

Propuesta metodológica para la predicción climática estacional de eventos extremos y días con precipitación. Estudio de caso: Sur de América Central.²²⁹
(Seasonal climate prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days in the South of Central America as a study case. A methodological proposal.)

Tito Maldonado y Eric Alfaro
230

Resumen

Se describe una propuesta metodológica en donde se ajustaron modelos estadísticos usando el Análisis de Correlación Canónica para la predicción climática estacional del acumulado de precipitación, los días con precipitación, los eventos extremos húmedos (percentil 80, P80) y los extremos secos (percentil 10, P10) en el sur de América Central (Nicaragua, Costa Rica y Panamá). El trimestre sobre el cuál se hizo la predicción fue agosto, setiembre y octubre (ASO), usando como campo predictor las temperaturas superficiales del mar (TSM) de los océanos circundantes al istmo, observadas durante los meses que preceden al trimestre, específicamente de abril a julio, para un esquema de predicción clásica, así como los meses simultáneos al trimestre ASO. Se encontró que la variabilidad de precipitación en la zona del sur de América Central, está fuertemente ligada a las anomalías de la temperatura de las aguas oceánicas adyacentes, notándose una fuerte influencia en la ocurrencia y magnitud de eventos extremos de precipitación durante ASO. Para efectos operacionales se encontró que con la TSM de junio o julio se puede obtener un buen esquema predictivo de las lluvias en el sur de América Central para dicho trimestre.

Palabras clave: Predicción climática estacional, precipitación, América Central, Análisis de Correlación Canónica, Ajuste de escala estadístico.

Abstract

Methodology for seasonal climate forecast of precipitation extreme events is developed tailoring prediction models with Canonical Correlation Analysis (CCA). Accumulated monthly precipitation, frequency of rainy days, wet extremes (80th percentile, P80) and dry extremes (10th percentile, P10) are deemed as predictant variables. This analysis is focused in Southern Central America (Nicaragua, Costa Rica and Panama) and the forecasts are made for the quarter corresponding to August, September and October (ASO). Sea surface temperature (SST) from neighbor oceans to the isthmus are used as predictor field. SSTs from April to July are studied as classic prognosis schemes, whereas SSTs of the simultaneous months to ASO are regarded as perfect prognosis scheme. Results show that precipitation variability in Southern Central America is strongly linked with the variability of the oceans, which influences the frequency and magnitude of extreme event occurrences during ASO. Finally, such models can be used in operative forecast schemes, since those models adjusted using the temperatures of June or July show acceptable prediction skill values for the region during such a quarter.

Key words: Seasonal climate prediction, precipitation, Central America, Canonical Correlation Analysis, Statistical downscaling.

²²⁹ Los autores desean agradecer al AI 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, ETESA, ACP e INETER). A las iniciativas de los proyectos V. I. 805-A9-532, 805-A8-606, 805-A7-002, 808-A9-180, UCR y CRN-2050-IAI.

²³⁰ Investigadores del Centro de Investigaciones Geofísicas, Posgrado en Ciencias de la Atmósfera, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, y Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica. (tito.maldonado@ucr.ac.cr / tito.maldonado@cigefi.ucr.ac.cr)

Introducción

Según Mason y Baddour (2007), los modelos estadísticos proveen una herramienta en la producción de pronósticos climáticos estacionales. En los modelos estadísticos se busca encontrar relaciones entre un conjunto de datos, llamados predictores y un segundo conjunto, llamados predictantes. Comúnmente, los predictantes incluyen las temperaturas medias estacionales y la precipitación acumulada, los cuales son típicamente predichos usando la temperatura superficial del mar, principalmente aquella de los océanos tropicales. Las predicciones se realizan bajo el supuesto de que las relaciones históricas observadas sean las mismas para el futuro. Pero hay muchas condiciones para que dicho supuesto sea válido, incluyendo la necesidad del uso de conjuntos de datos de muy buena calidad, para asegurarse que las relaciones históricas sean medidas en una forma robusta. Además, las relaciones descritas deben estar sustentadas por una base teórica. Debido a que existe la posibilidad de que se identifiquen relaciones espurias entre los predictores y los predictantes, los modelos estadísticos deben ser siempre validados. La mayoría de los modelos estadísticos se basan en relaciones lineales entre los campos, las cuales proveen un pronóstico bajo el supuesto de que dado un cambio en el valor del predictor, se esperaría un cambio proporcional y constante en el valor esperado del predictante, independientemente del valor del predictor.

Una de las técnicas que permite transferir en forma eficiente información de un campo de variables con un número grande de predictores hacia otro campo de variables con un número grande de predictantes es el Análisis de Correlación Canónica. (ACC, Amador y Alfaro 2009). En un trabajo reciente, Maldonado y Alfaro (2010) aplicaron el ACC para la predicción estacional de la precipitación sobre América Central y encontraron que la habilidad estadística predictiva de los modelos, mostró un buen patrón predictivo sobre la región, utilizando las series de tiempo de la TSM de los océanos circundantes. Sin embargo, Alfaro et al. (1998) y Enfield y Alfaro (1999), sugirieron que la respuesta del campo de precipitación al sur del istmo de América Central, podría tener algunas características particulares al compararla con el resto de la región, esto al analizar el inicio y el final de la estación lluviosa. Adicionalmente, algunos estudios previos de generación de escenarios de cambio climático en la zona continental América Central, que incluyen los Alvarado et al. (2005) y Ruosteenoja et al. (2003), muestran que los cambios hacia el futuro en la precipitación se manifiestan de forma irregular. En general se observa que en el Norte del istmo se produciría una tendencia hacia disminución, mientras que al Sur hacia el aumento, dependiendo del modelo, la región y del escenario socio-económico empleado. Debido a lo anterior, el objetivo de este trabajo es el de proponer una metodología de pronóstico estacional de diferentes aspectos de la precipitación, pero enfocada en el sur del istmo centroamericano.

En la próxima sección se discuten los datos y la metodología empleada como propuesta de pronóstico, usando como ejemplo el trimestre de agosto, setiembre y octubre, el cual

corresponde al segundo pico de la estación lluviosa en la vertiente pacífica de América Central y en donde se observan por lo general la mayoría de los eventos extremos de la precipitación. La sección siguiente muestra los resultados de la aplicación de esta metodología para pasar luego a la discusión de los mismos.

Datos y metodología

a) Bases de datos, predictantes y predictor

La base de datos de las series de precipitación, fue una compilación de los reportes de las estaciones meteorológicas de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales. El periodo base fue de 1969-2008, marcado por la calidad y disponibilidad de los datos. Se discriminaron aquellas series de tiempo que presentaban menos del 60% de los datos durante el periodo base. Así se logró obtener un total de 45 estaciones distribuidas como sigue: 8 en Nicaragua, 23 en Costa Rica y 14 en Panamá (Figura 1). A estas estaciones se le aplicó el método de rellenado de datos por análisis de componentes principales descrito en Alfaro y Soley (2009).

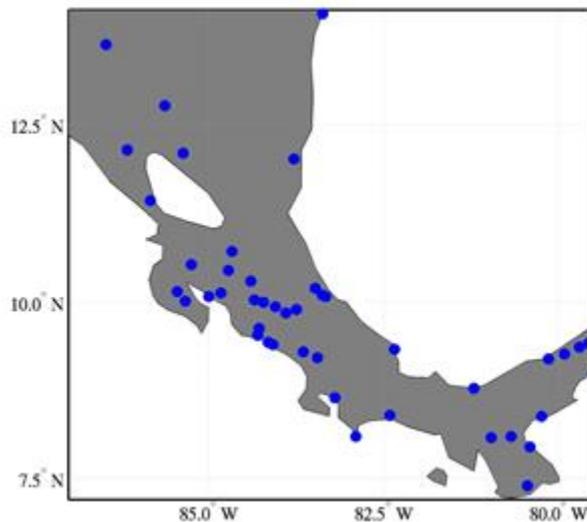


Figura 1. Los círculos azules representan las posiciones de las estaciones utilizadas.

Como predictantes se calcularon de las series de precipitación diaria, el acumulado mensual de precipitación (AMP) y el total de días con precipitación (DCP, se consideró como día con lluvia cuando la observación era mayor a 0mm) durante ASO. Mientras que se estimó el porcentaje de días que excedían (por debajo) el percentil 80 (10), llamados de aquí en adelante P80 (P10), de la distribución de precipitación diaria para agosto, setiembre y octubre. A estos porcentajes se les calculó el promedio en dicho trimestre, así; estas dos últimas variables se relacionan con extremos húmedos (secos) de precipitación sobre el sur de América Central (SAC).

Las anomalías de TSM (Smith et al., 2008) producidas por el Instituto Internacional para la Investigación Climática (IRI, por sus siglas en inglés) se utilizaron como predictor. La rejilla tiene una resolución de 2° de latitud por 2° de longitud en la región comprendida entre 63° N - 22° S, 111° E – 15° E.

b) Análisis de Correlación Canónica

El Análisis de Correlación Canónica (ACC) es una técnica estadística que identifica secuencias de pares de patrones en dos conjuntos de datos multivariados, o campos de observaciones, y construye nuevas variables transformadas por la proyección de los datos originales sobre estos patrones. Estos últimos, son escogidos de tal forma que las nuevas variables exhiban la mayor correlación, y a la vez, que no presenten correlación con cualquier otro patrón identificado. Es decir, busca nuevas variables que maximicen las interrelaciones entre dos conjuntos de datos multivariados (Wilks, 2006). En este sentido, ACC puede ser visto como una extensión de la regresión múltiple para el caso de una variable predictante vectorial (Glahn, 1968), donde estos pares de patrones son pesos análogos a los coeficientes de regresión.

En el campo de la geofísica, ACC se implementa para relacionar series de tiempo de una variable x con observaciones de una variable y . Dichos campos de observaciones, pueden o no tener las mismas localizaciones o puntos de grillas. Cuando estas series de tiempo son simultáneas, ACC puede ser utilizado para el diagnóstico de aspectos de variabilidad en el acople de los dos campos (e.g. Nicholls, 1987, Gershunov y Cayan, 2003, Alfaro et al., 2006, Alfaro (2007), Fallas (2009)). Si las observaciones del campo x preceden a las del campo y , ACC puede utilizarse para pronóstico estadístico de la variable y (predictante) utilizando como predictor la variable x (e.g. Maldonado y Alfaro, 2010). Además, según Amador y Alfaro (2009), esta técnica realiza reducción de escala de patrones presentes y pasados del predictor, hacia el campo de la variable predictante (e.g. Gershunov y Cayan, 2003; Alfaro 2007). Adicionalmente, una de las ventajas que presenta esta técnica es que no asume una relación estacionaria entre los campos del predictor como del predictante, ya que se pueden incorporar las tendencias existentes en algunos de ellos como fuentes de variabilidad (Gershunov y Cayan, 2003).

c) Diseño de los Modelos

Se utilizó la herramienta Climate Predictability Tool (CPT), proporcionada por IRI. El diseño de los modelos consistió en: i) Los datos de precipitación son positivamente sesgados, por lo que se transforman a una distribución normal por medio de cuantiles, ya que ACC funciona mejor en distribuciones normales. Además estos datos se limitan a que su valor mínimo puede ser sólo 0, como condición. ii) se realiza un pre-filtrado con Análisis de Componentes Principales (ACP), escogiendo una cantidad suficiente de Componentes Principales (CP) para representar la máxima variabilidad del sistema. Luego de este pre-filtrado los datos de precipitación se transforman a sus distribuciones originales por medio del proceso

inverso al primer punto. iii) Se relacionan los patrones de variabilidad encontrados en el paso anterior por medio Correlaciones Canónicas (CC) derivada del ACC, iv) Se elige un número razonable de CP y de CC, determinado por la combinación que muestre en promedio la mayor capacidad predictiva en el dominio espacial de la precipitación. En este estudio se permitió que los modelos tuvieran hasta un máximo de 17 modos de CC como de CP sugerido por Gershunov y Cayan (2003). v) Se aplica la etapa de validación cruzada (Wilks, 2006) con una longitud de ventana de validación cruzada de 1.

Este procedimiento se aplicó utilizando diferentes rezagos de la TSM mensual con respecto al trimestre en estudio con el objetivo de evaluar la habilidad estadística predictiva de cada mes en particular. Los rezagos contemplados comprenden desde un mes (julio) hasta cuatro meses (abril) antes de ASO, para un esquema de pronóstico clásico. También se examinó la habilidad estadística predictiva de los meses simultáneos al trimestre (agosto, setiembre y octubre) para un esquema de prognosis perfecta (Wilks, 2006).

Resultados

La Figura 2 muestra la habilidad estadística predictiva de cada uno de los modelos. Note que en todas las variables, la TSM de junio y julio presentan un buen resultado. Esto tiene gran importancia a nivel operacional, debido a la frecuencia de publicación de los datos de TSM, que es a inicios de mes. Esto significa que a inicios de julio se pueden realizar pronósticos utilizando la TSM de junio, lo que ayudaría a las partes pertinentes de cada nación a tomar decisiones en cuanto prevención y preparación para las lluvias en ASO. A pesar de lo anterior, agosto y setiembre muestran los mejores valores en cuanto a habilidad predictiva se refiere. Sin embargo, este resultado es útil, para estudiar fuentes de variabilidad del sistema o para realizar esquemas de prognosis perfecta (Wilks, 2006).

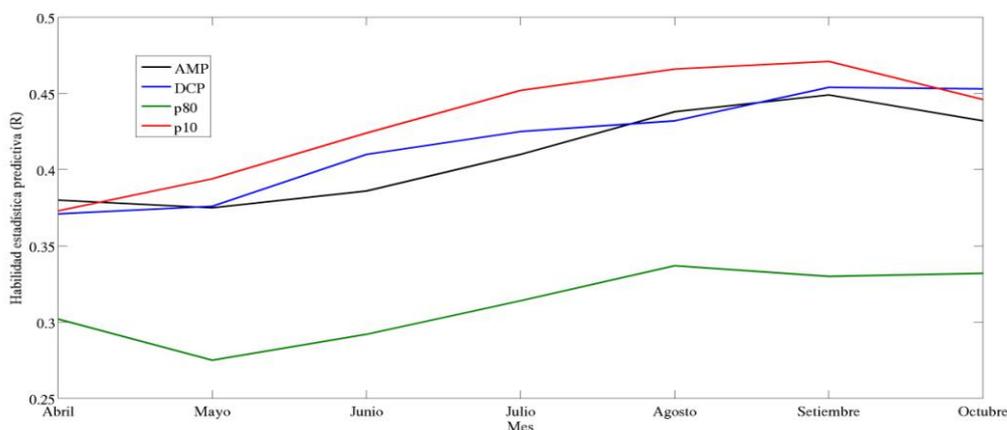
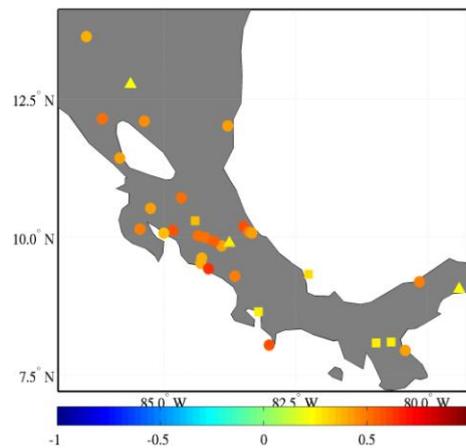
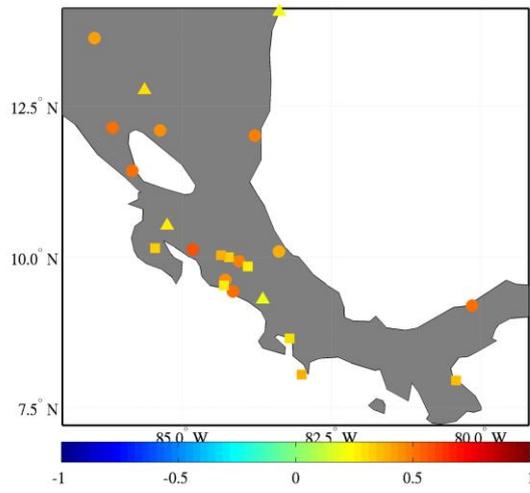
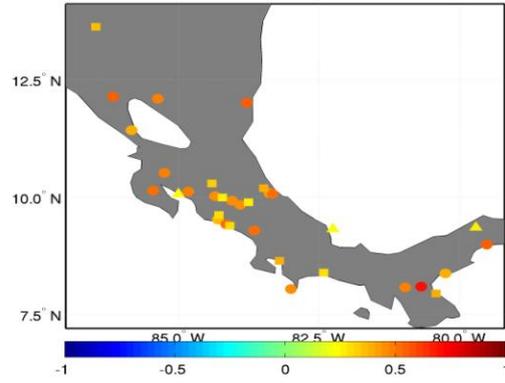


Figura 2. El promedio espacial de habilidad (r) para AMP (línea azul), DCP (línea de negro), P80 (línea verde) y P10 (línea roja) en el SAC para la predicción de la temporada de agosto, setiembre y octubre. Se muestran explícitamente los rezagos en el campo del predictor de la TSM.

Debido a lo anterior, este análisis se enfocará únicamente en los modelos que fueron generados con la TSM de julio (mejor resultado en para un esquema de pronóstico clásico). Todos los modelos presentaron distinto número de modos de CC, sin embargo, se estudiarán únicamente los primeros 2 modos ya que los modos de orden superior presentan fuentes de variabilidad más locales y que pueden tener una difícil interpretación física. Las Figuras 3 a, b, c y d muestran las distribuciones espaciales de las correlaciones de cada modelo de validación cruzada que se efectuaron para cada uno de los predictantes (AMP, DCP, P80 y P10, respectivamente y de aquí en adelante en el mismo orden) que fueron significativas al menos al 90%. Este resultado muestra que los modelos tienen una alta significación estadística en prácticamente todas las estaciones del SAC analizadas.



- a)
- b)



c)

d)

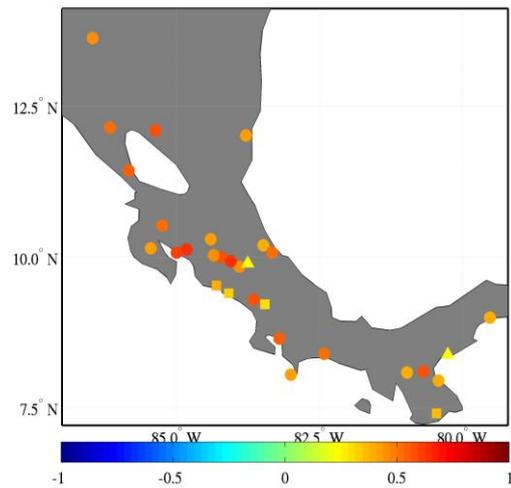
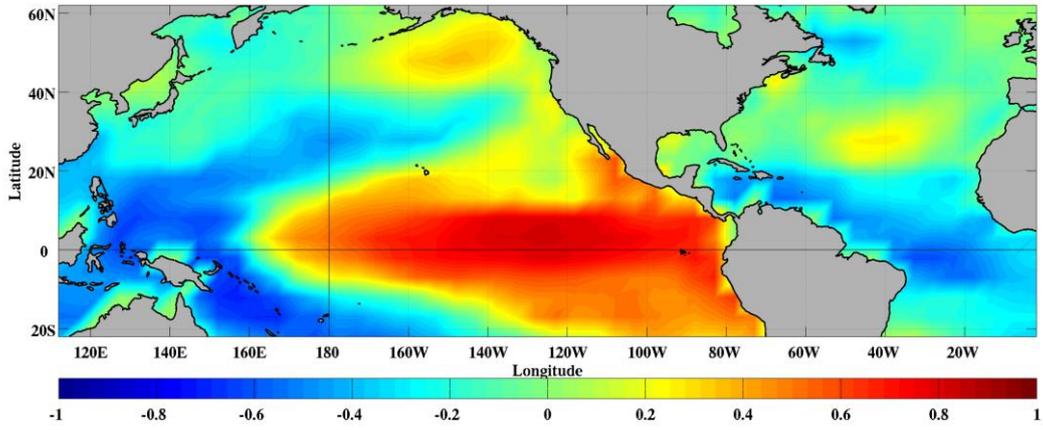
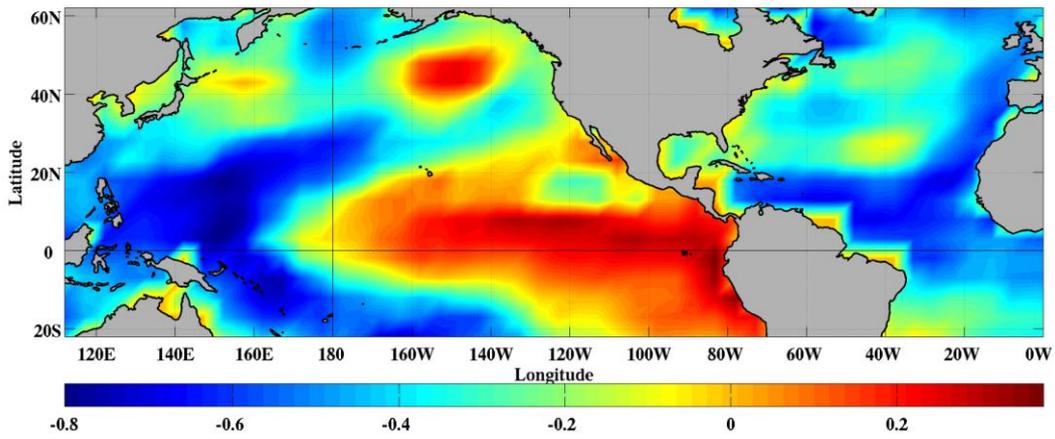


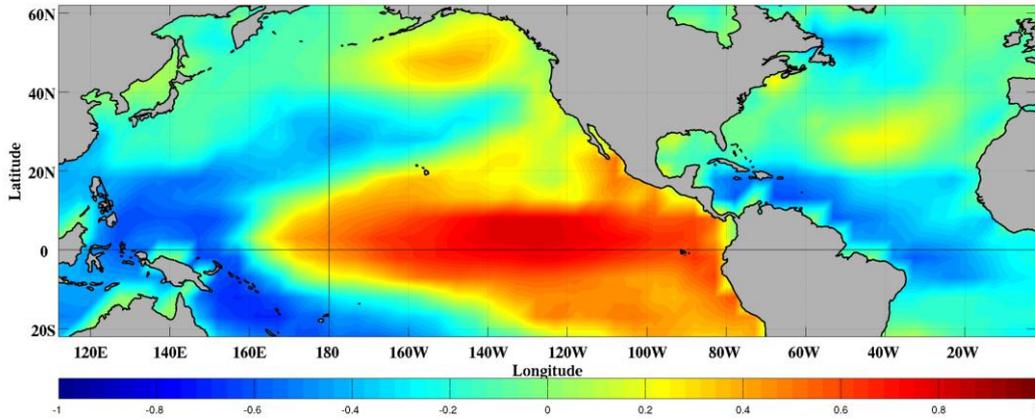
Figura 3. Distribución de la habilidad espacial (r) para a) AMP, b) DCP, c) P80 y d) P10, en el Sur de América Central para la predicción de ASO con la TSM de julio como predictor. Los valores se calcularon como la correlación de series de tiempo observadas y las predichas por el modelo mediante la validación cruzada. La significación estadística está limitada por los niveles entre 90-95% (triángulos), 95-99% (cuadros) y más del 99% (círculos). Dicha significación se calculó de acuerdo Davis (1976).

Los primeros modos de TSM en todos los modelos capturaron variabilidad debido a la presencia de un dipolo de temperaturas entre ambos océanos. En las Figuras 4 a, b, c, y d se observan los pesos espaciales asociados con dichos modos. Estos se correlacionaron positivamente con el Pacífico ecuatorial desde su parte central hasta la oriental, y negativamente con el Caribe y Atlántico Tropical Norte (ATN). Por otra parte, los modos asociados al campo de los predictantes AMP, DCP y P80 (Fig. 5 a, b y c), correlacionaron negativamente (positivamente) en la mayoría de las estaciones localizadas en la costa del Pacífico (Caribe) del SAC.



a)
b)





c)
d)

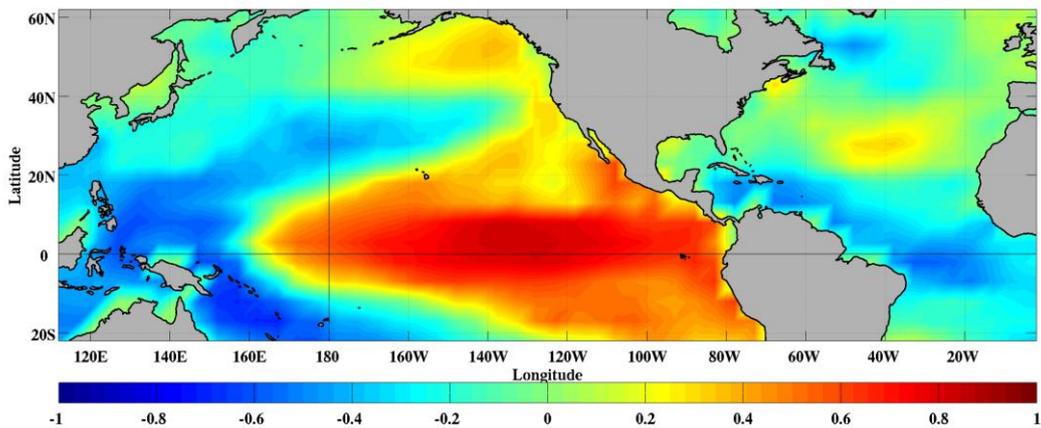
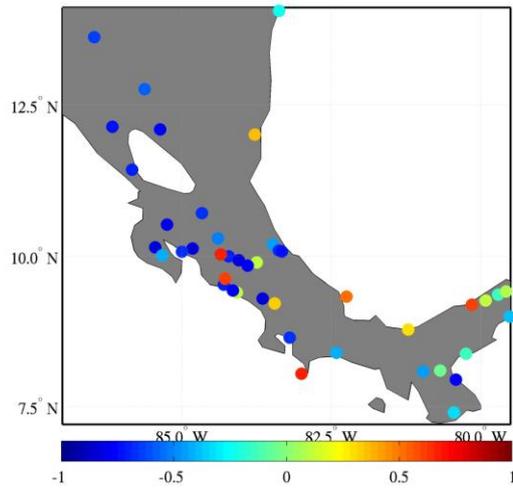
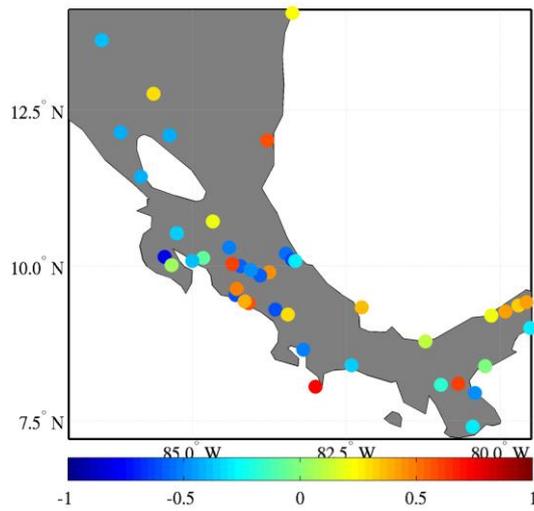


Figura 4. Pesos espaciales de los primeros modos de TSM de julio en cada modelo: a) AMP, b) DCP, c) P80 y d) P10.

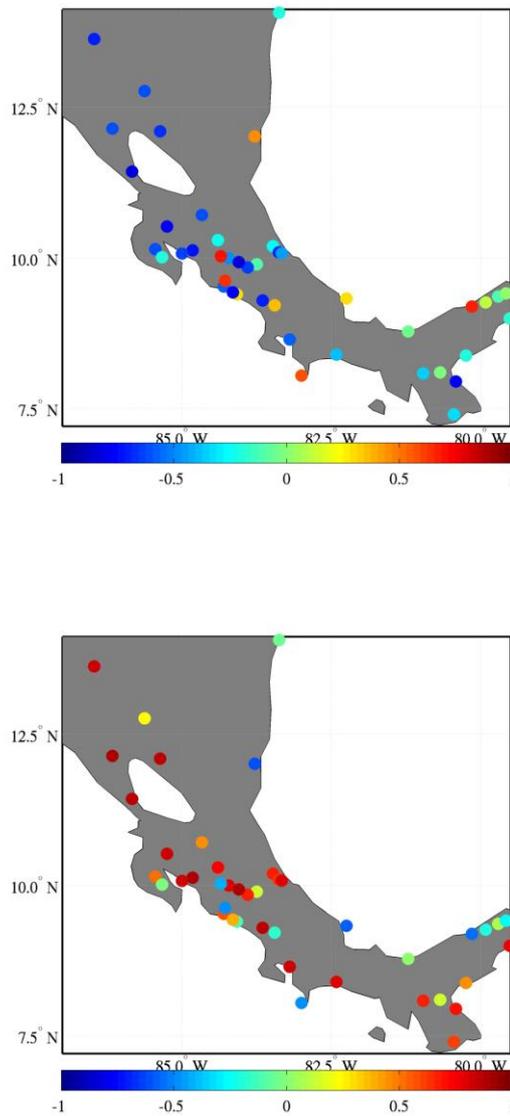
Mientras que el modo de P10 se presentó de manera inversa a los modos anteriores (Figura 5d). Cabe destacar aquí, el comportamiento atípico de algunas estaciones de Costa Rica, en las cuales sobresalen al menos unas cinco del litoral Pacífico y dos del Caribe, en donde las primeras mostraron una correlación positiva en una zona donde se obtuvieron valores negativos. Mientras que las segundas, se esperarían que presenten un patrón inverso a la mayoría de estaciones del Pacífico, debido a los diferentes mecanismos dinámicos que presentan ambos litorales en el régimen de lluvias para dicha estación (Taylor y Alfaro, 2005; Amador et al., 2006).



- a)
- b)



c)

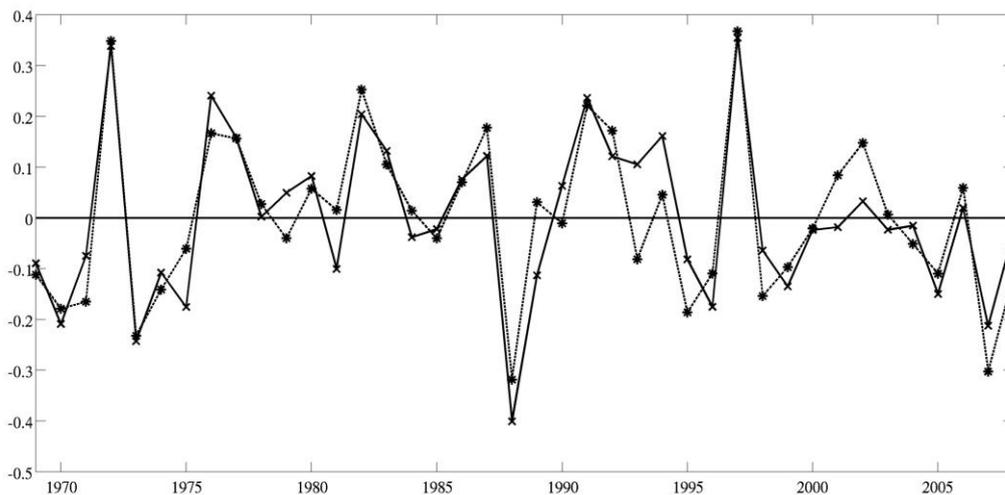


d)

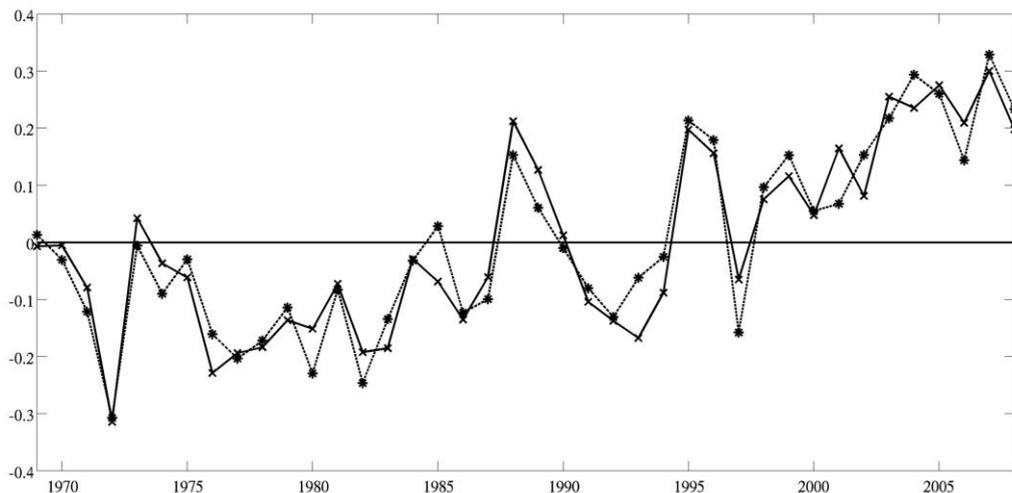
Figura 5. Pesos espaciales de los primeros modos de los predictantes de cada modelo: a) AMP, b) DCP, d) P80 y d) P10 para el trimestre ASO.

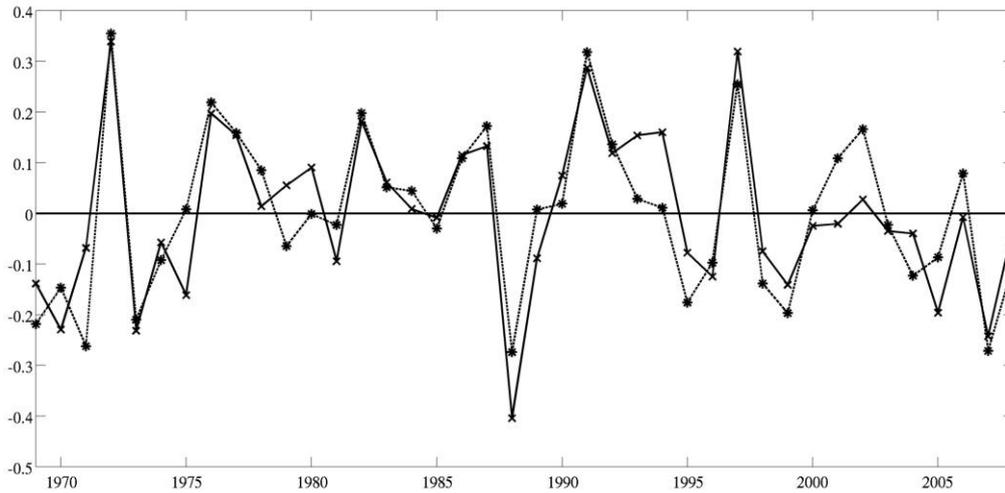
Este comportamiento atípico de dichas estaciones puede deberse al hecho de usar un gran área de cobertura de las TSM, y se podría estar manifestando en Costa Rica la interacción de las anomalías de la TSM del Pacífico sobre la costa Caribe del país. De igual forma, se puede estar manifestando la influencia de las anomalías del Atlántico sobre algunas estaciones de la vertiente Pacífico de Costa Rica. O sea, los modos de gran escala podrían dominar sobre aquellos de variabilidad local.

Este dipolo fue encontrado también por Alfaro (2007) y Fallas (2009) para América Central, que demuestran que cuando las anomalías de TSM presentan tal patrón de contraste entre el Pacífico ecuatorial oriental y el ATN, este influye sobre la variabilidad de la lluvia del istmo durante ASO (por ejemplo, Enfield y Alfaro, 1999). Esta característica significa por ejemplo que, cuando las anomalías de TSM del Pacífico ecuatorial oriental tienden a ser más cálidas en comparación con los de la ATN, la respuesta de la precipitación sobre la tierra en América Central tiende a ser asociada en la vertiente del Pacífico con condiciones secas y más húmedo en la vertiente del Caribe, sin embargo en este caso, no se observa una diferencia marcada en el régimen de lluvias entre ambos litorales de Costa Rica. Por otra parte, las series de tiempo muestran de estos modos presentan una variabilidad interanual para AMP, P80 y P10 (Figuras 6a, c y d), sin embargo para DCP (Figura 6b) presentó variabilidad por tendencia.



- a)
- b)





c)
d)

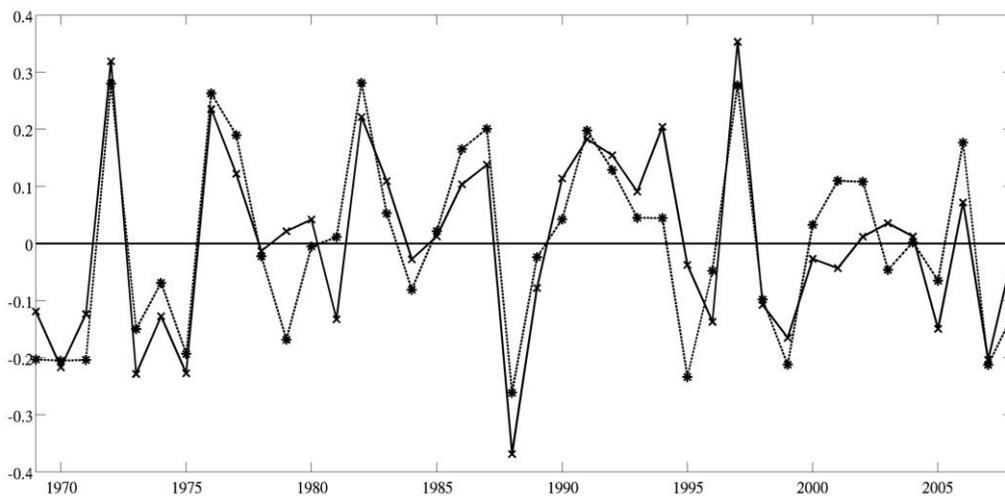


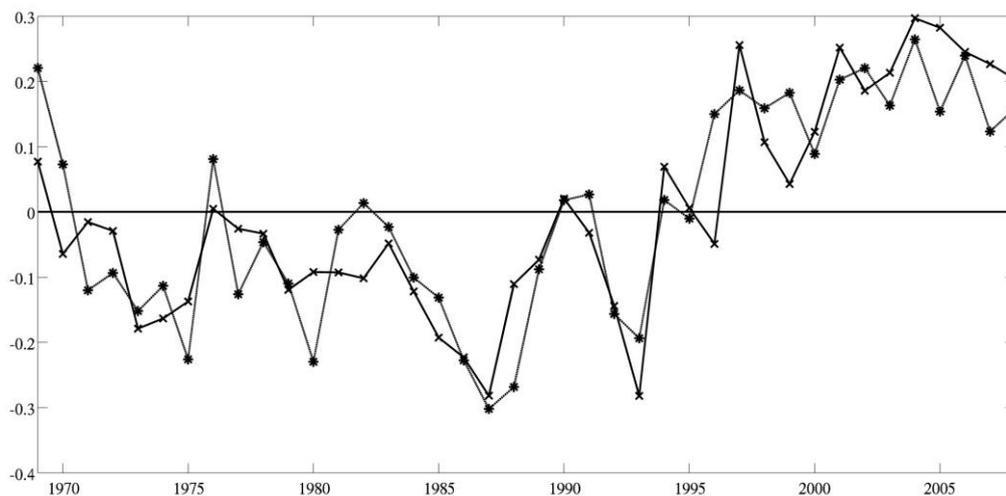
Figura 6. Series de tiempo normalizadas para los primeros modos en los modelos: a) AMP, b) DCP, c) P80 y d) P10. En todas se utilizó la TSM de julio como predictor. Las líneas continuas con cruces son las series de tiempo anuales de la TSM, mientras que las líneas a trazos con asteriscos representan el modo de la variable estadística correspondiente para el trimestre ASO. El periodo base es de 1969 al 2008. En cada uno de los casos, la correlación canónica de estos modos fue de alrededor de 0.9 con significación estadística por encima del 99%, según Davis (1976).

Un aspecto importante es el hecho de que todos estos modos tienen valores significativos de correlación con la diferencia normalizada para el mes de julio entre los índices

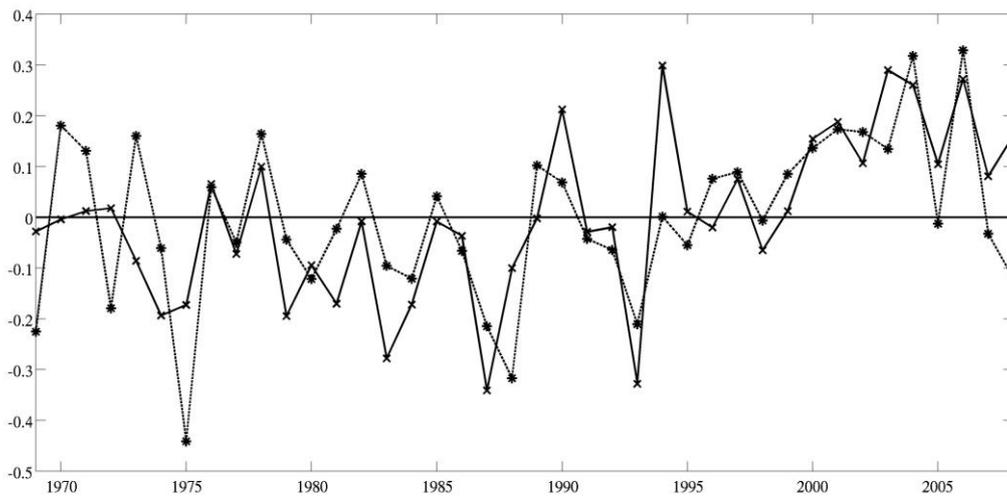
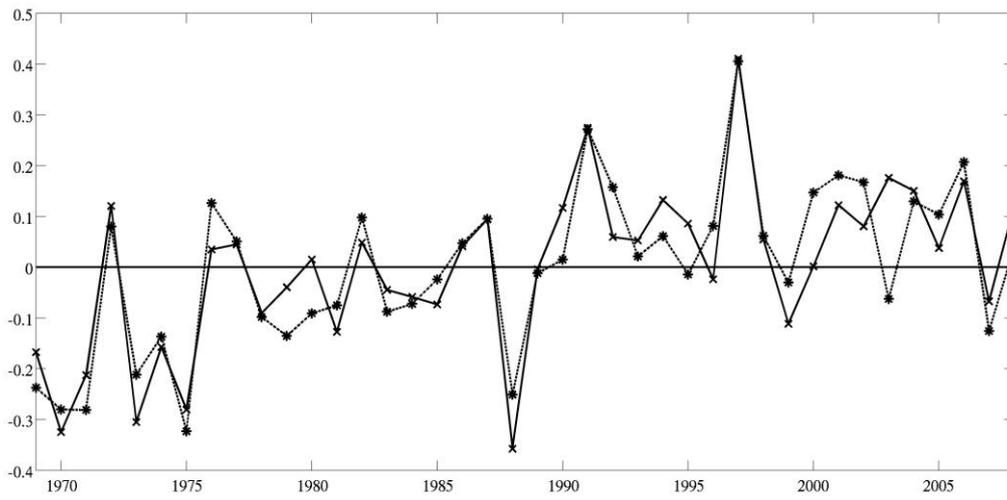
del Niño 3 y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA; Tabla 1). Esto significa que el conocimiento las predicciones de estos índices, se podría utilizar como un indicio de las predicciones futuras asociadas a la precipitación de ASO. A modo de ejemplo, se construyeron tablas de contingencia entre estos modos de TSM (Figura 6) y estos índices (Tabla 2). Estos cuadros muestran que los valores de los modos por debajo (encima) de los valores normales tienden a estar asociados con anomalías de TSM del Pacífico ecuatorial oriental más cálidas (frías) cuando se compara con las anomalías del ATN, esto para AMP, DCP y P80, mientras que el modo del P10 mostró el comportamiento opuesto. Se observa también que la probabilidad de la hipótesis contraria es muy pequeña.

La serie de tiempo del modo 2 del modelo AMP (Figura 7a) mostró una variabilidad multidecadal asociada a AMO (Tabla 3). En general, por debajo (encima) los valores normales AMO tienden a estar asociados con condiciones secas (húmedas) en América Central (por ejemplo, Alfaro 2007).

a)



b)



c)
d)

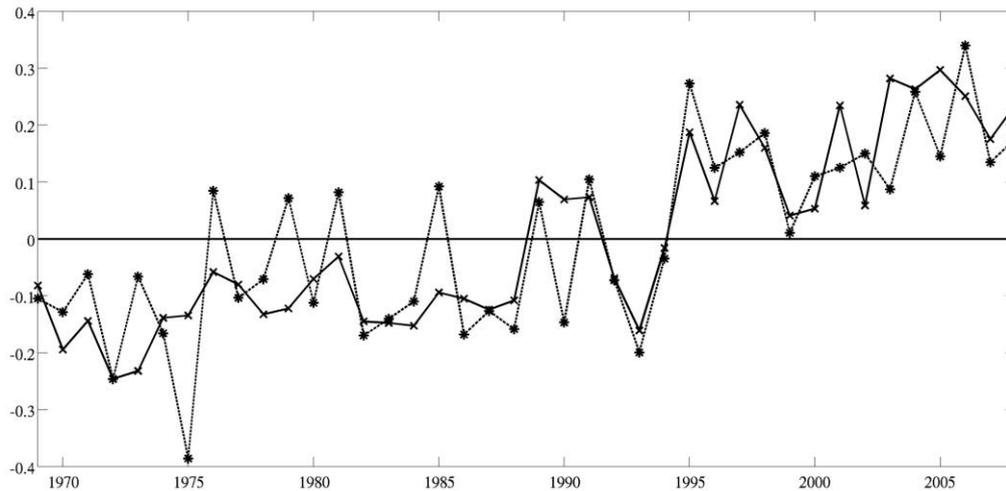


Figura 7. Series de tiempo normalizadas para los segundos modos en los modelos: a) AMP, b) DCP, c) P80 y d) P10. En todas se utilizó la TSM de julio como predictor. Las líneas continuas con cruces son las series de tiempo anuales de la TSM, mientras que las líneas a trazos con asteriscos representan el modo de la variable estadística correspondiente para el trimestre ASO. El periodo base es de 1969 al 2008. La correlación canónica de estos modos fue de alrededor 0.9, 0.9, 0.8 y 0.6, respectivamente, con significación estadística entre el 90%-95% para AMP y P10 y por encima del 99% para DCP y P80, según Davis (1976).

Esto podría reflejar el aumento (disminución) de la TSM del Atlántico Norte y la disminución (aumento) de la cortante vertical del viento, fenómeno que tiene una escala multidecadal, que ha producido alta (baja) actividad de huracanes en el Atlántico de acuerdo con Goldenberg et al. (2001).

Tabla 1. Correlación entre los primeros modos del campo de TSM de julio de cada modelo y las diferencias normalizadas de los índices Niño 3 y OMA del mismo mes. Todos los valores de significación estadística son superiores al 99%. La significación se calculó de acuerdo Davis (1976).

Variable	R
AMP	0.7
DCP	0.8
P80	0.8
P10	-0.7

Tabla 2. Tabla de contingencia de frecuencias relativas (%) entre los primeros modos de la TSM de julio de cada modelo y la diferencia normalizada de los índices Niño 3 y OMA del mismo mes. En paréntesis los valores de la frecuencia absoluta. Las categorías son: Bajo lo normal (B), Normal (N) y Arriba de lo normal (A). Los niveles de significación estadística están representados por *** >99%, ** 95-99% y * 90-95%.

a) AMP ($\chi^2=19.1^{***}$)				b) DCP ($\chi^2=24.5$)			
	B	N	A		B	N	A
B	54(7)**	38(5)	8(1)***	B	77(10)***	15(2)*	8(1)***
N	43(6)	43(6)	14(2)**	N	21(3)	57(8)***	21(3)
A	0(0)***	23(3)	77(10)***	A	0(0)***	31(4)	69(9)***
c) P80 ($\chi^2=17.4^{***}$)				d) P10 ($\chi^2=18.9^{***}$)			
	B	N	A		B	N	A
B	62(8)***	38(5)	0(0)***	B	0(0)***	23(3)	77(10)***
N	36(5)	36(5)	29(4)	N	50(7)**	43(6)	7(1)***
A	0(0)***	31(4)	69(9)***	A	46(6)	38(5)	15(2)**

Predicción de ASO 2010

Las condiciones de la TSM de julio de 2010 sobre el Océano Pacífico y el Mar Caribe fueron reportados por el Centro de Predicción Climática.²³¹ La Figura 8 muestra las anomalías de la TSM obtenidas de los medios mensuales del período base 1971 - 2000 (Xue et al., 2003). Se observaron temperaturas más cálidas en el ATN, en comparación con el Pacífico ecuatorial oriental, por lo que, de acuerdo a los resultados de la Tabla 1, descrita en la sección anterior, se esperarían condiciones más húmedas en la vertiente del Pacífico y condiciones más secas en casi toda la vertiente del Caribe del sur de América Central. Los pronósticos hechos a partir de modelos de ACC de AMP, DCP y P80 (Figuras 9, 10 y 11), muestran un escenario con alto porcentaje de probabilidad por encima (por debajo) de las condiciones normales de las estaciones en el Pacífico (Caribe, excepto en Costa Rica). De acuerdo con esta previsión, los valores esperados de la predicción no sólo serán superiores en el acumulado mensual, sino también en la cantidad de eventos extremos húmedos en ASO 2010. El pronóstico del P10 (Figura 12) es consistente con los resultados anteriores. Bajo porcentaje de probabilidad se espera para el escenario arriba de lo normal sobre el Pacífico, pero con alto porcentaje de probabilidad sobre el Caribe (excepto en Costa Rica).

²³¹ (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_disc_aug2010/ensodisc.html).

Tabla 3. Tabla de contingencia de frecuencias relativas (%) entre el segundo modo de la TSM de julio del modelo de AMP y el índice OMA. En paréntesis los valores de frecuencia absoluta. Las categorías son bajo lo normal (B), normal (N) y arriba lo normal (A). Los niveles de significación estadística están representados por ***> 99%, ** 95-99% y * 90 a 95%.

		AMP ($\chi^2=9.2^*$)		
		B	N	A
B		8(1)***	54(7)*	38(5)
N		29(4)	36(5)	36(5)
A		62(8)***	15(2)*	23(3)

Las series de tiempo de los segundos modos de los modelos restantes, mostraron principalmente variabilidad interanual (DCP) y por tendencia (P80 y P10). Ellos no tuvieron ninguna asociación estadísticamente significativa con algún índice de TSM conocidos y estas tendencias tuvieron un valor p inferior a 0.01.

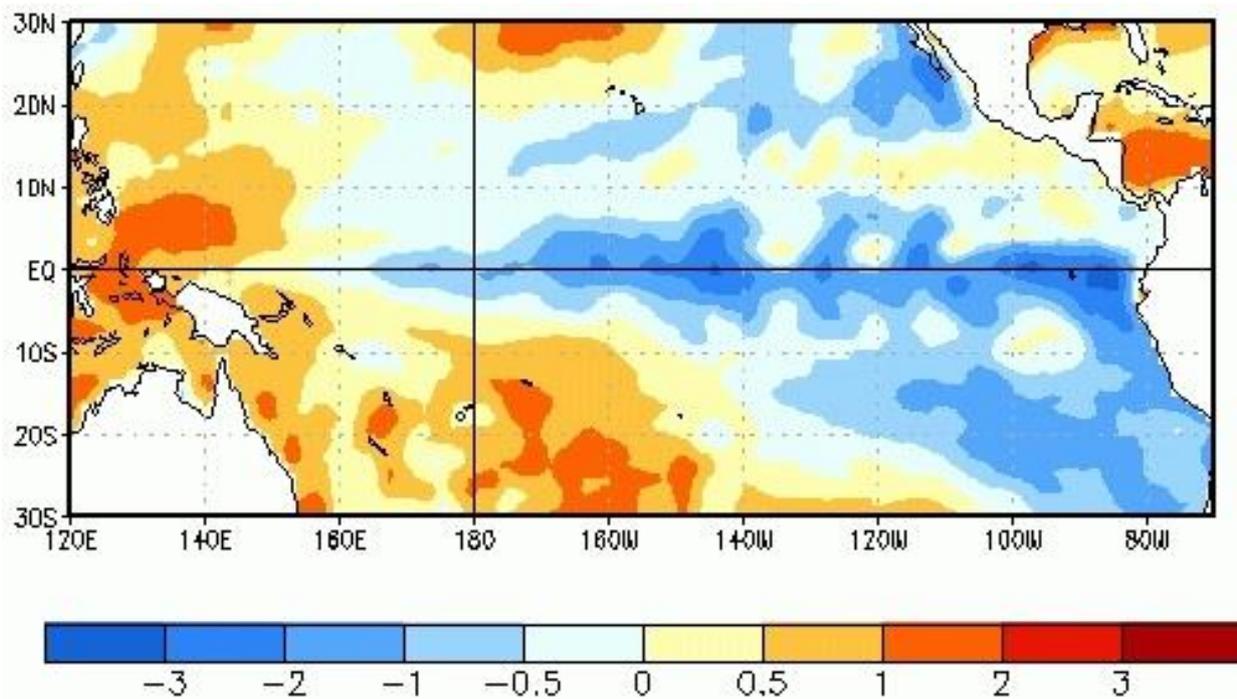
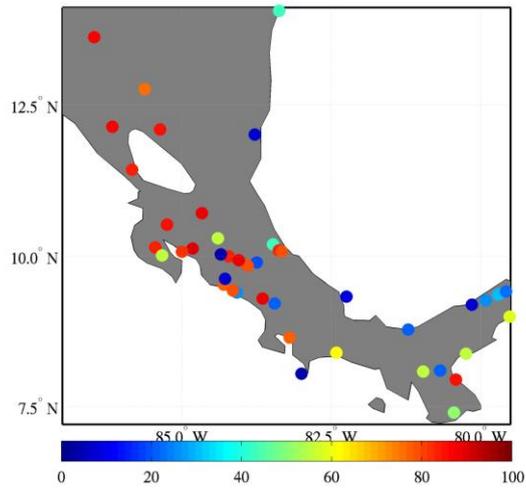
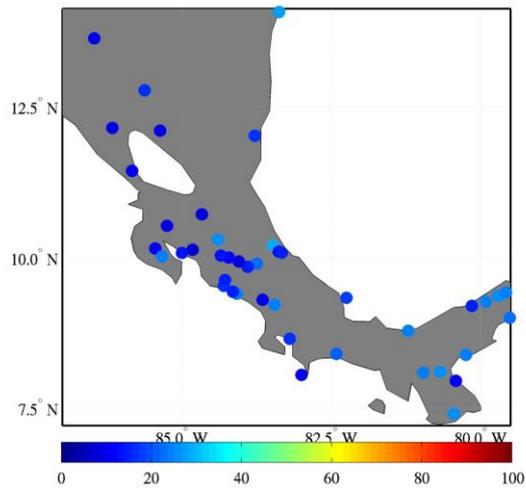


Figura 8. Promedio de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM, ° C) durante la semana centrada el 28 de julio de 2010. Las Anomalías fueron calculadas con respecto al periodo base 1971 – 2000 (Xue et al., 2003).



- a)
- b)



c)

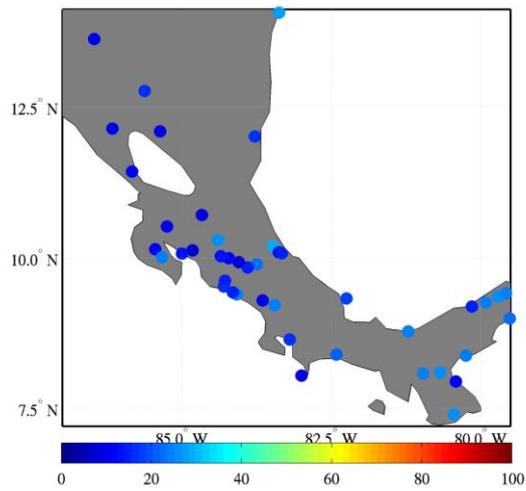
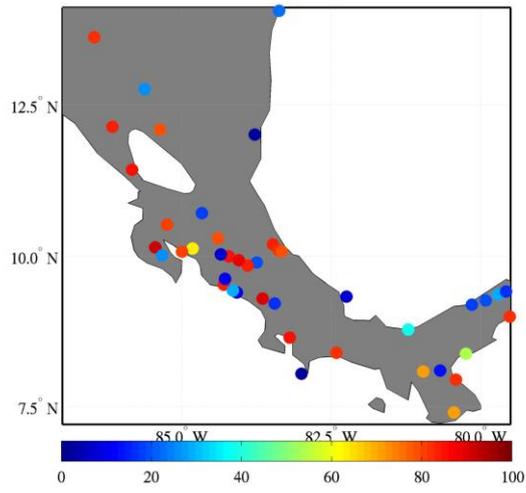
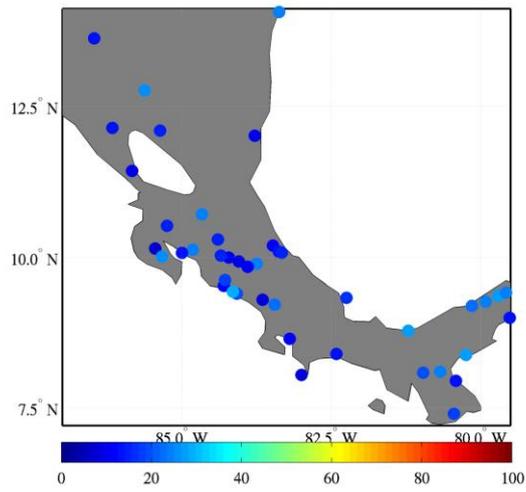


Figura 9. Pronósticos del acumulado mensual de precipitación (AMP) para agosto-septiembre-octubre (ASO) 2010 generados a partir de modelos de Análisis de Correlación Canónica (ACC) para la predicción de ASO. Los mapas de pronóstico mapas son para las categorías: a) Arriba de lo normal, b) Normal 4 y c) Bajo lo normal.



- a)
- b)



c)

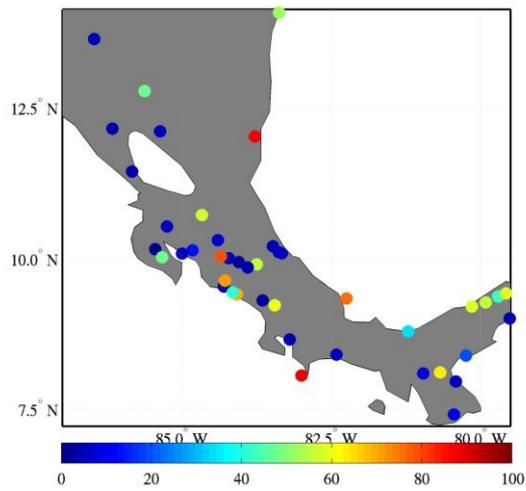
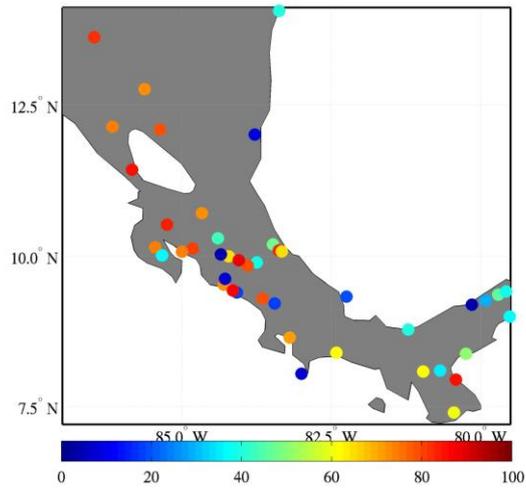
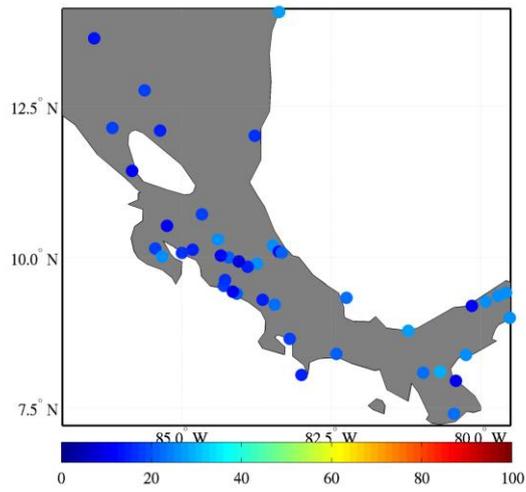
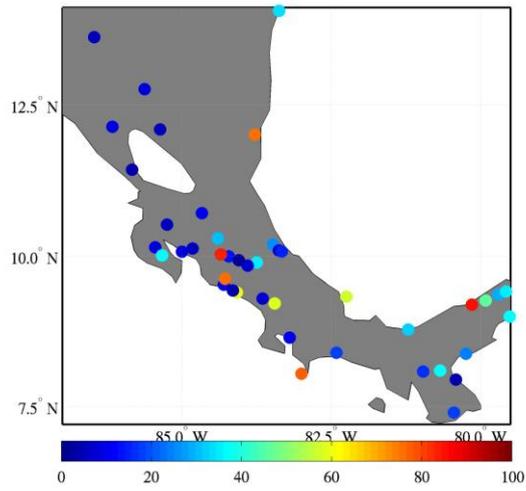


Figura 10. Pronósticos de los días con precipitación (DCP) para agosto-septiembre-octubre (ASO) 2010 generados a partir de modelos de Análisis de Correlación Canónica (ACC) para la predicción de ASO. Los mapas de pronóstico mapas son para las categorías: a) Arriba de lo normal, b) Normal 4 y c) Bajo lo normal.



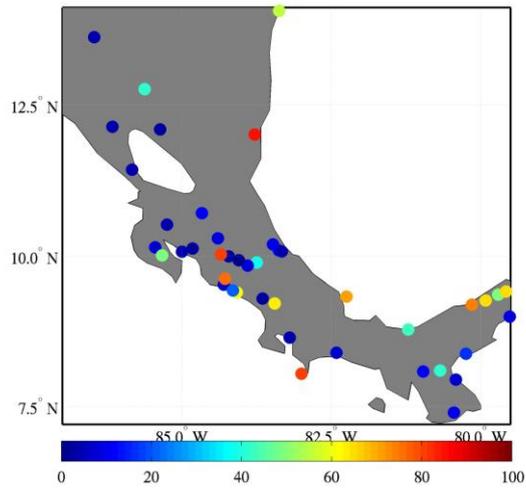
- a)
- b)



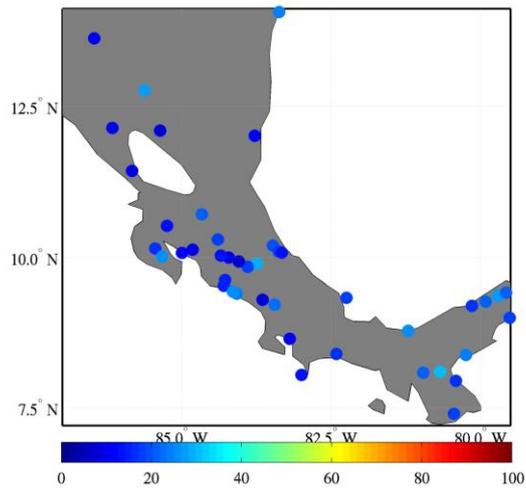


c)

Figura 11. Pronósticos del percentil 80 (P80) para agosto-septiembre-octubre (ASO) 2010 generados a partir de modelos de Análisis de Correlación Canónica (ACC) para la predicción de ASO. Los mapas de pronóstico mapas son para las categorías: a) Arriba de lo normal, b) Normal 4 y c) Bajo lo normal.



- a)
- b)



c)

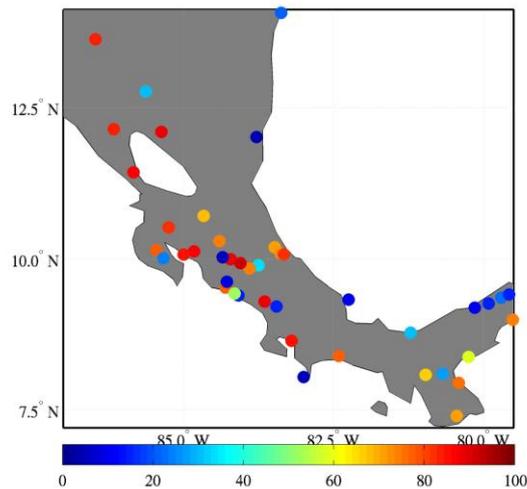


Figura 12. Pronósticos del percentil 10 (P10) para agosto-septiembre-octubre (ASO) 2010 generados a partir de modelos de Análisis de Correlación Canónica (ACC) para la predicción de ASO. Los mapas de pronóstico mapas son para las categorías: a) Arriba de lo normal, b) Normal 4 y c) Bajo lo normal.

Discusión

El uso del Análisis de Correlación Canónica (ACC) para la predicción de eventos extremos y días con precipitación utilizando las Temperaturas Superficiales del Mar (TSM) muestra buenos resultados en el pronóstico de dicho eventos. Se encontró que los modelos generados a partir de esta técnica, tuvieron una significancia estadística por encima del 90% en la mayoría de las estaciones en todos los modelos sobre el Sur de América Central (SAC, Figura 3).

En concordancia con otros trabajos (Enfield y Alfaro, 1999; Alfaro 2007; Fallas 2009) se encontró que la variabilidad de precipitación en la zona continental del SAC, está fuertemente ligada a las anomalías de la TSM de los aguas oceánicas adyacentes, notándose la fuerte influencia del dipolo de temperaturas en la ocurrencia y magnitud de eventos extremos de precipitación para el trimestre agosto, septiembre y octubre (ASO).

Para efectos operacionales se encontró que usando la TSM de junio se puede obtener un buen panorama de las lluvias en ASO, tomando en cuenta el hecho de que estas temperaturas se publican en las primeras semanas de cada mes, es decir en este caso en julio, lo que daría un tiempo razonable para la prevención y toma de decisiones de las entidades encargadas de manejo de desastres naturales de cada país. A pesar de eso, se encontraron mejores resultados con la TSM de julio, agosto y septiembre.

Por último, se debe tomar en cuenta un área oceánica adecuada (en este caso reducirla), para una región tan pequeña como lo es el SAC, debido a que se puede estar perdiendo factores de variabilidad en la precipitación sobre algunas estaciones, en ambos litorales, principalmente en Costa Rica, donde se observó una fuerte influencia del océano Pacífico sobre las estaciones del Caribe, presentándose en dichas estaciones el mismo patrón que la mayoría de estaciones del Pacífico, situación que no es de esperar debido a los diferentes mecanismos dinámicos que presentan ambos litorales en el régimen de producción de lluvias para dicha estación del año (Taylor y Alfaro, 2005; Amador et al., 2006). Así mismo, una característica atípica se encontró en algunas estaciones del Pacífico de Costa Rica, ya que su comportamiento fue inverso al resto localizadas en dicho litoral, lo que muestra influencia de las anomalías de la TSM del Atlántico sobre las estaciones de la vertiente Pacífico.

Referencias

- 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., & 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., Gershunov, A., & Cayan, D. (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, 1407 – 1421.
- Alfaro, E., L. Cid y D. Enfield, 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.
- Alvarado, L.F., M. Campos, E. Zárate, P. Ramírez & A. Bonilla. 2005. Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica. Documento Técnico, CRRH-UCR-CIGEFI-AIACC-LA06. San José, Costa Rica. 57pp. (Consultado 17 de mayo 2010, <http://www.aguayclima.com/biblioteca.htm>).
- Amador, J. A., & Alfaro, E. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)*, 11, 39 – 52.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69 (2-4), 101-142.
- 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, 1999.
- 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.
- 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.
- Glahn, H.R. (1968) Canonical correlation analysis and its relationship to discriminant analysis and multiple regression. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25, 23–31.

- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Nuñez, A. M., & Gray, W.M.(2001). The recent increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and implications. *Science*, 293, 474-479.
- Maldonado, T. y E. Alfaro, 2010. Predicción estacional para ASO-2010 de eventos extremos y días con precipitación sobre las vertientes Pacífico y Caribe de América Central, utilizando análisis de correlación canónica. *Sometido a la Revista Intersedes*.
- Mason, S. J., and O. Baddour, 2008: Statistical modeling. In Troccoli, A., M. S. J. Harrison, D. L. T. Anderson, and S. J. Mason (Eds), *Seasonal Climate Variability: Forecasting and Managing Risk*, Springer Academic Publishers, Dordrecht, 163-201.
- Nicholls, N. (1987). The use of canonical correlation to study teleconnections. *Monthly Weather Review*, 115, 393–399.
- Ruoteenoja, K., T.R. Carter, K. Jylhä & H. Tuomenvirta. 2003. Future climate in world regions: an intercomparison of model based projections for the new IPCC emissions scenarios. *The Finnish Environment* 644, Finnish Environment Institute, 83pp.
- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Peterson T. C., & Lawrimore, J. (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: *Encyclopedia of World Climatology*, J. E. Oliver, Springer, Netherlands, 183-188.
- Wilks, D. S. (2006). Statistical Forecasting, in: *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, 2, Elsevier, San Diego, California: Academic Press. 179 – 254.
- 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.