

Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 2: Análisis de Correlación Canónica.

Berny Fallas López¹ y Eric J. Alfaro²

¹*Departamento de Hidrología, Estudios Básicos de Ingeniería (EBI), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), San José, Costa Rica. Tel. 2000-7895 (bfallasl@ice.go.cr)*

²*Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Escuela de Física y Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica. Tel. 2511-5096 (erick.alfaro@ucr.ac.cr)*

(Recibido: 28-May-2012. Publicado: 20-Dic-2012)

Resumen

Se elaboró un pronóstico climático estacional en América Central basado en el Análisis de Correlación Canónica (ACC). Como predictores se usaron las temperaturas superficiales del mar de los océanos circundantes al istmo y como predictante el campo de precipitación, de 146 estaciones meteorológicas en Mesoamérica con registros mensuales para el período 1971-2000. El área oceánica asociada en el campo de la temperatura superficial del mar fue 60°N- 60°S y 270-0°O. En general, para cada uno de los períodos sobre los cuales se realizaron los pronósticos, se utilizaron las temperaturas superficiales del mar del trimestre anterior. El ACC, mostró los mejores resultados para el trimestre de ASO, trimestre de máxima precipitación anual en la vertiente del Pacífico. Algunos de los modos identificados en el análisis presentaron patrones espaciales asociados a fuentes de variabilidad conocidas como el ENOS, por lo que el ACC aparte de ser una herramienta útil para realizar pronósticos estacionales, también resultó útil para explicar predictores y asociaciones con otros índices climáticos. Los resultados de este trabajo mostraron que la introducción del ACC puede ayudar a los pronósticos estacionales de la región centroamericana, realizados en los foros de predicción climática de América Central, con análisis objetivos sobre las relaciones predictivas encontradas en el istmo.

Palabras clave: América Central, Análisis de Correlación Canónica, variabilidad climática, predicción climática estacional, climatología.

Abstract

A seasonal climate prediction was elaborated for Central America based on Canonical Correlation Analysis (CCA). Sea surface temperatures from the oceans around the isthmus were used as predictors. Precipitation was used as predictand field, using 146 meteorological stations located in Mesoamerica with monthly records from 1971 to 2000. The sea surface temperature area used was 60°N-60°S and 270-0°W. In general, the sea surface temperature associated with previous trimester was used for every predicted season. The CCA showed the best precipitation results for ASO, which is the trimester associated with the season of maximum precipitation over the Central American Pacific slope. Some of the modes identified in the analysis display spatial patterns associated with known climate variability sources as ENSO, meaning that CCA is useful for seasonal prediction in Central America and for predictor patterns explanation and possible climate indices associated. Results showed that CCA use in Central America can also help in the Regional Climate Outlook Forum tasks, providing objective analysis for the predictive relationships found in the region.

Key words: Central America, Canonical Correlation Analysis, climate variability, seasonal climate prediction, climatology.

1. Introducción

Existen dos medios principales para generar pronósticos estacionales: usando modelos dinámicos de gran escala de la atmósfera global, conocidos como modelos de circulación general, o usando técnicas estadísticas para relacionar la estacionalidad climática con cambios en las temperaturas superficiales del mar, tales como las asociadas con El Niño. En el primero de los casos, las predicciones son hechas para grandes áreas, y generalmente no son relevantes para ubicaciones específicas o de una escala más reducida. Además, debido a lo grosero de la escala a la que operan, la geografía en estos modelos normalmente está distorsionada y mal representada, y las ubicaciones geográficas pueden estar desplazadas. De ahí que dichas predicciones necesiten ser ajustadas para que puedan ser aplicadas a nivel local. Este proceso es conocido como disminución de escala, e involucra una corrección estadística de las predicciones de los modelos de circulación general (Amador y Alfaro, 2009). El método estadístico para realizar pronóstico estacional a partir de temperaturas superficiales del mar ha sido usado a través de muchos años en distintos Servicios Meteorológicos Nacionales. Desde finales de los años 90, estos pronósticos estadísticos han sido combinados para producir pronósticos por consenso, representando un esfuerzo en conjunto de distintas áreas, que se reúnen en los llamados Foros Regionales de Perspectivas Climáticas (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012).

Uno de estos métodos estadísticos es el llamado Análisis de Correlación Canónica (ACC). Según Soley y Alfaro (1999), el ACC es un método de análisis multivariado, similar al Análisis de Componentes Principales. Desarrollado por Hotelling (1936), esta técnica identifica una secuencia de pares de factores de peso en dos conjuntos de datos multivariados, construyendo conjuntos de variables transformadas proyectando los datos de origen sobre dichos pesos para obtener los componentes ortogonales de variabilidad. Los factores de peso son escogidos de forma tal que las nuevas variables definidas por las proyecciones de los conjuntos de datos sobre los patrones exhiban una correlación máxima. Sin embargo, no están correlacionados con las proyecciones de los datos sobre los otros componentes de ortogonalidad identificados, lo cual hace que se identifiquen nuevas variables que maximizan las relaciones internas entre los dos conjuntos de datos, contrastando con los patrones que describen la variabilidad propia de cada conjunto de datos. Es decir, el ACC está diseñado para identificar combinaciones lineales de variables de un campo que está más fuertemente correlacionado con combinaciones lineales de otro campo.

En muchos de los Foros de Perspectivas Climáticas se utiliza la Herramienta de Predicción Climática¹ (CPT por sus siglas en inglés). Este es un software desarrollado por el Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI por sus siglas en inglés), diseñado para hacer pronósticos estacionales climáticos y que utiliza el ACC (Ndiaye y Mason, 2007). Dicho programa es una herramienta fácil de utilizar y fue desarrollado inicialmente para ayudar a los pronosticadores de los Servicios Meteorológicos Nacionales en África, para producir pronósticos actualizados para cada país cada mes. Además, la herramienta del CPT está diseñada para realizar ambas formas de predicción, ya sea reducción de escala de los modelos de circulación general, o como predicciones estadísticas usando las temperaturas superficiales del mar, como es el caso del presente estudio.

Debido a lo anterior, el objetivo de este trabajo es el de elaborar un pronóstico climático estacional en América Central basado en el ACC, usando las temperaturas superficiales del mar de los océanos circundantes al istmo, para las distintas regiones climáticas. Cabe agregar que, en América Central, anteriormente los pronósticos estacionales se hacen basándose en pocos índices (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012), lo cual puede dificultar la obtención de mejores resultados.

Normalmente en América Central las regiones climáticas han sido definidas usando métodos como el de Köeppen o Thornthwhite (Oliver, 2005), basados en temperaturas y precipitaciones, así como en la evapotranspiración potencial y el balance de vapor de agua. Fallas y Alfaro (2012) describen los principales aspectos de la climatología en América Central, de donde se resume que el ciclo anual de lluvias de la Vertiente del Pacífico se caracteriza por tener un patrón bimodal con dos máximos durante el año, uno en

¹<http://iri.columbia.edu/outreach/software/>

junio y el otro en setiembre-octubre, con un mínimo relativo entre julio y agosto (Magaña *et al.*, 1999). Dicha reducción es llamada en la región “canícula” o “veranillo”. En el artículo citado, los autores formulan una hipótesis sobre el mecanismo que origina dicho fenómeno. Mencionan que la “canícula” está relacionada con un aumento en la velocidad de los vientos alisios y por consiguiente una disminución en la actividad convectiva en la región de la piscina de agua cálida ubicada en el Océano Pacífico Tropical Este (Wang y Enfield, 2003). Dichas condiciones inducen un enfriamiento en las temperaturas superficiales del mar, que provocan a su vez un aumento en la nubosidad, inhibiendo el ingreso de radiación solar al océano; lo cual asociado al aumento en los vientos alisios y su interacción con las montañas de América Central produce un máximo de precipitación en el Caribe y un mínimo de lluvias en el Pacífico. En general, el sector Caribe recibe más lluvias que el Pacífico, como reflejo de la influencia de perturbaciones meteorológicas tropicales en el Caribe y la interacción del sistema montañoso con los vientos alisios (Taylor y Alfaro, 2005).

2. Datos y metodología

En este trabajo se utilizó el esquema propuesto por Soley (2003) y Soley y Alfaro (1999), en donde suponiendo que tenemos dos campos \mathbf{S} (predictores) y \mathbf{Z} (predictantes) de dimensiones (n_t, n_s) y (n_t, n_z) , respectivamente, con $n_s > n_z$, se busca hacer varias combinaciones lineales:

$$\mathbf{A} = \mathbf{S}\mathbf{U} \quad \mathbf{B} = \mathbf{Z}\mathbf{V}$$

que maximicen la correlación entre los dos nuevos campos:

$$\frac{1}{n_t} \mathbf{A}^T \mathbf{B} = \text{diagonal máximo}$$

con la restricción de que los componentes ortogonales de variabilidad sean ortogonales entre sí:

$$\frac{1}{n_t} \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{I} \quad \frac{1}{n_t} \mathbf{B}^T \mathbf{B} = \mathbf{I}$$

De dicha manera, \mathbf{a}_1 y \mathbf{b}_1 tienen la correlación máxima posible, mientras que \mathbf{a}_1 es ortogonal a $\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_{n_s}$ y a $\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3, \dots, \mathbf{b}_{n_z}$, y \mathbf{b}_1 es ortogonal a $\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3, \dots, \mathbf{b}_{n_z}$ y a $\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_{n_s}$. La segunda pareja, \mathbf{a}_2 y \mathbf{b}_2 , exhiben la segunda correlación máxima, y así sucesivamente. Una columna de uno de los dos campos tiene una correlación máxima con la correspondiente columna del otro campo, y es ortogonal a las otras columnas de su propio y del otro campo.

El problema de maximización se complica por las condiciones de ortogonalidad impuestas y se resuelve utilizando multiplicadores de Lagrange. Para lo que se introducen matrices normalizadas que tienen que ser ortonormales para satisfacer las condiciones de ortogonalidad de los campos \mathbf{A} y \mathbf{B} . Efectivamente:

$$\frac{1}{n_t} \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \frac{1}{n_t} \mathbf{U}^T \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{U} = \hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{C}_{SS}^{-\frac{T}{2}} \mathbf{C}_{SS} \mathbf{C}_{SS}^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{U}}^T \hat{\mathbf{U}} = \mathbf{I}$$

De la expresión anterior resulta:

$$\frac{1}{n_t} \mathbf{B}^T \mathbf{B} = \hat{\mathbf{V}}^T \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{I}$$

En términos de las matrices normalizadas, el problema de maximización es expresado como:

$$\frac{1}{n_t} \mathbf{A}^T \mathbf{B} = \frac{1}{n_t} \mathbf{U}^T \mathbf{S}^T \mathbf{Z} \mathbf{V} = \hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{C}_{SS}^{-\frac{T}{2}} \mathbf{C}_{SZ} \mathbf{C}_{ZZ}^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{V}} = \text{diagonal máximo}$$

En esta forma se observa que el problema equivale a la descomposición en valores singulares de la matriz (Soley y Alfaro, 1999)

$$\mathbf{C}_{SS}^{-\frac{T}{2}} \mathbf{C}_{SZ} \mathbf{C}_{ZZ}^{-\frac{1}{2}}$$

en donde las matrices normalizadas $\hat{\mathbf{U}}$ y $\hat{\mathbf{V}}$ equivalen a los campos de la izquierda y de la derecha respectivamente.

$$\mathbf{C}_{SS}^{-\frac{T}{2}} \mathbf{C}_{SZ} \mathbf{C}_{ZZ}^{-\frac{1}{2}} = \hat{\mathbf{U}} \mathbf{D} \hat{\mathbf{V}}^T$$

Los factores de peso \mathbf{U} y \mathbf{V} se obtienen de la definición de las matrices unitarias:

$$\mathbf{U} = \mathbf{C}_{SS}^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{U}} \quad \mathbf{V} = \mathbf{C}_{ZZ}^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{V}}$$

Los patrones \mathbf{P} y \mathbf{Q} permiten recobrar los datos originales a partir de los componentes ortogonales de variabilidad:

$$\mathbf{A} = \mathbf{S}\mathbf{U} = \mathbf{S}\mathbf{C}_{SS}^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{U}} \Rightarrow \mathbf{S} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{C}_{SS}^{\frac{1}{2}} = \mathbf{A}\mathbf{P} \text{ con } \mathbf{P} \equiv \hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{C}_{SS}^{-\frac{1}{2}}$$

De la misma forma se obtiene que:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{B} \hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{C}_{ZZ}^{\frac{1}{2}} = \mathbf{B}\mathbf{Q} \text{ con } \mathbf{Q} \equiv \hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{C}_{ZZ}^{-\frac{1}{2}}$$

La covarianza de los componentes ortogonales de variabilidad \mathbf{A} con el campo original \mathbf{S} está dada por la siguiente matriz:

$$\mathbf{C}_{SA} = \frac{1}{n_t} \mathbf{S}^T \mathbf{A} = \frac{1}{n_t} \mathbf{P}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{P}^T = \mathbf{C}_{SS}^{\frac{T}{2}} \hat{\mathbf{U}}$$

De igual forma:

$$\mathbf{C}_{ZB} = \frac{1}{n_t} \mathbf{Z}^T \mathbf{B} = \mathbf{Q}^T = \mathbf{C}_{ZZ}^{\frac{T}{2}} \hat{\mathbf{V}}$$

La covarianza heterogénea mide la influencia de los componentes ortogonales de variabilidad derivados de uno de los campos en el otro:

$$\mathbf{C}_{SB} = \frac{1}{n_t} \mathbf{S}^T \mathbf{B} = \frac{1}{n_t} \mathbf{P}^T \mathbf{A}^T \mathbf{B} = \mathbf{P}^T \mathbf{D} = \mathbf{C}_{SS}^{\frac{T}{2}} \hat{\mathbf{U}} \mathbf{D}$$

Igualmente

$$\mathbf{C}_{ZA} = \frac{1}{n_t} \mathbf{Z}^T \mathbf{A} = \mathbf{Q}^T \mathbf{D} = \mathbf{C}_{ZZ}^{\frac{T}{2}} \hat{\mathbf{V}} \mathbf{D}$$

En el presente estudio, el área oceánica asociada con el campo de la temperatura superficial del mar para el ACC comprende de los 60°N a los 60°S de latitud, y de los 270 a los 0°O de longitud (campo \mathbf{S}). Esta área es similar a la utilizada por Alfaro (2007a,b) y se corresponde con la base de datos de índices del IRI. Se usó la versión 2 (Smith y Reynolds, 2004), que incluye temperaturas superficiales del mar globales reconstruidas de forma mejorada y extendida, basadas en datos del Proyecto Internacional Comprensivo de Datos Atmosféricos y Oceánicos (COADS por sus siglas en inglés) (Woodruff *et al.*, 1999). En forma similar a Fallas y Alfaro (2012), para cada uno de los períodos, se utilizaron las temperaturas superficiales del mar del trimestre anterior, siendo la excepción el período de febrero y marzo, en que se emplearon las mismas temperaturas usadas para el trimestre de diciembre y enero (setiembre, octubre y noviembre), debido a que los Foros Regionales de Perspectivas Climáticas precisamente se realizan a finales de noviembre para pronosticar dicho período (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012).

Por su parte para el campo \mathbf{Z} se utilizaron en este trabajo los mismos datos de precipitación de la base NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI-UCR) (Fallas y Alfaro, 2012; Soley, 2005), en donde sólo se utilizaron datos de 146 estaciones meteorológicas de Mesoamérica y se escogió el período de 30 años en que faltaban menos datos, que resultó ser el de 1971 a 2000.

En la evaluación de dichos modelos se utilizaron el índice de correlación de Pearson, índice de correlación de Spearman, Índice de Acierto y el error lineal en el espacio de las probabilidades (LEPS, siglas

en inglés). A continuación se hace una pequeña referencia de cada índice, según el manual de ayuda del software del CPT² (más detalles en Wilks, 1995):

Índice de Correlación de Pearson: Describe la intensidad de la asociación lineal entre los pronósticos y las observaciones.

Índice de Correlación de Spearman: Describe la intensidad de la asociación monotónica entre los pronósticos y las observaciones.

Índice de Acierto: Define el porcentaje de veces que la categoría de pronóstico corresponde con la categoría observada.

LEPS: Calcula un índice habilidad o calidad de un sistema de predicción, definido usando una tabla de conteo que da diferentes valores para los aciertos dependiendo de las categorías observadas y con las probabilidades previas de las categorías. Este indicador de calidad penaliza más los errores de acierto por 2 o más categorías.

3. Resultados y análisis

A continuación se muestran las figuras con los modos canónicos correspondientes para precipitación. Cada modo canónico muestra en las siguientes figuras, a la izquierda, el patrón de temperaturas superficiales del mar (variable independiente, campo **S**) que traería consigo lluvias por encima (colores amarillos, naranjas o rojos) o por debajo (celestes o azules) de los valores promedios en las estaciones utilizadas (variable dependiente, campo **Z**). Dichos patrones en las estaciones se muestran en los gráficos de la derecha. En medio de dichos cuadros se encuentra otro gráfico, que muestra los valores del modo con respecto al tiempo.

Para saber cuántos modos de correlación canónica se retenían en el modelo se usó un “scree test”, al igual que en el caso de las componentes principales. El criterio aplicado en este caso es usar un eje logarítmico, y el punto en que se forme un “codo” en el “scree test” de la variable independiente o dependiente delimitará la cantidad de modos a utilizar, puesto que la varianza explicada por los modos restantes ya no cambia mucho entre ellos sucesivamente. Sin embargo, si el modo posterior al “codo” en el “scree test” tiene una correlación canónica superior a 0.5, se sugiere que en dicho caso sea el criterio de experto el que decida si éste se conserva o no (generalmente se incluye este modo debido a la alta correlación). Como un ejemplo, luego de presentar los modos canónicos, se observan unos “scree test” correspondientes al trimestre MJJ (Figura 1b). Luego de dicha figura se muestra el índice de Correlación de Pearson, índice de Correlación de Spearman, índice de Acierto y finalmente el LEPS, para cada período de estudio (MJJ, ASO, DE y FM). Las tendencias no fueron eliminadas del análisis como fuente de variabilidad (Alfaro *et al.*, 2006).

La figura 1 muestra inicialmente los modos canónicos usados para la precipitación del trimestre de MJJ, así como los “scree plot” correspondientes. Se nota cómo en el momento en que se forma un “codo” en alguno de dichos gráficos, la herramienta detiene el cálculo de más modos canónicos (figura 1b, derecha). Luego en los estadísticos de la figura 2 se muestra que los valores de las correlaciones, así como el índice LEPS y de acierto, no son muy altos.

En la figura 1a se muestra que el primer modo parece estar relacionado con una condición de tendencia en la serie, mientras que el segundo modo muestra que una configuración con un PDO positivo (negativo), condiciones Niño (Niña) y un Atlántico cálido (frío), produce lluvias por encima (debajo) de las normales al norte de América Central, especialmente sobre Honduras y menos (más) lluvias al sur de la región (Panamá).

²<http://iri.columbia.edu/outreach/software/>

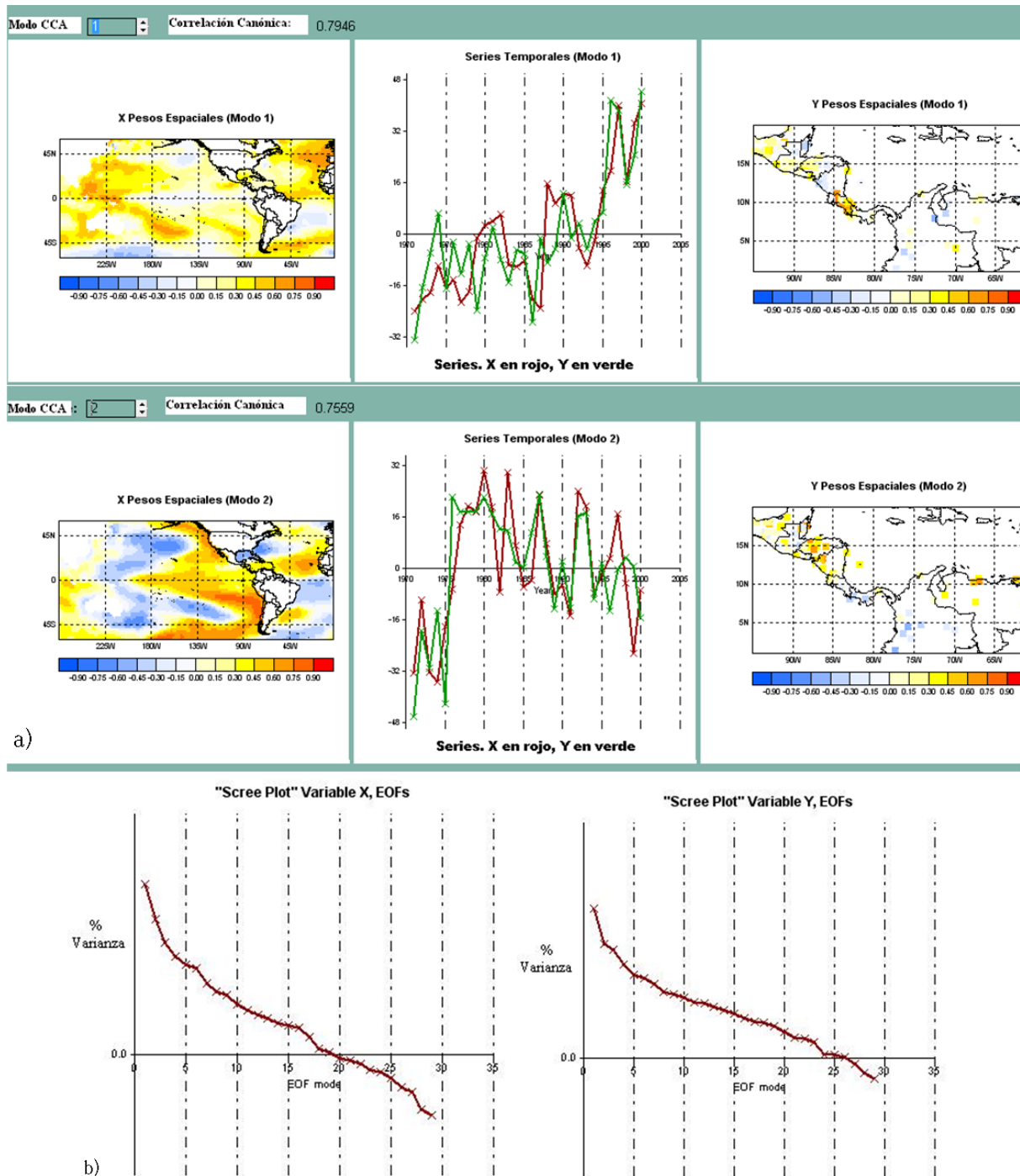


Fig. 1: a) Modos canónicos para la precipitación del trimestre de Mayo, Junio y Julio. b) "Scree plot" para la precipitación del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

En este período los índices (figura 2) de correlación de Pearson no muestran un patrón bien definido, mientras que la correlación de Spearman muestra valores positivos al sur de la región y negativos al norte. Los índices de acierto son bajos sobre toda la región, mientras que el índice LEPS muestra valores positivos sobre casi todo América Central, siendo más fuertes al sur de la misma.

Los mejores resultados fueron para el trimestre de ASO, donde se obtuvieron 2 modos como se observa en la figura 3, de los cuales el primero muestra que bajo condiciones de Niña (Niño) y un Atlántico cálido (frío), las lluvias superan (son inferiores) a los valores normales sobre prácticamente toda la región, pero especialmente del lado Pacífico de América Central. El segundo modo parece corresponder a tendencia

en las series. Los índices de acierto, LEPS, así como las correlaciones de Pearson y Spearman, obtuvieron los valores más altos entre los períodos analizados (figura 4). Las correlaciones de Pearson y Spearman muestran valores positivos sobre todo el Pacífico y negativos sobre Costa Rica en su Vertiente Caribe. El índice de acierto muestra valores más altos en el Pacífico, mientras que en el resto de la región no son tan bajos como los obtenidos para MJJ. El índice LEPS presenta valores positivos sobre toda América Central, pero mayores sobre Nicaragua y el sur de Honduras.

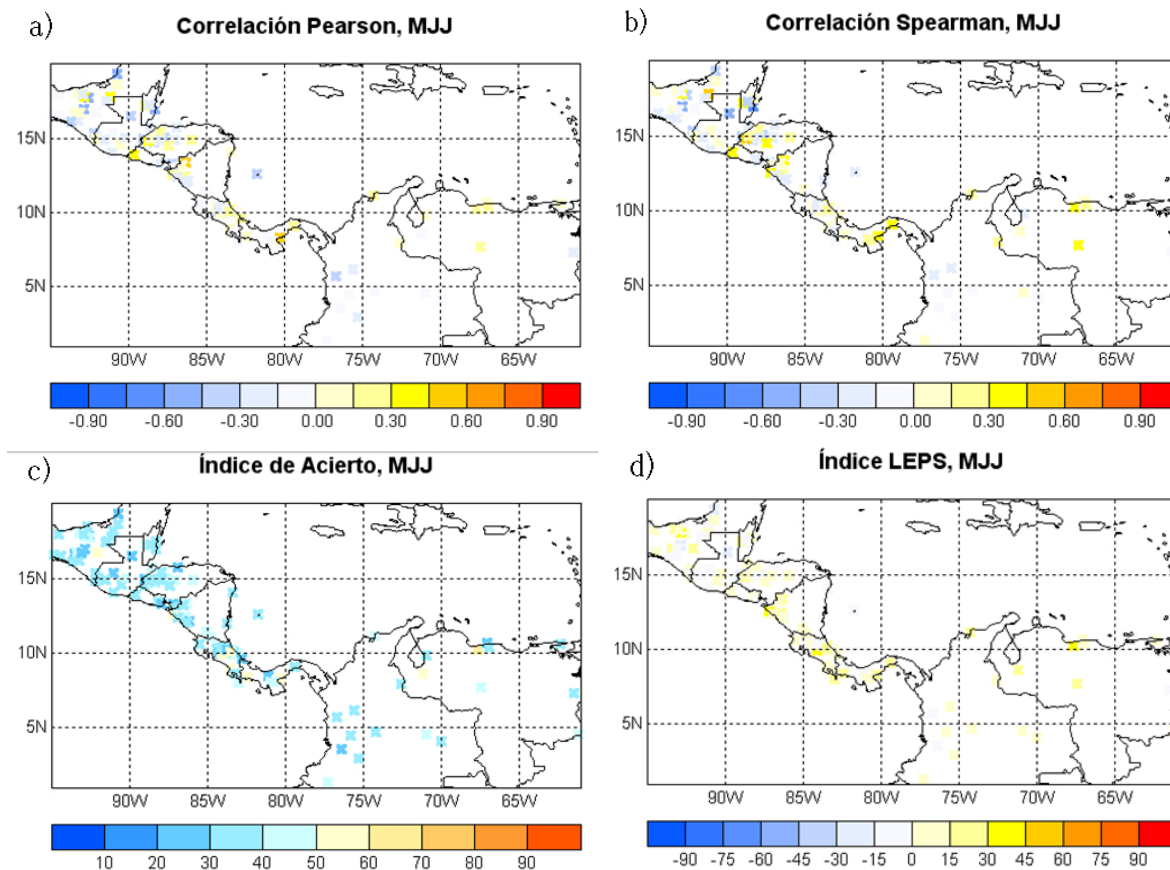


Fig. 2: Correlación de Pearson (a), Correlación de Spearman (b), Índice de Acierto (c) e Índice LEPS (d) para la precipitación del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

Para el bimestre de DE se obtuvieron 3 modos canónicos (figura 5). Los estadísticos correspondieron a los más bajos en términos generales (figura 6), mostrando una dificultad mayor para pronosticar.

El primero de dichos modos corresponde a un Atlántico cálido (frío) que trae consigo lluvias superiores (inferiores) a las normales para la región sur de América Central y menores (mayores) en el resto de la misma. Dicho resultado no coincide con lo obtenido por Enfield y Alfaro (1999), que determinaron un patrón más homogéneo de aumento de las lluvias sobre toda la región. El segundo modo corresponde a tendencia en las series. El modo tres indica que bajo condiciones de Niño (Niña) y un Atlántico frío (cálido), las lluvias son ligeramente mayores (inferiores) al norte de la región, y menores (mayores) al sur de la misma.

En el caso de la correlación de Pearson se presentan valores cercanos a cero sobre toda la región con algunos valores negativos sobre Panamá y costa Pacífica de Costa Rica y Nicaragua. Algo similar sucede con el de Spearman, pero se muestran valores positivos sobre el norte de la región y Costa Rica, y valores negativos en la costa Caribe de Honduras, Pacífico de Nicaragua y Panamá. El índice de acierto muestra valores bajos sobre toda la región, mientras que el índice LEPS presenta en su mayoría valores cercanos a cero sobre toda América Central.

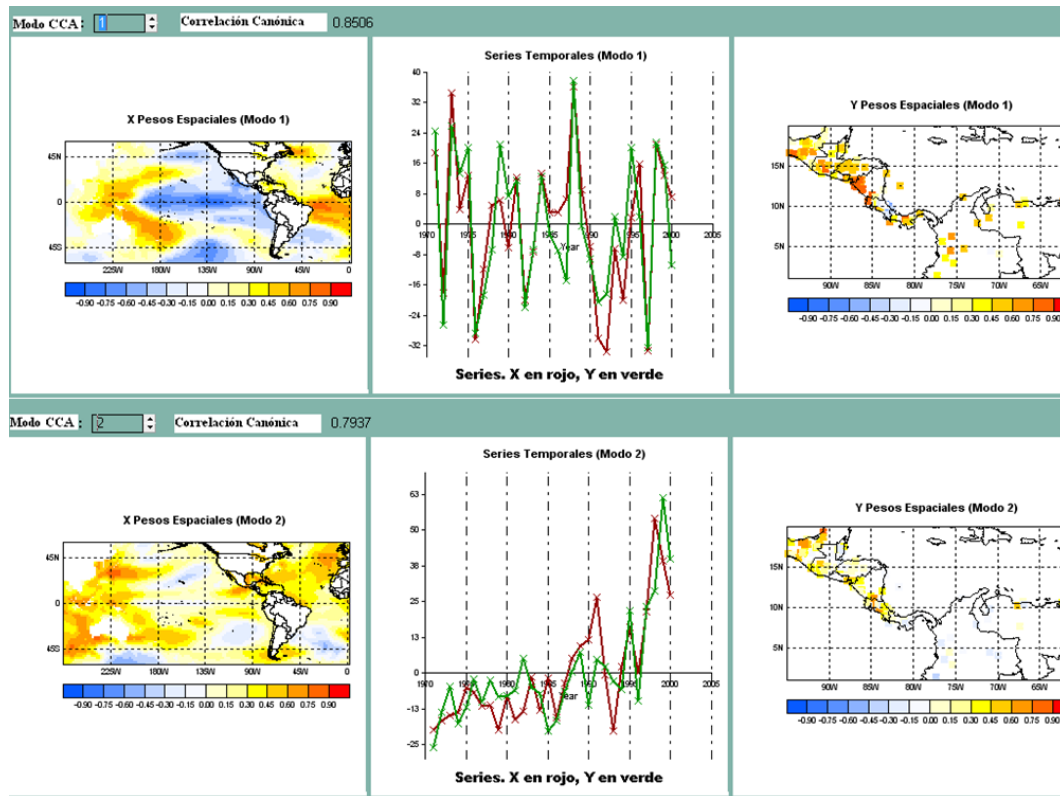


Fig. 3: Modos canónicos para la precipitación del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

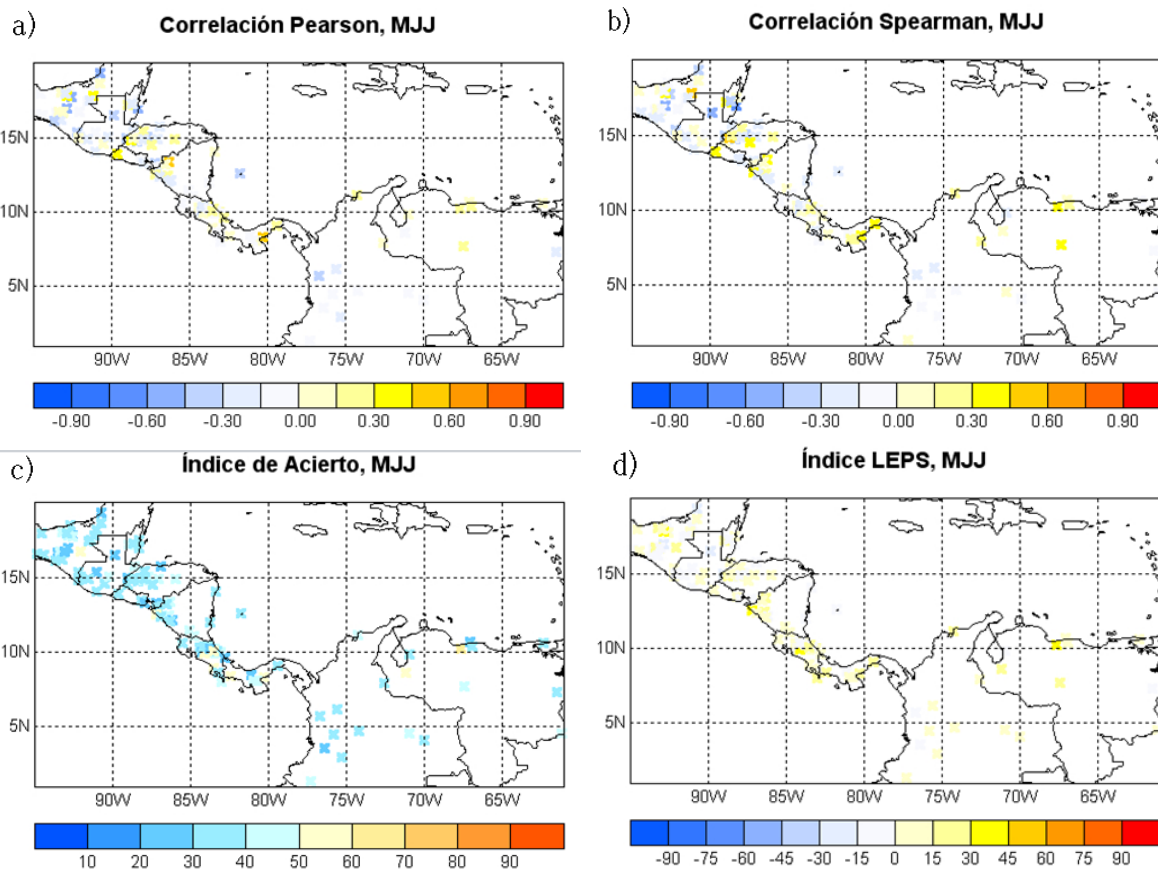


Fig. 4: Correlación de Pearson, (a) Correlación de Spearman (b), Índice de Acierto (c) e Índice LEPS (d) para la precipitación del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

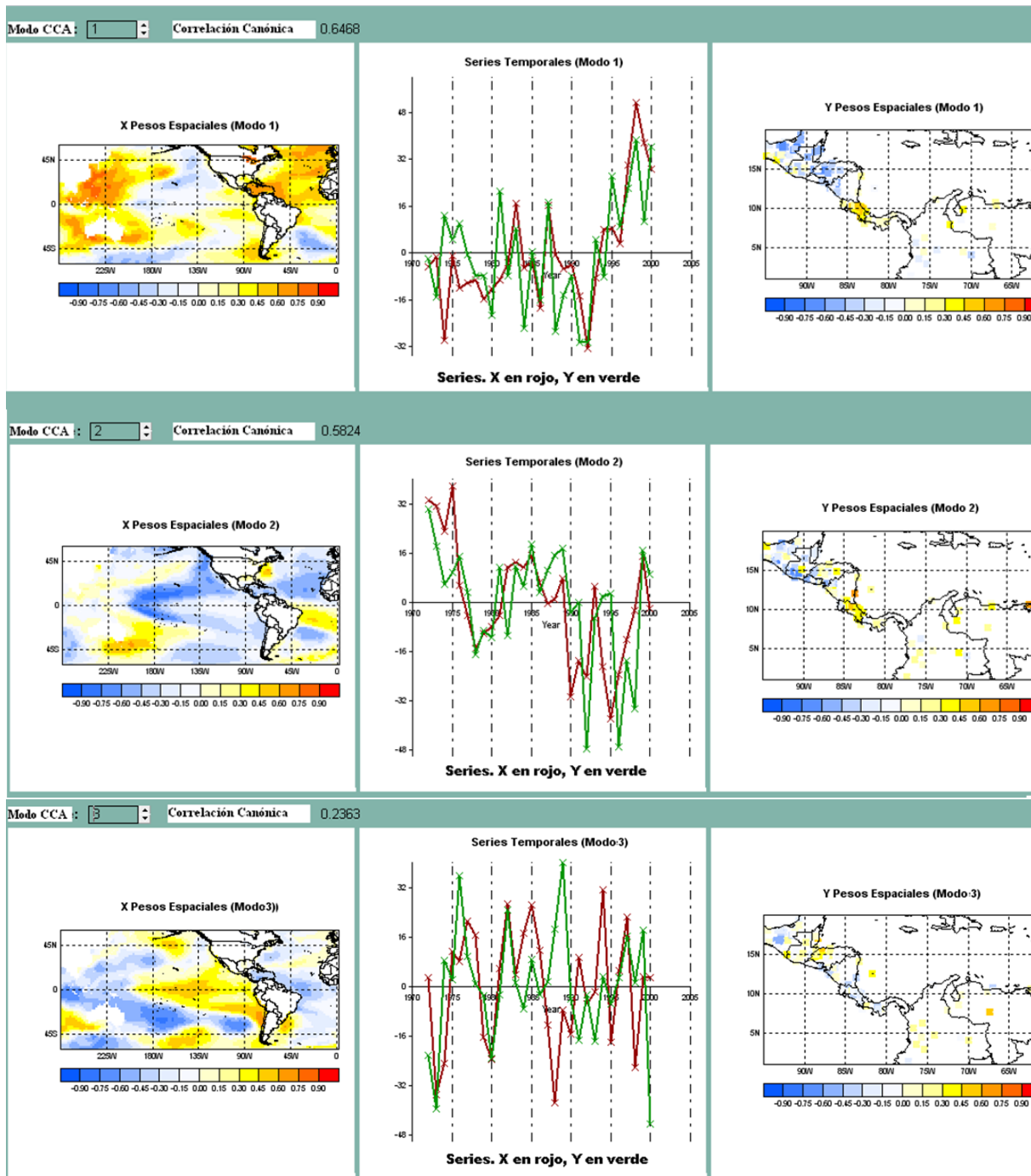


Fig. 5: Modos canónicos para la precipitación del bimestre Diciembre y Enero.

Evaluando el CPT para el bimestre de febrero y marzo, se muestra en la figura 7 que el primer modo está asociado a un patrón en el cual las condiciones de Niña (Niño), más una PDO fría (cálida) y un Atlántico cálido (frío), producen lluvias por encima de las normales sobre prácticamente toda la región, siendo la excepción el Pacífico de Guatemala y El Salvador. En el segundo modo, solo una PDO fría (cálida) parece mostrar condiciones de lluvias por debajo (encima) de las normales sobre todo el Caribe de la región. El tercer modo corresponde a la tendencia en las series, mientras que el cuarto modo muestra un patrón difícil de explicar, lo que está relacionado con que conforme aumenta el número de modos la identificación con patrones espaciales definidos se dificulta, ya que están más desorganizados.

Evaluando los estadísticos (figura 8) para el bimestre de febrero y marzo, se nota que mejoraron con respecto al bimestre anterior. La correlación de Pearson mantiene valores cercanos a cero, con algunos

valores positivos sobre buena parte de la región. En el caso de Spearman son similares a los de Pearson, solo que se presentan valores positivos más definidos sobre Honduras y el sur de América Central. En el caso del índice de acierto, los valores son bajos sobre toda la región, y en el caso del LEPS, todos los valores son positivos y más altos sobre el Pacífico de Costa Rica.

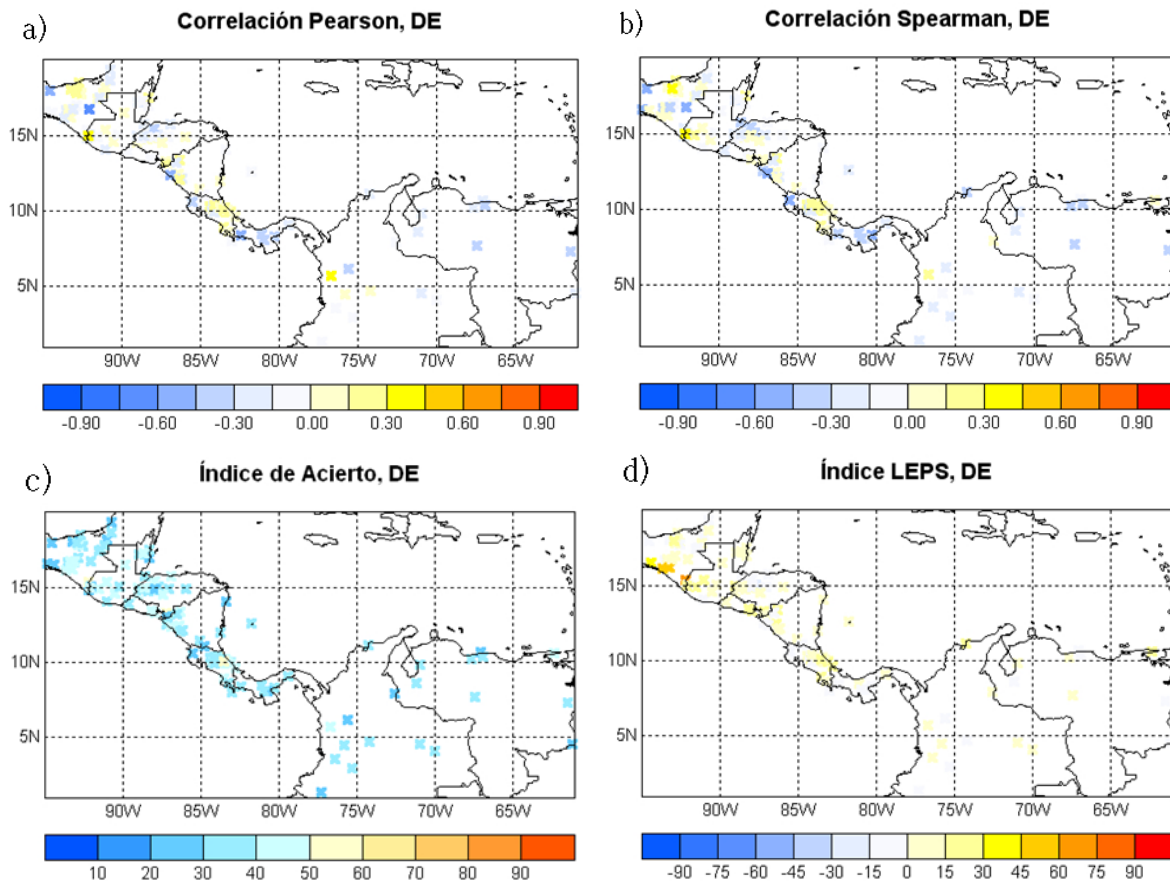


Fig. 6: Correlación de Pearson (a), Correlación de Spearman (b), Índice de Acierto (c) e Índice LEPS (d) para la precipitación del bimestre de Diciembre y Enero.

En términos generales, en los resultados anteriores se observa que los mejores están asociados al trimestre de ASO, ya que se presentan valores más altos del Índice de acierto, LEPS, Pearson y Spearman. Resultado similar obtuvo Alfaro (2007a), al usar correlación canónica para predecir los trimestres de MJJ y ASO. En el presente estudio, al igual que lo obtenido por García (2009), los índices de más peso con la precipitación en el análisis canónico fueron los asociados al Atlántico y al Pacífico Ecuatorial. Sin embargo la PDO también dio buenos resultados en el presente análisis sobre todo América Central.

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos los mejores fueron para el trimestre de ASO. Se obtuvieron 2 modos, de los cuales el primero muestra que bajo condiciones de Niña (Niño) y un Atlántico cálido (frío), las lluvias superan (son inferiores) a los valores normales sobre prácticamente toda la región, pero especialmente del lado Pacífico de América Central. El segundo modo parece corresponder a tendencia en las series. Los índices de acierto, LEPS, así como las correlaciones de Pearson y Spearman, obtuvieron los valores más altos entre los períodos analizados.

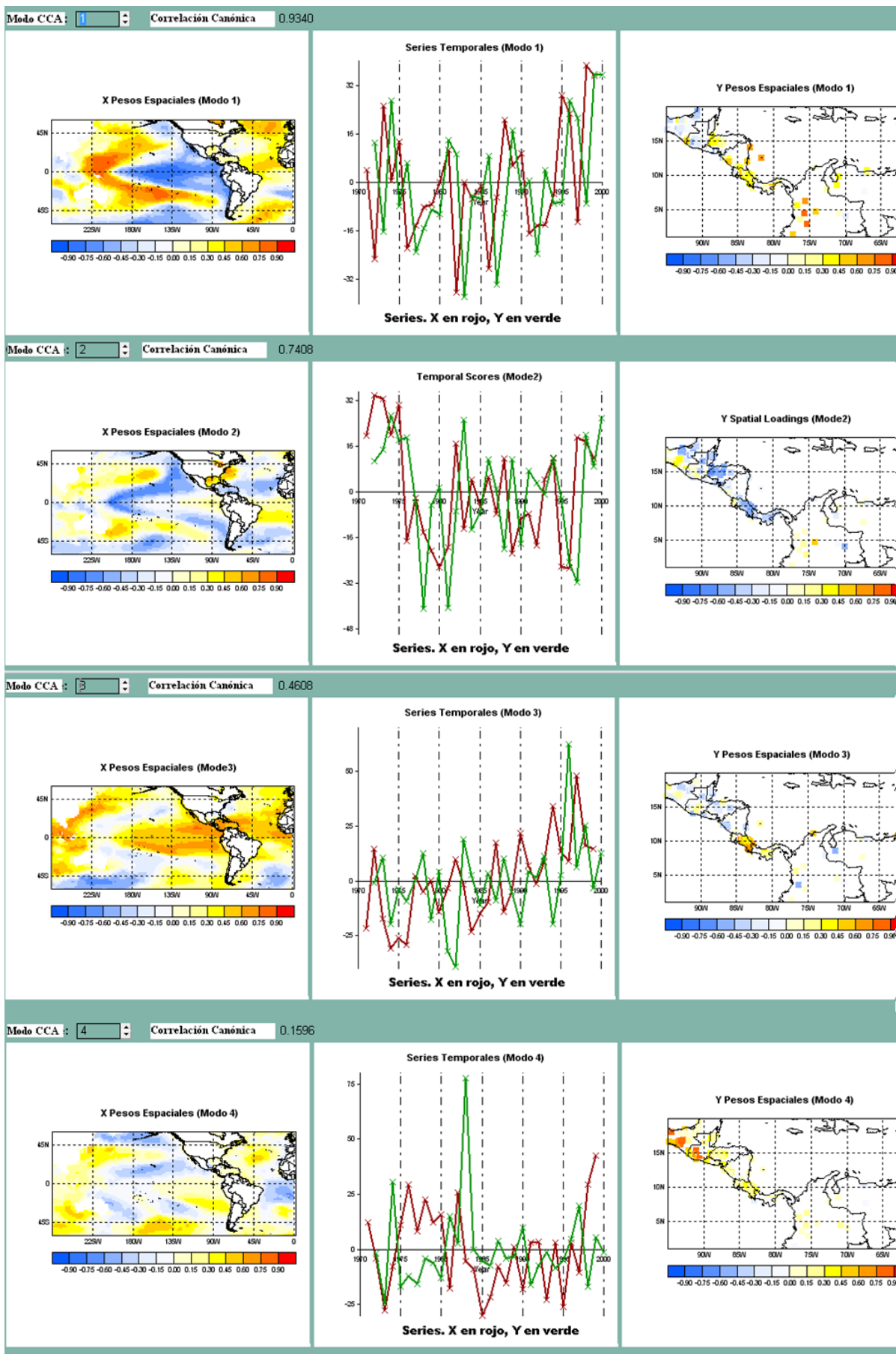


Fig. 7: Modos canónicos para la precipitación del bimestre Febrero y Marzo.

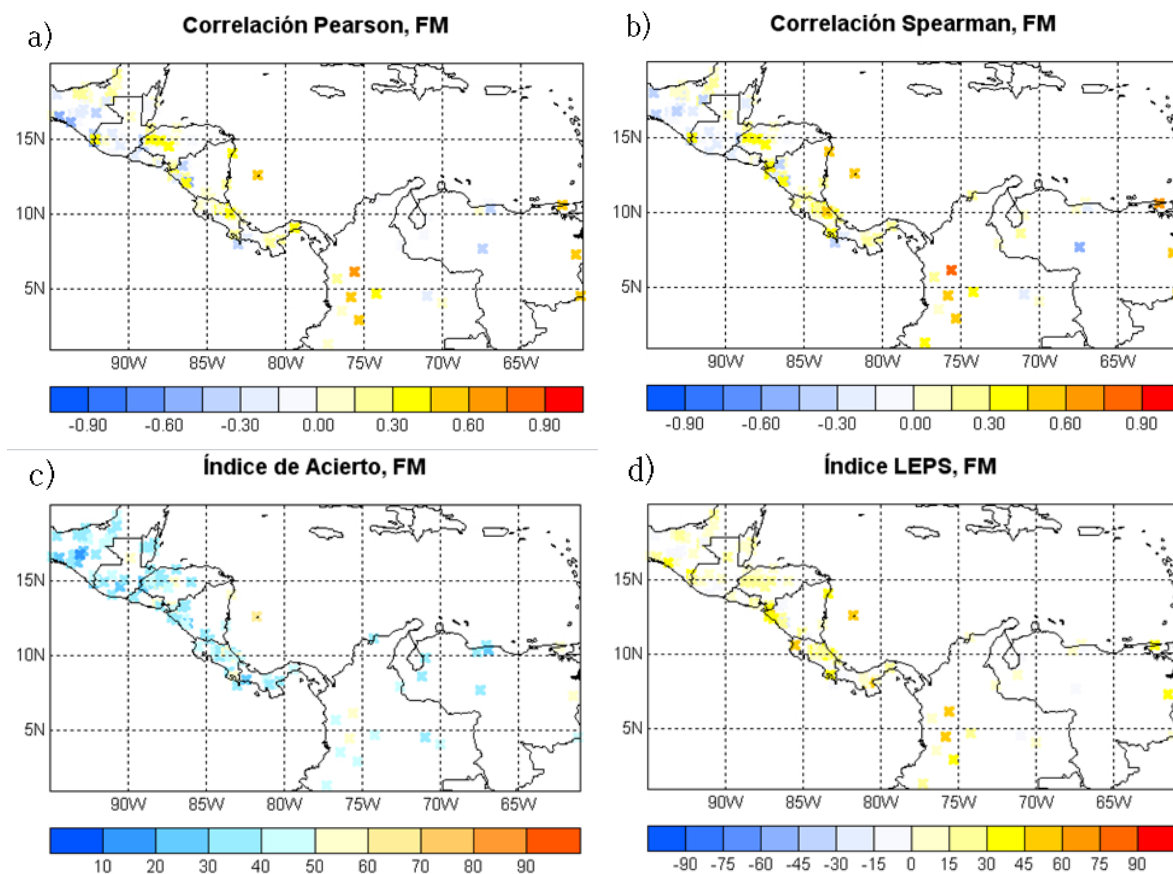


Fig. 8: Correlación de Pearson (a), Correlación de Spearman (b), Índice de Acierto (c) e Índice LEPS (d) para la precipitación del bimestre de Febrero y Marzo.

Por último, los resultados de pronóstico usando el ACC mostraron una alternativa en la cual se tiene mayor información de cada estación, ya que se pueden evaluar distintos estadísticos para cada estación de forma individual, por lo que se puede aplicar una prueba de significancia en la correlación de los modos (Alfaro 2007a, b), producto de la herramienta CPT, lo que es bastante útil para dar una mejor interpretación a los mismos.

Agradecimientos

Se agradece a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de América Central por el suministro de los registros de las estaciones meteorológicas para realizar este estudio. Este trabajo se realizó también gracias al apoyo de los siguientes proyectos de la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica: 805-B0-402 (apoyo de CORBANA), 805-A8- 606 (apoyo de Florida Ice & Farm CO.), 805-A9-532 (apoyo de ASDI-CSUCA), 805-A7- 002 (apoyo de CRN2050-IAI). A la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica, ya que este trabajo se enmarcó dentro de la Tesis de Licenciatura en Meteorología de BF.

Bibliografía

Alfaro E, 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. *J. Climate*, 19:1407-1421.

Alfaro E (2007a): Uso del análisis de correlación canónica para la predicción de la precipitación pluvial en Centroamérica. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 9:33-48.

- Alfaro E (2007b): Predicción Climática de la Temperatura Superficial del Aire en Centroamérica. *Am-bientico*, 165:6-10.
- Amador J, Alfaro E (2009): Métodos de reducción de escala: Aplicaciones al clima, variabilidad y cambio climático. *Revista REVIBEC*, 11:39-52.
- Donoso M, Ramírez P (2001): Latin America and the Caribbean: Report on the Climate Outlook Forums for Mesoamerica. In: *Coping with the climate: A step Forward*. Workshop Report "A multi-stakeholder review of Regional Climate Outlook Forums", October 16-20 (2000), Pretoria, South Africa. Publication IRI-CW/01/1, pp. 11-18.
- Enfield D, Alfaro E (1999): The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *J. Climate*, 12:2093-2103.
- Fallas B, Alfaro E (2012): Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista de Climatología*, 12:61-79.
- García L (2009): Régimen de lluvia y caudales en El Salvador; su relación con la variabilidad climática (forzantes oceánicos-atmosféricos) para la construcción de mapas de amenazas por déficit o exceso de lluvias. Tesis de Maestría en Hidrología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 220 pp.
- García-Solera I, Ramírez P (2012): Central America's Seasonal Climate Outlook Forum. The Climate Services Partnership, 8 pp. <http://climate-services.org/resource/central-american-climate-outlook-forum>
- Hotelling H (1936): Relations between two sets of variates. *Biometrika*, 28:139-142.
- Magaña V, Amador JA, Medina S (1999): The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Climate*, 12:1577-1588.
- Ndiaye O, Mason S (2007): Climate Predictability Tool. Documento Técnico, International Research Institute for Climate and Society, The Earth Institute of Columbia University. <http://portal.iri.columbia.edu> (última visita: 12-9-2012).
- Oliver JE (2005): Climate Classification. In: *Encyclopedia of World Climatology* (Oliver JE, Ed.), Springer, Netherlands, pp. 218-227.
- Smith TM, Reynolds RW (2004): Improved Extended Reconstruction of SST 1854-1997. *J. Climate*, 17:2466-2477.
- Soley FJ, Alfaro EJ (1999): Aplicación de Análisis Multivariado al Campo de Anomalías de Precipitación en Centroamérica. *Tóp. Meteor. Oceanogr.*, 6:1-23.
- Soley FJ (2003): Análisis en Componentes Principales. Documento Técnico. SP-5906, Métodos Digitales de Análisis de Secuencias Temporales. Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera. Sistema de Estudios de Posgrado Universidad de Costa Rica (<http://fjsoley.com>).
- Soley FJ (2005): Estado de la base de datos NUMEROSA, en Informe técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Taylor M, Alfaro E (2005): Climate of Central America and the Caribbean. In: *Encyclopedia of World Climatology*, Oliver JE (ed.), Springer, Netherlands, pp. 183-189.
- Wang C, Enfield DB (2003): A further study of the tropical Western Hemisphere warm pool. *J. Climate*, 16:1476-1493.
- Wilks DS (1995): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 373 pp.
- Woodruff SD, Lubker SJ, Wolter K, Worley SJ, Elms JD (1999): Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS), Release 1a: 1980-92. *Earth System Monitor*, 4:1-8.

