

# Predicción estacional de las temperaturas máximas y mínimas en América Central

BERNY FALLAS LÓPEZ<sup>1</sup>  
ERIC J. ALFARO<sup>2</sup>

## Resumen

Se utilizaron las técnicas estadísticas del análisis de tablas de contingencia y el análisis de correlación canónica para elaborar esquemas predictivos de los campos de temperatura máxima y mínima en América Central. Como primer paso, se produjeron índices de estos campos utilizando el análisis de componentes principales a partir de los registros de 146 estaciones con datos diarios, en los cuales se obtuvo un índice para la temperatura máxima y otro para la mínima. Además se obtuvieron sendos índices para pronosticar los campos de las temperaturas máximas y mínimas. Debido a que uno de los objetivos del estudio es el de apoyar el proceso de los Foros Regionales de Predicción Climática, los esquemas predictivos utilizaron los trimestres de Mayo-Junio-Julio, Agosto-Setiembre-Octubre y el cuatrimestre de Diciembre-Enero-Febrero-Marzo como periodos a predecir de los predictantes, es decir, de las temperaturas máximas y mínimas. Como predictores se utilizaron diferentes índices asociados con fuentes de variabilidad climática, que influyen los patrones climáticos de América Central, como Niño 3 y NAO, esto para el bimestre anterior y transanterior al del predictante, también se formaron nuevos índices a partir de la combinación lineal de varios de ellos. Se encontraron esquemas predictivos útiles para todas las relaciones señaladas anteriormente y se observó que gran parte de la variabilidad de las temperaturas mínimas y máximas en América Central, se pueden explicar con índices de variabilidad climática interanual como el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y de variabilidad multidecadal como el de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés).

**PALABRAS CLAVE:** COMPONENTES PRINCIPALES, AMÉRICA CENTRAL, TABLA DE CONTINGENCIA, ANÁLISIS DE CORRELACIÓN CANÓNICA, ÍNDICES CLIMÁTICOS, VARIABILIDAD CLIMÁTICA.

## Abstract

The statistical technique of contingency table analysis and canonical correlation analysis were used to produce predictive schemes associated with maximum and minimum temperatures in Central America. As a first step, principal component analysis was used to produce indices using 146 daily station records. One index was obtained for both, maximum and minimum temperatures. Keeping in mind that one of the work objectives is to support the Regional Climate Outlook Forums process, the predictive schemes used the trimesters of May-June-July, August-September-October and the four month period of December-January-February-March as targets for predictions of maximum and minimum temperatures. Different climate indices like Niño 3 and NAO were used as predictors, associated with several climate variability sources that influence the climate patterns in Central America, using one or two bimester previous to the predicted season. Linear combination of climate indices was also used to create new ones. Useful predictive schemes were found for practically all the relationships mentioned previously, noticing that most of the Central America climate variability could be explained by the El Niño (La Niña) (e.g. interannual variability) and the Atlantic (AMO, mainly, e.g. multidecadal variability) indices.

**KEYWORDS:** PRINCIPAL COMPONENTS, CENTRAL AMERICA, CONTINGENCY TABLE, CANONICAL CORRELATION ANALYSIS, CLIMATE ÍNDICES, CLIMATE VARIABILITY.

- 1 Licdo. en Meteorología. Departamento de Hidrología, Estudios Básicos de Ingeniería (EBI), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). San José. Costa Rica. Correo electrónico: [bfallasl@ice.go.cr](mailto:bfallasl@ice.go.cr). Tel. 2000-7895.
- 2 Dr. en Oceanografía. Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Escuela de Física y Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: [erick.alfaro@ucr.ac.cr](mailto:erick.alfaro@ucr.ac.cr). Tel. 2511-5096.

## 1. Introducción

El ciclo anual de la temperatura superficial del aire en Centroamérica se puede clasificar como tropical y predominantemente marítimo, con cambios anuales pequeños y dependientes de la cobertura nubosa y la altitud (Alfaro, 2000). En ese trabajo, con un enfoque de predicción estacional, el autor utilizó 337 puntos de una rejilla ( $0.5^\circ$  de latitud x  $0.5^\circ$  de longitud) sobre el istmo centroamericano, de un conjunto de datos mensuales de temperatura superficial del aire, para ajustar modelos de regresión lineal múltiple entre las primeras componentes principales de este campo (variables dependientes) y diversos índices de temperatura superficial del mar (variables independientes). Se pudieron ajustar modelos predictivos para todas las primeras componentes principales de las cuatro estaciones del año. Estos modelos mostraron que la principal influencia sobre la región, al compararla con los otros índices, la ejerce el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), pues presentó correlaciones positivas con todas las estaciones climáticas del año de la temperatura superficial, lo cual refleja una transferencia de calor sensible y latente desde el océano a la atmósfera suprayacente.

Posteriormente, con el fin de explorar la influencia de los océanos tropicales sobre las Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (ATSM) de la costa pacífica centroamericana, Alfaro y Lizano (2001) ajustaron un modelo de función de transferencia a las series de ATSM de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo, Panamá y Quepos, usando como variables independientes los índices Niño 3.4, Atlántico Tropical Norte y Sur. Estos investigadores concluyeron que la principal influencia sobre la región, al compararla con los otros índices, la ejerce el índice Niño 3.4 pues mostró correlaciones positivas con todas las series de ATSM, lo cual refleja una influencia de este índice sobre la profundidad relativa de la termoclina frente a la costa del Pacífico centroamericano.

Alfaro (2007) usó un modelo basado en el Análisis de Correlación Canónica (ACC), para explorar las asociaciones climáticas y la predictibilidad de marzo-abril-mayo como el trimestre correspondiente al máximo del ciclo anual de la temperatura superficial del aire, del campo empleado en Alfaro (2000), pero usando como variables predictoras las temperaturas superficiales del mar en los océanos Atlántico y Pacífico de 1958 a 1998 (41 años). El primer modo del modelo, mostró una correlación significativa con el índice Niño 3, en donde se notó que anomalías positivas (negativas) de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico Ecuatorial Este, están asociadas con anomalías positivas (negativas) de la temperatura superficial sobre prácticamente todo el istmo centroamericano.

Contar con una predicción estacional de temperatura es muy útil, ya que Hidalgo, Amador, Alfaro y Quesada (2013) demostraron que, junto con la radiación solar, este es un factor clave para la estimación a futuro de la evapotranspiración, además de que lo hace importante también para realizar clasificaciones climáticas. Debido a lo anterior, en este trabajo se hizo uso de las relaciones presentes entre las componentes principales, obtenidas de los campos de temperatura máxima/mínima y diferentes índices climáticos, para evaluar qué índices son los mejores para realizar los pronósticos estacionales según la época del año. Adicionalmente, se plantea el 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 los distintas temporadas climáticas utilizadas en los foros regionales de América Central (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012).

## 2. Metodología

En el presente estudio se utilizaron datos de temperaturas máximas y mínimas diarias de la

base NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI-UCR), mismas que fueron explicadas en detalle en Fallas-López y Alfaro (2012a, b), para un total de 146 estaciones luego de pasar el proceso de control de calidad y distribuidas a lo largo del istmo centroamericano. Se escogió el período de treinta años en que faltaban menos datos, el cual dio como resultado el período de 1971 al 2000. Las estaciones utilizadas presentaron menos del 30% de datos faltantes para el rango de años definido. Se utilizó la temperatura máxima y mínima en cada estación en forma separada y no la temperatura media, debido a que los aspectos que las determinan no necesariamente son los mismos, como lo mostraron Alfaro, Gershunov and Cayan (2006) al utilizar el análisis de correlación canónica para la predicción estacional de la temperatura superficial del aire en el oeste de Estados Unidos.

Para el relleno de datos faltantes, se utilizó el método expuesto por Alfaro y Soley (2009), en el cual se utilizan componentes principales de forma tal, que se complete la serie con valores consistentes con la estadística de algunas de las señales captadas y basado en la matriz de correlación en forma iterativa.

Los índices climáticos usados fueron los mismos que los utilizados por Fallas-López y Alfaro (2012a, b) a saber: Oscilación del Atlántico Norte, (NAO)<sup>3</sup>, Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)<sup>4</sup>, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)<sup>5</sup>, Niño3 (N3)<sup>6</sup>, luego se usaron combinaciones lineales de los índices anteriormente mencionados, para realizar diferencias y sumas normalizadas de los distintos índices, y así intentar realzar efectos y observar interacciones entre los océanos que

rodean la región de estudio, como: AMO-N3, AMO-(PDO+N3), AMO-PDO, AMO+PDO, PDO+N3.

Las tablas de contingencia fueron calculadas utilizando la herramienta desarrollada por Alfaro, Soley y Enfield (2003). Una vez escogidas las variables dependientes e independientes, se dividieron las dos variables en terciles, es decir, en tres categorías (normal, arriba de lo normal y abajo de lo normal), y se obtuvieron 9 categorías conjuntas. Para evaluar su significancia se utilizaron los estadísticos chi cuadrado ( $\chi^2$ ) y la correlación de Pearson para análisis categórico (Agresti, 2002).

Para los cálculos del ACC se utilizó la Herramienta de Predicción Climática<sup>7</sup> (CPT por sus siglas en inglés), que 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 (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. En forma análoga a Fallas-López y Alfaro (2012b), el área oceánica usada como campo predictor fue el de la temperatura superficial del mar, que comprende de los 60°N a los 60°S de latitud, y de los 90°E a los 0°W de longitud, obtenidos de la base de datos de índices del IRI (figura 1). Se usó la versión 2 (Smith y Reynolds, 2004) de los mismos. En la evaluación de dichos resultados se utilizaron el Índice de Correlación de Pearson, Índice de Correlación de Spearman, Índice de Acierto, el error lineal en el espacio de las probabilidades (LEPS, siglas en inglés) (Wilks, 2011).

Al igual que en Fallas-López y Alfaro (2012a, b), el presente trabajo tomó en cuenta los períodos de pronóstico utilizados por el Foro de Perspectivas

3 <http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii>

4 <http://www.cdc.noaa.gov/data/correlation/amon.us.long.data>

5 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>

6 <http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>

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

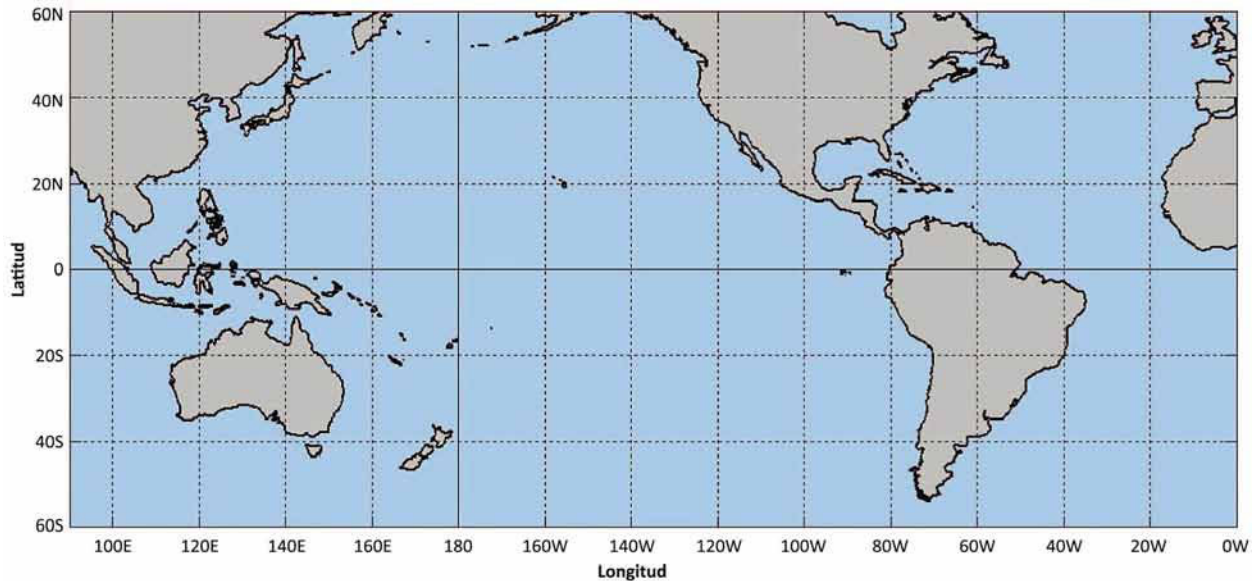


Figura 1. Área oceánica usada de la temperatura superficial del mar como campo predictor.

Climáticas de América Central (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012) para realizar los pronósticos, dichos períodos comprenden, los trimestres de Mayo, Junio y Julio (MJJ); Agosto, Setiembre y Octubre (ASO); así como el cuatrimestre de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo (DEFM). En este estudio se fraccionó este último cuatrimestre en los bimestres Diciembre-Enero (DE) y Febrero-Marzo (FM), debido a los diferentes patrones climáticos que se presentan en un bimestre u otro (Amador, Alfaro, Lizano y Magaña, 2006). Se usó el promedio del bimestre que antecedió al período del pronóstico, así como el bimestre tras anterior.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Análisis de Componentes Principales

Luego de realizar el “scree test” (Wilks, 2011), mostrado en la figura 2, se puede notar que en lo que se refiere a las temperaturas mínimas y máximas, se trabajó únicamente con una componente principal, ya que con una única componente se explicaba la mayor cantidad

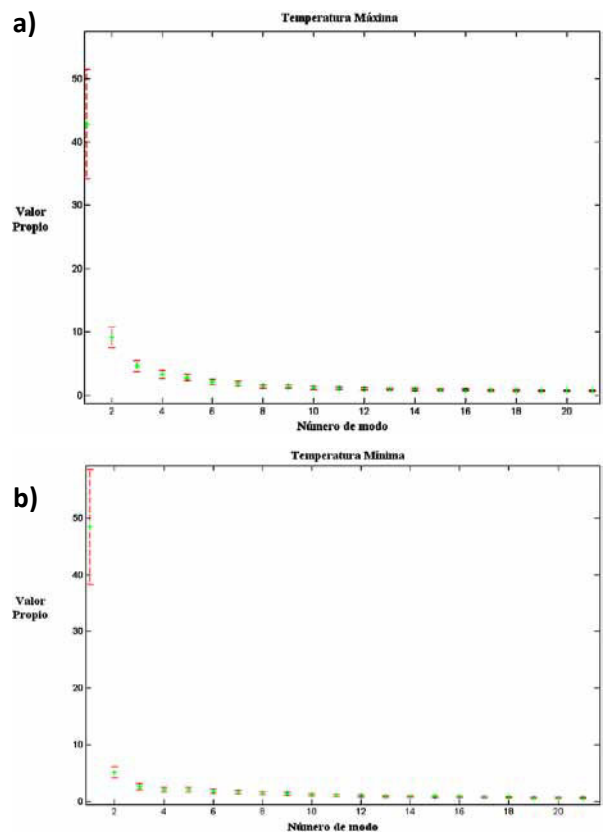


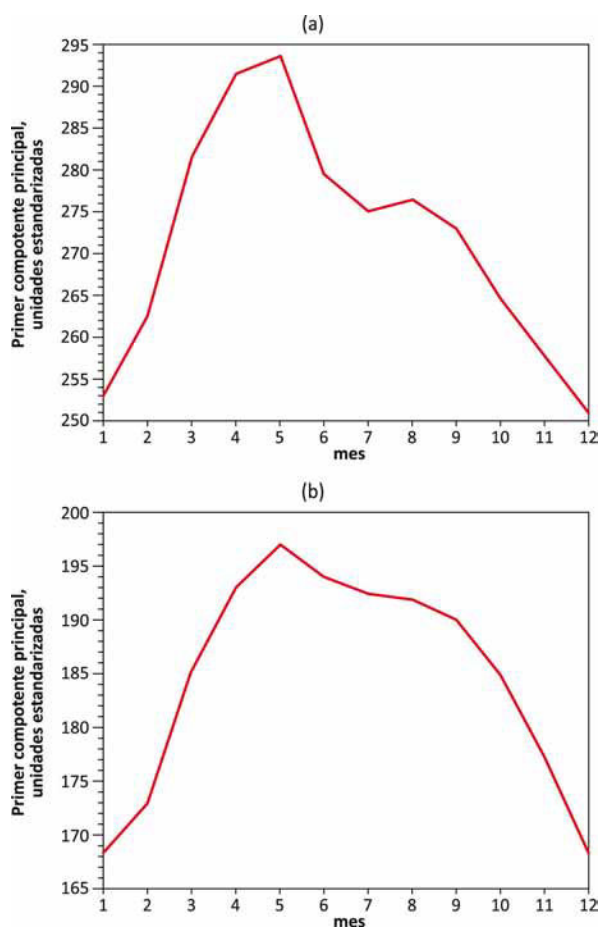
Figura 2. “Scree test” correspondiente a la (a) Temperatura Mínima y (b) Máxima, para los primeros 21 autovalores. Su error estándar, en barras verticales, se calculó de acuerdo a North et al. (1982).

de variabilidad del total de datos (49% para la máxima y 43% para la mínima).

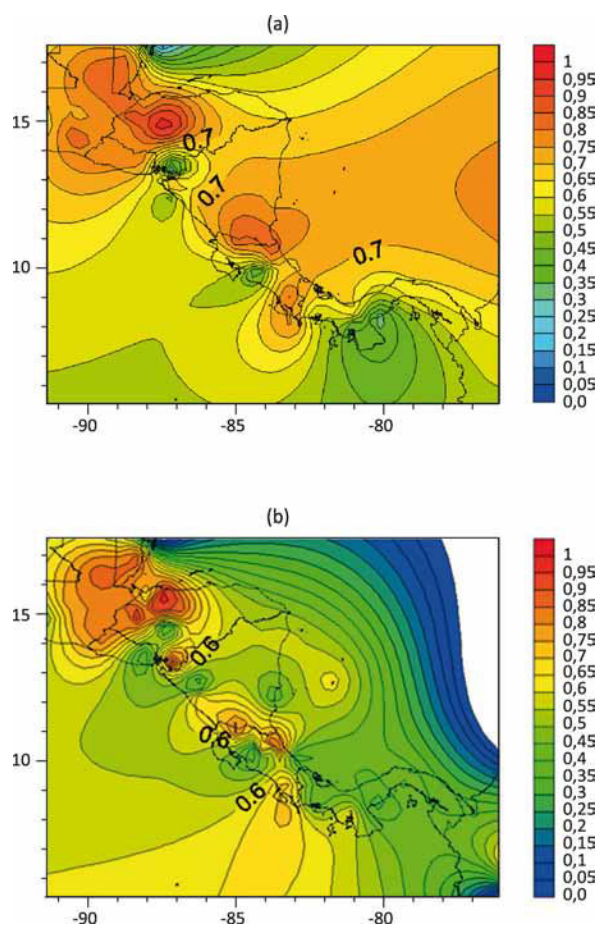
Los promedios mensuales del ciclo anual de los primeros modos ortogonales estandarizados, asociados a la temperatura máxima y mínima se muestran en la [figura 3](#), ambos con máximos en mayo y mínimos en diciembre.

En la [figura 4](#) se puede notar, que en general se presentaron correlaciones importantes sobre toda la región de las series de tiempo, de los primeros modos ortogonales con las estaciones usadas. A pesar de que se usaron sólo estaciones localizadas sobre tierra, en la figura se incluyen algunos contornos sobre el mar producto de

la metodología de interpolación, por lo que su interpretación debe considerar este aspecto. Por ejemplo, en la frontera entre Costa Rica y Nicaragua se tenían algunas estaciones, aunque quizás por la poca información disponible se obtuvieron valores altos de correlación en esa zona, mientras que en el Golfo de Fonseca y el Valle Central - Pacífico de Costa Rica, los valores fueron menores porque habían bastantes estaciones y estas zonas presentan una importante variabilidad de temperaturas. Si bien es cierto el análisis se enfoca sobre el istmo centroamericano, para la construcción de la [figura 4](#) se consideraron también estaciones en el norte de Suramérica (Colombia y Venezuela), la isla de San Andrés y el sur de México (Fallas-López, 2009).



**Figura 3.** Ciclo anual de los primeros modos ortogonales estandarizados asociados a la temperatura máxima (a) y mínima (b).



**Figura 4.** Mapa de correlación para la Componente Principal 1 de la (a) Temperatura Máxima y (b) Temperatura Mínima.

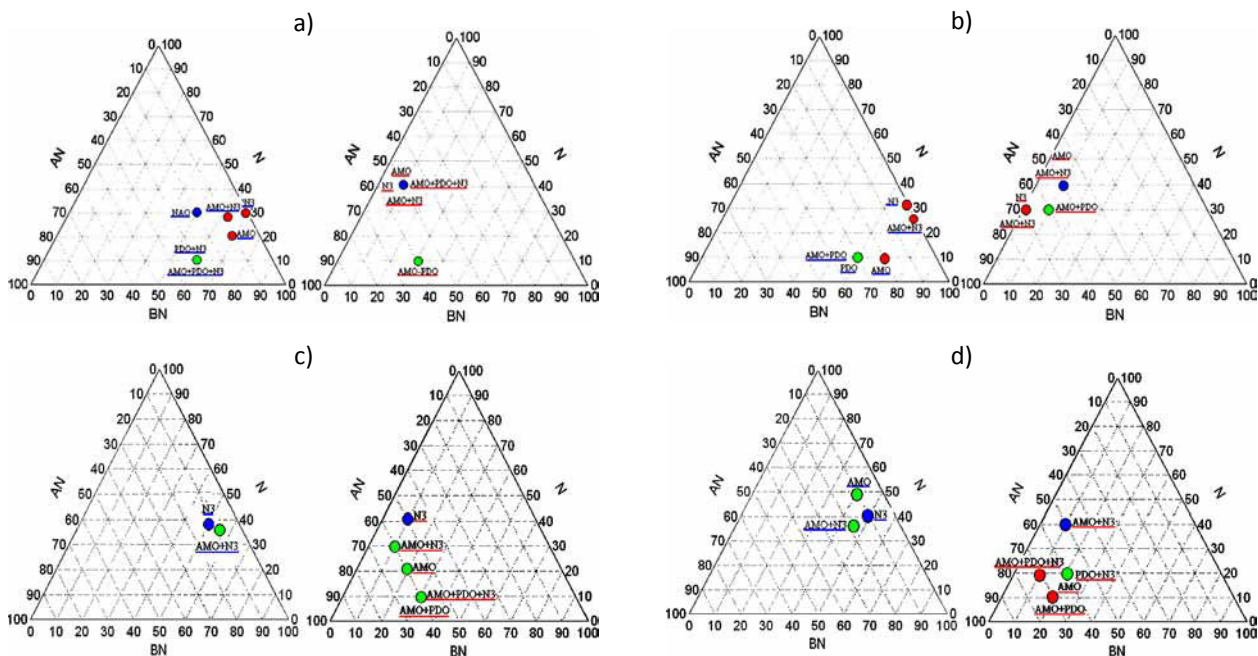
### 3.2. Análisis de contingencia

Se procedió a evaluar los resultados de las tablas de contingencia de los distintos índices y diferencias normalizadas entre ellos, luego se escogió los que presentaban probabilidades más altas de que el escenario pronosticado se cumpliera. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en gráficos de triángulos (SYSTAT, 1999) para los mejores predictores.

A pesar que el estudio fue realizado con múltiples índices, únicamente se muestran los que tenían significancias superiores al 90% y eventualmente serán mencionados los que no superan el 90%, en los casos en que ninguno de los índices exceda dicho nivel de significancia. Los gráficos de triángulos de la izquierda, corresponden a los que muestran probabilidades altas de que se presente un escenario de temperaturas por debajo de lo normal (primer tercil), mientras que los de la derecha muestran las probabilidades altas de que

se encuentren las temperaturas por encima de lo normal (tercer tercil). El color del punto indica la significancia de dicho valor, si es negro no es significativo al 90%, si es azul su significancia va del 90 al 95%, si es verde es significativo del 95% al 99% y si es rojo, es significativo a más del 99%; también se agregó una línea bajo cada índice predictor para establecer el tercil en el que se encuentra, una línea roja (azul) indica que el índice predictor se encuentra en el tercil superior (inferior).

En la [figura 5](#) se muestra cómo la temperatura mínima para el trimestre de mayo, junio y julio es influenciada principalmente por los índices AMO y N3, indistintamente de los bimestres usados para pronosticarla. Situación similar ocurre en el caso de las temperaturas máximas, que muestra dentro de los mejores pronosticadores a los índices de AMO y N3. También cabe agregar, que la PDO está presente dentro de los índices más significantes.



**Figura 5.** Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima, **c** y **d**) del período de Mayo, Junio y Julio (MJJ), usando el bimestre de Febrero y Marzo (**a**) (**c**) Marzo y Abril (**b**) (**d**). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

Al pronosticar las temperaturas mínimas de agosto, setiembre y octubre (figura 6), se observa nuevamente que los índices AMO y N3 se encuentran dentro de los mejores predictores; además en el caso del bimestre mayo y junio, el índice NAO aparece dentro de los mejores predictores, cuando éste se encuentra en fase positiva (negativa) las temperaturas mínimas son menores (mayores). De igual forma ocurre para las temperaturas máximas, donde se presentan significancias altas del AMO y N3, y también está presente el índice NAO, pero en este caso, para los meses de junio y julio, justo para la época del veranillo.

En diciembre y enero (figura 7) aparece nuevamente el índice NAO en todos los gráficos, a excepción del bimestre setiembre y octubre y su pronóstico al escenario bajo lo normal; los índices AMO y AMO+PDO con valores en el tercil bajo, pronostican también temperaturas mínimas por debajo de las normales. Con las temperaturas máximas nuevamente se observa la presencia

del índice NAO, lo cual tiene sentido debido a la presencia de masas invernales del norte que incursionan a latitudes de América Central. También se destacan los índices AMO, N3 y PDO.

En la figura 8 se muestran los índices correspondientes al mes de febrero y marzo, se nota que el índice NAO vuelve a aparecer en todos los gráficos, a excepción del correspondiente al escenario bajo lo normal del bimestre octubre y noviembre. En el caso del escenario por encima de lo normal correspondiente al bimestre de setiembre y octubre, no se muestra debido a que no superó el 90% de confianza; además hay un incremento en la presencia de índices de pronósticos relacionados con la PDO, entre ellos el índice de AMO+PDO+N3, que con valores bajo lo normal pronostica temperaturas mínimas por debajo de las normales. En el caso de las temperaturas máximas de febrero y marzo, también se muestra el índice NAO, además del AMO, N3 y el AMO+PDO.

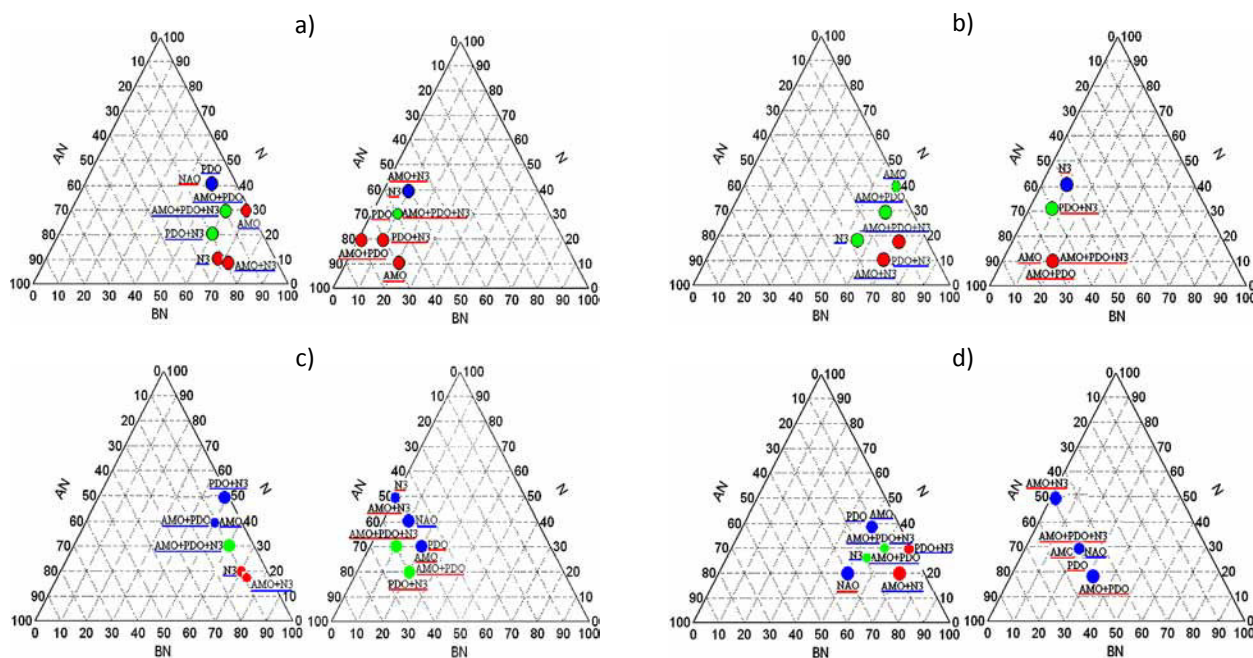


Figura 6. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Agosto, Setiembre y Octubre, usando el bimestre de Mayo y Junio (**a**) (**c**) y Junio y Julio (**b**) (**d**). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

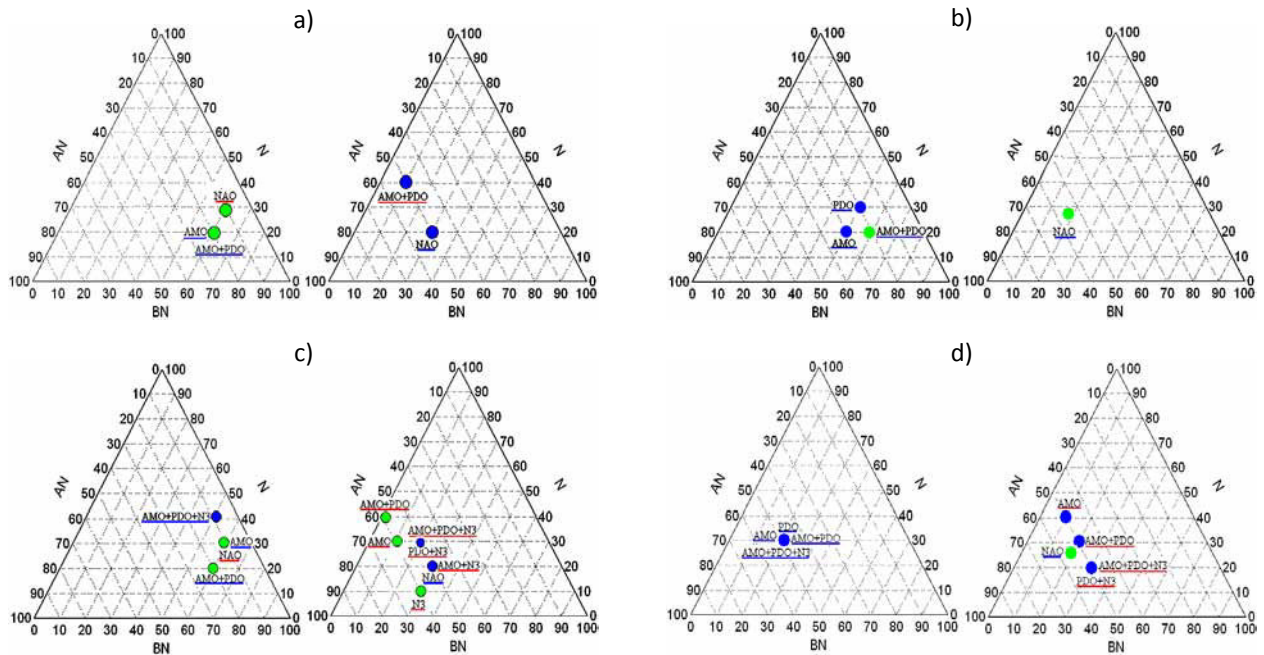


Figura 7. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Diciembre y Enero, usando el bimestre de Setiembre y Octubre (**a**)**(c)** y Octubre y Noviembre (**b**)**(d)**. Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

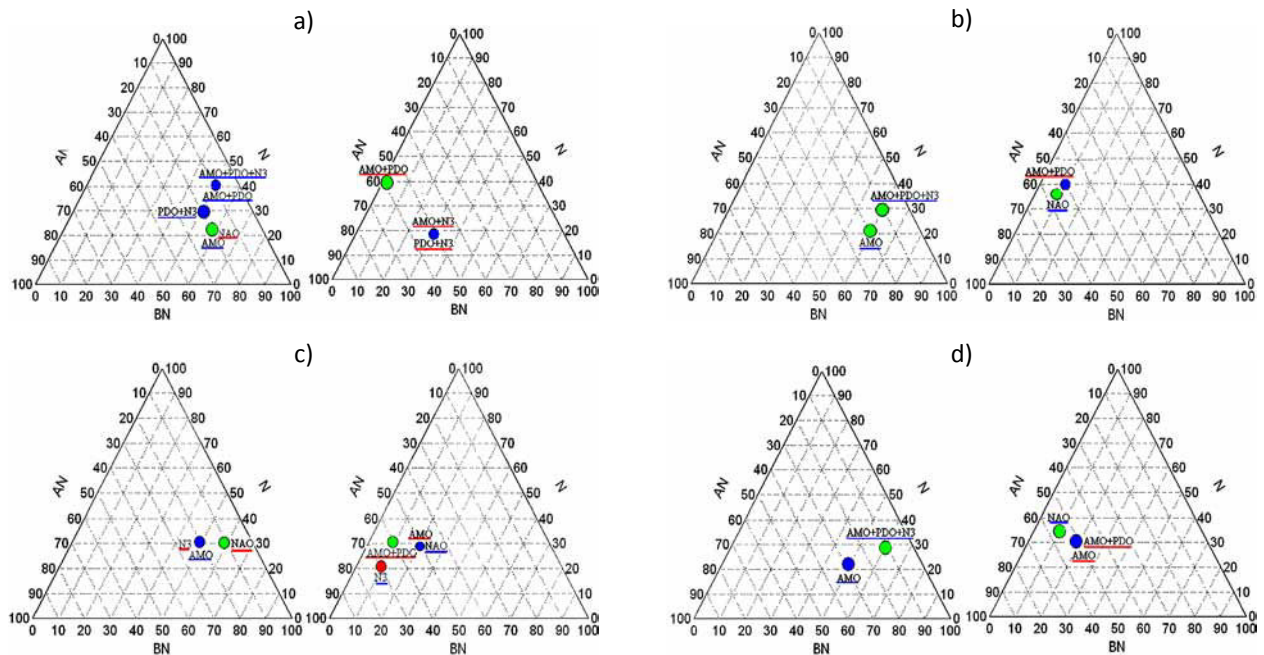


Figura 8. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Febrero y Marzo, usando el bimestre de Setiembre y Octubre (**a**) **(c)** y Octubre y Noviembre (**b**) **(d)**. Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).



### 3.3. Análisis de Correlación Canónica

Luego de mostrar los resultados usando componentes principales con los índices de forma individual en los gráficos de triángulo, se procedió a mostrar los resultados obtenidos con el análisis de correlación canónica. A continuación se muestran las figuras con la información obtenida a partir de dicho análisis, inicialmente se observarán las imágenes con los modos canónicos correspondientes para la temperatura mínima o temperatura máxima, cada modo canónico se muestra en las figuras en el siguiente orden, a la izquierda el patrón de temperaturas superficiales del mar (variable independiente), que traería consigo temperaturas por encima (colores amarillos, naranjas o rojos) o por debajo (celestes o azules) de los valores promedios en las estaciones utilizadas (variable dependiente). Dichos patrones en las estaciones se muestran en los gráficos de la derecha. En el medio de las figuras se encuentra un gráfico, que muestra los valores del modo con respecto al tiempo.

Como se mencionó anteriormente, en esta parte del estudio se utilizaron las temperaturas superficiales del mar correspondientes al período de 1971 al 2000, del trimestre anterior al pronosticado, con excepción del bimestre de febrero y marzo, en donde se usaron las mismas temperaturas que para el bimestre de diciembre y enero (setiembre, octubre, noviembre).

Para saber con cuántos modos de correlación canónica se trabajará, se usa un “scree test”, al igual que en el caso de las componentes principales (Wilks, 2011). 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, con esa cantidad de modos se trabaja. Lo anterior implica, que el aporte a la varianza total de los otros modos no es tan importante, sin embargo, existe una excepción en la cual puede ser que el “codo” en el “scree test” se presente por ejemplo en el modo dos, pero el modo tres tiene una correlación canónica superior

a 0.5, en este caso el criterio de experto es el que decide, generalmente debido a la alta correlación, el modo es incluido. Dicha situación sucedió en los gráficos correspondientes a la temperatura mínima del bimestre de diciembre y enero, así como en los de la temperatura máxima correspondiente a los bimestres de diciembre y enero, así como de febrero y marzo. 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). Además, se incluyeron en el análisis los resultados correspondientes a las estaciones utilizadas en el Sur de México, isla San Andrés y Norte de Suramérica (Colombia y Venezuela), para tener una visión más amplia de la región.

A continuación se muestran los resultados con las temperaturas mínimas. Para la temperatura mínima en el período de MJJ (figura 9) se observa que el primer modo está relacionado con la tendencia lineal en las series, mientras que el segundo modo muestra que bajo condiciones de un PDO negativo (positivo) más condiciones de Niña (Niño), las temperaturas mínimas caen por debajo (encima) de los valores normales (sin omitir el efecto del ligero enfriamiento en el ATN), especialmente sobre Honduras, resultado también obtenido con el análisis de tabla de contingencia (figura 5). Distintos patrones espaciales asociados con los índices se incluyen en Fallas-López (2009).

La figura 10 muestra que la correlación tanto de Pearson como Spearman tiene valores positivos, especialmente altos sobre Panamá y el Caribe de Costa Rica, el Índice de Acierto es alto sobre Panamá y una estación en Belice, mientras que en el resto de la región está en valores cercanos al 50%, finalmente el Índice LEPS presenta valores positivos, los más altos sobre Panamá. El LEPS (linear error in probability space, por sus siglas en inglés), calcula un índice definido usando una tabla de conteo que da diferentes valores

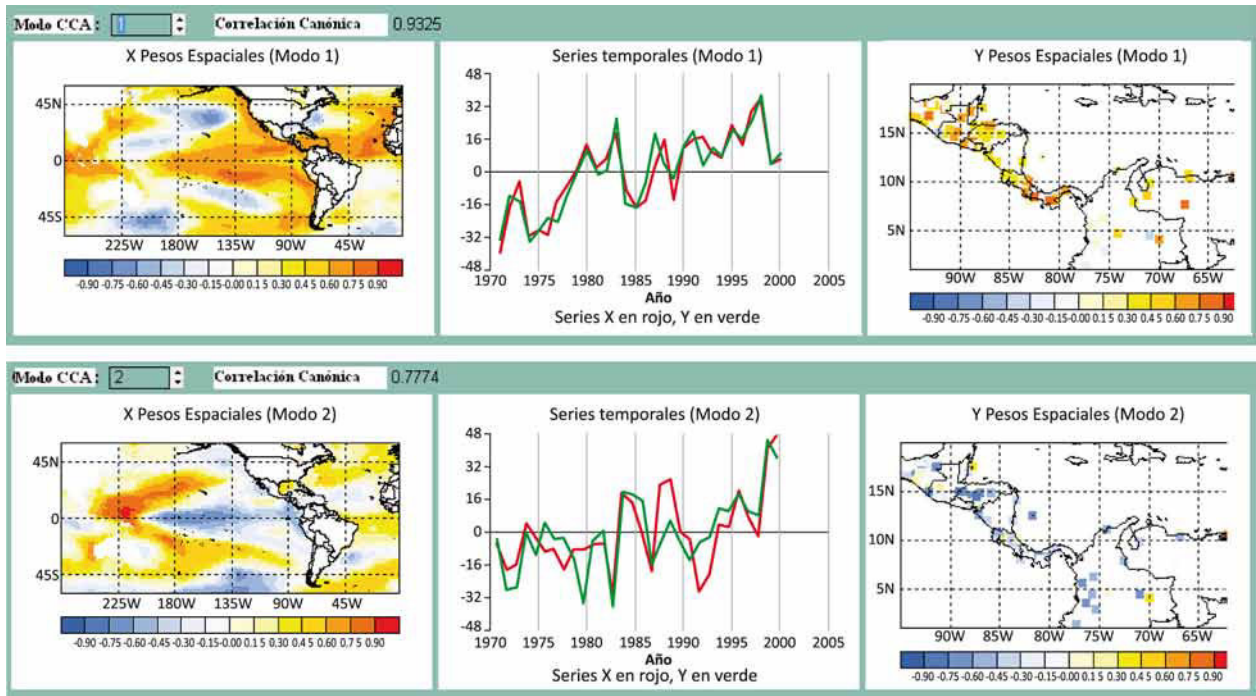


Figura 9. Modos canónicos para la temperatura mínima de Mayo, Junio y Julio.

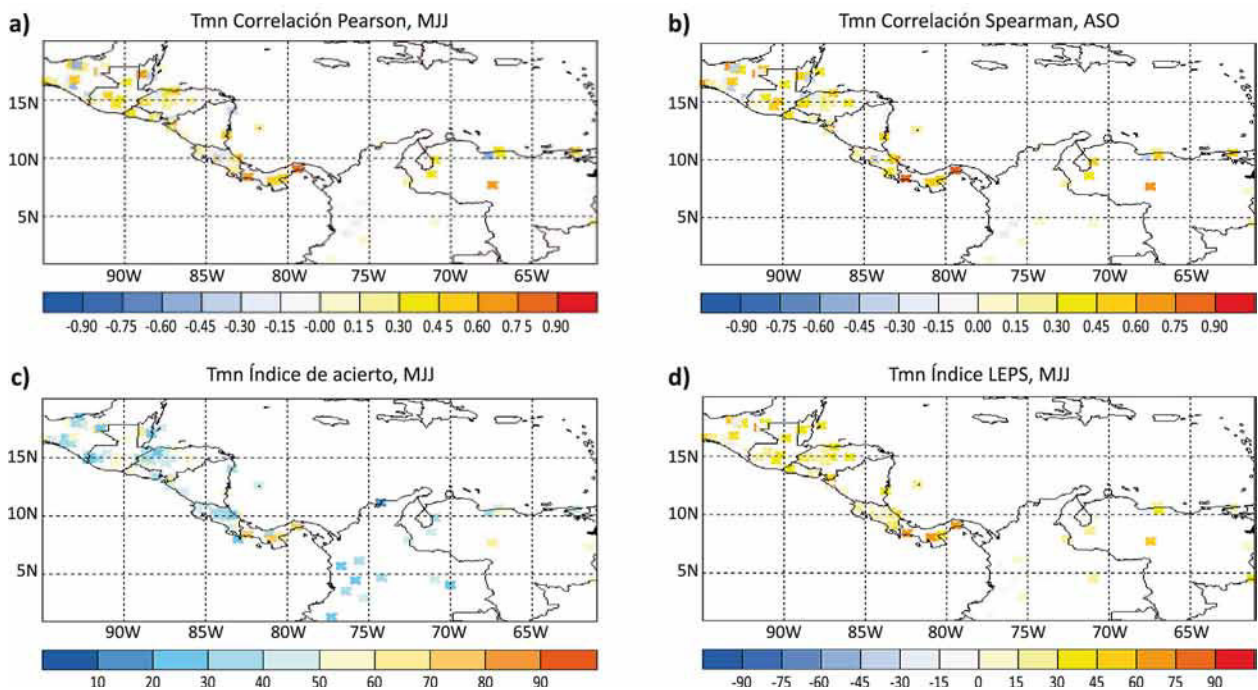


Figura 10. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

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. Entre más alto mejor es el esquema de pronóstico. Nótese que los estadísticos presentados en la [figura 10](#) y posteriores, se refieren al conjunto de modos canónicos y no únicamente a uno de ellos.

Analizando el trimestre de ASO ([figura 11](#)), se observa que el primer modo parece estar asociado a la tendencia, mientras que el segundo modo corresponde a condiciones en las cuales el Atlántico está cálido (frío), el PDO es positivo (negativo) y se presentan condiciones de Niño (Niña) en el Pacífico. Dicho patrón se refleja en un aumento (disminución) en las temperaturas mínimas sobre todo Centroamérica, especialmente sobre el Pacífico de Nicaragua y Costa Rica.

Los estadísticos asociados ([figura 12](#)) muestran buenos resultados, por ejemplo, las correlaciones de Pearson y Spearman presentan valores positivos en toda la región, excepto sobre regiones de

Honduras y parte de Belice. El índice de acierto es positivo en varias de las estaciones ubicadas al norte de Centroamérica, y en su mayoría están cerca del 40%, mientras que el índice LEPS muestra valores positivos, siendo mayores al norte de la región.

En el caso de diciembre y enero, se obtuvieron 3 modos canónicos ([figura 13](#)), el primero parece estar asociado a una tendencia, mientras que el segundo muestra que una PDO negativa (positiva) se refleja en una temperatura mínima menor (mayor) sobre Guatemala, Costa Rica y El Salvador, mientras que sobre Honduras, Nicaragua y Panamá la tendencia no es clara. Posiblemente esa señal no sea homogénea debido al efecto del ligero calentamiento en el ATN. El tercer modo muestra un Atlántico cálido (frío), correspondiendo a temperaturas mayores (menores) sobre toda la región, especialmente sobre Belice.

Los estadísticos ([figura 14](#)) muestran una correlación de Pearson con valores cercanos a cero y una ligera tendencia a valores positivos sobre Honduras y Nicaragua, el resto de la región

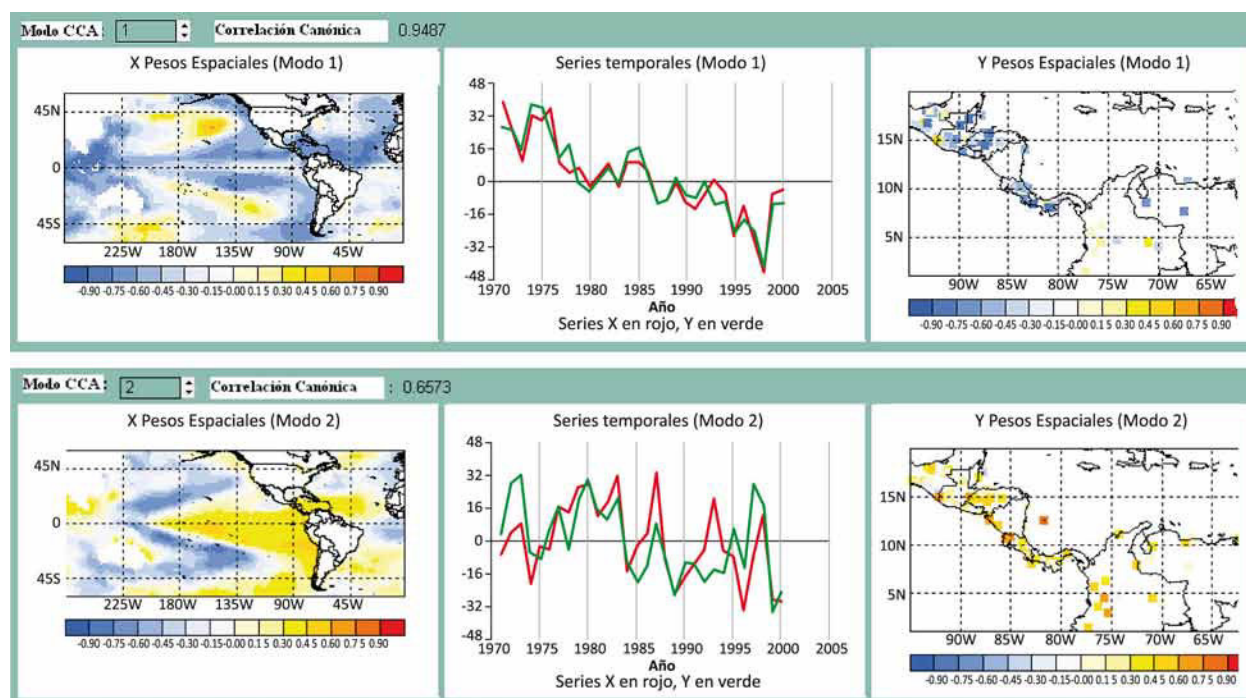


Figura 11. Modos canónicos para la temperatura mínima de Agosto, Setiembre y Octubre.

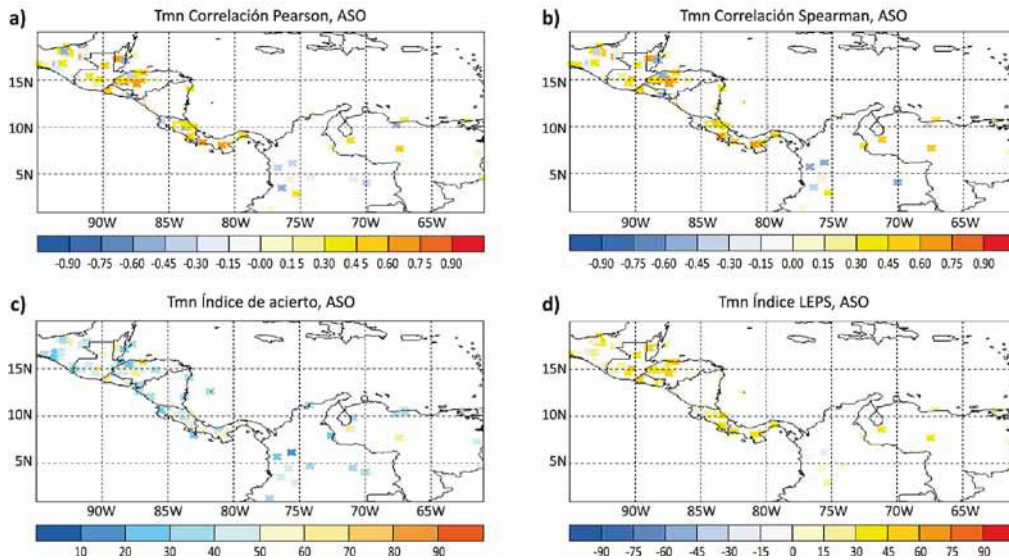


Figura 12. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

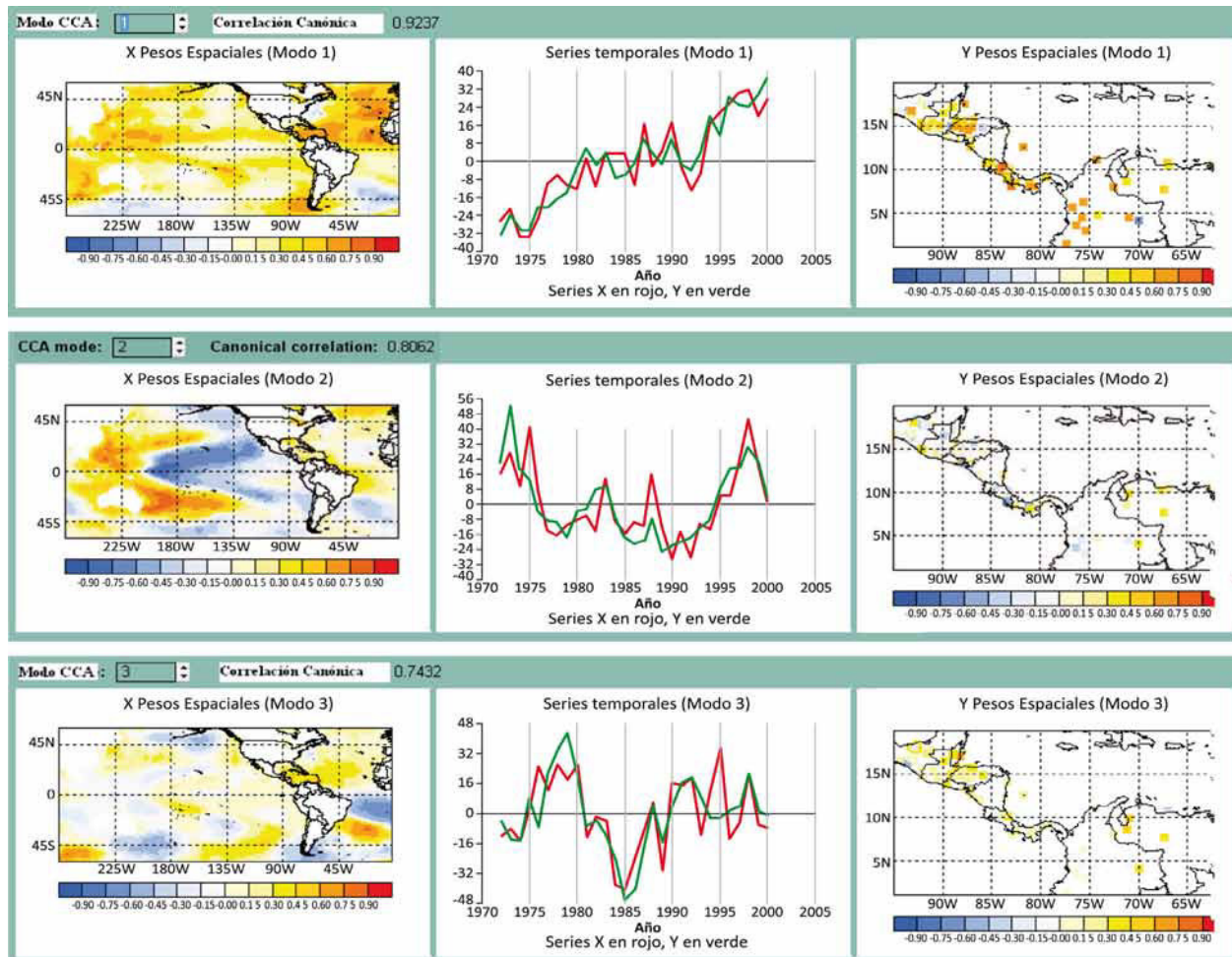


Figura 13. Modos canónicos para la temperatura mínima de Diciembre y Enero

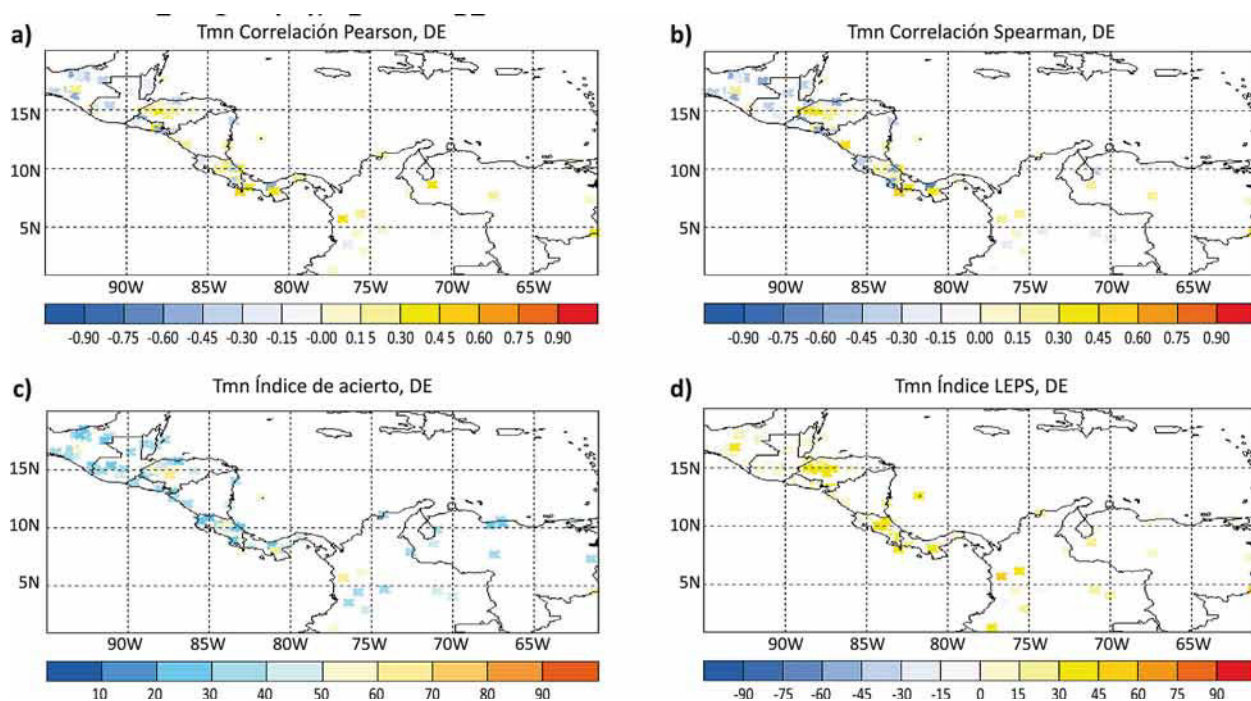


Figura 14. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del bimestre de Diciembre y Enero.

presenta valores negativos, algo similar ocurre con la correlación de Spearman, sin embargo se notan valores negativos más definidos sobre Costa Rica y Guatemala. El Índice de Acierto presenta valores inferiores al 50% mayormente. Finalmente, en el caso del Índice LEPS, los valores son positivos, más marcados sobre Honduras y Costa Rica.

Concluyendo con la temperatura mínima, para el bimestre de febrero y marzo (figura 15) se obtuvieron 3 modos canónicos, el primero muestra condiciones de Niña (Niño), sin omitir el evento frío (cálido), que traen consigo temperaturas mínimas por debajo (encima) de las normales sobre toda la región; el modo dos, muestra que condiciones de Niña (Niño) débil y un Atlántico cálido (frío) traen consigo temperaturas mínimas por debajo (encima) de los promedios en Honduras, El Salvador y Nicaragua. Finalmente el modo 3 presenta una Niña (Niño) débil que se asocia con temperaturas mínimas con valores inferiores (superiores) a lo normal al sur de la región y superiores al norte.

Otra posible explicación es de que el norte tenga ese patrón por el calentamiento (enfriamiento), que se observa en toda la costa del Pacífico de Norteamérica, favoreciendo (disminuyendo) empujes fríos más débiles, sin embargo, esto requiere un estudio posterior.

Los estadísticos correspondientes a estas temperaturas mínimas (figura 16) muestran valores altos positivos de la correlación de Pearson sobre toda la región, mientras que los valores de Spearman presentan una configuración similar, pero con valores no tan altos como los de Pearson. El Índice de Acierto tiene valores cercanos al 50% sobre toda Centroamérica, finalmente el Índice LEPS tiene valores positivos altos sobre casi toda la región. En resumen, este bimestre mostró los valores más altos de los períodos usados para la temperatura mínima. Dicho de otra forma, se podría concluir que el bimestre FM es el que manifiesta la mayor habilidad y confiabilidad para pronosticar la T<sub>min</sub>.

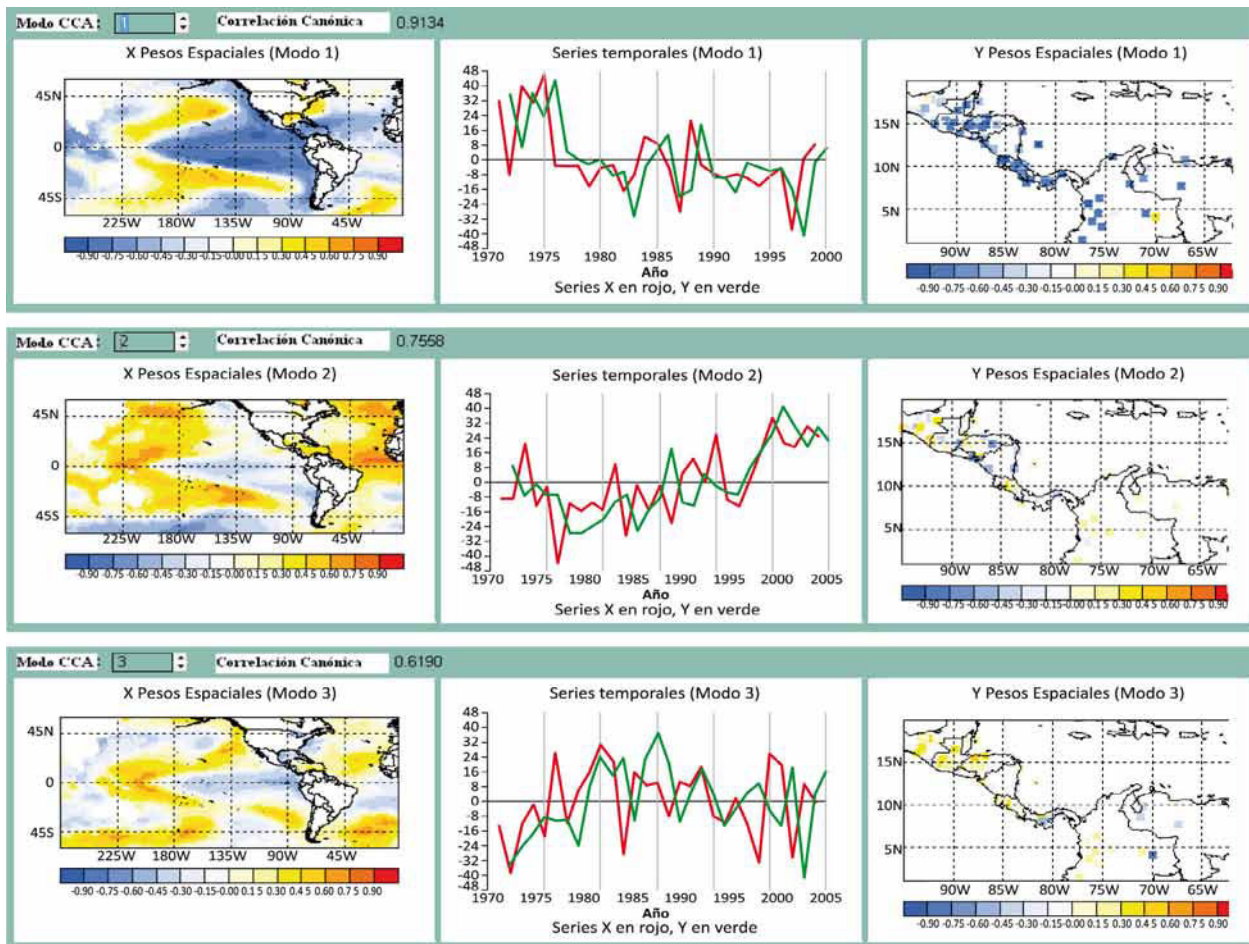


Figura 15. Modos canónicos para la temperatura mínima de Febrero y Marzo.

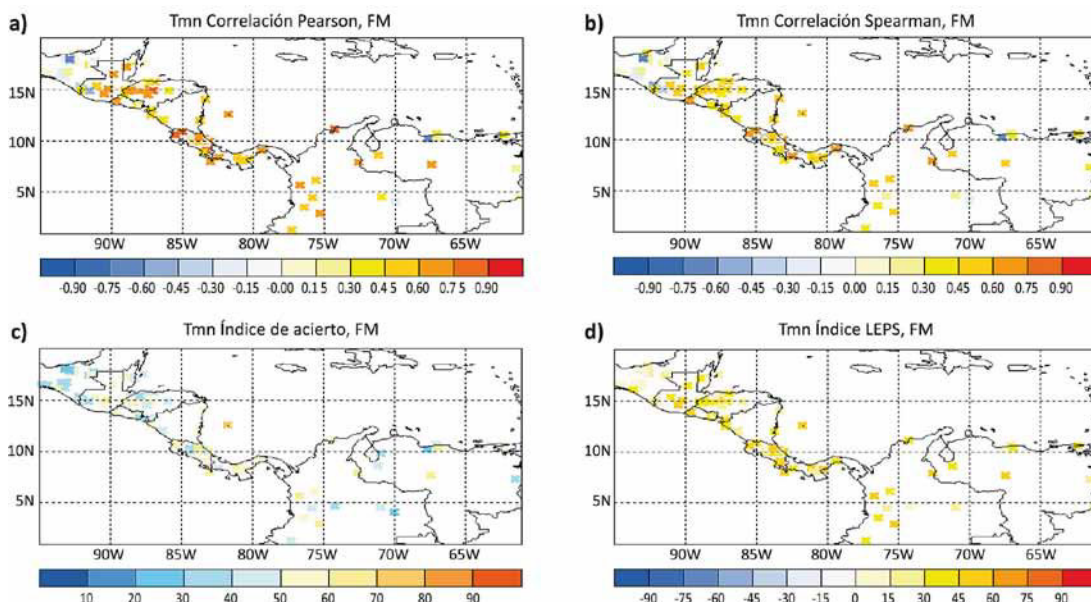


Figura 16. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del bimestre de Febrero y Marzo.

Iniciando con los resultados para la temperatura máxima, se observa que para el trimestre de MJJ (figura 17) se presentaron 3 modos canónicos, el primero relacionado con la tendencia en la serie, mientras que el segundo muestra que con condiciones de Niña (Niño), y de enfriamiento en el ATN, las temperaturas máximas son menores (mayores) sobre casi toda la región, mostrándose dicha tendencia de forma más débil sobre Nicaragua y parte de Guatemala; el tercer modo indica que un PDO negativo (positivo) trae consigo temperaturas máximas por encima (debajo) de las normales al sur de la región, especialmente sobre Costa Rica, y temperaturas máximas menores (mayores) al norte de Centroamérica. Este caso singular requiere un estudio posterior debido a que todo el resto de Centroamérica muestra un comportamiento diferente; nótese además que el ATN está ligeramente frío. Por lo tanto no se

aprecia con facilidad un forzante que pueda explicar esa singularidad en Costa Rica.

En cuanto a los estadísticos obtenidos (figura 18), la correlación de Pearson muestra valores positivos, siendo los más altos sobre Honduras, El Salvador y Nicaragua, de forma similar ocurre con la correlación de Spearman; los índices de acierto se encuentran en su mayoría en el rango superior al 40%, con valores más altos en Nicaragua y Honduras. El índice LEPS tiene valores positivos sobre casi todo Centroamérica, a excepción de Panamá.

Al trimestre siguiente, correspondiente a ASO, se obtuvieron 2 modos canónicos (figura 19), el primero corresponde a tendencia en la serie, parte de la variabilidad de la misma, mientras que la segunda muestra que bajo un patrón de Niña (Niño), las temperaturas máximas son menores

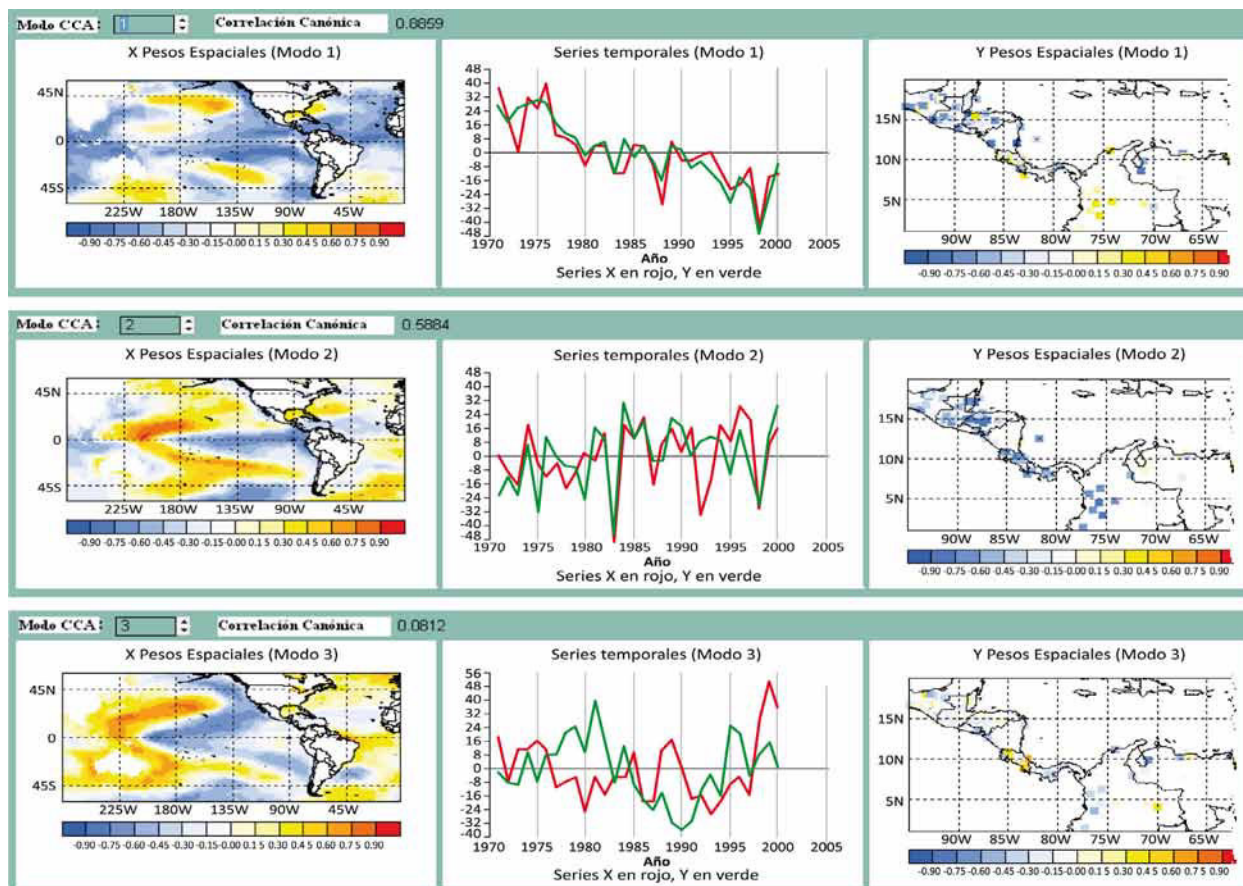


Figura 17. Modos canónicos para la temperatura máxima de Mayo, Junio y Julio.

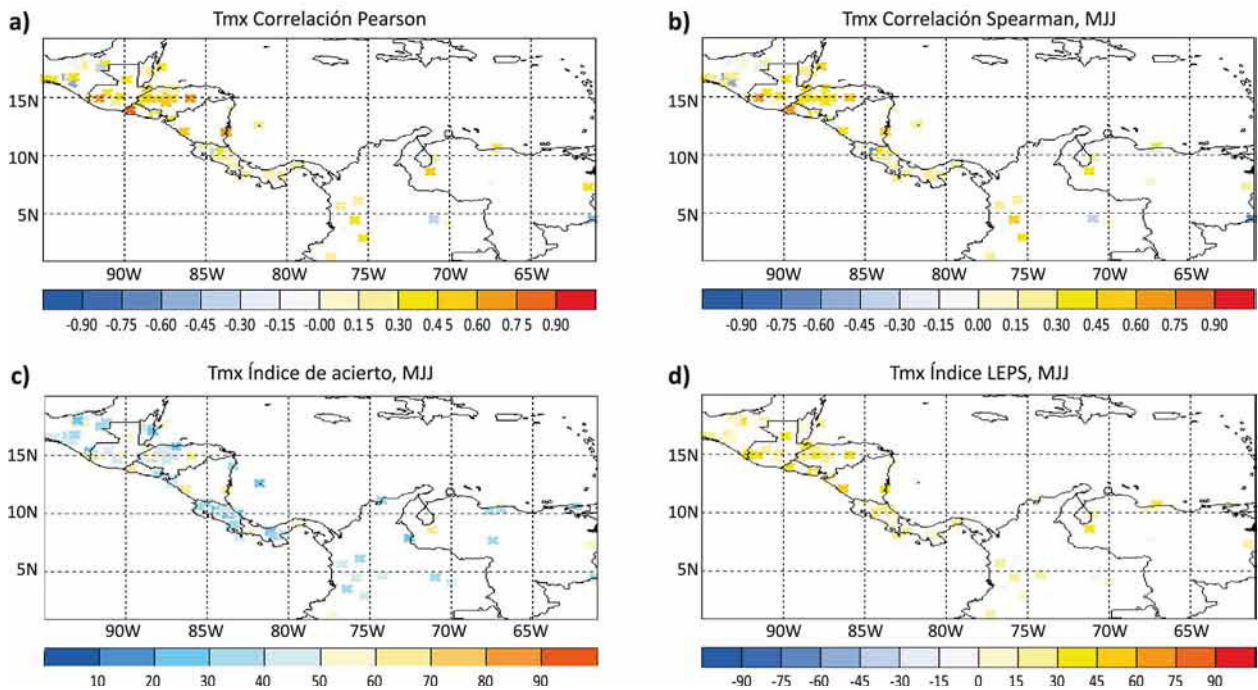


Figura 18. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

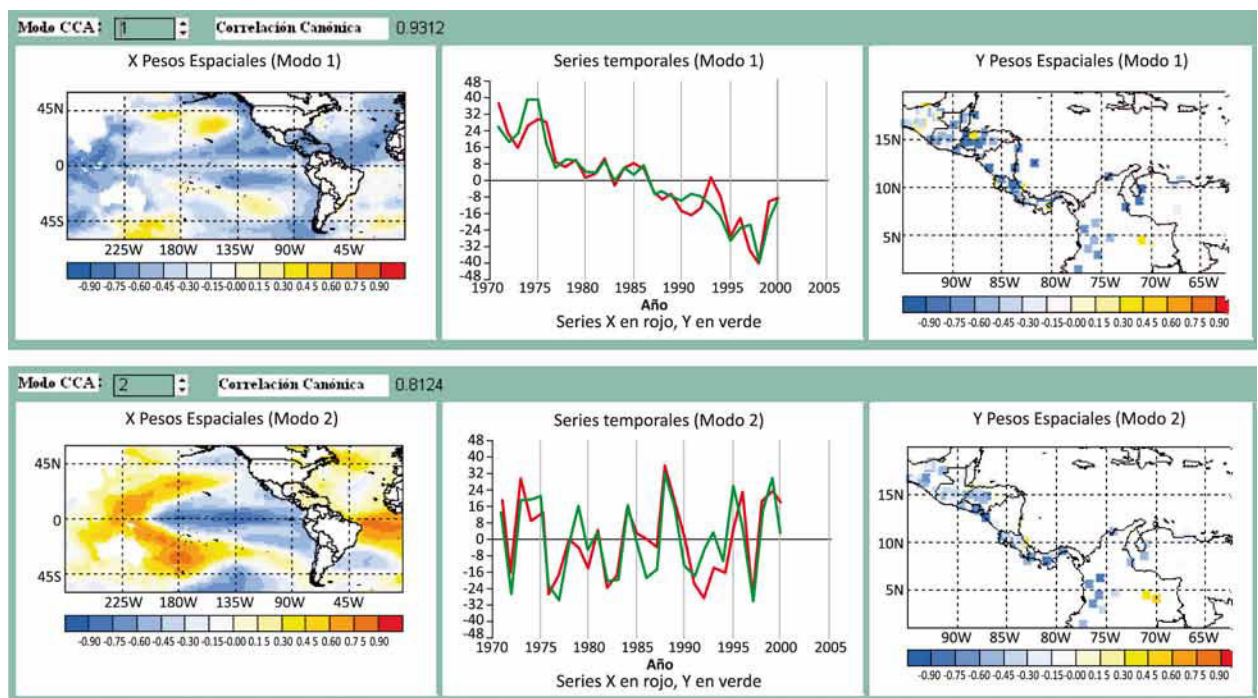


Figura 19. Modos canónicos para la temperatura máxima de Agosto, Setiembre y Octubre.



(mayores) sobre casi toda la región, a excepción de Nicaragua y parte de Honduras.

Las correlaciones e índices dieron valores superiores a los del trimestre MJJ (figura 20), las correlaciones de Pearson y Spearman muestran valores positivos altos sobre todo Centroamérica, siendo la excepción el norte de Honduras. El índice de acierto muestra varios valores por encima del 60% y los menores superiores al 50%, ambos ubicados de forma dispersa sobre la región; finalmente el Índice LEPS muestra valores positivos, siendo los más altos sobre Honduras y Panamá.

El bimestre de diciembre y enero muestra tres modos canónicos (figura 21), el primero relacionado con la tendencia de la serie y el segundo asociado a condiciones de Niño (Niña) y un Atlántico frío (cálido), que traerían consigo temperaturas máximas con valores por debajo (encima) de las normales sobre toda la región. Este resultado requiere un estudio posterior, debido a que bajo

circunstancias como por ejemplo frío en el Atlántico y caliente en el Pacífico, se esperaría un escenario más de tipo “seco” para regiones del Pacífico, y por lo tanto un aumento de las temperaturas diurnas. Pero nótese que a la luz de esto último, prácticamente todo el Atlántico Norte presenta un escenario frío. Lo mismo sucedería con el modo 3, sólo que ahora el Atlántico Norte está caliente, lo que podría implicar una mayor influencia del Atlántico, al compararla con la del Pacífico en el invierno boreal. El modo tres indica que un AMO cálido (frío) aumenta (disminuye) las temperaturas máximas sobre Centroamérica, especialmente sobre Guatemala, El Salvador y Panamá.

En cuanto a los estadísticos (figura 22), se muestra que las correlaciones de Pearson y Spearman dan valores positivos, siendo los más altos ubicados en el Caribe de Nicaragua, los índices de acierto se encuentran en su mayoría por encima del 40%, sin embargo, hay valores superiores sobre Honduras y Nicaragua, el Índice LEPS presenta

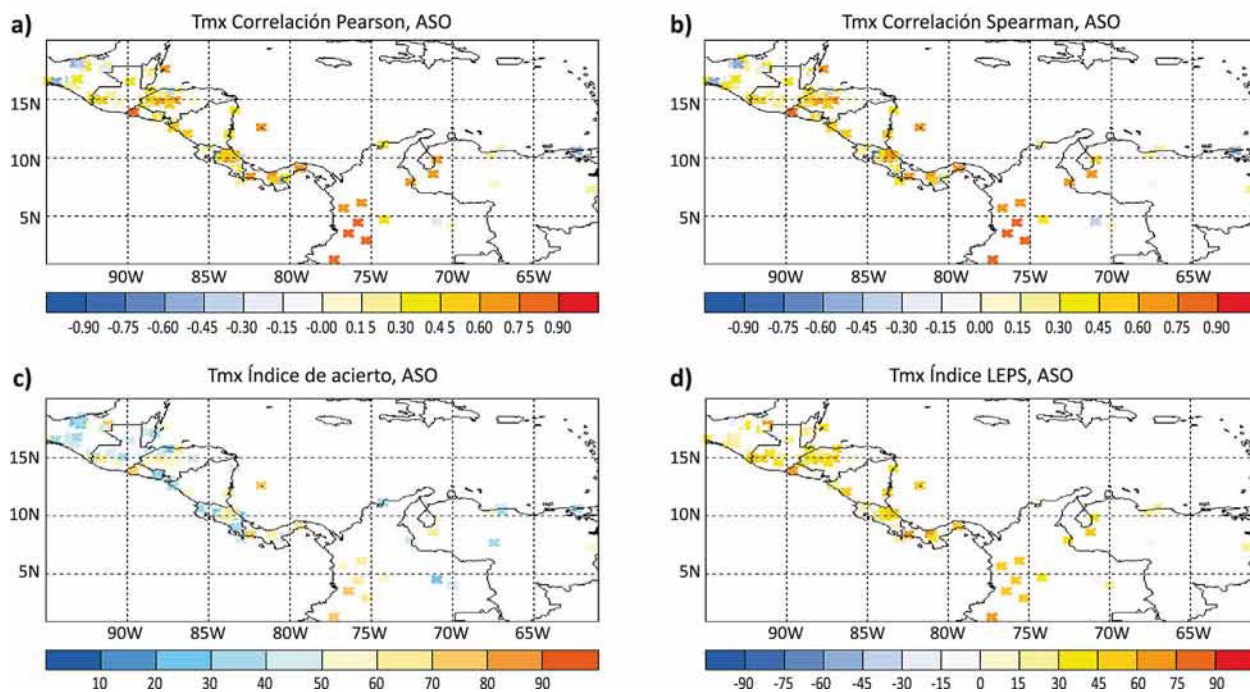


Figura 20. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

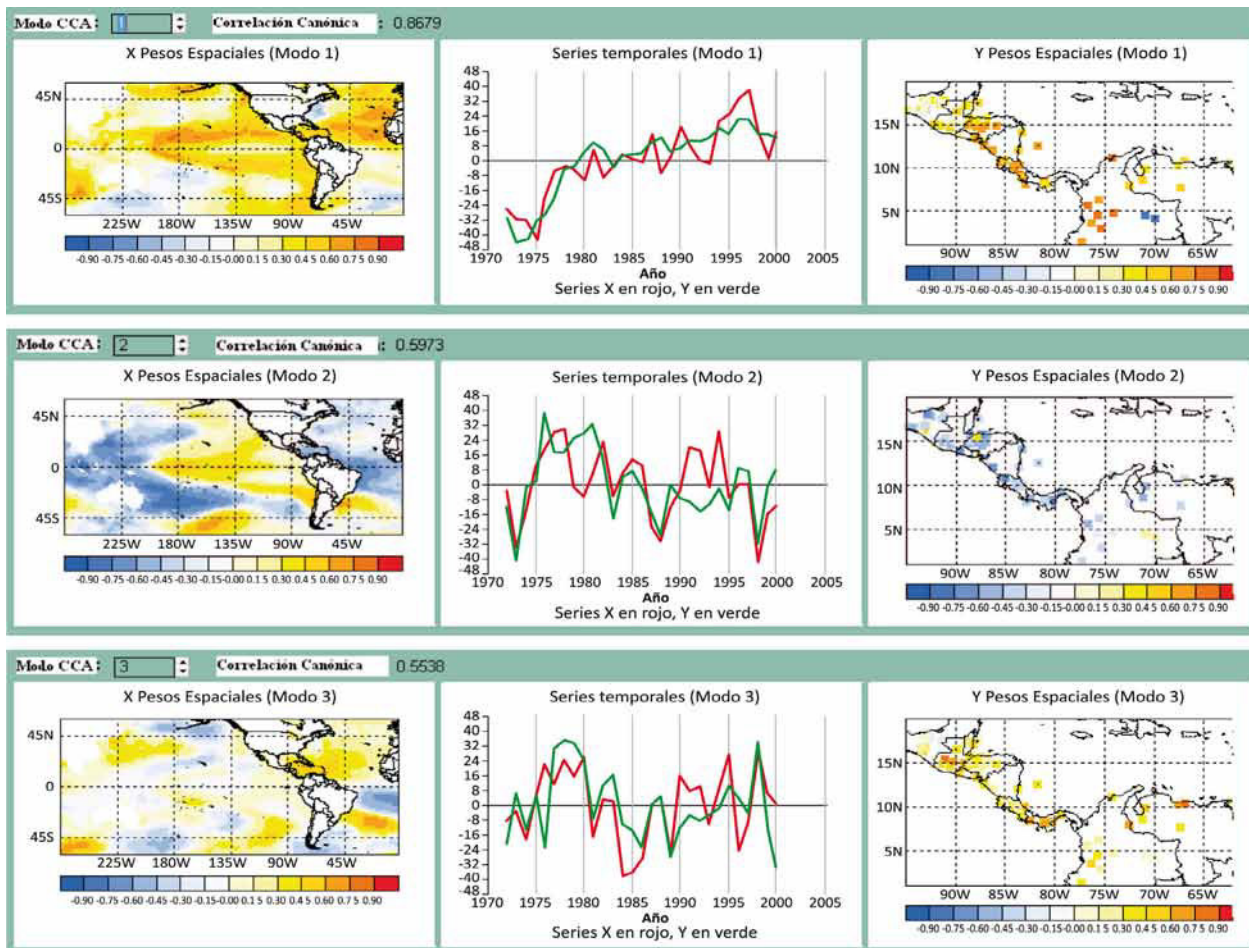


Figura 21. Modos canónicos para la temperatura máxima de Diciembre y Enero.

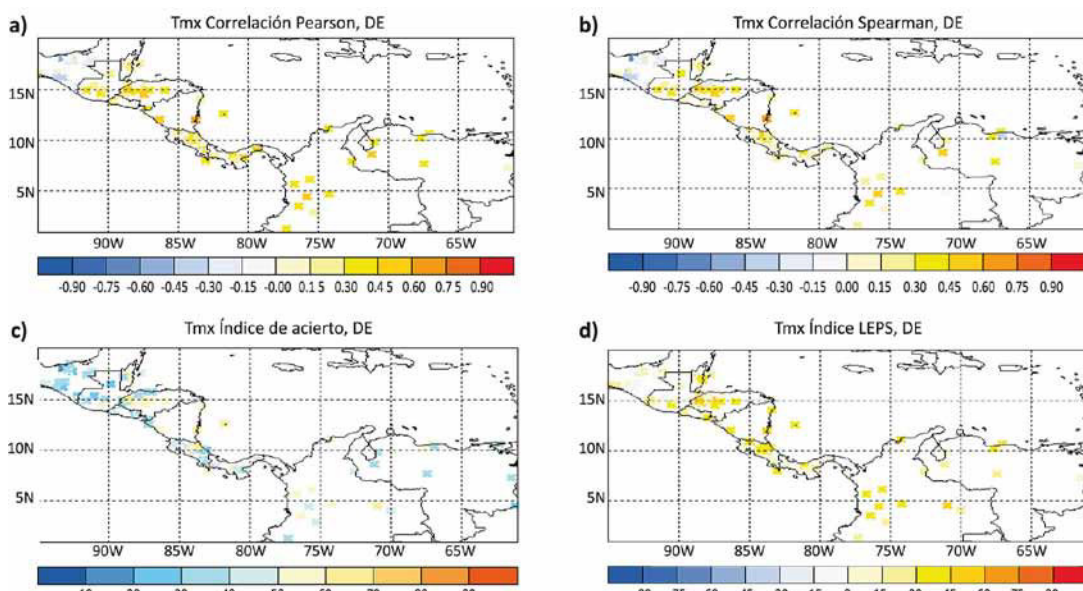


Figura 22. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del bimestre de Diciembre y Enero.

valores positivos, estando los más altos ubicados sobre Honduras y el Caribe de Nicaragua.

Finalmente, para el caso de febrero y marzo se presentan tres modos canónicos (figura 23), el primero con un PDO negativo (positivo) y condiciones de Niña (Niño), lo cual se asocia con temperaturas máximas menores (mayores) a las normales sobre toda la región. El segundo modo, correspondiente a un Atlántico frío (cálido), disminuyen (aumentan) las temperaturas máximas sobre Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica, caso contrario ocurre sobre Belice, Guatemala y Panamá, el análisis por tabla de contingencia muestra resultados similares a estos. Finalmente, el modo tres parece estar asociado al Atlántico Tropical Sur y muestra que al estar más cálida (fría)

de lo normal dicha zona, las temperaturas máximas aumentan (disminuyen) sobre toda Centroamérica siendo excepción Panamá.

Los valores de correlaciones e índices fueron superiores a los de cualquier otro período de pronóstico usado (figura 24), por lo que al igual que en el caso de la temperatura mínima, dicho bimestre muestra los mejores resultados.

Para las temperaturas utilizadas, algunos modos mostraron la presencia de la PDO, resultado similar al obtenido por Alfaro (2007).

Como se pudo observar, el pronóstico de las temperaturas del período de febrero y marzo es el que da mejores resultados, mientras que el de

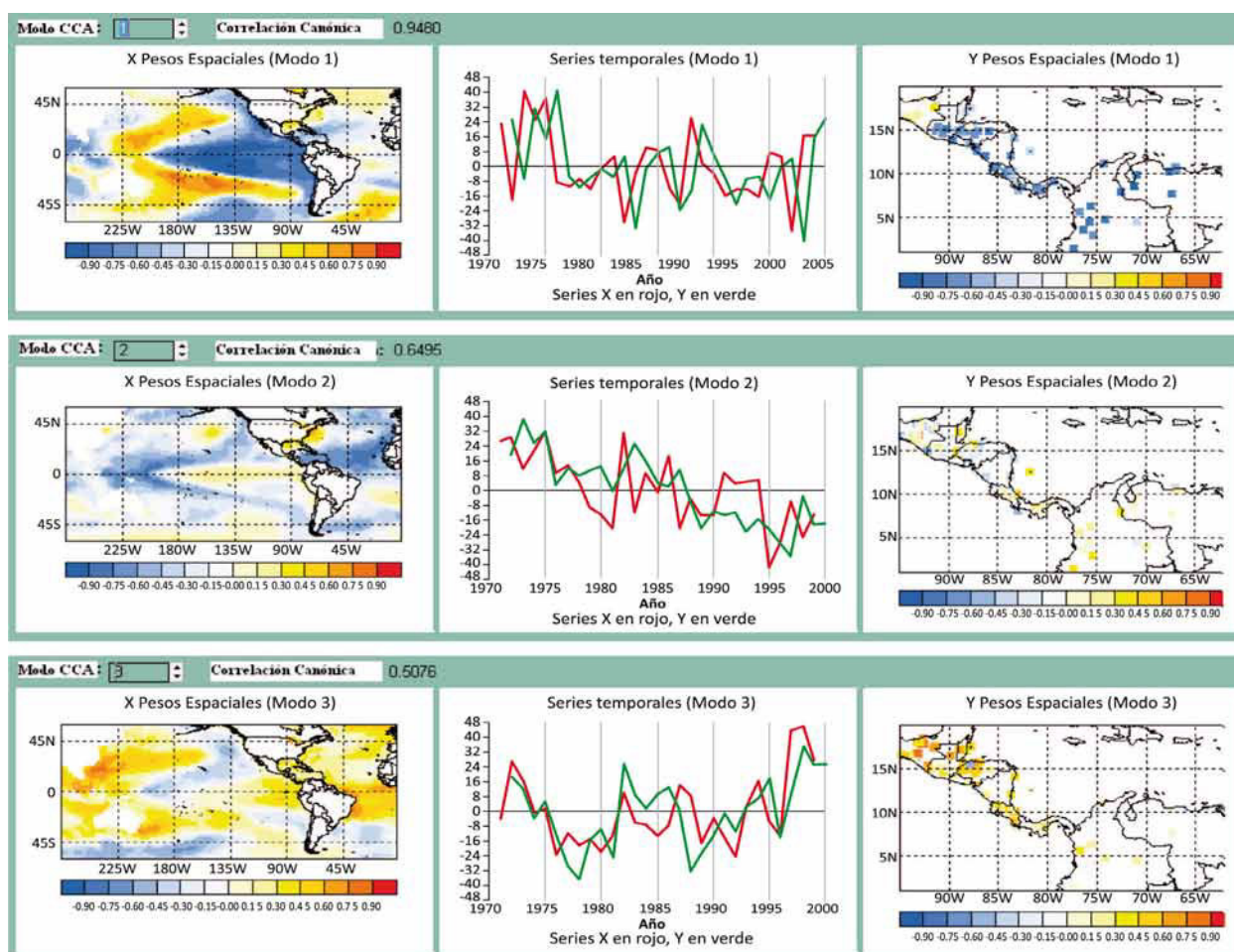


Figura 23. Modos canónicos para la temperatura máxima de Febrero y Marzo.

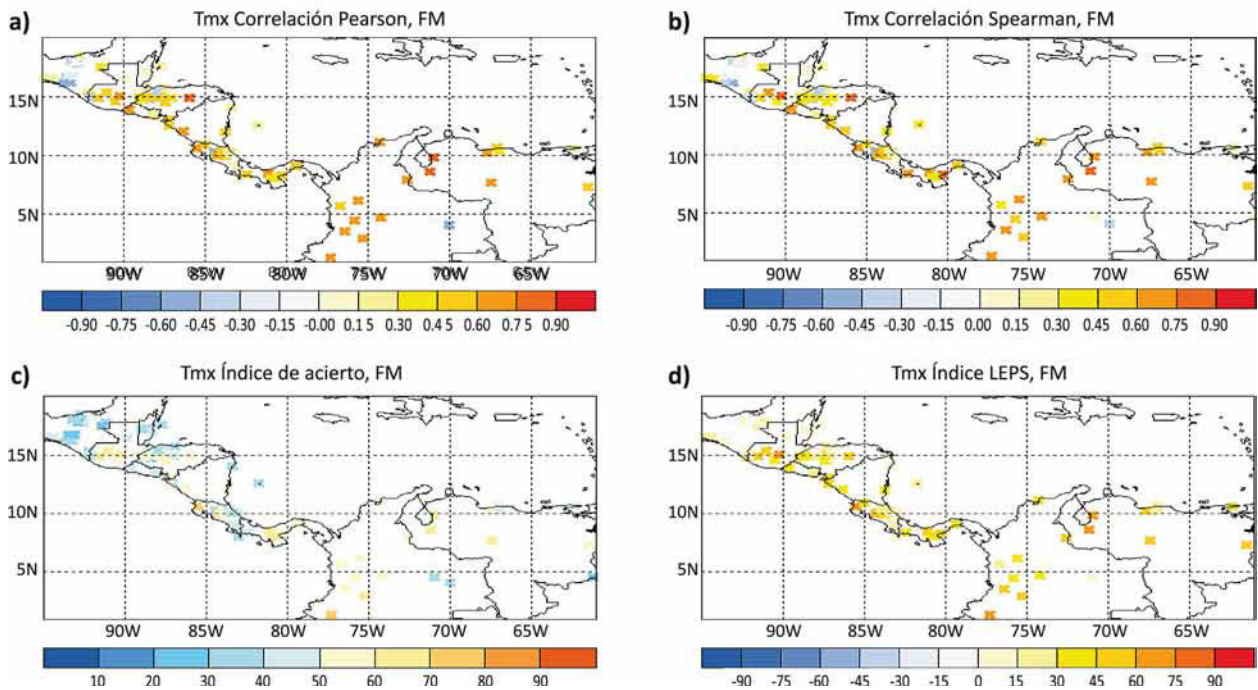


Figura 24. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del bimestre de Febrero y Marzo.

diciembre y enero parece ser el menos acertado, el cual puede estar relacionado con la variabilidad en la cantidad de ingreso de empujes fríos a la región. Sin embargo, la afirmación anterior sería cierta si efectivamente hubiera una gran variabilidad en la frecuencia de empujes fríos, pero la desviación estándar acumulada de la frecuencia de “frentes fríos” es de 1.85 en FM y de 1.55 en DE (Alvarado, *comunicación personal*). Si se comparan los resultados de la temperatura mínima, con los de la temperatura máxima, tanto para el trimestre de agosto, setiembre y octubre, como el bimestre de diciembre y enero, se nota que los resultados son mejores para la temperatura máxima.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos con ambos tipos de análisis han mostrado en términos generales resultados similares, sin embargo, el probar con el análisis contingente cada índice por separado para cada período de pronóstico, ha sido útil

para valorar para qué componente y en qué período es más efectivo un índice. En el caso del análisis de correlación canónica, el mismo permite establecer de forma más específica la influencia de un determinado patrón oceánico, sobre las temperaturas en cada estación de forma individual, por lo cual delimita bien cuales estaciones están influenciadas y en qué forma, por una cierta configuración de predictores. Además, el análisis contingente presenta los niveles de confianza asociados a cada signo.

Ambos análisis coinciden en la influencia de las temperaturas superficiales del mar sobre el Océano Atlántico, el Pacífico Ecuatorial y la Oscilación Decadal del Pacífico, tanto sobre las temperaturas mínimas como las máximas.

La técnica de las componentes principales, es útil para resumir la mayor cantidad de información de un conjunto de datos, en el presente estudio se pudo reunir la información más importante con ayuda únicamente de una componente principal,

explicando gran parte de la variabilidad de las mismas sobre el área, lo cual facilita mucho el estudio de ellas.

En cuanto a índices usados para pronosticar estacionalmente, el presente estudio muestra que si bien gran parte de la variabilidad de América Central se puede explicar con la influencia de El Niño (La Niña) (variabilidad interanual) o del Atlántico (AMO, principalmente, variabilidad multidecadal), también hay otros índices como el NAO, PDO y relaciones entre ellos, que pueden realzar señales con niveles de significancia mayores al 95%, además, el usar productos de índices normalizados ayudan a definir condiciones pronosticadas, en los casos en que los índices más usados, se encuentren dentro de los rangos normales.

Los resultados obtenidos indican que hay varios predictores para realizar dichos pronósticos, sin embargo, los índices AMO, N3 y AMO+N3 son los más relevantes, mostrando en algunos casos niveles de significancia al 99%. Dichos resultados son similares a los obtenidos por Alfaro (2000), ya que al igual que en ese estudio, con las primeras componentes principales fue suficiente para evaluar las temperaturas y además, se obtuvo que los océanos circundantes eran los más importantes para determinar la temperatura del aire.

De manera interesante dentro de los predictores para las temperaturas mínimas y máximas, se encontró el NAO, un índice atmosférico que dio resultados relevantes. Sin embargo, en la mayoría de los casos la significancia no era alta, lo cual tiene sentido debido a la variabilidad de los índices atmosféricos con respecto a los oceánicos.

El uso de la suma de los índices normalizados como en el caso del AMO+N3, dio resultados significativos, contrario a lo que se esperaba con la precipitación, donde la diferencia de ambos signos es relevante (Alfaro 2007), se realizó la suma ya

que no se buscaba un dipolo que influenciara las temperaturas, sino la suma de las temperaturas superficiales de los océanos circundantes.

Es importante el observar que el índice PDO da buenos resultados en varios de los períodos utilizados, ya que es un índice poco utilizado en términos generales a la hora de realizar pronósticos estacionales de las temperaturas mínimas y máximas.

El análisis canónico aparte de ser una herramienta útil para realizar pronósticos, también resultó útil para explicar predictores y asociaciones con otros índices.

Mejores resultados y mayor cantidad de índices para pronosticar las temperaturas, hacen de ésta variable la menos complicada de pronosticar en términos de esquemas predictivos, comparada con la precipitación (Fallas-Lopez y Alfaro, 2012a, b).

## 5. Referencias

- Agresti, A. (2002). *Categorical data analysis* (2da Ed.). John Wiley & Sons. United States of America.
- Alfaro, E. (2000). Response of Air Surface Temperatures over Central America to Oceanic Climate Variability Indices. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 7(2), 63-72.
- Alfaro, E. (2007). Predicción Climática de la Temperatura Superficial del Aire en Centroamérica. *Ambientico*. 165, 6-10.
- 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(8), 1407-1421.
- Alfaro, E. & Lizano, O. (2001). Algunas relaciones entre las zonas de surgencia del Pacífico Centroamericano y los Océanos Pacífico

- y Atlántico Tropical. *Revista de Biología Tropical*. 49(Supl. 2), 185-193.
- Alfaro, E.; Soley J. & Enfield, D. (2003). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications)*, ISBN 9978-310-00-2. Editado por ESPOL y FUNDESPOL, Guayaquil, Ecuador. 51pp.
- Alfaro, E. & Soley, J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*. 16(1), 59-74.
- Amador, J.; Alfaro, E.; Lizano, O. & Magaña, V. (2006). Atmospheric forcing in the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69, 101-142.
- 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. 11-18.
- Fallas-López, B. (2009). *Predicción Estacional de los campos de precipitación y temperatura en Centroamérica usando herramientas estadísticas*. Tesis de Grado, Licenciatura. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Fallas-López B. & Alfaro, E. (2012a): 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.
- Fallas-López B. & Alfaro, E. (2012b). 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. *Revista de Climatología*. 12, 93-105.
- García-Solera, I. & Ramírez, P. (2012). *Central America's Seasonal Climate Outlook Forum*. The Climate Services Partnership, 8 pp. Recuperado de <http://climate-services.org/resource/central-american-climate-outlook-forum>
- Hidalgo, H.G.; Amador, J.A; Alfaro, E.J. & Quesada, B. (2013). Hydrological Climate Change Projections for Central America. *Journal of Hydrology*. 495, 94-112.
- Ndiaye, O. & Mason, S. (2007). *Climate Predictability Tool*. International Research Institute for Climate and Society, The Earth Institute of Columbia University. Recuperado de <http://portal.iri.columbia.edu>.
- North, G. R.; Bell, T. L.; Cahalan, R. F. & Moeng, F. J. (1982). Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. *Mon. Wea. Rev.* 110, 699-706.
- Smith, T.M. & Reynolds, R.W. (2004): Improved Extended Reconstruction of SST 1854-1997. *J. Climate*. 17:2466-2477.
- SYSTAT (1999). *SYSTAT 9, Graphics*. Chicago, EUA.
- Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3ra. Ed. Academic Press.

## 6. 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-A9-224 (fondo de estímulo UCR), 805-B3-600 (fondo de estímulo UCR), 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.