre la tierra
    m_proj('lambert','lon',[lon_i lon_f],'lat',[lat_i lat_f]);
%    zi=griddata(meshlon,meshlat,VAL,x,y);
    pc=m_pcolor(x,y,zi);
    set(pc, 'edgecolor','none')
    m_grid('linestyle','none','box','fancy','tickdir','in',...
        'Fontname','Times New Roman',...
        'FontSize',14,...
        'FontWeight','Bold')
    m_gshhs_h('patch',[1 1 1])
else
    m_proj('lambert','lon',[lon_i lon_f],'lat',[lat_i lat_f]);
    pc=m_pcolor(x,y,zi);
    set(pc, 'edgecolor','none')
```

```

shading flat
m_grid('linestyle','none','tickdir','in',...
'Fontname','Times New Roman',...
'FontSize',14,...
'FontWeight','Bold');
m_gshhs_h('linewidth',1,'color','k');
end

if caxis1>caxis2 %MODIFICAR AQUI
caxis1=min(min(0));
caxis2=max(max(3));
end

if tipo==1
colormap(jet);
else
colormap(b2r(caxis1,caxis2));
end
hold on

myfiguresize = [2.5, 2.5, 15.75, 10.82];
set(gcf, 'PaperPosition', myfiguresize);
hold on

cbar=colorbar;
set(cbar,'FontWeight','Bold',...
'fontsize',14,...
'fontname','Times New Roman');
titulo=title(nombre);
set(titulo,'FontWeight','Bold',...
'fontsize',14,...
'fontname','Times New Roman');
caxis([caxis1 caxis2]);
nfig=nfig+1;

```



Environmental | Physics | Laboratory

EPhysLab