

**INTERSEDES
REVISTA ELECTRÓNICA DE LAS SEDES REGIONALES
DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**



Estampa santacruceña

Predicción estacional para ASO de eventos extremos y días con precipitación sobre las vertientes Pacífico y Caribe de América Central, utilizando análisis de correlación canónica

Tito Maldonado

Eric Alfaro

WWW.INTERSEDES.UCR.AC.CR
VOL. XII, N°24 (2011)
ISSN 2215-2458

**CONSEJO EDITORIAL REVISTA INTERSEDES
DIRECTOR DE LA REVISTA:
DR. EDGAR SOLANO MUÑOZ. SEDE DE GUANACASTE**

Consejo Editorial:

**M.Sc. Jorge Bartels Villanueva. Sede del Pacífico
M.Sc. Oriester Abarca. Sede del Pacífico
Lic. Luis E. Mora Alfaro. Sede Atlántico
M.Ph. Jimmy Washburn. Sede Atlántico
M.L. Mainor González Calvo. Sede Guanacaste
Dr. Henry Vargas Benavides. Sede Occidente
MSc. Liz Brenes Cambronero. Sede Occidente
Ing. Ivonne Lepe Jorquera. MBA. Sede Limón**

Editor Técnico:

Bach. David Alonso Chavarría Gutiérrez. Sede Guanacaste

Asistente:

Guadalupe Ajum. Sede Guanacaste

Consejo Científico Internacional

**Dr. Raúl Fonet-Betancourt. Universidad de Bremen, Alemania.
Dra. Pilar J. García Saura. Universidad de Murcia.
Dr. Werner Mackenbach. Universidad de Potsdam, Alemania. Universidad de Costa Rica.
Dra. Gabriela Marín Raventós. Universidad de Costa Rica.
Dr. Mario A. Nájera. Universidad de Guadalajara, México.
Dr. Xulio Pardelles De Blas. Universidad de Vigo, España.
M.Sc. Juan Manuel Villasuso. Universidad de Costa Rica.**

Indexación: Latindex / Redalyc

Licencia de Creative Commons

Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica, todos los derechos reservados.

Intersedes por intersedes.ucr.ac.cr está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Costa Rica License.



Predicción estacional para ASO de eventos extremos y días con precipitación sobre las vertientes Pacífico y Caribe de América Central, utilizando análisis de correlación canónica ¹

Seasonal prediction of extreme precipitation events, and frequency of rainy days for ASO over the Pacific and Caribbean slopes of Central America using Canonical Correlation Analysis.

Tito Maldonado²

Eric Alfaro³

Recibido: 30.09.11

Aprobado: 10.01.12

Resumen: Se generaron modelos basados en Análisis de Correlación Canónica para la predicción de eventos extremos de precipitación para el trimestre agosto-septiembre-octubre (ASO), utilizando como predictor la Temperatura superficial del mar (TSM), debido a la respuesta hidrológica de las anomalías de la TSM sobre la zona continental, y como predictante el acumulado mensual de precipitación, los días con precipitación, el porcentaje de días que exceden el percentil 80 (extremo húmedo) y el porcentaje de días que no sobrepasan el percentil 10 (extremo seco). Se encontró que usando la TSM de julio se relacionan adecuadamente los eventos ENOS y OMA con la predicción de extremos de precipitación durante ASO.

Palabras claves: Análisis de Correlación Canónica, Predicción estacional, Eventos extremos, El Niño Oscilación del Sur, Oscilación Multidecadal del Atlántico, América Central, Variabilidad Climática.

Abstract: Models were generated based on Canonical Correlation Analysis for prediction of extreme precipitation events during August-September-October (ASO), using as predictor the Sea Surface Temperature (SST) due to the hydrological response of the SST anomalies over the isthmus, and as predictant, the accumulated monthly rainfall, days with precipitation, the percentage

¹ Los autores desean agradecer al Centro de Investigaciones Geofísicas por el uso y disponibilidad de la base de datos, a los servicios meteorológicos e hidrológicos de la región (IMN, ICE, INSIVUMEH, ETESA, ACP, INETER, SMH y BMS). A las iniciativas de los proyectos 805-A9-532, 805-A8-606, 805-A7-002, UCR y CRN-2050-IAI.

² Investigador del Centro de Investigaciones Geofísicas, Posgrado en Ciencias de la Atmósfera y Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad de Costa Rica. Email: (tito.maldonado@ucr.ac.cr / tito.maldonado@cigefi.ucr.ac.cr)

³ Investigador del Centro de Investigaciones Geofísicas, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología y Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.

of days exceeding the 80th percentile (extreme wet) and the percentage of days that do not exceed the 10th percentile (dry extreme). It was found that using the July SST properly relate ENOS and AMO events with the prediction of precipitation extremes for ASO.

Keywords: Canonical Correlation Analysis, Seasonal prediction, extreme events, El Niño South Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation, Central America, Climate Variability.

Introducción

La influencia de las anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) ha sido fuertemente asociada a la variabilidad climática del campo de precipitación presente en el istmo centroamericano según lo explica Wang (2006) y Wang et al. (2006).

Alfaro (2007) expone que no sólo se debe dar importancia al modo principal de variabilidad interanual del Pacífico ecuatorial, El Niño – Oscilación del Sur o ENOS (Waylen et al., 1994; Waylen et al., 1996a; Waylen et al., 1996b), sino también a las variaciones interanuales y decadales de la TSM del Atlántico tropical cercano a la región (Enfield y Alfaro, 1999; Alfaro, 2000; Gianni et al., 2000; Gianni et al., 2001; Enfield et al., 2001; Waylen y Quesada, 2001; Taylor et al., 2002; Spence et al., 2004; Poveda et al., 2006). Ya que la influencia de las piscinas de aguas cálidas circundantes con temperaturas mayores a los 28.5° C (Wang et al., 2006), y sus gradientes en el istmo se manifiesta en la formación de convección profunda y en la interacción de los alisios con la compleja topografía de la región (Enfield y Alfaro, 1999). También modifican algunos aspectos de la circulación atmosférica supra yacente como la corriente en chorro de bajo nivel de los mares intra-americanos (Amador, 1998; Poveda y Mesa, 1999; Wang, 2007) y la celda de Hadley (Wang, 2006).

Se puede resaltar del ciclo anual de precipitación dominante en América Central, descrito en Magaña et al. (1999), Alfaro (2002), Taylor y Alfaro (2005) y Amador et al. (2006), la existencia de dos máximos de precipitación presentes en el año. El primero ocurre en junio y el segundo pico y por lo general mayor, ocurre entre septiembre y octubre. Esto es principalmente representativo sobre la vertiente del Pacífico. Mientras que en la vertiente del Caribe contrasta este comportamiento, presentando una disminución de las lluvias en estos meses, debido a diferentes mecanismos dinámicos de producción de lluvias en ambas regiones (Amador et al., 2006).

Dada a la asociación entre la TSM y el campo de precipitación, varios autores (e.g. Alfaro y Cid, 1999b; Alfaro y Soley, 2001; Ashby et al., 2005), han elaborado modelos estadísticos para predicción, construyendo índices oceánicos y de precipitación que capturan la variabilidad encontrada en el conjunto de las variables independientes (predictores) como en el de las variables dependientes (predictantes).

El trabajo de Gershunov y Cayan (2003) describe la elaboración de modelos basados en análisis de correlación canónica (ACC) para la predicción de extremos húmedos de precipitación. A pesar de que estos modelos estadísticos eluden la atmósfera, ésta se encuentra implícita en el transporte de la información del forzamiento de la TSM hacia la respuesta en la hidrología continental. Dos ventajas principales de este método son: que no asume una relación estacionaria a lo largo del ciclo anual entre los campos usados y que la variabilidad presente en ellos no es expresada a través del uso de índices, seleccionados o construidos previamente, sino más bien por medio del uso de los modos de variabilidad más correlacionados en ambos campos (Alfaro, 2007).

Además, presenta una buena habilidad predictiva en los eventos ENOS, para pronósticos de precipitación en las zonas continentales (Gershunov y Cayan, 2003). Aunado a esto, el ACC ha mostrado buena habilidad estadística predictiva en el segundo máximo de precipitación presente en la vertiente Pacífico, encontrándose dentro de la media anual según lo descrito por Alfaro (2007), resultado también observado por Fallas (2009). En esta época el principal mecanismo de producción de lluvias son sistemas meso escalares como la brisa marina, inmersos en una atmósfera inestable debido a la cercanía de la zona de convergencia inter-tropical al istmo (Alfaro, 2002; Amador et al. 2006). El trimestre DEF, según Alfaro (2007), presentó la mejor habilidad estadística predictiva en promedio de precipitación. Esta estación es importante para la vertiente Atlántica, debido a que en esta última estación, las precipitaciones son producidas principalmente por el paso de frentes fríos sobre esta región (Alfaro, 2002).

Sumado a esto, la influencia de ENOS, tiende a ser más significativa en el segundo semestre del año, al final del verano y comienzos del otoño boreal. Dicha manifestación se presenta en la cortante vertical del viento sobre la región, lo cual con eventos cálidos (fríos) tienden a estar relacionados con reducción (un aumento) de la cortante vertical del viento sobre el istmo (Alfaro et al., 1998; Alfaro y Cid, 1999a; Taylor et al., 2002; Spence et al., 2004).

Otra particularidad que presenta este método, descrito en Alfaro (2007), es que el trimestre agosto-septiembre-octubre (ASO) muestra la existencia de un patrón bipolar en el campo de TSM entre ambos océanos, relacionado con variaciones en la precipitación de América Central que fue también identificado por Enfield y Alfaro (1999) y Fallas (2009). En este patrón, importantes variaciones positivas (negativas) en la precipitación están relacionadas con variaciones negativas y positivas (positivas y negativas) en el Pacífico ecuatorial tropical del Este y en el Atlántico tropical, respectivamente, lo que estaría relacionado con una disminución (un aumento) del flujo de alisios del noreste sobre el istmo, actuando en favor (en contra) de la formación de sistemas meso escalares, principalmente sobre la vertiente del Pacífico (Alfaro, 2007). Fallas (2009) encontró, usando ACC y tablas de contingencia, que durante condiciones Niña (Niño) y Atlántico cálido

(frío), las lluvias superaron (son inferiores) a los valores normales sobre prácticamente todo el istmo, especialmente del lado Pacífico de Centroamérica. Además Fallas (2009) y García (2009) observaron que los índices de más peso en la precipitación con el ACC, fueron los asociados al Atlántico y al Pacífico Ecuatorial, sin embargo la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) también mostró buenos resultados.

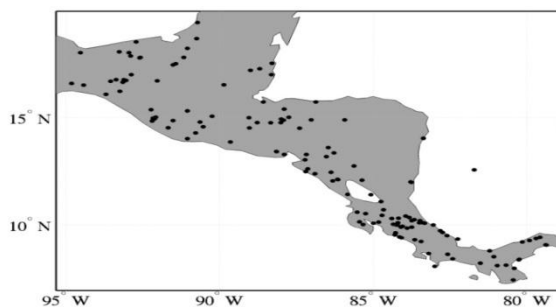
Dado esto, el objetivo de este trabajo, es construir modelos basados en ACC, utilizando la TSM de los océanos Pacífico y Atlántico como variable predictora, para explorar la predictibilidad de días y eventos extremos de precipitación en el segundo máximo del ciclo anual de precipitación, específicamente para el trimestre ASO sobre el istmo de América Central, debido a la importancia que representa para la vertiente Pacífico el estudio de eventos extremos en este periodo. Además, analizar los pronósticos generados con esta técnica y contrastarlos con las condiciones mostradas de la TSM para julio de 2010, según el diagnóstico emitido para el 5 de agosto de 2010 por el Centro de Predicciones Climáticas.⁴

Datos

a) Predictantes

La base de datos de precipitación diaria, utilizada como predictante, es la perteneciente al Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica. Dicha base de datos se compiló con información cedida por los diferentes servicios meteorológicos de cada país centroamericano. La serie de tiempo seleccionada para un primer análisis fue de 1971 a 2008 (38 años), debido a la cantidad de información presente en este periodo. De este juego se escogieron las estaciones que poseían al menos el 60% de los datos, quedando un total de 141 estaciones meteorológicas distribuidas principalmente sobre la vertiente Pacífico de América Central (Figura 1).

Figura 1. Los puntos representan la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas (series de tiempo) sobre América Central



⁴ (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/index.shtml, última visita el 26 de agosto de 2010), el cual da alerta de condiciones de Niña en el Pacífico y temperaturas superficiales del mar del Atlántico cálidas.

Se calcularon cuatro variables estadísticas relacionadas con los eventos extremos de precipitación en la zona, las cuales son el acumulado mensual de precipitación (AMP), días con precipitación (DCP), el porcentaje mensual de días que exceden el percentil 80 (P80), el cual se relaciona con los extremos húmedos; y el porcentaje de días que no sobrepasan el percentil 10 (P10), que está relacionado con los extremos secos. Para cada una de estos estadísticos, los datos faltantes fueron rellenos con técnicas de componentes principales descritas en Alfaro y Soley (2009). Por último, se calculó el acumulado trimestral de las variables ACM y DCP; y el promedio trimestral de P80 y P10, para ASO, dado que en esta estación del año se presenta el segundo máximo de precipitación, y por lo general mayor, sobre todo en la vertiente Pacífico del istmo (Alfaro, 2002) y Taylor y Alfaro (2005) y Amador et al. (2006). La predicción del P10 (extremos secos), es también de mucha importante para el Caribe costarricense, ya que ante la disminución de las lluvias durante este trimestre en esa región, se desarrollan actividades de mucha relevancia económica como son los Carnavales de Limón, por lo que periodos relativamente secos, podrían estar ligados a un mayor flujo de turistas.

b) Predictor

Se utilizaron los datos que corresponden al conjunto de anomalías de TSM obtenidos por el Instituto Internacional para la Investigación Climática (IRI, por sus siglas en inglés) que son el resultado de los análisis hechos por Smith et al. (2008), con una rejilla con resolución de 2° de latitud por 2° de longitud para la región comprendida entre 63° N - 22° S, 111° E - 15° E de los océanos Pacífico y Atlántico. El periodo base que se utilizó es el correspondiente a 1971-2008.

Método

Se procedió con el método estadístico descrito por Gershunov & Cayan (2003), Alfaro et al. (2006) y Alfaro (2007). Este procedimiento utiliza el ACC para relacionar variables a gran escala con variables de escala local y se puede entender en este contexto como un ajuste de escala estadístico. Este enfoque sugiere que el forzamiento climático básico (i.e. el campo de predictores) que son las anomalías de TSM tiene una respuesta hidrológica en las zonas continentales.

El proceso de elaboración de cada experimento se puede resumir en 3 pasos fundamentales. Primero, se hace un pre-filtrado del campo del predictor y del campo del predictante por medio de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) utilizando cada uno el mismo número de p componentes principales (CP). Segundo, los patrones de variabilidad en ambos campos, representados por sus respectivas p CP, se relacionan entre sí por medio de q correlaciones derivadas del ACC. Finalmente, se analiza un número razonable de combinaciones de p y q para definir el modelo estadístico óptimo, considerando la capacidad predictiva de cada modelo por medio de la técnica de

validación cruzada. Los valores óptimos de p y q que se escogen para un modelo en particular, son aquellos que muestran en promedio la máxima capacidad predictiva en el dominio espacial analizado de la precipitación.

Los modelos se configuraron con las siguientes características: i) la complejidad de los modelos (p,q) tuvo un rango de componentes principales en el predictor y en el predictante, el cual es el máximo razonable, sugerido en Gershunov y Cayan (2003) para evitar un sobre ajuste del modelo. ii) Los datos se transformaron a una distribución normal, por medio de cuantiles los cuales son normalmente distribuidos, ya que las técnicas de FOE y ACC trabajan mejor con este tipo de distribuciones. Para el caso de la precipitación, la distribución de frecuencias está positivamente sesgada. Al finalizar el pre-filtrado por FOE, se aplica el proceso inverso para obtener la distribución original. iii) Para examinar la habilidad estadística predictiva de cada modelo se utilizó la TSM mensual a partir de abril hasta octubre, es decir, se usaron rezagos de la temperatura superficial del mar de 1 hasta 4 meses, incluyendo también la TSM de los meses simultáneos al trimestre en estudio; calculándose el promedio de la correlación del predictor con cada serie de tiempo.

La etapa de validación cruzada (Wilks, 2006) se puede resumir en las siguientes fases: i) se eliminan los primeros datos de la variable dependiente y el o los primeros datos de las variables independientes, a estos valores se les llama longitud de la ventana de validación cruzada, y se recalcula el modelo. A este último se le llama el modelo reducido. ii) Usando el modelo reducido, se estiman los valores eliminados de la variable dependiente empleando los datos de las variables independientes. iii) Se reincorporan los datos eliminados de las variables dependiente e independiente al conjunto de datos total y se eliminan los siguientes datos en las series de tiempo, repitiéndose los pasos i) y ii) en forma sucesiva hasta obtener n modelos reducidos y n datos calculados, donde n es la longitud de las series de tiempo. En este trabajo los modelos reducidos se calcularon con una longitud de ventana de validación cruzada de 3 y un $n=38$.

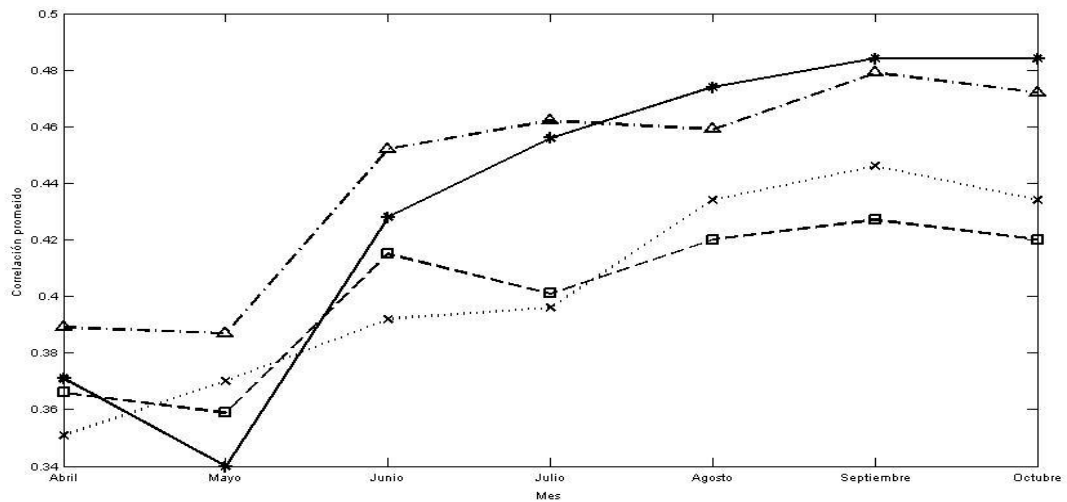
Por último, se hicieron pronósticos en base a los resultados obtenidos en el ACC. Este procedimiento consiste en que los modos canónicos del predictor pueden ser relacionados por medio de una regresión lineal simple con los modos canónicos del predictante, utilizando como coeficientes de regresión lineal, la correlación canónica entre cada modo (Wilks, 2006).

Resultados y Discusión

a) *Análisis de la habilidad estadística predictiva*

A partir de la TSM mensual como predictor, considerando un rezago de hasta 4 meses, iniciando en abril y finalizando en octubre, se generaron modelos estadísticos basados en las técnicas de componentes principales y análisis de correlación canónica. Como primer paso, se estudió la habilidad predictiva de cada modelo. Esto se realizó considerando el promedio de la correlación que presenta la variable predictora con cada serie de tiempo ubicada en la región continental de América Central. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos de cada variable estadística. El ACM tiene en promedio un $R=0.43$, con un valor mínimo en mayo y máximos en septiembre y octubre. En general a partir de julio muestra valores de correlaciones por encima del promedio mostrado. En la variable DCP, la media de la habilidad estadística estuvo en $R=0.44$, con un valor mínimo en mayo y el máximo en septiembre. A partir de junio presentó valores mayores al promedio de esta habilidad. El P80 presentó un valor promedio de $R=0.40$, con el mínimo en mayo y el máximo en septiembre. Igual que el estadístico anterior, a partir de junio presenta valores superiores a la media de la habilidad estadística predictiva. Por último, el P10 tuvo un promedio de $R=0.40$, con el mínimo en abril y el máximo en septiembre, sin embargo, solo el último trimestre presentó valores mayores a la media.

Figura 2. Habilidad estadística predictiva promedio del ACM (línea continua con asteriscos), DCP (línea a trazos y puntos con triángulos), P80 (línea a trazos con cuadros) y P10 (línea de puntos con cruces) en Centroamérica para la predicción de ASO. Se consideraron los meses previos, desde abril hasta los meses simultáneos al trimestre



Estos resultados concuerdan con los encontrados por Alfaro (2007), en los cuales para el trimestre ASO encontró que utilizando el promedio trimestral de la TSM del trimestre julio-agosto-septiembre (JAS), se encontraron los valores más altos de la habilidad predictiva.

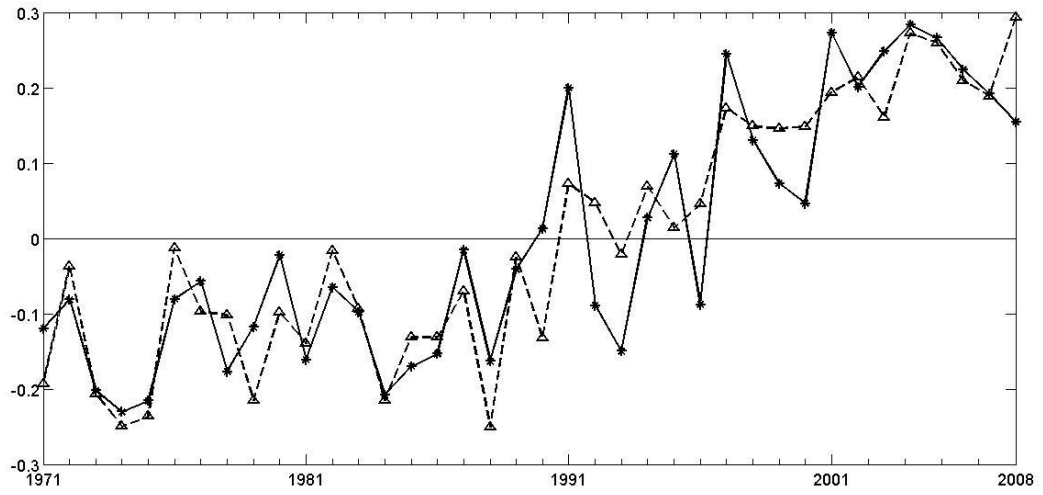
b) Análisis de los modos canónicos

En cada uno de los modelos generados en este estudio, se consideraron hasta un máximo de 17 componentes principales y de modos canónicos para evitar un sobreajuste del modelo (Gershunov y Cayan, 2003; Alfaro et al., 2006; Alfaro, 2007), sin embargo los modelos se pueden optimizar con un máximo de $p=q=3$, sugerido por estos mismo autores. Además los modos superiores (mayor o igual a 3) presentan patrones espaciales más desorganizados, relacionados con fuentes de variación más locales, por lo que los mismos no se muestran.

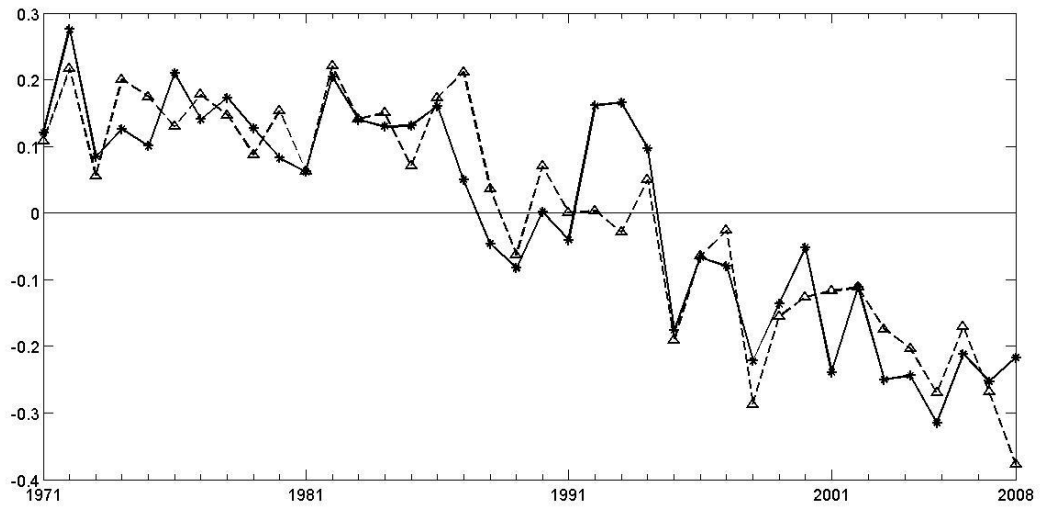
La Figura 3 presenta las series de tiempo normalizadas para los primeros modos canónicos de ACM, DCP, P80 y P10. Se utilizó como predictor la TSM de julio. Esto debido a los resultados de la sección anterior, ya que este mes exhibe, en general, una buena habilidad estadística predictiva, especialmente para efectos operacionales y por la disponibilidad de la información de la TSM computada hasta agosto de 2010 por el IRI.

Estos modos tienen una correlación canónica de 0.96 (ACM, Figura 3a), 0.98 (DCP, Figura 3b), 0.97 (P80, Figura 3c) y 0.98 (P10, Figura 3d), cuyas significancias para las dos primeras son del 90% y para las dos últimas del 99% (Davis, 1976). A excepción de la variable P10, estos modos capturaron y separaron una tendencia lineal presente en cada una de las variables, la cual no se elimina del análisis por ser una fuente de variabilidad (Alfaro, 2006; Alfaro, 2007). Esta tendencia cruzó el cero en todos los casos entre los años 1990 y 1995, y podría estar relacionada con los eventos cálidos relacionados con la Oscilación del Sur discutidos en Trenberth y Hoar (1996), aunque no hay evidencia estadística de ello.

a)



b)



c)

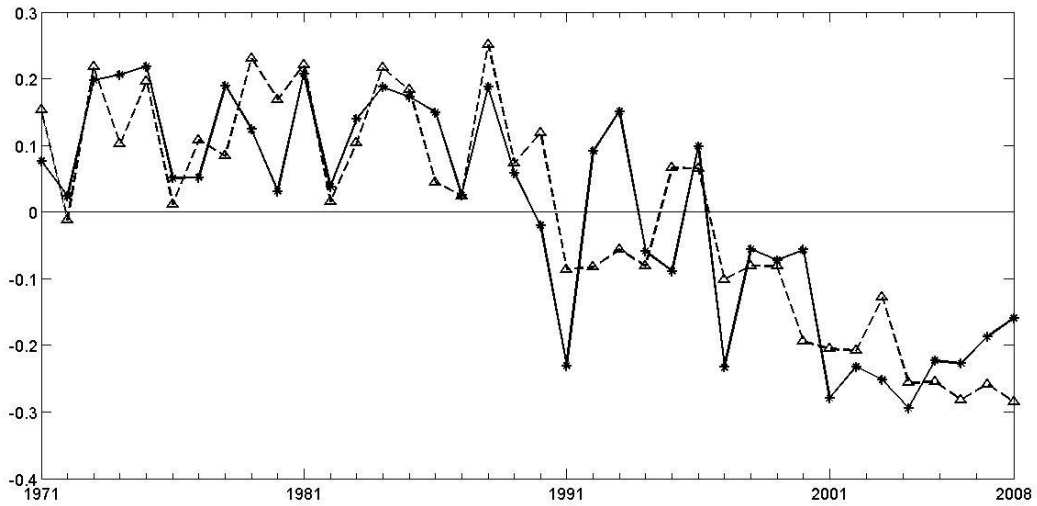
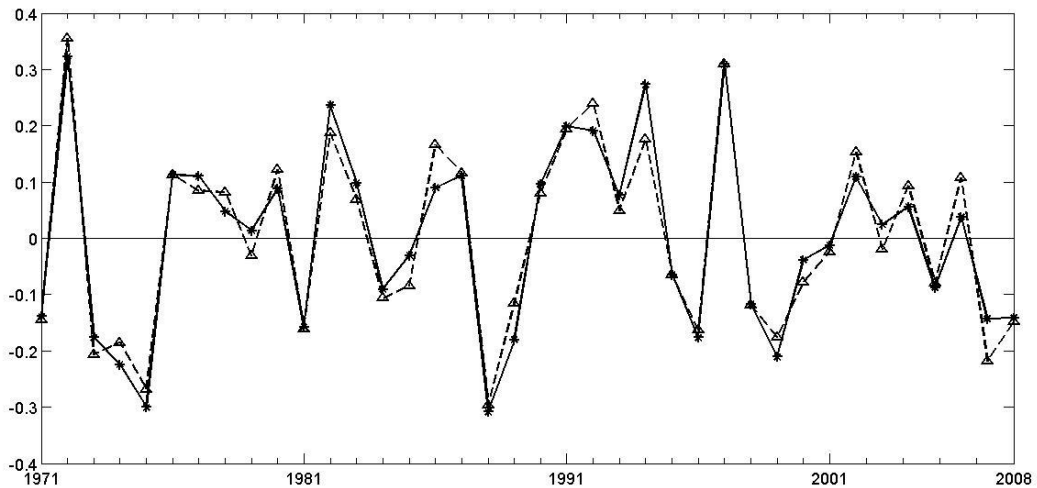


Figura 3. Series de tiempo normalizadas de los primeros modos de ACC. a) ACM, b) DCP, c) P80 y d) P10.

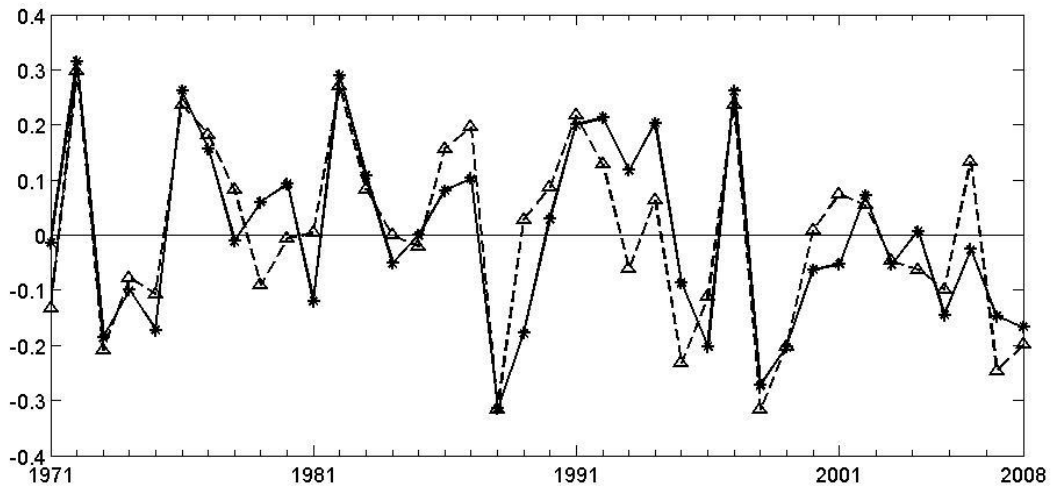
d)



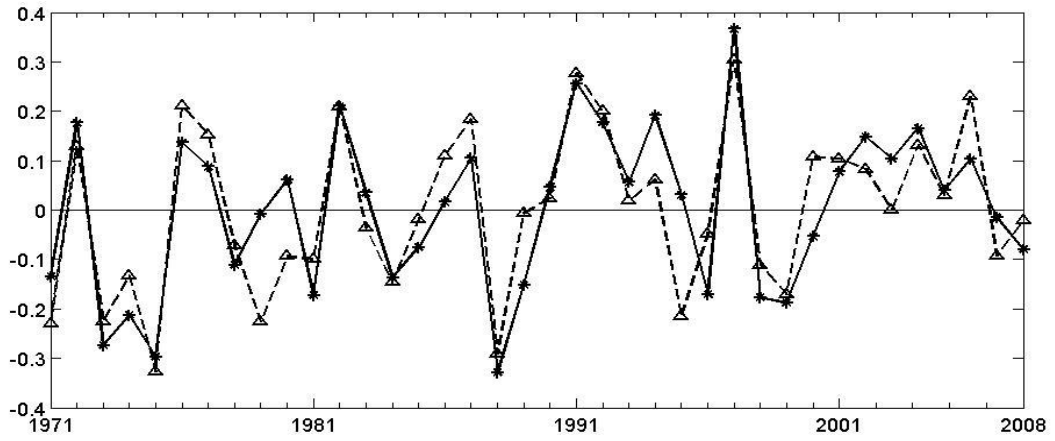
En todas se utilizó la TSM de julio como predictor. Las líneas continuas son las series de tiempo anuales de la TSM, mientras que las líneas a trazos representan el modo de la variable estadística correspondiente. En cada uno de los casos la correlación de este modo fue de 0.96, 0.98, 0.97 y 0.98. Los dos primeros tienen una significancia del 90% mientras que los dos últimos del 99% luego de corregir sus grados de libertad debido a la autocorrelación según Davis (1976). La significancia estadística de la pendiente para los primeros 3 casos es mayor al 99%.

La Figura 4, muestra los segundos modos canónicos de las variables ACM, DCP, P80 y P10. La correlación canónica es de 0.85 (ACM, Figura 4a), 0.84 (DCP, Figura 4b), 0.79 (P80, Figura 4c) y 0.94 (P10, Figura 4d). Las tres primeras tienen una significancia del 99%, mientras que la última es del 90% (Davis, 1976). El segundo modo de la predicción de P10 para ASO presenta una tendencia lineal con el mismo comportamiento descrito anteriormente. Los patrones espaciales de los modos que no capturaron una tendencia lineal, (segundo modo de ACM, DCP, P80 y el primer modo de P10) con la serie de tiempo de TSM de julio, se muestra en la Figura 5. Se observa que existe un patrón negativo de correlaciones en el océano Atlántico que se extiende desde África hasta las zonas costeras del Caribe de América Central. Mientras que en el Pacífico muestra un patrón positivo de correlaciones que se extiende por el Pacífico ecuatorial central hasta llegar a la costa de América (Fig. 5a,b,d). La Figura 5c, presenta un patrón de correlaciones opuesto al descrito antes. En la Figura 6 se exponen los patrones espaciales de estos modos de cada serie de tiempo. Se resalta la existencia de patrones contrastantes entre ambas vertientes del istmo. Mientras que se presenta una franja de correlaciones negativas (Fig. 6a,b) o positivas (Fig. 6c,d) en la costa Pacífico, en el Caribe se encuentra correlaciones positivas y negativas (Costa Rica y Panamá). Esto concuerda con Alfaro (2002), Taylor y Alfaro (2005) y Amador et al. (2006), y evidencia la presencia de diferentes mecanismo dinámicos de producción de precipitación en ambas vertientes sobre todo en la parte sur del Caribe centroamericano.

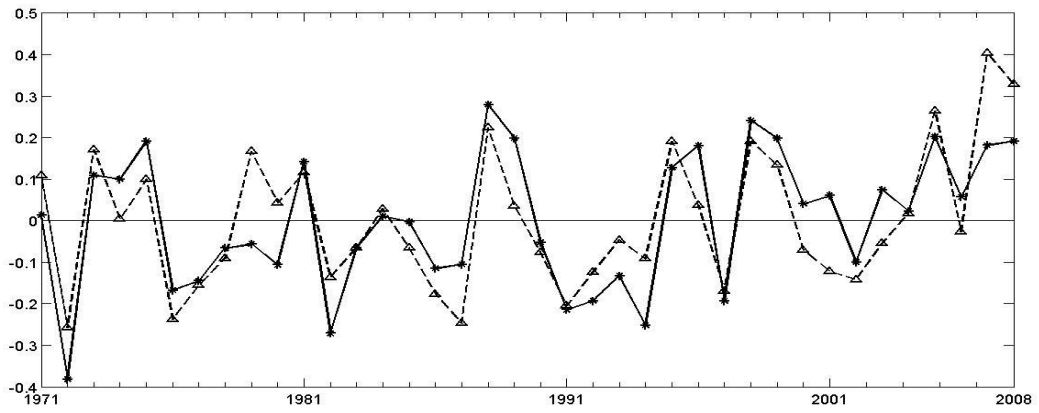
a)



b)



c)



d)

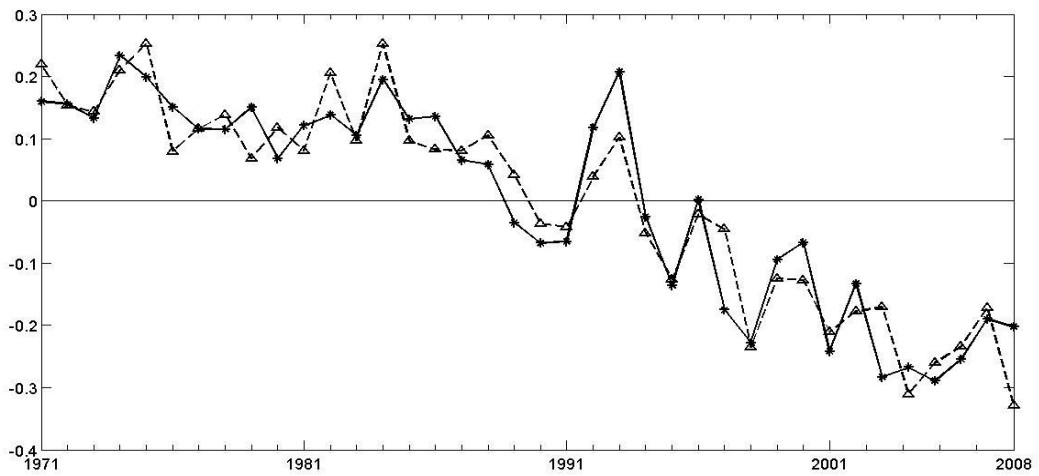
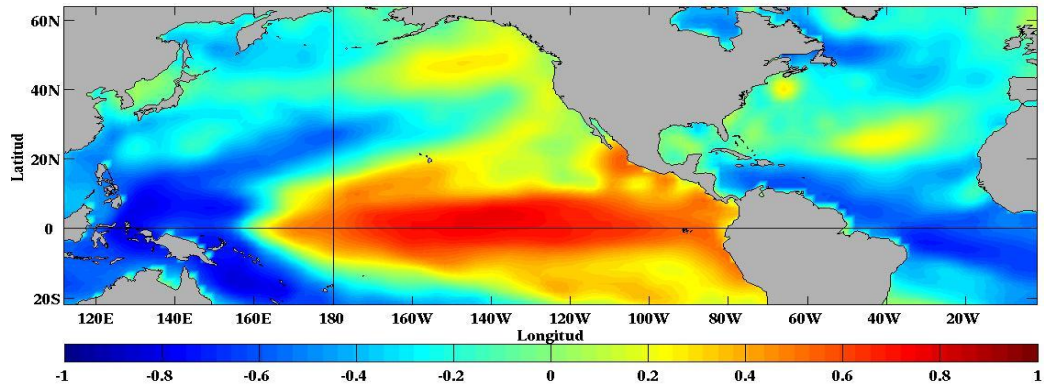


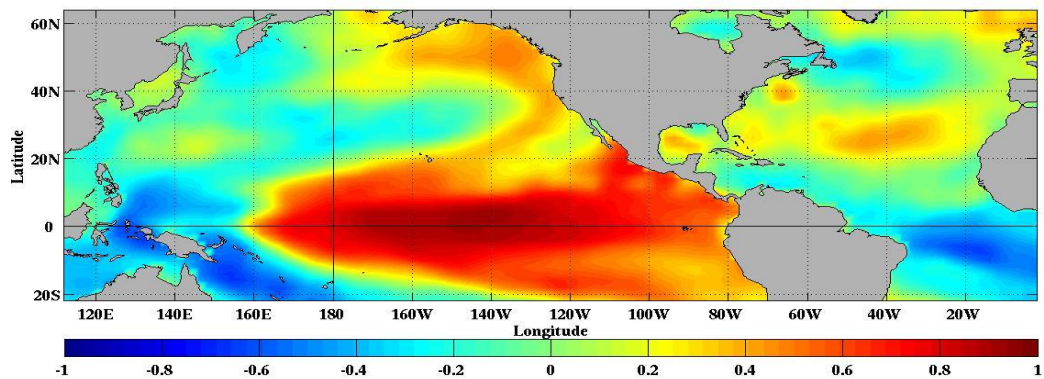
Figura 4. Series de tiempo normalizadas de los primeros modos de ACC. a) ACM, b) DCP, c) P80 y d) P10. En todas se utilizó la TSM de julio como predictor. Las líneas continuas son las series de tiempo anuales de la TSM, mientras que las líneas a trazos representan el modo de la variable estadística correspondiente. En cada uno de los casos la correlación de este modo fue de 0.85, 0.84, 0.79 y 0.94. Los tres primeros tienen una significancia del 99%, mientras que el último es del 90% luego de corregir sus grados de libertad debido a la autocorrelación según Davis (1976). La significancia estadística de la pendiente para el último caso es mayor al 99%.

De estos resultados se puede suponer que variaciones positivas (negativas) de la TSM en el Pacífico y negativas (positivas) en el Atlántico, durante julio, estarían relacionadas con variaciones negativas (positivas) en el ACM, DCP, P80 y P10 de ASO. Es decir, los resultados concuerdan con los resultados de Alfaro (2007) y Fallas (2009); también con lo observado por Alfaro (1998), Enfield y Alfaro (1999) y Taylor et al. (2002).

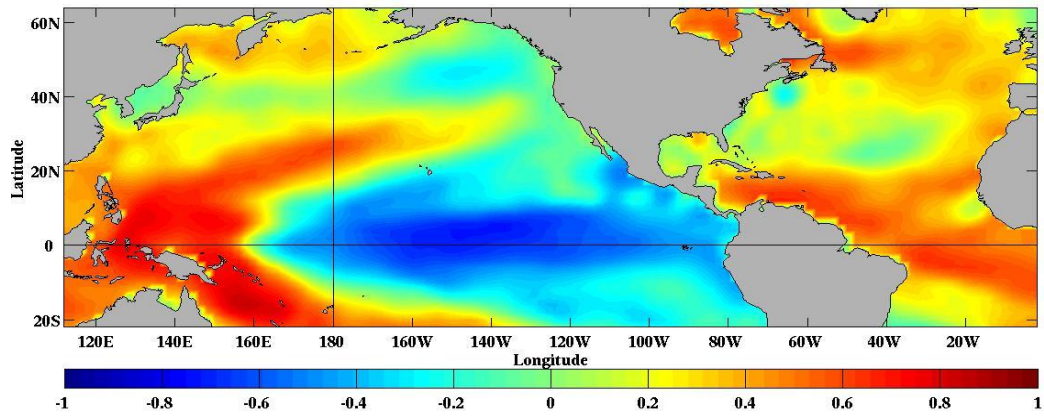
a)



b)



c)



d)

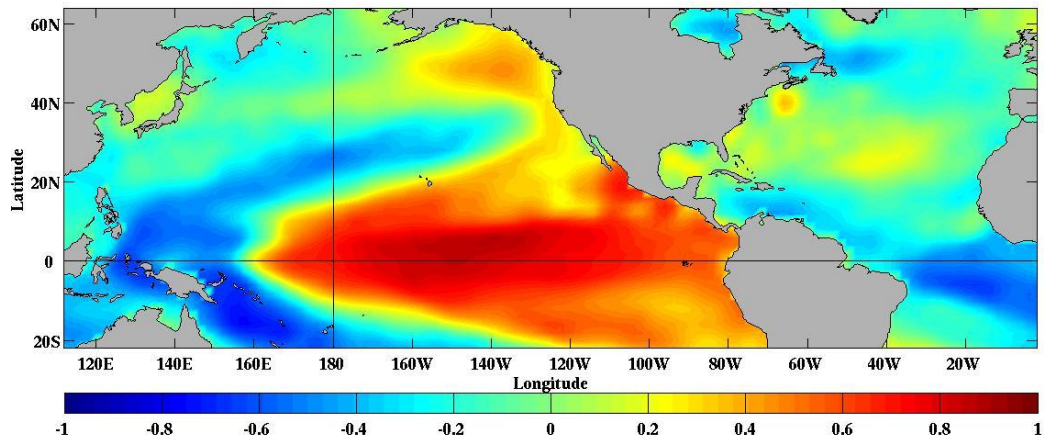


Figura 5. Patrones espaciales de los modos de la serie de tiempo de TSM que presentan un dipolo de temperaturas, y el campo del predictor. En cada modelo: modo 2 de a) ACM, b) DCP y c) P80; modo 1 d) P10. Los colores cálidos (rojizos) representan correlaciones positivas y los fríos (azulados) correlaciones negativas.

En la Tabla 1 se despliegan las correlaciones entre los modos canónicos que capturan variabilidad por el dipolo de TSM, discutido anteriormente, en las variables ACP, DCP, P80 y P10 con algunos índices de variabilidad climática conocidos para julio. De esta tabla se observa que en general, los máximos valores se encontraron con el índice que presenta la diferencia entre El Niño 3 y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA). Todos las correlaciones tuvieron una significancia del 99% (Davis 1976). Estos resultados concuerdan con los de Fallas (2009) y García

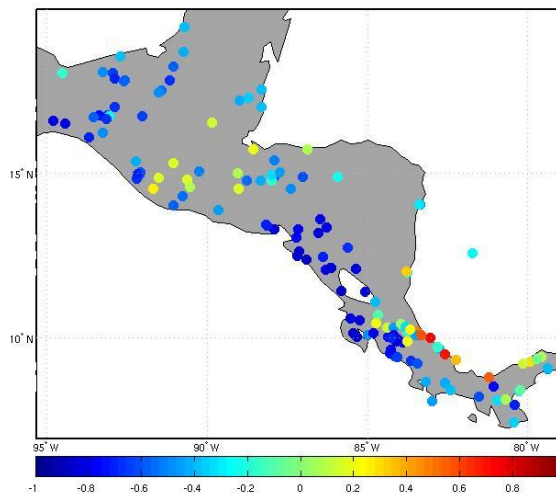
(2009), los cuales muestran que los índices de más peso son los del Pacífico y Atlántico, sin embargo sumar la influencia de la ODP da buenos resultados.

Tabla 1. Correlaciones de los modos que presentaron una fuente de variabilidad dipolo de temperaturas entre los océanos que rodean al istmo. Las operaciones de suma o resta se realizaron sobre las series normalizadas para hacer comparable la variabilidad entre ellas. En negrita se resaltan los valores máximos. Todos los valores tienen una significancia estadística del 99%.

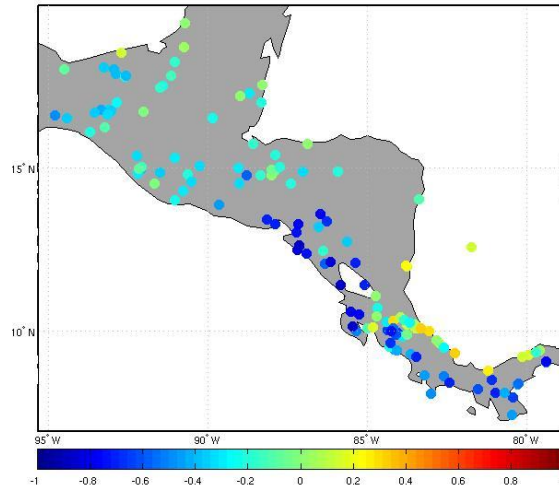
R			
Variable/ Índice	Niño3	Niño3-OMA	Niño3-OMA+PDO
ACM (Modo 2)	0.69	0.78	0.63
DCP (Modo 2)	0.76	0.73	0.63
P80 (Modo 2)	-0.60	-0.71	-0.53
P10 (Modo 1)	0.71	0.74	0.61

El patrón de la habilidad estadística predictiva se muestra en la Figura 7. Se calculó como las correlaciones entre las series de tiempo observadas y las predichas por el modelo del ACC utilizando validación cruzada. En cada uno de los estadísticos, ACM (Figura 7a), DCP (Figura 7b), P80 (Figura 7c) y P10 (Figura 7d) se observan valores de significancia del 95% en la mayor parte de la región. Al sur de México, la costa Pacífico de Nicaragua y Pacífico norte de Costa Rica y en algunas regiones del Caribe tienen valores de significancia mayores al 99% (Davis, 1976).

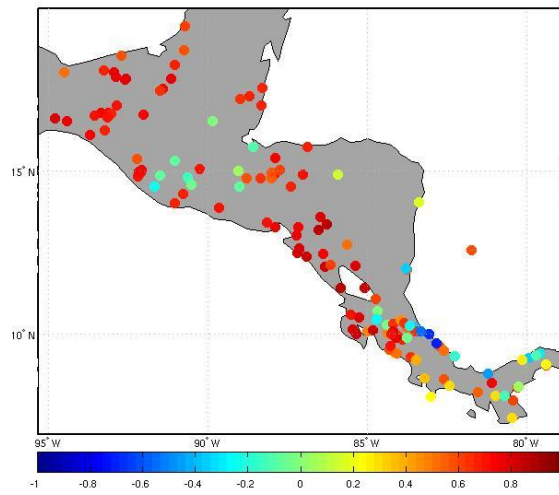
a)



b)



c)



d)

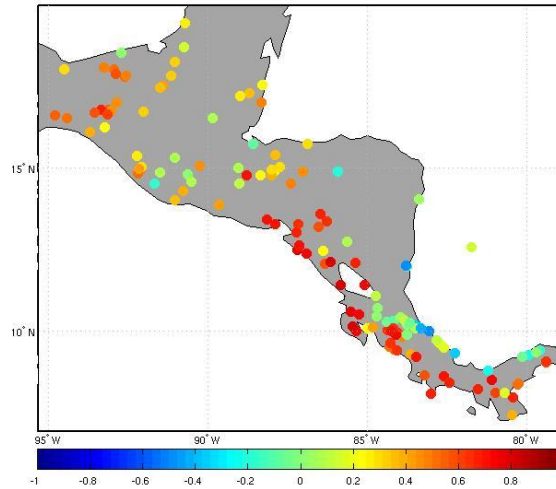
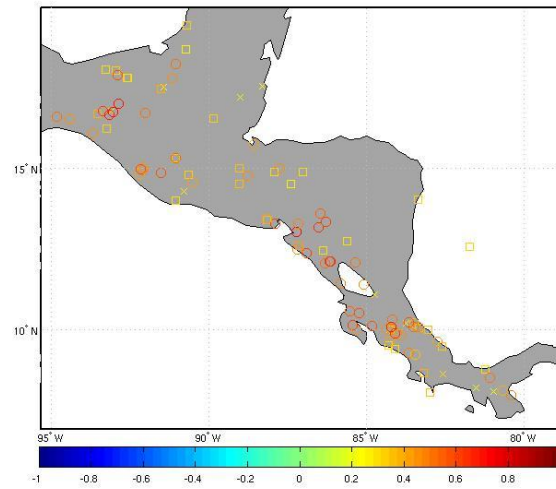
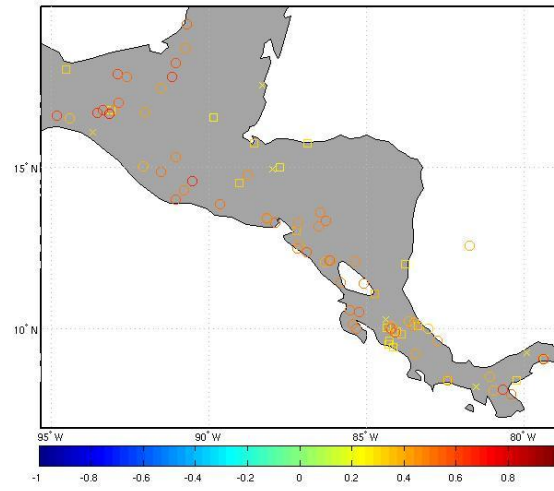


Figura 6. Patrones espaciales de las correlaciones de los modos de los predictantes que capturan el dipolo de temperaturas con series de tiempo ubicadas por América Central para predicciones de ASO. En cada modelo: modo 2 de a) ACM, b) DCP y c) P80; modo 1 d) P10. Los colores cálidos representan correlaciones positivas y los fríos correlaciones negativas.

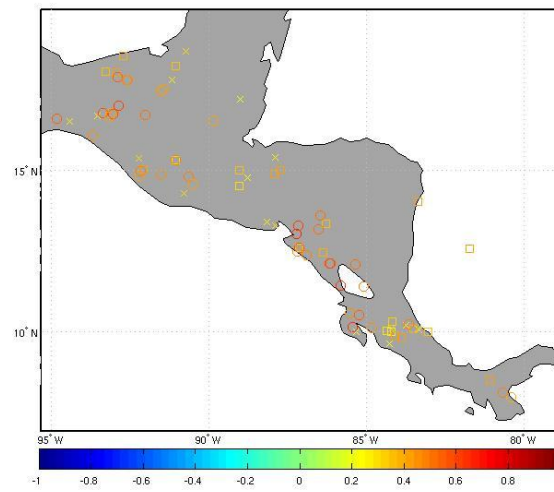
a)



b)



c)



d)

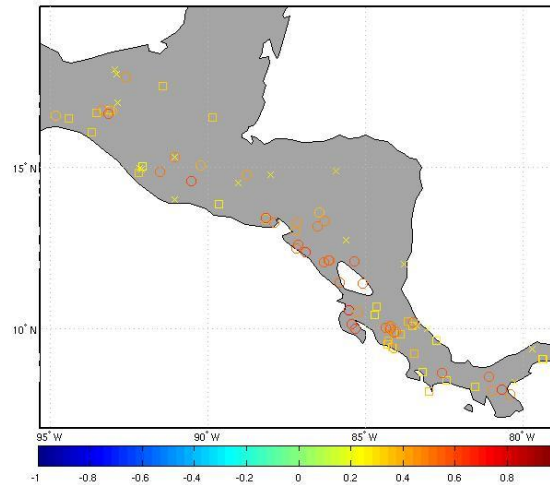


Figura 7. Patrones de la habilidad estadística predictiva de los estadísticos a)ACM, b) DCP, c) P80 y d) P10, en América Central para la predicción de ASO utilizando la TSM de julio como predictor. Los valores se calcularon como la correlación de las series de tiempo observadas y las predichas por el modelo del ACC usando validación cruzada. La significancia estadística de los valores de R tienen los límites de $0.27 > R \geq 0.21$ con un 90%, $0.38 > R \geq 0.27$ con un 95% y $R \geq 0.38$ con el 99%.

c) Pronósticos para ASO utilizando la TSM de julio de 2010

Como parte final, se realizaron pronósticos para el trimestre ASO de 2010 de las variables predictantes ACM, DCP, P80 y P10, utilizando como predictor la TSM de julio. Según el diagnóstico emitido por el Centro de Predicciones Climáticas,⁵ las condiciones mostradas para el mes de julio de 2010, son de La Niña provocando una disminución de menos que -1.0°C de la TSM sobre las regiones Niño 1+2, 3 y 3.4, mientras que las temperaturas del Atlántico se reportaron aumentos de al menos 1°C en la región del Caribe como se exhibe en la Figura 8.

⁵(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/index.shtml, última visita el 26 de agosto de 2010)

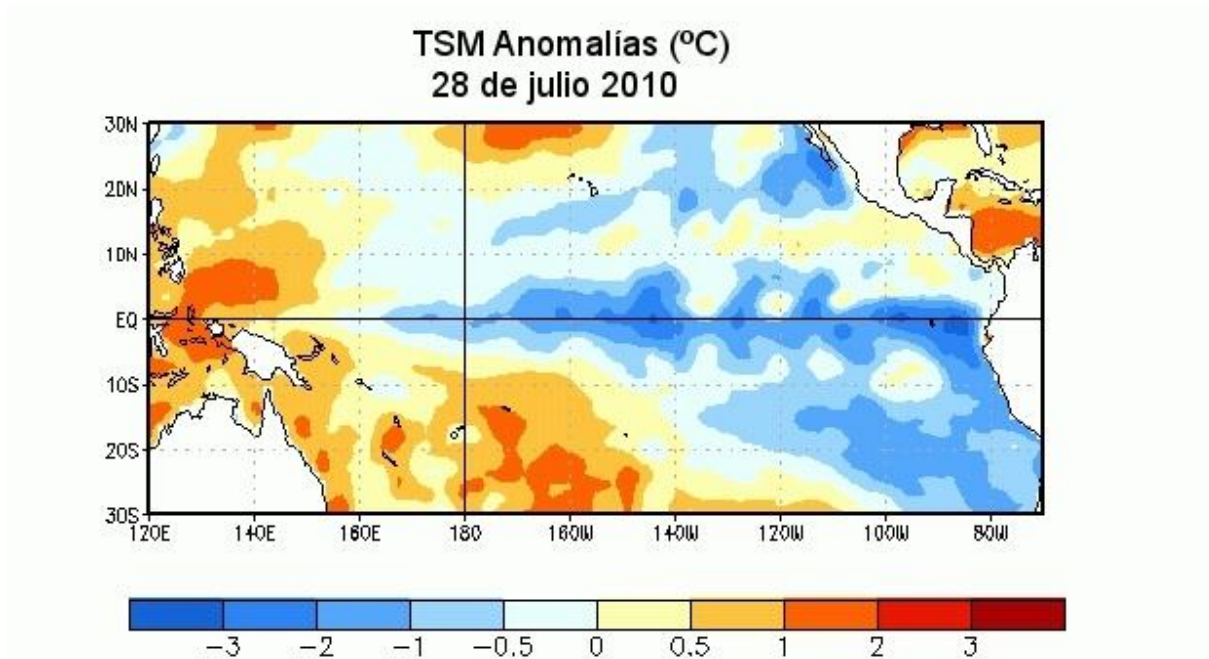


Figura 8. Anomalías (°C) de la Temperatura promedio superficial del mar (TSM) centralizada el 28 de julio de 2010. Las anomalías son calculadas con respecto a los promedios semanales del periodo base 1971-2000. ⁶

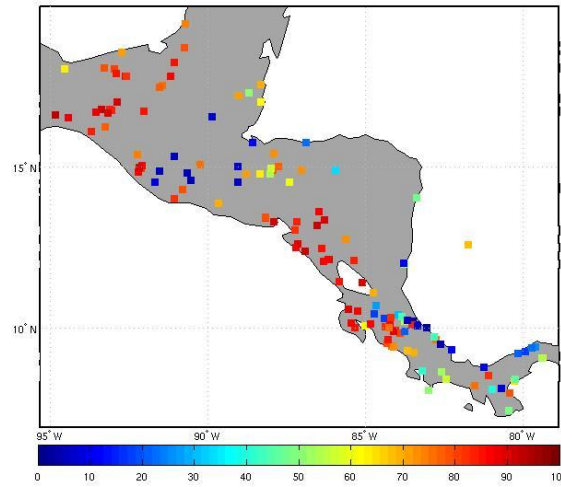
La distribución de los pronósticos de probabilidad en América Central, para el trimestre ASO, se presentan en la Figura 9. De ahí se énfasis en la existencia de un alto porcentaje de que las variables ACM (Figura 9a), DCP (Figura 9d) y P80 (Figura 9g) se presenten con valores por arriba de los normales. Lo que sugiere que existe una alta probabilidad de ocurrencia de extremos húmedos. Por otra parte, la Figura 9j muestra que el pronóstico de valores arriba de lo normal de extremos secos (P10), tiene en general bajo porcentaje de probabilidad, lo cual respalda la información obtenida anteriormente. Cabe destacar que estos resultados se proyectan sobre la vertiente del Pacífico y parte norte de la vertiente Atlántica. En el sur del Caribe (Costa Rica y Panamá) se obtuvo el resultado apuesto, en todas las variables, y refleja los diferentes mecanismos dinámicos de producción de precipitación que presentan ambos litorales del sur de América Central. Estos resultados concuerdan con los experimentos de Fallas (2009).

Por otra parte los mapas de pronósticos de valores normales (Fig. 9b,e,h,k) muestran bajos porcentajes de probabilidad en cada una de las variables. Por último, los mapas de pronósticos de valores bajo lo normal de ACM (Figura 9c), DCP (Figura 9f) y P80 (Figura 9i) muestran

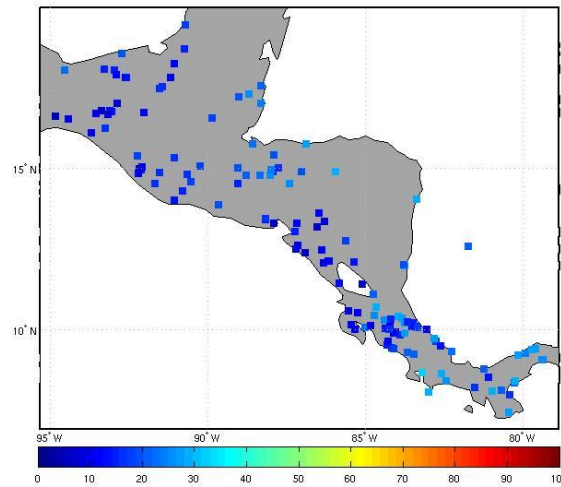
⁶ (Xue et al., 2003), tomadas de (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/index.shtml (última visita 26 de agosto de 2010).

principalmente en el litoral Pacífico, bajas probabilidades, mientras que para la costa sur del Caribe, presentan porcentajes altos de probabilidad. El percentil 10 (Figura 9l), confirma esta tendencia dado que exhibe baja probabilidad de ocurrencia en la costa Pacífico mas no así en la vertiente Caribe donde es muy probable que el porcentaje de días excedan al valor de este percentil.

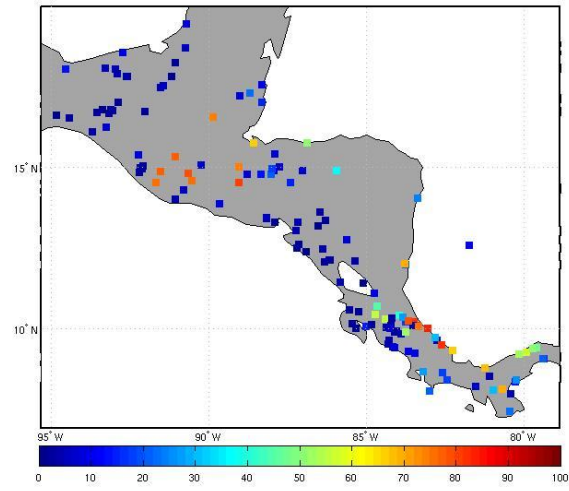
a)



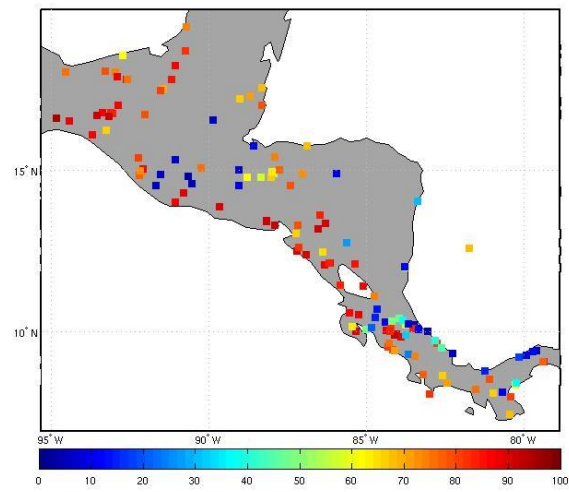
b)



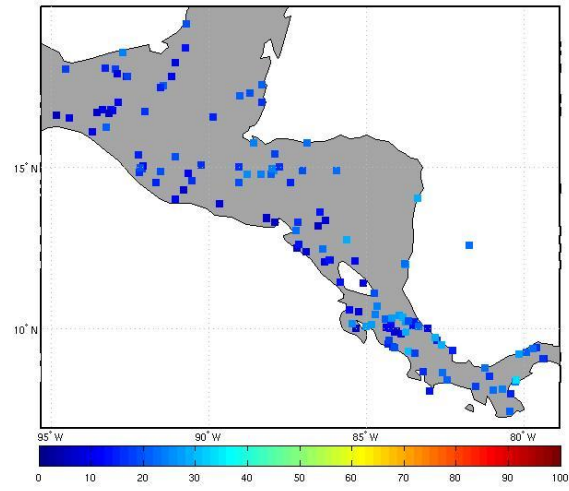
c)



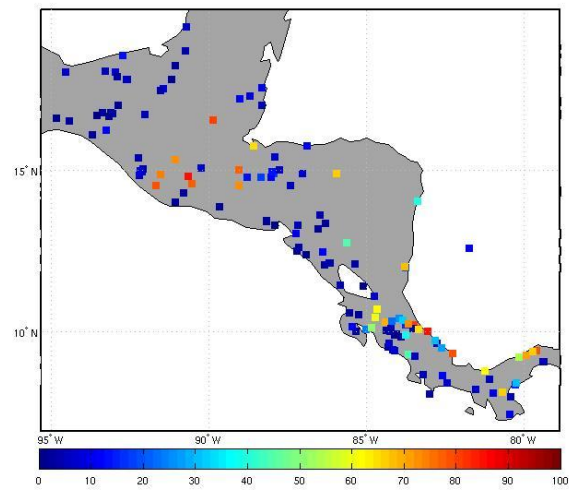
d)



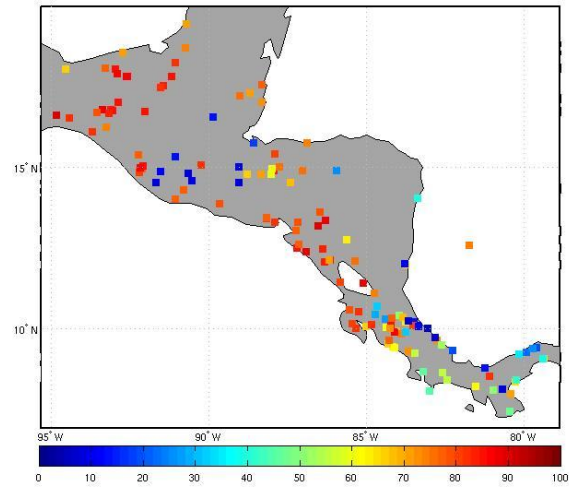
e)



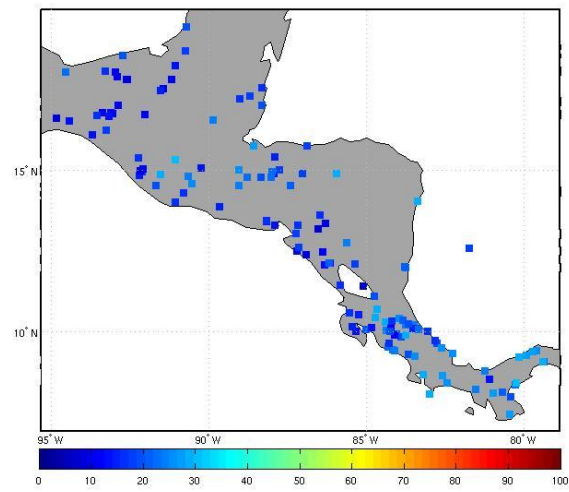
f)



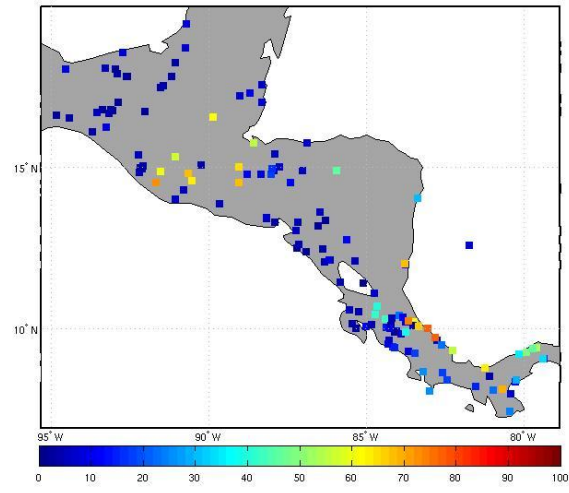
g)



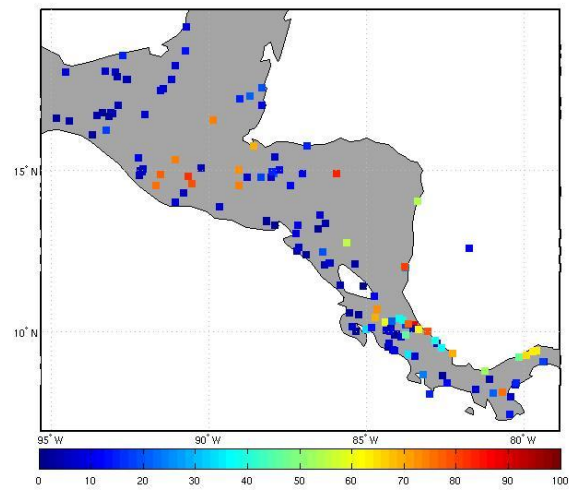
h)



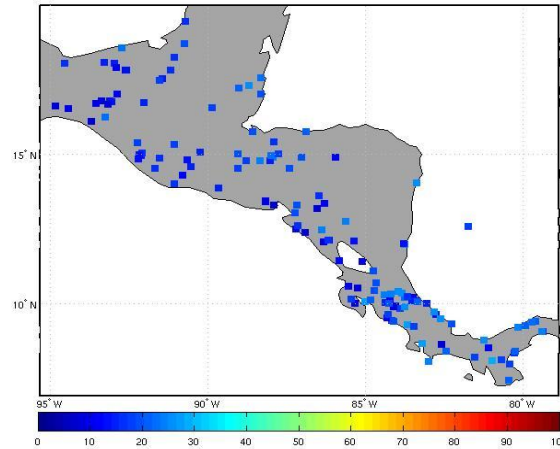
i)



j)



k)



l)

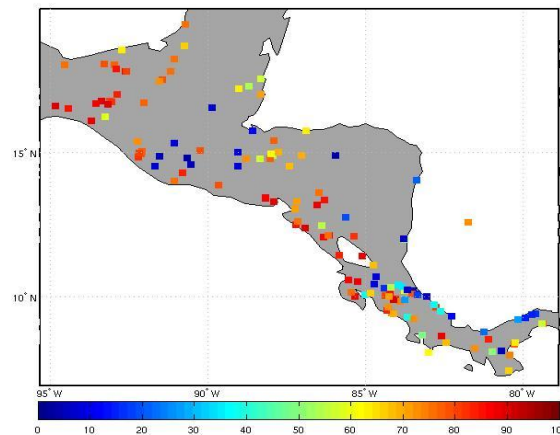


Figura 9. Distribución de pronósticos en América Central, generados a partir de modelos de ACC para la predicción de ASO. Los mapas de pronósticos son: a) ACP Arriba, b) ACP Normal, c) ACP Abajo, d) DCP Arriba, e) DCP Normal, f) DCP Abajo, g) P80 Arriba, h) P80 Normal, i) P80 Abajo, j) P10 Arriba, k) P10 Normal y k) Abajo.

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis de contingencia entre los modos que capturaron variabilidad por el dipolo de temperatura superficial del agua de los océanos y los índices Niño 3 y OMA. Los resultados son consistentes con los obtenidos por los modelos de ACC y los pronósticos realizados para el trimestre ASO. Los modos 2 del acumulado mensual y días con precipitación se encuentran anti correlacionados en ambos predictantes (Figura 6a,b). Con condiciones de que estos modos y el índice estén por debajo (arriba) de lo normal, se puede tener indicios de lo que se esperararía con respecto al predictante, es decir, que estas variables podría

augmentar (disminuir) con relación a sus valores normales. Estos resultados también confirman lo expuesto en Alfaro (2007) y Fallas (2009).

El modo 2 del P80 se encuentra correlacionado con la serie de tiempo de esta variable (Figura 6c). La tabla de contingencia de este modo y los índices oceánicos descritos antes, muestra que hay una alta frecuencia de que estando el primero por arriba (debajo) de lo normal y el segundo por debajo (arriba), la variable manifieste una tendencia a estar por arriba (debajo) de lo normal. En los casos hasta ahora estudiados, las significancias de las frecuencias obtenidas es del 99%.

Tabla 2. Frecuencias relativas de las tablas de contingencia en entre los modos canónicos de ACM (modo 2, $X^2= 23.84$, significancia 1.0%), DCP (modo2, $X^2= 15.25$, significancia 0.99), P80 (modo 2, $X^2= 23.84$, significancia 1) y P10 (modo 1, $X^2= 3.1$, significancia 0.46) y la diferencia de los índices Niño 3 menos OMA. Los valores de las significancias de las cuentas son * mayor al 90% pero menor al 95%, ** mayor al 95% pero menor al 99% y *** mayor al 99%. En paréntesis las frecuencias absolutas.

ACM (modo 2)	B	N	A
B	69(9)***	15(2)*	15(2)*
N	33(4)	58(7)**	8(1)***
A	0(0)***	23(3)	77(10)***
DCP (modo2)			
B	69(9)***	15(2)*	15(2)*
N	33(4)	42(5)	25(3)
A	0(0)***	38(5)	62(8)***
P80 (modo 2)			
B	0(0)***	23(3)	77(10)***
N	33(4)	58(7)**	8(1)***
A	69(9)***	15(2)*	15(2)*
P10 (modo 1)			
B	31(4)	46(6)*	23(3)*
N	33(4)	33(4)	33(4)
A	38(5)	15(2)**	46(6)*

Por último, existe una moderada frecuencia (significancia al 90%) de que el modo 1 del P10 tenga condiciones bajo (arriba) y los índices Niño 3 y OMA normal (arriba), y dado este escenario se esperaría que esta variable presente valores bajo (arriba) de lo normal, por la relación entre este modo y el predictante (Figura 6d) en la vertiente Pacífico y caso contrario en el sur del litoral Caribe.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo a partir de ACC reafirma la influencia de la TSM en la variabilidad climática de la precipitación en las zonas continentales de América Central, coincidiendo con los trabajos de Alfaro y Cid (1999), Alfaro et al. (2006), Alfaro (2007), Fallas (2009) y García (2009).

La habilidad estadística predictiva de los modelos, mostró en promedio una considerable mejora conforme se reducen los retrasos mensuales con respecto al trimestre ASO (Figura 1), mostrando que existe un buen patrón predictivo sobre la región de estudio (Figura 7) utilizando la serie de tiempo de la TSM de julio.

Para eventos extremos, la técnica proporciona buenos resultados, coincide además con Gershunov y Cayan (2003), Alfaro (2007) y Fallas (2009), debido a que la fuente de variabilidad producida por el dipolo de temperaturas superficiales que se genera entre el océano Pacífico y Atlántico, siempre está relacionado con los modos de mayor variabilidad y de mayor correlación de los modelos obtenidos (Figura 5), tomando en cuenta que la tendencia lineal representa una fuente de variabilidad importante que podría estar capturan los eventos cálidos de la Oscilación del Sur (Trenberth y Hoar, 1996), aunque no se encontró relación estadística. Sumado a esto, se encontró que los índices que tienen mayor influencia tanto de forma regional como local, son los relacionados al Niño3 y OMA (Tablas 1 y 2), respaldando que este patrón bipolar de temperaturas es de mucha influencia en las precipitaciones durante la estación estudiada.

Esto último se confirma mediante los pronósticos hechos para la temporada en estudio, ya que las condiciones de la TSM reportadas para julio de 2010 mostraron un Pacífico bajo condiciones frías (de la Niña) y un Atlántico caliente (Figura 8), y ante tal escenario, es de esperar que la ocurrencia de extremos húmedos en el Pacífico y Caribe norte sea alta, mientras que al sur del litoral Caribe se esperan condiciones de extremos secos. Esta situación física también se reflejó en las tablas de contingencia entre los modos canónicos que capturan el dipolo y la diferencia de los índices Niño 3 menos OMA.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, E. (2000). Eventos cálidos y fríos en el Atlántico tropical norte. *Atmósfera*, 13 (2), 109-119.
- Alfaro, E.J. (2002). Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationship with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9 (2), 88 – 103.
- Alfaro, E.J. (2007). Uso del análisis de correlación canónica para la predicción de la precipitación pluvial en Centroamérica. *Ingeniería y Competitividad*, 9, 33-48.
- Alfaro, E.J., & Cid, L. (1999a). Análisis de las anomalías en el inicio y término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 6 (1), 1-13.
- Alfaro, E.J., & Cid, L. (1999b). Ajuste de un modelo VARMA para los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica y los índices oceánicos Pacífico y Atlántico tropical. *Atmósfera*, 12 (4), 205-222.
- Alfaro, E.J., & Soley, F.J. (2001). Ajuste de un modelo VAR como predictor de los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 8 (1), 77-94.
- Alfaro, E.J., & Soley, F.J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 60-75.
- Alfaro, E.J., Cayan, D., & Gershunov, A. (2006). Prediction of summer maximum and minimum temperature over the central and western United States: the roles of soil moisture and sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19 (8), 1407-1421.
- Alfaro, E., Cid, L., & Enfield, D. (1998). Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los océanos Pacífico y Atlántico tropical. *Investigaciones Marinas*, 26, 59-69.
- Amador, J.A. (1998). A climate feature of tropical Americas: the trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5 (2), 91-102.
- Amador, J.A, Alfaro, J.E., Lizano, O.G, & Magaña, V.O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69 (2-4), 101 -142.
- Ashby, S., Taylor, M.A., & Chen, A.A. (2005). Statistical models for predicting rainfall in the Caribbean. *Theoretical and Applied Climatology*, 82 (1/2), 65-80.
- Climate Prediction Center, NCEP (2010, agosto). http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/index.shtml
- Davis, R.E. (1976). Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 6 (3), 249-266.

Enfield, D.B., & Alfaro, E.J. (1999). The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific oceans. *Journal of Climate*, 12 (7), 2093-2103.

Enfield, D.B., Mestas-Núñez, A.M., & Trimble, P.J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28 (10), 2077-2080.

Fallas López, B. (2009). Predicción estacional de los campos de precipitación y temperatura en Centroamérica, usando herramientas estadísticas. Tesis de Licenciatura en Meteorología, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. p. 50-63.

García Guirola, L.A. (2009). Régimen de lluvias y caudales en El Salvador, su relación con la variabilidad climática (Forzantes oceánicos-atmosféricos) para la construcción de mapas de amenaza por déficit o exceso de lluvias. Tesis de Maestría en Hidrología, Sistema de estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica. pp. 212.

Gianni, A., Cane, M.A., & Kushnir, Y. (2001). Interdecadal changes in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic oscillation. *Journal of Climate*, 14 (13), 2867-2879.

Gianni, A., Kushnir, Y., & Cane, M.A. (2000). Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO, and the Atlantic ocean. *Journal of Climate*, 13 (2), 297-311.

Gershunov, A., & Cayan, D.R. (2003). Heavy daily precipitation frequency over the contiguous United States: sources of climate variability and seasonal predictability. *Journal of Climate*, 16(16), 2752-2765.

Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12 (6), 1577-1588.

Poveda, G. & Mesa, O.J. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste [del Chocó] y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23 (89), 517-528.

Poveda, G., Waylen, P.R., & Pulwarty, R.S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in the northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, and Palaeoecology*, 234 (1), 3-27.

Spence, J.M., Taylor, M.A., & Chen, A.A. (2004). The effect of concurrent sea-surface temperature anomalies in the tropical Pacific and Atlantic on Caribbean rainfall. *International Journal of Climatology*, 24 (12), 1531-1541.

Smith, T.M., Reynolds, R.W., Thomas C. Peterson, and Jay Lawrimore (2008). Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21, 2283-2296.

- Taylor, M.A. & Alfaro, E.J. (2005). Climate of Central America and the Caribbean. In: J. E. Oliver (editor) *Encyclopedia of World Climatology*. Netherlands: Springer, p. 183-188.
- Taylor, M.A, Enfield, D.B., & Chen, A.A. (2002). The influence of the tropical Atlantic versus the tropical Pacific on Caribbean rainfall. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 107 (C9), 10.1-10.14.
- Trenberth, K.E., & Hoar, T.J. (1996). The 1990–1995 El Niño-Southern Oscillation Event: Longest on Record, *Geophysical Research Letters*, 23(1), 57–60, doi:10.1029/95GL03602.
- Wang, C. (2006). An overlooked feature of tropical climate: inter-Pacific-Atlantic variability. *Geophysical Research letters*, 33 (12), L12702.1 - L12702.5.
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relation to climate. *Climate Dynamics*, 29 (4), 411-422.
- Wang C., Enfield, D.B., Lee, S.-K., & Landsea, C.W. (2006). Influences of the Atlantic warm pool on western hemisphere summer rainfall and Atlantic hurricanes. *Journal of Climate*, 19 (12), 3011 – 3028.
- Waylen, P.R., Quesada, M.E., & Caviedes, C.N. (1994). The effects of El Niño-Southern oscillation on precipitation on San José, Costa Rica. *International Journal of Climatology*, 14 (5), 559-568.
- Waylen, P.R., Caviedes, C.N., & Quesada, M.E. (1996a). Interannual variability of monthly precipitation in Costa Rica. *International Journal of Climatology*, 9 (10), 2606-2613.
- Waylen, P.R., Caviedes, C.N., & Quesada, M.E. (1996b). Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 16 (2), 173-193.
- Waylen P.R., & Quesada, M. (2001). The effect of Atlantic and Pacific surface temperatures on the mid-summer drought of Costa Rica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, No. 27, 193-205.
- Wilks, D.S. 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, California: Academic Press.
- Xue, Y., Smith T.M., & Reynolds, R.W. (2003). Interdecadal changes of 30-yr SST normal during 1871-2000. *Journal of Climate*, 16, 1601-1612.