



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

---

**Implementación de un sistema para el análisis  
de la evolución temporal de la temperatura  
en tres estaciones de la costa mexicana**

**TESIS**

Que para obtener el grado de  
**Licenciado en Ciencias de la Tierra  
(Orientación Ciencias Acuáticas)**

**PRESENTA**

Ernesto Eduardo Gómez de la Peña

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ciencias de la UNAM por los años de aprendizaje y la formación personal y profesional que me brindó, al igual que al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Ciudad Universitaria y Estación el Carmen (UNAM) por su apoyo con el uso de recursos e instalaciones. Agradezco a DGTIC y CAS-UNAM por permitir el uso del Cluster Miztli bajo el proyecto: SC16-1-IR-18. También doy gracias a los proyectos "Impactos del Cambio Climático y Global en zonas costeras de México" (CONACYT PDCPN2013-01/214349), "Modelos ecológicos: evaluación de impactos y riesgos en zonas costeras de México" (DGTIC-UNAM,SC16-1-IR-18) y a la red de colaboración académica "Contaminación acuática: Niveles y efectos" (PRODEP, año 3).

Quedo en deuda con el Doctor Joan Albert Sánchez Cabeza por la guía continua en el presente trabajo así como por los datos y los consejos proporcionados. También agradezco a la Comisión Nacional de Agua, así como a Onésimo López, Germán Ramírez, Edgar Escalante, Miguel Ángel Gómez, Hernán Álvarez, Mario Gómez, José Reda y León Álvarez por su disposición y amabilidad al compartir las bases de datos de campo usadas en esta tesis.

Agradezco en especial al Doctor Gilberto Cardoso por la confianza, la constante dedicación y sobre todo, por ser una excelente persona, combinación de factores que hicieron posible que esta fuera una experiencia enriquecedora y motivante a pesar de los momentos de frustración.

Gracias a Marisa, Roberto y Andrea, por ser para mí una parte extendida de mi familia.

Me siento eternamente agradecido por la gente que siempre estuvo presente y apoyándome no sólo durante este trabajo, sino también durante los años de carrera: mi abuela María, mi abuelo Gonzalo, mis tías Tania, Carmelita y Laura, mi prima Nayelli, mis tíos Benjamín y Alberto, Luci, Desiree, Anuar y Omar.

*Dedico este logro a Jero, a mis padres María y Ernesto y a mi hermana Ixchel, por su respaldo y cariño incondicional y por el profundo amor que les tengo; a Sebas y a Romita, cuya inocencia ilumina mis días.*

## Resumen

En este trabajo se analizó la evolución de la temperatura del aire en Ciudad del Carmen (Campeche), Mazatlán (Sinaloa) y Puerto Morelos (Quintana Roo) con la finalidad de detectar algún cambio ocurrido en los últimos años. El estudio se llevó a cabo a través de la comparación de datos del reanálisis atmosférico ERA-Interim con datos de estaciones meteorológicas. Para facilitar dicha comparación se crearon dos programas, uno de descarga automática de bases de datos de ERA-Interim y otro complementario de cálculo de promedios utilizando el lenguaje de programación Python.

Los resultados indican que los datos de ERA-Interim representan adecuadamente las variaciones estacionales y el comportamiento de los mínimos de temperatura observados en campo. Sin embargo, los máximos de temperatura calculados por el reanálisis presentaron diferencias, por lo que se sugiere un uso limitado de los mismos.

En el caso de Ciudad del Carmen, se detectó un enfriamiento en los datos meteorológicos ( $-0.074 \pm 0.003^{\circ}\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$ ) que parece ser un reflejo de la disminución del valor de los máximos de temperatura en los 31 años analizados, esto a su vez podría ser una respuesta al cambio en la nubosidad y precipitación de la región. Sin embargo, debido a la baja resolución de los datos meteorológicos, el enfriamiento detectado debe tomarse sólo como un indicador aproximado de la evolución climática en Ciudad del Carmen.

Por otra parte, el calentamiento detectado en los 85 años analizados en Mazatlán ( $0.019 \pm 0.005^{\circ}\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$ ) coincide con las tendencias proyectadas por otros trabajos y parece acelerarse en años recientes, lo que podría afectar a la biota local en un futuro. A pesar de estimar veranos menos cálidos, los datos de reanálisis coinciden con el calentamiento y variación estacional en Mazatlán. Por lo anterior se sugiere el uso del reanálisis ERA-Interim en futuros modelos regionales de la zona.

En Puerto Morelos no se detectó ninguna tendencia significativa en los datos de campo ( $0.000 \pm 0.014^{\circ}\text{C/año}$ ,  $p > 0.05$ ). Por otra parte, de los tres sitios estudiados este fue el que tuvo una menor disponibilidad de datos de campo (diez años) y en el que se encontraron mayores diferencias entre la temperatura media registrada en campo y la calculada por el reanálisis.

La importancia del presente trabajo es que brinda herramientas —tanto tecnológicas como analíticas— para entender la variación de la temperatura en los sitios de estudio. Además de los resultados obtenidos, es necesario realizar un monitoreo meteorológico directo en los sitios para conocer a detalle la variación de la temperatura y otras variables y así poder elaborar políticas públicas que permitan una efectiva adaptación al cambio climático.

# Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. El Cambio Global y Climático: la situación actual	5
1.2. Principales efectos del Cambio Climático y Cambio Global en las costas	9
1.3. La información y la adaptación social a los cambios en el clima	12
1.4. Los reanálisis atmosféricos y su papel en el estudio del clima	13
1.5. Contexto del Grupo de Trabajo	14
1.6. Motivación y Objetivos	15
<b>2. Descripción de las zonas de estudio</b>	<b>16</b>
2.1. Observatorio Ciudad del Carmen	16
2.2. Observatorio Mazatlán	18
2.3. Observatorio Puerto Morelos	21
<b>3. Metodología</b>	<b>24</b>
3.1. El reanálisis atmosférico ERA-Interim	24
3.1.1. Descripción de la temperatura del aire en superficie de ERA-Interim	25
3.2. Desarrollo de los programas	26
3.2.1. Programas generados	27
3.2.2. Accesibilidad de los programas generados	28
3.3. Análisis de datos	29
3.3.1. Descripción de las bases de datos de campo	29
3.3.2. Estadística usada para el análisis de datos	29
<b>4. Resultados</b>	<b>32</b>
4.1. Ciudad del Carmen	32
4.2. Mazatlán	34
4.3. Puerto Morelos	38
4.4. Utilidad de los programas generados	40
<b>5. Discusión</b>	<b>41</b>
5.1. Observatorio Ciudad del Carmen	41
5.2. Observatorio Mazatlán	43
5.3. Observatorio Puerto Morelos	45
<b>6. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>Referencias</b>	<b>49</b>
<b>Anexo A: códigos de cada variable usados en el Programa de descarga automática de datos</b>	<b>60</b>
<b>Anexo B: series CNA-10MZT, ERA-10MZT, CNA-36MZT y ERA-36MZT</b>	<b>61</b>

# 1. Introducción

## 1.1. El Cambio Global y Climático: la situación actual

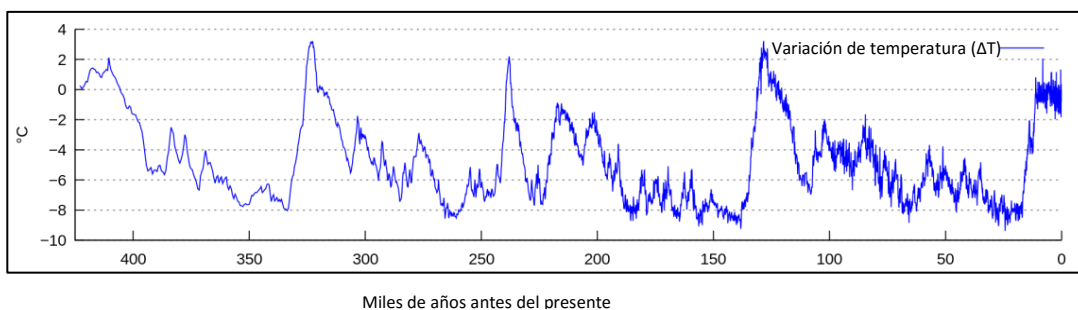
El planeta Tierra es un sistema en constante evolución. Éste está conformado por varios componentes que pueden o no interactuar directamente entre sí. El clima, los ciclos biogeoquímicos y la civilización humana son sólo algunos ejemplos de los componentes que conforman a nuestro planeta como el sistema que es.

El ser humano modifica continuamente su entorno y con ello, altera también las diversas componentes del medio en el que habita. Algunas de estas modificaciones pueden tener un efecto a escala planetaria. Se denomina Cambio Global al conjunto de cambios que impactan globalmente al Sistema Tierra. Algunos ejemplos de dichos cambios son: las alteraciones en la circulación atmosférica y oceánica, la contaminación, el crecimiento de la población humana, el uso excesivo de recursos naturales, el incremento en el nivel del mar, entre otros (IGBP 2015).

Dentro de las alteraciones que tienen alcance global, se encuentran los cambios en el clima. Estos últimos, son definidos como una alteración de las estadísticas del clima a largo plazo (NOAA 2007). En otras palabras, el Cambio Climático es la modificación de las condiciones “normales” del clima que se espera sobre una determinada región.

Aunque exista similitud entre ambos conceptos, se debe diferenciar entre Cambio Global y Climático debido a que no todas las alteraciones globales tienen relación con el clima. Dicho de otro modo, el Cambio Global es un concepto más amplio que incluye, además de otro tipo de alteraciones, todas las modificaciones en el Sistema Climático (IGBP 2015).

La Tierra también varía de manera natural a lo largo del tiempo geológico. La radiación solar que llega a la superficie terrestre fluctúa provocando que las interacciones entre la atmósfera, el océano y la tierra se modifiquen causando climas más cálidos cuando la radiación solar es mayor o más fríos cuando ocurre lo contrario. Estas fluctuaciones naturales en la radiación ocurren a escalas de tiempo conocidas (Figura 1.1) y se cree que son las principales responsables de que la Tierra haya entrado y salido de periodos glaciares en los últimos 2.5 millones de años aproximadamente (Hays, Imbrie y Shackleton 1976 , Petit et al. 1999).



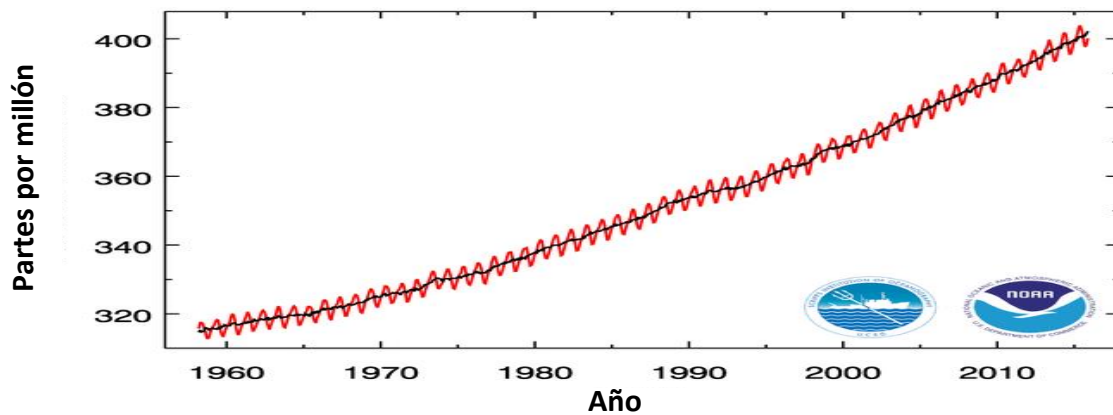
**Figura 1.1. Cambios de temperatura con respecto al presente en la Antártica; determinados a través del proxy de deuterio medido en el núcleo de hielo de Vostok (Petit et al. 1999).**

No obstante las fluctuaciones naturales en la temperatura del planeta, el consenso científico actual es que el reciente incremento observado en las temperaturas globales no se debe a esta variabilidad natural, sino muy probablemente al incremento observado en las concentraciones de gases de efecto invernadero antropogénicas (**Figura 1.2, Hegerl et al. 2007, Jones et al. 2013, Bindoff et al. 2013**).

Los gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), atrapan el calor en la atmósfera causando un efecto similar al de un invernadero (**NOAA 2007**). Cuando la concentración de estos gases aumenta en la atmósfera, también incrementa la temperatura global. La quema de combustibles fósiles, como petróleo, carbón y gas natural, que se ha efectuado desde la revolución industrial, añade  $\text{CO}_2$  a la atmósfera continuamente; esto ha resultado en que el nivel actual de  $\text{CO}_2$  sea el más alto que se haya registrado en los últimos 800,000 años (**IPCC 2014, Petit et al. 1999**).

Debido a que el desarrollo humano continúa basado en el uso de combustibles fósiles, la comunidad científica se ha preocupado por proyectar los posibles cambios futuros en el planeta según el incremento en los niveles de concentración de GEI y el consecuente incremento de temperatura. Para ello, las Naciones Unidas y la Organización Meteorológica Mundial crearon el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), que actualmente es el organismo líder internacional que provee al mundo con una visión científica clara del estado actual del Cambio Climático y sus posibles impactos ambientales y socioeconómicos (**IPCC 2015**).

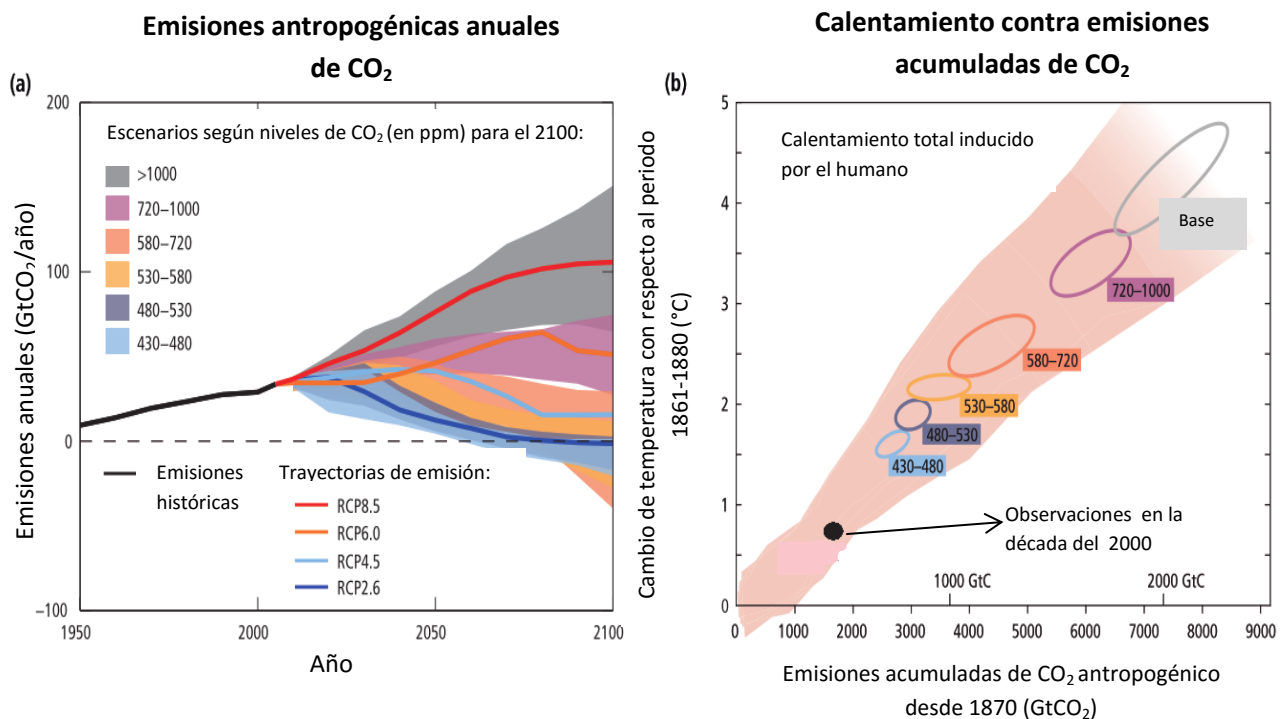
En el quinto reporte para la evaluación del Cambio Climático, el IPCC (**2014**) establece trayectorias probables que seguirían las concentraciones de GEI bajo cuatro escenarios diferentes de emisión. En dicho trabajo se contempla un escenario de bajas emisiones (RCP2.6), dos escenarios intermedios de mitigación (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (**Figura 1.3a**). Los escenarios que no implican un esfuerzo adicional para disminuir las emisiones, denominados “escenarios base”, conllevan a trayectorias de concentración que se encuentran entre el rango de un escenario RCP6.0 y uno RCP8.5.



**Figura 1.2. Cambios en la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii desde 1960** (Adaptado de Instituto Oceanográfico Scripps y NOAA 2015).

El escenario de bajas emisiones RCP2.6 tiene como meta mantener el calentamiento global por debajo de un incremento de 2°C con respecto a temperaturas preindustriales (Figura 1.3b). Sin embargo, en el periodo 1870-2011 se han emitido dos tercios de la emisión total de GEI que limitarían a 2°C el incremento, esto es, alrededor de 1900 GtCO<sub>2</sub> (Giga toneladas de CO<sub>2</sub>, IPCC 2014).

Estimar el incremento futuro de la temperatura global es vital, debido a que dicho incremento implica modificaciones notables en el sistema climático que nos afectan de diversas maneras. Gracias a las proyecciones del incremento de temperatura según las emisiones de CO<sub>2</sub> futuras podemos estimar cómo cambiará el sistema climático según las políticas mundiales que se adopten para mitigar el Cambio Climático.



**Figura 1.3. (a) Trayectorias de emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (líneas continuas) y los escenarios asociados a ellas (área sombreada) usados por el Grupo de Trabajo III del IPCC (2014).** Los escenarios del Grupo de Trabajo III sintetizan el rango amplio de escenarios de emisión publicados en la literatura científica y son definidos según la concentración estimada de CO<sub>2</sub> para el 2100 (en partes por millón).

**(b) Incremento de la temperatura media superficial global en función de las emisiones netas acumuladas.** El área sombreada de rojo muestra la dispersión de proyecciones pasadas y futuras provenientes de modelos de ciclo de carbono forzados con emisiones históricas. Las elipses muestran el calentamiento antropogénico total alcanzado en el año 2100 según las emisiones acumuladas del periodo 1870-2100. El ancho de las elipses en términos de temperatura es causado por el impacto de diferentes escenarios que incluyen forzadores que no son solamente CO<sub>2</sub>. La elipse rellena negra muestra las emisiones observadas en el 2005 y las temperaturas observadas para el periodo 2000-2009 con las incertidumbres asociadas. (Adaptado de IPCC 2014).

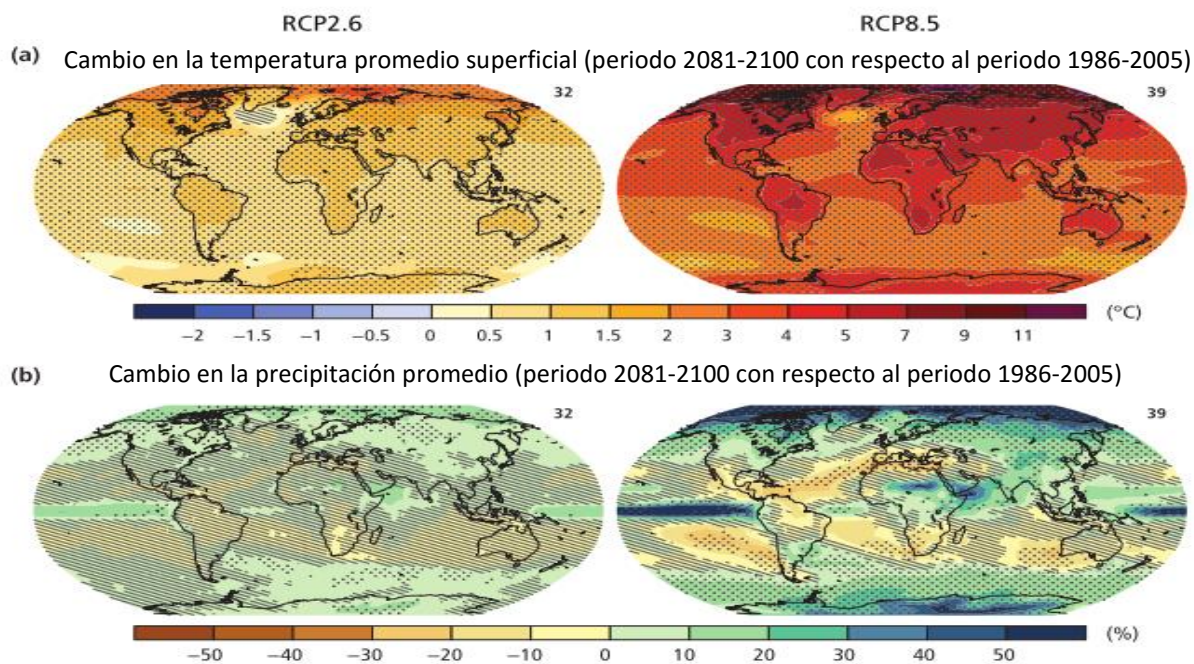


En la **Figura 1.4** podemos ver los cambios proyectados por el IPCC para la temperatura y la precipitación en el año 2100 bajo dos escenarios discutidos anteriormente: uno de mitigación intensa (RCP2.6) y uno donde no se hace un esfuerzo para disminuir las emisiones de GEI (RCP8.5).

En ambos escenarios, es altamente probable un aumento en la frecuencia de eventos extremos de temperatura (**Collins et. al 2013**). En detalle, se proyecta un aumento en: los eventos cálidos tanto a escala diaria como estacional, la frecuencia y duración de las ondas de calor y los inviernos fríos extremos.

También existe una alta certidumbre de que la seguridad alimentaria se verá disminuida con el Cambio Climático proyectado para mediados del siglo XXI en ambos escenarios. No sólo la producción alimentaria terrestre se verá amenazada por el incremento de temperatura superficial (**Porter et. al 2014**), sino también la productividad de pesquerías al haber una redistribución y disminución de especies causada por los cambios proyectados de temperatura en el mar (**Pörtner et al. 2014**).

Aunado a lo anterior, existe una alta certidumbre de que aumenten los riesgos por tormentas, inundaciones costeras y tierra adentro, incremento en el nivel del mar (**Church et al. 2013**), sequías y escasez de agua (**Collins et al. 2013, Jiménez-Cisneros et al. 2013**). Es altamente probable que los factores anteriores impacten en la salud humana, acrecentando los problemas que existen actualmente (**Smith et al. 2014**).



**Figura 1.4. Cambios en la temperatura superficial promedio (a) y en la precipitación promedio (b) según el escenario RCP2.6 (izquierda) y el RCP8.5 (derecha).** El número de modelos usados para calcular la media multi-modelo es indicado en la esquina superior derecha de cada panel. Las áreas punteadas muestran regiones donde el cambio proyectado es grande comparado con la variabilidad interna natural y donde al menos el 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio. Las áreas rayadas muestran regiones donde el cambio proyectado es menor a una desviación estándar con respecto a la variabilidad natural del sistema. (Adaptado de IPCC 2014).

Los cambios y riesgos mencionados anteriormente no afectarán por igual a todas las regiones del mundo. Muchos países en vías de desarrollo carecen de recursos para elaborar planes de mitigación y adaptación; lo anterior vuelve a dichas naciones particularmente vulnerables a los cambios proyectados para el siglo XXI (Wong et al. 2014).

Adicionalmente, existen diferencias entre las regiones de una nación en términos del posible impacto del Cambio Climático. Existen zonas que, dadas sus características naturales y poblacionales, son más vulnerables que otras; las costas, por su creciente población y su dinámica natural, representan un claro ejemplo (Nicholls et al. 2007).

## 1.2. Principales efectos del Cambio Climático y Cambio Global en las costas

La costa es el lugar donde se encuentran e interaccionan el medio marino y el medio terrestre. Debido a lo anterior, estos ambientes son altamente dinámicos pues se ajustan constantemente a los procesos geomorfológicos y oceanográficos de los alrededores (Cowell et al. 2003).

El atractivo que brinda la costa ha resultado en un rápido crecimiento económico desde el siglo XX en estas regiones; se proyecta que este crecimiento, tanto económico como demográfico, continuará para todo el siglo XXI. Actualmente, la densidad poblacional en regiones costeras es alrededor de 3 veces mayor que el promedio global (Small y Nicholls 2003).

México sigue las tendencias mundiales en cuestión de crecimiento poblacional costero. Desde 1990 al 2005, la población en más de la mitad de los estados costeros superó el crecimiento nacional promedio (Figura 1.5, CIMARES 2012) con un crecimiento de 2.7 millones de habitantes tan solo en el periodo 2000-2005. Se espera que este crecimiento continúe y se alcancen los 55 millones de habitantes en costas mexicanas para el 2030 (CONAPO 2006).

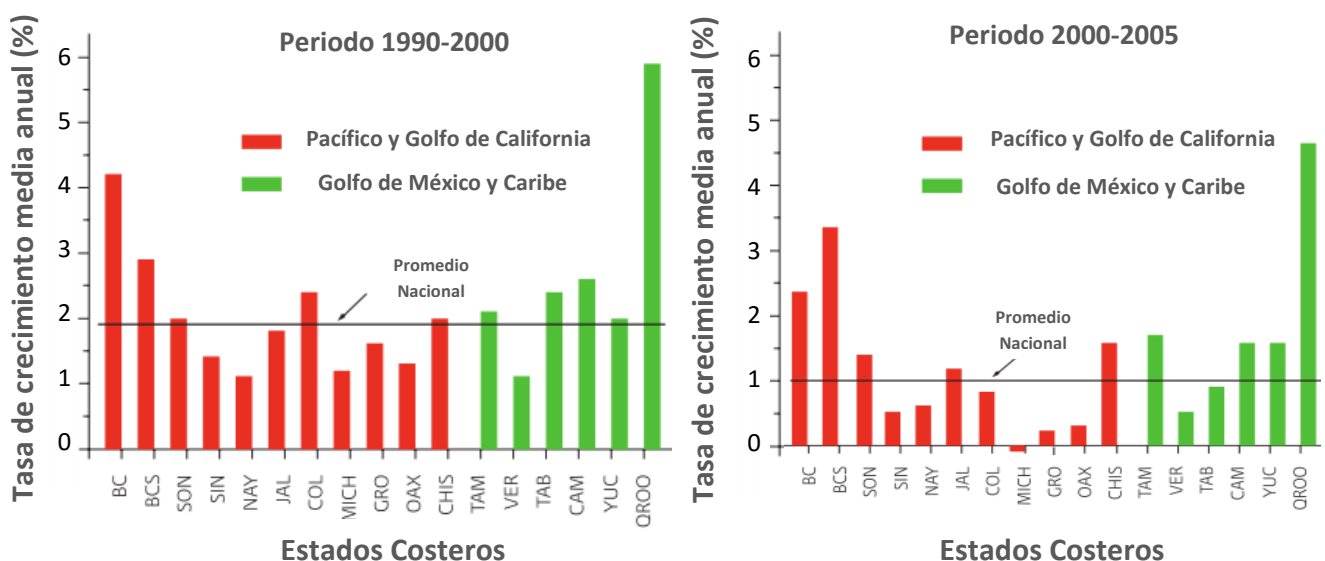


Figura 1.5. Crecimiento poblacional por estado con línea de costa en México (Azuz y Rivera 2007).

Tanto en México como en el mundo, la presión humana en el ecosistema costero ha causado grandes transformaciones: el entorno natural ha cedido lugar a centros turísticos y zonas urbanas. A pesar de esta urbanización, el sistema costero ha retenido su carácter dinámico. Esto tiene como consecuencia que los asentamientos en estas zonas sean especialmente vulnerables tanto a los cambios naturales de las costas, como a los inducidos por el Cambio Climático y el Cambio Global (Nicholls et al. 2007).

El Cambio Global afecta las costas a través de cuatro factores principales. El primero es el incremento de temperatura superficial. Esta ha incrementado en un promedio global de 0.6°C en el periodo 1951-2010 (Figura 1.6, Knutson et al. 2013, Bindoff et al. 2013), esto ha provocado una disminución y redistribución global de las especies marinas (Pörtner et al. 2014) a la vez que aumenta la posibilidad de que otros factores que en el presente no impactan las pesquerías lo hagan en el futuro (Cardoso-Mohedano 2015). El aumento de la temperatura oceánica también afecta a los corales elevando su tasa de mortalidad. Además de la consecuente disminución en la biodiversidad, lo anterior causa una pérdida económica debido a la reducción en el atractivo turístico de la zona (Hoegh-Guldberg et al. 2007).

El segundo factor que altera las costas es el incremento de CO<sub>2</sub> disuelto en el océano. Desde principios de la era industrial, la incorporación de CO<sub>2</sub> en el océano ha resultado en su acidificación. El pH de la superficie oceánica ha disminuido en un 0.1, que corresponde a un 26% de incremento en la acidez (Trenberth et al. 2007). Este incremento en la acidez reduce las tasas de calcificación de los corales; lo anterior degrada el arrecife y aumenta el riesgo por erosión al incrementarse la energía de las olas que llega a la línea de costa (Sheppard et al. 2005).

El tercer factor que pone en riesgo a las costas es el aumento del nivel del mar. Desde el año 1901 hasta el 2010, el nivel del mar se ha elevado 0.19 metros, con un rango de confianza de entre 0.17 a 0.21 metros (Figura 1.7, Nicholls et al. 2007). La pérdida de glaciares, junto con la expansión térmica del océano debido a su calentamiento, han causado que la tasa de elevación del nivel de mar desde mediados del siglo XIX sea la más grande que haya experimentado la Tierra durante los últimos dos milenios (alta certidumbre, IPCC 2014).

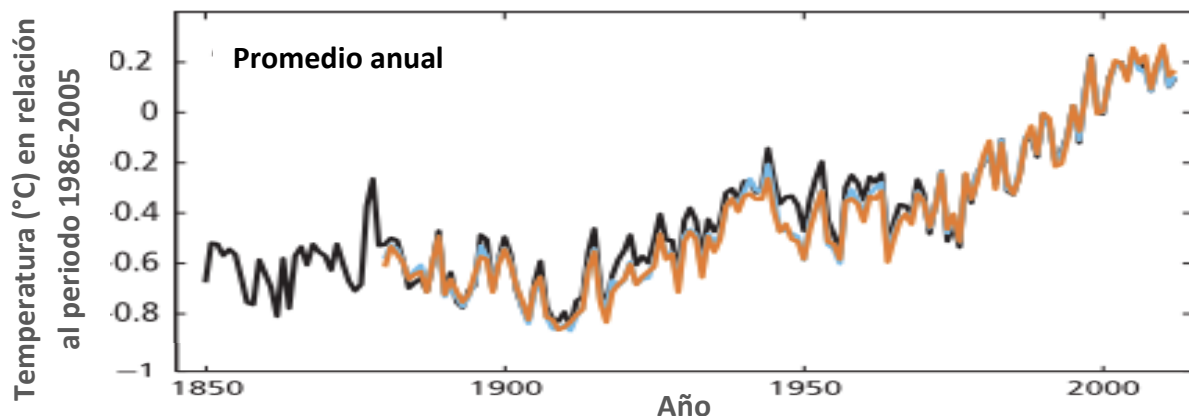


Figura 1.6. Promedio global anual combinado de las anomalías de temperatura en tierra y océano en relación con el promedio del periodo 1986-2005 (Adaptado de IPCC 2014).

La contaminación de agua potable por intrusiones salinas, el incremento en los niveles extremos de agua durante las tormentas y la degradación de las barreras naturales contra dichos niveles, son las principales afectaciones que el aumento del nivel del mar causa en zonas costeras (Nicholls et al. 2007).

El cuarto y último factor de cambio costero es la alteración de las desembocaduras de ríos. Aunque exista baja certidumbre de que el Cambio Climático haya afectado la frecuencia y magnitud de las inundaciones fluviales a través de eventos de precipitación extrema (IPCC 2014), el Cambio Global lo ha hecho a través de las actividades humanas que modifican fuertemente el cauce de los ríos para la captación y retención de agua potable.

Algunas desembocaduras fluviales están densamente pobladas y son impactadas frecuentemente tanto por influencias terrestres externas (inundaciones fluviales) como marinas (mareas de tormenta, erosión, aumento del nivel del mar, Ericson et al. 2006). Aunado a las modificaciones hechas por los humanos, estas influencias causan que estas zonas se vuelvan altamente vulnerables a los impactos del Cambio Global (Figura 1.8).

En la Tabla 1.1 se proporciona un resumen de las alteraciones físicas y ecosistémicas que provocan los cuatro factores principales de cambio en los sistemas costeros descritos en esta sección.

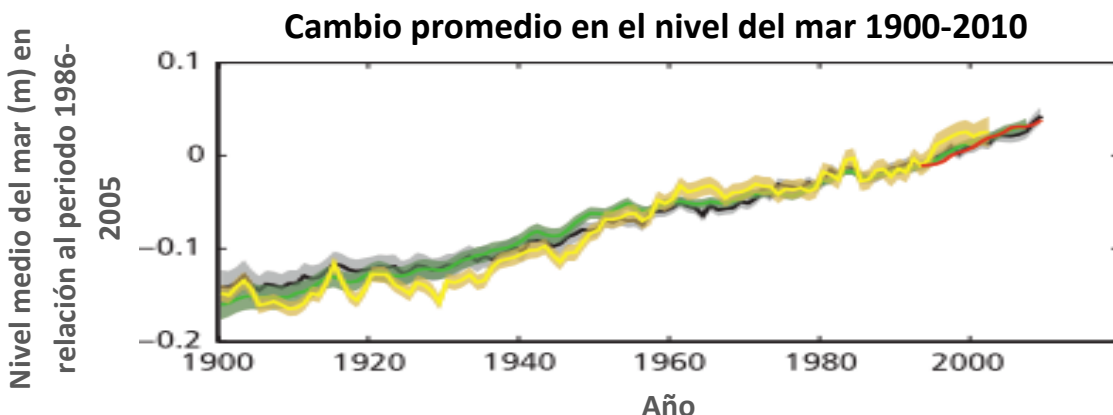


Figura 1.7. Nivel medio del nivel del mar en relación a periodo 1986-2005. Todas las series de tiempo están alineadas para tener el mismo valor en 1993, el primer año con datos de altimetría satelital disponibles. Todas las series de tiempo (diferentes colores indican distintos sets de datos) muestran valores anuales. Se muestra la incertidumbre (área sombreada) en los casos donde se pudo efectuar la evaluación. (Adaptado de IPCC 2014).



Figura 1.8. Vulnerabilidad relativa de los principales deltas costeros. Desplazamiento potencial de la población calculado con elevación del nivel del mar proyectado para el año 2050 (Extremo =>1 millón; Alto = 1 millón a 50,000; Medio = 50,000 a 5,000) (Ericson et al. 2006).

Factor de cambio en aumento	Principales efectos físicos y ecosistémicos en sistemas costeros
Temperatura Superficial Oceánica	Cambio en la circulación, redistribución de especies marinas, incremento en mortalidad de coral.
Concentración de CO <sub>2</sub>	Descenso en pH marino, impacto negativo en arrecifes de coral y otros organismos sensibles al pH.
Nivel del Mar	Inundaciones y daños por tormentas, erosión, intrusiones salinas, cambio y pérdida de humedales, drenaje obstaculizado.
Alteración de desembocaduras fluviales	Riesgo de inundación, calidad de agua alterada, riesgo de erosión, circulación alterada.

**Tabla 1.1. Alteraciones físicas y ecosistémicas que provocan los cuatro factores principales de cambio en las costas** (adaptado de Nicholls et al. 2007).

### 1.3. La información y la adaptación social a los cambios en el clima

Uno de los obstáculos detectados para que las sociedades se adapten al Cambio Climático es la falta de observación, investigación y monitoreo del medio ambiente (IPCC 2014) como ocurre en México y otros países (Sánchez-Cabeza 2015a). Esta falta de entendimiento del entorno conlleva a subestimar el complejo proceso social que implica el adaptarse al Cambio Climático, reduciendo la percepción de los costos y beneficios que brindan las diferentes opciones que existen para tal adaptación. La información insuficiente también provoca una disminución en la disposición de la población, el gobierno y las instituciones, para cambiar patrones de comportamiento o para adoptar innovaciones tecnológicas para la reducción de emisiones (Corfee-Morlot et al. 2011).

En México, es necesaria información local de las variaciones climáticas para elaborar políticas efectivas de mitigación y cumplir con los numerosos convenios internacionales ambientales con los que se ha comprometido el país, como la Convención en el Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 1992 y el Protocolo de Kioto firmado en 1998 (CICC 2012).

Dos agentes críticos para mejorar el manejo y obtención de información son el gobierno local y el sector privado. Estos agentes tienen un gran alcance no solo en la toma de decisiones, sino también en la elaboración y difusión de planes de acción para grupos vulnerables de la población (Corfee-Morlot et al. 2011).

Tanto en los agentes críticos mencionados como en la sociedad civil, existen factores culturales y sociales que interfieren con la percepción objetiva del Cambio Climático. Para poder conocer cómo es la respuesta real del medio ambiente a los planes de manejo implementados, es necesaria la adopción de métodos en la elaboración de políticas que utilicen la información proveniente del monitoreo y observación del ecosistema (Jones et al. 2014).

Ante la falta de información climática general, han surgido herramientas que abordan sistemáticamente la generación de datos meteorológicos. Dichas herramientas se denominan reanálisis atmosféricos, tema que se abordará en la siguiente sección.

## 1.4. Los reanálisis atmosféricos y su papel en el estudio del clima

Los reanálisis atmosféricos son proyectos de asimilación de datos meteorológicos cuya finalidad es producir datos física y temporalmente coherentes para facilitar el monitoreo e investigación climática (NCAR 2016). Surgieron por primera vez para analizar los datos recolectados en la campaña del Programa de Investigación Atmosférica Global (GARP, por sus siglas en inglés) del año 1979 (Dee et al., 2011). Los reanálisis generan bases de datos de cobertura global que abarcan un periodo largo (décadas o más) y que incluyen parámetros como: temperatura del aire, presión y viento a diferentes altitudes, precipitación, contenido de humedad en la tierra y temperatura oceánica superficial (ECMWF 2016).

Debido a que existe una falta general de observaciones históricas, los productos de reanálisis son utilizados ampliamente en la comunidad geocientífica (Qian et al. 2006). Esta falta de observaciones es especialmente notoria en zonas como los trópicos y los polos, regiones críticas para entender al Cambio Climático (Dee et al., 2011). Además del estudio del clima, otros usos de los productos de reanálisis son el forzamiento de modelos superficiales terrestres, y el establecimiento de condiciones de frontera en la modelación regional (Decker et al. 2011).

Los reanálisis constan en general de tres componentes: observaciones históricas, un esquema fijo de asimilación de datos y modelos de pronóstico. En cada ciclo de análisis (6-12 horas), el esquema fijo brinda una estimación dinámica y consistente del estado del clima. Dicha estimación es utilizada posteriormente para iniciar los modelos de pronóstico del estado atmosférico. Las salidas de dichos modelos se utilizan a su vez para iniciar el siguiente ciclo de análisis. Tanto el esquema fijo de asimilación de datos como los modelos de pronóstico utilizan las observaciones históricas disponibles (NCAR 2016).

El único componente de los reanálisis que varía a lo largo del tiempo son los datos históricos. Esto es inevitable debido a que la red de observaciones se encuentra en constante cambio. Dicha red está conformada por radiosondas, satélites, boyas, buques, aeronaves y estaciones meteorológicas, que en conjunto suman de 7 a 9 millones de observaciones en cada ciclo de análisis (NCAR 2016). Debido a estos cambios en el sistema de observaciones globales, la representación de señales climáticas en los reanálisis se ve alterada. Sin embargo, esta circunstancia también ocurre en cualquier análisis de observaciones históricas (ERA artículo).

A pesar de que se ha progresado substancialmente en los últimos años en las estimaciones de magnitudes atmosféricas básicas (Dee et al. , 2011, Decker et al. 2011), el uso de productos de reanálisis como equivalencia a las observaciones no es siempre justificable y aunque tiene beneficios, también está sujeto a limitaciones (Tabla 1 2).

Reconocer dichas limitaciones ha permitido tanto el uso de técnicas de corrección de sesgos (Qian et al. 2006; Berg et al. 2003), como el uso conjunto de observaciones directas y reanálisis (Simmons et al. 2010, Fan y Van den Dool 2004) que han contribuido a mejorar las entradas de los modelos de superficie terrestre. Por lo anterior, es importante que se continúe con la evaluación objetiva de los productos de reanálisis con observaciones directas de varias regiones geográficas y

climáticas (Decker et al. 2011), específicamente de las variables atmosféricas usadas para forzar los modelos de superficie.

Las principales instituciones que han producido reanálisis de segunda generación son el Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo a Mediano Rango (ECMWF por sus siglas en inglés), el Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés) y la Oficina de Modelación y Asimilación (GMAO) de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) (Decker et al. 2011).

Beneficios	Limitaciones
Bases de datos globales, resolución espacial y temporal consistente a lo largo de 3 décadas o más, amplia gama de variables disponibles.	Las restricciones observacionales, y por lo tanto la confiabilidad del reanálisis, pueden variar considerablemente dependiendo de la ubicación, periodo de tiempo y variable considerada.
Los reanálisis incorporan millones de observaciones en un sistema de asimilación de datos estable que permite estudiar diversos procesos climáticos.	Los cambios en la red de observaciones, los sesgos en ellas y en los modelos de pronóstico pueden introducir tendencias y variabilidad artificial en los productos de reanálisis.
Los datos de reanálisis son relativamente sencillos de manejar desde el punto de vista de procesamiento (aunque el tamaño de los archivos puede ser grande).	Las variables diagnóstico del ciclo hidrológico, tales como precipitación y evaporación, deben ser usadas con precaución extrema.

**Tabla 1 2. Beneficios y limitaciones del uso de reanálisis atmosféricos en estudios climáticos (adaptado de NCAR 2016).**

## 1.5. Contexto del Grupo de Trabajo

Para satisfacer la necesidad actual de información climática en el país, el proyecto “Observatorios del Cambio Climático” ha surgido bajo la dirección del Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza en colaboración con el Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En el proyecto participan científicos de nivel internacional que pertenecen a diversas Unidades Académicas del ICMyL de la UNAM, garantizando así la calidad del trabajo a realizar y la capacidad de obtener, tratar e interpretar la información obtenida desde una perspectiva multidisciplinaria.

En dicho proyecto tres zonas en la costa mexicana, Ciudad del Carmen (Campeche), Mazatlán (Sinaloa) y Puerto Morelos (Quintana Roo) se establecen como “Observatorios” por su importancia. Se planea que en dichos Observatorios se identifique y cuantifique el impacto del Cambio Climático en las costas de México mediante la recopilación de información histórica (Sánchez-Cabeza 2015 a, b).

## 1.6. Motivación y Objetivos

Este trabajo de tesis surge como una propuesta para solucionar un problema complejo: detectar y cuantificar una parte del Cambio Climático en los Observatorios mediante el uso y desarrollo de herramientas computacionales de manejo y procesamiento de datos y la comparación de datos meteorológicos con datos de reanálisis.

De manera puntual, se analizó la evolución de la temperatura del aire en las zonas mencionadas en busca de identificar algún cambio ocurrido en la temperatura costera mexicana durante los últimos años. Para dicho fin, se crearon dos programas, uno de descarga automática de bases de datos del reanálisis ERA-Interim y otro complementario de cálculo de promedios.

En el presente trabajo se desarrollaron tecnologías para manejar e interpretar los posibles efectos del Cambio Climático a partir de datos meteorológicos y su comparación con datos del reanálisis ERA-Interim. Los resultados obtenidos se analizaron desde un enfoque interdisciplinario ya que se colaboró con un grupo de Cambio Global del ICMYL.

### Objetivo Central

Analizar la evolución de la temperatura del aire en los Observatorios Ciudad del Carmen (Campeche), Mazatlán (Sinaloa) y Puerto Morelos (Quintana Roo) con la finalidad de detectar algún cambio ocurrido en los periodos con información disponible en cada Observatorio.

### Objetivos particulares

- Desarrollar un programa para la descarga automática de bases de datos del reanálisis atmosférico ERA-Interim utilizando el lenguaje de programación de alto nivel Python.
- Desarrollar programas complementarios para calcular los promedios de las temperaturas obtenidas de ERA-Interim en las estaciones propuestas.
- Evaluar el producto de temperatura del reanálisis ERA-Interim a través de la comparación con datos meteorológicos.
- Determinar si ha habido un aumento en la temperatura del aire en los Observatorios de Ciudad del Carmen, Mazatlán y Puerto Morelos en los periodos analizados.

### Hipótesis

Hipótesis de trabajo: La temperatura del aire en las estaciones analizadas ha aumentado en los periodos con información disponible.

Hipótesis nula: La temperatura del aire no muestra un incremento significativo en los periodos analizados.



## 2. Descripción de las zonas de estudio

Los sitios definidos como Observatorios del Cambio Climático en este proyecto son: Ciudad del Carmen (Campeche), Mazatlán (Sinaloa) y Puerto Morelos (Quintana Roo). Cada Observatorio incluye, además de la ciudad o poblado respectivo, un cuerpo lagunar aledaño; de esta manera, el Observatorio Ciudad del Carmen incluye a la Laguna de Términos, el de Mazatlán al Estero de Urias y finalmente el de Puerto Morelos engloba a la laguna arrecifal del mismo nombre. En cada Observatorio se encuentra también una sede del ICMYL de la UNAM, hecho crucial para la disponibilidad y acceso de datos meteorológicos requeridos en el presente trabajo.

### 2.1. Observatorio Ciudad del Carmen

Ubicado en el estado mexicano de Campeche, el Observatorio Ciudad del Carmen se encuentra en la porción sureste del Golfo de México, entre dos provincias geológicas. Al este se encuentra la Península de Yucatán, caracterizada por suelos carbonatados y escaso escurrimiento de ríos, mientras que al suroeste yacen las tierras bajas de Tabasco y altas de Chiapas, caracterizadas por una elevada precipitación y aporte fluvial (Yáñez-Arancibia y Day 1981).

El Observatorio Ciudad del Carmen engloba a la Laguna de Términos, que se extiende sobre 2,500 km<sup>2</sup> aproximadamente (Tamayo 1949) con una profundidad media de 3.5 m (Gutiérrez-Estrada y Castro-del-Río 1988) y que posee una vasta región central somera con una profundidad de 4 m (Yáñez Correa 1963).

La barrera natural que separa a la laguna del mar abierto es la Isla del Carmen, con aproximadamente 40 km de largo y 3 km de ancho; en la parte occidental de la isla se encuentra Ciudad del Carmen, urbe que cuenta con 169,466 habitantes (INEGI 2010) y que es la principal base de operaciones para la exploración y producción de petróleo en México.

En Términos desemboca el complejo fluvial más notable del país, el cual está formado por los ríos Grijalva y Usumacinta, a través de cuatro subsistemas fluvio-lagunares: Atasta-Pom, Palizada-del Este, Chumpan-Balchacah y Candelaria-Panlau (Figura 2.1, Rojas-Galaviz 1992, García-Cubas 1981).

#### *Circulación de la Laguna de Términos*

La Laguna de Términos, es un sistema conformado por dos bocas; en la entrada oriental (Puerto Real) penetra agua marina mientras que en la occidental (del Carmen) el agua fluye hacia el mar (Phleger 1971, Figura 2.1). El flujo neto en la laguna es en dirección este a oeste; esto se debe principalmente a que el patrón de vientos dominante es en dirección noreste-sureste (Mancilla y Vargas 1980).

Debido a que el régimen de mareas tiene una baja amplitud (~0.5m), existe un gradiente de salinidad dentro de la laguna, que va desde aguas con una influencia marina notable, a aguas de baja salinidad con alta influencia de ríos (Phleger 1971). La región con alta influencia marina es la zona aledaña a la Boca Puerto Real; esta está caracterizada por aguas claras y vegetación sumergida. A

pesar de que en la Boca del Carmen también exista una entrada de agua marina, las aguas dominantes son las drenadas de los sistemas fluvio-lagunares, lo anterior causa que el agua sea turbia debido al aporte de sedimentos en suspensión (Yáñez-Arancibia y Day 1981).

### **Descripción climatológica**

El clima es cálido húmedo con lluvias durante el verano, se alcanzan valores de precipitación que van de 1,200 a 2,000 mm en promedio anualmente. La temperatura ambiente media anual es de 27°C, con valores máximos de 36°C en el verano y mínimos de 17°C en el invierno (Carvajal 1973). Por otro lado, la temperatura del agua en la laguna se mantiene en un intervalo que va de 27 a 33 °C, con un promedio de 29.9°C (Torral 1971).

Como se mencionó anteriormente, el patrón de viento dominante son las brisas marinas en dirección noreste-sureste, sin embargo, en invierno prevalecen los “Nortes” o tormentas de invierno, que provienen del noreste (Carvajal 1973, García-Cubas 1981). Yáñez-Arancibia y Day (1981) definen tres épocas o "estaciones" bien caracterizadas a lo largo del año. La época de lluvias abarca desde el mes de junio hasta finales de septiembre, la época de nortes, también asociada con lluvias, abarca desde el mes de noviembre hasta enero, por último, la época estival, donde las lluvias se presentan con menor frecuencia, es de febrero a mayo.



**Figura 2.1 Ubicación del Observatorio Ciudad del Carmen.** a) Ubicación del Observatorio en la Península de Yucatán. b) Se observan la Isla del Carmen, las dos Bocas que posee la Laguna, Ciudad del Carmen y la estación del ICMYL (punto rojo); en la Boca Puerto Real entra agua marina mientras que en la del Carmen fluye agua hacia el mar (flechas negras). Se aprecian también los cuatro sistemas fluvio-lagunares que desembocan en Términos. (Adaptado de Madrazo-Garibay y Lopez-Ochoterena 1985).

## ***Importancia e impacto humano en la región***

La Laguna de Términos, su conexión con el mar, los sistemas fluvio-lagunares, así como las praderas de pastos marinos y los bosques de manglar asociados constituyen ambientes definidos como hábitats críticos, razón por la cual la laguna es parte de los 140 sitios RAMSAR (humedales protegidos) con que cuenta el país (CONANP 2016).

A pesar de representar solo el 4.7% del territorio nacional, la cuenca de Términos recibe el 30% de la descarga de los ríos de México; lo anterior permite la existencia de un vasto hidrosistema que es habitado por el 64% de las especies que existen a nivel nacional. Además de tener el primer lugar nacional en cuanto a número de plantas superiores (20,000 especies), peces de agua epicontinental (150 especies), anfibios (180 especies) y pájaros (240 especies), mientras que la Laguna de Términos es hogar de 30 especies endémicas de anfibios, reptiles, pájaros y mamíferos (Toledo 2003, García-Ríos 2013).

El cambio climático global impacta de diferentes maneras los ecosistemas del Golfo de México. Un ejemplo de ello es el ascenso acelerado del nivel del mar, combinado con un patrón atípico de lluvias e incremento de la temperatura. Esto provoca múltiples presiones ambientales sobre los humedales debido al incremento de la salinidad en conjunto con las inundaciones excesivas que ocurren en la zona (Day et al. 2008, 2012, 2013).

Ejemplos de estas presiones son el mayor aporte de agua dulce, de sedimentos terrígenos y de nutrientes que impactan la fisiografía plana de las llanuras de inundación deltaica donde se encuentran los humedales costeros del Golfo de México (Yáñez-Arancibia 2014).

## **2.2. Observatorio Mazatlán**

Mazatlán es una bahía y una ciudad mexicana en el estado de Sinaloa que se encuentra en la costa del Pacífico, en la entrada este del Golfo de California (Figura 2.2). Ubicada en la provincia geológica de la planicie costera noroccidental, Mazatlán es caracterizada por una naturaleza geológica reciente ya que son comunes los afloramientos de rocas sedimentarias del Cuaternario (INEGI 2000). Las formaciones elevadas existentes, como el Cerro del Vigía, provienen de las ramificaciones de la Sierra Madre Occidental en la zona (INAFED 2016).

El área de estudio incluye un sistema lagunar costero conocido como el Estero de Urías, que se ubica al sureste de la ciudad con una superficie de 18 km<sup>2</sup> y un largo de 17 km. La morfología del estero es compleja; un giro de casi 90° al final de la primera sección causa que el eje principal de la laguna sea paralelo a la costa. Por otro lado, la parte superior del estero tiene tres ramificaciones angostas y someras que están rodeadas de manglar (Ochoa-Izaguirre et al. 2002).

El Observatorio Mazatlán, además de la estación meteorológica del ICMYL, UNAM, cuenta con una fuente de datos meteorológicos adicional de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA, (Figura 2.2).

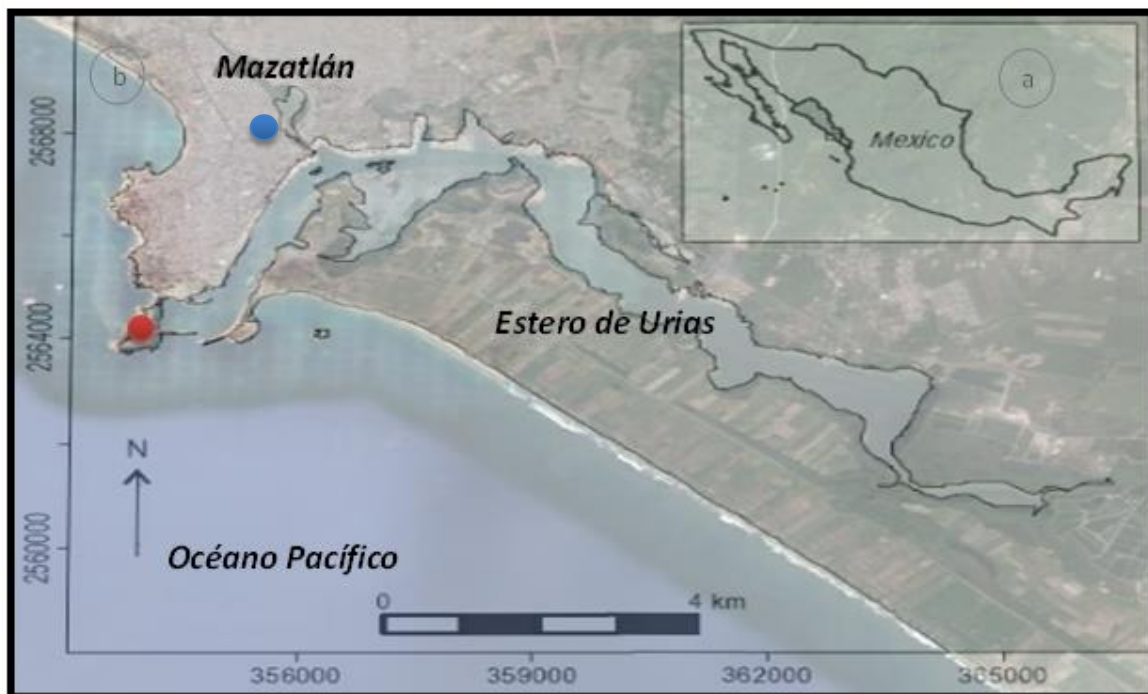
### **Circulación del Estero de Urias**

La circulación del Estero de Urias está gobernada por la marea astronómica (Secretaría de Marina 1974, Montaña-Ley et al. 2008), trabajos de modelación sugieren que también influyen en ella la topografía y los gradientes de salinidad existentes (Cardoso-Mohedano 2015a).

El régimen de mareas en Mazatlán es mixto, semidiurno y con una amplitud anual promedio de 1m (Montaña-Ley et al. 2008). Sin embargo, existen fuertes diferencias entre las corrientes causadas por la marea debido al amplio rango de profundidad dentro del estero; la profundidad del agua varía de 1 a 3m a lo largo del eje principal de la laguna e incrementa a lo largo del canal de navegación hasta un máximo de 13m (Montaña-Ley et al. 2000).

Diversos autores (Ochoa- Izaguirre et al. 2002, Álvarez-León 1977) han coincidido en dividir al Estero de Urias en tres zonas distintas tomando en cuenta diversos factores. Según sus características hidrodinámicas, el estero se divide en: área portuaria, intermedia y superior (Cardoso-Mohedano 2015a).

El área portuaria está directamente conectada al Océano Pacífico; tiene la profundidad y la velocidad estimada máxima del estero, 13 m y  $0.91 \text{ ms}^{-1}$  respectivamente (Cardoso-Mohedano 2015a). El área intermedia corresponde a la zona estuarina más amplia, donde la profundidad disminuye ( $\sim 4\text{m}$ ) así como la velocidad estimada ( $\sim 0.83\text{ms}^{-1}$ ) (Cardoso-Mohedano 2015a). El área superior es la más alejada de la boca lagunar; con la profundidad y la velocidad más bajas estimadas, de  $\sim 2\text{m}$  (Montaña-Ley et al. 2008) y  $\sim 0.31\text{ms}^{-1}$  (Cardoso-Mohedano 2015a) respectivamente.



**Figura 2.2 Ubicación del Observatorio Mazatlán.** a) Estado de Sinaloa en México. b) La estación Mazatlán del ICMYL (punto rojo), la estación CONAGUA (punto azul), el Estero de Urias y la ciudad de Mazatlán (Adaptado de Molino-Minero et al. 2014)

En el Estero de Urias se observa un comportamiento inverso de la salinidad, es decir que presenta una mayor salinidad en la zona más alejada del mar. Este comportamiento (también llamado anti-estuarino) es debido a una alta evapotranspiración y a la ausencia del aporte de agua fresca en la parte superior de la laguna, especialmente en los meses más cálidos (**Cardoso-Mohedano 2015a**).

### ***Descripción climatológica***

El clima es tropical con dos estaciones contrastantes en el año, una de sequía y otra de lluvias (**García-Amaro de Miranda 1973**). La precipitación promedio anual es de 800 mm, que ocurre principalmente en la estación de lluvias (**Álvarez-León 1977**). Por otro lado, los vientos predominantes están asociados con sistemas climáticos del noroeste, y sólo de junio a septiembre del suroeste.

La temperatura atmosférica varía a lo largo del año con un rango mínimo de 22-23°C en los meses más fríos (noviembre a febrero) y un rango máximo de 30-32°C durante los meses más calientes (julio a septiembre) (**Villalba 1989**). Por otro lado, la temperatura superficial del agua reportada para la laguna es de un promedio anual de 25°C, fluctuando entre los rangos 19.7 °C en febrero y 28°C en agosto (**Álvarez-León 1977**).

### ***Importancia e impacto humano en la región***

La bahía de Mazatlán cuenta con 438,434 habitantes, número que puede aumentar en un 50% en temporada turística (**INEGI 2013**). La población existente ejerce una fuerte presión ambiental en el Estero de Urias, debido a esto es probable que los efectos del Cambio Global provoquen importantes daños socio-económicos en esta región.

El bosque de manglar que bordea a la laguna es un recurso esencial para varias actividades locales y actúa como una guardería para varias especies de fauna terrestre y acuática (**Flores-Verdugo,2015**). En Urias, el bosque de manglar rodea la parte superior del estuario. Este bosque está mejor desarrollado a lo largo de la orilla y es habitado por 3 especies de mangle: el mangle rojo (*Rizophora mangle*), el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle blanco (*Laguncularia racemose*). Sin embargo, el sistema está degradado. Lejos de la orilla se encuentran árboles enanos que reflejan las modificaciones hidrológicas hechas por el hombre que a su vez crean condiciones pobres para el crecimiento del mangle (**Flores-de-Santiago, 2012**).

Ejemplos de la presión ambiental existente es la descarga en Urias de: desechos de una granja de camarón, aguas residuales industriales, urbanas y de enfriamiento de una planta termoeléctrica.

Cardoso-Mohedano y colaboradores (**2015b**) sugieren que el impacto de la planta termoeléctrica en el estero, bajo los escenarios de incremento de temperatura proyectados por el IPCC, podría afectar directamente al crecimiento y desarrollo piscícola. Lo anterior impactaría en la economía de la región al verse afectada la pesca y la acuicultura.

## 2.3. Observatorio Puerto Morelos

El Observatorio Puerto Morelos está localizado en la costa noreste de la Península de Yucatán, a unos 25 km al sur de Cancún, en el corazón del centro turístico más importante de México (**Figura 2.3**). En general, las costas de Quintana Roo se caracterizan por presentar un relieve muy escaso y por la ausencia total de ríos, esto se debe a la naturaleza kárstica del terreno, el cual es de carácter calcáreo (**Merino-Ibarra y Otero-Dávalos 1991**). A pesar de no contar con escorrentías superficiales, la región cuenta con la presencia de un sistema de circulación de aguas subterráneas de gran importancia ecológica y científica.

Por otro lado, las aguas costeras del Caribe Mexicano presentan una gran estabilidad vertical, elevada transparencia, y bajos niveles de nutrientes; lo anterior, aunado a temperaturas cálidas, permite la formación de arrecifes en la angosta plataforma continental de la región (**Merino-Ibarra y Otero-Dávalos 1991**).

En el margen de la costa de Puerto Morelos está ubicado un arrecife que cubre 4 km de longitud y que incluye una laguna arrecifal cuya anchura varía entre 550 y 1,500 m (**Ruíz-Rentería et al. 1998**). Dicho arrecife forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, la segunda barrera coralina más grande del mundo, que se extiende sobre el mar Caribe desde Honduras hasta el Canal de Yucatán.

### Circulación de la laguna arrecifal

La laguna arrecifal de Puerto Morelos es un ambiente micromareal del Caribe caracterizado por la influencia de la corriente de Yucatán y el régimen de los vientos alisios (**Sheinbaum et al. 2002, Chávez et al. 2003**). La laguna es relativamente somera, con una profundidad media de 3-4m y una máxima de 8m. Está conectada al océano abierto a través de dos bocas: una al norte que tiene 300 m de ancho y 6m de profundidad, y una al sur con 400 m de ancho y 8 m de profundidad. El fondo de la laguna está cubierto de arena calcárea que es estabilizada por praderas de pastos marinos (**Ruíz-Rentería et al. 1998**).

La circulación general de la laguna consiste en dos flujos, uno de entrada inducido por las olas que entran a la laguna sobre la planicie arrecifal y otro de salida, caracterizado por un flujo fuerte a través de las dos bocas lagunares (**Coronado et. al 2007**). Las olas que inducen el flujo de entrada son moduladas por cambios de baja frecuencia en el nivel del mar relacionados con la variabilidad geostrofica de la Corriente de Yucatán, que se ubica mar adentro. Aunque de una influencia menor, los forzamientos por la marea astronómica y el viento juegan un rol adicional en el oleaje que induce el flujo de entrada. (**Coronado et. al 2007**).

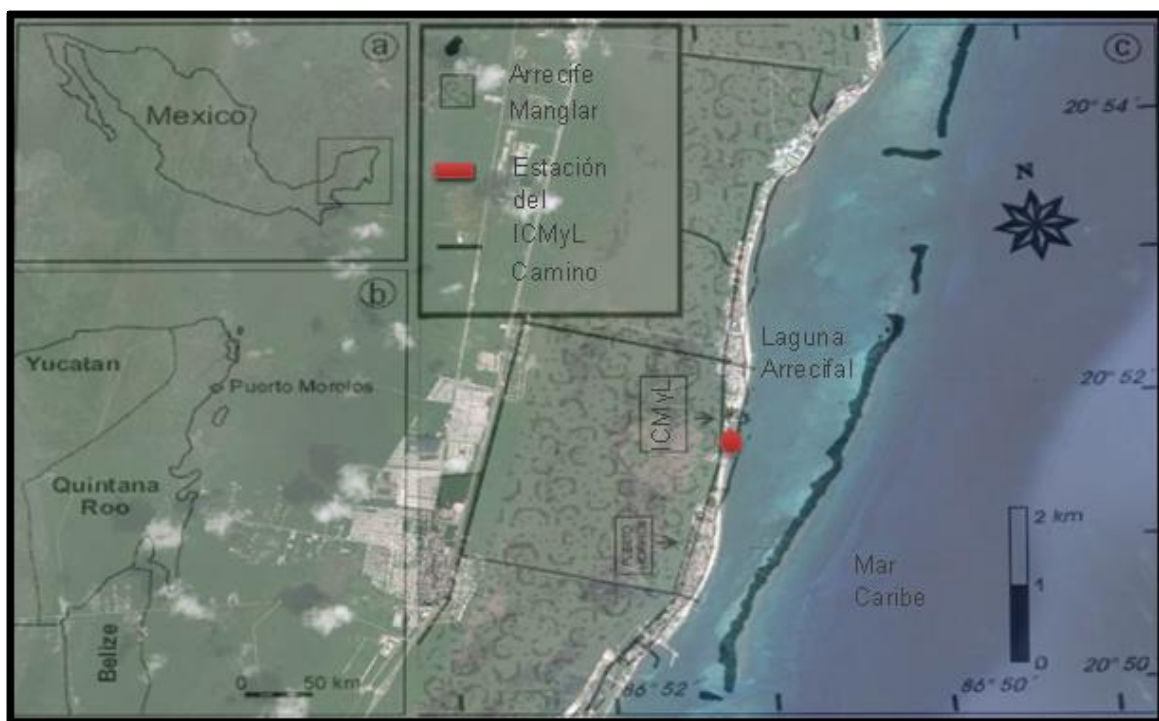
### Descripción Climatológica

El clima de la región es tropical, con dos estaciones dominantes en términos del patrón de vientos y temperatura del aire. El invierno empieza en noviembre y continúa hasta marzo o abril con un promedio de la temperatura del aire de 24 a 25°C. En contraparte, la temperatura máxima del aire es alcanzada en agosto, con un promedio mensual de 29°C y un máximo de alrededor de 33.5°C

(Coronado et. al 2007). La precipitación en la región es de 1123 mm en promedio al año (Merino-Ibarra y Otero-Dávalos 1991)

Por otro lado, la temperatura del agua en el fondo de la laguna tiene una variación estacional de alrededor de 5°C, dentro de un rango de 31 a 32 °C entre mediados de agosto y principios de septiembre y un intervalo de 24 a 25°C entre diciembre y mediados de marzo (Coronado et. al 2007).

Los vientos dominantes durante octubre y febrero provienen del noreste, aunque durante los frentes fríos existen eventos con dirección norte y sureste. Los patrones de viento durante el verano se caracterizan por la influencia de aire marítimo tropical y frecuentes tormentas. Los vientos predominantes son los alisios con una velocidad de 3 a 9 m s<sup>-1</sup>(Coronado et. al 2007).



**Figura 2.3 Ubicación de Puerto Morelos .a) La península de Yucatán dentro de México. b) Puerto Morelos en Quintana Roo. c) Ubicación de la estación del ICMYL (en rojo) y de la laguna arrecifal dentro de Puerto Morelos (Adaptado de VanTussenbroek 2011).**

### Importancia e impacto humano en la región

La laguna arrecifal de Puerto Morelos es un sitio RAMSAR, su gran valor natural es a su vez la principal atracción para la actividad turística de la zona. Declarado Parque Nacional desde 1998, el arrecife de Puerto Morelos tiene tres especies de pastos marinos y 264 especies de algas reportadas como vegetación marina (Carabias-Lillo et al. 2000). Por otro lado, se han observado 669 especies de fauna marina, tanto invertebrados como vertebrados, pertenecientes a 75 ordenes diversos (Carabias-Lillo et al. 2000).

Lo anterior hace del Parque Nacional un sitio tan rico y diverso como cualquiera otro sistema arrecifal de la región biogeográfica del Caribe. Algunas de las especies registradas dentro del Parque Nacional están consideradas bajo algún estatus de protección, tal es el caso de la tortuga caguama (*Caretta caretta*), verde (*Chelonia mydas*), de carey (*Eretmochelys imbricata*), y de los corales alce (*Acropora palmata*), cuerno de ciervo (*Acropora cervicornis*) y organillo (*Plexaura homomalla*, **Carabias-Lillo et al. 2000**).

El atractivo natural de la zona ha provocado un rápido crecimiento poblacional y un consecuente aumento de infraestructura turística y construcción de residenciales. El impacto ambiental del crecimiento urbano se ha visto reflejado en la deforestación del manglar y en el rellenado artificial del terreno, se espera que ambos impactos incrementen en el futuro debido al continuo desarrollo de complejos turísticos en la costa (**Ruíz-Rentería et al. 1998**).

Por otro lado, Rodríguez-Martínez et al. (**2010**) sugieren que el cambio detectado en la comunidad de pastos marinos en la laguna arrecifal durante el periodo 1993-2005, responde a un incremento en el aporte de nutrientes a la zona, provocado por el continuo desarrollo costero y el vertimiento de aguas residuales sin tratar en Puerto Morelos.

Con alrededor de 9,000 habitantes en el presente (**INEGI 2010**), el área de estudio se mantiene relativamente prístina. Sin embargo se ha detectado un ligero incremento en los valores máximos y un ligero decremento en los valores mínimos de la temperatura oceánica superficial que pudieran corresponder a cambios potenciales permanentes en Puerto Morelos (**Rodríguez-Martínez et al. 2010**).



## 3. Metodología

### 3.1. El reanálisis atmosférico ERA-Interim

ERA-Interim es un reanálisis climático global (consultar [sección 1.4](#)) que genera una gran variedad de parámetros tanto superficiales como troposféricos y estratosféricos. ERA es producido por el Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo a Mediano Rango (ECMWF en inglés), que es una de las principales instituciones que han producido reanálisis de segunda generación.

El acrónimo ERA proviene de “Reanálisis Europeo” y se refiere a una sucesión de proyectos de investigación en el ECMWF que generaron diversas bases de datos (ERA-15, ERA-40 etc.). Por otra parte, el término Interim se usa en inglés para designar proyectos que corresponden a una etapa intermedia. Tal es el caso de ERA-Interim, reanálisis intermedio entre ERA-40 y otro proyecto más ambicioso que abarcará todo el siglo veinte ([Dee et al. 2011](#)). El principal objetivo de este reanálisis es lidiar con las dificultades detectadas en la asimilación de datos de ERA-40.

Como todos los reanálisis, ERA-Interim está conformado por tres componentes: el esquema de asimilación de datos, el modelo de pronóstico y las observaciones históricas. Estos 3 componentes interactúan en ERA para analizar primero los parámetros superficiales y luego la alta atmósfera. Primero, la asimilación de datos estima la temperatura y punto de rocío en superficie, combinando observaciones históricas con estimaciones previas del modelo de pronóstico del ciclo anterior. Posteriormente, el pronóstico estima una amplia variedad de parámetros físicos tanto superficiales como de la alta atmósfera. El número de observaciones asimiladas por día es de alrededor de  $10^7$ , la mayor parte proveniente de satélites ([Dee et al. 2011](#)).

Como se mencionó anteriormente ([sección 1.4](#)), evaluar los productos de reanálisis ha permitido el uso de técnicas complementarias para mejorar los datos de entrada de diversos modelos. Naturalmente, dichas evaluaciones también contribuyen a que cada generación de reanálisis sea de mayor calidad que la anterior. Con respecto a la evaluación de ERA-Interim, [Simmons et al. \(2010\)](#) han reportado que la temperatura y humedad superficiales del reanálisis concuerdan relativamente bien a escala continental con el producto CRUTEM3, derivado únicamente de observaciones históricas. Por otro lado, [Decker et al. \(2011\)](#) hacen una comparación de datos de 33 torres de observación en el hemisferio norte con diversos reanálisis y concluyen que ERA-Interim tiene el menor sesgo en cuanto a temperatura del aire y su variabilidad.

La información del reanálisis ERA-Interim ha auxiliado en el monitoreo y evaluación del clima y su evolución ([Willett et al. 2010](#)) incluso a escala regional en conjunto con otras herramientas como modelos de superficie ([Huang et al. 2016](#)). Las incertidumbres de estas evaluaciones son difíciles de cuantificar; por eso es importante analizar los datos de reanálisis en conjunto con fuentes de datos más tradicionales provenientes solo de observaciones (e.g. [Simmons et al. 2010](#))

ya que algunas características regionales como microclimas, uso de suelo y topografía no son bien representadas por los reanálisis (Leung et al. 2003).

En este trabajo se utilizaron y analizaron las bases de datos de temperatura del aire del reanálisis atmosférico ERA-Interim con la finalidad de evaluar sus productos a través de la comparación con datos de campo en los Observatorios definidos en el capítulo anterior.

### 3.1.1. Descripción de la temperatura del aire en superficie de ERA-Interim

El producto “t2m” del reanálisis ERA-Interim contiene datos cada 3 horas de la temperatura del aire a 2 metros de la superficie, estimada en Kelvin. Se descargó dicho producto para el periodo que abarca desde el primero de enero de 1979 al 31 de julio del 2015 para el punto geográfico disponible más cercano a las estaciones meteorológicas de cada Observatorio (Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3). En la Tabla 3.1 se precisan las coordenadas geográficas de dichos puntos.

<i>Observatorio</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Distancia a la estación meteorológica más cercana</i>
<i>Ciudad del Carmen</i>	<i>18.625°N</i>	<i>91.750°O</i>	<i>3.5 km</i>
<i>Mazatlán</i>	<i>23.250°N</i>	<i>106.375°O</i>	<i>5 km</i>
<i>Puerto Morelos</i>	<i>20.875°N</i>	<i>86.875°O</i>	<i>1 km</i>

**Tabla 3.1.** Punto geográfico más cercano con datos de ERA-Interim a cada Observatorio.



**Figura 3.1.** a) Ubicación del Observatorio Ciudad del Carmen. b) Ubicación de la estación meteorológica del ICMYL (en azul) y punto geográfico más cercano con datos de ERA-Interim (en rojo).

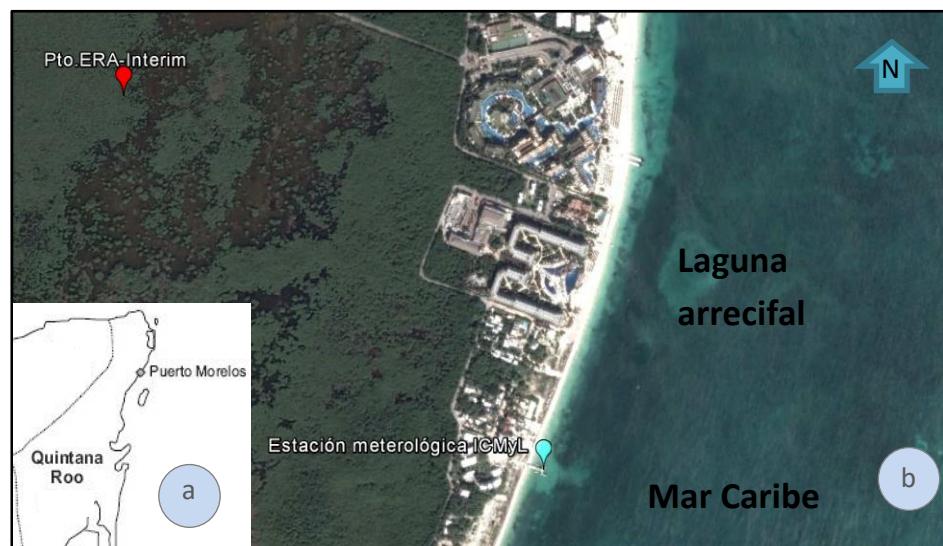
### 3.2. Desarrollo de los programas

Para facilitar el acceso y la visualización de los datos del reanálisis ERA-Interim en los Observatorios, se elaboraron programas de descarga automática de datos y de cálculo de promedios en el lenguaje de programación Python, que es un lenguaje de alto nivel, orientado a objetos, de sintaxis simple y distribuido abiertamente (**Fundación Python Software 2015**). Para facilitar el trabajo, se usó el ambiente de desarrollo integrado (IDE, en inglés) Ninja-IDE, diseñado para facilitar la construcción de aplicaciones en Python (**Ninja-IDE 2015**).

Para analizar los datos de reanálisis se trabajó con las librerías netCDF. Las netCDF son un formato común de datos para el trabajo científico (Network Common Data Form, en inglés) que permiten compartir, crear y acceder datos científicos (**OGC 2015**).



**Figura 3.2. a) Ubicación del Observatorio Mazatlán, Sinaloa en México. b) Ubicación de la estación meteorológica ICMYL (azul), estación CONAGUA (azul cielo) y punto geográfico más cercano con datos de ERA-Interim (rojo).**



**Figura 3.3. a) Ubicación del Observatorio Puerto Morelos. b) Ubicación de la estación meteorológica (en azul) y punto geográfico más cercano con datos de ERA-Interim.**

La programación realizada se efectuó bajo la filosofía de código limpio; esta filosofía plantea que el código elaborado debe ser lo más claro y sencillo posible con el fin de facilitar la lectura y entendimiento del trabajo a cualquier persona que desee usar o editar el programa ([Martin 2008](#)).

Tomando en cuenta lo anterior, se elaboraron subrutinas (scripts que hacen una tarea específica) que se anidaron en un script principal, este último se diseñó para que la usuaria pueda editar con facilidad los parámetros de cada programa.

### **3.2.1. Programas generados**

El sistema operativo usado en este trabajo para desarrollar los programas fue Ubuntu, el cual está basado en GNU/Linux y se distribuye como software libre ([Ubuntu 2015](#)). Para que los programas generados funcionen es necesario tener las bibliotecas SciPi, NumPy y netCDF4 instaladas en el sistema operativo.

Es necesario registrarse en el ECMWF para generar un archivo `.ecmwfapirc` que fungirá como llave de identificación. Posteriormente, es necesario instalar la biblioteca `ecmwfapi` en el sistema. El procedimiento para realizar ambas acciones se puede consultar en el sitio web del ECMWF ([ECMWF 2015a](#)).

#### **Programa de descarga automática de datos**

Este programa descarga archivos netCDF por mes a lo largo de los años especificados. Con las herramientas descritas y la sintaxis que se indica en el sitio web del ECMWF para solicitar datos ([ECMWF 2015b](#)), se procedió de la siguiente manera:

- Se creó un archivo de solicitud de datos para descargar las variables de interés; los códigos usados para cada variable son los especificados por ECMWF y se pueden consultar en el [anexo A](#).
- Se realizó una subrutina donde se asocian el nombre de las estaciones con sus coordenadas geográficas, de igual forma se creó un script que asocia la variables elegidas con las disponibles en ERA-Interim.
- Para la descarga de archivos netCDF mensuales con las variables elegidas, se efectuó un ciclo sobre el archivo de solicitud de datos, donde el año inicial y el final están especificados por la usuaria.
- Se desarrolló también una subrutina de etiquetado para los archivos netCDF descargados.

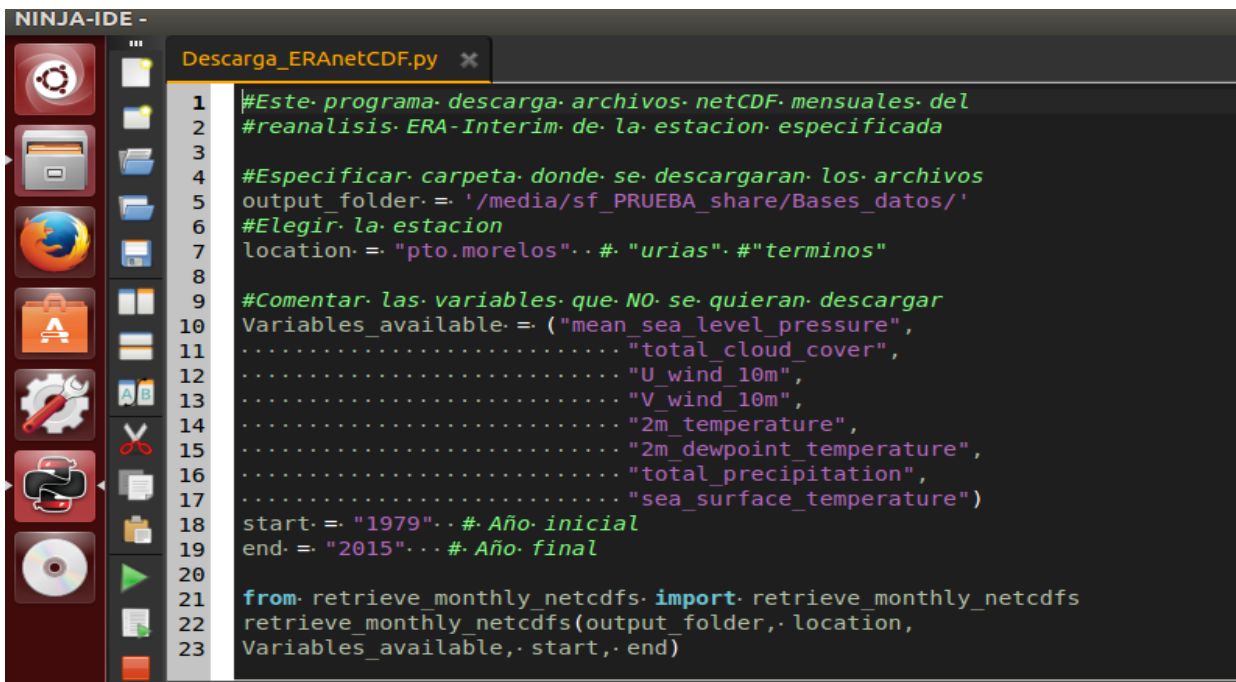
En el script principal ([Figura 3.4](#)) se puede editar la descarga eligiendo la localidad, las variables y el periodo de tiempo que se quiera analizar.

#### **Programa complementario de promedios diarios**

Con los archivos netCDF descargados anteriormente, este programa produce archivos csv (*comma-separated values* por sus siglas en inglés) que contienen el promedio diario de cada variable elegida a lo largo de un mes. Los archivos son organizados en carpetas que corresponden

a cada punto geográfico de la localidad analizada, donde es generado un archivo .txt donde se especifican las coordenadas geográficas de cada punto analizado así como las unidades de las variables descargadas.

De las subrutinas elaboradas, las más relevantes fueron las que efectúan las tareas de: lectura cíclica en carpetas, lectura y extracción de variables de archivos netCDF, cálculo de promedio diario y guardado de los promedios producidos.



```
1 #Este programa descarga archivos netCDF mensuales del
2 #reanálisis ERA-Interim de la estación especificada
3
4 #Especificar carpeta donde se descargarán los archivos
5 output_folder = '/media/sf_PRUEBA_share/Bases_datos/'
6 #Elegir la estación
7 location = "pto.morelos" .# "urias" .#"terminos"
8
9 #Comentar las variables que NO se quieran descargar
10 Variables_available = ("mean_sea_level_pressure",
11 ..... "total_cloud_cover",
12 ..... "U_wind_10m",
13 ..... "V_wind_10m",
14 ..... "2m_temperature",
15 ..... "2m_dewpoint_temperature",
16 ..... "total_precipitation",
17 ..... "sea_surface_temperature")
18 start = "1979" .# Año inicial
19 end = "2015" .# Año final
20
21 from retrieve_monthly_netcdfs import retrieve_monthly_netcdfs
22 retrieve_monthly_netcdfs(output_folder, location,
23 Variables_available, start, end)
```

**Figura 3.4.** Script principal del programa “Descarga\_ERANetCDF”. Se observan las variables disponibles, donde se pueden comentar las que no se quieran descargar. Se tiene que especificar el año de inicio, el año final, la localidad y la carpeta destino para la descarga.

### Programa complementario de promedios personalizados

Este programa produce archivos csv que contienen el promedio de las variables elegidas en el periodo que se especifique. Los archivos generados son organizados de la misma manera que en el programa de promedios diarios; también se genera un archivo .txt con las especificaciones de los puntos geográficos y de las variables disponibles. Las subrutinas de este programa son similares a las del programa anterior con excepción de la rutina de cálculo de promedios, pues se elabora el promedio de todos los datos contenidos en el periodo especificado.

#### 3.2.2. Accesibilidad de los programas generados

Todos los scripts desarrollados en el presente trabajo se encuentran disponibles de forma abierta en la plataforma virtual Github (<https://github.com/eduardogomezdelapena/automatic-EraInterim>).

### 3.3. Análisis de datos

#### 3.3.1. Descripción de las bases de datos de campo

Para el Observatorio Ciudad del Carmen, existen datos diarios de temperatura desde septiembre de 1984 hasta agosto del 2015, sin embargo, la información disponible tiene una resolución de 0.5°C y para el año 1985, está incompleta. Los datos fueron tomados de la estación meteorológica CONAGUA ubicada en la Estación de Investigaciones Marinas “El Carmen”, ICMYL, UNAM.

Por otra parte, se encontraron dos fuentes disponibles de datos de temperatura en Mazatlán. La primera es una base de datos de la CONAGUA que cuenta con promedios mensuales de temperatura para el periodo 1930-1944 y el periodo 1960-2004 y con promedios por hora para el periodo 2005-2014. La segunda serie de tiempo contiene datos de temperatura diarios para el periodo 2005-2006 y fue tomada de la Unidad Académica Mazatlán, ICMYL, UNAM.

Por último, la base de datos de campo de Puerto Morelos fue facilitada por la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, ICMYL, UNAM. Consiste en mediciones de temperatura en intervalos irregulares de tiempo desde septiembre de 1992 hasta noviembre del 2011; debido a datos faltantes, se analizaron únicamente los datos del periodo 1993- 2002.

#### 3.3.2. Estadística usada para el análisis de datos

Para homogeneizar la frecuencia de muestreo entre las series de reanálisis y campo, se calculó el promedio sobre los datos de reanálisis a cada paso de tiempo según la frecuencia de la serie de campo con la que se comparó (**Tabla 3.2**). El número de años analizado en cada Observatorio correspondió con la disponibilidad de datos en las estaciones meteorológicas. De esta manera, la comparación entre campo y reanálisis fue de 31 años en Ciudad del Carmen, 36 años en Mazatlán y 10 años en Puerto Morelos (**Tabla 3.2**).

Se realizaron promedios de los periodos analizados y regresiones lineales para determinar el cambio a largo plazo de la temperatura en los diferentes puntos geográficos. Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas estadísticas de comparación de medias y análisis de correlación entre las series meteorológicas y de reanálisis para determinar las diferencias y similitudes.

#### Gráfica de caja y bigotes

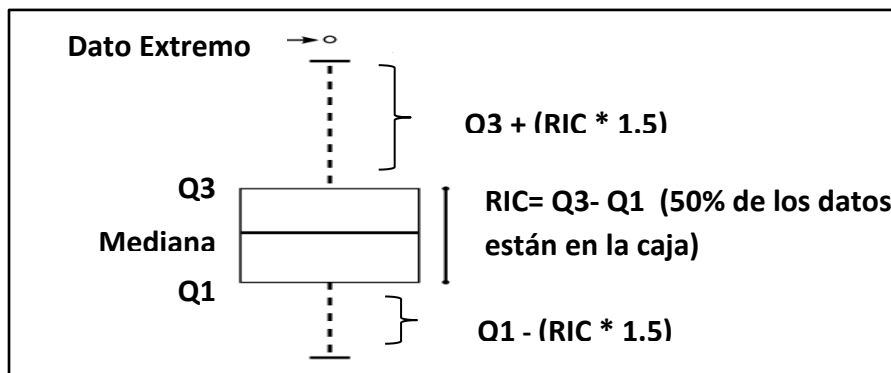
Para visualizar la variabilidad de los datos se utilizaron gráficas de caja y bigotes. Los tres valores que dividen un conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales (llamados cuartiles) forman la base de dichas gráficas que agilizan la interpretación de la distribución, dispersión y simetría de los datos (**Zar 2010a**).

Como se muestra en la **Figura 3.5**, una caja vertical es dibujada con el borde inferior en el primer cuartil (Q1) y el superior en el tercer cuartil (Q3). Después, la mediana (el segundo cuartil) es indicada por una línea horizontal que atraviesa la caja. Posteriormente, una línea vertical es

dibujada desde el borde inferior de la caja al menor dato que no exceda una distancia a la caja de 1.5 veces el rango intercuartílico (la diferencia entre el tercer cuartil y el primero).

Acrónimo	Observatorio	Fuente	Número de años analizados	Periodo	Frecuencia de muestreo
ICML-31CDC	Cd. Carmen	ICML	31	1984-2014	Diaria
ERA-31CDC		ERA-Interim	31	1984-2014	Diaria
CNA-85MZT	Mazatlán	CONAGUA	85	1930-2014	Mensual
CNA-36MZT		CONAGUA	36	1979-2014	Mensual
ERA-36MZT		ERA-Interim	36	1979-2014	Mensual
ICML-02MZT		ICML	02	2005-2006	Diaria
CNA-02MZT		CONAGUA	02	2005-2006	Diaria
ERA-02MZT		ERA-Interim	02	2005-2006	Diaria
CNA-10MZT		CONAGUA	10	2005-2014	Cada 3 horas
ERA-10MZT		ERA-Interim	10	2005-2014	Cada 3 horas
ICML-10PM	Puerto Morelos	ICML	10	1993-2002	Cada 3 horas
ERA-10PM		ERA-Interim	10	1993-2002	Cada 3 horas

**Tabla 3.2. Acrónimos definidos para cada serie de datos según el observatorio al que pertenezcan, fuente que proporcionó los datos y número de años analizados.**



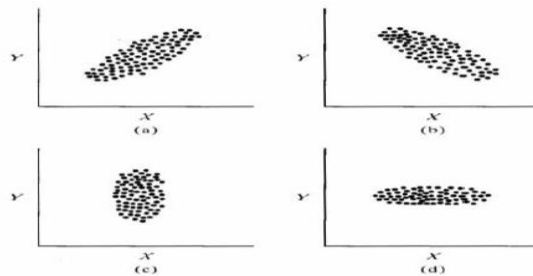
**Figura 3.5 Diagrama de caja y bigotes con sus elementos principales.**

De igual manera, una línea vertical es dibujada desde el borde superior de la caja al mayor dato que no exceda 1.5 veces el rango intercuartílico (RIC) a la caja. Estas dos líneas verticales debajo y sobre la caja son los “bigotes” de la gráfica. Si algún dato yace más allá de los bigotes, se considera un dato extremo (Zar 2010a).

## Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la “fuerza” de la asociación que existe entre dos variables (Zar 2010b). Dicho coeficiente es adimensional y sus valores se encuentran entre -1 y 1; los valores 1 y -1 implican una correlación perfecta y el valor 0 señala que no existe correlación entre las variables analizadas.

Una correlación positiva implica que si el valor de una de las variables incrementa, la otra variable también incrementa su valor; por otro lado, una correlación negativa indica que el valor de una de las variables incrementa mientras que el de la otra disminuye (Zar 2010b, Figura 3.6).



**Figura 3.6. Correlación lineal simple. (a) Correlación Positiva. (b) Correlación negativa. (c) No existe correlación. (d) No existe correlación.**

## Prueba U de Mann-Whitney

Hay una gran diversidad de métodos estadísticos que no requieren suponer normalidad en la distribución de un conjunto de datos. Estos procedimientos estadísticos se denominan pruebas no paramétricas. Las pruebas no paramétricas pueden ser generalmente aplicadas a cualquier situación donde se justifique el uso de una prueba paramétrica (Zar 2010c). Cuando los supuestos que se deben asumir para realizar una prueba paramétrica son violados seriamente, entonces la contraparte no paramétrica puede ser más poderosa (Zar 2010c).

Cuando los supuestos de la prueba t de Student no se pueden asumir, la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney nos es útil para comparar las tendencias centrales de dos poblaciones. La hipótesis nula de dicha prueba plantea que las medias provenientes de dos conjuntos de datos provienen de la misma población (i.e. que son semejantes), mientras que la hipótesis alternativa plantea que un conjunto en particular tiende a tener mayores valores que el otro (Fay & Proschan 2010).

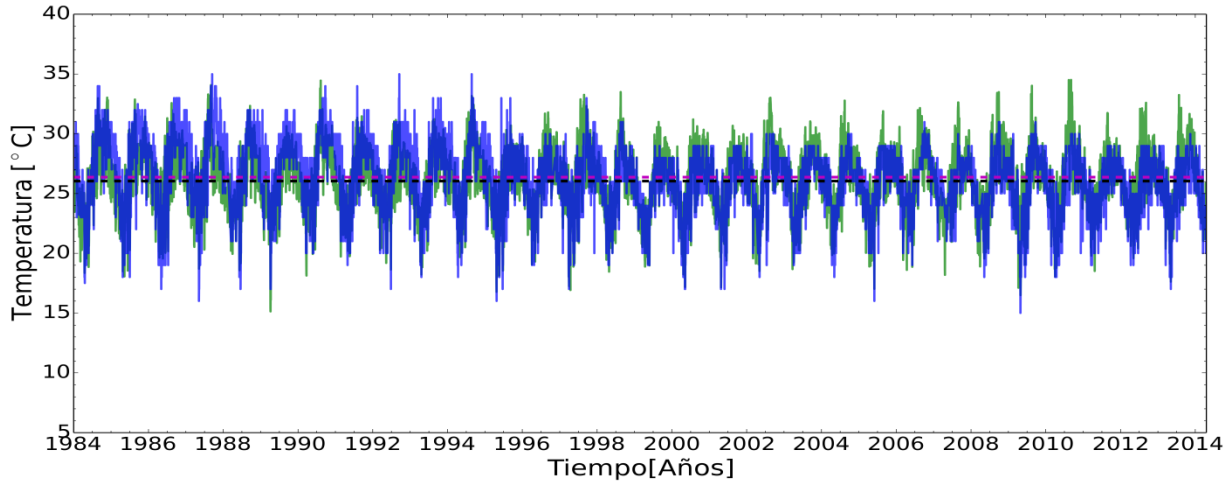
Debido a que los datos analizados en este trabajo tuvieron distribuciones no normales, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para comparar las medias entre conjuntos.



## 4. Resultados

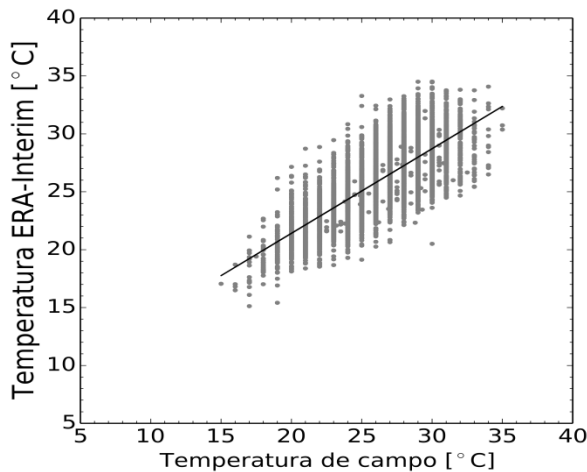
### 4.1. Ciudad del Carmen

Se analizó la evolución de la temperatura en el Observatorio Ciudad del Carmen a través de la comparación de datos de reanálisis con datos de campo. La **Figura 4.1** muestra la serie de datos ICML-31CDC superpuesta con la serie ERA-31CDC en el periodo 1984-2014.

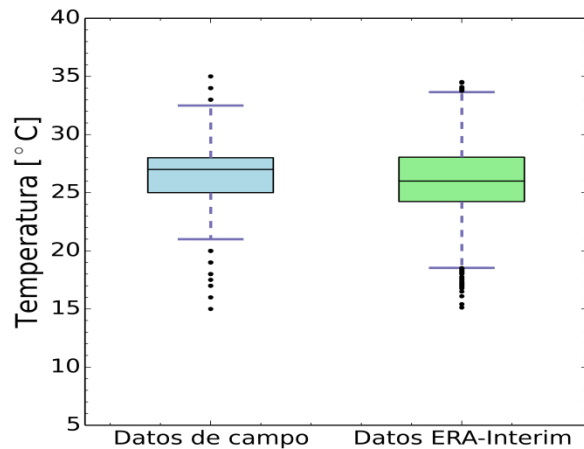


**Figura 4.1.** Comparación visual de la variación de la temperatura entre la serie de campo ICML-31CDC (azul) y la de reanálisis ERA-31CDC (verde) en Ciudad del Carmen. Se observa que la media de los datos de campo (26.36°C, línea punteada magenta) es ligeramente mayor que la del reanálisis (26.06°C, línea punteada negra).

La correlación entre dichas series (**Figura 4.2**) tiene un índice de Pearson de 0.73; por otra parte, la distribución de los datos parece diferir en cada conjunto (**Figura 4.3**). Los datos de campo muestran una frecuencia mayor de eventos de temperatura baja mientras que ERA-Interim sugiere una distribución homogénea de eventos cálidos y fríos. En ambas series se observan datos extremos, sin embargo, dichos extremos parecen ser más frecuentes en la serie del reanálisis.



**Figura 4.2.** Gráfica de correlación entre temperatura de campo y estimada por ERA-Interim para Ciudad del Carmen. El coeficiente de Pearson es de 0.73. La distribución de la nube de datos se debe a la resolución de 0.5°C en los datos de campo.



**Figura 4.3.** Gráfica de caja y bigotes de las series de datos de campo y estimados por Era-Interim para el Observatorio Ciudad del Carmen en el periodo 1984-2014.

En la serie de campo se observa una pendiente negativa de  $-0.074 \pm 0.003$  °C/año,  $p < 0.05$  (Figura 4.4); se considera que el carácter negativo de dicha pendiente indica un enfriamiento del Observatorio en el periodo analizado. Lo anterior se aprecia también en el decremento en la temperatura decadal (Tabla 4.1) de Ciudad del Carmen en los últimos 31 años.

	Periodo	Media
Observatorio Ciudad del Carmen	1984-1994	27.33°C
	1995-2004	25.96°C
	2005-2014	25.75°C

Tabla 4.1. Temperaturas medias decadales de los datos de campo en el Observatorio Ciudad del Carmen.

Por otro lado, en la serie del reanálisis no se detectó ninguna tendencia significativa (Figura 4.5). Por último, se encontraron diferencias significativas entre las medias de ambos conjuntos en la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney. Los resultados de la comparación entre las series ICML-31CDC y ERA-31CDC se pueden consultar en la Tabla 4.2.

	ICML-31CDC	ERA-31CDC
Media	26.36 °C	26.06 °C
Desviación estándar	2.75	2.73
Pendiente	$-0.074 \pm 0.003$ °C/año, $p < 0.05$	$-0.003 \pm 0.003$ °C/año, $p > 0.05$ , $p > 0.1$
Coefficiente de Pearson	0.73	

Tabla 4.2 Correlación de Pearson y regresión lineal para las series ICML-31CDC y ERA-31CDC en el Observatorio Ciudad del Carmen en el periodo 1984-2014. Los valores de p indican el nivel de significancia estadística a 5% ( $p < 0.05$ ) y 10% ( $p < 0.1$ ).

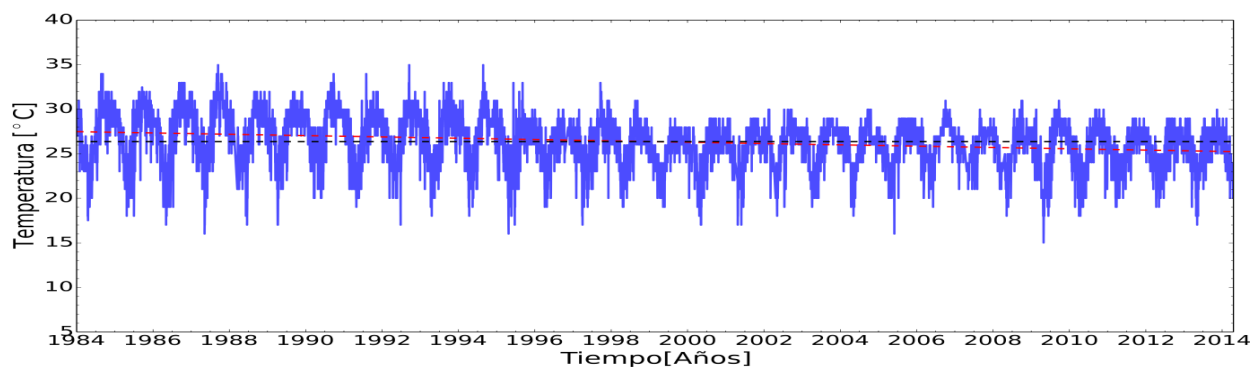


Figura 4.4. Variación de la temperatura reportada en la estación meteorológica "El Carmen", ICMyl. Se observa una media de 26.36°C (línea punteada negra) y una pendiente de la temperatura de  $-0.074 \pm 0.003$  °C/año,  $p < 0.05$  (línea punteada roja).

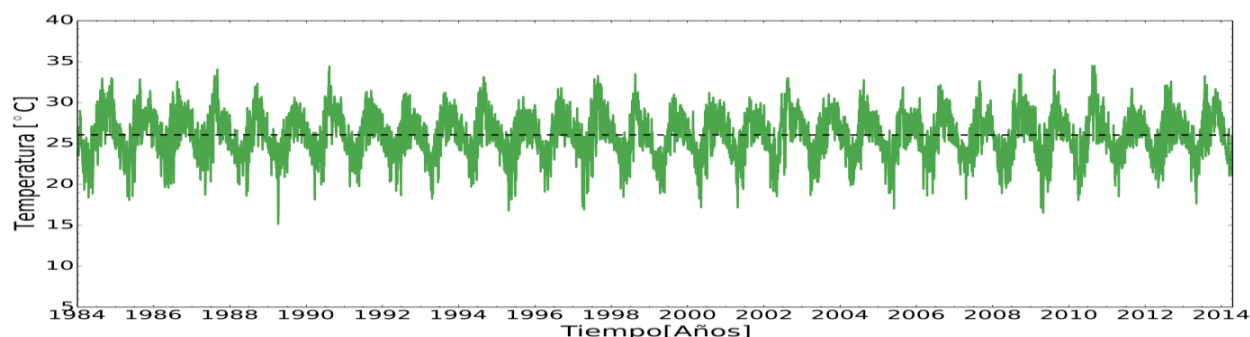
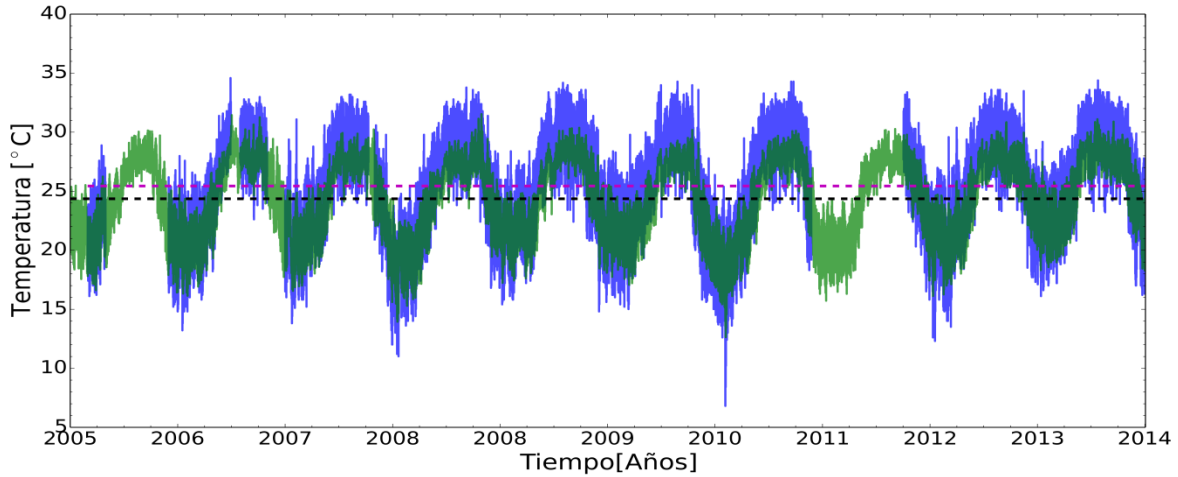


Figura 4.5. Variación de la temperatura estimada por ERA-Interim. Se observa una media (línea punteada negra) de 26.06°C. No se encontraron tendencias significativas en los datos.

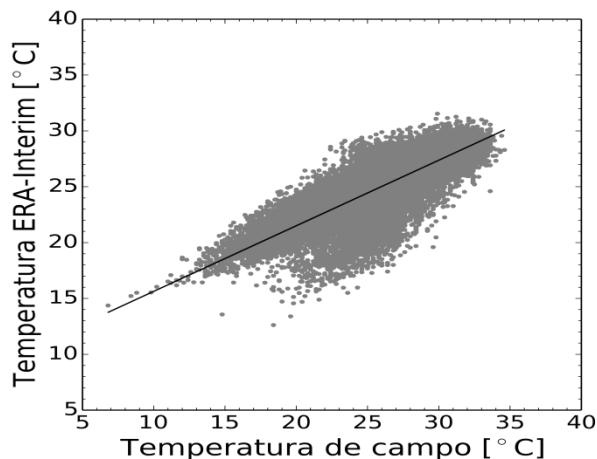
## 4.2. Mazatlán

Se analizó la evolución de la temperatura en el Observatorio Mazatlán a través de la comparación de datos de reanálisis con datos de campo. La **Figura 4.6** muestra la serie de datos CNA-10MZT superpuesta con la serie de reanálisis ERA-10MZT en el periodo 2005-2014.

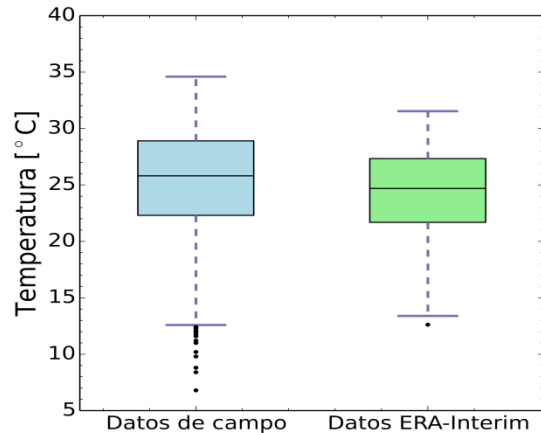


**Figura 4.6.** Comparación visual de la variación de la temperatura entre la serie de campo CNA-10MZT (azul) y la de reanálisis ERA-10MZT (verde) en Mazatlán en la década 2005-2014. Se observa que la media de los datos de campo (25.44°C, línea punteada magenta) es mayor que la del reanálisis (24.36°C, línea punteada negra).

La correlación entre dichas series tiene un coeficiente de Pearson de 0.80 (**Figura 4.7**); por otra parte, la distribución de los datos parece diferir en cada conjunto. Los eventos fríos muestran un intervalo mayor de variación que los cálidos tanto en la serie CNA como en la de reanálisis (**Figura 4.8**); por otro lado, los eventos extremos parecen diferir entre ambas series puesto que estos son menos frecuentes en el reanálisis.



**Figura 4.7.** Análisis de correlación entre la temperatura reportada por la CONAGUA y por ERA-Interim para el periodo 2005-2014 en Mazatlán. El coeficiente de Pearson es 0.80.



**Figura 4.8.** Gráfica de caja y bigotes de las series de datos cada 3 horas de CONAGUA y Era-Interim para el Observatorio Mazatlán en el periodo 2005-2014.

En la década 2005-2014 se observa una pendiente positiva de la recta ajustada tanto en la serie CNA como en la de reanálisis ERA (Tabla 4.3); se considera que lo anterior indica un calentamiento del Observatorio Mazatlán en el periodo analizado. A pesar de esta similitud, existen diferencias entre las pendientes ajustadas; CNA-10MZT arrojó una pendiente de  $0.23 \pm 0.01^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  mientras que ERA-10MZT una de  $0.125 \pm 0.006^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  (Tabla 4.3), una diferencia de aprox.  $0.11^\circ\text{C/año}$ .

	CNA-10MZT	ERA-10MZT
<b>Media</b>	25.44°C	24.36°C
<b>Desviación estándar</b>	4.31	3.30
<b>Pendiente</b>	$0.23 \pm 0.01^\circ\text{C/año}$ , $p < 0.05$	$0.125 \pm 0.006^\circ\text{C/año}$ , $p < 0.05$
<b>Coefficiente de Pearson</b>	0.80	

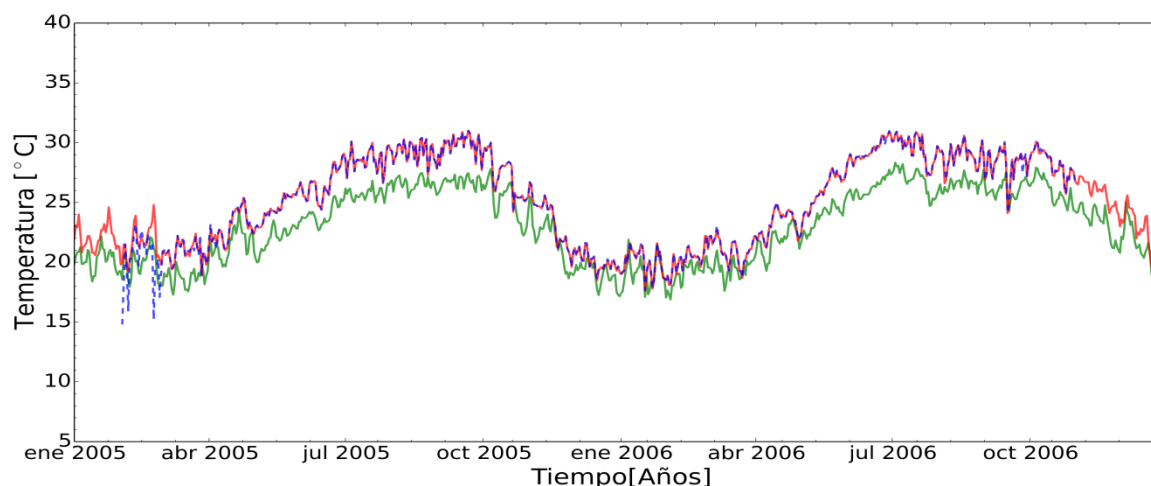
**Tabla 4.3. Correlación de Pearson y regresión lineal para las series CNA-10MZT y ERA-10MZT en el Observatorio Mazatlán en el periodo 2005-2014. Los valores de p indican el nivel de significancia estadística a 5% ( $p < 0.05$ ) y 10% ( $p < 0.1$ ).**

De manera similar al Observatorio Ciudad del Carmen, se encontraron diferencias significativas entre las medias de las series CNA y ERA en la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney para la década 2005-2014. En la Tabla 4.4 se pueden consultar los análisis realizados y las variables estadísticas para dicha década. En el Anexo B se encuentran las series CNA-10MZT y ERA-10MZT con sus respectivas regresiones.

Para los años 2005-2006 existen tres fuentes disponibles con información diaria: las series ICML-02MZT, CNA-02MZT y ERA-02MZT (Figura 4.9). Se puede observar que dichas series están altamente correlacionadas, siendo la mínima correlación entre dichas series de 0.96 y la máxima de 0.98 (Tabla 4.4).

	ICML-02MZT	CNA-02MZT	ERA-02MZT
<b>ICML-02MZT</b>	1	0.98	0.96
<b>CNA-02MZT</b>	0.98	1	0.96
<b>ERA-02MZT</b>	0.96	0.96	1

**Tabla 4.4 Índices de correlación entre las series ICML-02MZT, CNA-02MZT y ERA-02MZT para el periodo 2005-2006 en el Observatorio Mazatlán.**



**Figura 4.9. Comparación visual de la variación de la temperatura entre las series ICML-02MZT (rojo), CNA-02MZT (punteada azul) y la estimada ERA-02MZT (verde) en el periodo 2005-2006 en el Observatorio Mazatlán.**

Debido a que CONAGUA tiene registros de temperatura desde 1930 y ERA-Interim desde 1979, se analizaron dos periodos adicionales en el Observatorio Mazatlán: 1930-2014 y 1979-2014. En el primer y más largo periodo se observa una pendiente media anual de  $0.019 \pm 0.005$  °C,  $p < 0.05$  en la temperatura mensual reportada por CONAGUA (Figura 4.10). Lo anterior junto con el incremento observado en la temperatura media entre los periodos 1930-1999 y 2000-2014 (Tabla 4.5) sugiere nuevamente, un calentamiento en el Observatorio Mazatlán.

Observatorio Mazatlán	Periodo	Media
	Siglo XX, (1930-1999)	24.37°C
	Siglo XXI, (2000-2014)	25.07°C

Tabla 4.5. Temperaturas medias de los datos de la estación CONAGUA en Mazatlán para los periodos 1930-1960, 1961-1990 y 1991-2014.

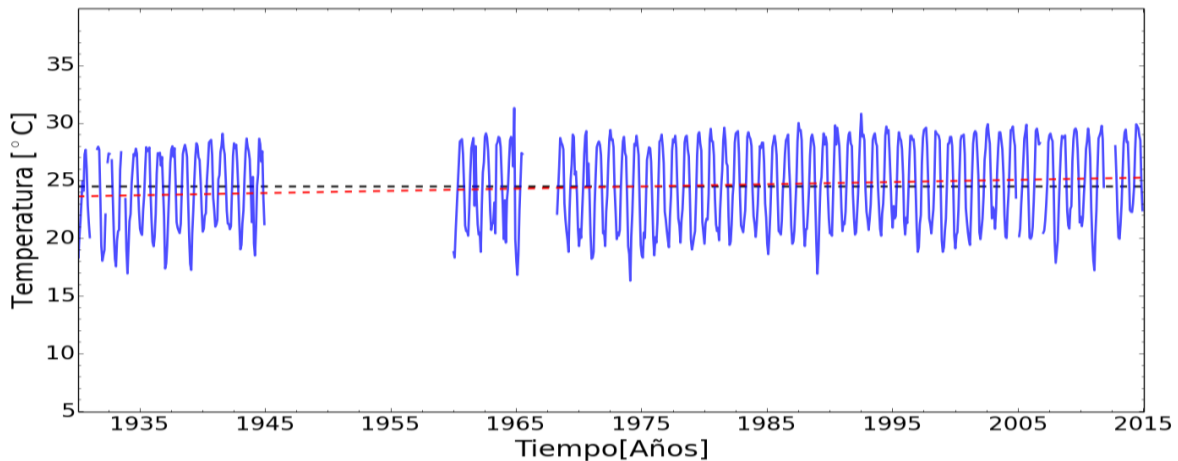


Figura 4.10. Variación de la temperatura reportada por CONAGUA en el Observatorio Mazatlán para el periodo 1930-2014. Se observa una media de 24.52°C (línea punteada negra) y una pendiente positiva de la recta ajustada a la temperatura con un valor de  $0.019 \pm 0.005$  °C/año,  $p < 0.05$  (línea punteada roja).

Con respecto al segundo periodo adicional, se cuenta con información mensual continua de las series CNA-36MZT y ERA-36MZT y con datos mensuales proporcionados por el ICMYL-Mazatlán para el lapso 2005-2006 (Figura 4.11).

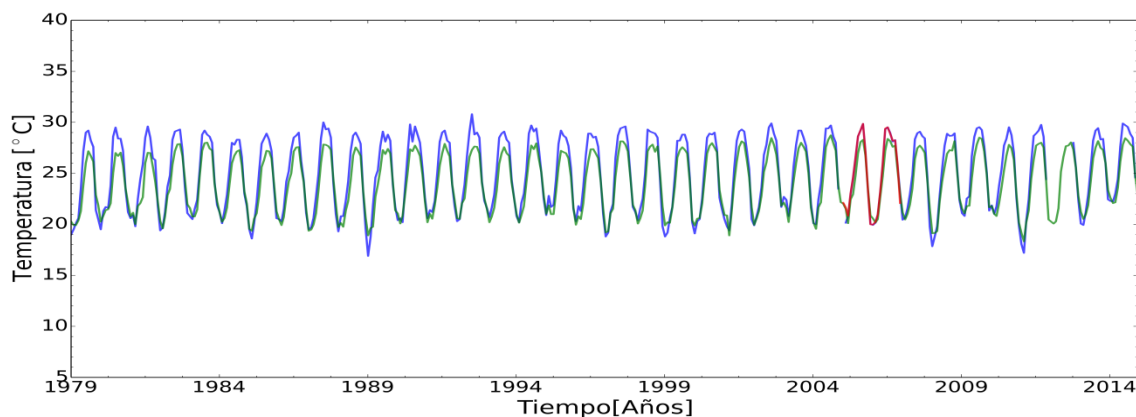
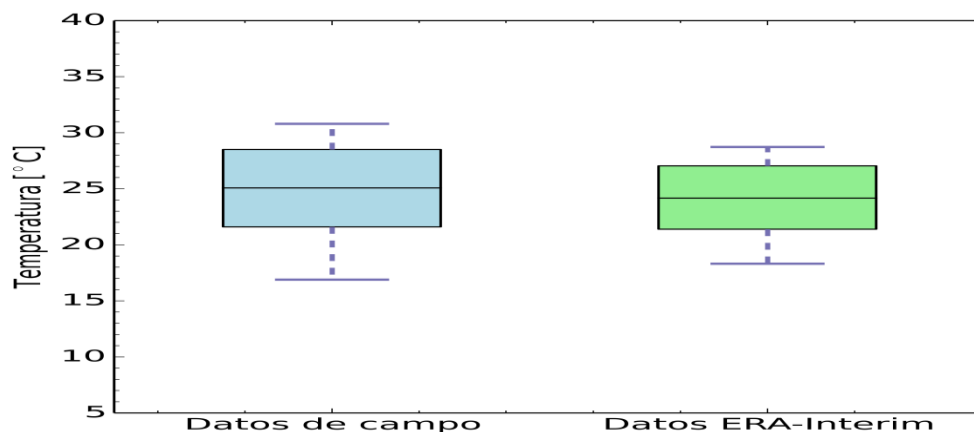


Figura 4.11. Comparación visual de la variación de la temperatura mensual entre las series ICML-02MZT (rojo), CNA-36MZT (punteada azul) y ERA-36MZT (verde) en el periodo 1979-2014 en el Observatorio Mazatlán.

La distribución de eventos cálidos y fríos en dicho periodo parece ser similar entre la serie CNA-36MZT y ERA-36MZT (**Figura 4.12**); sin embargo, la temperatura de ERA muestra un rango menor de variación que la temperatura medida por la CONAGUA.



**Figura 4.12. Grafica de caja y bigotes de las series de datos mensuales de CONAGUA y de Era-Interim para el Observatorio Mazatlán en el periodo 1979-2014.**

Con respecto a la variación de la temperatura en el segundo periodo adicional, se obtuvo que la recta ajustada a la serie ERA-36MZT tuvo una pendiente de  $0.030 \pm 0.013^{\circ}\text{C}$ ,  $p < 0.05$  mientras que la serie CNA-36MZT tuvo una pendiente de  $0.028 \pm 0.017^{\circ}\text{C}$ ,  $p < 0.1$  (**Tabla 4.6**). Este menor nivel de significancia en los datos de campo podría reflejar el mayor intervalo de variación que tienen los datos de campo en comparación con los de reanálisis (**Figura 4.12**). Lo anterior sugiere que tanto los datos de campo como los de reanálisis reportan un calentamiento de similar magnitud (pero de significancia diferente) en el Observatorio Mazatlán para el lapso 1979-2014.

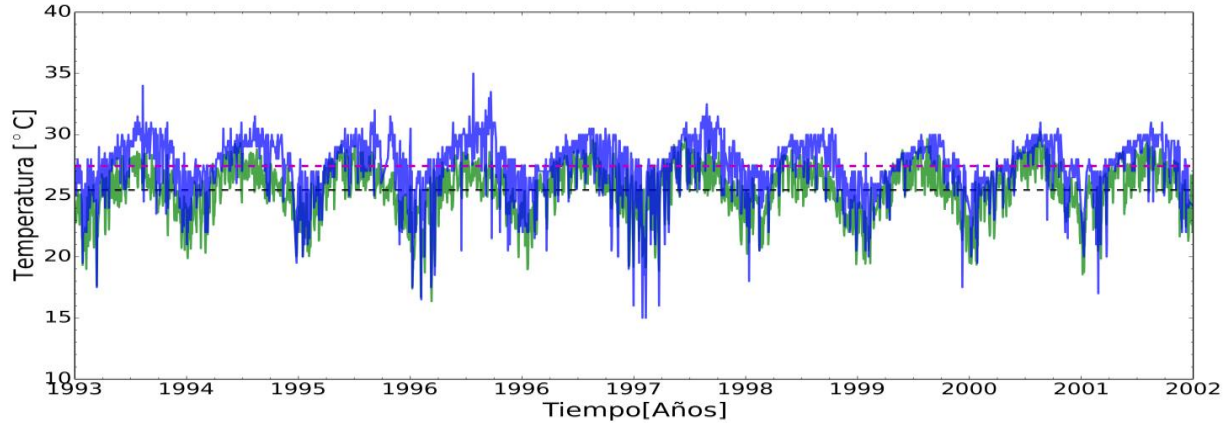
	CNA-85MZT	CNA-36MZT	ERA-36MZT
<b>Media</b>	24.52°C	24.91°C	24.08°C
<b>Desviación estándar</b>	3.56	3.57	2.90
<b>Pendiente</b>	$0.019 \pm 0.005^{\circ}\text{C/año}$ , $p < 0.05$	$0.028 \pm 0.017^{\circ}\text{C/año}$ , $p > 0.05$ , $p < 0.1$	$0.030 \pm 0.013^{\circ}\text{C/año}$ , $p < 0.05$

**Tabla 4.6. Regresión lineal, media y desviación estándar para la serie CNA-85MZT en el periodo 1930-2014 y para las series CNA-36MZT y ERA-36MZT en el periodo 1979-2014 en el Observatorio Mazatlán. Los valores de p indican el nivel de significancia estadística a 5% ( $p < 0.05$ ) y 10% ( $p < 0.1$ ).**

Por último, se encontraron diferencias significativas entre las medias de las series CNA y ERA en la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney para el periodo 1979-2014. En la **Tabla 4.6** se encuentran los análisis realizados y las variables estadísticas para los periodos adicionales 1930-2014 y 1979-2014. En el **Anexo B** se pueden consultar las series de datos CNA-36MZT y ERA-36MZT con sus respectivas regresiones.

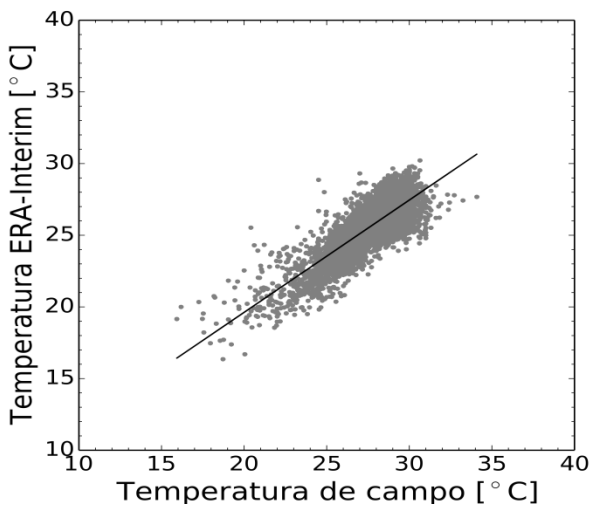
### 4.3. Puerto Morelos

El análisis de la temperatura en el Observatorio Puerto Morelos se realizó a través de la comparación de datos de campo y datos de reanálisis. La **Figura 4.13** muestra la serie de datos ICML-10PM superpuesta con la serie ERA-10PM en la década 1993-2002.

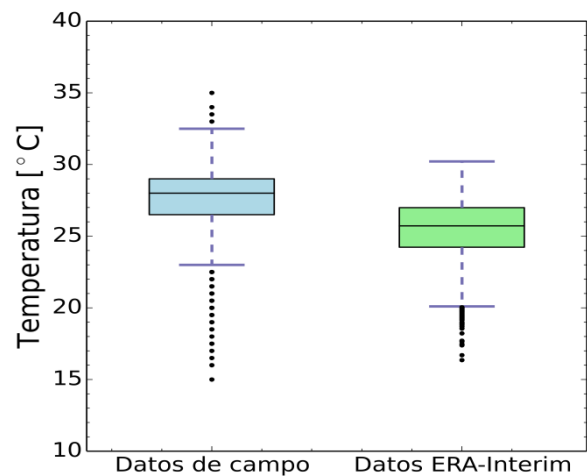


**Figura 4.13. Comparación visual de la variación de la temperatura entre la serie ICML-10PM (azul) y ERA-10PM (verde) en Puerto Morelos para el periodo 1993-2002. Se observa que la media de los datos de campo (27.49°C, línea punteada magenta) es mayor que la del reanálisis (25.45°C, línea punteada negra).**

La correlación entre dichas series tiene un coeficiente de Pearson de 0.81 (**Figura 4.14**); por otra parte, la distribución de los datos parece diferir en cada conjunto. Los eventos fríos muestran un rango mayor de variación en la serie del reanálisis que en la serie de campo; otra diferencia es que el reanálisis reporta solamente eventos extremos a bajas temperaturas mientras que en la serie de campo existen eventos extremos tanto en bajas como en altas temperaturas (**Figura 4.15**).

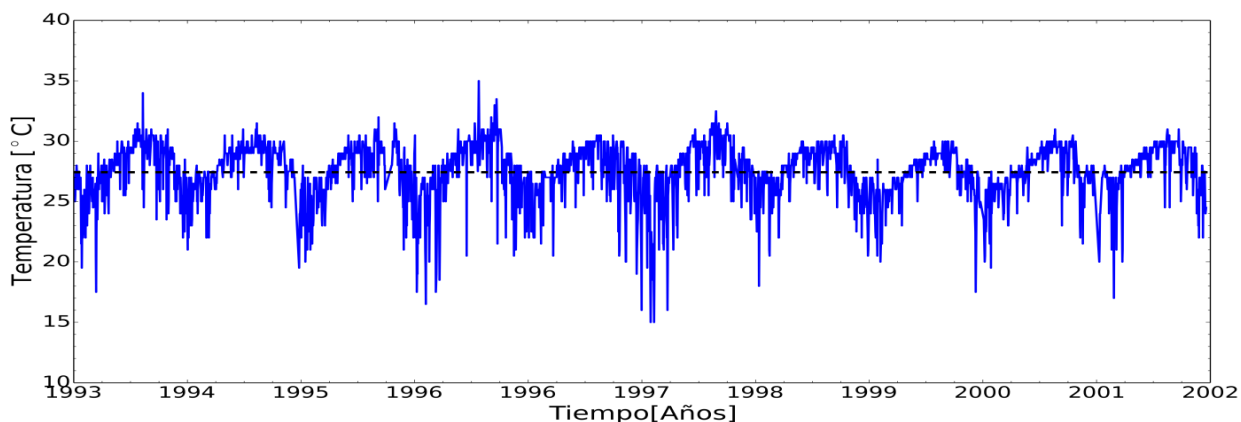


**Figura 4.14. Análisis de correlación entre la temperatura reportada por el ICMYL y por ERA-Interim para el periodo 1993-2002 en Puerto Morelos. El coeficiente de Pearson es 0.81.**

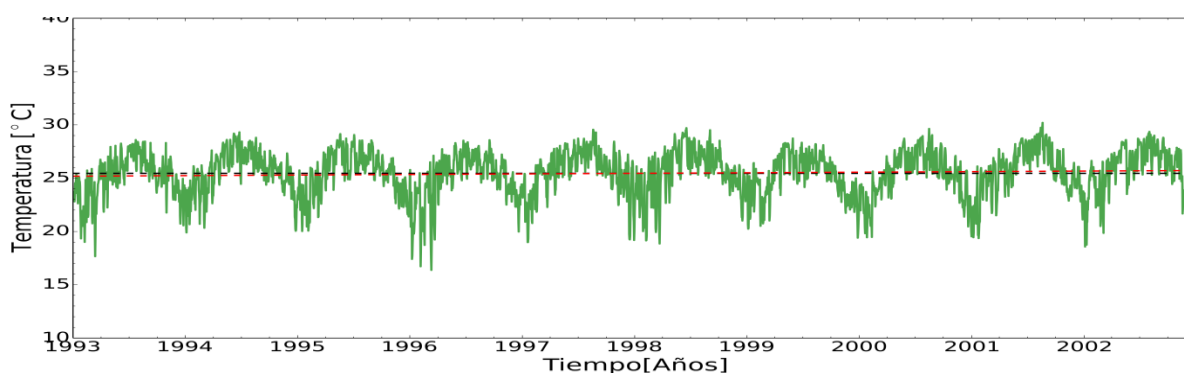


**Figura 4.15. Grafica de caja y bigotes de las series de datos mensuales del ICMYL y Era-Interim para el Observatorio Puerto Morelos en el periodo 1993-2002.**

En cuanto a la variación de la temperatura en el periodo 1993-2002, no se detectaron tendencias significativas en la serie ICML-10PM (Figura 4.16), mientras que en la serie ERA-10PM la pendiente resultó ser positiva con un valor de  $0.053 \pm 0.012^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  (Figura 4.17).



**Figura 4.16. Variación de la temperatura reportada en la estación Puerto Morelos, ICMyL en el periodo 1993-2002.** Se observa una media de  $27.49^\circ\text{C}$  (línea punteada negra). No se detectó ninguna tendencia en los datos.



**Figura 4.17. Variación de la temperatura estimada por ERA-Interim en el periodo 1993-2002.** Se observa una media (línea punteada negra) de  $25.45^\circ\text{C}$  y una pendiente positiva de la temperatura de  $0.053 \pm 0.012^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  (línea punteada roja).

De manera similar a los dos Observatorios anteriores, se encontraron diferencias significativas entre las medias de la serie real y de reanálisis en la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney en la década analizada. En la **Tabla 4.7** se pueden consultar los valores de las variables estadísticas y análisis realizados en este trabajo para el Observatorio Puerto Morelos.

	ICML-10PM	ERA-10PM
<b>Media</b>	27.49°C	25.45°C
<b>Desviación estándar</b>	2.33	2.10
<b>Pendiente</b>	$0.000 \pm 0.014^\circ\text{C/año}$ , $p > 0.05$ , $p > 0.1$	$0.053 \pm 0.012^\circ\text{C/año}$ , $p < 0.05$
<b>Coefficiente de Pearson</b>	0.81	

**Tabla 4.7 Resultados del análisis de correlación de Pearson y regresión lineal para la serie ICML-10PM y ERA-10PM para la década 1993-2002 en el Observatorio Puerto Morelos.** Los valores de  $p$  indican el nivel de significancia estadística a 5% ( $p < 0.05$ ) y 10% ( $p < 0.1$ ).



#### **4.4. Utilidad de los programas generados**

Además de los análisis realizados, en el presente trabajo se desarrollaron herramientas computacionales de manejo y procesamiento de datos. Como resultado de utilizar dichas herramientas se obtuvieron principalmente dos beneficios.

La primera ventaja consistió en la obtención automatizada de los datos de ERA-Interim; esto disminuyó el tiempo de trabajo y permitió que la información de dicho reanálisis fuese más accesible. Lo anterior facilitó la recopilación de magnitudes atmosféricas básicas para la base de datos del proyecto “Observatorios del Cambio Climático”.

Por otra parte, la segunda ventaja consistió en que los programas complementarios agilizaron la visualización, procesamiento y análisis de los datos del reanálisis ERA-Interim. Debido a que dichos programas permiten elegir la frecuencia con la que se calcula el promedio en los datos, la comparación entre las series de campo y de reanálisis se simplificó al ajustar la frecuencia de muestreo del reanálisis a la de los datos de campo.

## 5. Discusión

El Cambio Global (CG) impactará de manera distinta a las diversas regiones del planeta. Esta afectación desigual se debe a que los efectos del CG se pueden ver aumentados o disminuidos por las características de cada área. Las zonas costeras, por su dinámica natural y poblacional, potencian los cambios inducidos por el humano y en consecuencia, se encuentran particularmente vulnerables (Nicholls et al. 2007).

El incremento promedio de 0.6°C en la temperatura superficial global desde 1950 (Knutson et al. 2013, Bindoff et al. 2013) es uno de los factores que afectan actualmente a los ecosistemas costeros. Dicho incremento ha cambiado la distribución de las especies marinas (Pörtner et al. 2014) y afectado a los arrecifes coralinos (Hoegh-Guldberg et al. 2007).

A pesar de que se conozca el incremento de temperatura promedio del planeta, es necesaria la observación y el monitoreo local del medio ambiente para poder implementar planes de manejo eficientes y conocer la respuesta de los ecosistemas a estos impactos (Jones et al. 2014). En México, dicha observación y monitoreo son insuficientes lo que obstaculiza el entendimiento del CG y dificulta la adaptación y mitigación del mismo.

Ante la falta de información climática general, han surgido herramientas como los reanálisis atmosféricos que abordan sistemáticamente la generación de datos meteorológicos. La información de dichos reanálisis puede auxiliar en el monitoreo y evaluación del clima y su evolución (Huang et al. 2016, Willett et al., 2010). Sin embargo, reconocer las limitaciones de los productos de reanálisis ha permitido tanto el uso de técnicas de corrección de sesgos (Qian et al. 2006), como el uso conjunto de observaciones directas y reanálisis (Simmons et al., 2010) que aumentan la calidad de los datos para su posterior uso en modelos de superficie terrestre.

Con el objetivo tanto de mejorar el entendimiento de las zonas costeras de México, como de evaluar el producto de temperatura del reanálisis ERA-Interim en dichas regiones, el presente trabajo analiza los posibles cambios de temperatura del aire en Ciudad del Carmen, Mazatlán y Puerto Morelos a través de la comparación de datos de campo con datos de ERA-Interim. Los resultados de dichas comparaciones (Figura 4.1, Figura 4.6 y Figura 4.13) indican que, a pesar de que los datos del reanálisis parecen simular correctamente la variación y el comportamiento de los mínimos estacionales de temperatura, los valores máximos presentan diferencias. Dichas diferencias podrían contribuir a que las temperaturas medias del reanálisis sean menores que las reportadas en los datos de campo (Tabla 5.1). A continuación, se analizan los resultados de la comparación y las proyecciones climáticas existentes para cada uno de los observatorios.

### 5.1. Observatorio Ciudad del Carmen

El análisis de temperatura para el Observatorio Ciudad del Carmen parece indicar que existe un enfriamiento en esta zona (Tabla 5.1, Tabla 4.1). Un enfriamiento menor también es reportado

por el Instituto Nacional de Ecología (INE 2016a) para el periodo analizado junto con un aumento en la precipitación para el estado de Campeche.

Observatorio	Serie	Media	Desviación estándar	Pendiente	Correlación de Pearson
Cd. Carmen	ICML-31CDC	26.36 °C	2.75	-0.074± 0.003 °C/año, p<0.05	0.73
	ERA-31CDC	26.06 °C	2.73	-0.003 ±0.003 °C/año p>0.05, p>0.1	
Mazatlán	CNA-85MZT	24.52°C	3.56	0.019±0.005 °C /año, p<0.05	----
	CNA-36MZT	24.91°C	3.57	0.028±0.017°C/año, p>0.05, p<0.1	----
	ERA-36MZT	24.08°C	2.90	0.030±0.013°C/año, p<0.05	----
	CNA-10MZT	25.44°C	4.31	0.23 ± 0.01°C/año, p<0.05	0.80
	ERA-10MZT	24.36°C	3.30	0.125± 0.006°C/año, p<0.05	
Puerto Morelos	ICML-10PM	27.49°C	2.33	0.000±0.014°C/año, p>0.05, p>0.1	0.81
	ERA-10PM	25.45°C	2.10	0.053±0.012°C/año, p<0.05	

**Tabla 5.1 Principales resultados generados para cada Observatorio.**

Aparentemente, dicho enfriamiento ocurrió a una mayor velocidad en las primeras dos décadas de los 31 años observados (Tabla 4.1). Sin embargo, la gran diferencia observada entre las primeras décadas probablemente se deba a la baja resolución de las observaciones históricas. Por esta razón, el enfriamiento detectado en este trabajo debe tomarse sólo como un indicador aproximado de la evolución climática en Ciudad del Carmen.

Por otra parte, se puede apreciar una disminución en el valor de los máximos de temperatura a lo largo del periodo analizado (Figura 4.4). Una disminución similar en el valor de los máximos se ha registrado con anterioridad en zonas al norte del Golfo (Plantico et al. 1990, Lettenmaier et al. 1994, Twilley et al. 2001) y, en conjunto con un incremento menor en el valor de los mínimos, resultó en una disminución del intervalo de temperatura. Dicha disminución mostró correlación en el norte del Golfo con un incremento en la nubosidad de la región (Plantico et al. 1990, Karl et al. 1993). De manera similar, en diversas zonas del globo donde se reportó una disminución en el intervalo de temperatura durante la segunda mitad del siglo XX se ha correlacionado un incremento en la nubosidad (Karl et al. 1993).

Por lo anterior, se propone que la disminución en el valor de los máximos de temperatura y el enfriamiento detectado en Ciudad del Carmen podrían ser una respuesta a un posible incremento en la nubosidad y precipitación de la región (se recomienda realizar futuros estudios en este tema).

Por último, debido a que en el Observatorio Ciudad del Carmen el máximo de temperatura resultó ser crucial en el estudio del sitio, se sugiere que la diferencia entre la tendencia de los datos de campo y de reanálisis (**Tabla 5.1**) se debe a que los máximos de temperatura estimados por ERA-Interim presenta diferencias con los de la estación meteorológica. Lo anterior, aunado con la baja resolución de los datos de campo, podría explicar también que en Ciudad del Carmen la correlación entre los datos de campo y de reanálisis fue la más baja registrada entre los sitios analizados (**Tabla 5.1**).

### ***Proyecciones climáticas para el Golfo de México***

Debido a que las actividades humanas están creando condiciones únicas tanto en la atmósfera como en el océano, el entendimiento de climas futuros no puede simplificarse con una extensión de tendencias recientes o analizando tendencias pasadas (**Mulholland, 1997**). Por la razón anterior, es necesario el uso de modelos para entender la posible evolución del sistema climático.

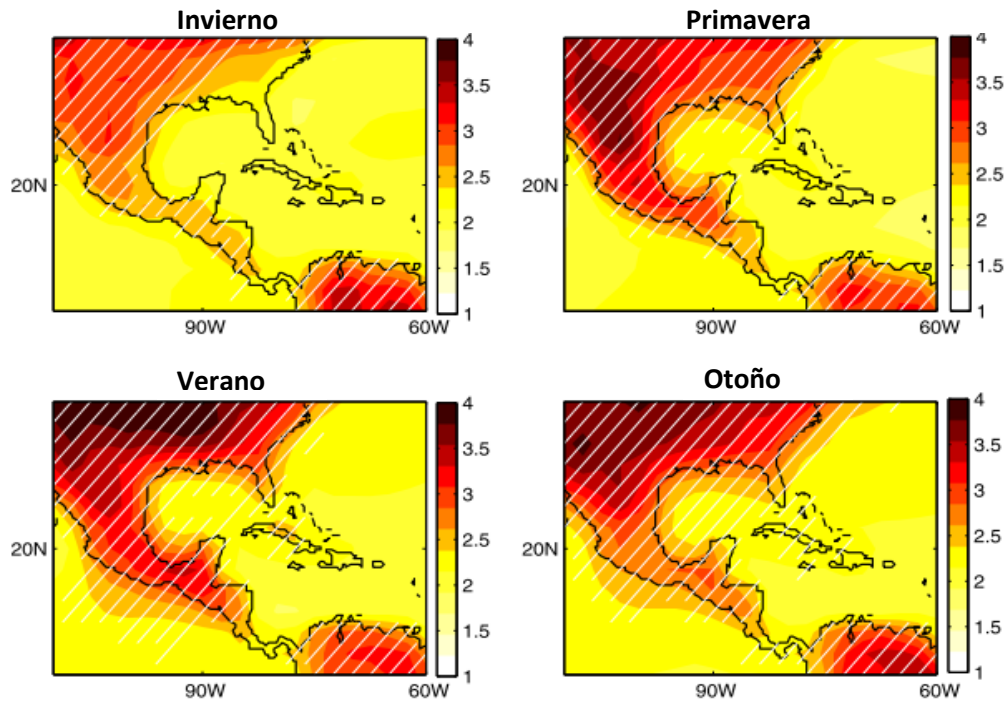
El Tercer Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3 por sus siglas en inglés; **Meehl et al. 2007**) hecho para el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4 por sus siglas en inglés; **IPCC 2007**) es el conjunto de modelos climáticos globales que ofrecen la mejor base científica que tenemos para hacer proyecciones detalladas de cómo el clima podría cambiar en cada región (**Biasutti et al. 2012**). **Biasutti et al. (2012)** hacen una revisión de las proyecciones del AR4 para la región del Golfo de México y el Caribe. Bajo un escenario de mitigación y emisión de GEI intermedio-alto (denominado A1B), el 75% de los modelos proyectan un calentamiento mayor a 2°C y una disminución en la precipitación en el Golfo para el 2099 (**Figura 5.1** y **Figura 5.2**, **Biasutti 2012**). Debido a la incertidumbre que existe en los modelos que representan al sistema climático, lo anterior no debe ser interpretado como una predicción, sino como una aproximación general a los cambios que probablemente ocurran bajo diferentes escenarios de Cambio Climático.

En cuanto al Observatorio Ciudad del Carmen, la zona analizada parece no reflejar aún el calentamiento proyectado por el IPCC. Sin embargo, el enfriamiento detectado parece disminuir en las últimas dos décadas analizadas (**Tabla 4.1**). Se sugiere que esto podría deberse simplemente a la variabilidad natural del sistema, o podría reflejar una transición hacia un periodo más cálido. Independientemente de la causa de dicha disminución, el INE (**2016a**) proyecta que el cambio hacia temperaturas más cálidas y menor precipitación inicie pronto en el estado de Campeche.

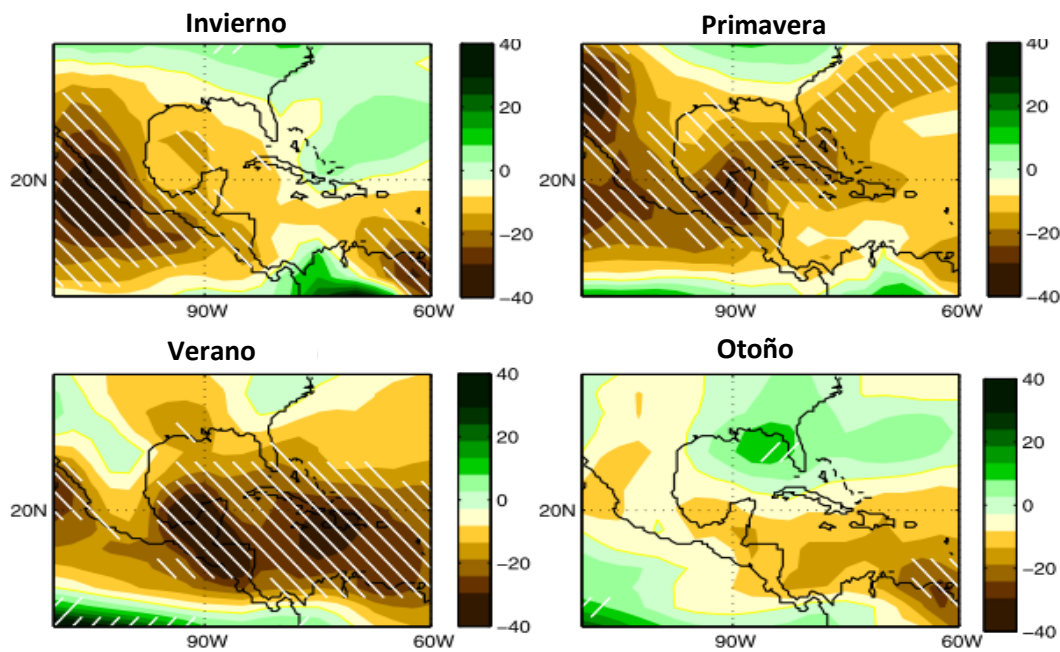
## **5.2. Observatorio Mazatlán**

El análisis de temperatura para el Observatorio Mazatlán parece indicar que existe un calentamiento en esta zona (**Tabla 5.1**, **Tabla 4.5**). Tanto el reanálisis como los datos de campo sugieren que dicho calentamiento ha aumentado en Mazatlán en épocas recientes. Esto es debido a que las pendientes calculadas para las series CNA-36MZT y ERA-36MZT son de  $0.028 \pm 0.017^\circ\text{C/año}$  y  $0.030 \pm 0.013^\circ\text{C/año}$  respectivamente, mientras que las de las series CNA-10MZT y ERA-10MZT –que contienen datos solamente de la última década– son un orden de

magnitud mayor (Tabla 5.1). En otras palabras, las pendientes calculadas para el periodo 1979-2014 son menores que las de la última década, lo que evidencia una mayor tasa de calentamiento en los últimos años.



**Figura 5.1** Media multi-modelo de las anomalías de temperatura (°C) estacionales bajo un escenario de altas emisiones (A1B) para el periodo 2075-2099 con respecto al periodo 1975-1999. El área rayada indica regiones donde el 75% de los modelos coincide con un calentamiento superior a 2°C (Biasutti et al. 2012)



**Figura 5.2.** Media multi-modelo de las anomalías de precipitación (%) estacionales bajo un escenario de altas emisiones (A1B) para el periodo 2075-2099 con respecto al periodo 1975-1999. El área rayada indica regiones donde el 75% de los modelos coincide con el signo de las anomalías (Biasutti et al. 2012).

Este incremento reciente de la temperatura en Mazatlán podría intensificar otras fuentes de calor en la región (como la planta termoeléctrica en el Estero de Urias, [Cardoso-Mohedano et al. 2015b](#)), que a su vez impactaría en la economía de la zona al verse afectado el crecimiento y desarrollo piscícola.

Por otra parte, se observa que el reanálisis ERA-Interim en general aproxima bien la temperatura de campo en Mazatlán. Lo anterior se observa en las correlaciones altas entre reanálisis y campo del periodo 2005-2006 ([Figura 4.9, Tabla 4.4](#)), en la temperatura mensual y en las pendientes ajustadas al periodo 1979-2014 ([Figura 4.11 y Tabla 5.1](#) respectivamente). Por otra parte, se puede apreciar una alta correlación entre la estación meteorológica del ICMYL y la de CONAGUA ([Tabla 4.4](#)). Lo anterior muestra que los datos de campo utilizados en este Observatorio fueron de calidad.

Como se mencionó anteriormente, el valor máximo de temperatura estimado por el reanálisis presenta diferencias con el meteorológico; en el Observatorio Mazatlán, esta diferencia es de alrededor de 2°C ([Figura 4.11](#)). Se observa que la máxima diferencia entre los datos ERA-Interim y los meteorológicos ocurre entre mayo y septiembre ([Figura 4.9, Figura 4.11](#)) por lo que se infiere que el reanálisis estima veranos menos cálidos.

### ***Proyecciones climáticas para el Noroeste de México***

Son pocas las proyecciones climáticas en las que se incluya la ciudad de Mazatlán. La mayor parte de los trabajos realizados sobre la región difieren en los cambios estimados de temperatura y precipitación ([Flores-Campaña, 2012](#)).

Para el año 2020, el INE ([2016b](#)) establece para Sinaloa un incremento de temperatura de entre 0.5°C y 1.0°C y una variación de temperatura de +10% a -10% para el año 2020 con respecto al periodo 1900-1999. El incremento observado en el Observatorio Mazatlán entre el periodo 1930-1999 y el periodo 2000-2014 en los datos de campo es de 0.7°C ([tabla 4.5](#)), lo que parece concordar hasta el momento con las proyecciones estimadas por el INE en Sinaloa.

Con respecto a las proyecciones a largo plazo, Gay-García et al. ([2008](#)) estiman un incremento de alrededor de 0.5°C y una reducción hasta del 25% en la precipitación anual para el 2030 en la región. Por otro lado, el INE ([2016b](#)) estima un cambio de entre 2°C y 4°C para la temperatura y una disminución entre 5% y 30% para la lluvia en el 2080.

### **5.3. Observatorio Puerto Morelos**

El análisis de temperatura en el Observatorio Puerto Morelos parece indicar que no existe una tendencia significativa en los datos de campo ([Tabla 5.1, Tabla 4.7](#)). Esto último parece apoyar lo reportado por Rodríguez-Martínez et al. ([2010](#)), trabajo en el cual no se detectan cambios significativos en la temperatura del aire en Puerto Morelos.

Por otra parte, un calentamiento similar al estimado por el reanálisis ([Tabla 5.1](#)) es reportado por el INE ([2016c](#)) para el estado de Quintana Roo en el periodo analizado. Sin embargo,

observamos una gran diferencia entre los datos de campo y reanálisis; las medias calculadas difieren casi 2°C entre las series ICML-10PM y ERA-10PM y las pendientes ajustadas difieren en significancia (**Tabla 5.1**). A pesar de estas diferencias, los datos de reanálisis y de campo están altamente correlacionados. Nuevamente, se sugiere que esta correlación refleja la buena modelación de la variación estacional de la temperatura en el Observatorio.

### ***Proyecciones climáticas para el Caribe***

La mitad de los modelos usados por el IPCC concuerdan que el calentamiento en la región se encontrará en un rango de entre 2.6 °C y 3.6°C para el periodo 2080-2099 con respecto al periodo 1980-1999 (**Christensen et al. 2007**). En cuanto a la precipitación, se proyecta una variación media de entre -48 a 9% con la mitad de los modelos concordando en un decremento de entre -16 a -5% (**Christensen et al. 2007**).

**Biasutti et al. (2012)** discuten las proyecciones anteriores y sus implicaciones para la experiencia humana. Concluyen que a pesar de que la región ya es cálida, a finales del siglo XXI será más caliente que lo que hayamos experimentado con anterioridad (**Figura 5.1**). En cuanto a la precipitación, la reducción proyectada no se saldrá del intervalo de valores que hemos vivido en el pasado (**Figura 5.2, Biasutti et al. 2012**).

Por otra parte, el INE (**2016c**) proyecta para el estado de Quintana Roo un elevado calentamiento a finales de siglo. Sin embargo, los datos de campo del Observatorio Puerto Morelos parecen no reflejar aún el calentamiento proyectado por el IPCC ni por el INE. Lo anterior sugiere que la temperatura podría no ser un parámetro sensible al Cambio Climático en Puerto Morelos.

## 6. Conclusiones

Se analizaron los cambios de temperatura del aire en Ciudad del Carmen, Mazatlán y Puerto Morelos a través de la comparación de datos del reanálisis atmosférico ERA-Interim con datos de estaciones meteorológicas. Para facilitar lo anterior se desarrollaron programas de descarga automática de datos y de cálculo de promedios. Ya que el uso de dichos programas disminuyó y agilizó el tiempo de trabajo, se propone que estos sean utilizados como una herramienta futura para optimizar la consulta y el análisis de la información de ERA-Interim. El código desarrollado en el presente trabajo se encuentra disponible de forma abierta en la plataforma virtual Github (consúltese: <https://github.com/eduardogomezdelapena/automatic-EraInterim>).

En cuanto a la comparación del reanálisis con las estaciones meteorológicas, se concluye que los datos de ERA-Interim representan adecuadamente las variaciones estacionales y el comportamiento de los mínimos de temperatura observados en campo. Sin embargo, los máximos de temperatura calculados por el reanálisis presentaron diferencias, por lo que se sugiere tomar en cuenta este comportamiento para evaluar las variaciones locales de temperatura. Lo anterior podría explicar que las temperaturas promedio estimadas por ERA-Interim sean menores a las observadas en campo.

En el caso de Ciudad del Carmen, el enfriamiento detectado parecer ser causado por una disminución en el valor de los máximos de temperatura, esto a su vez podría ser una respuesta al cambio en la nubosidad y precipitación de la región. Sin embargo, debido a la baja resolución de los datos meteorológicos, el enfriamiento detectado debe tomarse sólo como un indicador aproximado de la evolución climática en Ciudad del Carmen. Se concluye que la zona analizada parece no reflejar aún el calentamiento proyectado para la región, sin embargo, se observó una disminución reciente en el enfriamiento observado. Dicha disminución podría ser parte de la variabilidad del sistema, o bien, una transición hacia un periodo mas cálido. Por otra parte, debido a que los máximos de temperatura resultaron ser cruciales en el estudio de Ciudad del Carmen, se sugiere que la capacidad limitada de ERA-Interim para reproducir dichos máximos podría ser la principal causa de la diferencia entre las pendientes de los datos de campo y los de reanálisis en el sitio analizado.

Con respecto al Observatorio Mazatlán, se detectó un calentamiento en los datos meteorológicos que coincide con las tendencias climáticas proyectadas por el Instituto Nacional de Ecología. Debido a que las pendientes calculadas para el periodo 1979-2014 son menores que las de la última década tanto en los datos de reanálisis como en los de campo, se sugiere que el calentamiento en Mazatlán ha aumentado en años recientes. Lo anterior, junto con otras presiones existentes en la zona, podría afectar a la biota local en un futuro cercano. Por otra parte, a pesar de que el reanálisis estima veranos menos cálidos, se concluye que ERA-Interim en general aproxima bien el comportamiento estacional de la temperatura observada en Mazatlán debido a que tanto el reanálisis como los datos meteorológicos reportan un calentamiento y una variación estacional similares en el periodo 1979-2014. Por lo anterior, se sugiere el uso del reanálisis ERA-Interim en futuros modelos regionales de la zona.



En el Observatorio Puerto Morelos el análisis de temperatura parece indicar que no existe una tendencia significativa en los datos de campo. En contraste, los datos ERA-Interim sugieren un calentamiento similar al reportado por el Instituto Nacional de Ecología para el estado de Quintana Roo. De los tres sitios estudiados este fue el de la más baja disponibilidad de datos de campo (diez años) y el de mayores diferencias entre las medias y pendientes calculadas a las series de campo y reanálisis. Por lo anterior se concluye que los datos de campo del Observatorio Puerto Morelos parecen no reflejar aún el calentamiento proyectado por el INE ni por el IPCC. Se sugiere que lo anterior podría indicar que la temperatura del aire podría no ser un parámetro sensible al Cambio Climático en Puerto Morelos.

Si bien los datos de ERA-Interim son de ayuda para estudiar ciertos aspectos de la evolución de la temperatura en los Observatorios, es imperante el monitoreo directo y continuo de los sitios para mejorar e implementar modelos regionales sobre cada zona y así poder evaluar las posibles implicaciones del Cambio Climático a detalle sobre cada región. Dado que cada Observatorio se encuentra inmerso en una región de gran importancia ecológica, las diferentes tendencias detectadas demandan la elaboración de políticas públicas específicas en cada zona para lograr una efectiva adaptación y mitigación del Cambio Climático en las comunidades costeras de México.

## Referencias

- Alvarez-León, R., 1977. Estudio hidrobiológico de los esteros del Astillero, Urias y La Sirena adyacentes a Mazatlán, Sinaloa, México. Tesis de Maestría, Centro Ciencias del Mar y Limnología. Univ. Nal. Autón. México. , 131 pp.
- Biasutti M., Sobel A. , Camargo S., Creyts T., 2012. Projected changes in the physical climate of the Gulf Coast and Caribbean [Cambios proyectados en el clima de la Costa del Golfo y el Caribe]. *Climatic Change* 112:819-845.
- Bindoff, N., Stott P., AchutaRao K., Allen R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X, 2013. Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional [Detección y Atribuciones del Cambio Climático: desde una perspectiva Global a una Regional]. En *Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 869-928 pp.
- Carabias-Lillo, J., Provencio E., de-la-Maza-Elvira, J., Guitiérrez-Carbonell, D. y Gómez-Cruz, M. , 2000. Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Instituto Nacional de Ecología, 224 pp.
- Cardoso-Mohedano, J. Bernardello R., Sanchez-Cabeza J.A., Molino-Minero-Re E. , Ruiz-Fernández A., Cruzado A., 2015a. Accumulation of conservative substances in a sub-tropical coastal lagoon [Acumulación de sustancias conservativas en una laguna costera subtropical]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* ,164, 1-9.
- Cardoso-Mohedano, Bernardello R., Sanchez-Cabeza J.A., Ruiz-Fernández, Alonso-Rodriguez R. Cruzado A., J. et al., 2015b. Thermal Impact from a Thermolectric Power Plant on a Tropical Coastal Lagoon [Impacto térmico de una planta termoeléctrica en una laguna costera tropical]. *Water Air Soil Pollut* 226,2202.
- Carvajal, R., 1973. Condiciones ambientales y productividad en la laguna de Términos, Campeche, México. *Laguna*, 31, 35-38.
- Christensen J.H., 2007. Regional climate projections [Proyecciones regionales climáticas]. En *Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC*. En: Solomon et al. Cambridge University Press, Cambridge.
- Church, J., Clark P., Cazenave A., Gregory J., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M., Milne G., Nerem R., Nunn P., Payne A., Pfeffer W., Stammer D. , Unnikrishnan A., 2013. Sea Level Change [Cambio en el Nivel del Mar]. En *Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 1139-1177 pp.

- CICC (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático), 2012. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 399 pp.
- CIMARES (Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas), 2012. Política Nacional de Mares y Costas de México, Gestión Integral de las Regiones más Dinámicas del Territorio Nacional. 65 pp.
- Collins, M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J., Fichet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A., Wehner, M. et al., 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility [Cambio Climático a Largo plazo: Proyecciones, Compromisos e Irreversibilidad]. En Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 1535 pp.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), 2016. Humedales de México, sitios RAMSAR. Recuperado el 19 de enero de 2016 del sitio web: <http://ramsar.conanp.gob.mx/lsr.php>
- CONAPO (Consejo Nacional de Población), 2006. Tomo II Censo de Población y Vivienda 2005, Tabulados básicos, Estados Unidos Mexicanos. Recuperado el 27 de diciembre de 2015 del sitio web INEGI: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825494292>
- Corfee-Morlot, J., Cochran I., Hallegatte S., Teasdale P., 2011. Multilevel risk governance and urban adaptation policy [Gobernanza del riesgo multinivel y política de adaptación urbana]. *Climatic Change*, 104(1), 169-197.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M., y Ocampo-Torres, F., 2007. On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon [Sobre la circulación de la laguna arrecifal de barrera de Puerto Morelos]. *Coral Reefs*, 26(1), 149–163.
- Cowell, P.J., Stive M.J.F., Niedoroda A.W., de Vriend H., Swift D., Kaminsky G., Capobianco M., 2003. The coastal tract. Part 1: A conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change [El intervalo costero. Parte 1: Un acercamiento conceptual al modelado del cambio costero de bajo orden]. *J.Coastal Res.*, 19, 812-827.
- Dee D., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E., Isaksen L., Kallberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B., Morcrette J., Park B., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J., Vitart F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [El reanálisis ERA-Interim: configuración y desempeño del sistema de asimilación de datos]. Centro Europeo para el Pronóstico de Clima a Mediano Plazo, Reading, UK, 45 pp.
- Day, J.W., A. Yáñez-Arancibia, J.H. Cowan, Day R., Twilley R., Rybczyk J., 2013. Global climate change impacts on coastal ecosystems in the Gulf of Mexico: considerations for integrated coastal management [Impactos del cambio climático global en ecosistemas costeros del Golfo de México: consideraciones para un manejo integral costero]. En: J.W. Day y A. Yáñez Arancibia, eds. *The Gulf of Mexico Origin, Waters, and Biota*, Series Volume 4 Ecosystem- Based

Management. Harte Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press, College Station, TX, pp: 253-272.

Day, J.W., Christian R., Boesch D., Yáñez-Arancibia A., Morris J., Twilley R., Naylor L., Schaffner L., Stevenson C., 2008. Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands [Consecuencias del cambio climático en la ecogeomorfología de humedales costeros]. *Estuaries and Coasts*, 37, 477-491.

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), 2015a. Accessing data servers in batch [Acceso a los servidores de datos en batch]. Consultado en: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/WEBAPI/Accessing+ECMWF+data+servers+in+batch> (consultado en diciembre del 2015).

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), 2015b. Brief request syntax [Breve sintaxis de solicitud]. Consultado en: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/WEBAPI/Brief+request+syntax> (consultado en diciembre del 2015).

Ericson, J.P., Vorosmarty C.J., Dingman S., Ward L., Meybeck M., 2006. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications [Aumento efectivo del nivel del mar y deltas: causas del cambio y las implicaciones en la dimensión humana]. *Global Planet Change*, 50, 63-82.

Flores-Campaña, L.M., Arzola-González J.F., Ramírez-Soto M., Osorio-Pérez A., 2012. Repercusiones del cambio climático global en el estado de Sinaloa, México. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de geografía*, Vol. 21, 115-129.

Flores-Verdugo F., Zebadua-Penagos F., Flores-de-Santiago F., 2015. Assessing the influence of artificially constructed channels in the growth of afforested black mangrove (*Avicennia germinans*) within an arid coastal region [Evaluando la influencia del mangle negro (*Avicennia germinans*) en canales artificialmente construidos en una región árida costera]. *Journal of Environmental Management* 160, 113-120.

Fundación Python Software, 2015. ¿Qué es Python? Resumen Ejecutivo. Consultado en <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>

García-Ríos V., Alpuche-Gual L., Herrera-Silveira J., Montero-Muñoz J., Morales-Ojeda S., Pech D., Cepeda-González M., Zapata-Pérez O., Gold-Bouchot G., 2013. Towards a coastal condition assessment and monitoring of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem (GoM LME): Terminos Lagoon pilot site [Hacia un manejo y monitoreo de Gran Ecosistema Marino del Golfo de México: Laguna de Términos]. *Environmental Development* 7, 72–79.

Gay-García C., Conde-Álvarez A. C. y colaboradores, 2008. Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional. Primera Versión. Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Hegerl G., Zwiers F., Braconnot P., Gillett N., Luo Y., Marengo-Orsini J., Nicholls N., Penner J. Stott, P., 2007. Understanding and attributing climate change [Entendiendo las atribuciones del

- cambio climático]. ]. En Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 663-745 pp.
- Hoegh-Guldberg O., Mumby P. J., Hooten A. J., Steneck R., Greenfield P., Gomez E., Harvell C., Sale P., Edwards A., Caldeira K., Knowlton N., Eakin C., Iglesias-Prieto R., Muthiga N., Bradbury R., Dubi A., Hatziolos M., 2007. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification [Los arrecifes de coral bajo el cambio climático y acidificación del océano]. *Science*, 318,1737-1742.
- IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) , 2015. Earth System Definitions [Definiciones del Sistema Terrestre]. Recuperado el 10 de diciembre de 2015 de sitio web: <http://www.igbp.net/globalchange/earthsystemdefinitions.4.d8b4c3c12bf3be638a80001040.html>
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal) , 2016. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México: Sinaloa. Recuperado el 22 de enero de 2016 del sitio web: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM25sinaloa/mediofisico.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) , 2000. Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Geológica, 1:250 000. Geología, Mapa 4: Municipio de Mazatlán. En: Cuaderno Estadístico Municipal de Mazatlán, Sinaloa. Edición 2005.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2010. Principales resultados por localidad 2010 (ITER). Recuperado el 26 de enero del 2016 del sitio web: [http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta\\_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est](http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013. México en cifras. Recuperado del sitio web: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/>.
- INE (Instituto Nacional de Ecología), 2016b. El cambio climático en México: información por estado y sector. Sinaloa. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. [http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo\\_sector/estados/sinaloa.html](http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/sinaloa.html) (consultado en agosto del 2016).
- INE (Instituto Nacional de Ecología), 2016c. El cambio climático en México: información por estado y sector. Quintana Roo. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. [http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo\\_sector/estados/futuro\\_qroo.html](http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_qroo.html) (consultado en agosto del 2016).
- Instituto Oceanográfico Scripps y NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) , 2015. Full Mauna Loa CO2 record [Record completo en Mauna Loa de CO2]. Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de sitio web Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. Cambio Climático: Reporte de Síntesis, Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC [Equipo de escritura, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Suiza, 151 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) , 2014. Cambio Climático: Reporte de Síntesis, Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC [Equipo de escritura, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Suiza, 151 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ,2015. ¿Qué es el IPCC?. Recuperado el 11 de diciembre de 2015 del sitio web del IPCC: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>
- Jiménez-Cisneros B., Oki T., Arnell N.W., Benito G., Cogley J.G., Döll P., Jiang T., Mwakalila S.S., 2014. Freshwater resources [Recursos Dulciacuícolas]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 229-269 pp.
- Jones G., Stott P. y Christidis N., 2013. Attribution of observed historical near surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations [Atribuciones de las variaciones de las temperaturas superficiales históricas observadas a causas antropogénicas y naturales usando simulaciones CMIP5]. J. Geophys. Res. Atmos., 118,4001-4024.
- Jones R., Patwardhan A., Cohen S., Dessai S., Lammel A., Lempert R., Mirza M., von Storch H., 2014. Foundations for decision making [Fundamentos para la toma de decisiones]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 195-228 pp.
- Karl T., Jones P., Knight R., Kukla G., Plummer N., Razuvayev V., Lindsey J., Charlson R., 1993. "Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperatures" [Tendencias asimétricas de los mínimos y máximos diarios de temperatura], Bull. Am. Meteorol. Soc., 74, 1007-1023.
- Knutson T., Zeng F., y Wittenberg A. T. , 2013. Multi-model assessment of regional surface temperature trends: CMIP3 and CMIP5 Twentieth-Century Simulations [Evaluación multi-modelo de las tendencias regionales de temperaturas superficiales: Simulaciones CMIP3 y CMIP5 para el siglo veinte I]. J. Climate, 26, 8709–8743.
- Martin R. , 2008. Clean Code, A Handbook of Agile Software Craftsmanship [Código Limpio, Una Guía de Software Ágil y Artesanal]. En Capítulo 1: Código Limpio, ¿Qué es Código Limpio? Prentice Hall, Massachusetts, E.U.A., p7.
- Meehl G, Covey C, Delworth T, Latif M, McAvaney B, Mitchell J, Stouffer R, Taylor K , 2007. The WCRPCMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research [Los datos multimodelo

WCRPCMIP3: una nueva era en la investigación del cambio climático]. BullAmMeteorol Soc 88:1383–1394

Merino-Ibarra M., Otero-Dávalos L., 1991. Atlas ambiental costero: Puerto Morelos, Quintana Roo. Centro de Investigaciones de Quintana Roo, Chetumal, Q.Roo., México.

Molino-Minero E., Cardoso-Mohedano J., Ruiz-Fernández A., Sanchez-Cabeza J., 2014. Comparación de redes neuronales artificiales y análisis armónico para el pronóstico del nivel del mar (estero de Urías, Mazatlán, México). Ciencias Marinas, 40(4), 251-261.

Montaño-Ley Y., Páez-Osuna F., Peraza-Vizcarra R., 2000. Suspended and bed load sediment transport through a coastal lagoon entrance in Mazatlán, Sinaloa, Mexico [Transporte de sediment suspendido y de fondo en la entrada de una laguna costera en Mazatlán,Sinaloa,México]. Rev. Int. Contam. Ambie 16 (1), 27-36.

Mulholland P., Best G., Coutant C. , Hornberger G., Meyer J., Robinson P. , Stenberg J., Turner R., Vera-Herrera F. ,Wetzel R., 1997. Effects of Climate Change on freshwater ecosystems of the south-eastern United States and the Gulf Coast of Mexico [Efectos del cambio climático en ecosistemas epicontinentales del sureste de los Estados Unidos y el Golfo de México]. Hydrological Processes, Vol. 11, 949-970.

Nicholls R., Wong P., Burkett V., Codignotto J., Hay J., McLean R., Ragoonaden S., Woodroffe C., 2007. Coastal systems and low-lying areas [Sistemas Costeros y Áreas de baja elevación]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (315-356). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Ninja-IDE , 2015. About Ninja-IDE [Acerca de Ninja-IDE]. Consultado en: <http://ninja-ide.org/>

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2007. What is Climate Change? [¿Qué es el Cambio Climático?]. Recuperado el 14 de diciembre de 2015 de sitio web National Weather Service: <http://www.nws.noaa.gov/om/brochures.shtml>

OGC (Open Geospatial Consortium) , 2015. Estándares para netCDF de la OGC. Consultado en <http://www.opengeospatial.org/standards/netcdf>

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N., Barnola J., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M.,1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica [Historia atmosférica y climática de los últimos 420,000 años del núcleo de hielo Vostok, Antártica]. Nature 399, 429-436.

Porter J., Xie L., Challinor A., Cochrane K., Howden S., Iqbal M., Lobell D., Travasso M.,2014. Food security and food production systems [Seguridad alimentaria y sistemas de producción alimentaria]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 485-533 pp.

- Pörtner H., Karl D., Boyd P., Cheung W., Lluch-Cota S., Nojiri Y., Schmidt D., Zavalov P., 2014. Ocean systems [Sistemas Oceánicos]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 411-484 pp.
- Rodríguez-Martínez R., Ruíz-Rentería F., van Tussenbroek B., Barba-Santos G., Escalante-Mancera E., Jordán-Garza G. y Jordán-Dahlgren E., 2010. Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico [Estado ambiental y tendencias del sitio Puerto Morelos CARICOMP, México]. *Revista de biología tropical*, 58(3), 23-43.
- Rojas-Galaviz J., Yáñez-Arancibia A., Day J., y Vera-Herrera F., 1992. Estuarine Primary Producers: Laguna de Terminos, a Study Case [Productores Primarios Estuarinos: Láguna de Términos, un caso de estudio]. En, U. Seeliger, (ed.), *Coastal Plant Communities of Latin America [Comunidades Costeras de plantas de América Latina]*. Prensa Académica de San Diego, 141-153 pp.
- Secretaría de Marina , 1974. Estudio Geográfico de la Región de Mazatlán, Sin. Dir. Gral. Oceanogr. Señal. Marit., 80-167 pp.
- Sheppard C., Dixon D.J., Gourlay M., Sheppard A. y Payet R. , 2005. Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: examples from the Seychelles [La mortalidad coralina aumenta la energía de las olas que llega a las líneas costeras protegidas por planicies arrecifales: ejemplos de las Seychelles ]. *Estuar. Coast Shelf S.*, 64, 223-234.
- Smith K.R., Woodward A., Campbell-Lendrum D., Chadee D., Honda Y., Liu Q., Olwoch J., Revich B., Sauerborn R., 2014. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits [Salud Humana: impactos, adaptación y co-beneficios]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 709-754 pp.
- Trenberth K., Jones P., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein-Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J., Rusticucci M., Soden B. , Zhai P., 2007. Surface and atmospheric climate change [Cambio climático superficial y atmosférico]. En Cambio Climático: La Ciencia Física Básica. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 235-336 pp.
- Twilley R., Barron E., Gholz H., Harwel M. , Miller. I, Reed D.J., Rose J., Siemann E., Wetzel R. y Zimmerman R., 2001. Confronting climate change in the Gulf Coast Region: Prospects for sustaining our ecological heritage. Union of Concerned Scientist, Cambridge, Massachusetts, and Ecological Society of America, Washington DC. 82 p.
- Ubuntu , 2015. About Ubuntu and Debian [Acerca de Ubuntu y Debian]. Consultado en: <http://www.ubuntu.com/about/about-ubuntu/ubuntu-and-debian>
- Van Tussenbroek B.I., 2011. Dinámica de los pastos marinos y macroalgas asociadas en lagunas arrecifales coralinas. *Hidrobiológica*, 21(3), 293-310.



- Wong P., Losada I.J., Gattuso J.P., Hinkel J., Khattabi A., McInnes K.L., Saito Y., Sallenger A., 2014. Coastal systems and low-lying areas [Sistemas costeros y áreas de baja elevación]. En Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A, 361-409 pp.
- Yáñez-Arancibia A. y Day Jr., J. W , 1981. Oceanológica Acta . Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon estuarine system in the Southern Gulf of Mexico [Caracterización ecológica de la Laguna de Términos, una laguna-sistema-estuarino tropical en el sureste del Golfo de México]. ISCOL-UNESCO '81 Bordeaux Francia.
- Yáñez-Arancibia A., Day J. W., Twilley R. R. y Day R. H. , 2014. Manglares; ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. Madera y Bosques, 20(3), 39-75.
- Zar Jerrold, 2010b. Biostatistical Analysis [Análisis Bioestadístico]. En Capítulo 19 Correlación lineal simple, sección 19.1: El coeficiente de correlación. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey.
- Zar Jerrold , 2010c. Biostatistical Analysis [Análisis Bioestadístico]. En Capítulo 8 Hipótesis de Dos Muestra, sección 8.12: Pruebas de rangos para dos muestras. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey.
- NCAR (National Center for Atmospheric Research), 2016. Atmospheric Reanalysis: Overview and Comparison Tables. Consultado en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables> (consultado en noviembre del 2016).
- ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), 2016. What is ERA-Interim? [¿Qué es ERA-Interim?]. Consultado en: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/What+is+ERA-Interim> (consultado en noviembre del 2016).
- Qian T., Dai A., Trenberth K. E., Oleson K. W., 2006: Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004 [Simulación de las condiciones superficiales globales de 1948 a 2004]. Part I: Forcing data and evaluations. J. Hydrometeor., 7, 953–975.
- Berg A., Famiglietti J. S., Walker J., Houser P., 2003: Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes [Impacto de la corrección de sesgos a productos de reanálisis en las simulaciones de humedad de suelo y flujos hidrológicos Norte Americanos].
- Fan Y., Van den Dool H., 2004. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.58 resolution for 1948 to present [Base de datos de la humedad del suelo global mensual del Centro de Predicción del Clima a 0.58 de resolución de 1948 al presente]. J. Geophys. Res., 109.

- Decker M., Brunke M., Wang Z., Sakaguchi K., Zeng X., Bosilovich M., 2011. Evaluation of the Reanalysis Products from GSFC, NCEP, and ECMWF Using Flux Tower Observations. [Evaluación de los productos de reanálisis de GSFC, NCEP, and ECMWF usando torres de observación]. Special MERRA Collection. Journal of Climate. 1916, Volumen 25.
- Huang X., Rhoades A., Ullrich P., Zarzycki C., 2016. An evaluation of the variable-resolution- CESM for modeling California's climate [Una evaluación del CESM para modelar el clima de California]. J. Adv. Model. Earth Syst., 8, 345–369.
- Willett K., Alexander L., Thorne P., 2010. Global climate (in 'State of the Climate in 2009') [Clima Global en "Estado del Clima en 2009"]. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 91: S19–S52.
- Leung L., Mearns L., Giorgi F., Wilby R., 2003. Regional climate research: needs and opportunities [Investigación en clima regional: necesidades y oportunidades]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 84(1), 89–95.
- Tamayo J., 1949. Geografía general de México. V.1: Geografía física. Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas, México. 562p.
- Yáñez-Correa A., 1963. Batimetría, salinidad, temperatura y distribución de los sedimentos recientes en la Laguna de Términos, Campeche, México. Anales Bol. Inst. Geol. UNAM, (1) 67, 1-47.
- Phleger F. y Ayala-Castañares A., 1971. Processes and history of Terminos Lagoon, Mexico [Procesos e historia de la Laguna de Términos, México]. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol, (2) 55, 2130-2140.
- Toral S., 1971. Estudios de los Cichlidae (Pisces, Perciformes) de la Laguna de Términos y sus afluentes. Tesis Profesional Fac. Ciencias, Univ. Nal. Autón. México. 32 pp.
- García-Amaro de Miranda E., 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Segunda edición. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 246 pp.
- Hays J. D., Imbrie J. y Shackleton N. J., 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages [Variaciones en la órbita terrestre: Marcapasos de las Eras Glaciares]. *Science* 194(4270), 1121–113.
- Mancilla M. y Vargas M., 1980. Los primeros estudios sobre el flujo neto de agua a través de la Laguna de Términos, Campeche. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 7(2) ,1-12.
- García-Cubas A., 1981. Moluscos de un sistema lagunar tropical en el sur del golfo de México (Laguna de Términos, Campeche). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Publicación Especial 5, 182.
- Madrazo-Garibay M. y López-Ochoterena E., 1985. Protozoarios ciliados de México. XXIX. Aspectos biológicos de seis especies asociadas a *Crassostrea virginica* (Gmelin) (Mollusca, Bivalvia) de la

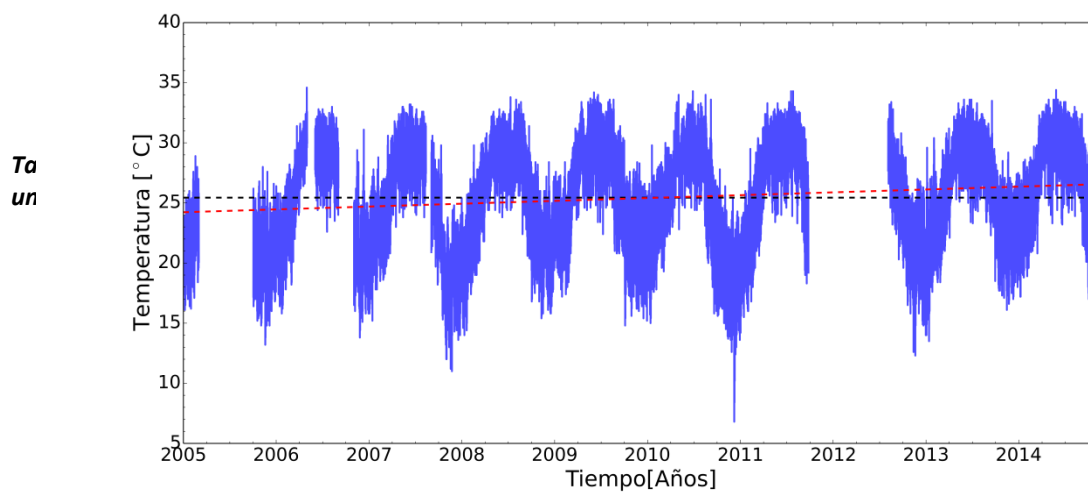
- Laguna de Términos, Campeche, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, Universidad Nacional Autónoma de México, 13, 39-44.
- Gutiérrez-Estrada M. y Castro-del-Río A., 1988. Origen y desarrollo geológico de la Laguna de Términos. En: A. Yáñez Arancibia y Day, Jr J.W. (eds.). *Ecología de los ecosistemas costeros del sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 89-110 pp.
- Villalba L. A., 1989. Descripción general del estero de Urías, Mazatlán, Sinaloa. *Ciencias Del Mar*, 8,32–37.
- Plantico M., Karl T., Kukla G., Gavin J., 1990. Is recent climate change across the United States related to rising levels of anthropogenic greenhouse gases?. *Journal of Geophysical research*, vol. 95, No. D10, Pages 16,617-16,637.
- Lettenmaier D., Wood E., Wallis J. , 1994. Hydro-Climatological trend in the continental United States [Tendencia hidro-climatológica de los Estados Unidos continentales], 1948-88. *Journal of Climate*, vol. 7, pages 586-607.
- Ruíz-Rentería F., VanTussenbroek B., Jordán-Dahlgren E. , 1998. CARICOMP—Caribbean coral reef, seagrass and mangrove sites: Puerto Morelos, Quintana Roo, México [Arrecifes de coral, pastos marinos y sitios de manglar en el Caribe]. *Coastal Regions and small island papers*. UNESCO, Paris.
- Ochoa-Izaguirre M., Carballo J.L., Paez-Osuna F., 2002. Qualitative changes in macroalgal assemblages under two contrasting climatic conditions in a sub-tropical estuary [Cambios cualitativos en los arreglos macroalgales bajo dos condiciones climáticas constrictas en un estuario subtropical]. *Bot.Mar.*, 45(2),130-138.
- Sheinbaum J., Candela J., Badan A., Ochoa J. , 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel [Estructura del flujo y transporte en el Canal de Yucatán]. *Geophys Res Lett*, 29,1040.
- Toledo A., 2003. Ríos, costas, mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mexico.
- Chávez G., Candela J. y Ochoa J., 2003. Subinertial flows and transports in Cozumel Channel [Flujos subinerciales y transporte en el Canal de Cozumel]. *J. Geophys Res.*, 108, 1901– 1911.
- Small C. y Nicholls R.J. , 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones [Un análisis global de los asentamientos humanos en zonas costeras]. *J. Coastal Res.*, 19, 584-599.
- Azuz, I. y Rivera, E., 2007. Estimación del crecimiento poblacional para los estados costeros de México. *Papeles de Población*, Universidad Autónoma del Estado de México 51.
- Montaño-Ley Y., Peraza-Vizcarra R., Páez-Osuna F., 2008. Tidal hydrodynamics and their implications for the dispersion of effluents in Mazatlán harbor: an urbanized shallow coastal lagoon [Hidrodinámica mareal y su implicación en la dispersion de efluentes en el Puerto Mazatlán: una laguna costera somera urbanizada]. *Water Air Soil Poll.* , 194 (1-4), 343-357.

- Fay, M., Proschan, M. , 2010. "Wilcoxon–Mann–Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules"[ ¿Wilcoxon–Mann–Whitney o Prueba t? Sobre los supuestos para las hipótesis de prueba y las múltiples interpretaciones de reglas de decisión]. *Statistics Surveys*. 4: 1–39.
- Zar Jerrold , 2010a. *Biostatistical Analysis [Análisis Bioestadístico]*. En Capítulo 7 Hipótesis de Una Muestra, sección 7.5: Reportando variabilidad alrededor de la mediana. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey.
- Simmons A., Willett K., Jones P., Thorne P., Dee D. 2010. Low- frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational datasets [Variaciones de baja frecuencia en la humedad de la baja atmósfera, temperatura y precipitación: Inferencias de reanálisis y datos observados mensualmente]. *J. Geophys. Res.* 115.
- Flores-de-Santiago F. , Kovacs J. , Flores-Verdugo F. , 2012. Seasonal changes in leaf chlorophyll a content and morphology in a sub-tropical mangrove forest of the Mexican Pacific [Cambios estacionales en el contenido y morfología foliar de clorofila a en un bosque de manglar subtropical del Pacífico mexicano]. *Marine Ecology Progress Series*, 444, 57-68.
- Day, J.W., Yáñez-Arancibia A. y Rybczyk J.M. , 2012. Climate change effects, causes, consequences: physical, hydro- morphological, ecophysiological, and biogeographical changes [Efectos, causas y consecuencias del cambio climático: cambios físicos, hidromorfológicos, ecofisiológicos y biogeográficos]. En: M.J. Kennish y M. Elliot, eds. *Estuarine Treatise*. Vol. 8: Human-Induces Problems, Uses and Abuses. Elsevier, Inc., Dordrecht, Países Bajos, pp: 303-315.
- Sánchez-Cabeza J., 2015a. Protocolo del proyecto “Observatorios del Cambio Climático”, Grupo de Trabajo de los Observatorios del Cambio Climático ,Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México. Manuscrito no publicado.
- Sánchez-Cabeza J., 2015b. Observatorios Costeros del Cambio Global en Mazatlán, México: evidencias preliminares de hipoxia. En 5to Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, Resúmenes Sede Regional Noroeste. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.
- INE (Instituto Nacional de Ecología), 2016a. El cambio climático en México: información por estado y sector. Campeche. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
[http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo\\_sector/estados/futuro\\_campeche.html](http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_campeche.html) (consultado en agosto del 2016).

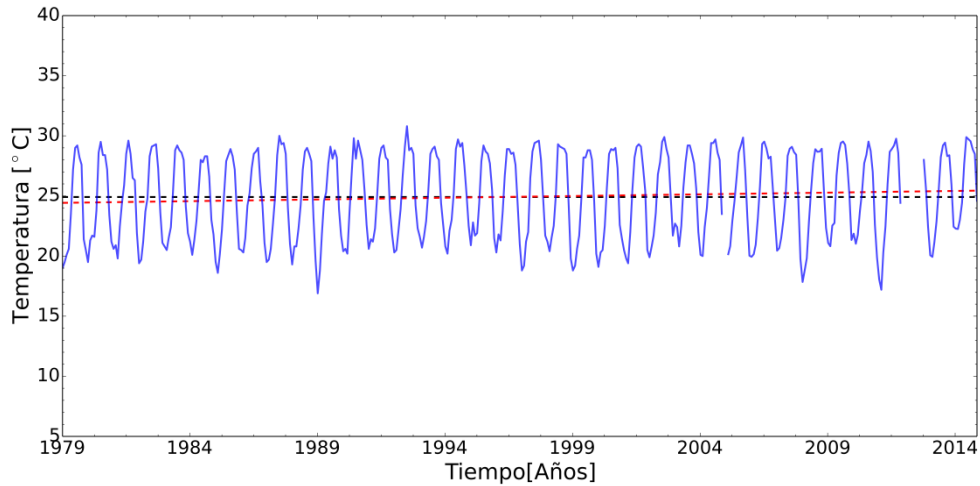
<b>Variable</b>	<b>Nombre corto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Código en ERA-Interim</b>
<b>Temperatura oceánica superficial</b>	“sst”	K	34.128
<b>Precipitación total</b>	“tp”	m	228.128
<b>Temperatura del punto de rocío, 2m</b>	“d2m”	K	168.128
<b>Temperatura a 2m</b>	“t2m”	K	167.128
<b>Componente V del viento a 10 m</b>	“v10”	m/s	166.128
<b>Componente U del viento a 10 m</b>	“u10”	m/s	165.128
<b>Cobertura total de nubes</b>	“tcc”	0 - 1	164.128
<b>Presión del aire a nivel del mar</b>	“msl”	Pa	151.128

## **Anexo A: códigos de cada variable usados en el Programa de descarga automática de datos**

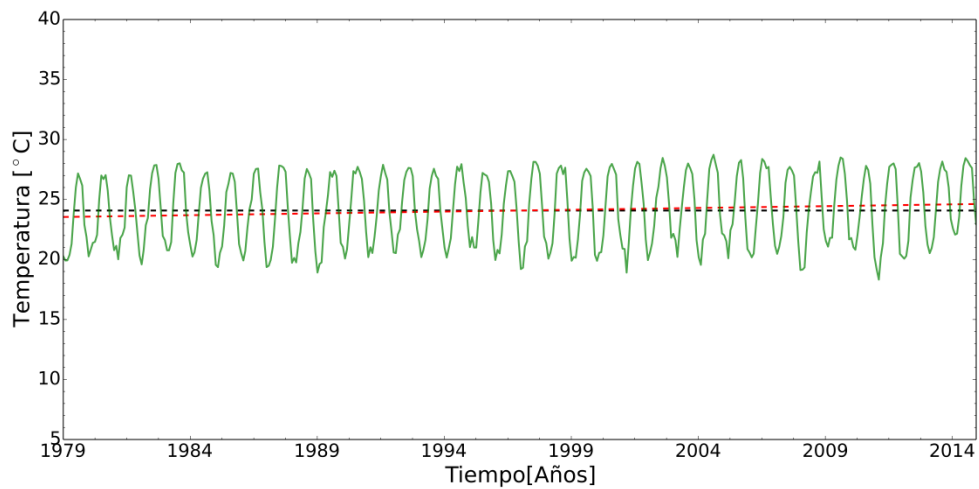
## Anexo B: series CNA-10MZT, ERA-10MZT, CNA-36MZT y ERA-36MZT



**Figura 7. 1. Variación de la temperatura de la serie de campo CNA-10MZT (azul) en Mazatlán en la década 2005-2014. Se observa que la media es de 25.44°C (línea punteada negra) y la pendiente ajustada de  $0.23 \pm 0.01^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  (línea punteada roja).**



**Figura 7.3. Variación de la temperatura de la serie de campo CNA-36MZT (azul) en Mazatlán para el periodo 1979-2014.** Se observa que la media es de 24.91°C (línea punteada negra) y la pendiente ajustada de  $0.028 \pm 0.017^\circ\text{C/año}$ ,  $p > 0.05$ ,  $p < 0.1$  (línea punteada roja).



**Figura 7.4. Variación de la temperatura de la serie de campo ERA-36MZT (verde) en Mazatlán para el periodo 1979-2014.** Se observa que la media es de 24.08°C (línea punteada negra) y la pendiente ajustada  $0.030 \pm 0.013^\circ\text{C/año}$ ,  $p < 0.05$  (línea punteada roja).

