Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.
ORGANISMO DESCENTRALIZADO DE INTERES PUBLICO
Departamento de Oceanografía Física
Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada * Ensenada, Baja California, México.
Tel: +52 (646) 175 05 00 * Fax: +52 (646) 175 05 47

28 de noviembre de 2014
Ref: Convenio INECC/A1-007/2014

Reporte Final

Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional

Coordinadora del Proyecto:
Dra. Tereza Cavazos

Parte I
Análisis de Variables Atmosféricas
(históricas y escenarios de cambio climático)

Tereza Cavazos y Pamela De Grau
Departamento de Oceanografía Física, CICESE

ÍNDICE

ÍNDICE 2

RESUMEN EJECUTIVO 3

EXECUTIVE SUMMARY 4

1. INTRODUCCIÓN 6

2. OBJETIVOS 7

3. ANÁLISIS DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS 8

3.1. Alcances y consideraciones 8
3.2. Datos y metodología del periodo histórico 8

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS DURANTE 1979-2005 11

4.1. Precipitación 11
4.2 Temperatura superficial (Ts) 14
4.3. Presión a nivel del mar (Psl) 16
4.4. Viento zonal (Uas) 18
4.5. Viento meridional (Vas) 19
4.6. Ciclo anual y métricas de variables atmosféricas en el SE de México 20

5. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO DURANTE EL SIGLO 21 23

5.1. Proyecciones de cambio en la precipitación para el periodo 2015-2039 23
5.2. Proyecciones de cambio en la precipitación para el periodo 2075-2099 28
5.3. Proyecciones de cambio en la temperatura superficial (Ts) para el periodo 2015-2039 34
5.4. Proyecciones de cambio en la temperatura superficial (Ts) para el periodo 2075-2099 37
5.5. Proyecciones de cambio en la presión superficial a nivel del mar para el 2075-2099 41
5.6. Proyecciones de cambio en el vector de viento para el periodo 2075-2099 44
5.7. Proyecciones de cambio en el ciclo anual de variables atmosféricas en el SE de México durante el siglo 21 49
5.8. Variabilidad interanual de la circulación superficial en el SE de México durante el siglo 21 51

6. CONCLUSIONES 53

6.1. Evaluación histórica 53
6.2. Evaluación futura 53

7. RECOMENDACIONES Y PRÓXIMOS PASOS 54

BIBLIOGRAFÍA 55

8. ANEXO 1: RESUMEN DE ACTIVIDADES Y CRONOGRAMA (2 JUL - 30 NOV 2014) 57

Resumen Ejecutivo

Como parte de los proyectos de la Quinta Comunicación Nacional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) desarrollaron un estudio de Actualización de escenarios de cambio climático para México (Cavazos et al. 2013) utilizando datos de 14 modelos de circulación global (MCG) que fueron considerados en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC; Stocker et al. 2013).

En el estudio de Cavazos et al. (2013) se analizaron las variables de temperatura y precipitación sólo sobre el continente, pero se lograron identificar limitaciones de los MCG para reproducir algunos procesos físicos que modulan la variabilidad del clima regional de México. Partiendo de esos resultados y de otros que han sido publicados en la literatura, en el presente estudio se evalúan 4 MCG (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3) que capturan diferentes aspectos de la climatología tropical relevante para México y se analizan nuevas variables (temperatura superficial, precipitación, presión a nivel del mar y dirección e intensidad del viento superficial) sobre el continente y el océano y se evalúan con diversas bases de datos observadas.

En la Sección 4 de este reporte se analiza la evaluación histórica (1979-2005) de todas las variables atmosféricas (observadas y derivadas de los MCG). Los MCG seleccionados y el ensamble simulan adecuadamente la posición de los anticiclones del Pacífico y el Atlántico, la posición e intensidad de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la vaguada monzónica y los vientos alisios estacionales. Se encontró que el reanálisis del ERA-int es demasiado seco a pesar de que los patrones de las variables de circulación son similares a los que simulan los MCG, que producen mayor precipitación que el ERA-int todo el año. Por esta razón se cree que el ERA-int podría tener un problema al momento de precipitar; es posible que la parametrización de nubes sea muy seca y/o que tenga problemas de asimilación de datos observados en la parte tropical, como lo sugieren Torres-Alavez y Cavazos (2014).

En el caso de estudio del Sureste de México, se encontró que los MCG sobrestiman la temperatura superficial y subestiman significativamente la precipitación de la región, especialmente en verano, pero reproducen adecuadamente el patrón bimodal de las lluvias de verano y la canícula de esa región. Los ciclos anuales de las variables atmosféricas analizadas son consistentes con el patrón de lluvias observado y son simulados adecuadamente por los MCG, aunque con algunos sesgos.

La Sección 5 muestra los resultados de los escenarios de cambio climático. Para finales del siglo 21 (2075-2099) y bajo el escenario más extremo, el RCP8.5, el ensamble de los 4 MCG proyectan ligeros cambios en los patrones estacionales de lluvia y en la circulación que rodea al país. Se espera un mayor calentamiento en el Pacifico Oriental tropical que en el Atlántico Norte (similar a un Niño fuerte). En el verano, la presión sobre México podría aumentar y los Alisios podrían intensificarse afectando la posición de la ZCIT, la cual podría encontrase por debajo de 10ºN y en consecuencia se generarían anomalías negativas de lluvia en México. En el otoño, la Alta Pacifico podría debilitarse debido a un mayor calentamiento en el Pacifico tropical y subtropical; esto posiblemente produciría más lluvias en el otoño en las costas del Pacifico Mexicano, retrasando la terminación del monzón.

En el Sureste de México, el comportamiento del ciclo anual de las variables atmosféricas analizadas es similar al observado, con una bimodalidad en la precipitación y con menos precipitación en verano e invierno que responde a una mayor presión superficial y aumento en los vientos alisios durante la canícula.

En promedio, durante el siglo 21 se esperan aumentos de temperatura superficial de 1 hasta 4ºC y disminuciones de lluvia especialmente en invierno y verano. Es probable que haya un ligero aumento en la precipitación de otoño en las costas del Pacifico y en el Sureste de México.

Se recomienda utilizar proyecciones con modelos regionales (downscaling dinámico) para reducir las incertidumbres debido a la topografía compleja y la influencia de sistemas tropicales no capturados por los MCG.

Executive Summary

As part of the project of the Fifth National Communication, the Center for Scientific Research and Higher Education at Ensenada (CICESE), the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), the Center for Atmospheric Sciences (CCA) of the National Autonomous University of Mexico and the National Weather Service (NWS), developed the study "Update of climate change scenarios for Mexico" (Cavazos et al. 2013) based on information from Global Circulation Models (GCM), which were considered in the Fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Stocker et al. 2013).

Cavazos et al. (2013) analyzed historical and climate change projections of temperature and precipitation only over the continent, but still they were able to identify limitations of the GCMs to reproduce some physical processes that modulate the regional climate variability in Mexico. Based on these and other results that have been published in the literature, the objective of the present study is to evaluate four GCMs (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR,-CGCM3 MRI) that best capture different aspects of the tropical weather relevant to Mexico based on a new set of variables (surface temperature, precipitation, sea level pressure and direction and intensity of surface wind) over the continent and the ocean, which are evaluated with different observational datasets.

Section 4 of this report shows the historical evaluation (1979-2005) of all atmospheric variables (observed and from GCMs) and Section 5 the scenarios of climate change projected for the 21 century under the RCP4.5 and RCP8.5. Section 4 shows that the GCMs selected simulate adequately the position of the Pacific and the Atlantic anticyclones, the position and intensity of the ITCZ, the monsoon trough and the seasonal trade winds. The circulation patterns simulated by the GCMs are similar to those of ERA-int reanalysis, but ERA-int is too dry in the whole domain. In the study case of Southeastern Mexico, the GCMs overestimate the surface temperature and underestimate significantly the precipitation of the region, but they adequately reproduce the bimodal pattern of the summer rains and the *canicula* in the region. The annual cycles of the atmospheric variables analyzed are consistent with the observed rainfall patterns and are adequately simulated by GCMs, but with certain biases.

Section 5 shows the results of the climate change scenarios. By the end of 21 century (2075-2099) and under the most extreme scenario, the RCP8.5, the mean ensemble of the 4 GCMs project slight changes in the seasonal rainfall patterns and circulation around the country. Increased warming is expected in the

eastern tropical Pacific and in the North Atlantic (similar to a strong El Niño). During the summer, the sea level pressure may increase over Mexico and the trades may intensify affecting the position of the ITCZ, which could be located south of 10N and, consequently, negative rainfall anomalies would be expected in Mexico. In the fall, the North Pacific high could weaken due to greater warming in the tropical and subtropical Pacific; this may produce more autumn rainfall on the shores of the Mexican Pacific coasts, delaying the monsoon season.

In southeastern Mexico, the pattern of the annual cycle of the atmospheric variables analyzed is similar to the observed one; it is expected a bimodal rainfall distribution, but with reduced summer and winter rainfall due to a greater surface pressure over the continent and increased trade winds in July-August.

On average, during the 21st century surface temperature may increase between 1 and 4°C and rainfall may decrease especially in winter and summer. There is probably a slight increase in autumn precipitation in the Pacific coast and in Southeast Mexico.

We recommend using projections with regional models (dynamic downscaling) to reduce uncertainties due to the complex topography and the influence of tropical systems that are not captured by the GCMs.

1. Introducción

En el estudio "Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional (Cavazos et al., 2013)", las instituciones de la Red Mexicana de Modelación del Clima (CICESE, IMTA y CCA-UNAM) que coordinó el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) llevaron a cabo el análisis regional de un periodo histórico y de las proyecciones de 14 modelos de circulación global (MCG) del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) para el caso de México. Los resultados de los modelos del CMIP5 se utilizaron en el 5º Reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

Cavazos et al. (2013) utilizaron métricas climáticas a escala mensual (ciclo anual, errores y series de tiempo) para evaluar el desempeño de cada MCG en México y Centro América durante el periodo histórico (1961-2000). Las variables superficiales que se evaluaron fueron temperatura máxima del aire, temperatura mínima del aire, temperatura promedio del aire y precipitación, las cuales se compararon con las de la base de datos mensuales del *Climate Research Unit* (CRU) de la Universidad de East Anglia. También se evaluaron índices climáticos extremos para todo el país mediante el análisis de umbrales presentes y futuros de la temperatura máxima y mínima y de la precipitación a escala anual y estacional.

Los resultados de los 14 MCG se combinaron en un ensamble ponderado mediante el método REA (*Reliability Ensemble Averaging;* Giorgi y Mearns, 2001), calculando la incertidumbre de cada modelo. Esto se hizo para el periodo histórico (1961-2000) y para las proyecciones usando los escenarios de forzamiento radiativo (van Vuueren, 2011) bajo (RCP4.5), medio (RCP6.0) y alto (RCP8.5). Se re-evaluaron las métricas climáticas para validar el comportamiento de todos los modelos individuales con respecto al ensamble ponderado del REA y de los datos observados del CRU. El desempeño de los modelos difirió en el Sur y Noreste de México, por lo que no fue posible identificar uno solo como el más adecuado para simular las variables superficiales analizadas. Sin embargo, el ensamble ponderado con REA, al integrar la información de todos los modelos, mejoró el desempeño individual, ya que consideró la correlación y la desviación estándar del ciclo anual de las observaciones junto con las de todos los modelos.

Sin embargo, el estudio realizado por Cavazos et al. (2013) es sólo para algunas variables climáticas en el continente; para entender el clima de la región y sus impactos presentes y futuros es necesario evaluar otras variables atmosféricas (como la presión a nivel del mar, los vientos superficiales y la temperatura superficial del mar) en un dominio espacial que incluya a los mares intra-Americanos.

Estudios recientes que utilizan varios o todos los modelos del CMIP3 y del CMIP5 y que incluyen a México resaltan que algunos MCG son mejores que otros para México, el Caribe y Centro América porque capturan algunos de los fenómenos y procesos tropicales relevantes para la región, como por ejemplo el monzón, la canícula, el jet de bajos niveles del Caribe, la oscilación de Madden-Julian o los contrastes térmicos entre el océano y el continente (p. ej., Bukovsky et al. 2013, Cavazos y Arriaga-Ramirez 2012, Geil et al. 2013, Geil et al. 2013, Maloney et al. 2013, Liang et al. 2008, Lin et al. 2008, Fuentes-Franco et al. 2014, Martinez-Sanchez y Cavazos 2014, Torres-Alavez et al. 2014). Aunque estos procesos, así como también los ciclones tropicales, son difíciles de ser

capturados por los modelos globales, estos estudios muestran que los 4 modelos que se muestran en la Tabla 1.1 parecen simular mejor diferentes aspectos de la climatología tropical relevante para México, por lo que son los que se evalúan en este estudio.

Tabla 1.1. Lista de los modelos globales del CMIP5 que se evalúan en este estudio; se hizo un ensamble promedio mensual para cada modelo usando tres de sus realizaciones (r1, r2, r3) para el período histórico 1979-2005.

Modelo	Centro de Modelación	Resolución
CNRM-CM5	Metéo-France/Centre National de Resherches Météorologiques, France	1.4°x1.4°
HadGEM2-ES	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, United Kingdom	1.8°x1.2°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.8°x1.8°
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	1.1°x1.1

2. Objetivos

2.1 Primera Etapa (Segundo Reporte)

1. Evaluar nuevas variables atmosféricas superficiales sobre el continente y el océano utilizando 4 MCG (ver Tablas 1 y 2).
2. Presentar resultados del análisis estacional de las variables para el periodo histórico (1979-2005).

Etapa 2 (Tercer Reporte)

1. Evaluar los escenarios de cambio climático para México de 4 MCG y 4 variables atmosféricas
2. Presentar resultados de los escenarios para un caso de estudio en México (Sureste)

3. Análisis de Variables Atmosféricas

3.1. Alcances y consideraciones

El proyecto CMIP5 generó salidas de 22 MCG que se han utilizado para estudiar la predictibilidad del clima y las limitaciones de los modelos para reproducirlo en escalas de tiempo desde intra-estacionales a decenales; los estudios han permitido determinar los factores por los cuales ante forzamientos similares se obtienen respuestas diferentes en un amplio rango (Taylor, et al. 2011); esto a su vez ha servido para ver la incertidumbre de los modelos utilizados. El CMIP5 aportó algunas respuestas científicas y sus resultados se publicaron en el quinto informe del IPCC (Stocker et. al. 2013). La información actualizada de los escenarios de cambio climático para México (Cavazos et al. 2013) es un producto de la Quinta Comunicación Nacional (SEMARNAT/INECC 2013) y sus análisis regionales se consideran en evaluaciones de impacto, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático a nivel nacional, local y sectorial.

Con el desarrollo del proyecto de "Actualización de escenarios de cambio climático para México", se fortalecieron las capacidades técnicas nacionales en cuanto al manejo de información para la generación de escenarios, su correcta interpretación y aplicación; no solo para tener conocimiento de las proyecciones, sino también para que los resultados fuesen utilizados por otros grupos de trabajo que contribuyen en el concomimiento del estado actual y futuro de la vulnerabilidad en diversos sistemas y también en la creación de líneas estratégicas para la adaptación.

Con la incorporación de nuevas variables atmosféricas superficiales (temperatura superficial, precipitación, presión superficial y dirección e intensidad del viento superficial) sobre el continente y el océano se pretende ampliar el conocimientos sobre la climatología de México y brindar información relevante para realizar estudios de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, los cuales son prioritarios para el país; y, además están marcados en los diferentes instrumentos de política como el Plan Nacional de Desarrollo (PND), la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y son parte de los objetivos del Programa Institucional del INECC 2013-2018.

3.2. Datos y metodología del periodo histórico

La base de datos mensual de las variables atmosféricas (Tabla 3.1) que se utilizó para validar las salidas de los MCG durante el periodo observado (1979-2005) es el Reanálisis ERA-Interim (Dee et al. 2011) del Centro Europeo (ECMWF, http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_moda/). ERA-Interim (ERA-int) tiene una resolución espacial de 1.5º, pero todas las variables de los datos observados y de los MCG fueron interpoladas bilinealmente a 0.5º para facilitar la comparación entre las bases de datos. El remallado bilineal, el cálculo de las climatologías y los errores se calcularon con el paquete gratuito de CDO (*Climate Data Operators*), el cual está disponible en: https://code.zmaw.de/projects/cdo/wiki/Cdo#Documentation.

También se usó la precipitación observada en malla del Proyecto Global de Climatología de la Precipitación (GPCP, versión 2.1; Huffman et al 2009.), el cual se deriva de datos de satélite sobre océano y continente combinados con datos de precipitación de estaciones en continente; tiene una resolución espacial de 2.5° (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html). Además, se

usaron los datos mensuales observados de precipitación en malla sobre el continente de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de *East Anglia* (CRU, versión 3.1, 1901-2009; Mitchell y Jones, 2005) para validar la precipitación en el sureste mexicano (Fig. 3.2) simulada por el GPCP, el ERA-Interim y los MCG. Esta base tiene una resolución de 0.5º y está disponible en http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru_ts_3.10. Sin embargo, los errores en la precipitación de los MCG se calcularon con respecto al GPCP porque el CRU sólo tiene datos en el continente, mientras que las demás bases tienen en el continente y en el océano.

La temperatura superficial (Ts) sobre el océano del ERA-Interim y de los MCG se comparó con la temperatura superficial del mar (SST) de la base de datos mensuales extendida y reconstruida por la NOAA versión 3b (ERSST_v3, Smith et al. 2008).

Se hizo una evaluación estacional (DEF, MAM, JJA, SON) de las variables atmosféricas observadas que se muestran en la Tabla 3.1 para el dominio espacial que se muestra en la Fig. 3.1. Las climatologías estacionales observadas durante 1979-2005 se comparan con las correspondientes de los 4 MCG (Tabla 1.1). Aunque se obtuvieron las 4 estaciones del año, en el reporte sólo se discuten los mapas de invierno (DEF) y verano (JJA), como se especificó en los términos de referencia debido a la gran cantidad de mapas generados.

También se obtuvieron ciclos anuales de precipitación, la desviación estándar (Std) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre el ciclo anual observado y el de los modelos para el caso de estudio del sureste mexicano, caracterizado por la canícula y la influencia de sistemas tropicales (Fig. 3.2).

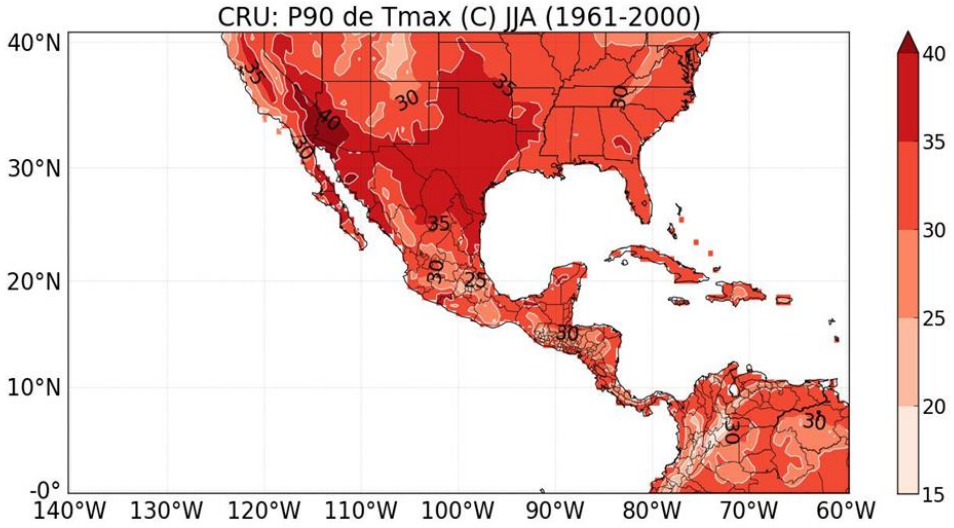

Figura 3.1. Ejemplo del dominio espacial que se utilizará en el análisis de las variables climáticas; los escenarios de ascenso del nivel del mar sólo se harán en las costas mexicanas (Figura tomada de Cavazos et al. 2013).

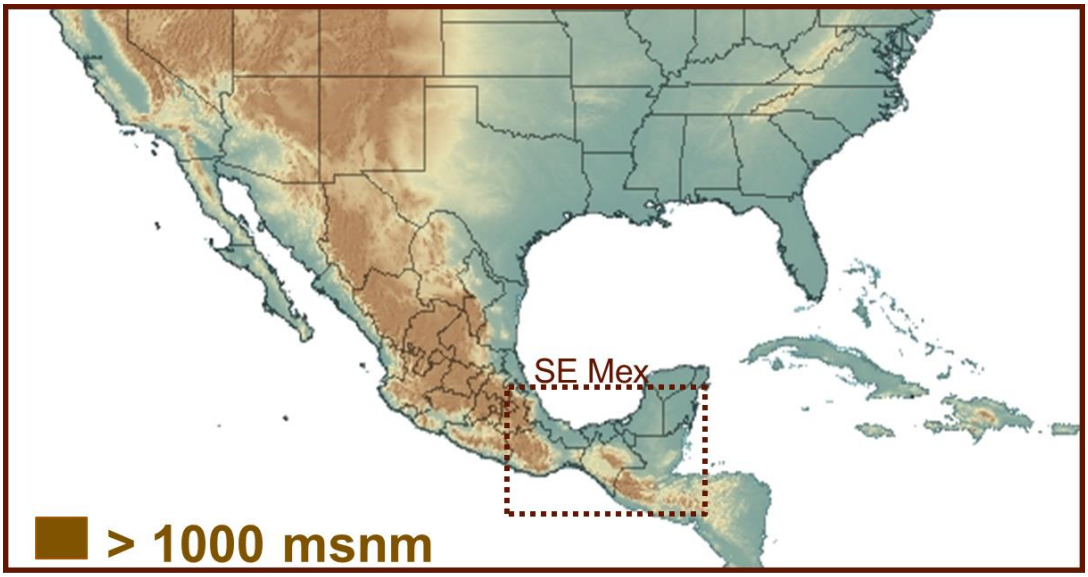

Figura 3.2. Se muestra la la topografia y con un rectángulo la región del sur de México (14ºN a 20ºN; 88ºW a 97ºW) que se analiza en detalle en este reporte como un caso de estudio.

Tabla 3.1. Lista de variables a escala mensual, modelos, métricas, periodos y dominio a evaluar con datos observados y los MCG. En la segunda etapa del proyecto se evalúa la parte histórica (1979-2005).

Variables Originales	T sup (^{o}K), Precip (pr; kg/m2/s)		
(nombre; unidad)	Presión sup (psl; pa) y U y Vsup (uas, vas; m/s)		
Variables (nueva unidad)	T sup (^{o}C), Precip (pr; mm/d), Psup (psl; mb)		
Experimentos de modelos	**Histórico mensual**		**Proyecciones (promedios y anomalías)**
Periodos	1979-2005*		2015-2039: RCP4.5 y RCP8.5
* Para comparar con ERA-Interim			2075-2099: RCP4.5 y RCP8.5
Datos "Observados"	GPCP (precip), ERA-Interim (variables atmosféricas) y ERSST (Temp. sup. del mar)		
Modelos globales (MCG)	CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGM3		
Escala de análisis	Estacional (DEF, JJA) y anual con datos disponibles a escala mensual		
Métricas regionales	Ciclo anual de P y T, desviación estándar (std), raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre datos observados y MCG del sureste Mexicano (caso de estudio)		
Mapas estacionales	Mapas estacionales (DEF, JJA) presentes y cambios futuros en todo el dominio		
Ventana espacial	Lat: 0 a 40N	Lon: 140W a 60W	

4. Resultados y discusión de variables atmosféricas durante 1979-2005

En esta sección se muestra una comparación espacial de la climatología promedio de invierno (DEF) y verano (JJA) durante 1979-2005 de 5 variables superficiales: precipitación (P), temperatura (Ts), presión a nivel del mar (Psl), viento zonal (Uas) y viento meridional (Vas). Estas variables son fundamentales para entender la estacionalidad del clima tropical y subtropical que afecta a México y la influencia que ejercen los mares intra-americanos que rodean al país. Se comparan las bases observadas (GPCP, ERSST, y/o ERA-int) con los 4 MCG (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-LR y MRI-CGCM3) y el ensamble promedio (Ens_GCMs) de los 4 modelos. Esta comparación nos dará una idea de la capacidad de los modelos utilizados para reproducir las características climáticas de la región y también las diferencias que pueden existir entre las bases observadas.

En la Sección 4.6 se muestran los ciclos anuales de todas las variables y su desviación estándar (Std) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los datos observados y el Ens_GCMs del ciclo anual para el caso particular del Sureste de México (Fig. 3.2).

4.1. Precipitación

La Fig. 4.1.1 muestra la precipitación invernal (DEF) durante 1979-2005 para los datos observados (GPCP y ERA-int), el ensamble de los 4 MCG seleccionados y cada MCG. Los datos observados de satélite y estaciones (GPCP) muestran la zona de convergencia intertropical (ZCIT) por debajo de 10ºN, lejos de las costas mexicanas como es de esperarse para la estación invernal. La ZCIT tiene una intensidad máxima de >7 mm/d. El reanálisis de ERA-int muestra una ZCIT mucho más débil que el GPCP; en general ERA-int es mucho más seco que el GPCP en el Pacífico Oriental y toda la costa del Atlántico, Golfo de México y el Caribe.

El Ens_GCMs simula mejor la precipitación que el ERA-int, aunque es un poco más lluvioso que el GPCP en México y la ZCIT también es más intensa que la observada con el GPCP. Individualmente, sólo el MRI-CGCM3 no reproduce adecuadamente el patrón general de la distribución espacial de la precipitación (Fig. 4.1.1.g), mientras que el HadGEM2-ES muestra la ZCIT más intensa.

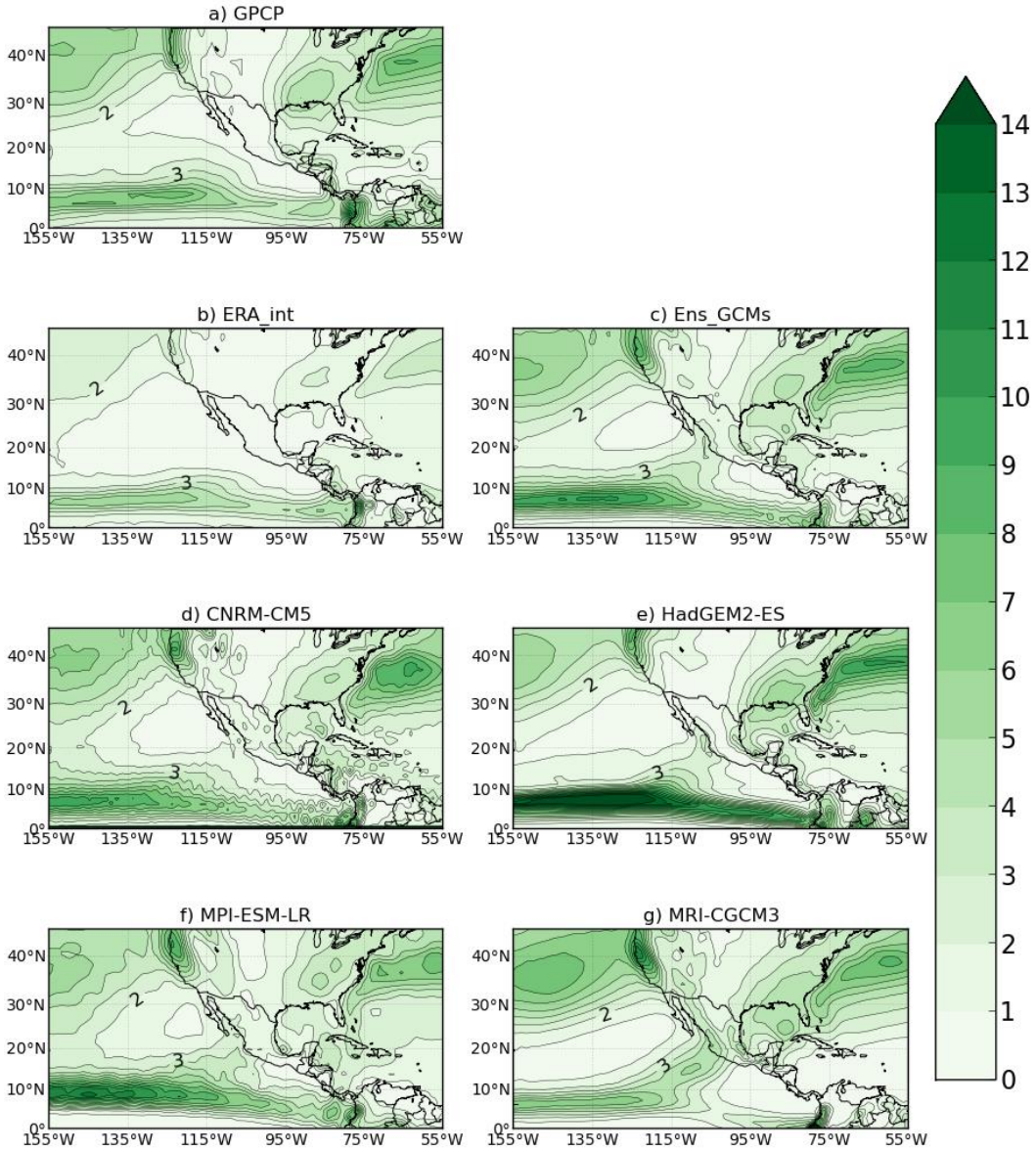

Figura 4.1.1 Precipitación promedio (mm/día) de invierno (DEF) durante 1979-2005.

Durante el verano (Fig. 4.1.2) la ZCIT se desplaza hacia el este y un poco hacia el norte, centrándose aproximadamente en 10ºN, 100ºW, con precipitaciones mayores de 14 mm/d. Esta intensidad se observa en todas las bases, excepto en el ERA-int que nuevamente es demasido seco en todo el dominio. La entrada del verano también se caracteriza por el desarrollo del monzón de América del Norte, el cual se identifica por la lengüeta de precipitación en el Noroeste de México y Suroeste de Estados Unidos.

El GPCP muestra precipitaciones de hasta 6 mm/d en la zona del monzón, mientras que el ERA muestra sólo valores entre 1 y 2 mm/d. En el sur de México se observan precipitaciones mayores a

11 mm/d de acuerdo al GPCP. El Ens_GCMs captura muy bien el patrón de las lluvias monzónicas a lo largo de la Sierra Madre Occidental, pero es un poco más seco que el GPCP en la costa oriental de México y en el sur del país. Todos los MCG simulan adecuadamente el monzón, pero subestiman la precipitación en la Península de Yucatán.

El MPI-ESM-LR muestra una ZCIT muy intensa, cuyos máximos se acercan mucho a las costas del Pacífico sur Mexicano. El verano también se caracteriza por una intenisficación del anticiclón del Pacífico Norte (Fig. 4.3.1), el cual se genera la estación seca en en el norte de Baja California y California; estas regiones presentan un clima tipo mediterráneo con lluvias de invierno como lo muestra la Fig. 4.1.1.

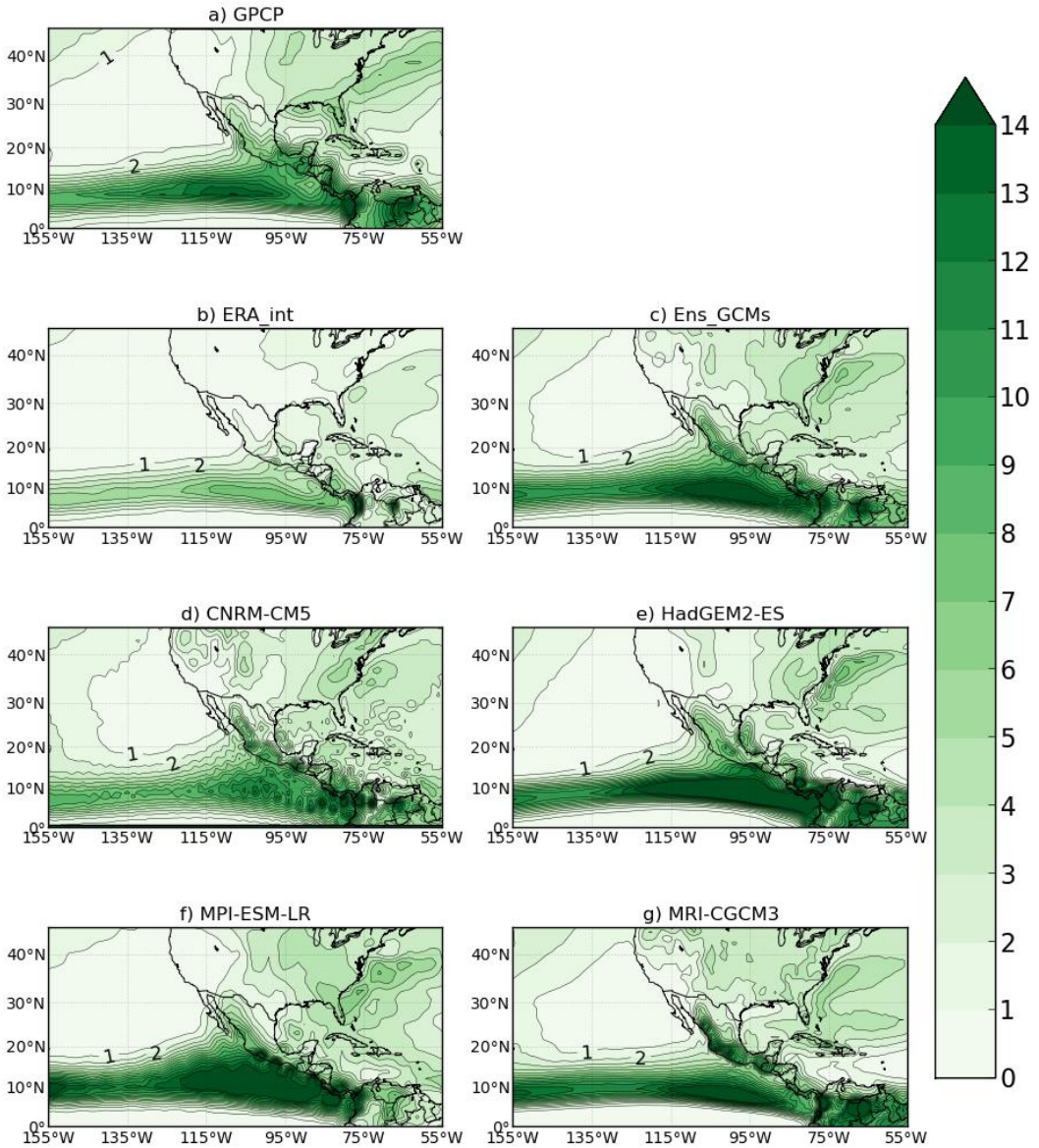

Figura 4.1.2. Precipitación promedio (mm/d) de verano (JJA) durante 1979-2005.

4.2 Temperatura superficial (Ts)

La Fig. 4.2.1 muestra la Ts de invierno (DEF) del ERSST (datos de satélite), del ERA-int, el ENS_GCMs y los 4 modelos individuales. Los datos el ERSST muestran una pequeña región con temperatura mayor a 27ºC en la costa sur del Pacífico Mexicano, la cual es bien capturada por los datos del ERA-int. El ENS_GCMs también muestra esa región cálida, pero es más extensa que la de los datos observados. La isoterma de 24ºC la reproducen bien todas las bases de datos utilizadas. En la parte continental, todos los modelos logran capturar la presencia de las sierras y el altiplano mexicano, las cuales se reflejan en una cuña con menores temperaturas superficiales que bordea a las dos grandes sierras, la Sierra Madre Occidental y la Oriental.

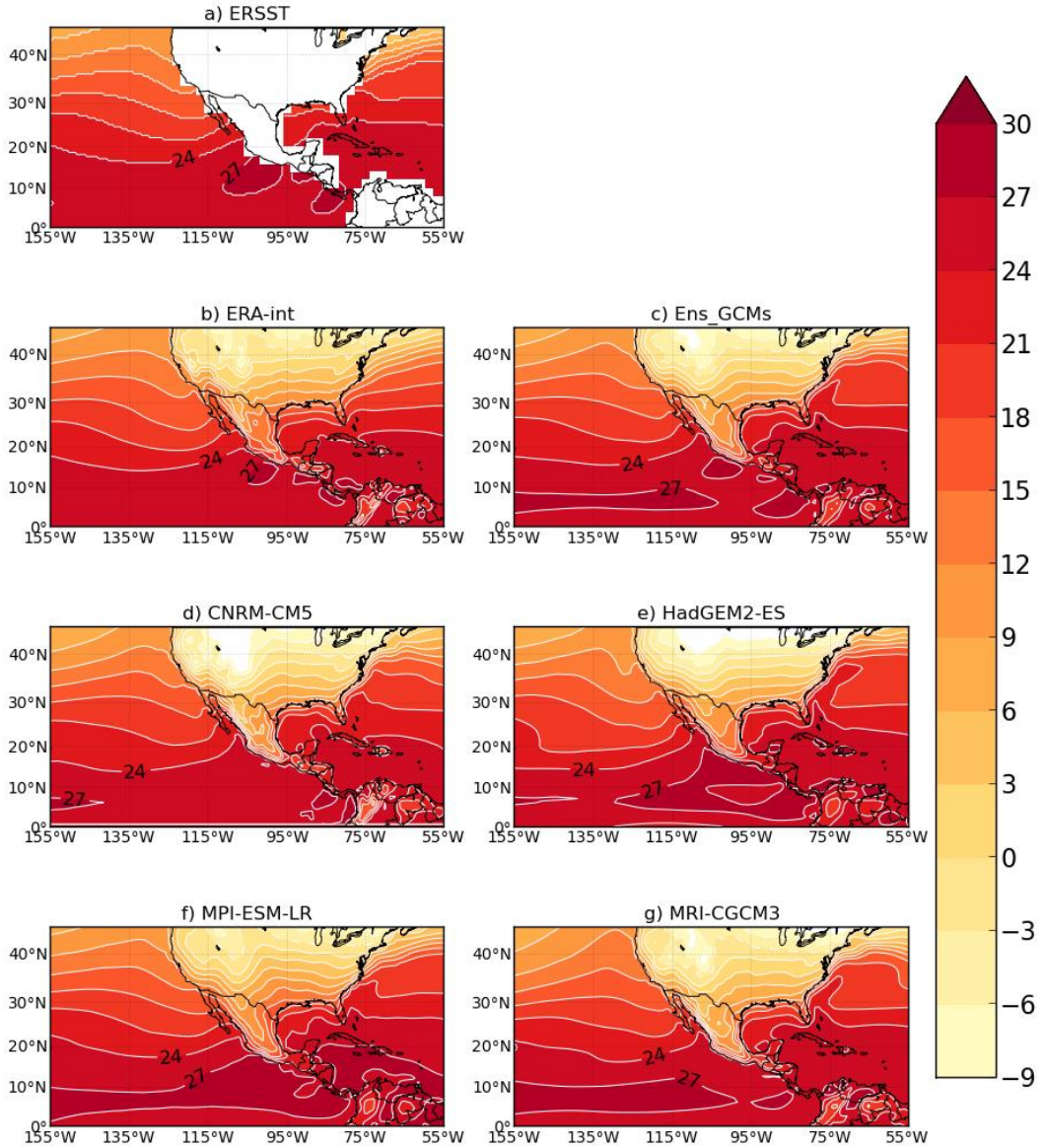

Figura 4.2.1. Temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de invierno (DEF) durante 1979-2005.

El verano se caracteriza por una expansión de la alberca de agua cálida del mar, con temperaturas superficiales del mar (TSM) > 28ºC en ambas costas de México. El ERA-int muestra una alberca cálida muy pequeña en el Pacífico Oriental Tropical lo que podría ser una de las causantes de la poca lluvia que genera este reanálisis durante el verano. El Ens_GCMs simula bastante bien el tamaño de las albercas en los dos océanos. El MPI simula una alberca demasiado grande consistente con una ZCIT muy intensa y más lluvia en las costas del Pacífco Mexicano (Fig. 4.1.2); mientras que los otros modelos tienen una alberca cálida en el Atlántico Norte demasido fría, lo cual es consistente con otros estudios (Kozar y Misra 2013; Martinez-Sanchez y Cavazos 2014). Una alberca cálida más fría en el AN puede reflejarse en un anticiclón del Atlántico Norte más intenso, sin embargo en la Fig. 4.3.1 no se observa que este aniciclón sea mucho más intenso que los datos del ERA-int. En el continente, los valores máximos de TS se observan en la zona del Desierto de Sonora/Arizona en todas las bases de datos. El HadGEM2-ES es el que presenta el mayor calentamiento en esta región, el cual es consistente con la intensa vaguada monzónica (baja presión) que se observa en en el Noroeste de México y el Suroeste de Estados Unidos en la Fig. 4.3.1d.

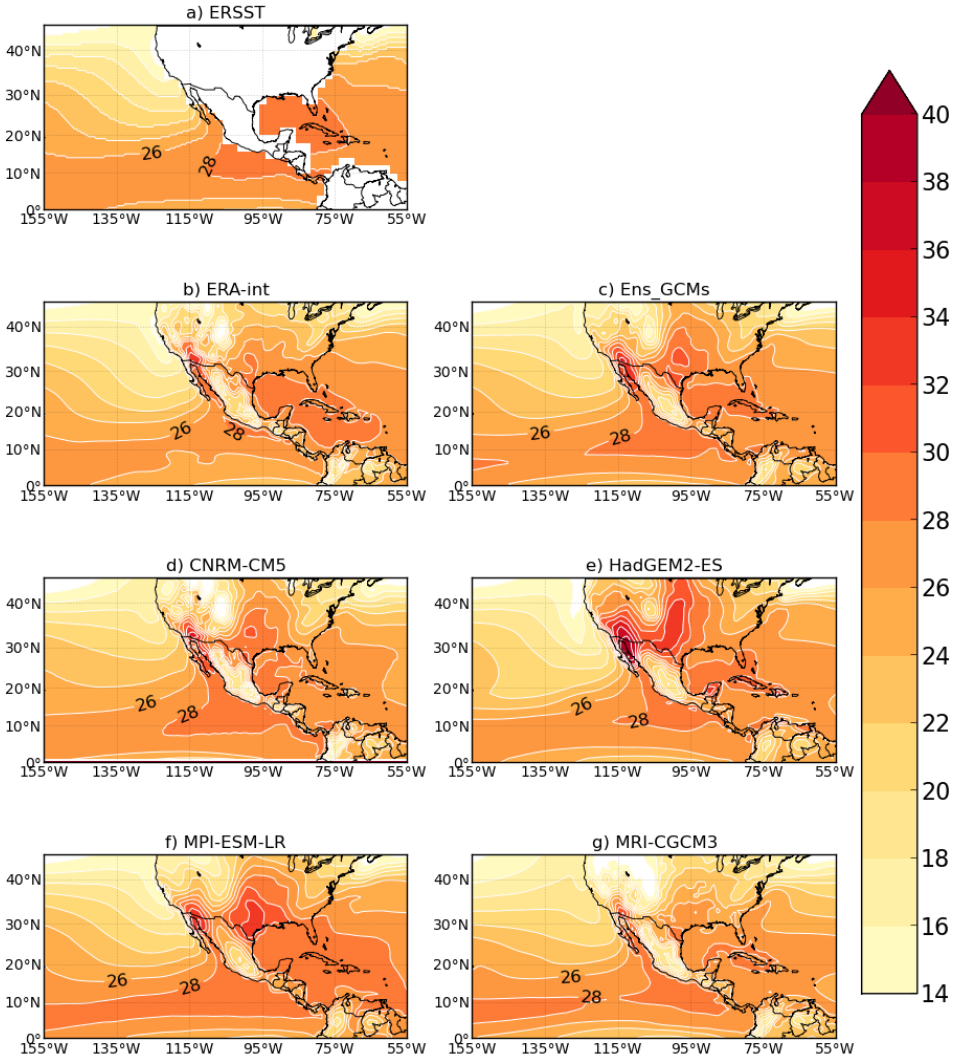

Figura 4.2.2. Temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de verano (JJA) durante 1979-2005.

4.3. Presión a nivel del mar (Psl)

La Fig. 4.3.1 muestra los patrones promedio de la presión a nivel del mar (Psl) durante el verano (JJA) en la región de estudio. El verano se caracteriza por un anticiclón del Pacífico Norte intenso (1024 mb), el anticiclón del Atlántico Norte generalmente un poco más débil que el del Pacífico, y la vaguada monzónica en el noroeste de México que es una extensión de la ZCIT del Pacífico Oriental Tropical, como se ve en los datos del ERA-int (Fig. 4.3.1a). Los anticiclones son bien simulados por los MCG, pero la vaguada varía de acuerdo al modelo. En particular, la vaguada del HadGEM2-ES es demasiado intensa debido posiblemente a un contraste térmico océano-continente muy intenso, como se observó en la sección anterior. Esta característica, sin embargo, no hizo que el HadGEM2-ES sea más lluvioso que el Ens-GCMs (Fig. 4.1.2c), como era de esperarse cuando existen contrastes térmicos intensos (p. ej., Turrent y Cavazos 2009; Torres-Alavez et al. 2014), por lo que existen otros factores que modulan la precipitación regional.

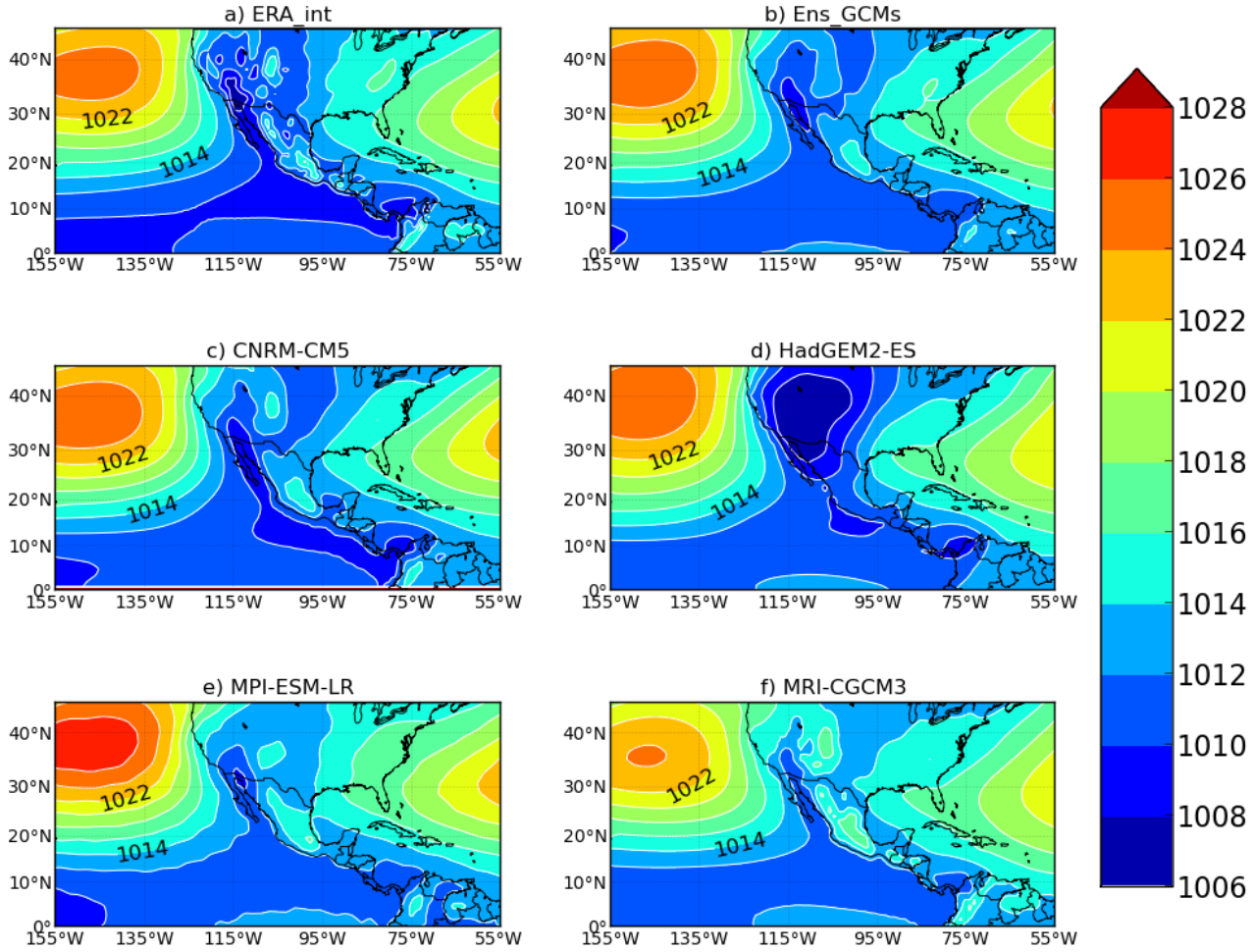

Figura 4.3.1. Presión a nivel del mar promedio (mb) de verano (JJA) durante 1979-2005.

El invierno se caracteriza por la migración hacia el sur y hacia el oeste de la ZCIT (Fig. 4.1.1); los dos anticiclones semipermanentes también migran hacia el sur dando lugar a la temporada seca del año. Esto se observa claramente en el patrón invernal de la Psl de la Fig. 4.3.2, en donde casi todo el país está dominado por altas presiones (> 1013 mb). Todos los modelos simulan adecuadamente la posición e intensidad de las bajas y altas presiones; el HadGEM2-ES es el que simula las bajas y altas presiones más intensas; en particular, este modelo (Fig. 4.3.2.d) es el único que simula adecuadamente la isobara de 1010 mb que muestra el ERA-int a lo ancho del Pacífico Oriental; esta extensa baja presión cerca del ecuador en el HadGEM2-ES se traduce en la ZCIT más lluviosa del invierno de acuerdo a los MCG (Fig. 4.1.1e). El ERA-int como ya lo hemos visto, aunque simula condiciones de circulación favorables para generar lluvia, tiene problemas para precipitar, posiblemente tiene problemas con las parametrizaciones de nubes como lo sugirieron Torres-Alavez et al. 2014.

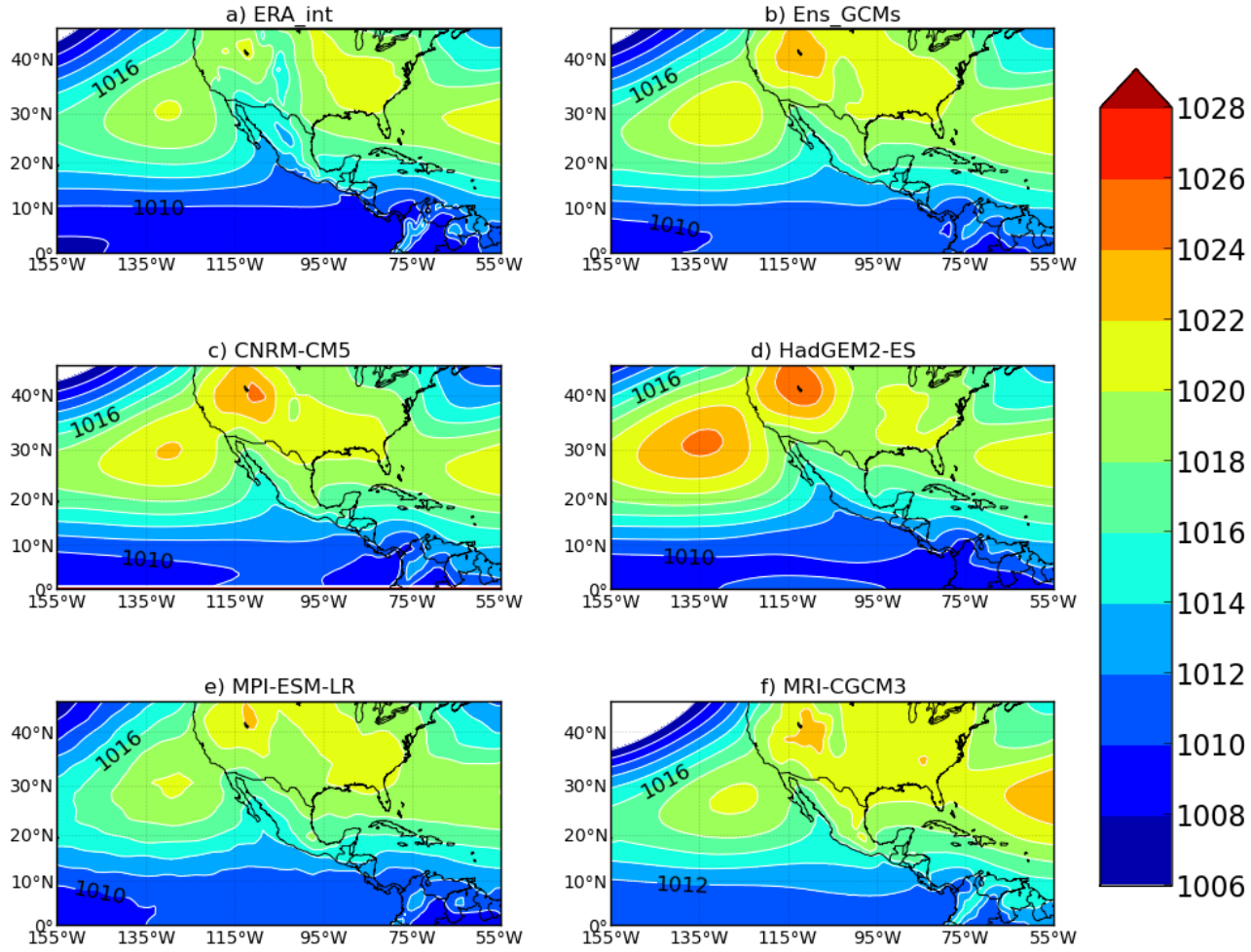

Figura 4.3.2. Presion a nivel del mar (mb) de invierno (DEF) durante 1979-2005.

4.4. Viento zonal (Uas)

Las zonas tropicales del país se caracterizan por la influencia de los vientos alisios (vientos negativos del este) durante el invierno (Fig. 4.4.1a) y el verano (Fig. 4.4.1b), mientras que el subtrópico y el altiplano mexicano son influenciados por los vientos del oeste (valores positivos) durante el invierno. Los vientos alisios más intensos tanto en invierno como en verano se observan en el Mar Caribe, cerca de la zona que se caracteriza por el jet de bajos niveles del Caribe. Todas las bases simulan adecuadamente la posición e intensidad de los alisios del Caribe con valores menores a -8 m/s. Esta banda de los alisos corresponde a la parte sur del anticiclón del Atlántico Norte.

Al entrar el verano el océano y el continente se calientan y los vientos alisios se debilitan especialmente en la región de la ZCIT; la vaguada monzónica genera una circulación ciclónica que favorece la entrada de humedad del Pacífico hacia el continente, lo cual se refleja en los valores positivos del viento zonal de JJA en las costas del Pacífico Mexicano y es consistente con los patrones de Psl (Fig. 4.3.1) y Ts (Fig. 4.2.2). Todas las bases simulan adecuadamente el viento zonal, aunque no se observa un cambio significativo en la intensidad de los alisios del Caribe de invierno a verano.

a) DEF: Viento zonal (Uas) **b) JJA: Viento zonal (Uas)**

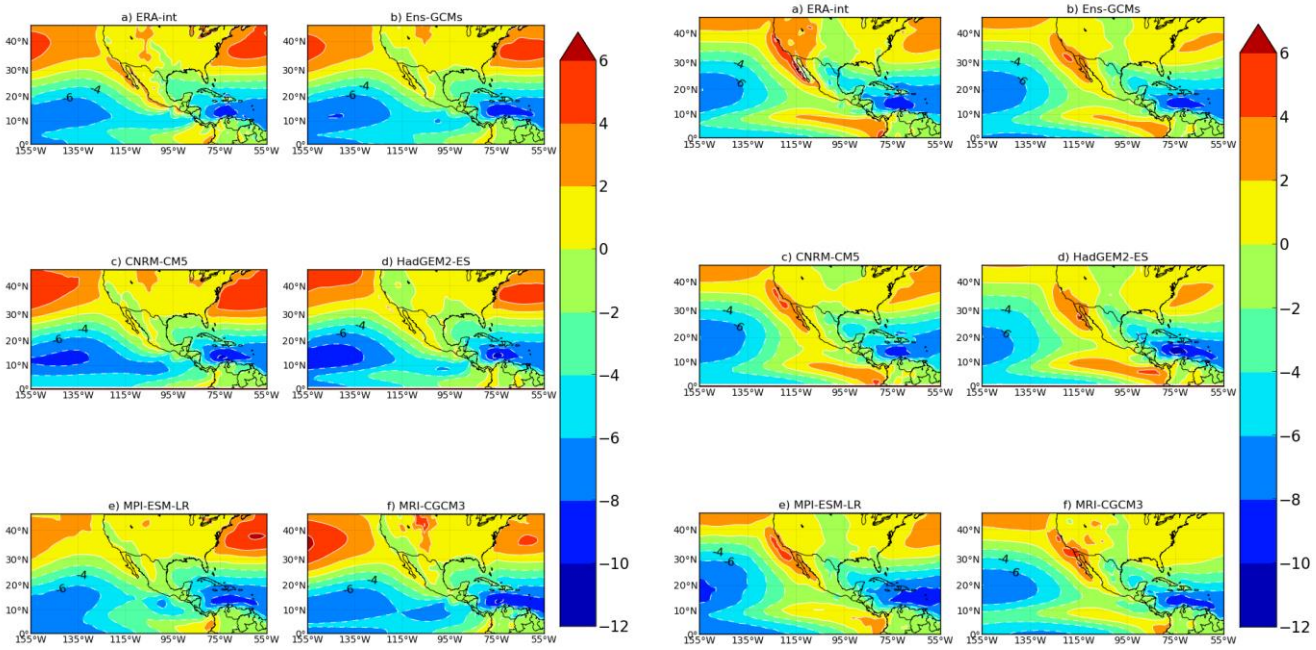

Figura 4.4.1. Viento zonal superficial promedio (m/s) en superficie de invierno (DEF) y de verano (JJA) durante 1979-2005.

4.5. Viento meridional (Vas)

El viento meridional más significativo que se observa en la Fig. 4.5.1 es la parte sur del anticiclón del Pacifico Norte, el cual se caracteriza por vientos del noroeste, tanto en invierno como en verano. En verano el anticiclón se intensifica y migra hacia el norte como se ve claramente en los patrones de la Psl (Fig. 4.3.1), en respuesta al calentamiento continental (Fig. 4.2.2) y a la migración de la celda de Hadley. Cerca del Ecuador se observan vientos del sur (valores positivos) en el verano lo que indica la migración de la ZCIT hacia el norte en esta temporada del año.

a) DEF: Viento meridional (Vas) **b) JJA: Viento meridional (Vas)**

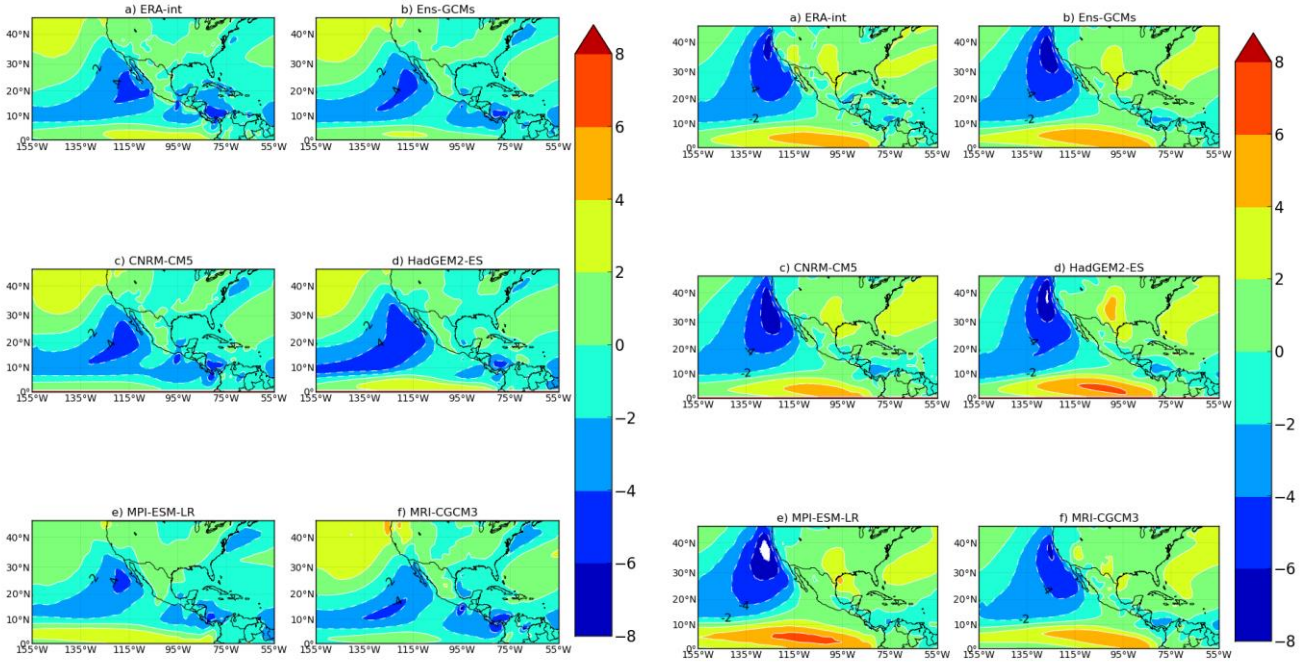

Figura 4.5.1. Viento meridional superficial promedio (m/s) en superficie de invierno (DEF) y verano (JJA) durante 1979-2005.

4.6. Ciclo anual y métricas de variables atmosféricas en el SE de México

Una característica del ciclo anual de la precipitación del sur y sureste de México (Fig. 3.2) es la sequía de medio verano o canícula que ocurre entre julio y agosto (Magaña et al. 1999). La Fig. 4.6.1 muestra la precipitación observada de acuerdo al CRU (datos de estaciones) con valores máximos cerca de 10 mm/d en junio y casi 12 mm/d en septiembre. Este patrón es capturado bastante bien por el GPCP (datos de satélite), aunque subestima ligeramente la lluvia de verano. El reanálisis del ERA-int es el más seco de todas las bases, característica que también se observa claramente en los patrones espaciales de invierno y verano de todo el dominio estudiado (Figs. 4.1.1 y 4.1.2) y en el error de la Tabla 4.6.1b, el cual es el más grande de todos; además, el ERA-int también subestima fuertemente la variabilidad de la precipitación (Tabla 4.6.1a) porque muestra una Std = 1.20 mm/d, mientras que la del GPCP es 3.43 m/d. Este problema del ERA-Int fue documentado por Torres-Alavez y Cavazos (2014) para el caso del monzón. El Ens_GCMs captura muy bien el patrón bimodal de la precipitación, aunque con una subestimación del orden de 4 mm/d durante el verano; esto era de esperarse ya que la región tiene una topografía compleja y es afectado por sistemas sinópticos y de mesoescala como las ondas del este y ciclones que posiblemente no son capturados por los MCG debido a su resolución burda (Tabla 1.1). El modelo que mejor captura la bimodalidad (Fig. 4.6.1) y la variabilidad (Std, Tabla 4.6.1a) es el HadGEM2-ES, por lo menos captura muy bien el pico de junio. El modelo que muestra el menor error en la precipitación mensual (comparado con el GPC) es el MRI-CGCM3, como lo muestra la Tabla 3.6.1b.

El ciclo anual de la temperatura superficial (Ts) en la zona continental del Sureste de México (Fig. 3.2) también muestra una bimodalidad, pero con un retraso de un mes (Fig. 4.6.1) con respecto a la precipitación, como es típico en esta zona (Magaña et al. 1999) y en otras regiones del país como el Noroeste de México donde las altas Ts preceden a las lluvias monzónicas de junio (Turrent y Cavazos 2009, Torres-Alavez y Cavazos 2014). El máximo calentamiento continental que ocurre en mayo es uno de los varios mecanismos que dan lugar al primer pico de precipitación en junio en el Sureste de México. Magaña et al. (1999) sugieren que un máximo en la TSM de 29°C (en el Pacifico Oriental al sur de México) en abril-mayo se asocia con el primer pico de lluvia en junio. Posteriormente, la lluvia de junio y la nubosidad de la temporada generan un enfriamiento relativo en la superficie durante el periodo de la canícula, con valores mínimos de temperatura en julio (Fig. 4.6.1), el cual se observa claramente en los datos observados y en los MCG. Sin embargo, el Ens-GCMs sobrestima la Ts de todos los meses por aproximadamente 0.75ºC, esto se debe a que el HadGEM2-ES y el MPI sobreestiman significativamente la temperatura de la región. El MRI es el MCG que mejor simula el ciclo anual de Ts en esta región. La sequía de medio verano (canícula) también se refleja en un aumento estacional en la presión superficial (Psl) en julio-agosto (valor máximo relativo) con respecto a mayo y junio; el segundo pico de lluvias en septiembre también se asocia a una disminución de la presión (Fig. 4.6.1). Los MCG simulan adecuadamente el ciclo anual de la Psl, pero tienden a sobrestimarla; el modelo que mejor simula los ciclos anuales de la Psl y de los vientos zonales (Uas) es el HadGEM2-ES, aunque este modelo sobre estima más la Ts que los demás MCG. Los vientos dominantes de esta región tropical son los vientos alisios (vientos del noroeste). Al aumentar la Psl en julio también aumentan los vientos zonales del este, es decir los vientos alisios se intensifican (se hacen más negativos) y esto parece estar asociado con la canícula, como lo sugiere Magaña et al. (1999). Los modelos simulan vientos meridionales más débiles que los observados en el ERA-int todo el verano. El hecho de que el ERA-int tenga los vientos tan fuertes podría ser la causa de que sea tan seco en la región y en todo el dominio.

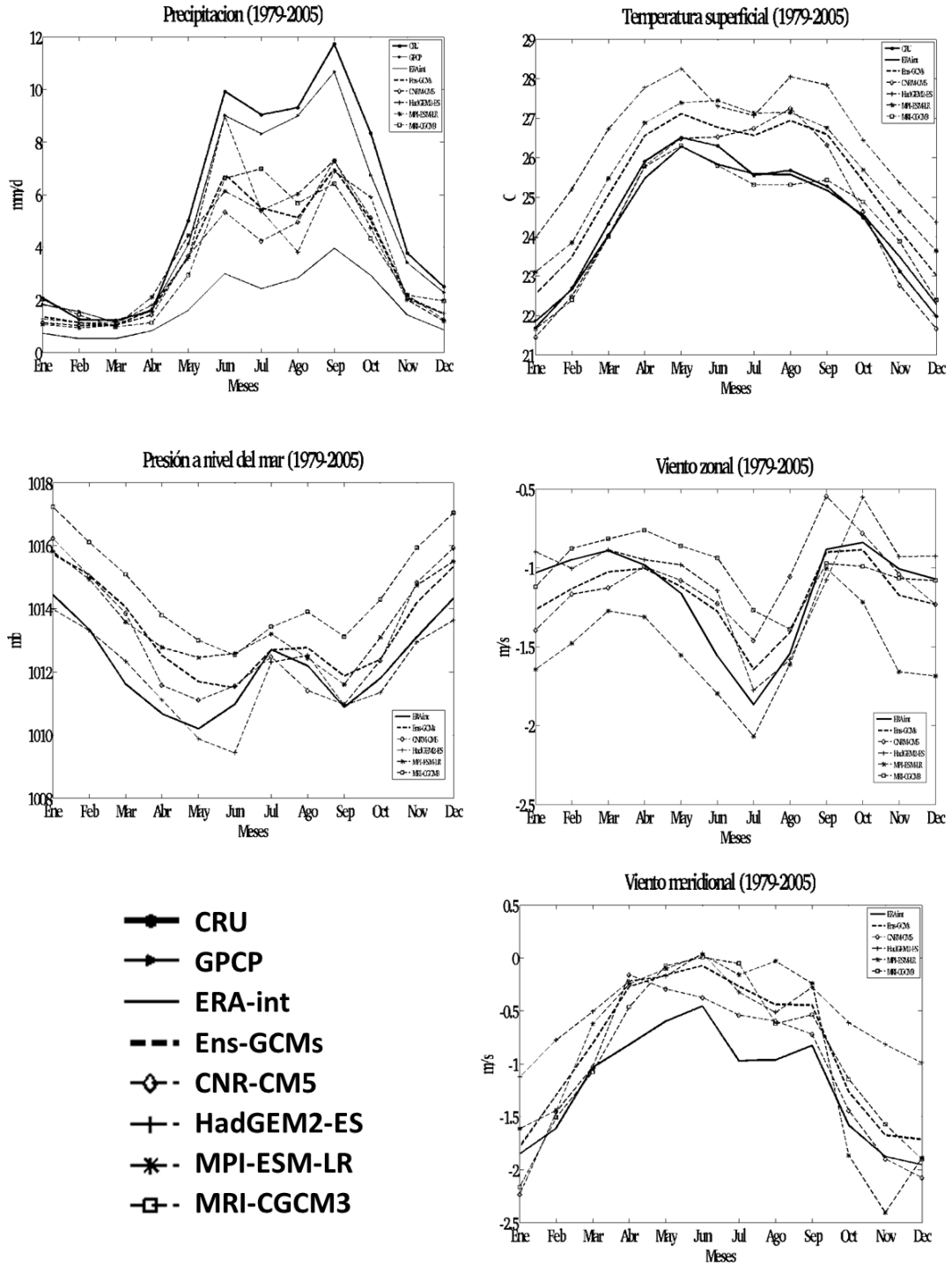

Figura 4.6.1. Ciclo anual promedio de variables atmosféricas en el sureste mexicano (Fig. 3.2) durante 1979-2005, de acuerdo a los datos observados (CRU, GPCP o ERA-int) y a los MCG. La variables son: precipitación (mm/d), temperatura superficial (Ts, ºC), presión a nivel del mar (Psl, mb), y vientos zonal (Uas, este y oeste) y merdional (Vas, norte y sur); los vientos del oeste y del sur son positivos. El CRU se usa para validar temperatura y precipitación; el GPCP se usa para validar precipitación y el ERA-int para validar las demás variables atmosféricas de los MCG.

Tabla 4.6.1. Métricas de validación en el Sureste de México de las variables atmosféricas observadas y de los MGC. (a) Desviacion estándard y (b) RMSE (raíz del error medio cuadrático) a escala mensual. El RMSE de la precipitación se obtuvo con respecto a los datos observados del GPCP (azul) y el de las otras variables atmosféricas se obtuvo con respecto al ERA-int (azul). Se resaltan en negritas la Std de la precipitación que se acerca más a la del GPCP, y los errores más pequeños.

a) Desviacion estándar

Base o MCG	P (mm/d)	Psl (mb)	Tas (oC)	Uas (m/s)	Vas (m/s)
CRU (Obs)	3.76		1.63		
ERA-int (Obs)	1.20	4.04	1.46	1.15	4.00
GPCP (Obs)	**3.43**				
Ens-GCMs	2.29	1.54	1.68	0.46	0.65
CNRM-CM5	2.22	1.89	2.11	0.52	0.74
HadGEM2-ES	**2.70**	1.40	1.61	0.52	0.41
MPI-ESM-LR	2.44	1.33	1.65	0.50	0.89
MRI-CGCM3	2.33	1.55	1.55	0.45	0.74

b) Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Base o MCG	P (mm/d)	Psl (mb)	Tas (oC)	Uas (m/s)	Vas (m/s)
ERA-int (Obs)	3.64				
Ens-GCMs	**2.49**	4.04	1.30	**1.76**	**2.36**
CNRM-CM5	3.06	4.21	1.40	1.79	2.43
HadGEM2-ES	3.21	**3.74**	2.45	1.96	2.38
MPI-ESM-LR	2.74	4.23	1.65	1.93	2.47
MRI-CGCM3	2.57	4.75	**1.19**	1.77	2.44

5. Proyecciones de cambio climático para México durante el siglo 21

En esta Sección se presentan y discuten las proyecciones de cambio climático bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (bajas y altas emisiones, respectivamente) para todo el dominio y para el caso de estudio del Sureste de México (Fig. 3.2). Se presentan resultados para el periodo 2015-2039 y para el 2075-2099; si los cambios proyectados con el escenario RCP4.5 para alguna variable son muy pequeños, sólo se discutirán los correspondientes al RCP8.5. Todas las anomalías de cambio son con respecto al periodo histórico de 1979-2005. Los resultados de cada variable se pueden comparar con los correspondientes al periodo histórico en la Sección 4.

5.1. Proyecciones de cambio en la precipitación para el periodo 2015-2039

La Fig.5.1.1 muestra los posibles cambios en la precipitación de invierno (DEF) bajo el escenario RCP8.5 para cada MCG (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3) y el ensamble de los 4 (Ens-GCMs). Invierno es la temporada seca en toda la región caracterizada por una ZCIT al sur de 10N; el Ens-GCMs (Fig. 5.1.1a) indica que la ZCIT podría estar localizada un poco más al sur de lo normal lo que podría generar reducciones de 0 a -0.5 mm/d de precipitación en México, con excepción de la zona fronteriza norte del país, en donde se podrían ver incrementos en la lluvia invernal de 0 a +0.5 mm/d. Este incremento podría estar asociado a la influencia de la corriente de chorro como lo han sugerido algunos estudios (Torres-Alavez et al. 2014, Polade et al. 2014). El HadGEM2 es el modelo que presenta el mayor cambio en la intensidad y posición de la de la ZCIT.

Durante el verano (JJA; Fig. 5.1.2) del futuro cercano (2015-2013) también se esperan reducciones de precipitación en el país del mismo orden que en invierno. La ZCIT sigue estando por debajo de 10N pero más hacia el noreste que en invierno, como ocurre en el periodo histórico. Sin embargo, la ZCIT histórica se localiza a 10N; esta posible migración hacia el sur en el futuro cercano repercutiría en las lluvias del país (0 a -0.5 mm/d). Los modelos HadGEM2 y MRI son los que producen los cambios más grandes en la posición e intensidad de la ZCIT de verano.

A escala anual, las Fig. 5.1.3 y 5.1.4 muestran los cambios esperados en la precipitación anual (%) bajo el escenario RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente; se proyectan pequeños aumentos en la precipitación a nivel nacional (0-10%) principalmente en el noroeste debidos a la lluvia otoñal (no se muestran los cambios de la lluvia de otoño). Torres-Alavez et al. (2014) también reporta cambios similares, pero para 2075-2099 con mayor influencia en las costas del Pacifico Mexicano debido a una migración hacia el norte de la ZCIT y calentamiento del Pacifico subtropical. Esto es consistente con lo que se muestra en la siguiente sección para finales de siglo.

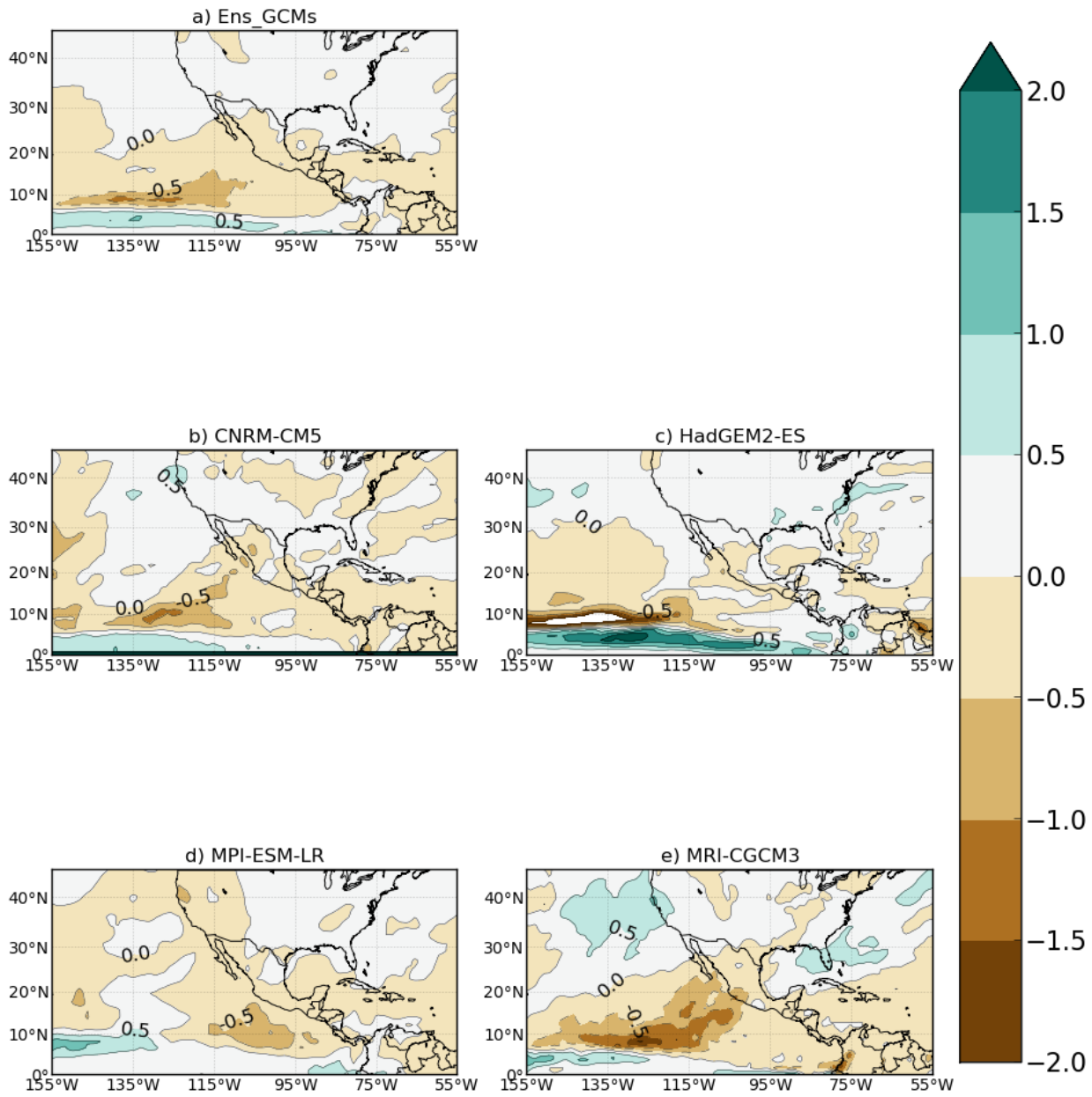

Figura 5.1.1. Anomalías de la precipitación (mm/d) de invierno (DEF) para el escenario RCP8.5 durante 2015-2039 con respecto al periodo histórico 1979-2005.

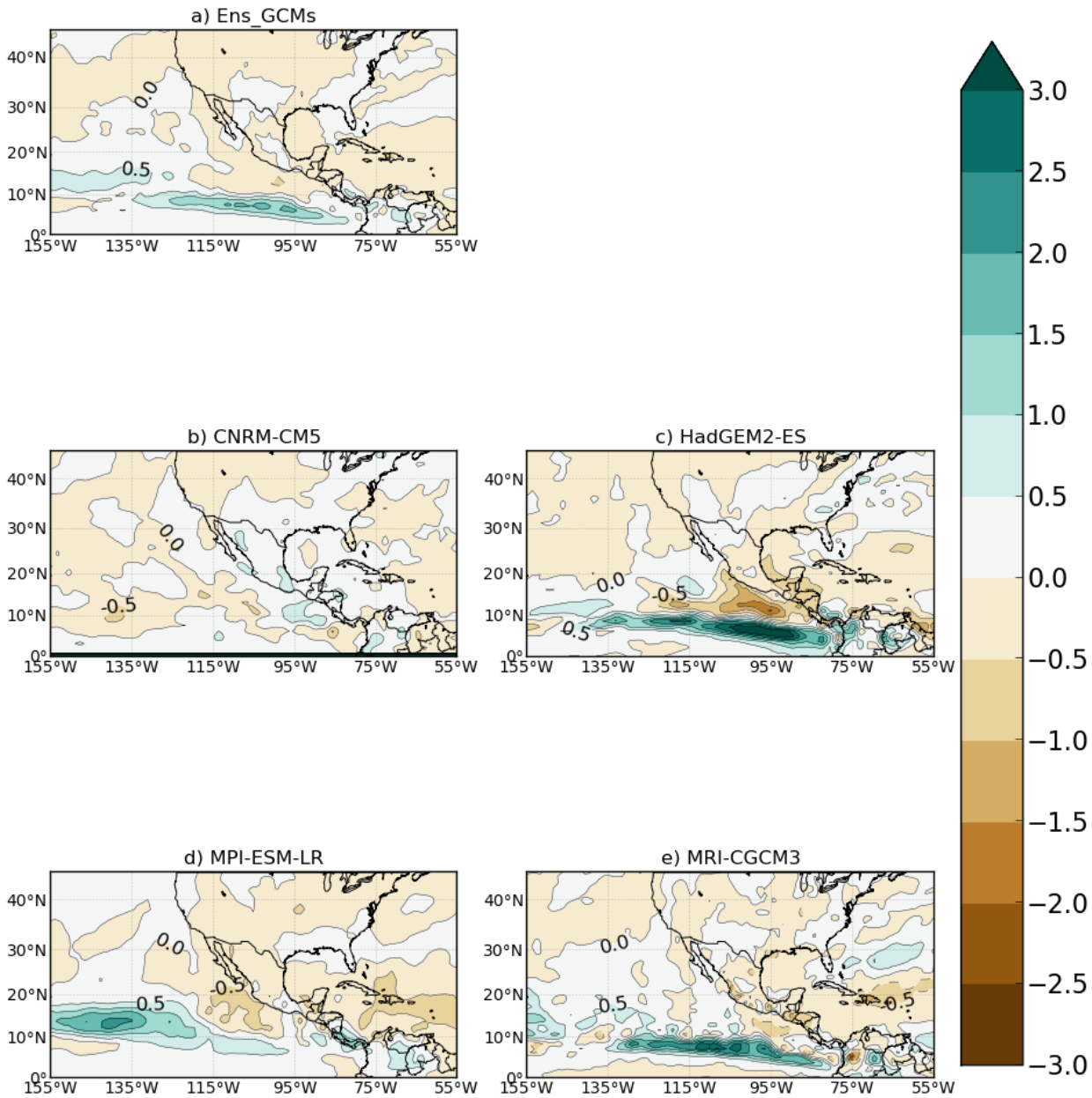

Figura 5.1.2. Anomalías de la precipitación (mm/d) de verano (JJA) para el escenario RCP8.5 durante 2015-2039 con respecto al periodo histórico 1979-2005.

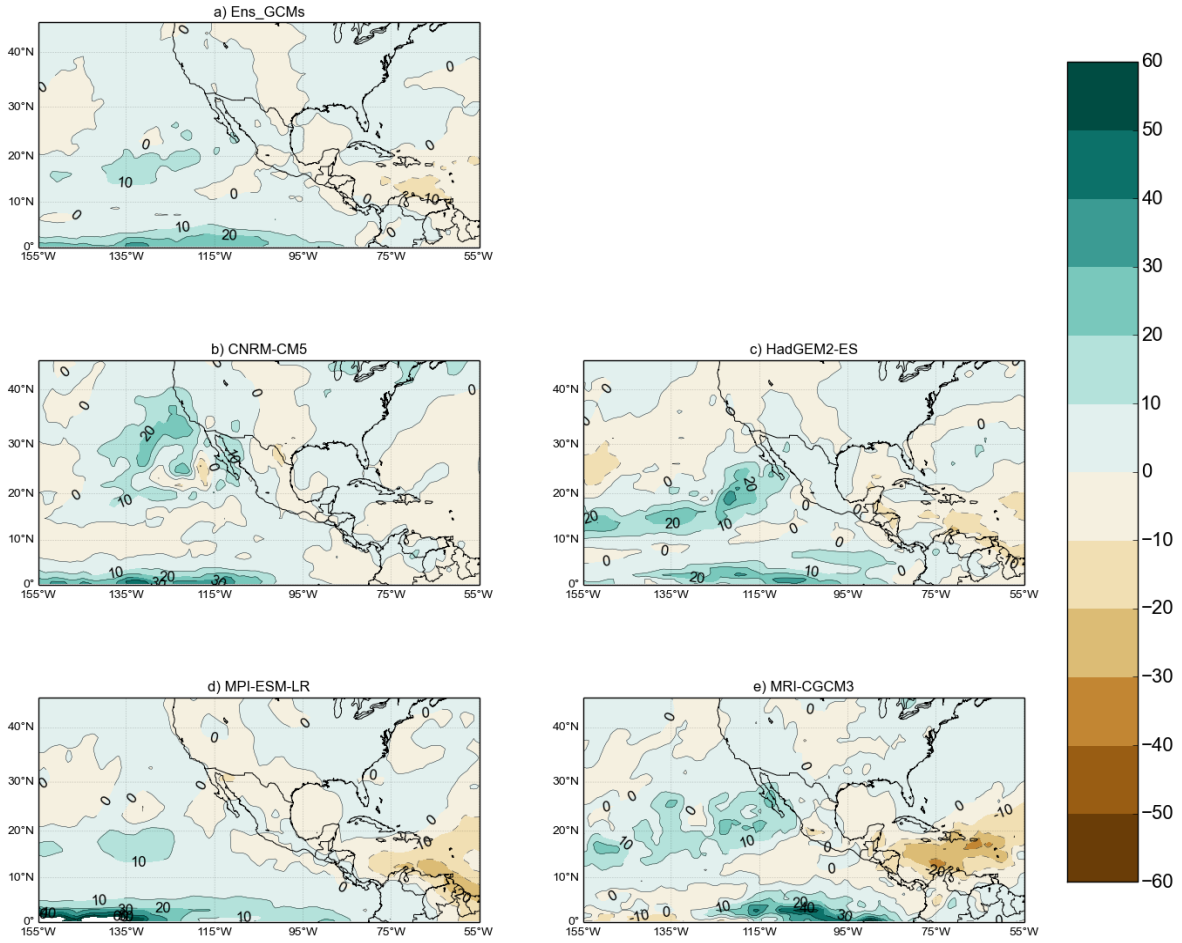

Figura 5.1.3. Anomalía de precipitación anual en porciento (%) para el escenario RCP4.5 durante 2015-2039.

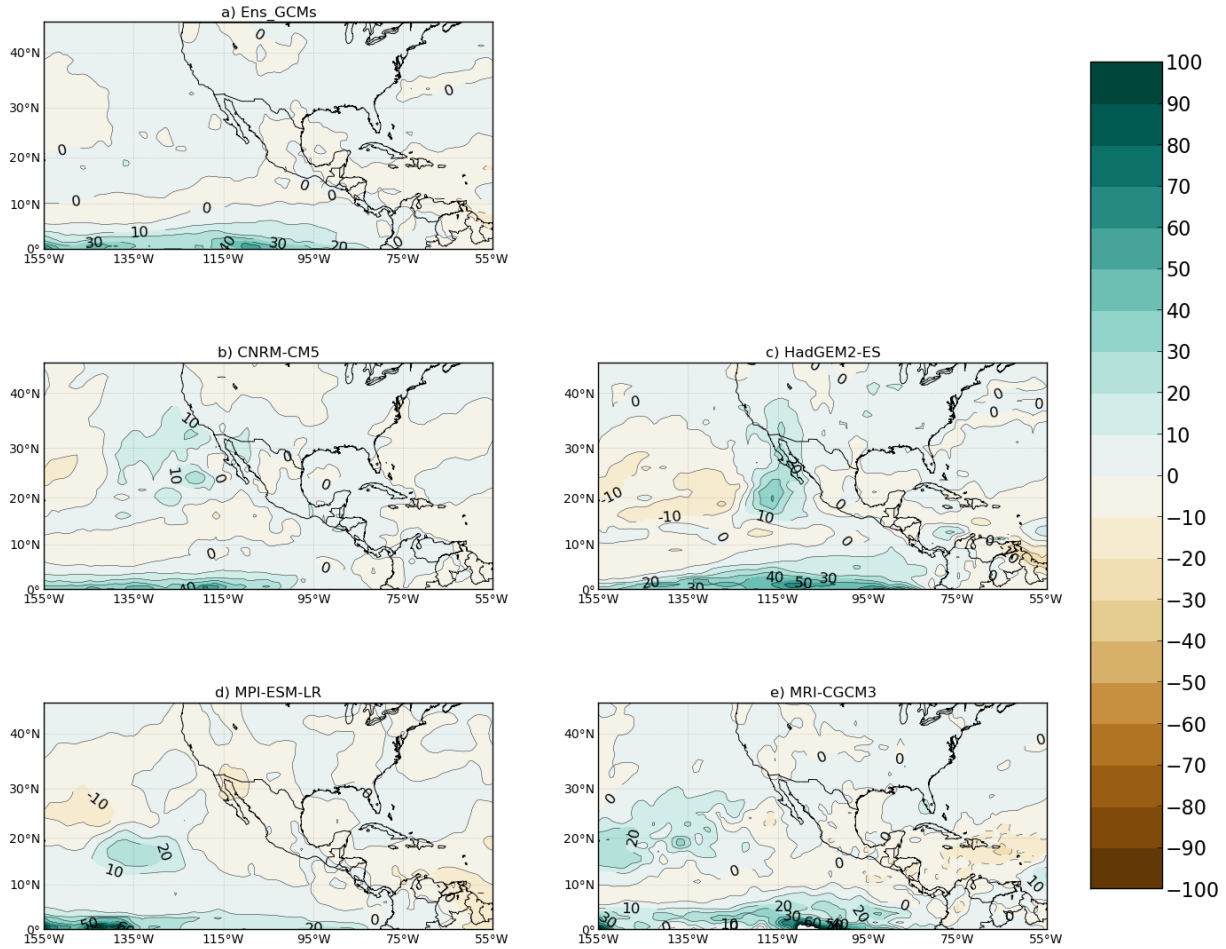

Figura 5.1.4. Anomalía de precipitación anual promedio en porciento (%) para el escenario RCP8.5 durante 2015-2039.

5.2. Proyecciones de cambio en la precipitación para el periodo 2075-2099

La Fig.5.2.1 muestra las anomalías de invierno para el escenario de altas emisiones (RCP8.5) para el futuro lejano (2075-2099). Se esperan cambios negativos en la precipitación invernal en casi todo México (0 a -0.5 mm/d), pero en el extremo Noroeste del país podrían esperarse algunos incrementos. La ZCIT podría intensificarse entre 0 y 5N, ligeramente al sur de su posición histórica (ver Fig. 4.1.1), similar a la posición de un año de El Niño.

Para el verano (Fig. 5.2.2), el ensamble de los 4 MCG muestra a la ZCIT más intensa al sur de 10N y reducciones de hasta 1 mm/d en México. Como en el 2015-2039, el modelo HadGEM2 es el que muestra los cambios más grandes en la ZCIT. La posición anómala de la ZCIT parce cambiar en el otoño cuando podrían ocurrir cambios positivos en la precipitación en México de 0 a 1 mm/d (Fig. 5.2.3), retrasando la terminación del monzón hasta octubre como lo sugieren varios autores (Cook y Seager 2013; Torres-Alavez et al. 2014).

A escala anual se esperan aumentos de precipitación en el Noroeste de México del orden de 0 a +10% y reducciones en el resto del país de 0 a -10%, como lo muestra la Fig. 5.2.4 y la Fig. 5.2.5 para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Los cambios positivos podrían ocurrir principalmente en invierno y otoño.

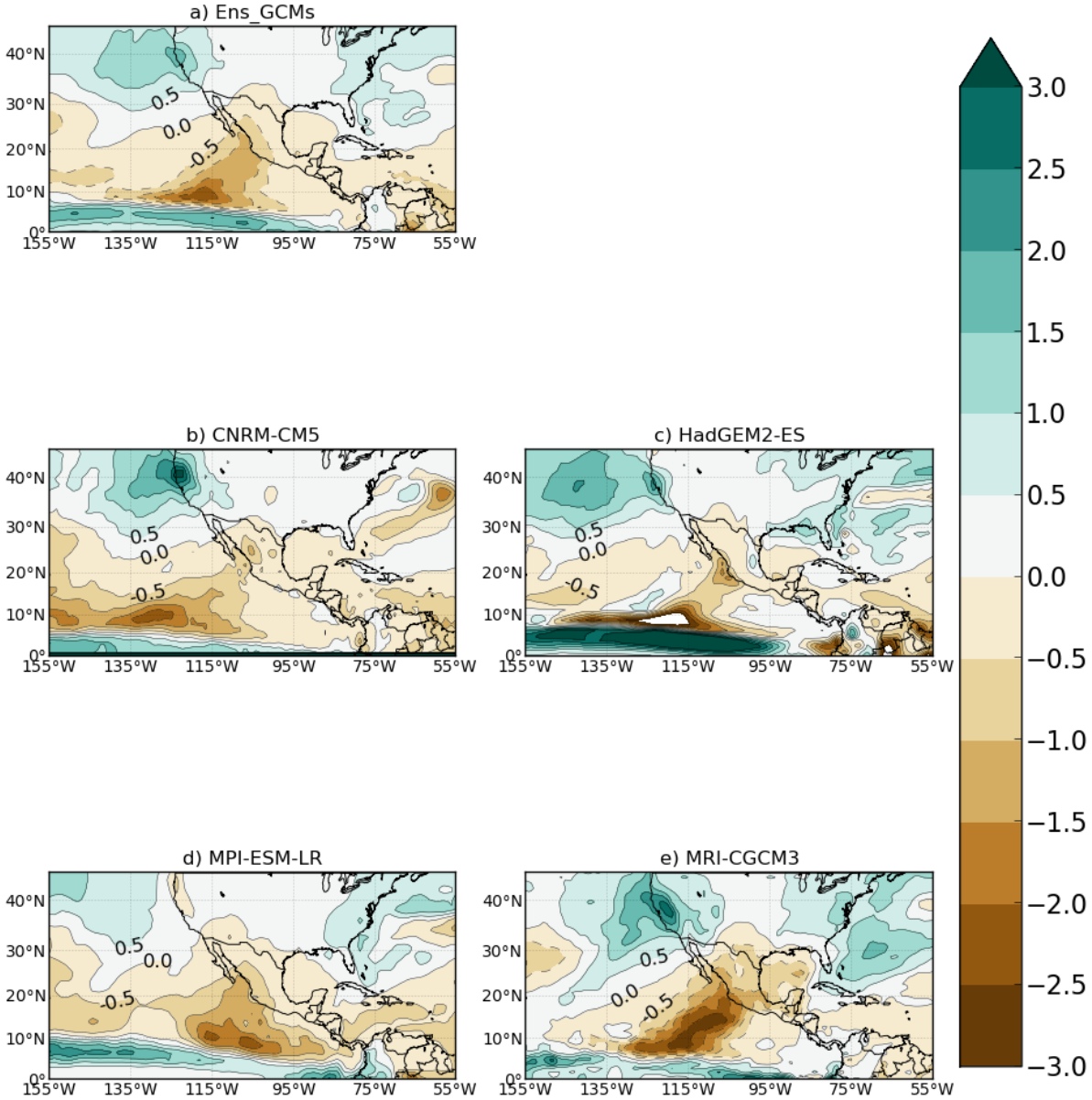

Figura 5.2.1. Anomalías de precipitación (mm/d) de invierno (DEF) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

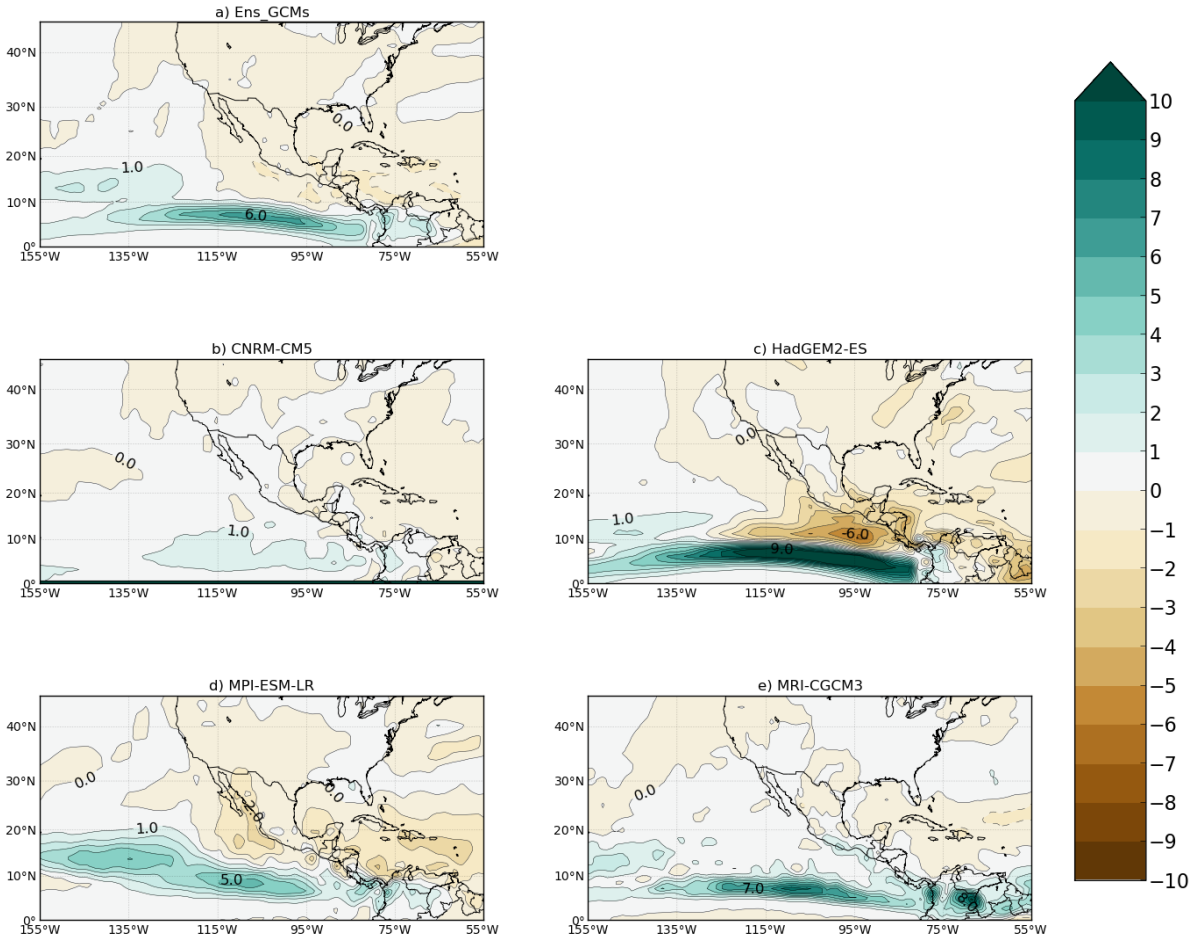

Figura 5.2.2. Anomalías de precipitación (mm/d) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

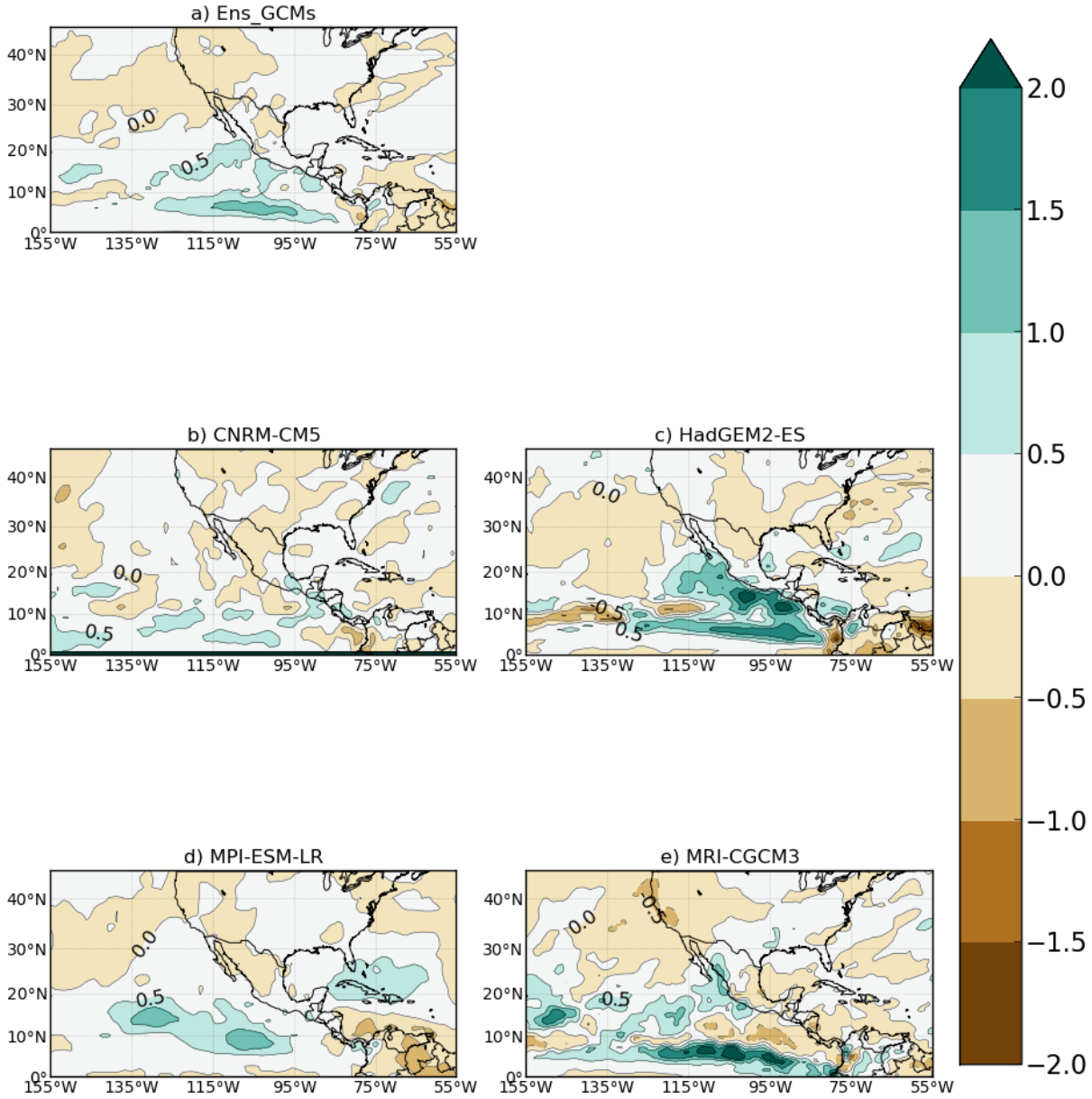

Figura 5.2.3. Anomalías de precipitación (mm/d) de otoño (SON) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

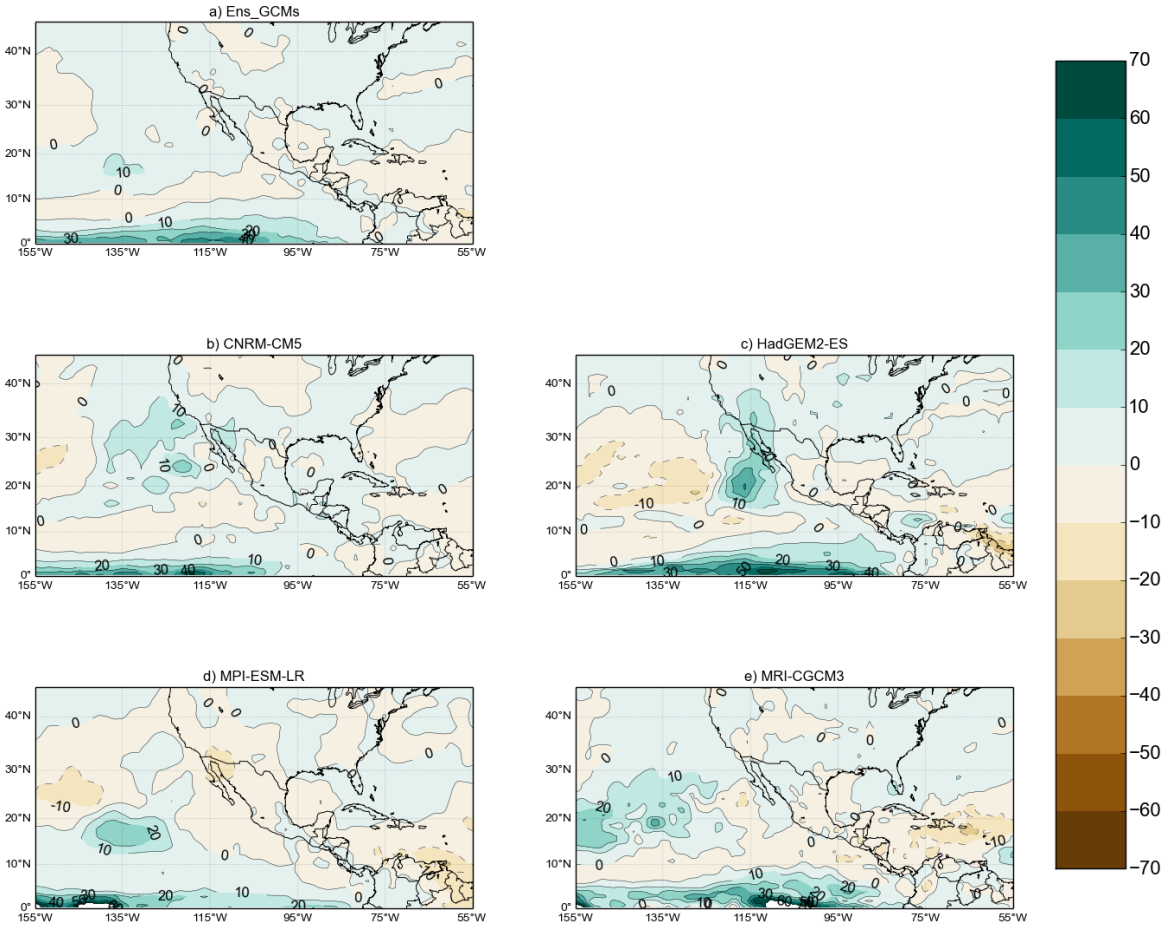

Figura 5.2.4. Anomalía de la precipitación anual promedio (%) bajo el escenario RCP4.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

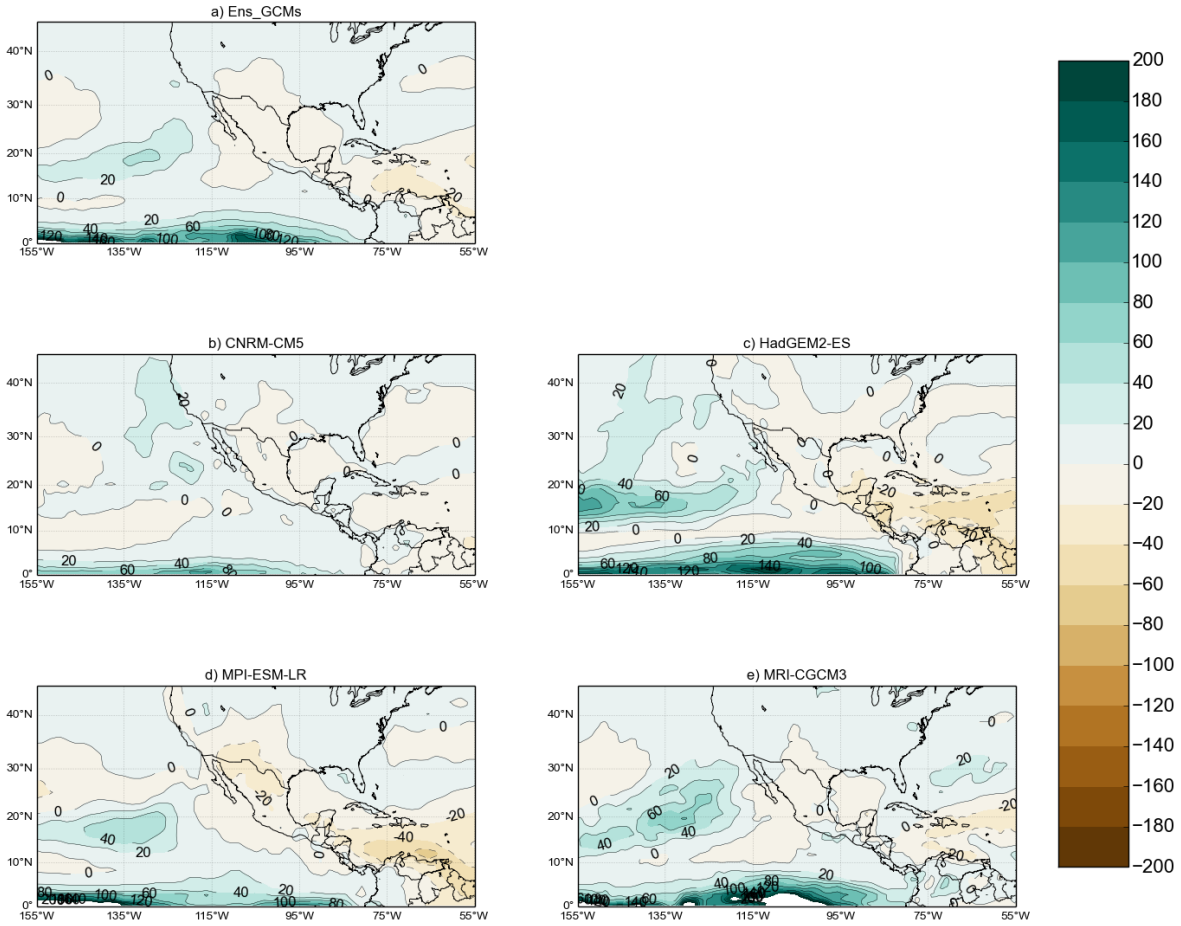

Figura 5.2.5. Anomalía de la precipitación anual promedio (%) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

5.3. Proyecciones de cambio en la temperatura superficial (Ts) para el periodo 2015-2039

Los ensambles de los 4 MCG para los escenarios RCP8.5 de temperatura superficial (Ts) durante el invierno (DEF; Fig. 5.3.1) y verano (JJA; Fig. 5.3.2) muestran cambios pequeños (-0.5 a 0.5 ºC) en México y con fuertes discrepancias entre los 4 modelos, especialmente en verano; HadGEM2 y el MRI proyectan cambios positivos y el CNRM y el MPI cambios negativos de temperatura.

Durante el verano, el HadGEM2 muestra una zona de aumento de temperatura de hasta 2ºC frente a las costas de Baja California, de 1 a 1.5ºC en el Noroeste y Sureste de México y de hasta 3.5ºC en el norte de Estados Unidos. El CNRM muestra aumentos de hasta 4ºC en el norte de Estados Unidos pero para la mayor parte de México sus cambios son de -0.5 a 0ºC.

Durante el verano (Fig. 5.3.2), se observa un posible aumento de hasta 2ºC en las costas frente a Baja California. Todos los modelos reproducen un aumento en esta región, pero el MPI proyecta los incrementos más altos (>4ºC).

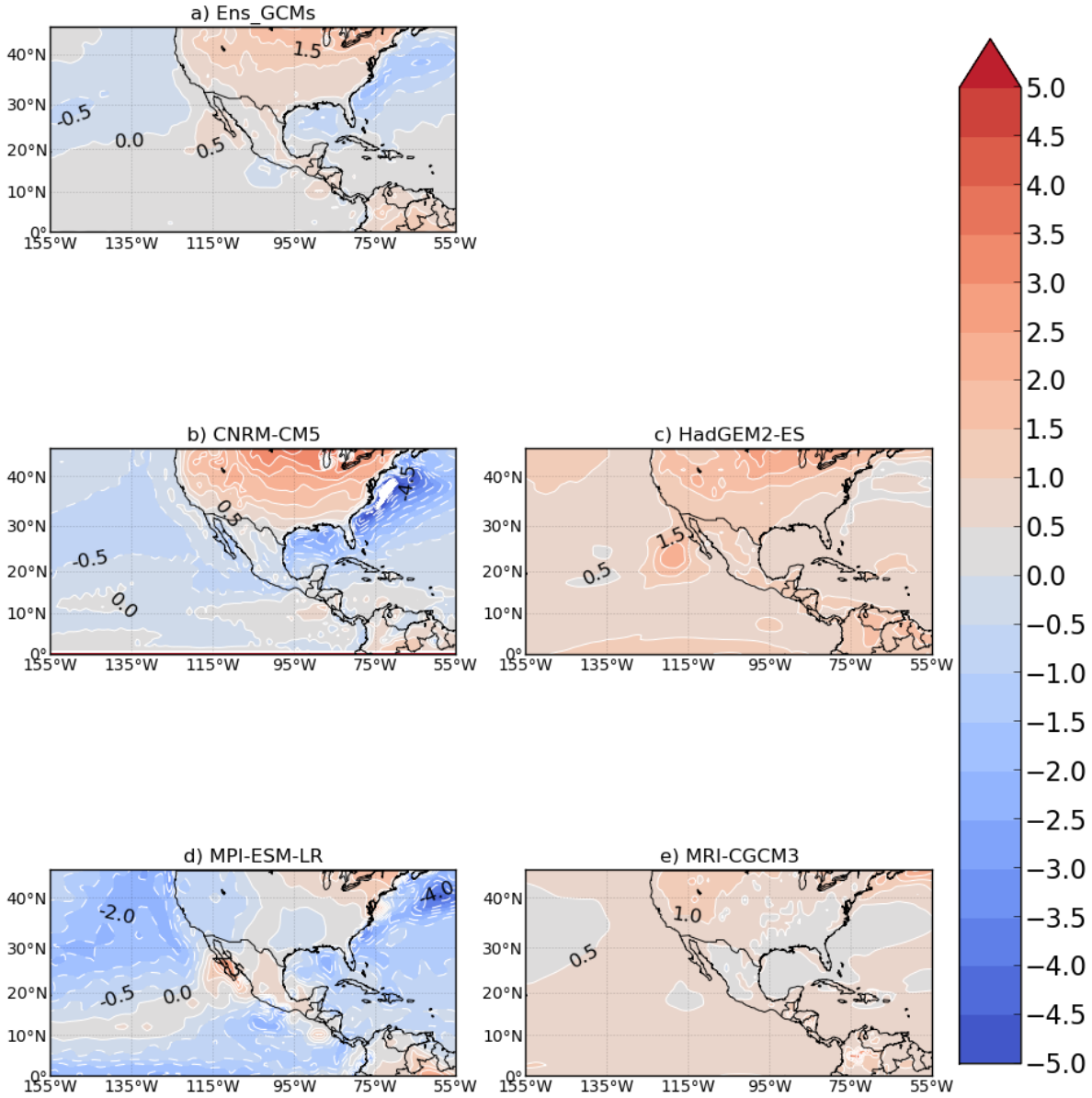

Figura 5.3.1. Anomalía de la temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de invierno (DEF) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2015-2039 con respecto a 1979-2005.

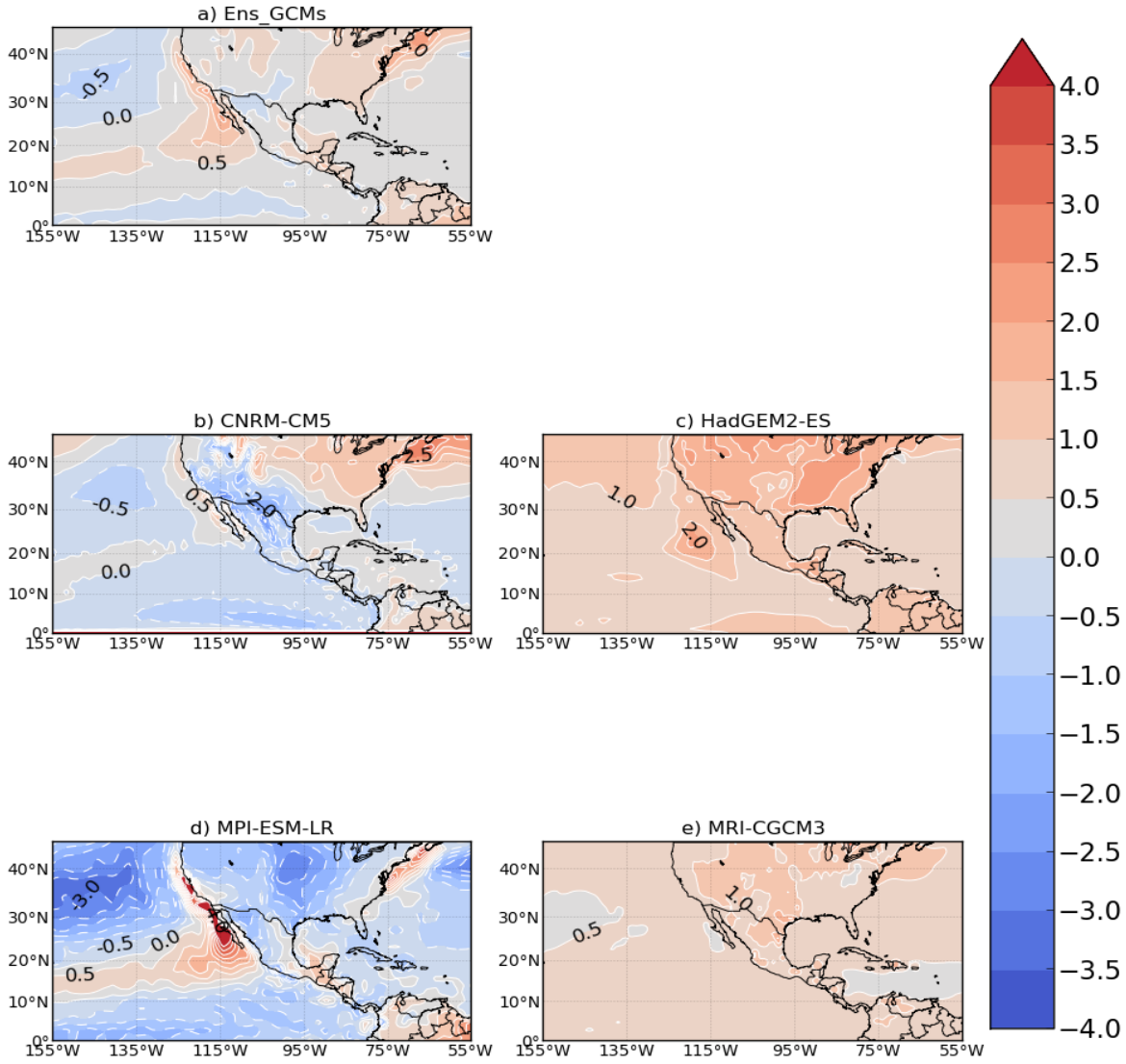

Figura 5.3.2. Anomalía de la temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2015-2039 con respecto a 1979-2005.

5.4. Proyecciones de cambio en la temperatura superficial (Ts) para el periodo 2075-2099

Los escenarios de los modelos para los últimos 19 años del siglo 21 muestran cambios más significativos en la Ts que los proyectados para el futuro cercano (2015-2039). El Ens-GCMs del RCP8.5 de invierno sugiere aumentos de hasta 3ºC para casi toda la República Mexicana y máximas anomalías > 4ºC en Estados Unidos (Fig. 5.4.1). Individualmente el HadGEM2-ES continua siendo el modelo que simula los aumentos de temperaturas más grandes y el MRI-CGCM3 es el modelo que presenta las anomalías más bajas para México.

La proyección de la temperatura superficial promedio de verano para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano (Fig. 5.4.2) sugiere un gran incremento en el tamaño de la alberca de agua cálida en el Pacifico (en el tamaño de la isoterma de 28ºC), mientras que en el lado del Atlántico el tamaño de la alberca es mayor que en el periodo histórico del Ens-GCMs, pero similar en tamaño a los datos observados de satélite, del ERSST. Este patrón espacial del lado del Pacifico sería como el de un año de El Niño intenso, cuando típicamente el verano en México es más seco de acuerdo a estudios de datos observados. En forma consistente, el Ens-GCMs también sugiere reducciones de la precipitación de verano, como se vio en la sección anterior. Los dos modelos que proyectan los incrementos mayores en el tamaño de la alberca son el HadGEM2 y el MRI.

Las anomalías de Ts proyectadas para el verano bajo el escenario RCP8.5 (Fig. 5.4.3) son entre 2.5 y 5ºC para México. El Ens-GCMs muestra aumentos >4ºC en gran parte de Estados Unidos, México y Centro América. El Océano Pacífico podría calentarse más al norte de 10ºN, especialmente entre 10 y 20N, al sur de la posición de la Alta Pacifico, lo que podría debilitarla; la temperatura del Golfo de México podría incrementarse de 2.5 a 3ºC, en menor intensidad que el Pacifico Oriental de tal forma que se presentaría un contraste térmico inverso entre los dos océanos, como se vio en el periodo histórico (Sección 4.2), lo que podría ser responsable en parte de las reducciones proyectadas para la precipitación de verano en México y el Caribe.

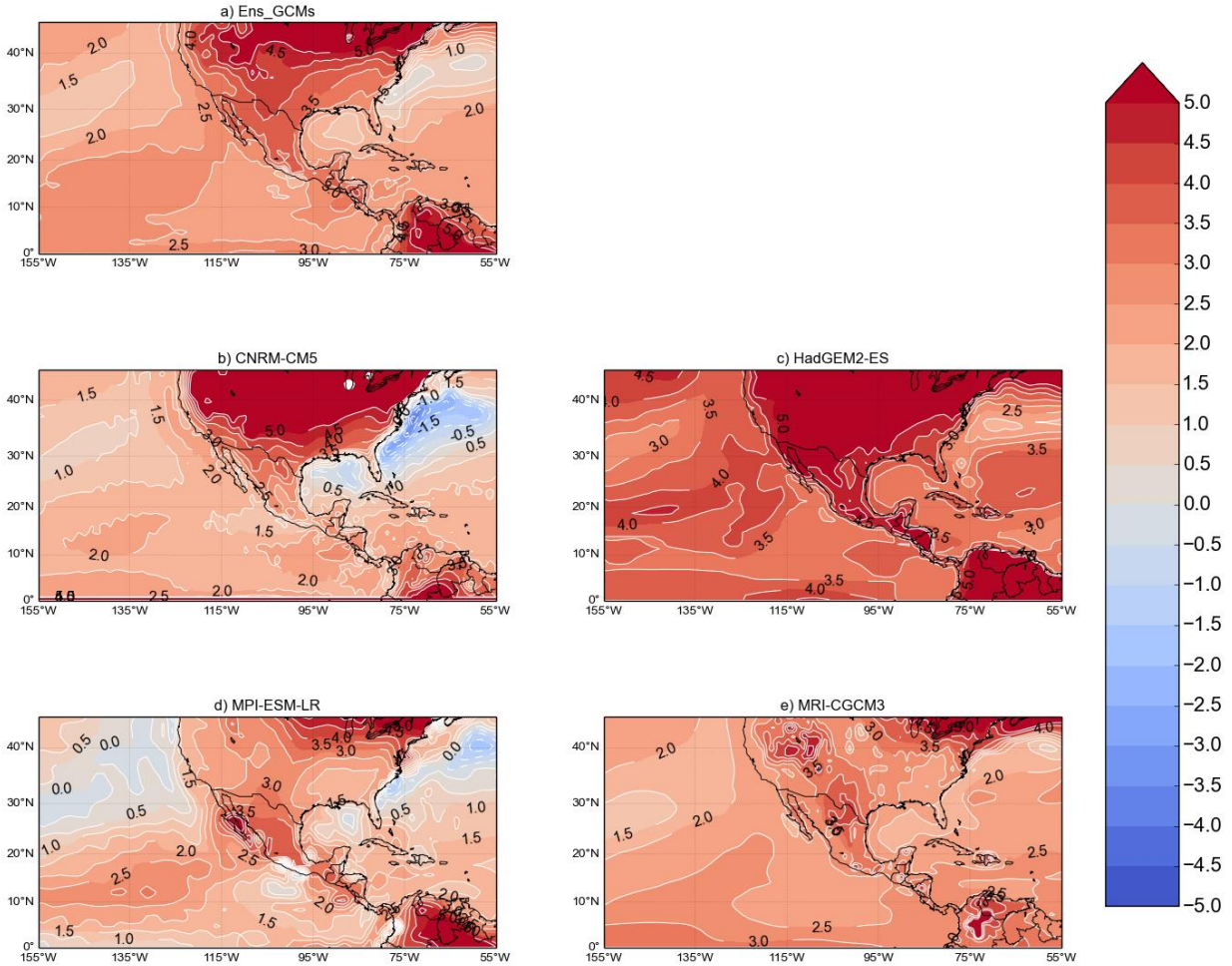

Figura 5.4.1. Anomalía de temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de invierno (DEF) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

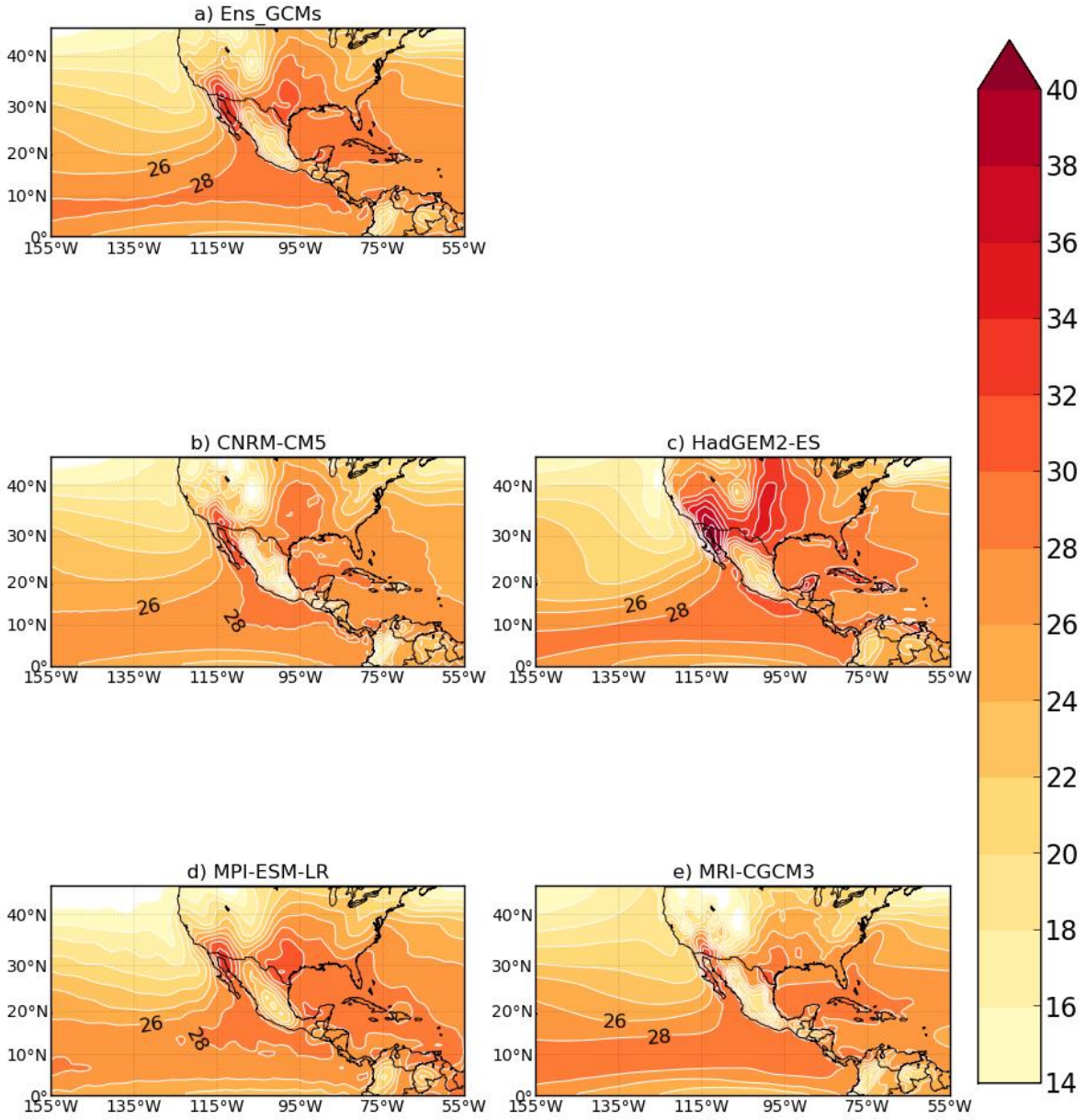

Figura 5.4.2. Proyeccion de la temperatura superficial (Ts) promedio (ºC) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099.

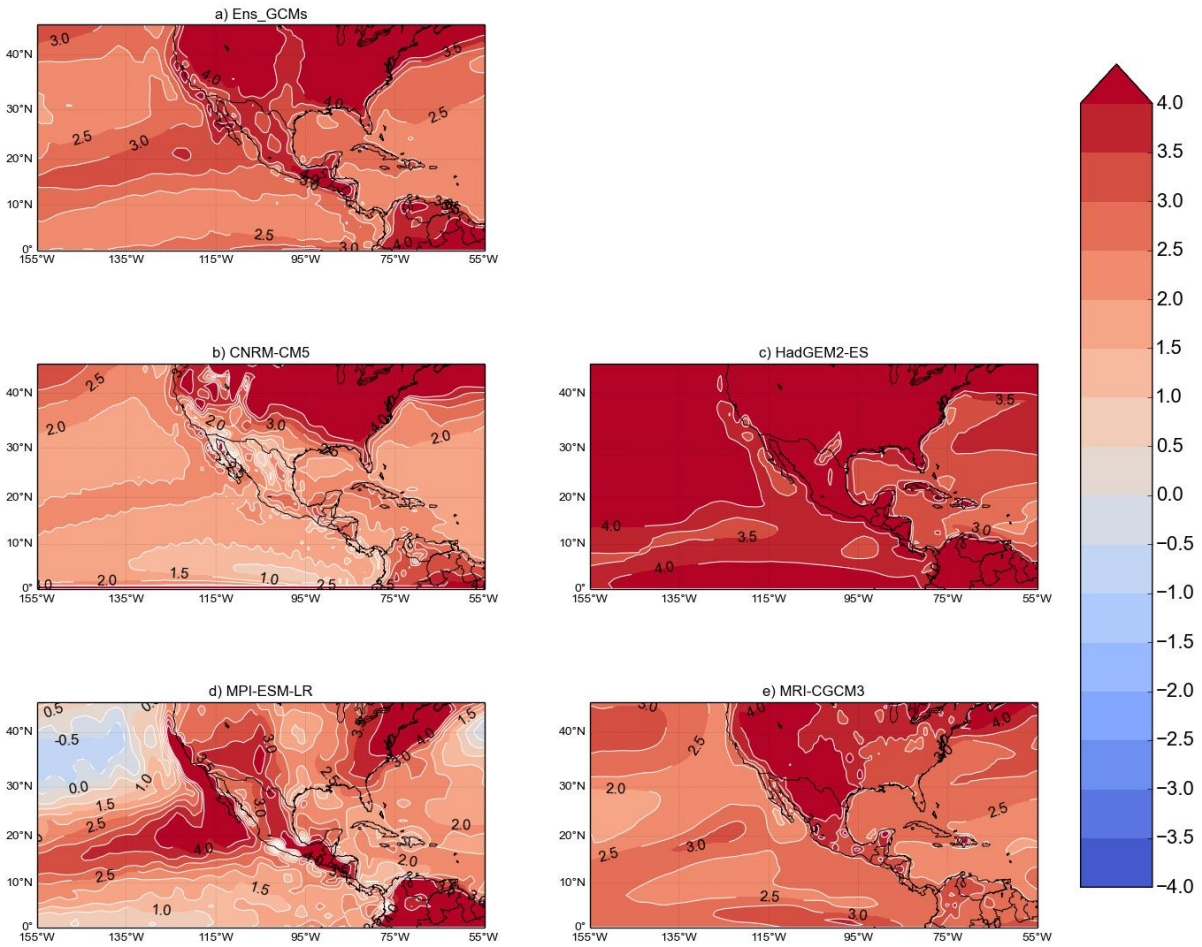

Figura 5.4.3. Anomalía de temperatura superficial (Ts) promedio (^{o}C) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

5.5. Proyecciones de cambio en la presión superficial a nivel del mar para el 2075-2099

La Fig 5.5.1 muestra los cambios proyectados de la presión a nivel del mar (Psl) para el invierno en del periodo 2075-2099 bajo el escenario RCP8.5. En el ensamble se observan anomalías negativas (debilitamiento) de las altas subtropicales de -0.5 a -2 mb. En general los patrones en la posición de los centros de altas y bajas presiones se mantienen, pero debilitados. El HadGEM2 proyecta una disminución en la intensidad de los anticiclones de ~2 mb. El MPI es el único modelo que presenta anomalías positivas entre 1 y 2 mb para el país y en toda la zona de las altas presiones. Es interesante observar que las mayores anomalías en la presión a nivel del mar de todos los modelos se presentan por arriba de los 10 º N.

En el verano, las altas presiones sobre el continente se intensifican y sobre el Océano Pacifico subtropical se debilitan (Fig. 5.5.2), esto último seguramente debido al calentamiento sobre el océano como se observó en la Sección 5.4. Consistente con los cambios proyectados en la Ts, el debilitamiento del anticiclón del Atlántico es más pequeño que el del Pacifico.

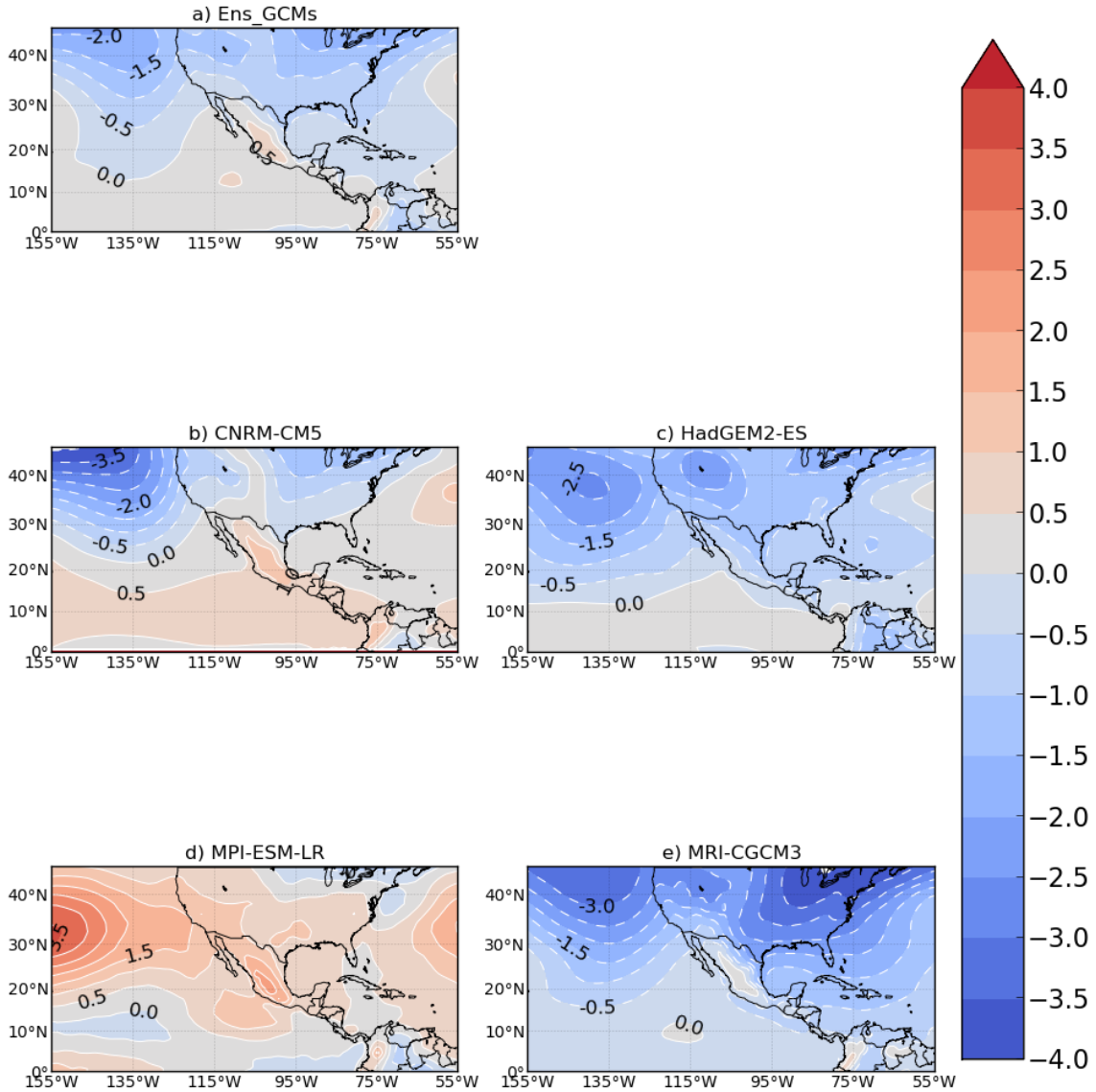

Figura 5.5.1. Anomalía de la presión a nivel del mar promedio (mb) de invierno (DEF) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

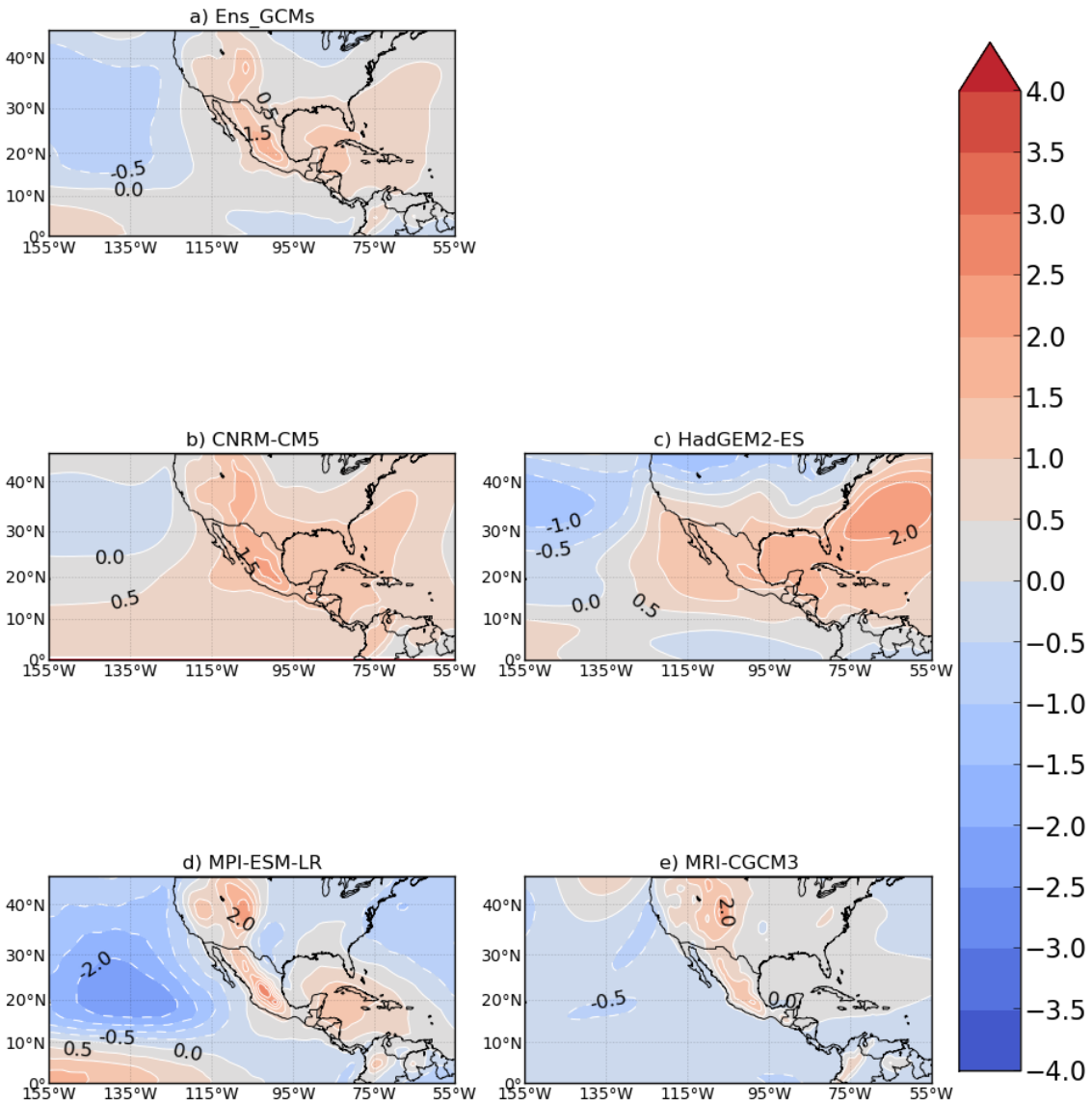

Figura 5.5.2. Anomalía de la presión a nivel del mar promedio (mb) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

5.6. Proyecciones de cambio en el vector de viento para el periodo 2075-2099

La Fig. 5.6.1 muestra el viento promedio esperado para el invierno del 2075-2099 bajo el escenario RCP8.5. El ensamble muestra una circulación anticiclónica en el Pacifico subtropical más al sur del período histórico (Fig. 4.3.1). Las anomalías del vector de viento (Fig. 5.6.2) demuestran el debilitamiento de la alta Pacífico con una circulación ciclónica frente a las costas de California, y una circulación anormalmente anticiclónica al sur de la Península de Baja California; con estos dos patrones, el Océano Pacifico tiene una influencia sobre las costas de Baja California y el sur de California, lo que podría ser responsable de las anomalías positivas de precipitación que se observan en el invierno en la Fig. 5.2.1. El modelo francés, el CNRM, es el que presenta un mayor debilitamiento de la alta Pacífico (>1.2 m s^{-1}), es decir, las anomalías de la Fig. 5.6.2 muestran una circulación más ciclónica frente a California.

En verano (Fig. 5.6.3), el anticiclón del Pacifico migra hacia al norte con vientos paralelos a la costa de California y Baja California, como en el periodo histórico, aunque el anticiclón se debilita un poco (Fig. 5.5.2) debido al calentamiento del Pacifico. Tanto en invierno (Fig. 5.6.1) como en verano (Fig. 5.6.3) los viento alisios promedio del Caribe se desaceleran al cruzar de Centro América al Pacifico. Esta desaceleración favorece la convergencia y la convección al sur de las costas Mexicanas en verano. Sin embargo, la convergencia de verano bajo el escenario RCP8.5 se localiza ligeramente más al sur que la observada en el periodo histórico, como a 5ºN. Esta posición de la ZCIT es similar a la de un evento El Niño fuerte, la cual es consistente con el mayor calentamiento que se espera en el futuro en la alberca de agua cálida. Las mayores anomalías del vector de viento del Ens_GCMs para el escenario RCP8.5 se esperan que ocurran en el Pacifico cerca de la ZCIT, con alisios más intensos al oeste de Centroamérica. Este resultado es consistente con el trabajo de Torres-Alavez et al. (2014) que sugieren que el la intensificación de los alisios en el Pacifico Oriental empuja a la ZCIT hacia el sur. El HadGEM2 y el CNRM registran sus mayores anomalías en el Pacífico cercanas a las costas de Centroamérica y México, mientras que el MPI y el MRI las presentan en la zona suroeste del Pacífico.

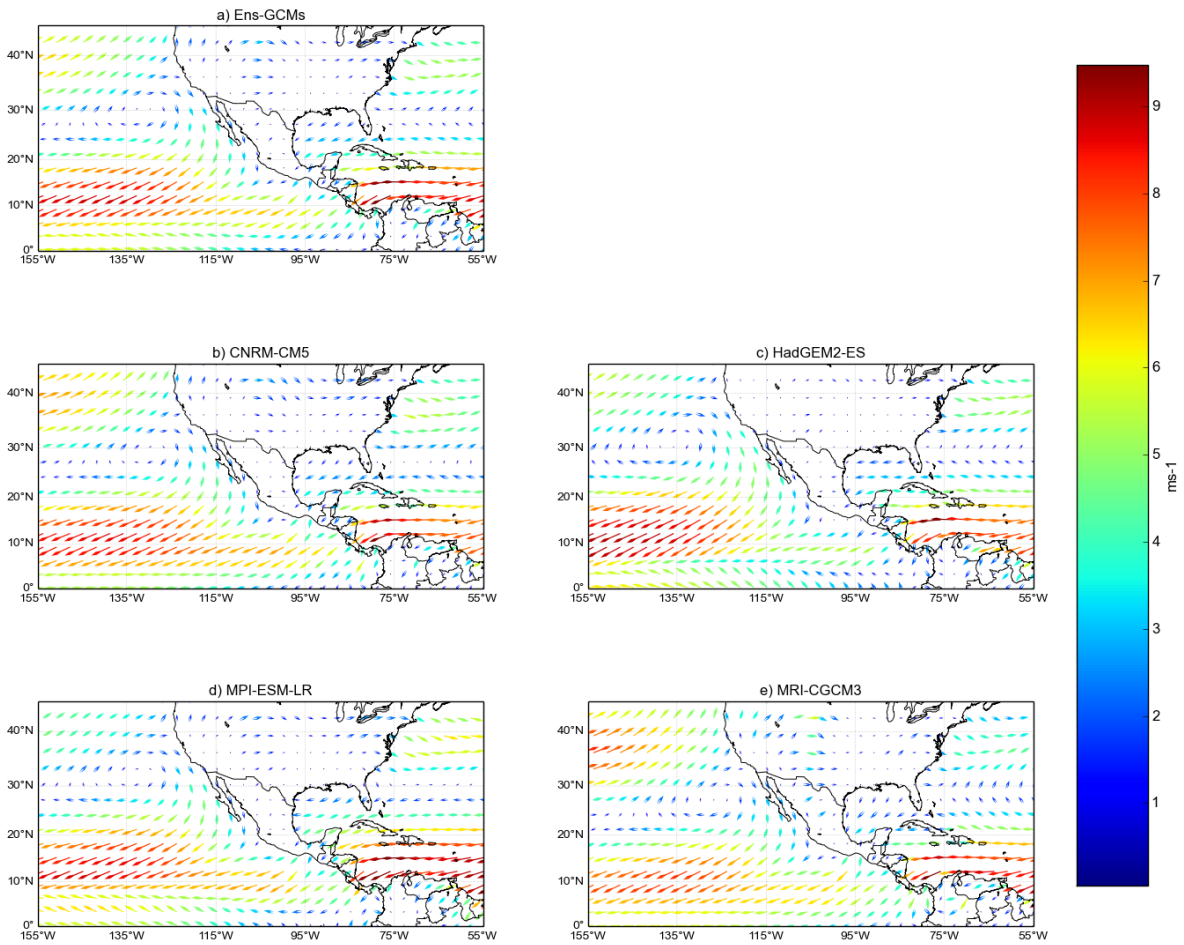

Figura 5.6.1. Vector de viento promedio (m s^{-1}) de invierno (DEF) para el escenario RCP8.5 durante 2075-2099.

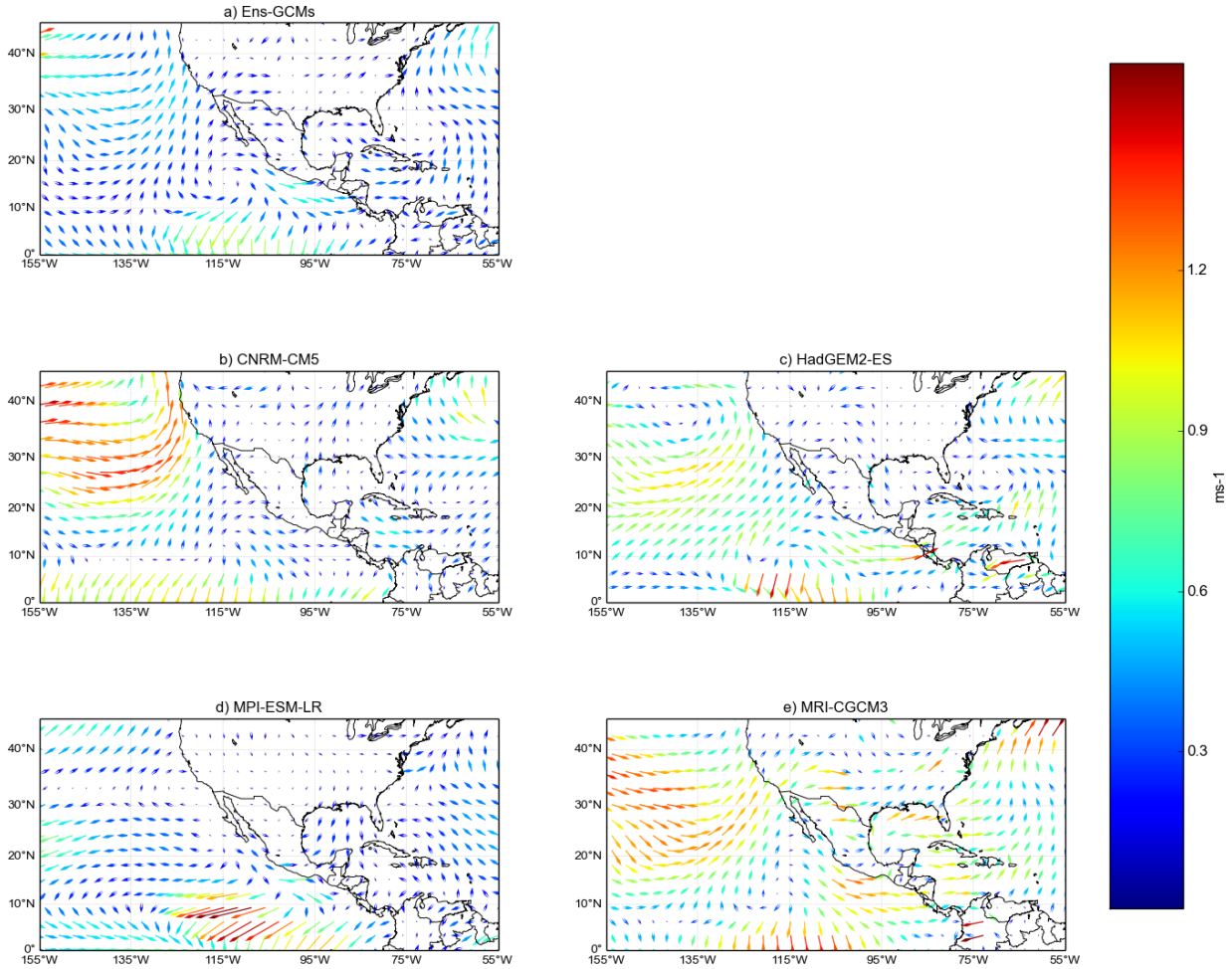

Figura 5.6.2. Anomalía del vector de viento promedio (m s^{-1}) de invierno (DEF) para el escenario RCP8.5 durante 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

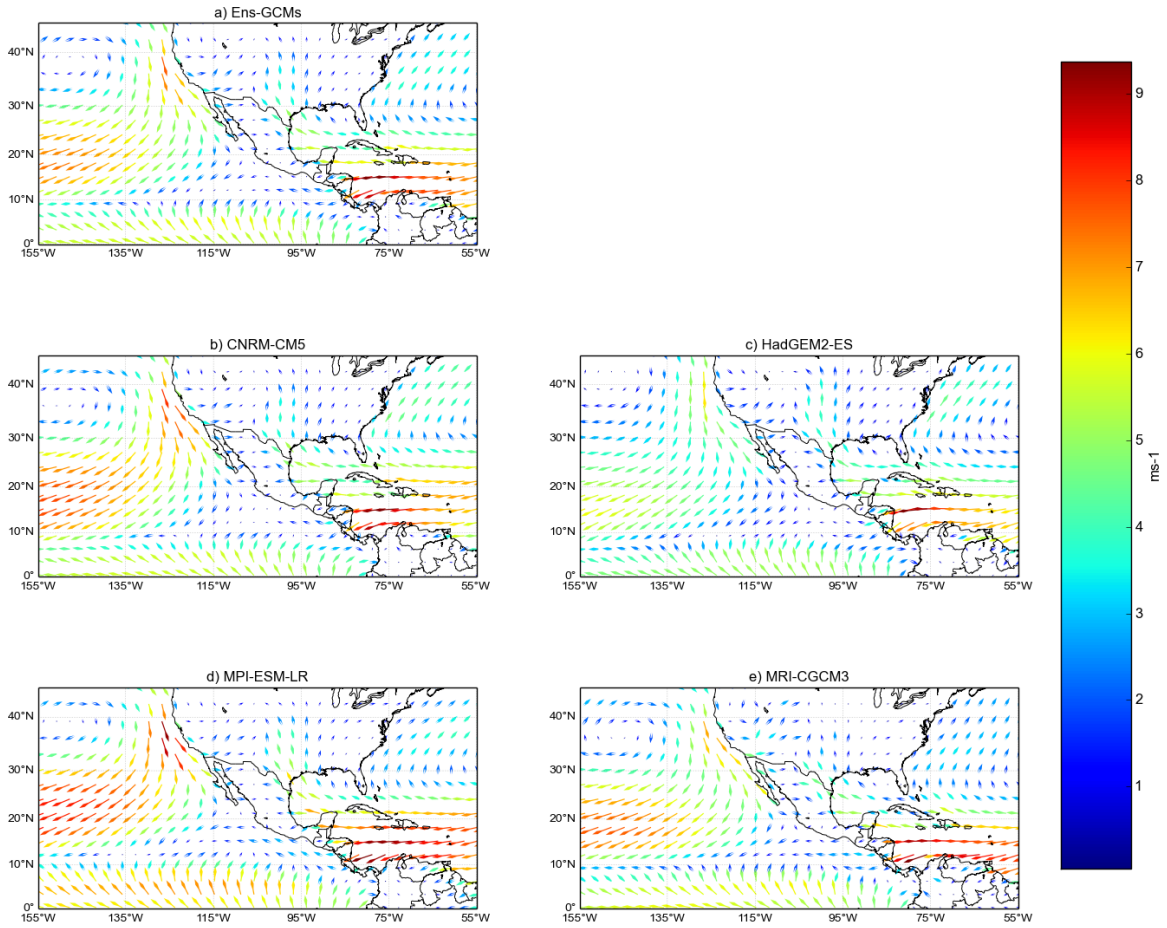

Figura 5.6.3. Vector de viento promedio (m s^{-1}) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099.

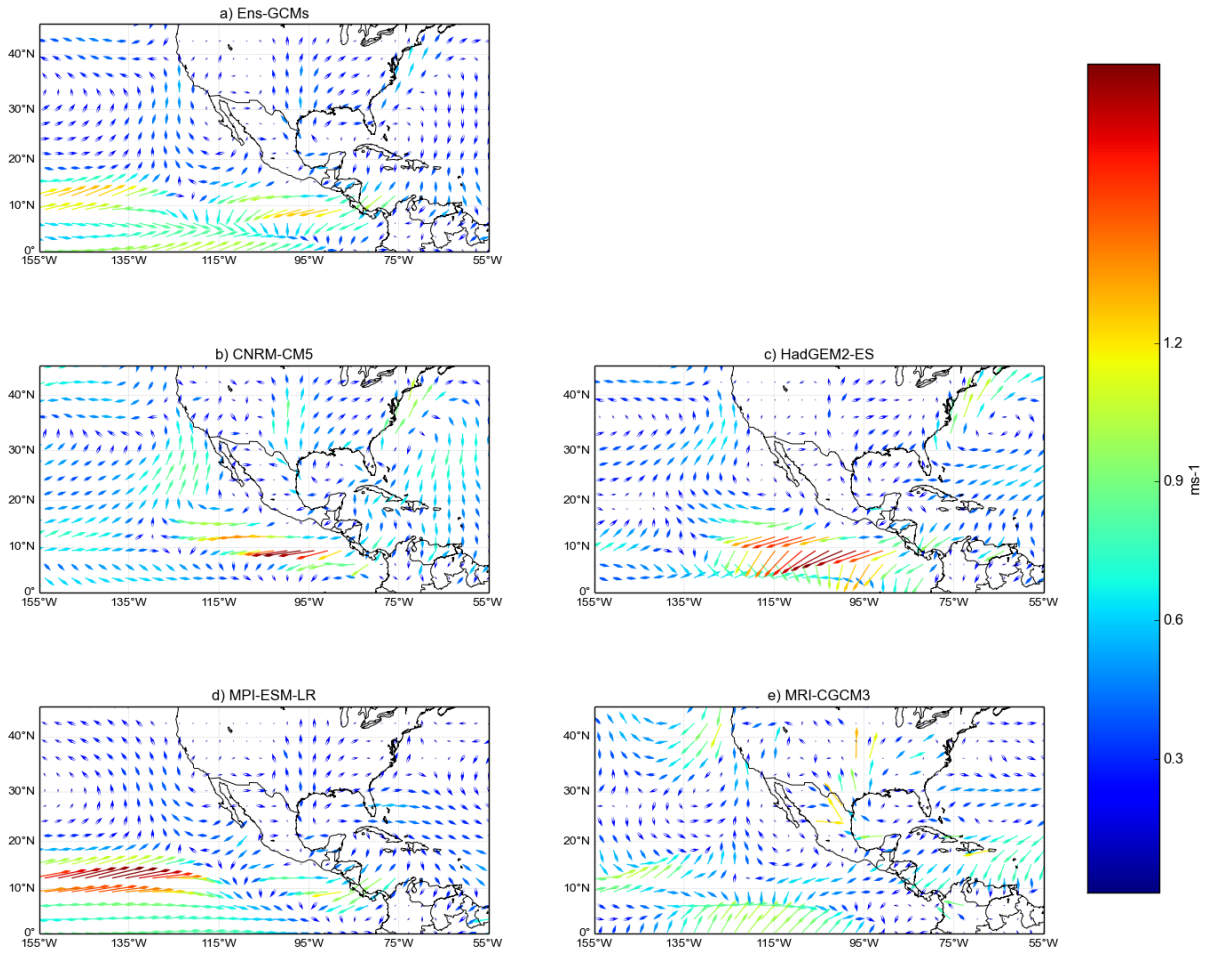

Figura 5.6.3. Anomalías del vector de viento promedio (m s^{-1}) de verano (JJA) bajo el escenario RCP8.5 para el periodo 2075-2099 con respecto a 1979-2005.

5.7. Proyecciones de cambio en el ciclo anual de variables atmosféricas en el SE de México durante el siglo 21

Las proyecciones de los ciclos anuales de la precipitación (Fig. 5.7.1) y de las variables atmosféricas superficiales (Fig. 5.7.2) en el sureste Mexicano bajo diferentes escenarios del siglo 21 presentan patrones similares al del periodo histórico. La precipitación podría verse reducida ligeramente durante el invierno y el verano, pero podría aumentar ligeramente en octubre. La reducción de verano está asociada a una mayor presión superficial (Psl) sobre el continente y a una intensificación de los alisios (Uas), como se observa en la Fig. 5.7.2. El aumento de precipitación es consistente con otros trabajos reportados (Torres-Alavez et al. 2014) y con los cambios espaciales de las mismas variables, explicados arriba. La explicación de las variables es similar al del periodo observado (Sección 4.6).

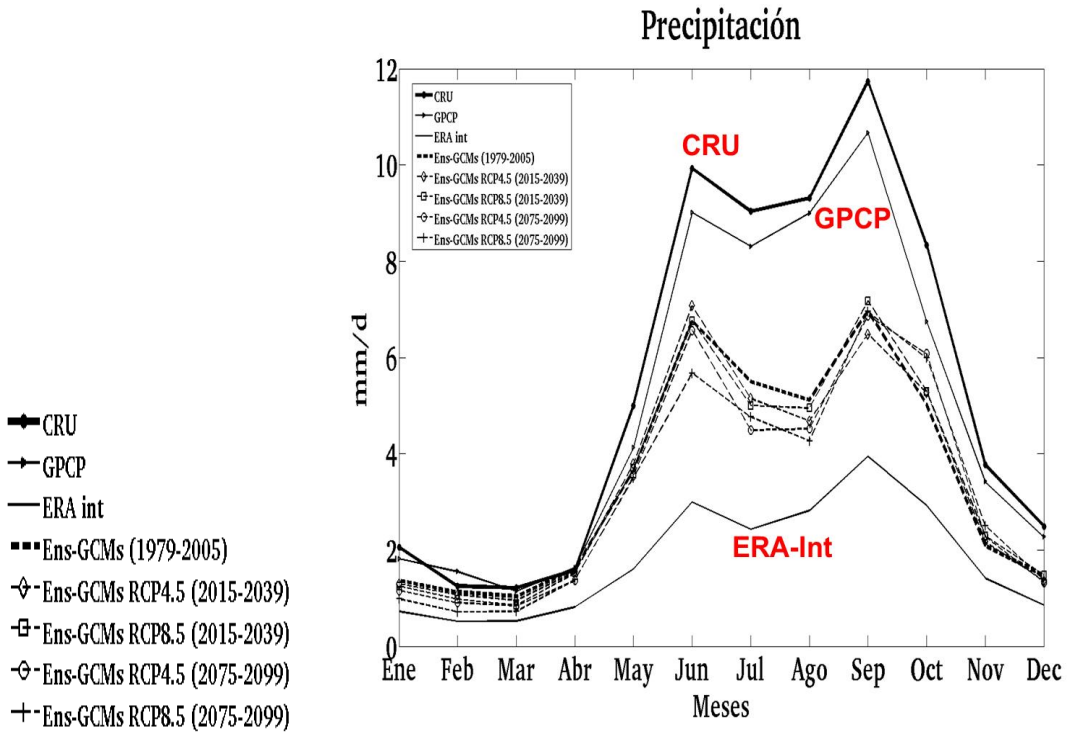

Figura 5.7.1. Ciclo anual de precipitación (mm/d) observada en el sureste mexicano (Fig. 3.2) durante 1979-2005 y bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los periodos (2015-2039 y 2075-2099), de acuerdo a los datos observados del CRU, GPCP y ERA-int, y al ensamble promedio de 4 MCG (Ens-GCMs).

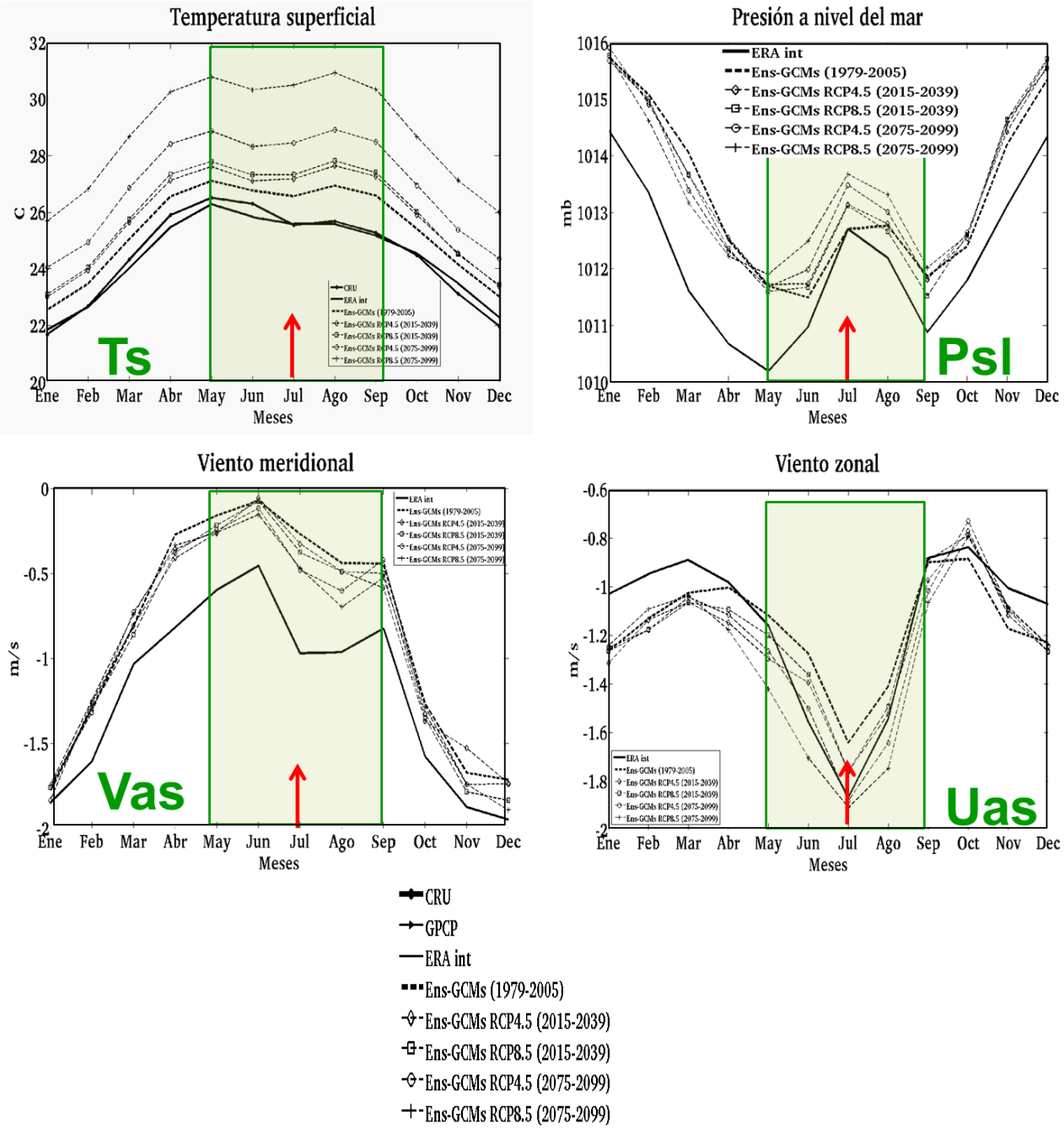

Figura 5.7.2. Ciclo anual promedio de variables atmosféricas observadas en el sureste mexicano (Fig. 3.2) durante 1979-2005 y bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los periodos (2015-2039 y 2075-2099), de acuerdo a los datos observados del CRU, GPCP y ERA-int, y al Ens-GCMs La variables son: temperatura superficial (ºC), presión a nivel del mar (mb), y vientos zonal (este/oeste) y merdional (norte/sur). Se resalta con una flecha el mes mas seco (julio) y con verde el perido de verano (mayo-septiembre).

5.8. Variabilidad interanual de la circulación superficial en el SE de México durante el siglo 21

La Fig.5.8.1 muestra las series de tiempo históricas (1979-2005) y futuras (2015-2099) de la precipitación del Sureste de México bajo los 2 escenarios radiativos (RCP4.5 y RCP8.5. La precipitación promedio observada en la región es de ~ 1700 a 1965 mm a^{-1} (4.9 a 5.4 mm d^{-1}), mientras que el Ens-GCMs subestima la precipitación como 2 mm d^{-1}; es decir, el ensmable muestra ~ 1260 mm a^{-1} (3.5 mm d^{-1}) y subestima fuertemente la variabilidad interanual (Std) como era de esperarse de los MCG. La tendencia de la precipitación en el periodo histórico es insignifcativa y en el siglo 21 los escenarios muestran tendencias negativas, pero pequeñas; los cambios más grandes son con el escenario RCP8.5 (tendencia = -0.2 mm d^{-1}), lo que equivale a una reducción de aproximadamente 5% en la precipitación anual (ver Fig. 5.2.4), la cual ocurriría principalmente en invierno y verano, mientras que en otoño podría haber aumentos pequeños, como ya se explicó antes.

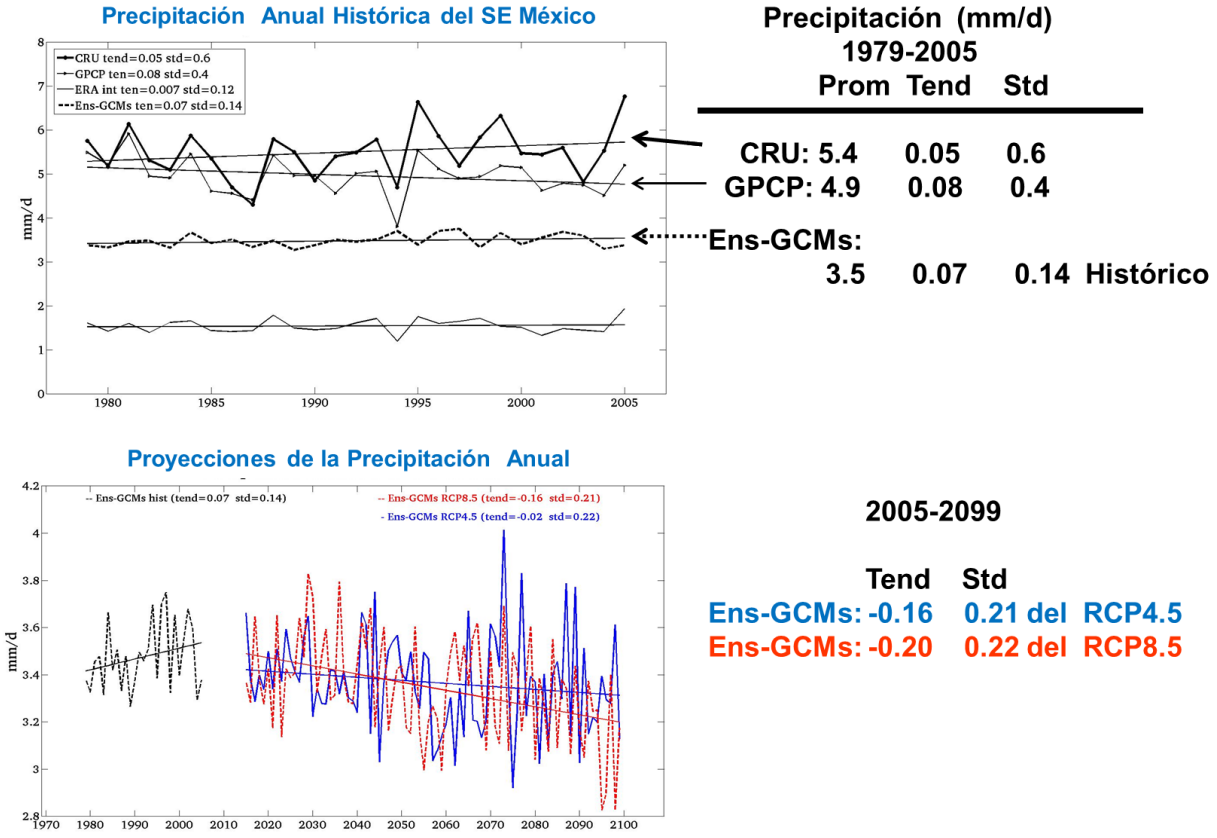

Figura 5.8.1. Precipitación anual histórica (1979-2005) y proyecciones de la precipitación para el siglo 21 (2005-2099) en el sureste mexicano (Fig. 3.2). Arriba se muestran los datos observados (CRU, GPCP y ERA-int) y el ensamble de los 4 MCG (Ens-GCMs). Abajo se muestran las proyecciones de los escenarios RCP8.5 (rojo) y RCP4.5 (azul). Del lado derecho se muestran los valores promedios, tendencias y desviación estándar (Std), todas en mm d^{-1}.

La temperatura anual en el Sureste Mexicano muestra una tendencia de 0.5ºC tanto en los datos observados como en el Ens_GCMs, por lo que hay una consistencia en el cambio; el aumento podría deberse al cambio climático, como lo sugieren los últimos reportes del IPCC. El Ens_GCMs subestima la variabilidad, en un 30%, pero sobreestima la temperatura promedio como en 1ºC, como se observa en la Fig. 5.8.2.

Para el siglo 21 se esperan aumentos de 0.88ºC bajo el escenario RCP4.5 y hasta 4ºC bajo el escenario RCP8.5. Esta gran diferencia en los dos escenarios siginifica que hay una gran incertidumbre en la intensidad del cambio, aunque hay una certidumbre de que los cambios serán positivos porque todos los modelos muestran una señal similar. Ambos escenarios tambien muestran un incremento en la variabilidad interanual (de 0.48 a 1.18ºC).

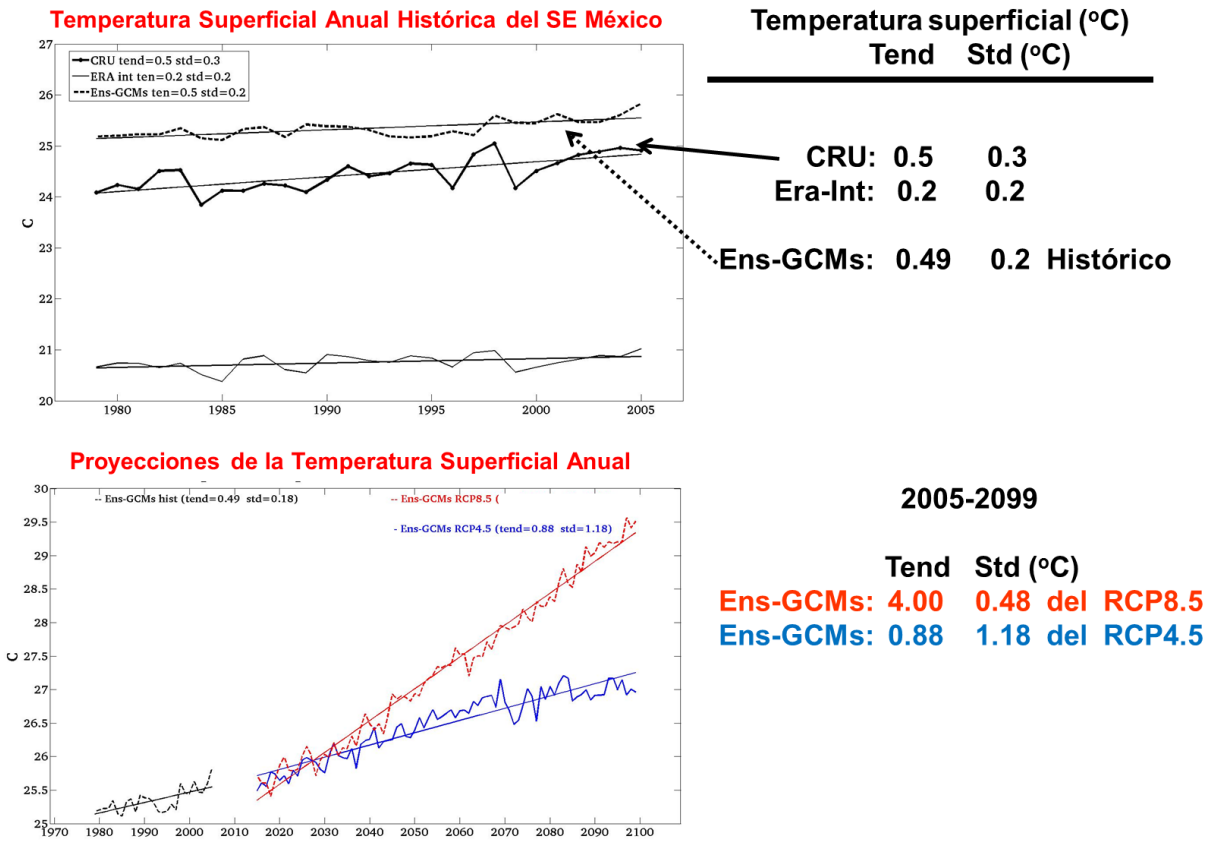

Figura 5.8.2. Temperatura superficial anual histórica (1979-2005) y proyecciones de la temperatura superficial para el siglo 21 (2005-2099) en el Sureste de México (Fig. 3.2). Arriba se muestran los datos observados (CRU, GPCP y ERA-int) y el ensamble de los 4 MCG (Ens-GCMs). Abajo se muestran las proyecciones de los escenarios RCP8.5 (rojo) y RCP4.5 (azul). Del lado derecho se muestran las tendencias y desviación estándar (Std) de los dos periodos, todas en ºC.

6. Conclusiones

6.1. Evaluación histórica

Los principales resultados de la Parte I muestran que los MCG seleccionados y el ensamble simulan adecuadamente la posición de los anticiclones del Pacífico y el Atlántico, la posición e intensidad de la ZCIT, la vaguada monzónica y los vientos alisios estacionales. Se encontró que el reanálisis del ERA-int es demasiado seco a pesar de que los patrones de las variables de circulación son similares a los que simulan los MCG, que producen mayor precipitación que el ERA-int todo el año. Por esta razón se cree que el ERA-int podría tener un problema al momento de precipitar; es posible que la parametrización de nubes sea muy seca y/o que tenga problemas de asimilación de datos observados en la parte tropical, como lo sugieren Torres-Alavez et al. (2014).

Los MCG tienen un contraste térmico inverso (el Golfo de México es más frio que el Océano Pacifico tropical) lo que podría ser una de las causas del sesgo negativo de precipitación en verano en casi todo el país y en particular en el Sureste de México.

En el caso de estudio del Sureste de México, se encontró que los MCG sobrestiman la temperatura superficial y subestiman significativamente la precipitación de la región, especialmente la de verano; sin embargo, reproducen adecuadamente el patrón bimodal de las lluvias de verano y la canícula de esa región. La canícula está asociada con un aumento en la presión superficial y en los vientos alisios superficiales. Los ciclos anuales de las variables atmosféricas analizadas son consistentes con el patrón de lluvias observado y son simulados adecuadamente por los MCG.

6.2. Evaluación futura

Bajo el escenario RCP8.5, los MCG proyectan ligeros cambios en los patrones estacionales de lluvia y circulación. Se espera mayor calentamiento en el Pacifico Oriental que en el Atlántico (similar a un Niño fuerte), lo que significa menos lluvias de verano en el país y la ZCIT más al sur de lo normal (al sur de 10ºN). Además, en el verano la presión sobre México podría aumentar y los Alisios podrían intensificarse lo cual afectaría la posición de la ZCIT (al sur de 10N).

En el otoño, la Alta Pacifico podría debilitarse debido a un mayor calentamiento en el Pacifico; esto podría generar más lluvias en el otoño en las costas del Pacifico Mexicano, consistente con los resultados de Torres-Alavez et al. (2014). La presión a nivel del mar mostró de manera general que los centros de alta presión se debilitan en las proyecciones futuras teniendo anomalías de hasta -3 mb.

El escenario de altas emisiones RCP8.5 en el periodo lejano 2075-2099 es el que presenta los cambios más grandes en todas las variables atmosféricas. Ambos escenarios mostraron reducciones en los patrones de precipitación para México, siendo el escenario RCP8.5 el más seco, hasta con 20 por ciento menos lluvia en algunas regiones. Las estaciones del año con más probabilidades de reducción de lluvia son invierno y verano, mientras que el otoño podría ser ligeramente más lluvioso. En el Noroeste de Baja California podrían aumentar ligeramente las lluvias de invierno debido a una posible intensificación de condiciones tipo El Niño en el futuro lejano.

Estacionalmente, todos los escenarios proyectados muestran al HadGEM2 como el modelo más lluvioso en la ZCIT y el CNRM el más seco.

Las proyecciones de la temperatura superficial de verano muestran incrementos mayores a 4 ^{o} C en México. La alberca de agua cálida representada por isotermas > 28.5^{o}C muestra un tamaño mucho más grande y extendida hacia el Pacífico occidental en el siglo 21. Durante el invierno las anomalías de temperatura superficial más grandes se proyectan sobre el continente. Al igual que en la precipitación de los 4 GCMs, el HadGEM2-ES es el modelo que mostró el escenario con el mayor aumento en temperatura.

Los cambios en el vector de viento muestran claramente una migración hacia el sur de la ZCIT en invierno y una posición ligeramente al sur de 10°N en el verano a finales del siglo 21. Estas condiciones tipo El Niño, se asociarían a menos lluvias en México durante el verano. Los vientos alisios también aparecen un poco más intensos que en el periodo histórico, los cuales parecen empujar a la ZCIT hacia el sur. El vector de viento es la variable que en promedio presentó los cambios más pequeños en las proyecciones de ambos escenarios futuros. Para el invierno el CNRM fue el modelo con las anomalías más grandes en el Pacífico, mientras que en el verano el HadGEM2 y el MPI son los que mostraron intensificaciones en el vector de viento, el primero en las zonas del Pacífico cercanas a la costa y el segundo en el Pacífico oeste.

7. Recomendaciones y próximos pasos

Se recomienda utilizar proyecciones de modelos dinámicos regionales (downscaling dinámico) para reducir las incertidumbres debido a la topografía compleja y la influencia de sistemas tropicales no capturados por los MCG. Se pueden aprovechar las salidas de algunos modelos regionales que se han generado como parte de la iniciativa CORDEX (*Coordinated Regional Dynamical Downscaling*) para México y Centroamérica (CORDEX-CCA).

También sería deseable apoyar y desarrollar proyectos en donde se proponga correr los modelos regionales en México, no sólo ser usuarios de las salidas de modelos que otros centros generan, sino generar las capacidades en México para correr los modelos.

Como parte de los entregables del proyecto, hemos dado una copia de todos los datos y programas utilizados y las figuras generadas. Sería recomendable desarrollar una plataforma web para poner a disposición del público la información generada.

Uno de los planes que tenemos es analizar las 4 variables atmosféricas en el Sureste Mexicano, pero con salidas de algún modelo regional de CORDEX-CCA, para ver si efectivamente el modelo regional genera mejores resultados que los MCG, si es capaz de capturar mejor la temporada de lluvia de verano y la circulación que la genera.

Bibliografía

Cavazos, T., and S. Arriaga-Ramirez, 2012: Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the 21st century. *J Climate*, **25**, 5904-5915.

Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto, C. Conde, A. Quintanar, J. Santana, R. Romero, M. E. Maya, J. G. Rosario, M. R. Ayala, H. Carrillo, O. Santiesteban, M. E. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. http://escenarios.ine.gob.mx

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*., **137**, 553–597.

Fuentes-Franco, R., E. Coppola, F. Giorgi, F. Graef, and E. G. Pavia, 2014: Assessment of RegCM simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Clim. Dyn*., **42**, 629-647.

Geil, Kerrie L., Yolande L. Serra, Xubin Zeng, 2013: Assessment of CMIP5 Model Simulations of the North American Monsoon System. *J. Climate*, **26**, 8787–8801. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00044.1.

Giorgi, F. y Mearns, L., 2001: Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method. *J. Climate*, **15**, 1141-1158.

Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, and G. Gu, 2009: Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1. *Geophys. Res. Lett*., **36**, L17808, doi:10.1029/2009GL040,000.

IPCC, 2013: "Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Jiang, X., E. D. Maloney, J. L. Li, and D. E. Waliser, 2013: Simulations of the eastern North Pacific intraseasonal variability in CMIP5 GCMs. *J. Climate*, **26**, 3489–3510.

Kozar, M. E. and V. Misra, 2012: Evaluation of twentieth century Atlantic warm pool simulations in historical CMIP5 runs. *Clim. Dyn*., DOI: 10.1007/s00382-012-1604-9.

Liang, J. Zhu, K. E. Kunkel, M. Ting, J. X. L. Wang, 2008: Do CGCMs simulate the North American monsoon precipitation seasonal–interannual variability?. *J. Climate*, **21**, 4424-4448.

Lin, J. L., B. E. Mapes, K. M. Weickmann, G. N. Kiladis, S. D. Schubert, M. J. Suarez, J. T. Bacmeister, M. I. Lee, 2008: North American monsoon and convectively coupled equatorial waves simulated by IPCC AR4 coupled GCMs. *J. Climate*, **21**, 2919-2937.

Magaña, V., J. A. Amador, and S. Medina, 1999: The midsummer drought over México and Central America. *J. Climate*, **12**, 1577-1588.

Maloney, E., S. Camargo, E. Chang, B. Colle, R. Fu, K. Geil, Q. Hu, X. Jiang, N., Johnson, K. Karnauskas, J. Kinter, B. Kirtman, S. Kumar, B. Langenbrunner, K. Lombardo, L. Long, A. Mariotti, J. Meyerson, K. Mo, D. Neelin, Z. Pan, R. Seager, Y. Serra, A. Seth, J. Sheffield, J. Stroeve, J. Thibeault, S. Xie, C. Wang, B. Wyman, and M. Zhao, 2013: North American Climate in CMIP5 Experiments: Part III: Assessment of 21st Century Projections. *J. Climate*. **27**, 2230-2270, doi:10.1175/JCLI-D-13-00273.1.

Martínez-Sanchez, J. N. and T. Cavazos, 2014: Eastern Tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. *Clim. Res.*, **58**, 221-234.

Mitchell, T. D., and P. D. Jones, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol*., **25**, 693–712. [Dataset available online: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_2.10/data_all/].

SEMARNAT/INECC, 2013: México, Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México, D. F., 399 pp. ISBN: 978-607-8246-50-2.

Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, and J. Lawrimore, 2008: Improvements to NOAA´s historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J. Climate*, **21**, 2283-2296.

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

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. y Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485–498.

Torres-Alavez, A., T. Cavazos, and C. Turrent, 2014: Land-sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *J. Climate*, **27**, 4566-4580. doi:http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00557.1.

Turrent, C., and T. Cavazos, 2009: Role of the land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon, *Geophys. Res. Lett*., **36**, L02808, doi:10.1029/2008GL036299.

van Vuuren D., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith and S.K. Rose, 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*, **109,** 5–31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.

8. ANEXO 1: Resumen de actividades y cronograma (2 Jul - 30 Nov 2014)

PROPUESTA ECONÓMICA CICESE Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional (Julio-Noviembre 2014)				
Actividad	**Descripción**	**Productos**	**Informes**	**Responsables**
1	Plan de Actividades	Actividades y Cronograma	**Primer Informe (15 Jul)**	Tereza Cavazos
2	Descarga y procesamiento de datos de modelos históricos y escenarios futuros de los modelos globales.	1. Descargar y procesar variables atmosféricas superficiales (Temperatura Superficial (°C), Precipitación (mm/mes), Presión superficial (mb), Dirección e Intensidad del Viento superficial en sus componentes U y V (uas, vas; m/s) en la región Lat: 0 a 50 N y Long: 160W a 40W de las salidas mensuales históricas y de escenarios futuros (RCP4.5 y RCP8.5) de por lo menos 3 experimentos de 4 modelos acoplados globales "CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGM3". 2. Ensamblar (promediar) los diferentes experimentos de cada variable para los periodos históricos y futuros. 3. Interpolar las variables bilinealmente a 0.5° por 0.5° de longitud y latitud geográficas, usando como malla base la de los datos observados del CRU. 4. Cortar el dominio espacial.		Tereza Cavazos
3	Descarga y procesamiento de datos observados	1. Descargar y procesar las variables anteriores para los datos históricos observados a escala mensual del GPCP (para precipitación), ERA-Interim (Variables Atmosféricas) y ERSST (Temperatura Superficial del Mar) para el periodo 1979-2005.	**Segundo Informe (12 Sep)**	Tereza Cavazos
4	Resultados preliminares de los datos correspondientes al período histórico (1979-2005) con resolución mensual.	1. Iniciar el análisis de métricas (ciclos anuales y RMSE) y mapas de variables de todo el dominio. Las métricas se harán para un estudio de caso: el sur/sureste mexicano caracterizado por la canícula. 2. Elaborar el Segundo Informe		Tereza Cavazos
5	Escenarios de nivel del mar	1. Descargar mosaicos de modelos digitales de elevación SRTM y ensamblar para la república mexicana. Descargar modelo de elevación regional de zona de prueba del Continuo de Elevaciones de México CEM versión 3 del INEGI y comparar con SRTM. 2. Proyectar modelos regionales a sistema métrico conforme (Universal Transversa de Mercator) para la estimación de la pendiente del terreno. 3. Definir zona costera vulnerable a través de área de influencia a partir de la línea de costa y pendiente del terrreno. 4. Colaborar en la realización del Segundo Informe.		Alejandro Hinojosa
6	Evaluar y discutir los resultados históricos (observados vs modelos)	1. Continuar con el análisis de métricas y análisis de mapas. 2. Evaluar los resultados y discutir de acuerdo a estudios publicados.		Tereza Cavazos
7	Proyecciones futuras	1. Calcular las proyecciones (totales y anomalías) a escala mensual para todo el periodo. 2. Calcular los cambio en la climatologia para el futuro cercano (2015 – 2039) y futuro lejano (2075 – 2099) de los RCP 4.5 y RCP 8.5 de las diferentes variables de los modelos globales. 3. Mapear los cambios estacionales de cada variable. 4. Evaluar los resultados.	**Tercer Informe (28 Nov)**	Tereza Cavazos
8	Escenarios de nivel del mar	1. Generar mapas regionales de los escenarios de ascenso de nivel del mar de 1 y 2 metros para diferentes regiones costeras de México. 2. Preparar datos y metadatos de entregables.		Alejandro Hinojosa
9	Tercer informe	Conjuntar toda la información: preparar último informe y presentación final.		Tereza Cavazos y Alejandro Hinojosa

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES - CICESE	Mes				
	1	2	3	4	5
Elaborar un plan de trabajo detallado que incluya acciones, tiempos, productos, etc., para el desarrollo del proyecto.					
Elaborar el **Primer Informe** parcial (15 de Jul)					
Descargar y procesar variables atmosféricas superficiales (Temperatura Superficial (°C), Precipitación (mm/mes), Presión superficial (mb), Dirección e Intensidad del Viento superficial en sus componentes U y V (uas, vas; m/s) en la región Lat: 0 a 50 N y Long: 160W a 40W de las salidas mensuales históricas de los modelos acoplados globales "CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGM3"					
Descargar y procesar las variables anteriores para (1) los 4 modelos (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGM3) de la página Web del CMIP5, para los escenarios de emisiones de GEI: RCP4.5 y RCP8.5, y (2) los datos históricos observados a escala mensual del GPCP (para precipitación), ERA-Interim (Variables Atmosféricas) y ERSST (Temperatura Superficial del Mar) para el periodo 1979-2005.					
Interpolar las variables bilinealmente a 0.5° por 0.5° de longitud y latitud geográficas, usando como malla base la de los datos observados del CRU.					
Resultados preliminares de los datos correspondientes al período histórico (1979-2005) con resolución mensual.					
Elaborar el **Segundo Informe** parcial (12 Septiembre)					
Evaluar y discutir los resultados históricos (observados vs modelos) mediante el uso de métricas para el caso del sureste Mexicano (ejemplo de zona tropical; desviación estándar, raíz del error medio cuadrático y ciclos anuales) y mapas comparativos para todo el dominio.					
Calcular las proyecciones (proyecciones totales y anomalías) del futuro cercano (2015 – 2039) y futuro lejano (2075 – 2099) de los RCP 4.5 y RCP 8.5 de las diferentes variables de los modelos globales					
Evaluar los cambios futuros de los MCG mediante la aplicación de métricas (ciclo anual y mapas de todo el dominio) usando los escenarios de emisiones de GEI: RCP4.5 y RCP8.5 con respecto al escenarios base.					
Desarrollar mapas de ascenso del nivel medio del mar (de 1 a 2 m) en las áreas costeras de México, con sistemas de información geográfica utilizando los escenarios de inundación por aumento del nivel del mar que se muestran en la página http://flood.firetree.net/?ll=31.8811,-116.6199&z=12&m=0. Se utilizarán los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para el programa mundial SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), de la página http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp, cuya resolución espacial es de 90 x 90 metros por celda.					
Participar en reuniones de trabajo, realizadas por el INECC, con responsables de los estudios de escenarios de cambio climático, impactos, vulnerabilidad y adaptación.					
Informe Final (28 de Nov) de proyecto que incluya: índice, resumen español e inglés, introducción, antecedentes, descripción de la metodología, resultados, conclusiones, recomendaciones, próximos pasos, bibliografía y anexos.					
Preparar una presentación en Power Point con los resultados más relevantes del estudio, los cuales se expondrán ante la Coordinación de Adaptación del INECC.					