

Revista Electrónica Nova Scientia

Teleconexiones atmosféricas-oceánicas
(océanos Pacífico y Atlántico) moduladoras de
veranos húmedos y secos en el Núcleo del
Monzón de Norte América

Teleconnections atmospheric-oceanic (Pacific
and Atlantic oceans) modulating the wet and dry
summers in the Core North American Monsoon

**Omar Llanes-Cárdenas¹, Héctor J. Peinado-Guevara²,
Mariano Norzagaray-Campos¹, Héctor A. González-
Ocampo¹, Cipriano García-Gutiérrez¹ y
Víctor M. Peinado-Guevara²**

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-
Unidad Sinaloa, Instituto Politécnico Nacional

² Escuela de Ciencias Económicas y Administrativas,
Universidad Autónoma de Sinaloa, Guasave

México

Víctor M. Peinado-Guevara. *E-mail: v_peinado@hotmail.com

Resumen

En décadas recientes, la irregularidad de las precipitaciones ha tenido diversos efectos ambientales y socioeconómicos adversos a nivel mundial. El objetivo de este trabajo fue analizar la resolución de cuatro Modelos Climáticos Regionales (MCR's) forzados por ERA-Interim para capturar los monzones extremos húmedos y secos en el Núcleo del Monzón de Norte América (NMNA), considerando los mecanismos oceánicos del Pacífico y del Atlántico. De las bases de datos disponibles en la red y para el período 1990-2008, se obtuvo: (1) promedio de las observaciones (obs media) después de haber obtenido 4 conjuntos de datos de precipitación observados: UDel, CLICOM, GPCP y CRU, (2) del Experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala (CORDEX)-de Norte América (NA) se obtuvieron cuatro MCR's forzados por ERA-Interim: RegCM4 (Reg1 y Reg2), HadGEM3-RA, RCA3.5 y REMO, (3) número e intensidad de los huracanes del Pacífico y (4) cálculo de las anomalías del Jet de Niveles Bajos del Caribe (CLLJ), Varianza Filtrada (VF), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO). Se seleccionaron dos monzones extremos: uno húmedo (1990) y otro seco (2005). Se aplicó una prueba de normalidad de Shapiro Wilk a los datos a estudiar. Se calculó una correlación de Pearson y una prueba de hipótesis con nivel de confianza de 95 % ($P \leq 0.05$) y 99 % ($P \leq 0.01$) entre los modelos, Era-Interim, las observaciones y los índices oceánicos. Sin considerar los índices oceánicos, HadGEM3-RA y ERA-Interim capturan de mejor manera la precipitación en los monzones húmedos, en tanto que ERA-Interim y Reg1 resultaron ser mejores para capturar la precipitación para monzones secos. El monzón de 1990 presentó casi el doble de precipitación que el 2005. Esta anomalía húmeda al parecer se asocia con la ocurrencia de 16 huracanes cerca del Golfo de California en 1990, lo que contrasta con el 2005, cuando solo se presentaron 7 huracanes. VF y CLLJ son inversamente proporcionales a la vea que son dos predictores significativos de los monzones húmedos en el NMNA. ERA-Interim captura de mejor manera las precipitaciones en años extremos húmedos. La PDO se correlacionó significativa y negativamente con REMO ($P_r = -0.90$) y CLLJ ($P_r = -0.90$), es decir, REMO no presenta resolución para capturar monzones secos que ocurren al presentarse fases $-PDO$. Cuando se presentan anomalías de fase $+PDO$ y $-CLLJ$, también se presentará una anomalía de fase $-CLLJ$ y viceversa, las cuales son características de eventos secos. Esta metodología resultó eficaz para predecir eventos hidroclimáticos extremos en el NMNA, sobre todo cuando se carece de datos provenientes de estaciones meteorológicas.

Palabras clave: El Niño; La Niña; Núcleo del Monzón de Norte América; índices oceánicos; CLLJ.

Recepción: 16-06-2017

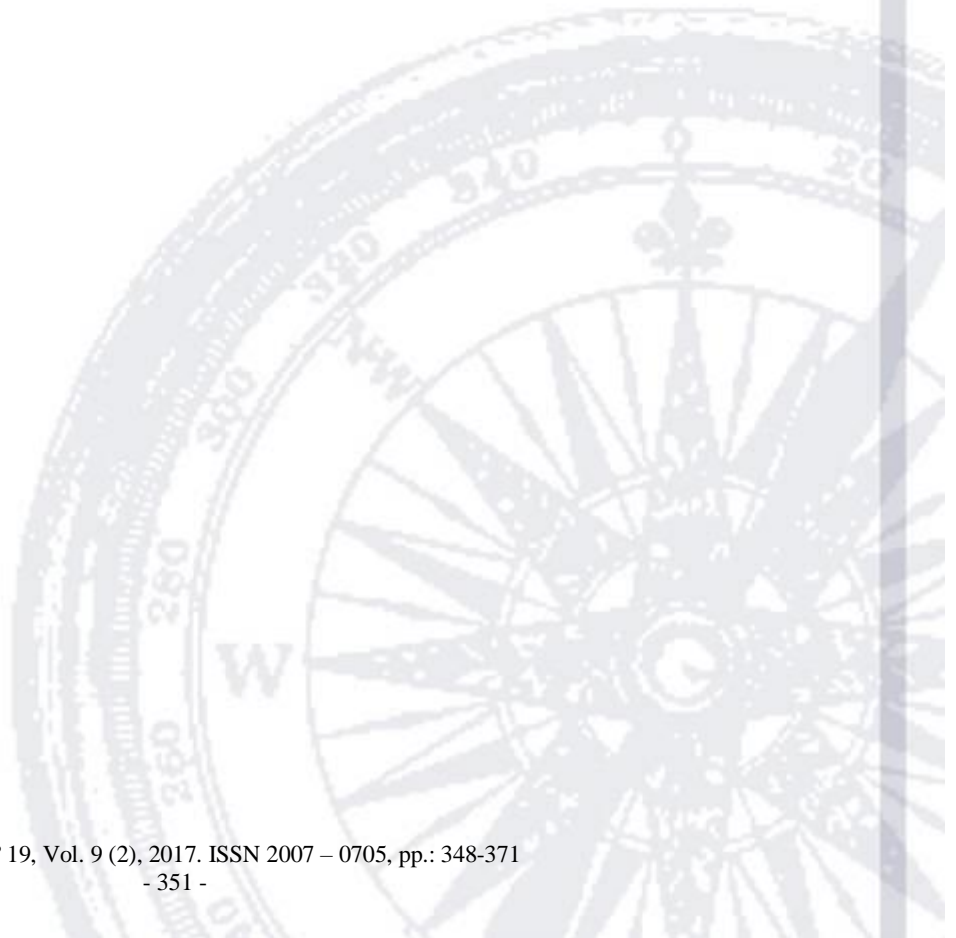
Aceptación: 22-09-2017

Abstract

In recent decades, irregular rainfall has evidenced a number of adverse environmental and socioeconomic effects worldwide. The goal of this study was to analyze the ability of four Regional Climatic Models (RCM's) forced by ERA-Interim to capture the humid and dry extreme monsoons in the Core North American Monsoon (CNAM), considering the oceanic mechanisms of the Pacific and Atlantic. From available databases in the network and for the period 1990-2008, we obtained: 1) average observations (obs mean); after obtaining four sets of observed precipitation data: UDeI, CLICOM, GPCP and CRU, 2) from the Coordinated Regional Scale Reduction Experiment (CORDEX) -of North America (NA), four RCM's were obtained forced by ERA-Interim, 3) number and intensity of Pacific hurricanes, and 4) calculation of Caribbean Low Level Jet (CLLJ) anomalies, the Filtered Variance (VF), the Decadal Pacific Oscillation (PDO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). Two extreme monsoons were selected: one wet (1990) and one dry (2005). To all the data, they were applied the test of normality of Shapiro Wilk. It was calculated a Pearson correlation and a hypothesis test, with a confidence level of 95% ($P < 0.05$) and 99% ($P < 0.01$) between the models, Era-Interim, the observations and oceanic indexes. Regardless of the oceanic indexes, HadGEM3-RA and ERA-Interim were the that better captured precipitation in wet monsoons; And ERA-Interim and Reg1 proved to be better at capturing precipitation for dry monsoons. The 1990 monsoon presented almost twice as much precipitation as the monsoon of 2005. This wet anomaly could be associated with the occurrence of 16 hurricanes near the Gulf of California by 1990, since in 2005, only 7 hurricanes occurred. VF and CLLJ are inversely proportional and are two significant predictors of wet monsoons in the CNAM. ERA-Interim better captures precipitation in extreme wet years. PDO, was significantly and negatively correlated with REMO ($P_r = -0.90$) and CLLJ ($P_r = -0.90$), that is to say, REMO has no ability to capture dry monsoons that occur when -PDO (La Niña) and -CLLJ (La Niña)

phases are present. The dry events are significantly associated with the occurrence of -PDO (La Niña) phase anomalies and not with the occurrence of -CLLJ (La Niña) phase anomalies. This methodology is an effective alternative to predict extreme hydroclimatic events in CNAM, especially when there is no data from weather stations.

Keywords: El Niño; La Niña; Core North American Monsoon; oceanic indexes; CLLJ.



Introducción

En décadas recientes, la irregularidad de las precipitaciones ha ocasionado una serie de problemas a nivel mundial, entre los que destacan sequías e inundaciones severas generadas por la ocurrencia de años extremos secos y húmedos respectivamente (Hare, 2003; IPCC, 2013). De acuerdo a Gochis *et al.* 2006, Brito *et al.*, 2010 y Llanes *et al.*, 2016, en la región del noroeste de México, las precipitaciones estacionales de verano (junio-septiembre) están asociadas en medida importante al Monzón de Norte América (MNA) y representan 60 a 80 % de las precipitaciones anuales (Gochis *et al.*, 2006; Cerezo *et al.*, 2016). Particularmente, el MNA presenta una amplia variabilidad sinóptica e intraestacional, caracterizada por ráfagas y rupturas del Monzón (Cavazos *et al.*, 2002; Cerezo *et al.*, 2016) asociadas a mecanismos de forzamientos locales y remotos, incluyendo huracanes, ondas de Rossby y la oscilación de Madden-Julian (Brito *et al.*, 2010; Seastrand *et al.*, 2014; Cerezo *et al.*, 2016). En el núcleo del MNA (NMNA), los veranos secos tienden a ocurrir después de inviernos húmedos (Zhuet *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2012), lo que manifiesta la variabilidad intraestacional e interanual. Dicha relación inversa, puede estar asociada a fluctuaciones de gran escala de las temperaturas superficiales del mar (TSM), como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) (Sutton and Hodson 2005). La relación inversa, también podría estar asociada a teleconexiones atmosféricas de los trenes de las ondas de Rossby, como los huracanes de gran intensidad (Chávez *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 2012; Cerezo *et al.*, 2016) así como a la variabilidad de los vientos zonales, como el Jet de Niveles Bajos del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) y meridionales como las Ondas del Este (OE) (Trenberth, 1997; Hare y Mantua, 2000; Méndez y Magaña, 2009; Llanes *et al.*, 2016). Para el uso de datos estacionales de precipitación provenientes de Modelos Climáticos Regionales (MCR's), es conveniente elegir el modelo con mayor resolución para capturar la variabilidad de las precipitaciones (Gutzler *et al.*, 2005; Bukovsky *et al.*, 2013; Cerezo *et al.*, 2011). El objetivo de este trabajo fue analizar la funcionalidad de cuatro Modelos Climáticos Regionales (MCR's) producidos por el Experimento Regional Coordinado de Reducción del Clima (CORDEX, por sus siglas en Inglés) de Norte América (NA): RegCM4 (Reg1 y Reg2), HadGEM3-RA, RCA3.5 y REMO (forzados por ERA-Interim), para capturar los monzones extremos húmedos y secos en NMNA, considerando los mecanismos oceánicos del Pacífico y del Atlántico: número e intensidad de huracanes del Pacífico, y los índices CLLJ, OE, PDO y AMO. Dicha metodología es una

alternativa eficaz para predecir eventos hidroclicmáticos extremos en el NMNA, sobre todo cuando se carece de datos provenientes de estaciones meteorológicas (Norzagaray *et al.*, 2016). Los eventos mencionados pueden poner en riesgo la sustentabilidad alimentaria de los estados de Sonora, Chihuahua y Sinaloa, los cuales conforman la región agrícola y ganadera más importante de México (Llanes *et al.*, 2015; 2016).

Materiales y Métodos

El NMNA de acuerdo a Cavazos *et al.* (2008), lo conforman porciones de los estados de Sinaloa, Sonora y Chihuahua, en el noroeste de México (figura 1a) y presenta como límites las coordenadas -112° a -106° Longitud Oeste y de 24° a 30° Latitud Norte y se ha considerado a nivel mundial como sector marino de conservación y manejo sustentable (Lluch-Cota *et al.*, 2007) (Figura 1b).

Precipitación observada promedio (obs media)

Se obtuvieron cuatro conjuntos de datos de precipitación mensual observados, de los cuales se obtuvo el promedio (obs media). Obs media se utilizó para evaluar la resolución de los modelos y ERA-Interim para capturar los monzones húmedos y secos extremos.

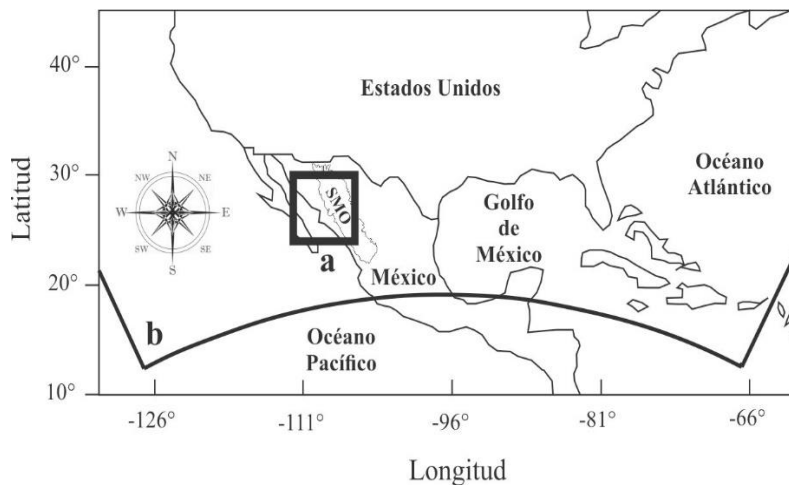


Figura 1. Área de estudio: (a) región del NMNA y (b) región definida por el CORDEX-NA.

El primer conjunto de datos fue el de la Universidad de Delaware (UDel), cuyo período de estudio abarcó de 1950 a 2008; el mencionado conjunto fue obtenido de la NOAA/OAR/ESRLPSD, Boulder, CO, USA desde el sitio web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. UDel es una compilación interpolada con un mallado regular de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (Willmott y Matsuura, 1995). El segundo

conjunto de datos observados fue la versión 2.2 del Global Precipitation Climatology Project (GPCP, Adler *et al.*, 2003), el cual se obtuvo de igual manera de la NOAA/OAR/ESRLPSD, Boulder, CO, USA, desde el mismo con sitio web. El tercer conjunto de datos de precipitación observado fue el Climate Computing (CLICOM), que contiene datos diarios de precipitación, a partir de los cuales se calcularon los datos mensuales. La precipitación media se interpoló con un mallado regular de $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ para el período de 1960 a 2008 (Muñoz-Arriola *et al.*, 2009; Llanes *et al.*, 2016), disponible en el sitio web [http://clicom-mex.cicese .mx/](http://clicom-mex.cicese.mx/). Finalmente, el cuarto conjunto de datos fue la versión 3.1 de la East Anglia Climatic Research Unit (CRU) (Mitchell y Jones, 2005), con un mallado regular de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, el cual fue obtenido de la British Atmospheric Data Center (BADC), desde el sitio web http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.Nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276.

Modelos Climáticos Regionales (MCR's)

Los MCR's son modelos numéricos que resuelven las ecuaciones que simulan la interacción de la atmósfera terrestre, los océanos, el relieve terrestre y el hielo (Cerezo *et al.*, 2016). La región CORDEX-Norte América (CORDEX-NA) se definió mediante el CORDEX framework, la cual abarca la mayor parte de los Estados Unidos, Canadá y hasta el centro de México (Figura 1b). De acuerdo a las directrices del CORDEX, los MCR's deben manejarse con el ERA-Interim como condiciones de frontera e inicial, con un mallado de espaciamiento horizontal de ~50 km. Se omitió el primer año de las simulaciones (1989) por considerarse un modelo de período spin-up (Giorgi *et al.*, 2009). Se analizaron y compararon los datos de los cuatro MCR's: RegCM4 (Giorgi *et al.*, 2012), HadGEM3-RA (una versión regional del HadGEM3 mundial, Hewitt *et al.*, 2011), RCA3.5 (Samuelsson *et al.*, 2011) y REMO (Jacob, 2001). Para RegCM4, se analizaron dos simulaciones diferentes (Reg1 y Reg2), siendo la única diferencia entre ellas la parametrización convectiva: Reg1 utilizó una escala de tiempo constante para liberar la inestabilidad convectiva sobre la Tierra (Fritsch y Chappell, 1980; Emanuel, 1991; Grell, 1993) y Reg2 utilizó todos los puntos de la red (Emanuel, 1991). Las simulaciones del RegCM4 (Reg1 y Reg2) se realizaron en la Universidad del estado de Iowa. La simulación HadGEM3-RA fue generada por el Met Office/Centro Hadley utilizando el esquema convectivo (Gregory y Rowntree, 1990), la simulación del RCA3.5 fue realizada por el Servicio Meteorológico Sueco y se llevó a cabo con el esquema convectivo (Kain y Fritsch, 1990; 1993) y, por último, la simulación REMO fue realizada por el Instituto Max Planck

de Meteorología, utilizando el esquema convectivo (Tiedtke, 1989). Existen otros trabajos, que han analizado la resolución de otros MCR's en el MNA (Bukovsky *et al.*, 2013), sin embargo, dichos MCR's fueron forzados con el reanálisis del NCEP, el cual puede no ser el reanálisis más adecuado para esta región (Cerezo-Mota *et al.*, 2011), debido a que no presenta alta resolución para reproducir las precipitaciones estacionales (julio-septiembre) en el NMNA. Se calculó el sesgo o desviación (bias), el cual consistió en restar el valor de obs media a cada uno de los MCR's (Figura 3).

Variabilidad interanual y ciclo anual

Se calcularon las anomalías estandarizadas de precipitación de los MCR's y obs media para el período 1990-2008 (Figura 4a, Méndez y Magaña, 2009; Llanes *et al.*, 2016). Para ello, se seleccionaron dos años extremos: uno seco (< -1 std) y otro húmedo ($> +1$ std). La selección de los años extremos se fundamentó en dos condiciones: (1) el año donde la dispersión entre las observaciones fue el mínimo y 2) el año donde la mayoría de las simulaciones mostraron anomalías del mismo signo (Cerezo *et al.*, 2016). A partir de tales condiciones, el año 1990 fue elegido como el húmedo y el 2005 como el año seco. Para dichos años (1990 y 2005) se analizó el ciclo anual de precipitación de los MCR's y obs media (Figura 4, Cavazos *et al.*, 2008).

Número e intensidad de huracanes de los años extremos

El número e intensidad de huracanes generados en el Océano Pacífico para 1990 y 2005 se obtuvo del Archivo Nacional del Centro de Huracanes (HURDAT2), del sitio web <http://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>. En este trabajo, sólo se consideraron los huracanes categoría 1, 2 y 3. No se incluyeron las depresiones y tormentas tropicales, debido a que en la revisión de los datos no se encontraron impactos significativos de estos ciclones tropicales en la región del NMNA entre mayo y septiembre de 1990 y 2005 (Cerezo *et al.*, 2016; Llanes *et al.*, 2016).

Anomalías de CLLJ, VF, PDO y AMO

La intensidad del CLLJ se definió por el efecto negativo de las anomalías del viento zonal a 925 hPa en la región $12.5-17.5^{\circ}$ LN y $70-80^{\circ}$ LW (Wang, 2007), debido a que los vientos de niveles bajos, dentro de la región del jet son del este. Cuando se presentó una anomalía de fase -CLLJ, el

CLLJ fue anómalamente intenso. Mediante el software TRACK se calculó la varianza filtrada (VF) del viento meridional a 700 hPa de alta frecuencia entre 3-9 días de un sitio en el mar Caribe (17.5° N y 70°W) dentro del cinturón de trayectorias de las OE (Méndez y Magaña, 2009). El valor de VF se consideró como una medida de la actividad de OE en la región del Caribe, donde una mayor VF se asoció a una mayor energía debido al paso de las OE (Diedhiou *et al.*, 1999). La PDO se definió como las anomalías de la TSM en el Océano Pacífico Norte (20°–65° N, 100°–0° W), donde las anomalías positivas se asociaron a episodios de El Niño (Mantua *et al.*, 1997). La AMO involucró cambios en la TSM sobre extensas áreas del Atlántico tropical, en periodos de varias décadas (Enfield *et al.* 2001), los cuales representaron las anomalías de temperatura anual (con tendencia removida) promediadas sobre el Atlántico Norte (0-70 °N). De manera similar, las anomalías negativas de la AMO se asociaron a episodios de El Niño (Llanes *et al.*, 2016). Las series de tiempo históricas de la PDO y AMO así como de los vientos zonales y meridionales para el período 1989-2008 fueron obtenidos de la base de datos de la NOAA, en el sitio web <http://www.cdc.noaa.gov>.

Análisis estadístico

Pruebas estadísticas, evaluación de los MCR's y elaboración de mapas

Para conocer si los conjuntos de datos MCR's, ERA-Interim, obs media e índices oceánicos (CLLJ, OE, PDO y AMO), presentaban normalidad para los años extremos 1990 y 2005, se procedió a aplicar una prueba de normalidad de Shapiro Wilk, en virtud de que dicha prueba presenta una adecuada potencia cuando el número de datos analizados es menor a 30 ($n < 30$) (Villaseñor y González, 2009). Después de verificar la normalidad de los conjuntos de datos, se calculó una correlación de Pearson (P_r) con un nivel de confianza de 95 % ($p < 0.05$) y 99 % ($p < 0.01$). Para conocer la varianza entre los MCR's, ERA-Interim y obs media, se calculó la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y la varianza (S). Para corroborar que los coeficientes de P_r , eran significativamente diferentes de cero ($H_0: P_r = 0$; $H_1: P_r \neq 0$), se aplicó una prueba de hipótesis (Camacho, 2008). Los P_r de los dos años extremos se compararon con un índice crítico absoluto ($P_{rcrít} \geq |0.90|$ para $\alpha = 0.05$; $P_{rcrít} \geq |0.98|$ para $\alpha = 0.01$). Los análisis estadísticos y la elaboración de mapas se realizaron con los programas Excel de Microsoft versión 2013, PAleontological STatistics (PAST) versión 3.08 (Hammer, 2015), Surfer 10.0 y CorelDRAW X7.

Resultados

Ciclo anual. Al considerar los cuatro conjuntos de observaciones, UDel registró aproximadamente 15 % menos precipitaciones (Figura 2).

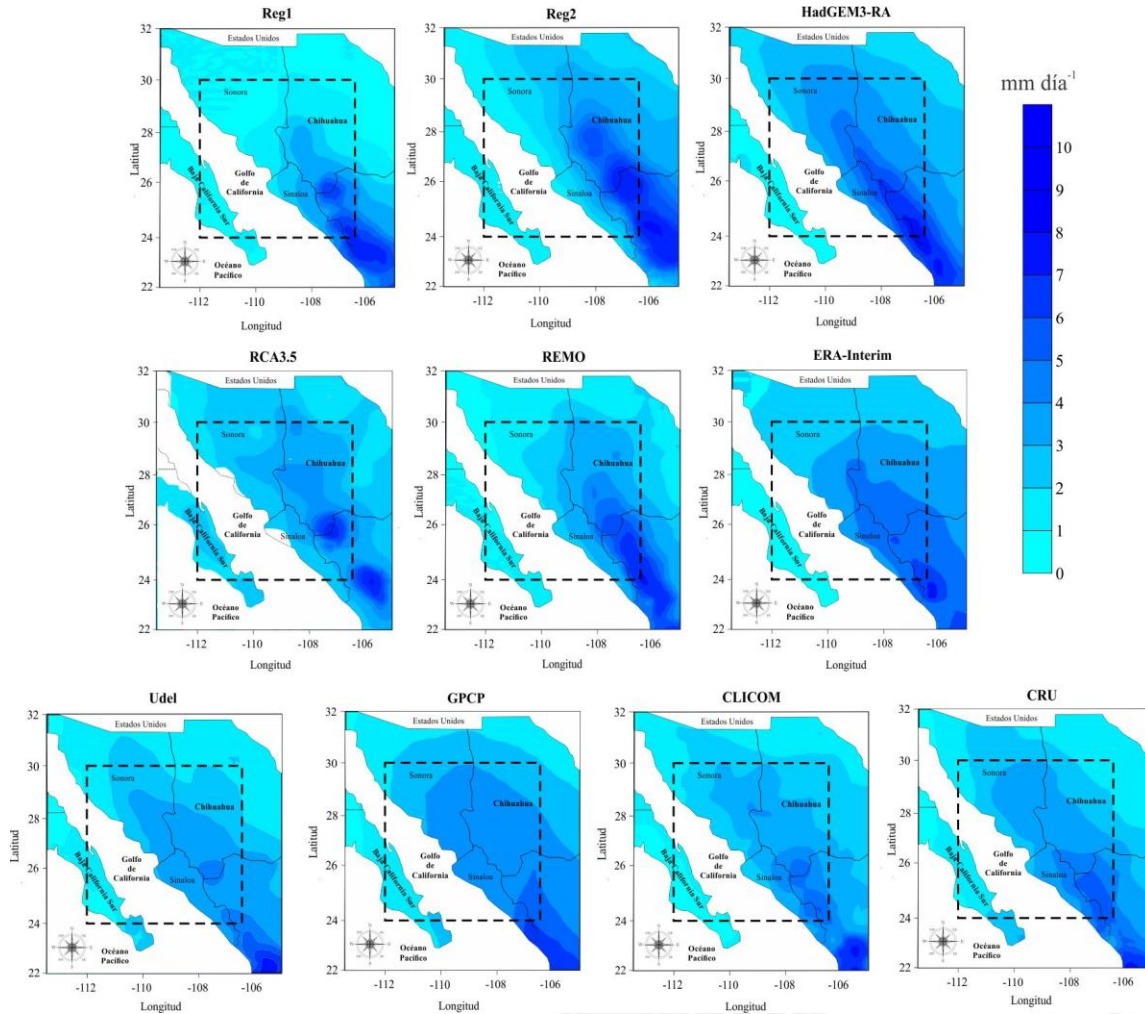


Figura 2. Precipitación monzónica promedio de los MCR's y obs media en el período 1990-2008 (mm día⁻¹).

Al tomar en cuenta que la variación espacial y bias negativos, Reg1 y ERA-Interim, presentaron mayor resolución para capturar los veranos secos (Figuras 2 y 3). En el NMNA, Reg2 reprodujo con mayor resolución la precipitación promedio de verano con respecto a Reg1, pero Reg2 presentó mayores sesgos negativos en las zonas costeras de Topolobampo (Sin), El Maviri (Sin), Guaymas (Son) y San Carlos (Son), lo que coincide con Fuentes-Franco *et al.* (2014).

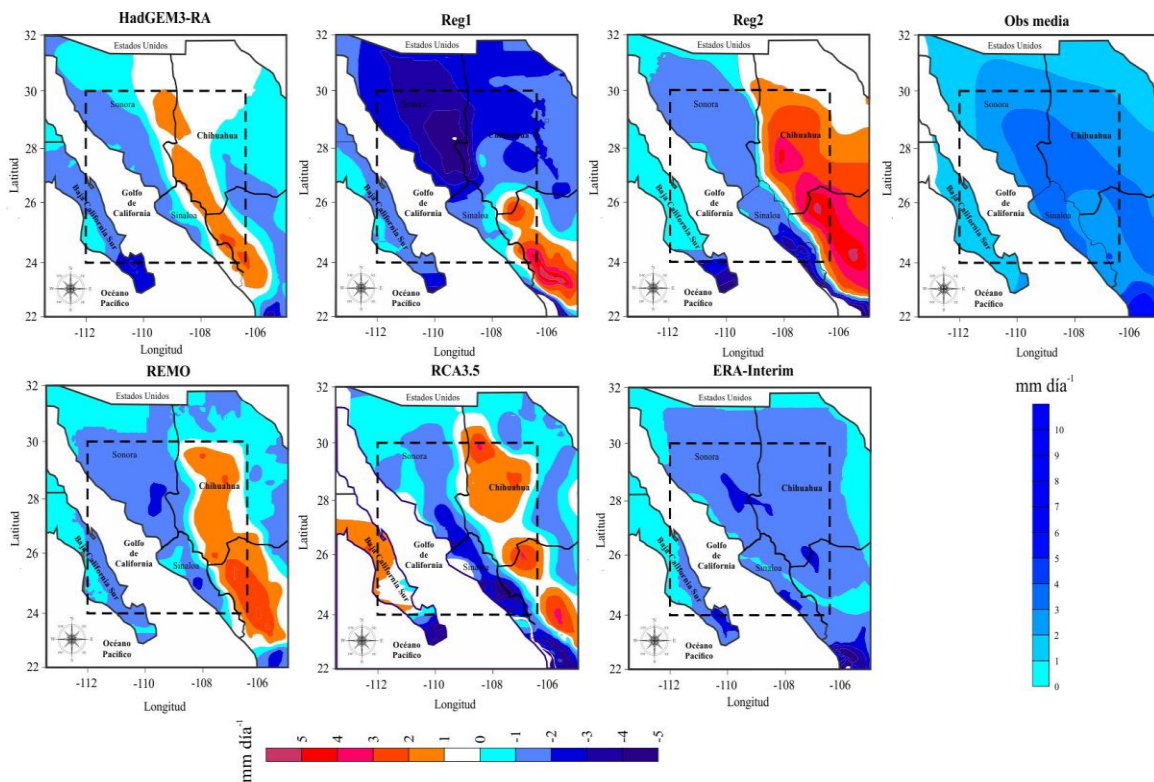


Figura 3. Sesgo de la precipitación monzónica promedio para el período 1990-2008 (mm día^{-1}).

REMO registró la precipitación máxima en septiembre, con más del doble de la precipitación en comparación con obs media. RCA3.5, HadGEM3-RA y Reg2, también sobreestimaron la precipitación sobre la Sierra Madre Occidental (SMO), donde Reg2 mostró los mayores sesgos positivos al sureste del estado de Sinaloa (Figuras 1 y 3).

Variabilidad interanual

Los años 1990, 1991 y 2005 registraron la menor dispersión de obs media (Figura 4a). Los veranos de 1996, 1999 y 2006 registraron dispersiones superiores a $|1.0|$. Los resultados concuerdan con Cerezo *et al.* (2016), quienes encontraron que 1999 fue el año con mayor dispersión, incluyendo la diferencia del signo de las anomalías.

RMSE y S entre los modelos y las observaciones

Sin tomar en cuenta los mecanismos oceánicos del Pacífico y el Atlántico, ERA-Interim presentó la mayor resolución para capturar las precipitaciones estacionales en el NMNA para el período 1990-2008, debido a que los valores del RMSE y S fueron mínimos (Cuadro 1). El modelo que

presentó la menor resolución para capturar las precipitaciones en el NMNA fue Reg2, debido a que el RMSE y S presentaron los valores máximos (Cuadro 1).

Cuadro 1. RMSE y S entre los modelos, ERA-Interim y obs media para el período 1990-2008.

Modelo	RMSE	S
Reg1	1.1368	1.6080
Reg2	1.9577	3.4003
HadGEM3-RA	1.0755	1.7348
RCA3.5	0.9986	1.3528
REMO	1.0869	1.7892
ERA-Interim	0.7807	1.0602

Condiciones atmosféricas y oceánicas, asociadas con monzones extremos

Condiciones atmosféricas

Para RCA3.5, el inicio del monzón intenso se registró en junio, debido a que casi triplicó la precipitación con respecto a obs media (Cerezo *et al.*, 2016). El monzón de 1990 mostró un invierno seco, que fue capturado adecuadamente por la mayoría de los MCR's, excepto por Reg1 y Reg2, los cuales sugirieron inviernos húmedos (Figuras 4a y 4b). A su vez, para 2005 los modelos reflejaron más similitud con las observaciones, excepto los modelos REMO y HadGEM3-RA, los cuales sobreestimaron la precipitación de septiembre (Jacob *et al.*, 2012). El verano de 1990 registró casi el doble de la precipitación que con respecto a 2005 (Figura 4b y 4c).

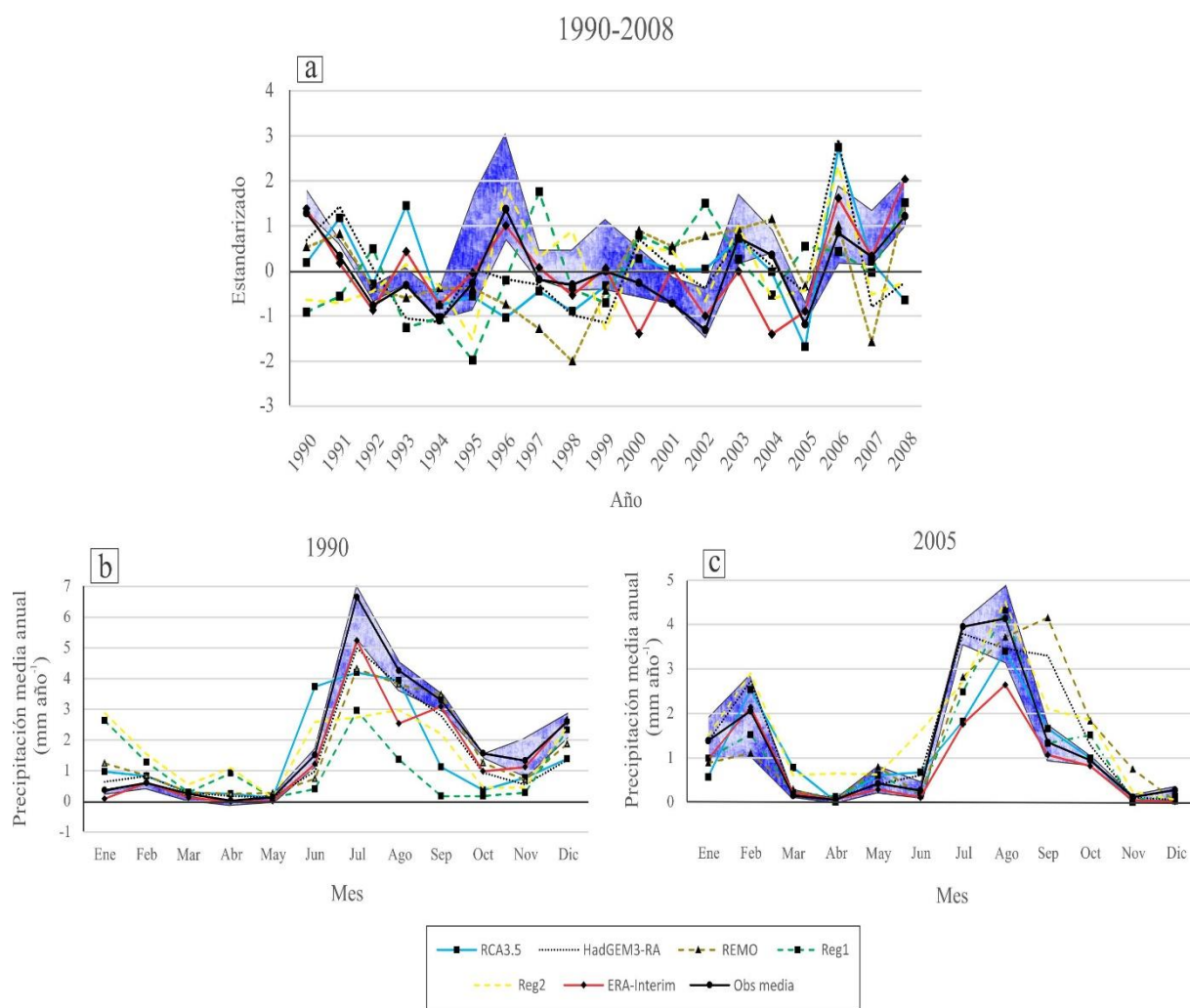


Figura 4. (a) Anomalías estandarizadas de precipitación para 1990-2008 (mm día^{-1}), (b) precipitación media anual para 1990 (mm día^{-1}) y (c) precipitación media anual para 2005 (mm día^{-1}) (la línea azul con blanco en las figuras 4a, 4b y 4c, indican la dispersión de obs media).

Condiciones atmosféricas y oceánicas del Pacífico y Atlántico

Huracanes del Pacífico y anomalías de CLLJ, VF, PDO y AMO

Para los años 1990 y 2005 no se presentaron asociaciones claras entre la ocurrencia de huracanes en el Pacífico y las precipitaciones generadas en NMNA. Sin embargo, de acuerdo a Wang and Enfield (2003) y Méndez y Magaña (2009), el número e intensidad de huracanes está altamente correlacionado con las anomalías de TSM. También se ha documentado que las anomalías de CLLJ, VF, PDO y AMO (Figura 5) son fuentes potenciales de humedad atmosférica en el norte de México, las cuales podrían explicar la tendencia de los monzones extremos en NMNA (Espinosa y Valdez, 2007; Méndez y Magaña, 2009; Ormaza, 2016; Tamara *et al.*, 2017).

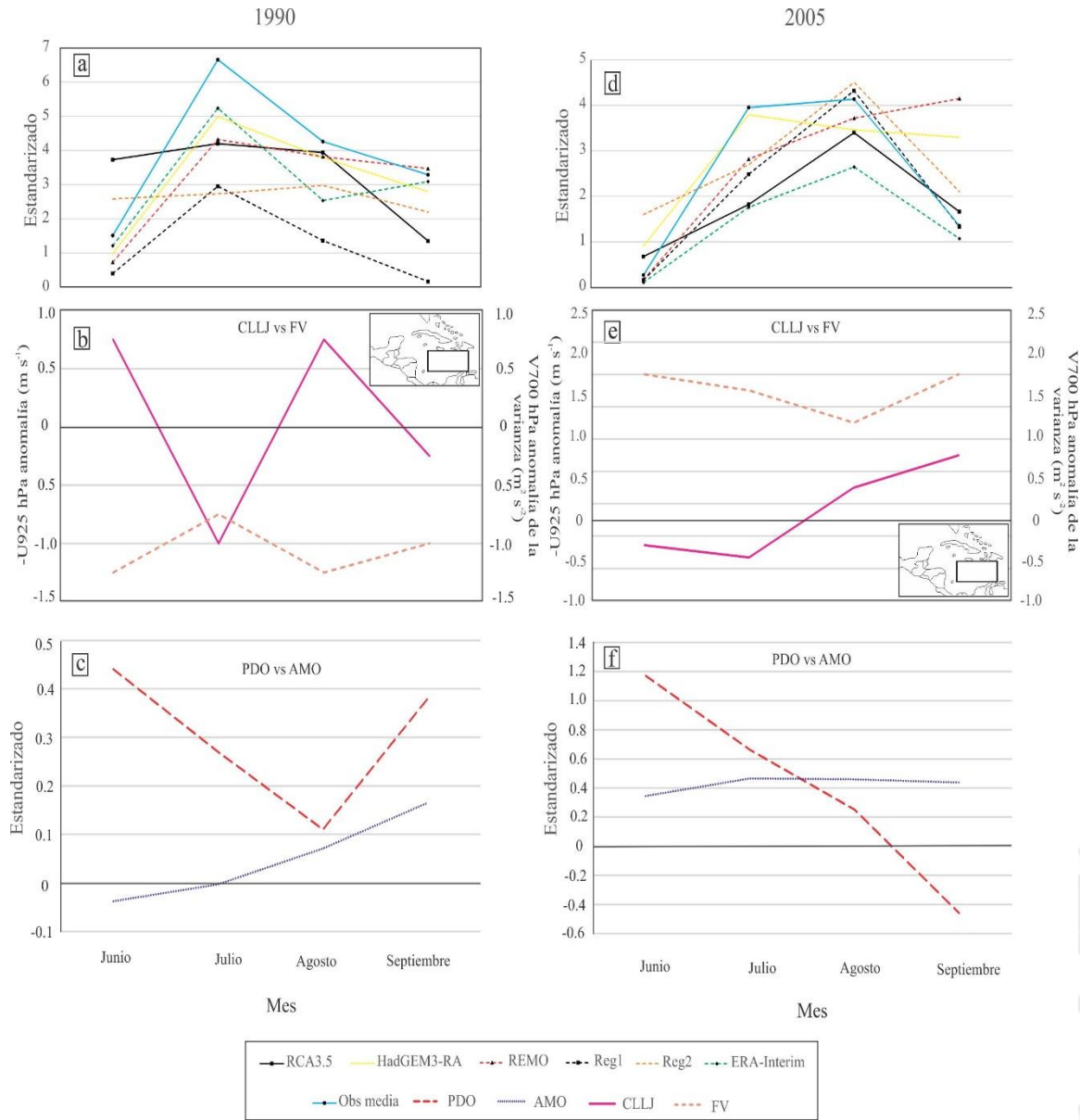


Figura 5. (a) anomalías estandarizadas monzónicas de los modelos, ERA-Interim, obs media y los índices oceánicos para 1990 y (b) igual que la figura 5a, pero para 2005.

De acuerdo a la figura 5d, los meses de junio y septiembre de 2005 representaron los meses monzónicos con menores precipitaciones del período 1989-2008, debido a que obs media registró las anomalías mínimas. En NMNA, el modelo que capturó con mayor resolución la precipitación en el monzón seco fue HadGEM3-RA, a su vez, Reg2 fue el modelo que sobreestimó con mayor magnitud la precipitación y ERA-Interim la subestimó en mayor magnitud. Lo anterior obedece a que Reg2 sobreestimó la precipitación en la Sierra Madre Occidental (SMO), así como el noreste

de Sinaloa y Sonora (Figuras 1 y 3, Cerezo *et al.*, 2016). En 2005 se observaron anomalías de fase -CLLJ (La Niña) en el período junio-julio y también se presentaron anomalías de fase +VF, las cuales son características de la ocurrencia de períodos secos.

Análisis estadístico de los monzones extremos

Análisis de correlación para 1990

HadGEM3-RA y ERA-Interim capturaron con mayor resolución la precipitación en años extremos húmedos, debido a que los mayores P_r , fueron para HadGEM3-RA vs obs media = 0.98 y ERA-Interim vs obs media = 0.95 (Cuadro 2). VF y CLLJ fueron los únicos índices oceánicos que presentaron correlación significativa, debido a que VF vs CLLJ, VF vs ERA-Interim y CLLJ vs ERA-Interim presentaron correlaciones de $P_r = -1.00$, $P_r = 0.94$ y $P_r = -0.92$, respectivamente (Cuadro 2). Lo anterior significa que VF y CLLJ son inversamente proporcionales y que pueden ser dos predictores significativos de los monzones húmedos, para los que NMNA y ERA-Interim capturaron de mejor manera las precipitaciones en años extremos húmedos.

Cuadro 2. Análisis de correlación entre los modelos, obs media, CLLJ, VF, PDO y AMO para 1990 (año húmedo).

	RCA3.5	HadGEM3-RA	REMO	Reg1	Reg2	Era-Interim	Obs media	CLLJ	VF	PDO	AMO
RCA3.5		0.73	0.97	0.33	0.12	0.88	0.66	0.88	0.96	0.57	0.17
HadGEM3-RA	0.27		0.06	0.16	0.60	0.10	0.02	0.33	0.31	0.31	0.86
REMO	-0.03	0.94		0.38	0.79	0.17	0.12	0.38	0.38	0.32	0.54
Reg1	0.67	0.84	0.62		0.42	0.19	0.09	0.39	0.34	0.49	0.60
Reg2	0.88	0.40	0.21	0.58		0.93	0.63	0.72	0.78	0.22	0.51
Era-Interim	0.12	0.90	0.83	0.81	0.07		0.05	0.08	0.06	0.70	0.91
Obs media	0.34	0.98	0.88	0.91	0.37	0.95		0.25	0.22	0.43	1.00
CLLJ	0.12	-0.67	-0.62	-0.61	0.28	-0.92	-0.75		0.00	0.93	0.89
VF	-0.04	0.69	0.62	0.66	-0.22	0.94	0.78	-1.00		0.95	0.95
PDO	-0.43	-0.69	-0.68	-0.51	-0.78	-0.30	-0.57	-0.07	0.05		0.86
AMO	-0.83	0.14	0.46	-0.40	-0.49	0.09	0.00	-0.11	0.05	-0.14	

Negrita = Prcrit = 0.90; $\alpha = 0.05$

□ = Prcrit = 0.98; $\alpha = 0.01$

n = 4

Análisis de correlación para 2005

ERA-Interim y Reg1 capturaron con mayor resolución los monzones secos, debido a que presentaron las mayores correlaciones; en este sentido, para ERA-Interim vs obs media, $P_r = 0.94$ y para Reg1 vs obs media, $P_r = 0.92$ (Cuadro 3). La VF evidenció correlación significativa negativa con RCA3.5 ($P_r = -0.93$), Reg1 ($P_r = -0.95$) y ERA-Interim ($P_r = -0.90$), es decir, RCA3.5, Reg1 y ERA-Interim no mostraron capacidad de resolución significativa para capturar las sequías severas.

Cuadro 3. Análisis estadístico de P_r entre los MCR's, obs media, CLLJ, VF, PDO y AMO para 2005 (año seco).

	RCA3.5	HadGEM3-RA	REMO	Reg1	Reg2	Era-Interim	Obs media	CLLJ	VF	PDO	AMO
RCA3.5		0.30	0.29	0.02	0.02	0.04	0.18	0.59	0.07	0.58	0.25
HadGEM3-RA	0.70		0.11	0.27	0.41	0.19	0.19	0.68	0.52	0.37	0.01
REMO	0.71	0.89		0.36	0.45	0.29	0.43	0.28	0.59	0.10	0.13
Reg1	0.98	0.73	0.64		0.02	0.01	0.08	0.78	0.05	0.71	0.20
Reg2	0.98	0.59	0.55	0.98		0.05	0.17	0.74	0.01	0.77	0.34
Era-Interim	0.96	0.81	0.71	0.99	0.95		0.06	0.75	0.10	0.64	0.13
Obs media	0.82	0.81	0.57	0.92	0.83	0.94		0.94	0.18	0.85	0.13
CLLJ	0.41	0.32	0.72	0.22	0.26	0.25	-0.06		0.88	0.10	0.71
VF	-0.93	-0.48	-0.41	-0.95	-0.99	-0.90	-0.82	-0.12		0.93	0.43
PDO	-0.42	-0.63	-0.90	-0.29	-0.23	-0.36	-0.15	-0.90	0.07		0.42
AMO	0.75	0.99	0.87	0.80	0.66	0.87	0.87	0.29	-0.57	-0.58	

Negrita = Pcrit = 0.90; $\alpha = 0.05$ □ = Pcrit = 0.98; $\alpha = 0.01$

n = 4

Discusión

Reg1 y ERA-Interim presentaron la mayor resolución para capturar los veranos secos (Figuras 2 y 3). Dichos resultados son similares a los de Fuentes Franco *et al.* (2014), quienes utilizando RegCM4 (Reg1 y Reg2) con una combinación de parametrización similar pero con un dominio CORDEX-América Central modificado, también encontraron que Reg1 tiende a subestimar las precipitaciones de verano en el noroeste de México. REMO registró casi el doble de precipitación en septiembre, en comparación con obs media, lo que está de acuerdo con los resultados de Jacob *et al.* (2012), quienes señalaron que REMO tiende a sobrestimar la precipitación estacional sobre las cadenas montañosas de Norteamérica. Los valores máximos de RMSE y S para Reg2, se pueden asociar a altos sesgos negativos en las zonas costeras (Fuentes-Franco *et al.*, 2014). Según los análisis efectuados, en 1990, se presentaron 16 huracanes en el Océano Pacífico Tropical del Este (OPTE), lo que en comparación con los 7.8 eventos estacionalmente promediados para el periodo 1990-2008 (Romero-Vadillo *et al.*, 2007), la ocurrencia de huracanes para el monzón húmedo se duplicó. Dicho aumento de huracanes en 1990, puede ser la causa de la ocurrencia del monzón húmedo extremo generado en 1990 (Llanes *et al.*, 2016). Se observa en la Figura 5a, que julio de 1990 fue el mes con mayor humedad en el período 1989-2008, debido principalmente a que obs media registró la máxima anomalía. ERA-Interim y HadGEM3-RA capturaron con mayor resolución la precipitación en los monzones húmedos, en tanto que Reg2 y Reg1 fueron los modelos que la subestiman en mayor magnitud. Lo anterior obedece a que Reg1 tiende a subestimar las precipitaciones de verano en el noroeste de México y Reg2 presentó altos sesgos negativos en las zonas costeras de Topolobampo (Sin.), Guaymas (Son.) y San Carlos (Son.) (Fuentes-Franco *et al.*, 2014). Según la figura 5c, AMO, fue el índice oceánico con el menor efecto sobre el monzón extremo de 1990, debido a que durante el período julio-septiembre se presentaron

fases +AMO (La Niña), las cuales se asocian a eventos secos en el noroeste de México (Méndez y Magaña, 2009). Al considerar las fases +PDO (El Niño) registradas para el período junio-septiembre de 1990, junio fue el mes que más contribuyó a la generación de humedad anual, lo cual se asocia a que registró la mayor anomalía cálida (Llanes *et al.*, 2016). En junio y agosto de 1990 se registraron fases +CLLJ (El Niño), las cuales se asociaron a transportes potenciales de humedad hacia Norteamérica (Méndez y Magaña, 2009). Dichos resultados coinciden con los de Cerezo *et al.* (2016), quienes reportaron para junio y el período agosto-octubre de 1990, la incidencia de 11 huracanes (Boris, Elida, Julio, Kena, Lowell, Marie, Norbert, Odile, Polo, Trudy y Vance) de un total de 16 huracanes registrados en el OPTE en 1990. De acuerdo a las anomalías de fase -VF (El Niño), en junio y agosto de 1990, las OE aportaron las mayores humedades para el año húmedo extremo de 1990. Estos resultados son similares a los encontrados por Méndez y Magaña (2009) reportaron para el verano de 1990, anomalías de fase +CLLJ y -VF en el norte de México, características de presencia de humedades potenciales. De acuerdo a las fases +CLLJ (El Niño), -VF (El Niño) y +PDO (El Niño), para junio y el período agosto-septiembre, así como para el período de huracanes que se presentaron en el OPTE en junio y el período agosto-octubre de 1990, se puede inferir que en junio y agosto se presentó el mayor aporte de humedad de los indicadores oceánicos en el período 1989-2008 (Méndez y Magaña, 2009; Llanes *et al.*, 2016; Cerezo *et al.*, 2016). Para el período de agosto-septiembre se registraron 5 huracanes (Fernanda, Hillary, Java, Keneth y Max) de un total de 7 huracanes ocurridos en el 2005 en el OPTE, los cuales estarían asociados a la ocurrencia de anomalías de fase +CLLJ (El Niño) y +PDO (El Niño), que pueden considerarse transportadores de humedad hacia NMNA (Méndez y Magaña, 2009 y Llanes *et al.*, 2016). Las anomalías de CLLJ, VF, PDO y AMO, así como la ocurrencia de huracanes en el OPTE, pueden ayudar a predecir los monzones húmedos y secos extremos en el NMNA (Figura 5b, CPC/NCEP, 2015; Llanes *et al.*, 2015; Tamara *et al.*, 2017). Lo anterior puede atribuirse a que, según Méndez y Magaña (2009), CLLJ y VF son fuentes potenciales de humedad en norte américa y el noroeste de México. Ello también puede asociarse a un mayor número de huracanes ocurridos con mayor intensidad que se caracterizaron por mayores humedades relativas y anomalías con mayores alturas geopotenciales en el nivel de 500 hPa (Llanes *et al.*, 2016). En la Cuadro 3 se observa que el CLLJ no presenta correlación significativa para la ocurrencia de monzones secos, lo cual obedece a que aunque el CLLJ está relacionado con el clima en la región del Caribe, Centroamérica y México (Amador 1998; Méndez y Magaña, 2009), este indicador no

alcanza a reflejar un efecto significativo en la región del noroeste de México, específicamente en el NMNA. La PDO se correlacionó significativa y negativamente con REMO ($P_r = -0.90$) y CLLJ ($P_r = -0.90$), lo que significa que el modelo REMO no presenta resolución para capturar monzones secos que ocurren cuando se presentan fases $-PDO$ y $-CLLJ$ (Espinosa y Valdez, 2007; Méndez y Magaña, 2009). Los eventos secos se asociaron significativamente a la ocurrencia de anomalías de fase $-PDO$ (La Niña), no así con la ocurrencia de anomalías de fase $-CLLJ$ (La Niña, Méndez y Magaña, 2009). La AMO se correlacionó significativa y positivamente con HadGEM3-RA ($P_r = 0.99$), lo que significa que HadGEM3-RA alcanza la mayor resolución para capturar monzones secos, cuando se presenten anomalías de fase $+AMO$ (La Niña), las cuales son características de eventos secos en el noroeste de México (Méndez y Magaña, 2009; Llanes *et al.*, 2016).

Conclusiones

En este trabajo se analizó la resolución de cuatro modelos forzados por el reanálisis ERA-Interim para el período 1990-2008. Se aplicó una correlación de Pearson entre los modelos ERA-Interim, obs media y los índices oceánicos del Pacífico y Atlántico (CLLJ, VF, PDO y AMO), para conocer los mecanismos oceánicos que pueden estar asociados con la ocurrencia de años extremos húmedos y secos en el NMNA. La precipitación del verano de 1990 casi duplicó la precipitación del 2005. En 1990 ocurrió casi el doble de huracanes en el OPTE en el período 1990-2008, lo que puede interpretarse como una de las causas del extremo húmedo registrado para el monzón de 1990 (Llanes *et al.*, 2016). Los resultados de Méndez y Magaña (2009) para el noroeste de México son similares a los reportados en este trabajo, debido a que estos autores encontraron para 1990 (año húmedo) los siguientes valores: AMO = 0.05, PDO = 1.00, VF = $-1.10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y CLLJ = 0.20 m s^{-1} , los cuales son valores que propician precipitaciones intensas en el norte de México (Llanes *et al.*, 2016). Los resultados promedio estacionales de los indicadores oceánicos de este estudio para 2005 (año seco): AMO = 0.43, PDO = 0.41, VF = 0.25 y CLLJ = -1.62 , son similares a los resultados de Méndez y Magaña (2009), quienes señalan que las fases $+AMO$, $-PDO$, $+VF$ y $-CLLJ$ son propicias para la ocurrencia de veranos secos en el noroeste de México. VF y CLLJ fueron los únicos índices oceánicos que presentaron correlación significativa (VF vs CLLJ = -1.00 , VF vs ERA-Interim = 0.94 y CLLJ vs ERA-Interim = -0.92 , respectivamente (Cuadro 2). Ello implica que VF y CLLJ son inversamente proporcionales y que pueden ser dos predictores significativos de los monzones húmedos en el NMNA, así mismo, que ERA-Interim captura de

mejor manera las precipitaciones en años extremos húmedos en el NMNA. Lo anterior puede atribuirse a que, según Méndez y Magaña (2009), la ocurrencia de anomalías de fase +CLLJ (El Niño) y -VF (El Niño), son fuentes potenciales de humedad en norte américa y el noroeste de México. El CLLJ no refleja correlación significativa para la ocurrencia de monzones secos (P_r de -0.06 a 0.72), lo cual se infiere aún cuando está relacionado con el clima en la región del Caribe, Centroamérica y México (Amador, 1998; Méndez y Magaña, 2009), pero no alcanza a reflejar un efecto significativo en la región del noroeste de México, específicamente en el NMNA. Lo anterior coincide con Méndez y Magaña (2009) quienes encontraron una correlación no significativa entre CLLJ y los eventos secos para el norte de México (P_r de -0.30 a 0.60). La PDO se correlacionó significativa y negativamente con REMO ($P_r = -0.90$) y CLLJ ($P_r = -0.90$), lo que significa que REMO no alcanza resolución para capturar monzones secos que ocurren cuando se presentan fases -PDO (Espinosa y Valdez, 2007). Los eventos secos, se asocian significativamente con la ocurrencia de anomalías de fase -PDO, no así con la ocurrencia de anomalías de fase -CLLJ. Lo anterior coincide con los resultados de Llanes *et al.* (2016) para el noroeste de México, pues señalan que las fases -PDO son esenciales para la ocurrencia de eventos secos y por consecuencia también de anomalías de fase -CLLJ (Méndez y Magaña, 2009).

Agradecimientos

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, por el apoyo económico brindado mediante los Proyectos de investigación con registro 20170218 y 20170039.

Referencias

- Adler R.F., Huffman G.J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., SUSSKIND J., Arkin P. (2003). The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J.Hydrometeorol.*, 4: 1147–1167. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2
- Brito C.L., Vivoni E.R., Gochis D.J., Filonova, Tereshchenko I., Monzon C. (2010). An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 74, 531. doi: 10.1016/j.jaridenv.2009.10.014

- Bukovsky M.S., Gochis D.J., Mearns L.O. (2013). Towards assessing NARCCAP regional climate model credibility for the North American Monsoon: current climate simulations. *J. Clim.*, 26: 8802–8826. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00538.1.
- Camacho S.J. (2008). Asociación entre variables: correlación no paramétrica. *AMC*, vol. 50 (3), 144-146.
- Castro C.L., Chang H., Dominguez F., Carrillo C., Kyung S.J., Juang H. (2012). Can a regional climate model improve warm season forecasts in North America. *J. Clim.*, 25: 8212–823.
- Cavazos T., Comrie A.C., Liverman D.M. (2002). Intraseasonal anomalies associated with wet monsoons in SE Arizona. *J. Clim.* 15: 2477–2490. doi: doi.org/10.1175/WAF929.1
- Cavazos T., Turrent C., Lettenmier D. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American Monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L21703. doi: 10.1029/2008GL035832.
- Cerezo M.R., Allen M., Jones R. (2011). Mechanisms controlling precipitation in the northern portion of the North American Monsoon. *J. Clim.* 24: 2771–2783. doi: 10.1175/2011JCLI3846.1.
- Cerezo M.R., Cavazos T., Arritt R., Torres A.A., Sieck K., Nikulin G., Okiah M., Salinas P.J.A. (2016). CORDEX-NA: factors inducing dry/wet years on the North American Monsoon region. *Int. J. Climatol.* 36: 824–836. doi: 10.1002/joc.4385
- Chávez F.P., Strutton P.G., Friederich G.E., Feely R.A., Foley G.C., Mcphaden M.J. (1999). Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-1998 El Niño". *Science*, 286: 2126-2131.
- CPC/NCEP. (2015). ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions. Fecha de consulta 30/Sep./2016: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf
- Emanuel K.A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48: 2313–2335. doi: doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048<2313:ASFRCC>2.0.CO;2
- Espinosa C.T.L., Valdez H.J.E. (2007). Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*, 6:(1,2). doi: doi:10.1029/2002GL014963

- Fritsch J.M., Chappell C.F. (1980). Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 37: 1722–1733. doi: doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2
- Fuentes F.R., Coppola E., Giorgi F., Graef F., Pavía E.G. (2014). Assessment of RegCM4 and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Clim. Dyn.*, 42: 629–647. doi: doi.org/10.1007/s00382-013-1686-z
- Gershunov A., Barnett T.P. (1998). Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 2715 – 2725. doi: doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2715:IMOET>2.0
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M.B., Bi X., elguindi n., Diro G.T., Nair V., Giuliani G., Turuncoglu U.U., Cozzini S., Güttler I., O'brien T.A., Tawfik A.B., Shalaby A., Zakey A.S., Steiner A.L., Stordal F., Sloan L.C., Brankovic C. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.*, 52: 7–29. doi: 10.3354/cr01018.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull.* 58(3): 175–183.
- Gochis D.J., Brito C.L., Shuttleworth W.J. (2006). Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *J. Hydrol.* 316: 53–70. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.04.021
- Gregory D., Rowntree P.R. (1990). A mass-flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure. *J. Geophys. Res.*, 92: 14198–14203. doi: doi.org/10.1175/JAS3723.1
- Grell G.A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Weather Rev.*, 121: 764–787. doi: doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0
- Gutzler D.S., Kim H.K., Higgins R.W., Juang H.M.H., Kanamitsu M., Mitchell K., Mo K., Pegion P., Ritchie E., Schemm J.K., Schubert S., Song Y., Yang R. (2005). The North American Monsoon model assessment project: integrating numerical modeling into a field-based process study. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 86: 1423–1429. doi: 10.1175/BAMS-86-10-1423
- Hammer Ø. (2015). PAleontological STatistics Version 3.08 Reference manual, 243.

- Hare S.R., Mantua N.J. (2000). Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989, *Prog. Oceanogr.*, 47, 103–145.
- Hare W.L. (2003). Assessment of knowledge on impacts of Climate Change – Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC: impacts of ecosystems, food production, water and socio-economic systems. [http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex01.pdf]: Feb. 2, 2011].
- Hewitt H.T., Copsey D., Culverwell I.D., Harris C.M., Hill R.S.R., Keen A.B., McLaren A.J., Hunke E.C. (2011). Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next generation Met Office climate modelling system. *Geosci. Model Dev.*, 4: 223–253. doi: 10.5195/gmd-4-223-2011.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. 33. doi: [doi:10.1017/CBO9781107415324.005](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.005)
- Jacob D. (2001). A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 77: 61–73. doi: 10.1007/s007030170017
- Jacob D., Elizald A., Haensler A., Hagemann S., Kumar P., Podzum R., Rechid D., Remedio A., Saeed F., Sieck K., Teichmann C., Wilhelm C. (2012). Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere* 3: 181–199. doi: 10.3390/atmos3010181.
- Kain J.S., Fritsch J.M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2784–2802. doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2
- Kain J.S., Fritsch J.M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. *Meteorol. Monogr.*, 24: 165–170.
- Llanes C.O., Norzagaray C. M., Muñoz S.P., Ruiz G.R., Troyo D.E., Álvarez R.P. (2015). Hydroclimatic Trends in Areas with High Agricultural Productivity in Northern Mexico. *Pol. J. Environ. Stud.*, 24: 3, 1165-1180. doi: 10.15244/pjoes/31221
- Llanes C.O., Norzagaray C.M., Muñoz S.P., Ruiz G.R., González O.H., Herrera M.M.N. (2016). Estimating Trends and Return Periods of Daily Extreme Precipitation Associated with Tropical Cyclones in the Core North American Monsoon. *Pol. J. Environ. Stud.* 25 (6), 2283-2292. doi: 10.15244/pjoes/64161

- Lluch C.S.E., Aragón N.E.A., Arreguín S.F., Auriolos G.D., Bautista R.J.J., Brusca R.C., Cervantes D.R., Cortés A.R., del-monte L.P., Esquivel H.A., Fernández G., Hendrickx M.E., Hernández V.S., Herrera C.H., Kahru M., Lavín M., Lluch B.D., Lluch C.D.B., López M.J., Marinote S.G., Nevárez M.M.O., Ortega G.S., Palacios C. E., Parés S.A., Ponce D.G., Ramírez R.M., Salinas Z.C.A., Schwartzlose R.A., Sierra B.A.P. (2007). The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73: 1–26.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. (1997). A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with impacts on salmon, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 1069–1079. doi: [doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- Méndez M., Magaña V. (2009). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central American, *Journal of Climate*, 1175-1188. doi: doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1
- Mitchell T.D., Jones P.D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 25: 639–712. doi: [10.1002/joc.1181](https://doi.org/10.1002/joc.1181)
- Muñoz A.F., Avissar R., Zhu C., Lettenmaier P.D. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water. Resour. Res.*, 45: W00A20. doi: [10.1029/2007WR006783](https://doi.org/10.1029/2007WR006783).
- Norzagaray C.M, Muñoz S.P., Espinosa C.L., Ruíz G.R., González O.H., Llanes C.O. (2016). Erosivity indicators based on rainfall in Northwestern Mexico, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 24:2, 133-142. doi: [10.3846/16486897.2015.1106405](https://doi.org/10.3846/16486897.2015.1106405)
- Ormaza G.F.I. (2016). Eventos oceanográficos de alta y baja frecuencia en El Océano Pacífico Ecuatorial Este. Evaluación de su seguimiento y predicción. *Revista Internacional de Investigación y Docencia (RIID)*: 2445-1711.
- Romero V.E., Zayztev O., Morales P.R. (2007). Tropical cyclones statistics in the Northeastern Pacific. *Atmosfera*, 20(2): 197–203.
- Samuelsson P., Jones C.G., Willén U., Ullerstig A., Gollvik S., Hansson U.L.F., Jansson C., Kjellström E., Nikulin G., Wyser K. (2011). The Rossby centre regional climate model RCA3: model description and performance. *Tellus*, 63A: 4–23.

- Seastrand S., Serra Y., Castro C., Ritchie E. (2014). The dominant synoptic-scale modes of North American Monsoon precipitation. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4104.
- Tamara P.I., Maria A.F., Silva D., De Paula D.S., Leila M.V., Freitas D.E. (2017). Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 37: 1250–1264. doi: 10.1002/joc.4773
- Tiedtke M. (1989). A comprehensive mass-flux scheme for cumulus parameterization in largescale models. *Mon. Weather Rev.*, 117: 1779–1800. doi: [doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO)
- Trenberth K.E. (1997). The Definition of El Niño. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 78: 2771-2777. doi: [doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Villasenor A.J.A., González E.E. (2009). A generalization of Shapiro-Wilk test for multi-variate normality. *Communications in Statistics –Theory and Methods*, 38, 1870. doi: doi.org/10.1080/03610920802474465
- Wang C., Enfield D.B. (2003). A further study of the tropical Western Hemisphere Warm Pool. *J. Clim.* 16: 1476–1493. doi: doi.org/10.1175/1520-0442-16.10.1476
- Willmott C., Matsuura K. (1995). Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *J. Appl. Meteorol.*, 34: 2577–2586. doi: [doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2577:SIOAAA>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2577:SIOAAA>2.0.CO)
- Wolter K. (1987). The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 540-558.
- Zhang Y., Wallace J., Battisti D. (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *J. of Clim.*, 10: 1004-1020. doi: [doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:ELIV>2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0)
- Zhu C., Cavazos T., Lettenmaier D.P. (2007). Role of antecedent land surface conditions in warm season precipitation over Northwestern Mexico. *J. Clim.*, 20: 1774–1791. doi: doi.org/10.1175/JCLI4085.1
- Zhu C., Lettenmaier D.P., Cavazos T. (2005). Role of antecedent land surface conditions on North American monsoon rainfall variability. *J. Clim.*, 18: 2824–2841, 2005. doi: doi.org/10.1175/JCLI3387.1