

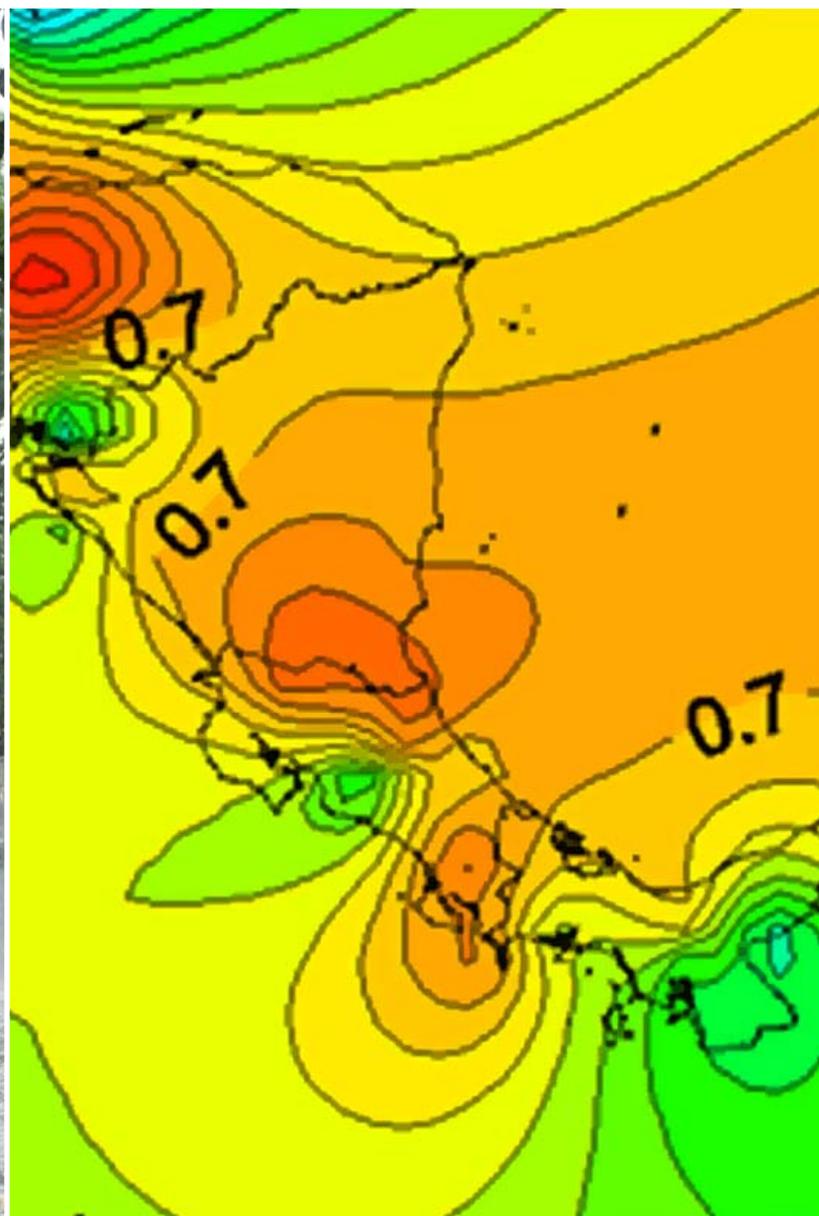
TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034

Volumen 13

Junio 2014





TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 13

Junio 2014

Editora:

Dra. Gladys Jiménez Valverde

Director de publicación:

MSc. Roberto Villalobos Flores

Comité editorial:

Licdo. Werner Stolz España Ing. José Alberto Retana Barrantes Licdo. Luis Fernando Alvarado Gamboa

Diseño y diagramación:

Rodrigo Granados Jiménez

La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.



Versión electrónica en:
<http://www.imn.ac.cr/publicaciones>



CONTENIDO

- | Pág. | Artículo |
|------|--|
| 5 | Predicción estacional de las temperaturas máximas y mínimas en América Central
BERNY FALLAS LÓPEZ, ERIC J. ALFARO |
| 27 | Desarrollo de un software para el procesamiento y control de calidad semi-automático de datos meteorológicos horarios
JOSÉ LUIS ARAYA LÓPEZ, DANIEL SOTO CERVANTES |
| 43 | Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56
KARINA HERNANDEZ ESPINOZA |
| 50 | Reincidencia de eventos hidrometeorológicos extremos en Costa Rica durante el periodo 2000-2010
LUIS EDUARDO QUESADA HERNÁNDEZ, NURY SANABRIA VALVERDE |
| 58 | La Oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica
DANIEL POLEO BRITO, ELADIO SOLANO LEÓN, WERNER STOLZ ESPAÑA |

Predicción estacional de las temperaturas máximas y mínimas en América Central

BERNY FALLAS LÓPEZ¹
ERIC J. ALFARO²

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. 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. 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° de latitud x 0.5° 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)³, Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)⁴, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)⁵, Niño3 (N3)⁶, 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 (χ^2) y la correlación de Pearson para análisis categórico (Agresti, 2002).

Para los cálculos del ACC se utilizó la Herramienta de Predicción Climática⁷ (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/>

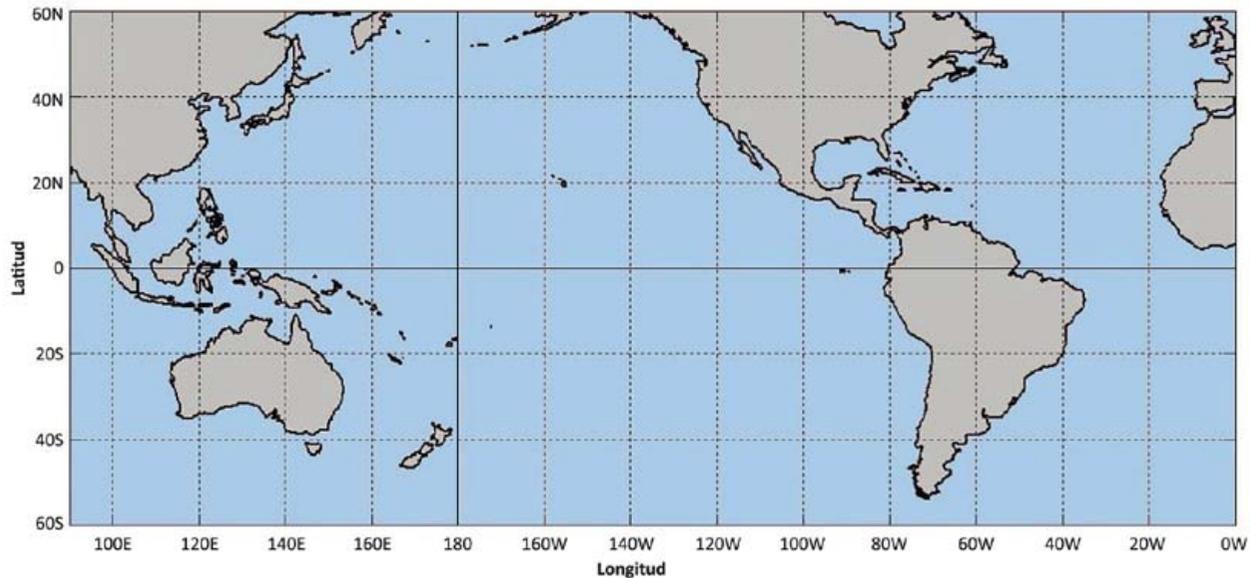


Figura 1. Área oceánica usada de la temperatura superficial del mar como campo predictor.

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

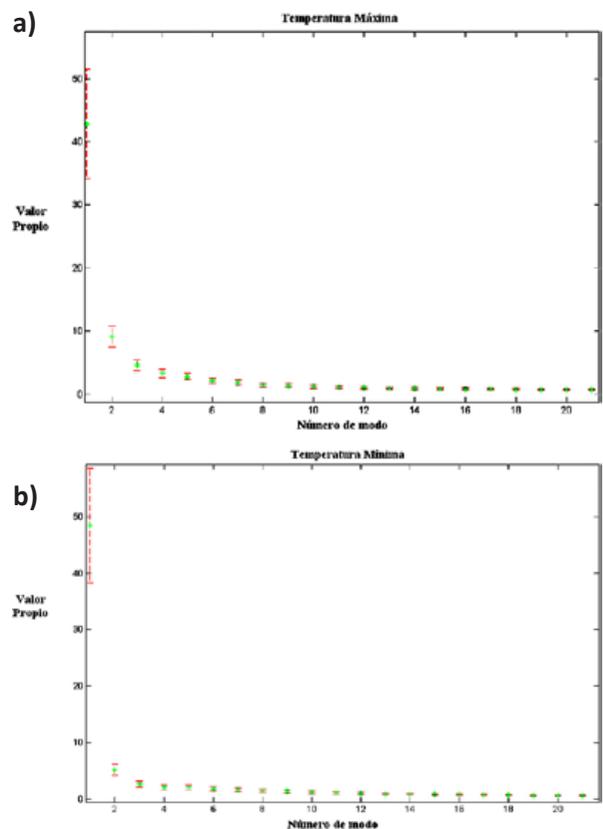


Figura 2. “Scree test” correspondiente a la (a) Temperatura Mínima y (b) Máxima, para los primeros 21 autovalores. Su error estándar, en barras verticales, se calculó de acuerdo a North et al. (1982).

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).

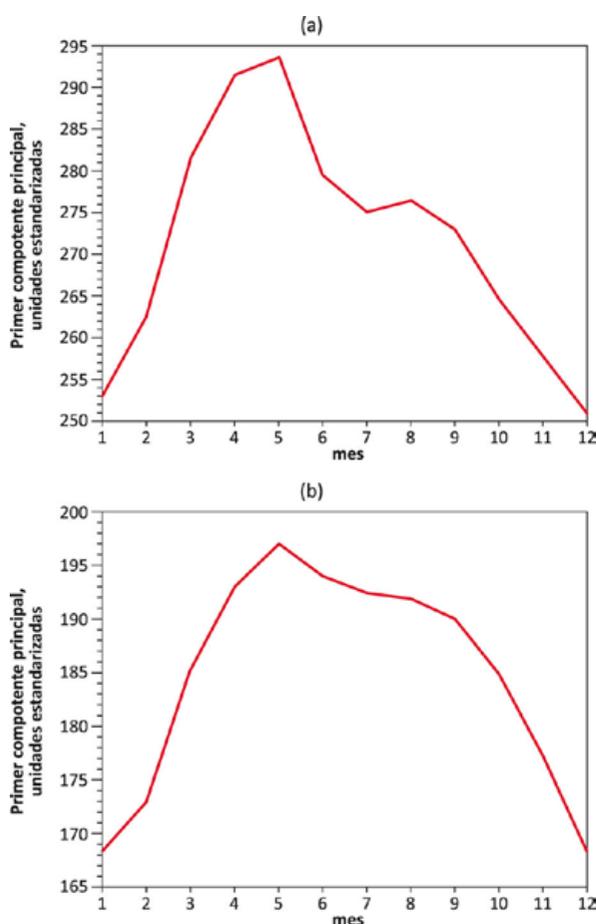


Figura 3. Ciclo anual de los primeros modos ortogonales estandarizados asociados a la temperatura máxima (a) y mínima (b).

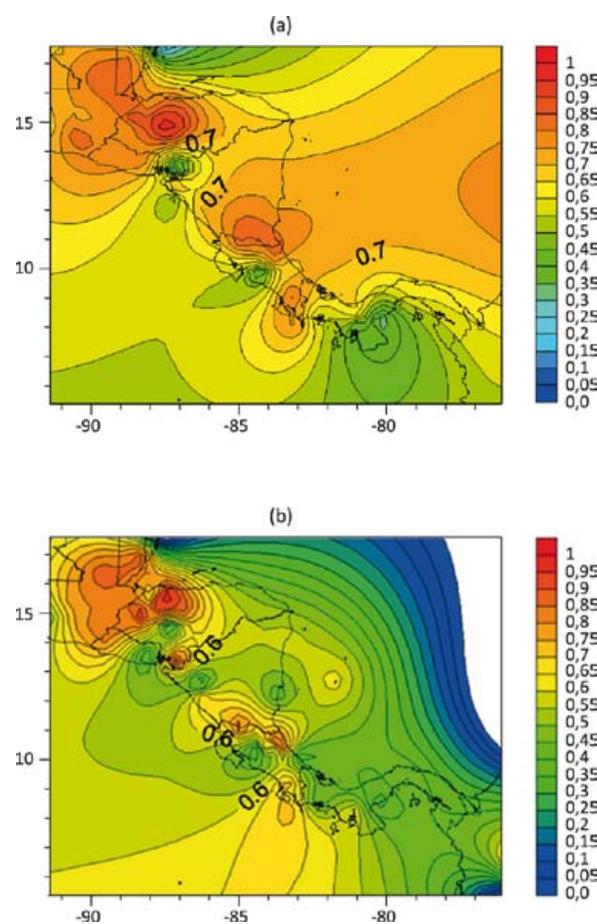


Figura 4. Mapa de correlación para la Componente Principal 1 de la (a) Temperatura Máxima y (b) Temperatura Mínima.

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.

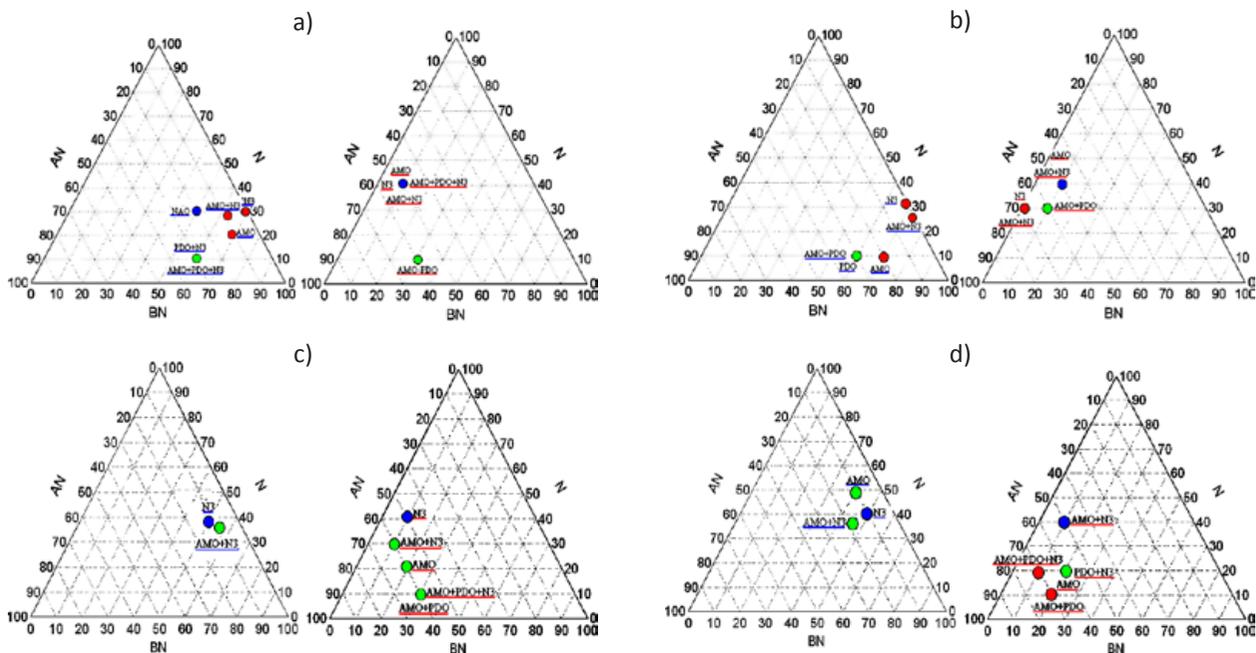


Figura 5. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima, **c** y **d**) del período de Mayo, Junio y Julio (MJJ), usando el bimestre de Febrero y Marzo (**a**) (**c**) Marzo y Abril (**b**) (**d**). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

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.

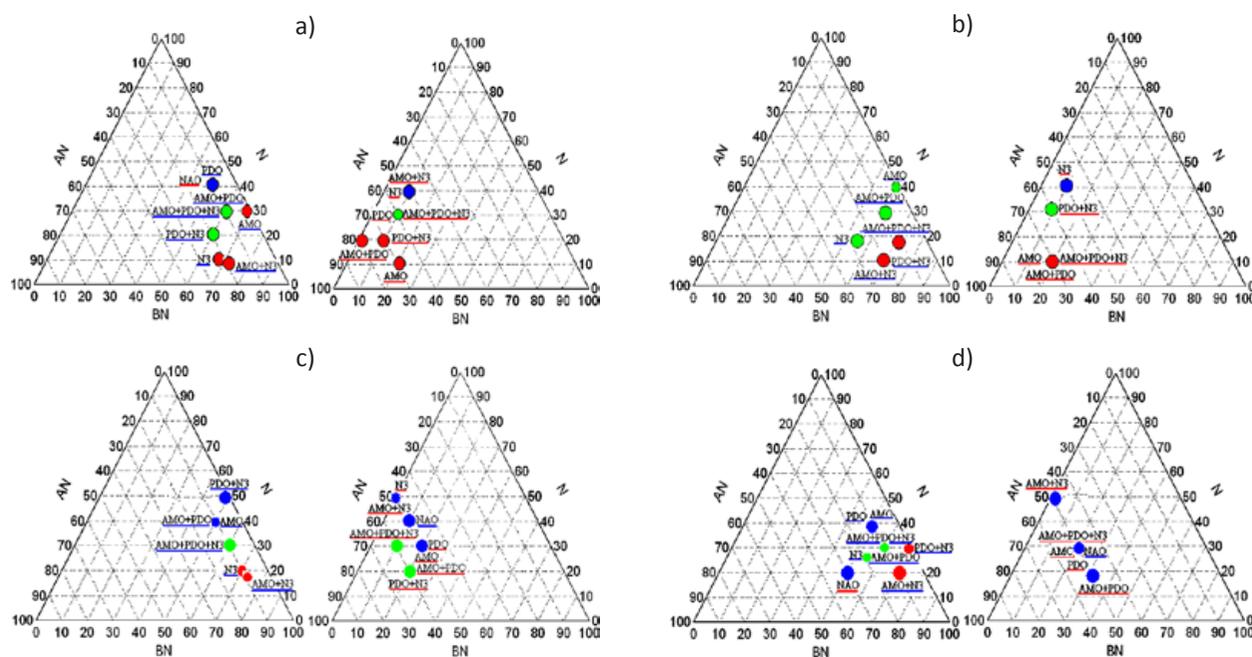


Figura 6. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Agosto, Setiembre y Octubre, usando el bimestre de Mayo y Junio (**a**) (**c**) y Junio y Julio (**b**) (**d**). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

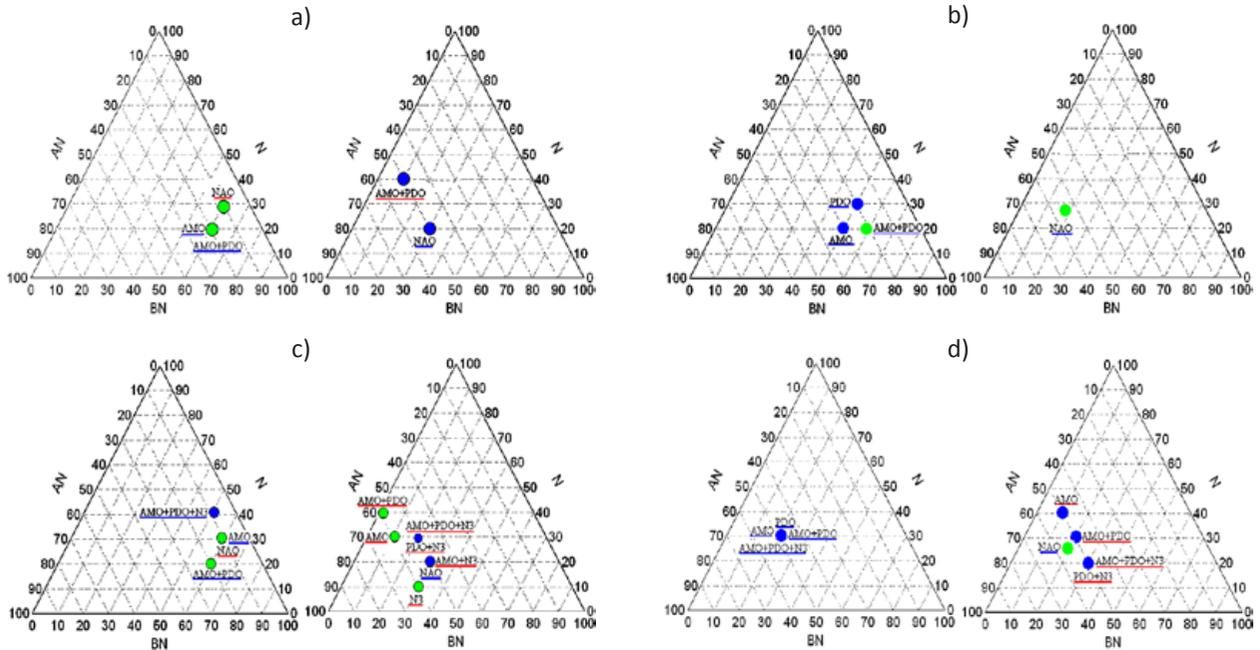


Figura 7. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Diciembre y Enero, usando el bimestre de Setiembre y Octubre (**a**)**(c)** y Octubre y Noviembre (**b**)**(d)**. Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

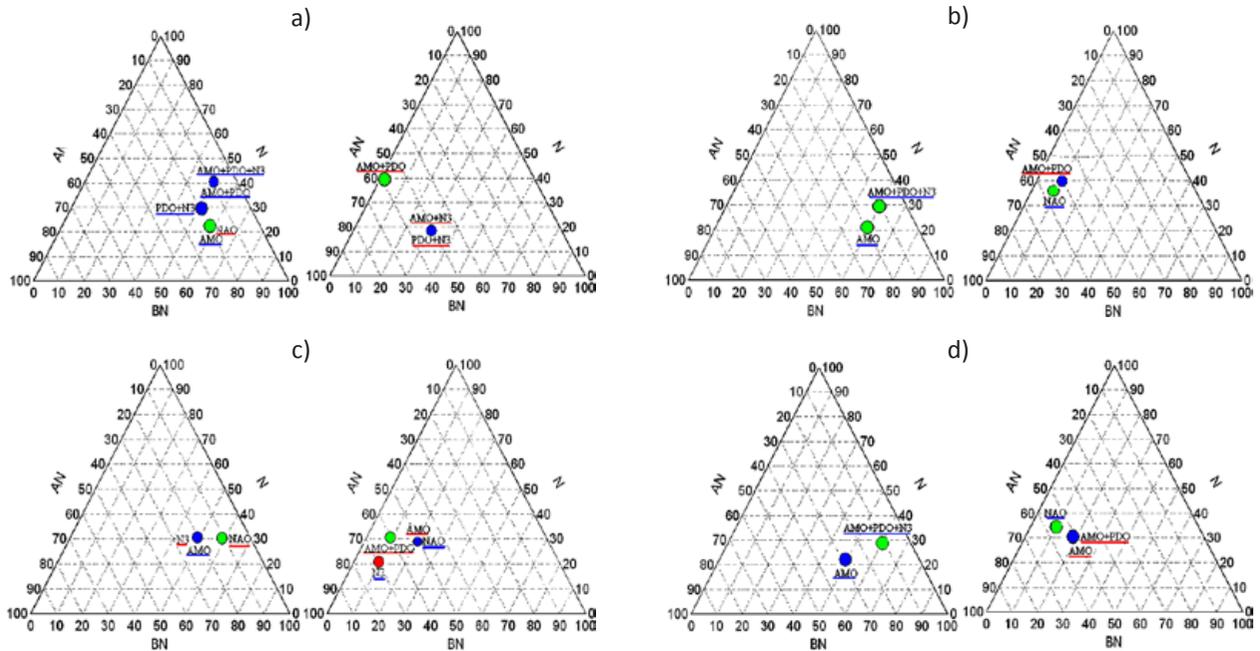


Figura 8. Predictores para la Temperatura Mínima, **a** y **b** (Máxima **c** y **d**) del período de Febrero y Marzo, usando el bimestre de Setiembre y Octubre (**a**) **(c)** y Octubre y Noviembre (**b**) **(d)**. Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

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

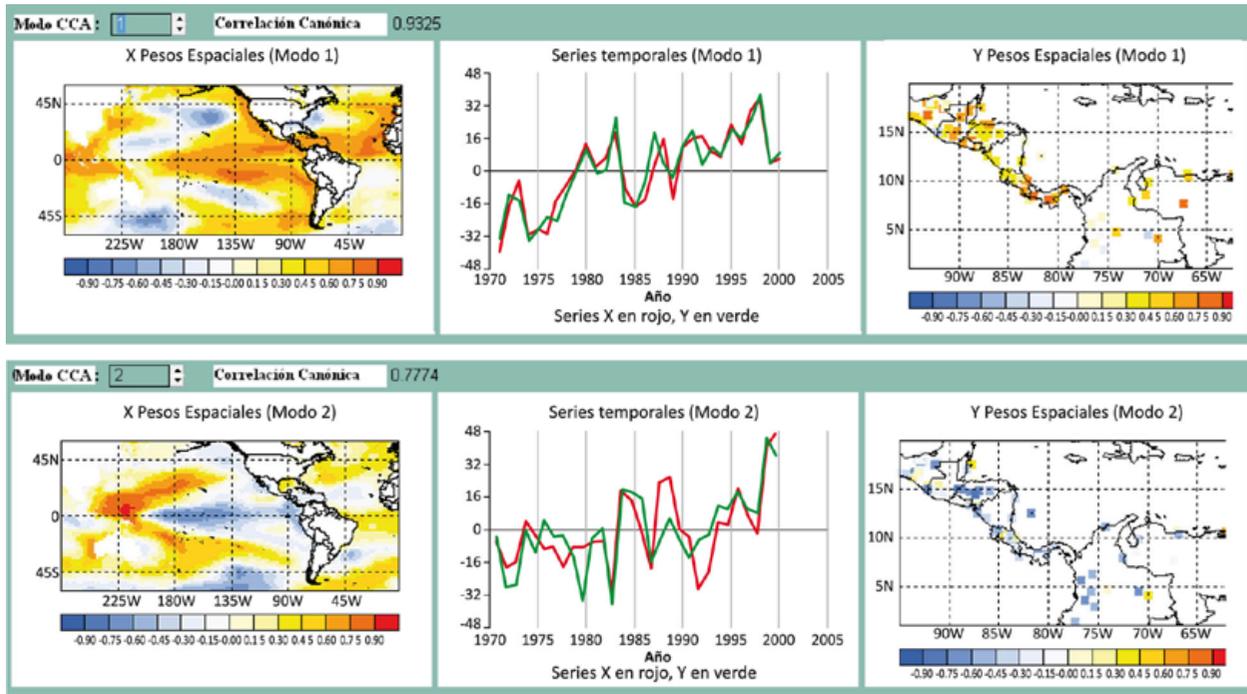


Figura 9. Modos canónicos para la temperatura mínima de Mayo, Junio y Julio.

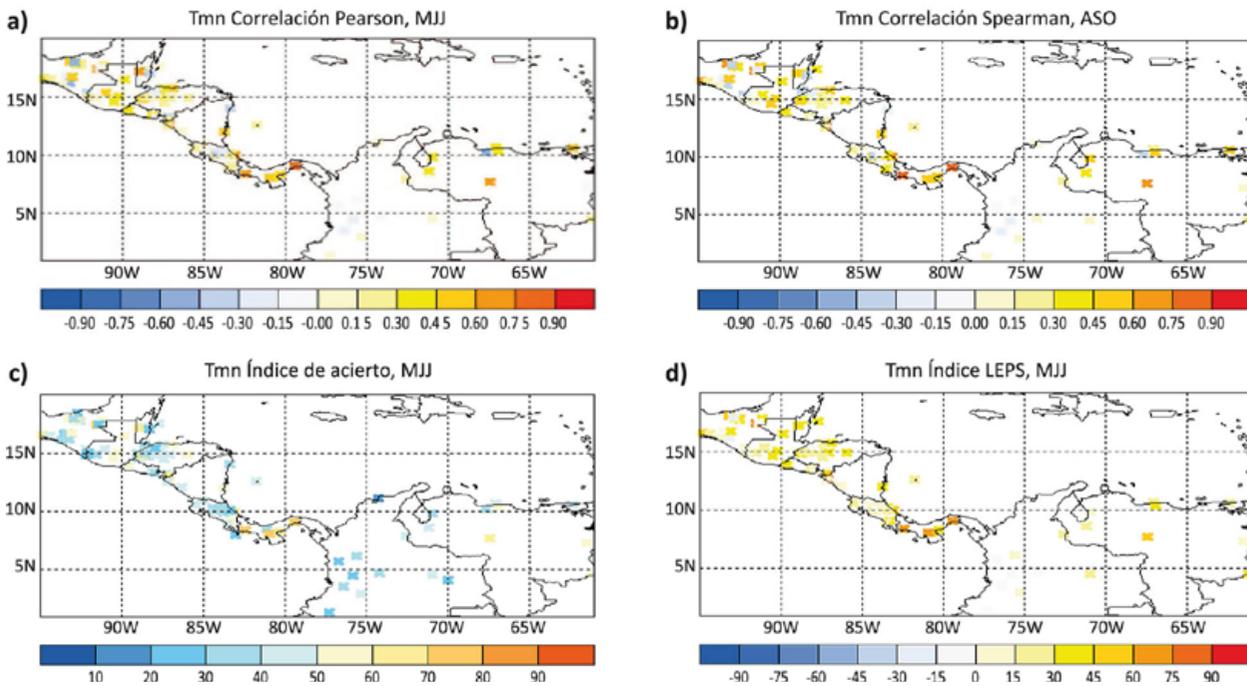


Figura 10. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

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

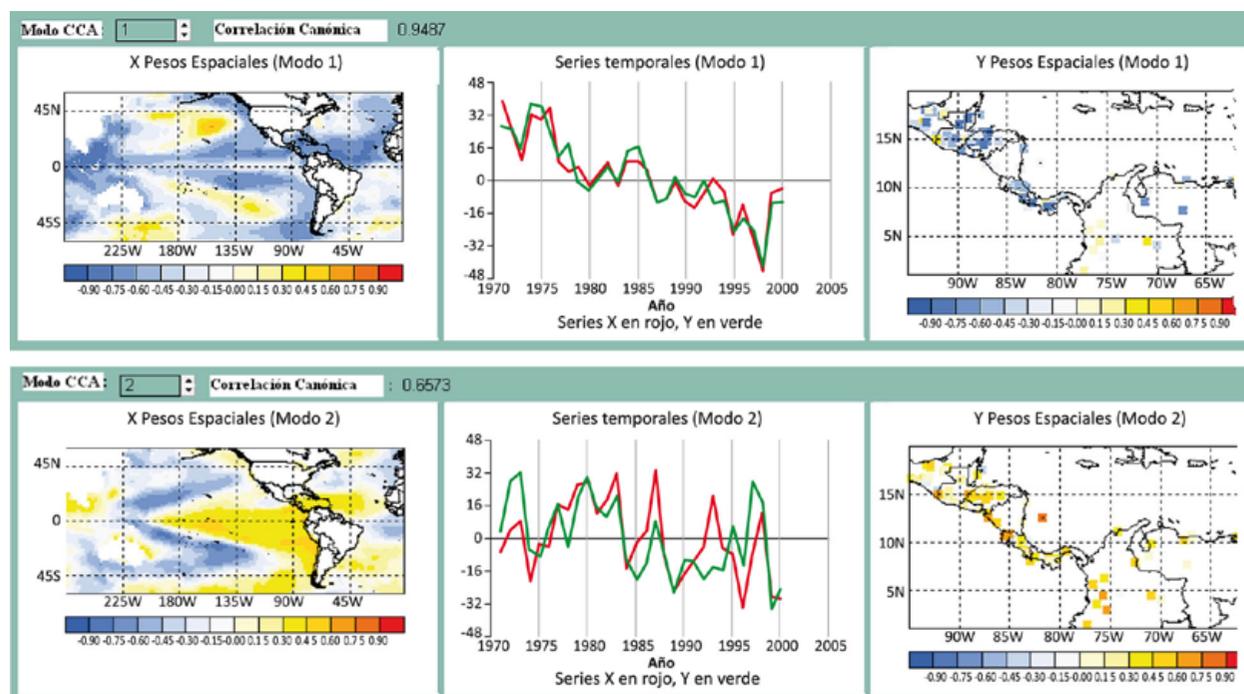


Figura 11. Modos canónicos para la temperatura mínima de Agosto, Setiembre y Octubre.

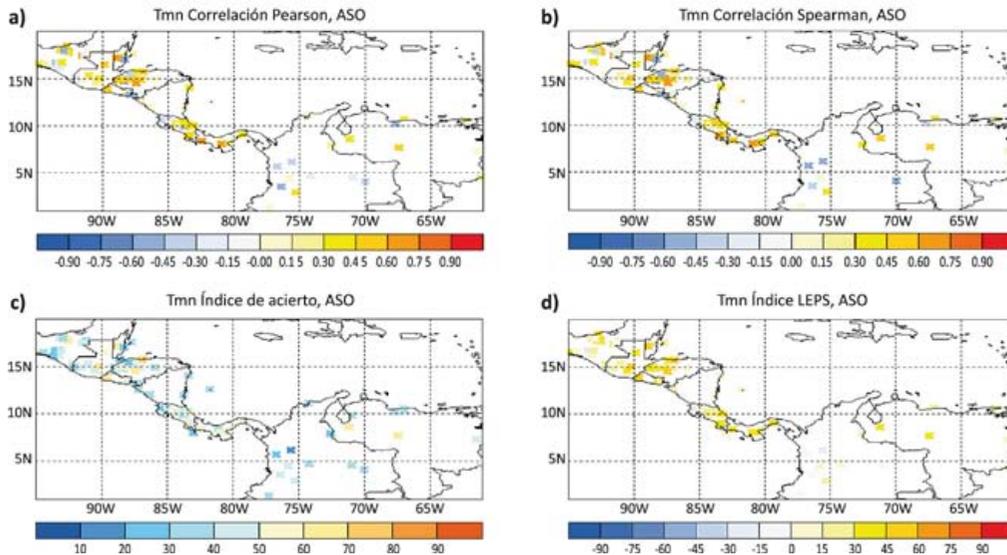


Figura 12. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

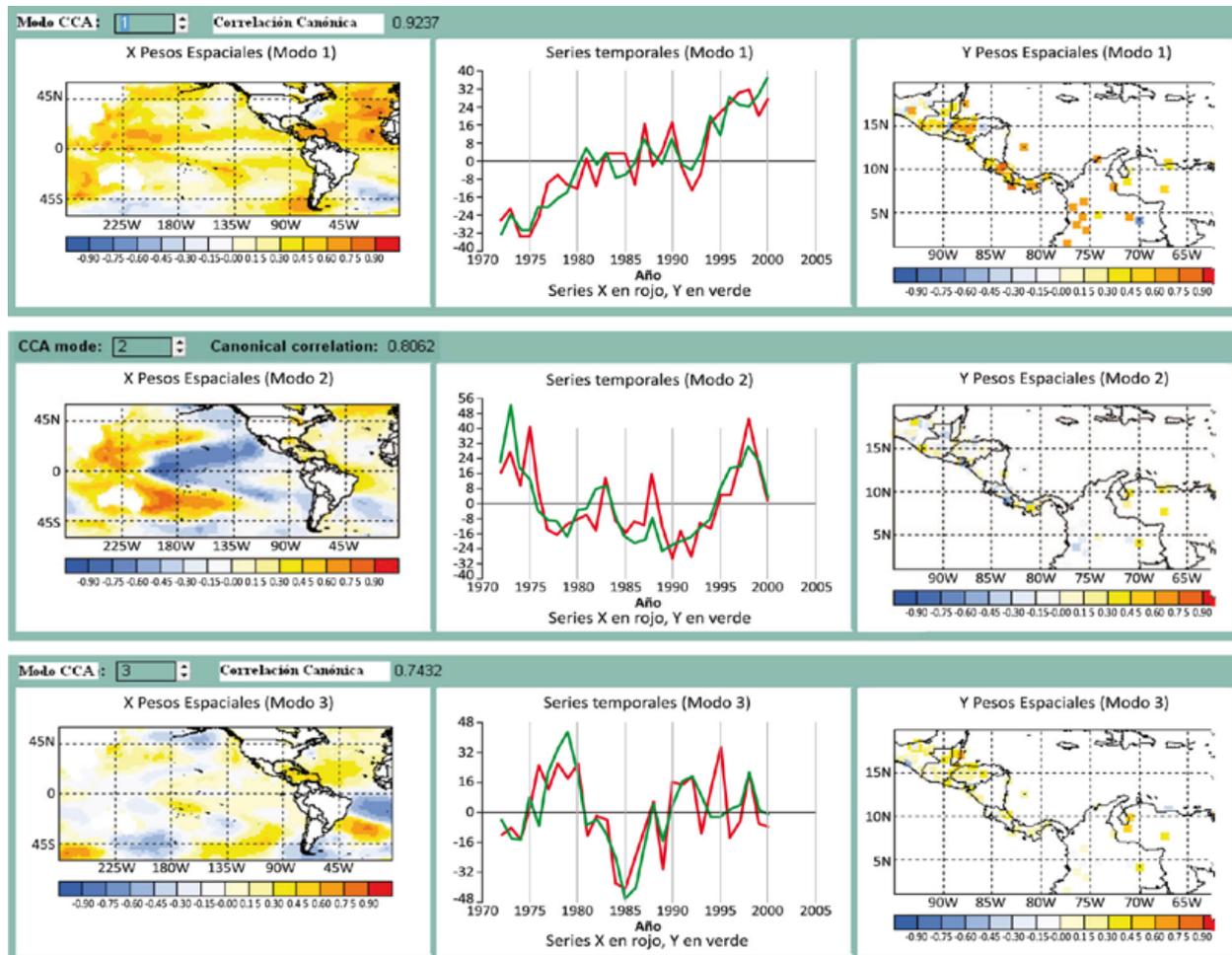


Figura 13. Modos canónicos para la temperatura mínima de Diciembre y Enero

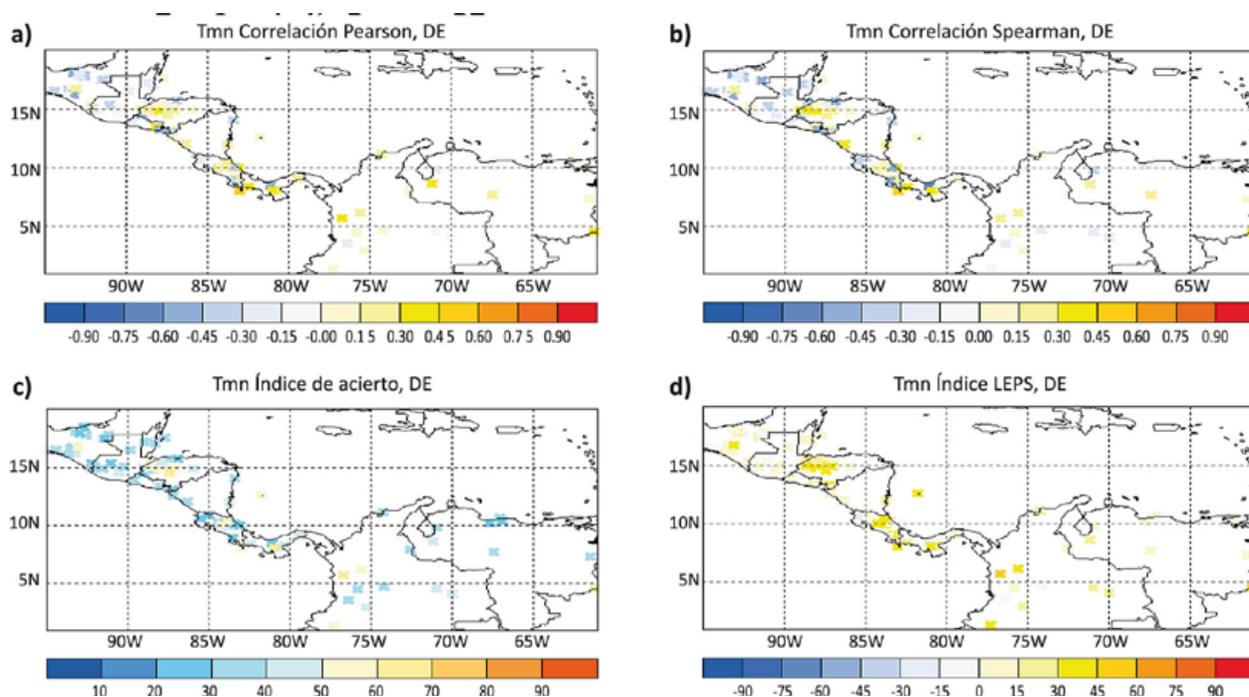


Figura 14. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del bimestre de Diciembre y Enero.

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_{min}.

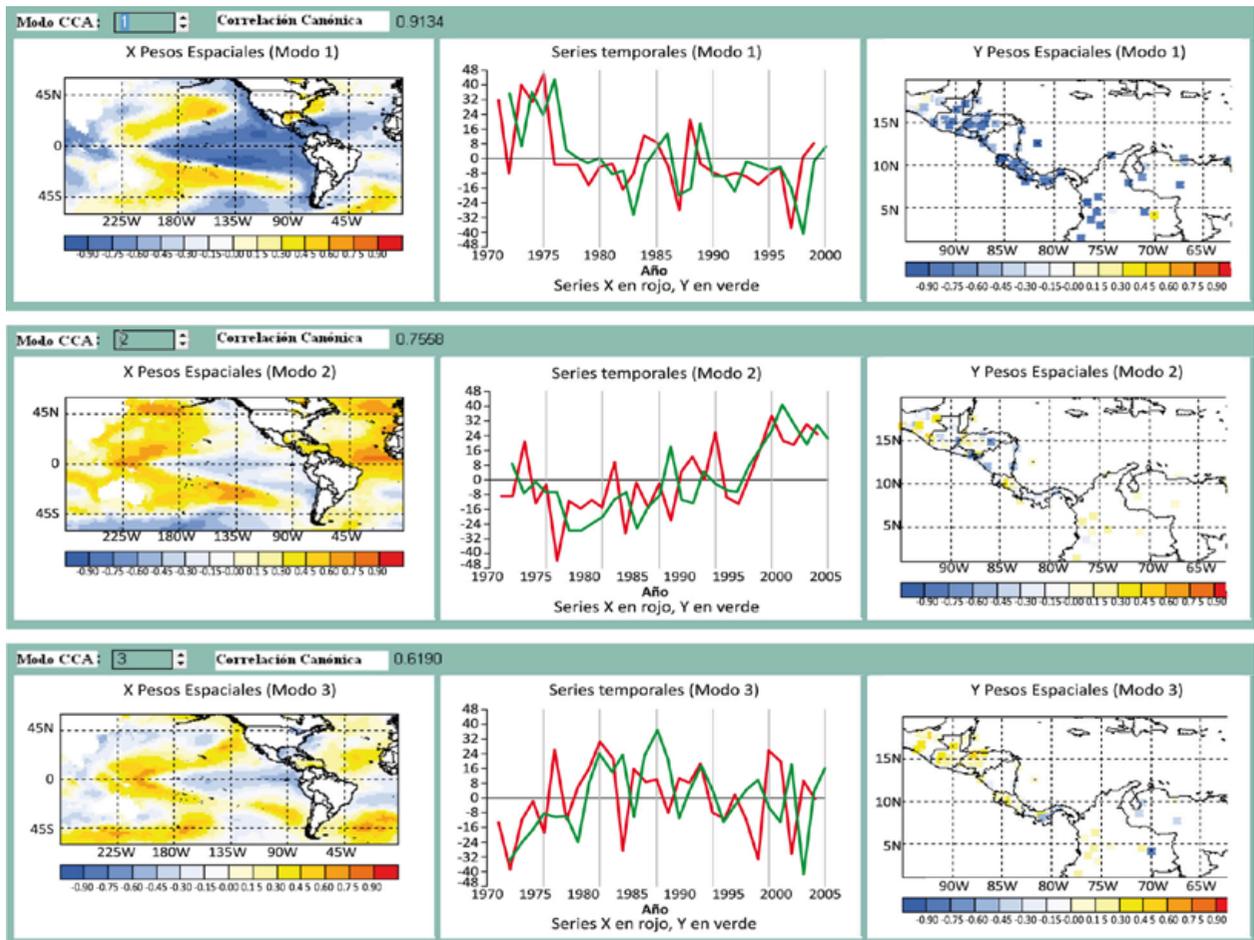


Figura 15. Modos canónicos para la temperatura mínima de Febrero y Marzo.

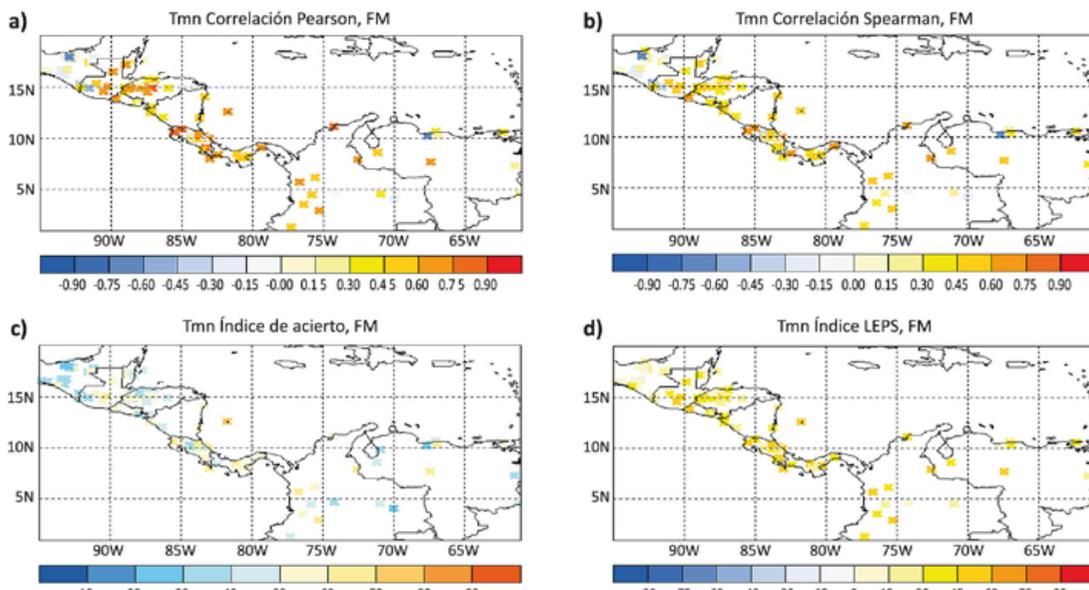


Figura 16. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura mínima del bimestre de Febrero y Marzo.

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

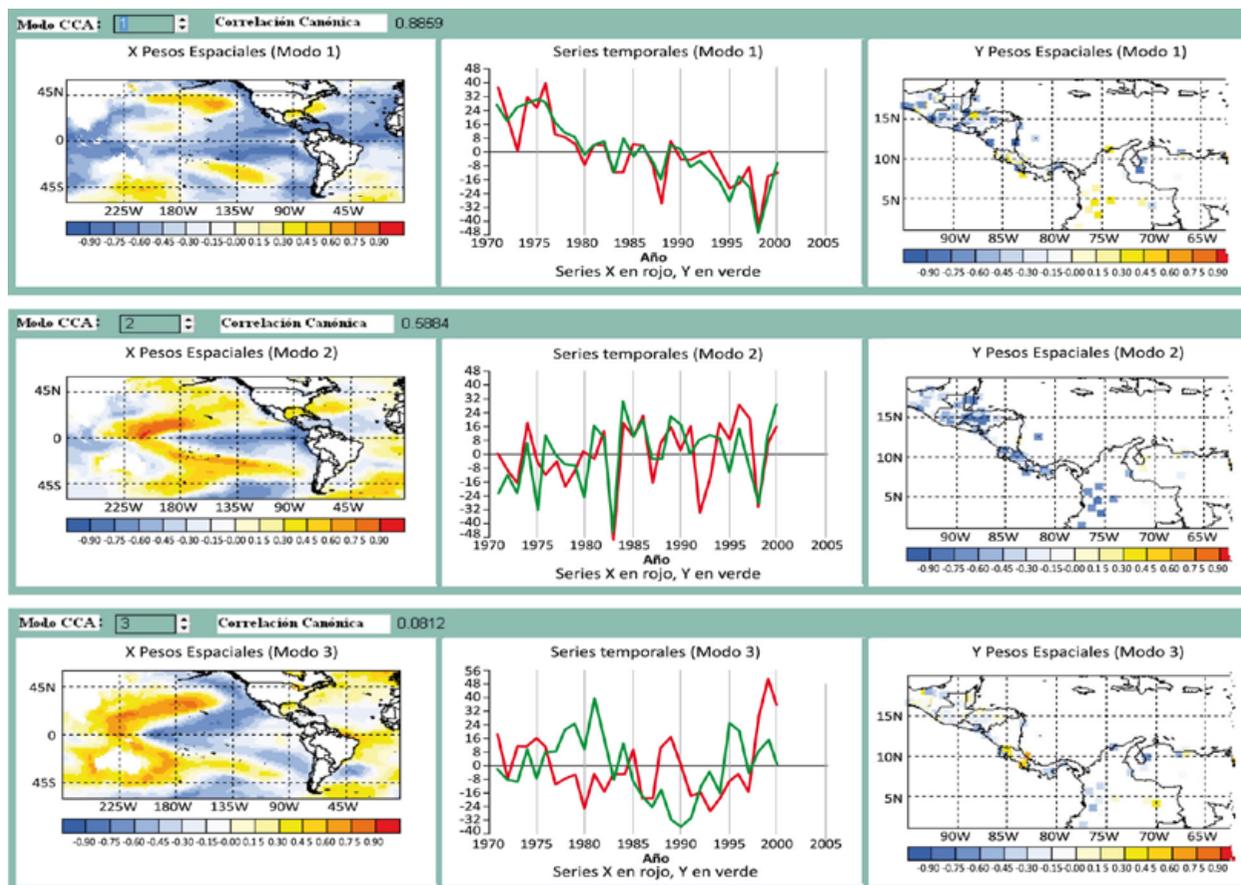


Figura 17. Modos canónicos para la temperatura máxima de Mayo, Junio y Julio.

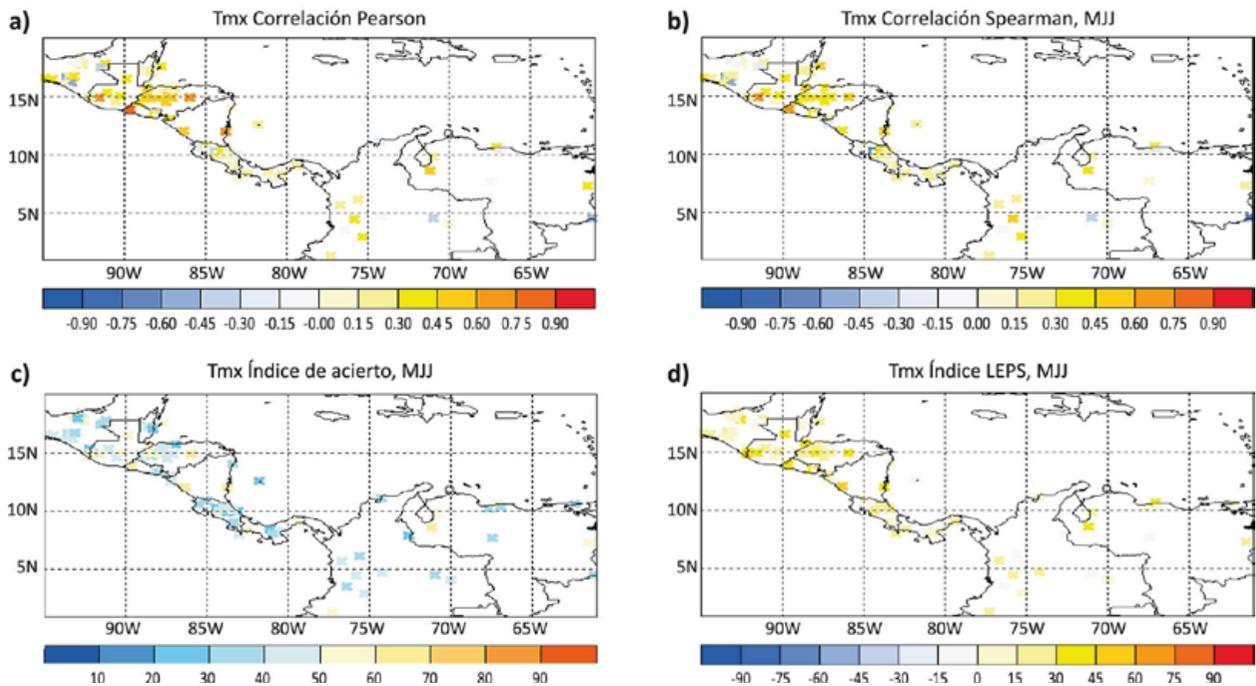


Figura 18. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del trimestre de Mayo, Junio y Julio.

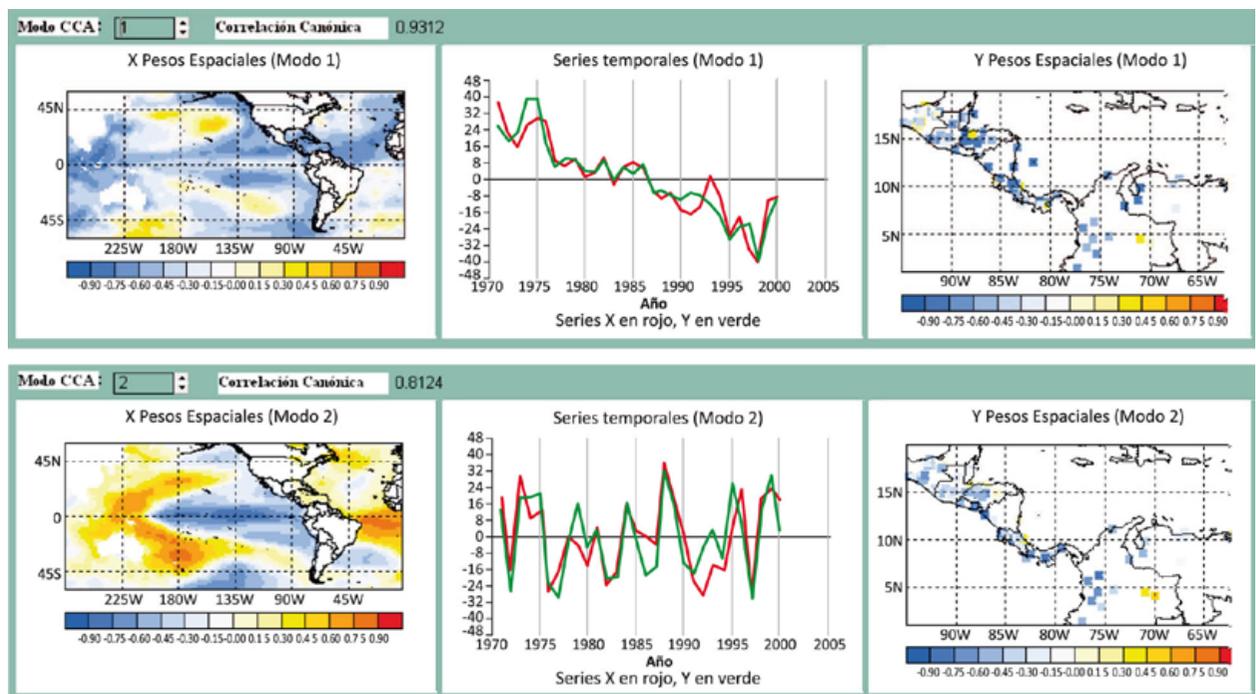


Figura 19. Modos canónicos para la temperatura máxima de Agosto, Setiembre y Octubre.

(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

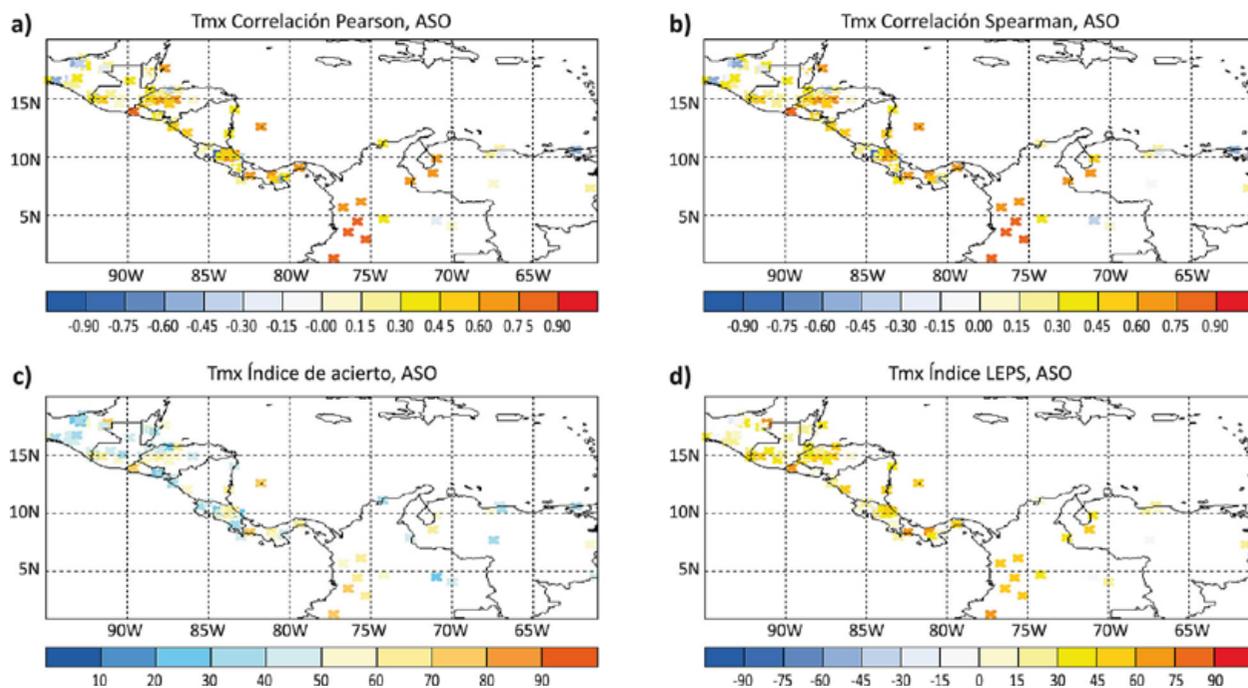


Figura 20. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre.

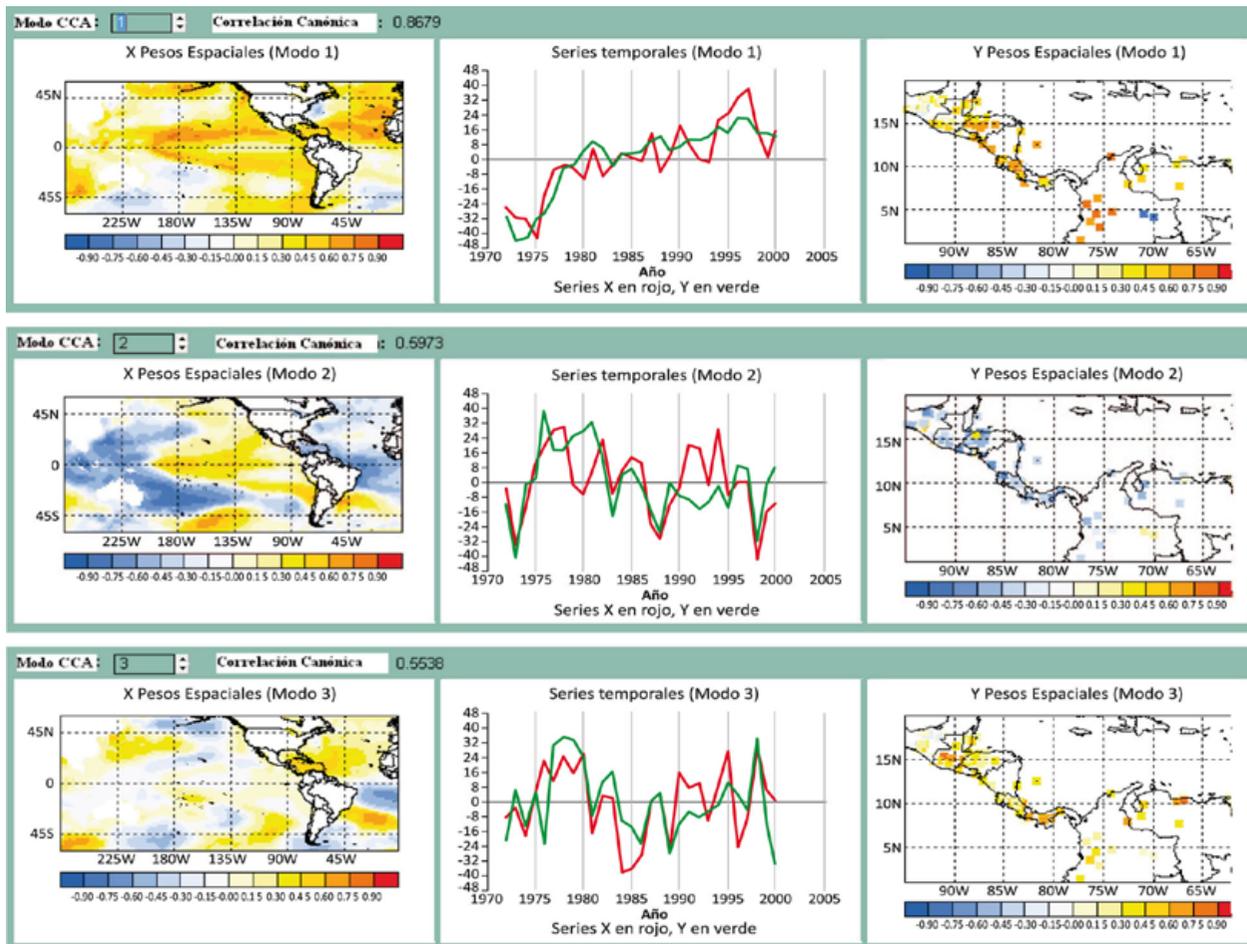


Figura 21. Modos canónicos para la temperatura máxima de Diciembre y Enero.

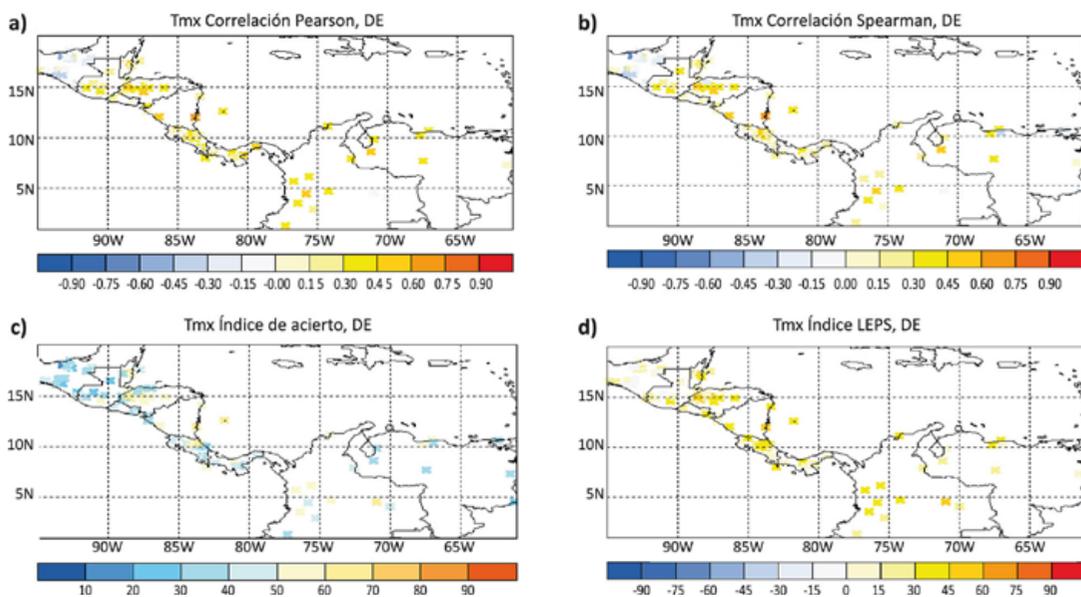


Figura 22. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del bimestre de Diciembre y Enero.

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

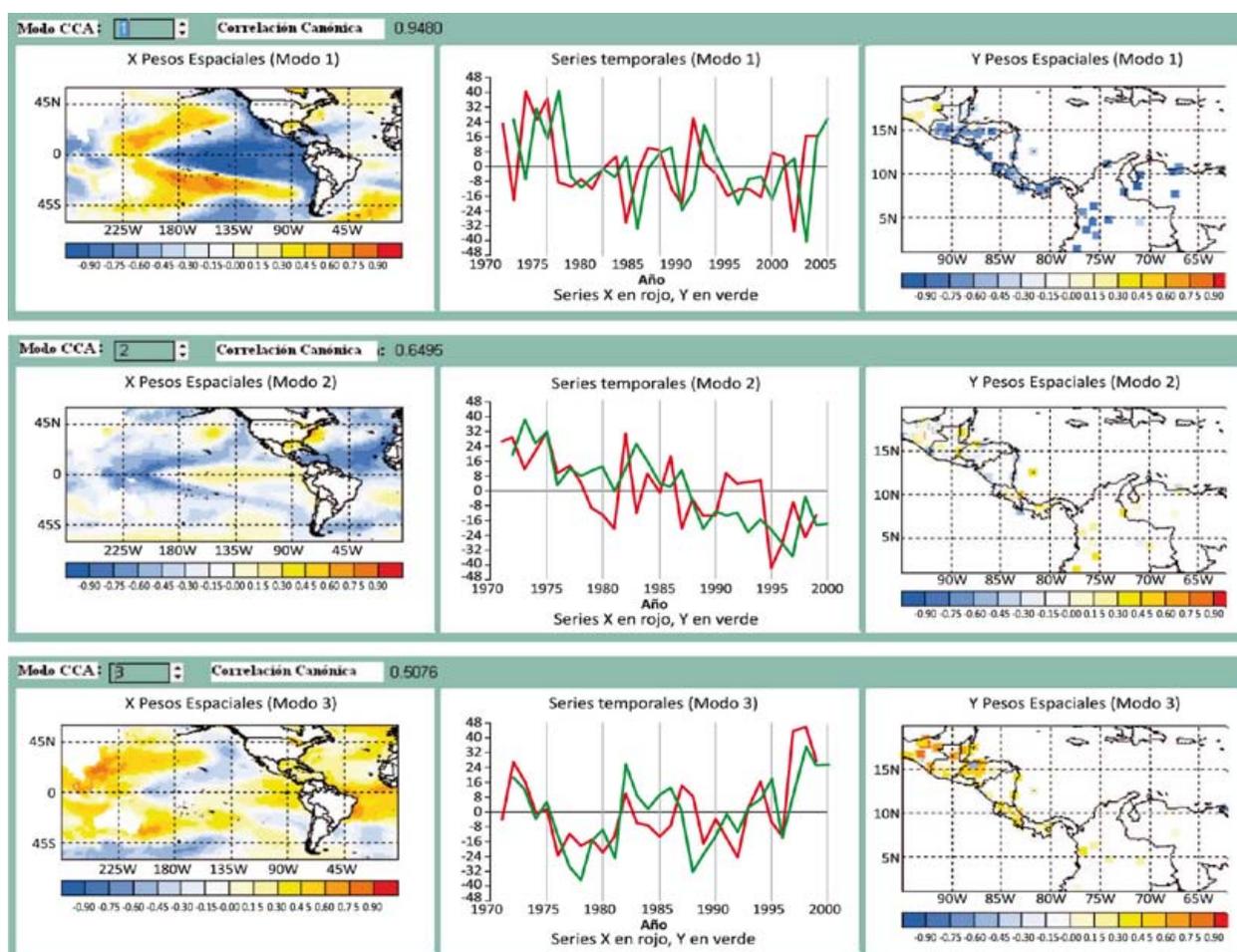


Figura 23. Modos canónicos para la temperatura máxima de Febrero y Marzo.

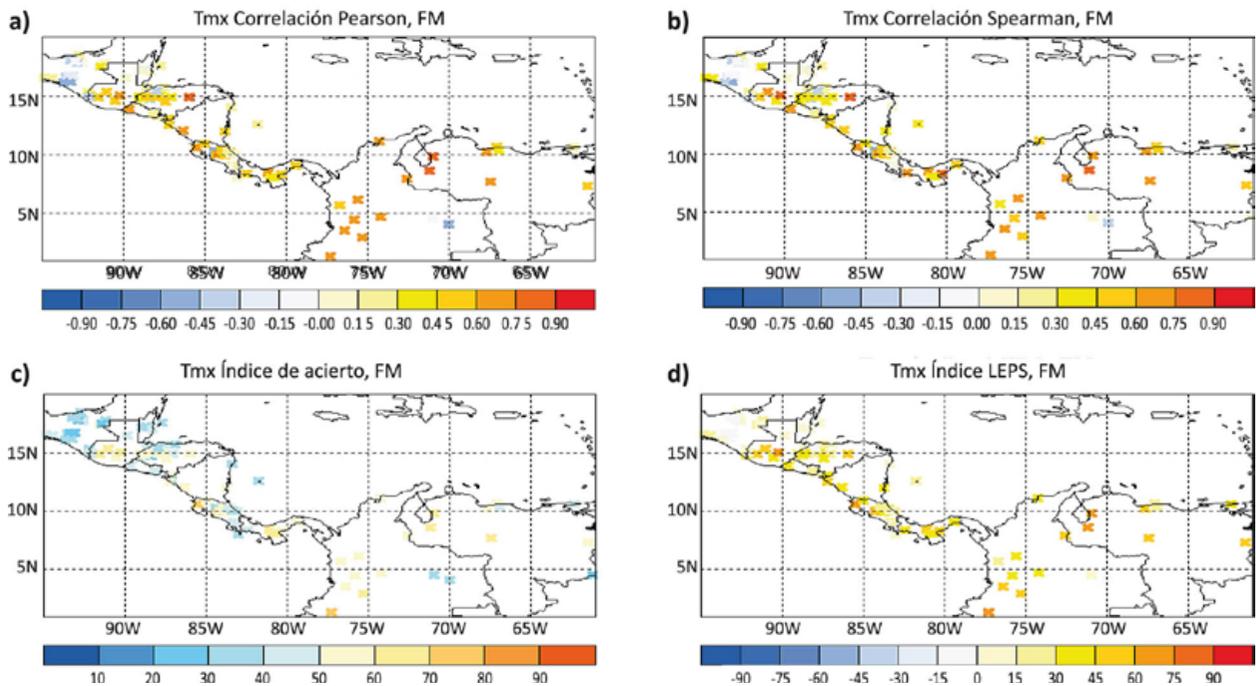


Figura 24. Correlación de Pearson **a)** Correlación de Spearman **b)** Índice de Acierto **c)** e Índice LEPS **d)** para la temperatura máxima del bimestre de Febrero y Marzo.

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.

Desarrollo de un software para el procesamiento y control de calidad semi-automático de datos meteorológicos horarios

JOSÉ LUIS ARAYA LÓPEZ¹
DANIEL SOTO CERVANTES²

Resumen

Se presenta el desarrollo, implementación y prueba del software MetCC, que facilita la revisión de la calidad de un gran número de series de tiempo meteorológicas. MetCC ha sido ideado para solventar las necesidades que se tienen en el Instituto Meteorológico Nacional, de contar con herramientas que permitan disminuir tiempo y costos en el procesamiento de cantidades crecientes de datos. MetCC es un conjunto de módulos y funciones acopladas, el cual permite obtener resultados de una forma más eficiente que con el uso de programas para series individuales. Su ventaja principal es que está diseñado para poder filtrar valores atípicos presentes en las series temporales para su posterior análisis y validación, evitando el trabajo rutinario de ejecución por parte del usuario, de modo que este pueda dedicar ese tiempo a análisis y validación de los datos. Diversas pruebas realizadas sugieren que MetCC simplifica el protocolo de control de calidad, al unificar los diversos algoritmos y programas desarrollados en otros lenguajes en una herramienta de trabajo.

PALABRAS CLAVE: CONTROL DE CALIDAD, CLIMATOLOGÍA, COMPUTACIÓN CIENTÍFICA, METEOROLOGÍA.

Abstract

We present MetCC, a quality-control software developed at the Costa Rican National Meteorological Institute. MetCC has been thought out to satisfy the need of filtering atypical values in data sets. MetCC includes routines that have been coupled in an unified system, which can be used either as part of a process or independently, depending on the needs of the analyst. It generates reports that extract atypical data based on the application of quality control algorithms. The software is endowed with the ability to operate on an arbitrary number of data sets, facilitating data processing and transformation for further analysis and validation. MetCC also incorporates procedures for filling time gaps, data manipulation and flagging. A number of tests suggest that MetCC can save valuable time and work, allowing the analyst to concentrate efforts on the evaluation aspect of the process.

KEYWORDS: QUALITY CONTROL, CLIMATOLOGY, SCIENTIFIC COMPUTING, METEOROLOGY.

1. Introducción

Con el crecimiento del número de dispositivos móviles, computadoras y sensores de diversa índole, el número de datos disponibles a diversos usuarios ha crecido vertiginosamente en todas las áreas del conocimiento y en particular en

la meteorología. De hecho, el término “data deluge” ha surgido para describir el dilema al que se enfrentan diversas organizaciones en cuanto a cómo almacenar, interpretar y traducir esta información voluminosa en conocimiento aplicado. Además, se está proponiendo un cuarto paradigma científico, orientado a uso intensivo de

- 1 Licdo. en Meteorología. Instituto Meteorológico Nacional. Departamento de Redes y Procesamiento de Datos. Correo electrónico: jaraya@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.
- 2 Técnico Especialista III en Meteorología. Instituto Meteorológico Nacional. Departamento de Redes y Procesamiento de Datos. Correo electrónico: dsoto@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616, ext. 209.

datos (Hey, Tansley & Tolle, 2009), contexto en el cual el uso del dato resulta imprescindible.

En el caso particular de la meteorología, el procesamiento de datos resulta primordial para responder a muchas de las interrogantes que surgen en esta disciplina, en particular en temas como la variabilidad climática y el cambio climático. Por eso resulta importante encontrar formas de recolectar, almacenar, procesar y analizar el dato de forma eficiente, particularmente en lo que a su calidad se refiere. Es de suma importancia para las instituciones, orientar y/o redirigir el tiempo que utilizan los analistas para desarrollar herramientas que mejoren la eficiencia del análisis del dato y les permita dedicarse al análisis de la información generada. Esto a su vez promueve una cultura de vigilancia continua sobre la calidad de la información.

El desarrollo e implementación de un software para el control de calidad, debería ser un aspecto metodológico inherente en el quehacer de los servicios meteorológicos e hidrológicos, así como de aquellas instituciones que gestionan datos. Gandin (1962, 1988) introduce el concepto del control objetivo de la calidad aplicada al campo meteorológico, lo cual sentaría las bases para la posibilidad del control de calidad usando soluciones computacionales.

Posteriormente, con el desarrollo de los recursos tecnológicos, se han venido presentando diversas propuestas en lo referente a software para el control de calidad, tal como lo proponen Wolfson, Erez & Alperson, (1978); Schmidlin, Wilks, McKay y Cember (1995); Gronell y Wijffels (2008).

Los principales centros de acopio del mundo cuentan con sistemas de control de calidad, tales como los descritos en Vejen et al. (2002), Gronell y Wijffels (2008) o el sistema MADIS (abreviatura para "Meteorological Assimilation Data ingest System") de la NOAA (<http://madis.noaa.gov/>).

Dada la existencia de software para el control de calidad, surge la pregunta de por qué se opta por

esta propuesta en particular. Una de las razones es, desarrollar la capacidad de resolver necesidades propias en términos de aplicaciones y productos. Otra razón es que aún no existe un proceso estándar internacional, que especifique como deben de llevarse a cabo los controles de calidad (Beltrano y Perini, 2004), dada las diferencias que existen en los diversos centros de acopio en términos de objetivos, servicios, recursos disponibles, parámetros, resolución y cantidades de datos acopiados.

En el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, en los últimos años se ha venido incrementando el número de estaciones meteorológicas automáticas en la red de estaciones. Anteriormente, la revisión y el procesamiento de los datos se hacían de forma visual, esto era necesario porque dentro de los sistemas de observación automatizados se introduce el problema del aislamiento del observador del proceso de medición, razón por la cual si no se desarrollan programas adecuados para probar la integridad del dato, la computadora va a procesar, transmitir y almacenar tanto datos válidos como erróneos (Brock y Richardson, 2001).

Dado lo anterior, surge la necesidad de plantear estrategias para poder procesar la información, de modo que pueda ser revisada y almacenada eficientemente. Resulta deseable también, que dicho procesamiento pueda efectuarse independientemente del número de estaciones meteorológicas que se adicionen a la red y que el procesamiento de datos pueda mantenerse a pesar de contar con una cantidad limitada de recurso humano. Parte de la solución a este problema, va dirigida en hacer un uso inteligente de los recursos tecnológicos y transferir a las computadoras el trabajo rutinario del analista. Es por eso que el Departamento de Redes y Procesamiento de Datos del IMN, ha optado por desarrollar una herramienta que unifique los algoritmos de control de calidad y las rutinas de procesamiento que se han venido utilizando desde el año 2008, el cual se ha convenido denominar MetCC y consiste en un

paquete de programas orientado al procesamiento y control de calidad de datos climáticos horarios. MetCC está orientado a satisfacer la necesidad de poder llevar a cabo de forma rutinaria el procesamiento de los datos almacenados en la base de datos oficial del IMN.

En este artículo se presenta la metodología de trabajo utilizada en el desarrollo de este producto, las consideraciones prácticas pertinentes, así como algunos resultados obtenidos al correr MetCC sobre un amplio conjunto de datos en resolución horaria de diversos parámetros meteorológicos, a fin de que el lector pueda enterarse de datos atípicos cuya detección se facilita usando esta herramienta. Para finalizar se presentan algunas conclusiones principales sobre el trabajo realizado.

2. Metodología

2.1. Algoritmos de control de calidad utilizados

Para incluir los diversos algoritmos de control de calidad en MetCC, se debió de efectuar un análisis preliminar de qué algoritmos pueden servir para diversos parámetros meteorológicos de forma simultánea (los valores umbrales de rechazo del dato de los diversos algoritmos pueden ingresarse por medio de una función o método adecuada, dependiendo de la variable meteorológica). El lector puede consultar Shafer, Friebrich, Arndt, Fredrickson y Hughes (2000), Meek y Hatfield (2001); Graybeal, DeGaetano y Eggleston (2004); Liljegren et al. (2009); Jiménez González-Rouco, Navarro, Montávez, y García-Bustamante 2010), para una descripción de diversos algoritmos de control de calidad que se pueden aplicar a datos meteorológicos. Los algoritmos de control de calidad incorporados a MetCC son también discutidos en Araya (2007), Araya y Alfaro (2008a, 2008b). De manera general, los algoritmos de control de calidad que se han programado en MetCC pueden clasificarse de la siguiente manera:

- a) **Pruebas de cotas:** verificación de que los datos horarios almacenados superan o no los valores históricos almacenados en la base de datos espejo (base de datos con un control de calidad sobre estos).
- b) **Pruebas de saltos:** se aplican a la temperatura superficial del aire, humedad relativa y presión atmosférica superficial. Cuando el valor absoluto del salto excede el valor umbral, entonces el dato es aislado para una evaluación detallada.
- c) **Pruebas de anomalías:** se usan para la temperatura superficial del aire, la humedad relativa y la presión atmosférica superficial, se efectúan cálculos de la desviación del dato con respecto al promedio horario. Esto ayuda a la detección de anomalías positivas o negativas inconsistentes.
- d) **Pruebas de consistencia:** son pruebas tales como la consistencia entre el flujo total de irradiancia y los valores extremos de irradiancia para una hora en particular. Para el parámetro viento se ha aplicado una serie de algoritmos de consistencia discutidos en DeGaetano (1997).
- e) **Pruebas de persistencia:** se aplican a los todos los parámetros meteorológicos, ya que permiten detectar secuencias de valores repetidos que pudieran no estar correctos.
- f) **Generación de estadísticos mensuales:** capacidad de generar estadísticos de los diversos parámetros meteorológicos en resolución mensual, esto con el fin de determinar posibles inconsistencias que pudieran deducirse de su análisis.
- g) **Productos gráficos:** la visualización gráfica de la información resulta fundamental en cualquier análisis empírico de datos.

2.2. Datos utilizados

MetCC fue validado con un amplio conjunto de datos provenientes de la red de estaciones meteorológicas automáticas del IMN (ver [cuadro 1](#)). En dicho cuadro se muestran las estaciones meteorológicas tanto abiertas como cerradas a las

Cuadro 1. Lista de estaciones meteorológicas utilizadas para la prueba de MetCC

NÚMERO	CUENCA	ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
69597	69	597	BOCA TAPADA	10,68	-84,23	60
69633	69	633	COMANDO LOS CHILES	11,02	-84,70	40
69647	69	647	FINCA BRASILIA DE LORO	10,97	-85,33	380
69649	69	649	FINCA EL ENSAYO	10,95	-85,40	540
69651	69	651	VILLA BLANCA	10,20	-84,48	1080
69655	69	655	LOS LIRIOS	10,75	-84,57	1080
69661	69	661	CIUDAD QUESADA	10,30	-84,42	700
69677	69	677	LAGUNA, CAÑO NEGRO	10,90	-84,78	37
69679	69	679	UPALA	10,87	-85,07	60
69681	69	681	LA REBUSCA	10,48	-84,02	40
69697	69	697	BIOLÓGICA LA SELVA DE SARAPIQUÍ	10,43	-84,00	40
69699	69	699	BETANIA, CUTRIS	10,64	-84,38	100
69701	69	701	ITCR, SAN CARLOS	10,36	-84,51	183
69709	69	709	SAN GERARDO, LA VIRGEN DE SARAPIQUÍ	10,41	-84,15	210
71015	71	15	CANTA GALLO	10,48	-83,67	20
71021	71	21	LA RITA, ROXANA CENTRO	10,25	-83,75	120
72141	72	141	CUAJINIQUIL TIERRA	10,95	-85,70	60
72149	72	149	SAN JOSÉ, PINILLA	10,25	-85,83	15
72153	72	153	SANTA ELENA, LA CRUZ	10,92	-85,61	1700
72157	72	157	FINCA LA CEIBA	10,10	-85,32	58
72159	72	159	PAQUERA	9,82	-84,93	10
72161	72	161	SANTA ROSA	10,83	-85,62	285
72163	72	163	SANTA ROSA 2	10,84	-85,62	315
72165	72	165	NICOYA CENTRO	10,14	-85,45	130
73123	73	123	ITCR, CARTAGO	9,85	-83,90	1360
73129	73	129	RECOPE, OCHOMOGO	9,88	-83,93	1546
73137	73	137	VOLCAN IRAZÚ	9,97	-83,83	3060
73141	73	141	PACAYAS	9,90	-83,80	1735
73143	73	143	VOLCÁN TURRIALBA	10,02	-83,77	3343
73147	73	147	POCOCÍ, GUAPILES	10,21	-83,77	253
73149	73	149	MARAVILLA , JUAN VIÑAS	9,89	-83,74	1181
74051	74	51	AEROPUERTO LIBERIA OESTE 07	10,58	-85,53	70
74053	74	53	SANTA CRUZ	10,28	-85,58	40
74061	74	61	EL CORRAL, PALO VERDE	10,35	-85,35	10
74063	74	63	MANGARICA, LLANO LA CRUZ, LIBERIA	10,60	85,45	135
76055	76	55	HACIENDA MOJICA	10,45	-85,15	33
76057	76	57	PARQUE NACIONAL PALO VERDE	10,34	-85,34	9
76059	76	59	HACIENDA TABOGA, CAÑAS	10,35	-85,18	29
78027	78	27	PUNTARENAS	9,97	-84,82	3

Continuación de cuadro I

NÚMERO	CUENCA	ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
81005	81	5	AEROPUERTO DE LIMÓN	9,95	-83,02	5
84000	84	0	MUSEO NACIONAL, SAN JOSÉ	9,93	-84,08	1160
84124	84	124	SAN LUIS, POAS	10,12	-84,30	1360
84139	84	139	CIGEFI	9,93	-84,03	1210
84141	84	141	IMN, ARANJUEZ	9,93	-84,07	1181
84143	84	143	OROTINA	9,88	-84,50	160
84145	84	145	ESC. CENTROAMERICANA GANADERÍA	9,92	-84,37	390
84167	84	167	BARRIO SAN JOSÉ, ATENAS	10,00	-84,40	680
84169	84	169	JUAN SANTAMARÍA	9,98	-84,17	913
84181	84	181	ISTARÚ	9,88	-83,97	1680
84187	84	187	FABIO BAUDRIT	10,00	-84,25	840
84189	84	189	LAGUNA, FRAIJANES	10,13	-84,18	1720
84191	84	191	RECOPE, LA GARITA	10,00	-84,28	740
84195	84	195	AEROPUERTO PAVAS OESTE	9,97	-84,13	997
84197	84	197	SANTA BARBARA	10,03	-84,15	1070
84199	84	199	BELEN	9,98	-84,19	926
84205	84	205	GETSEMANÍ, HEREDIA	10,03	-84,10	1389
84207	84	207	PATIO DE AGUA, CORONADO	9,98	-83,97	1690
84225	84	225	UTN, Balsa ATENAS	9,94	-84,38	437
85021	85	21	HITTOY CERERE	9,67	-83,02	170
85023	85	23	MANZANILLO	9,63	-82,65	80
87013	87	13	SIXAOLA	9,52	-82,63	10
88035	88	35	FRAILES	9,77	-84,07	1600
88041	88	41	LA LUCHA	9,72	-83,98	1880
88047	88	47	LA LUCHA 2	9,73	-84,00	1740
90011	90	11	QUEPOS	9,42	-84,17	6
90013	90	13	FINCA DAMAS	9,48	-84,20	6
94013	94	13	CERRO BUENAVISTA	9,56	-83,75	3400
98075	98	75	LAS BRISAS, SAN VITO	8,87	-82,88	1040
98079	98	79	LA LINDA, PEREZ ZELEDÓN	9,35	-83,63	750
98087	98	87	PINDECO	9,13	-83,33	397
98091	98	91	CHIRRIPO	9,45	-83,50	3440
98095	98	95	ALTAMIRA	9,02	-83,00	1370
98103	98	103	ESTACIÓN BIOLÓGICA LAS CRUCES	8,79	-82,96	1210
100003	100	3	GOLFITO	8,63	-83,16	6
100615	100	615	LA PALMA, PALMAR SUR	8,95	-83,35	16
100631	100	631	COTO 47	8,60	-82,98	8
100633	100	633	FINCA EL PATIO, PUERTO JIMENEZ	8,60	-83,43	8
100641	100	641	COOPEAGROPAL, LAUREL	8,47	-82,85	16
100643	100	643	RÍO CLARO	8,67	-83,06	45

que se les ha efectuado el control de calidad. La ubicación de las diversas estaciones meteorológicas en todo el territorio costarricense se presenta en la [figura 1](#). Se puede notar la variedad en altitudes que se pueden encontrar, las cuales van desde el nivel del mar hasta los 3.440 metros aproximadamente. Algunas de estas estaciones no contenían datos en los periodos analizados, ya que habían sido clausuradas. De igual manera, no necesariamente todas generan datos de los parámetros meteorológicos considerados en este trabajo. Los periodos elegidos se definieron en virtud de los datos con control de calidad almacenados en la

base de datos oficial del IMN (instancia de la base de datos la cual se denomina en este documento “base espejo”). Con el fin de llevar a cabo una actualización, se eligieron los siguientes parámetros meteorológicos horarios en los siguientes períodos:

- Temperatura superficial del aire (abril del 2010 a mayo del 2013).
- Humedad relativa (enero del 2007 a mayo del 2013).
- Irradiancia (enero del 2009 a julio del 2013).
- Precipitación (enero del 2012 a julio del 2013).
- Viento (enero del 2008 a octubre del 2013).

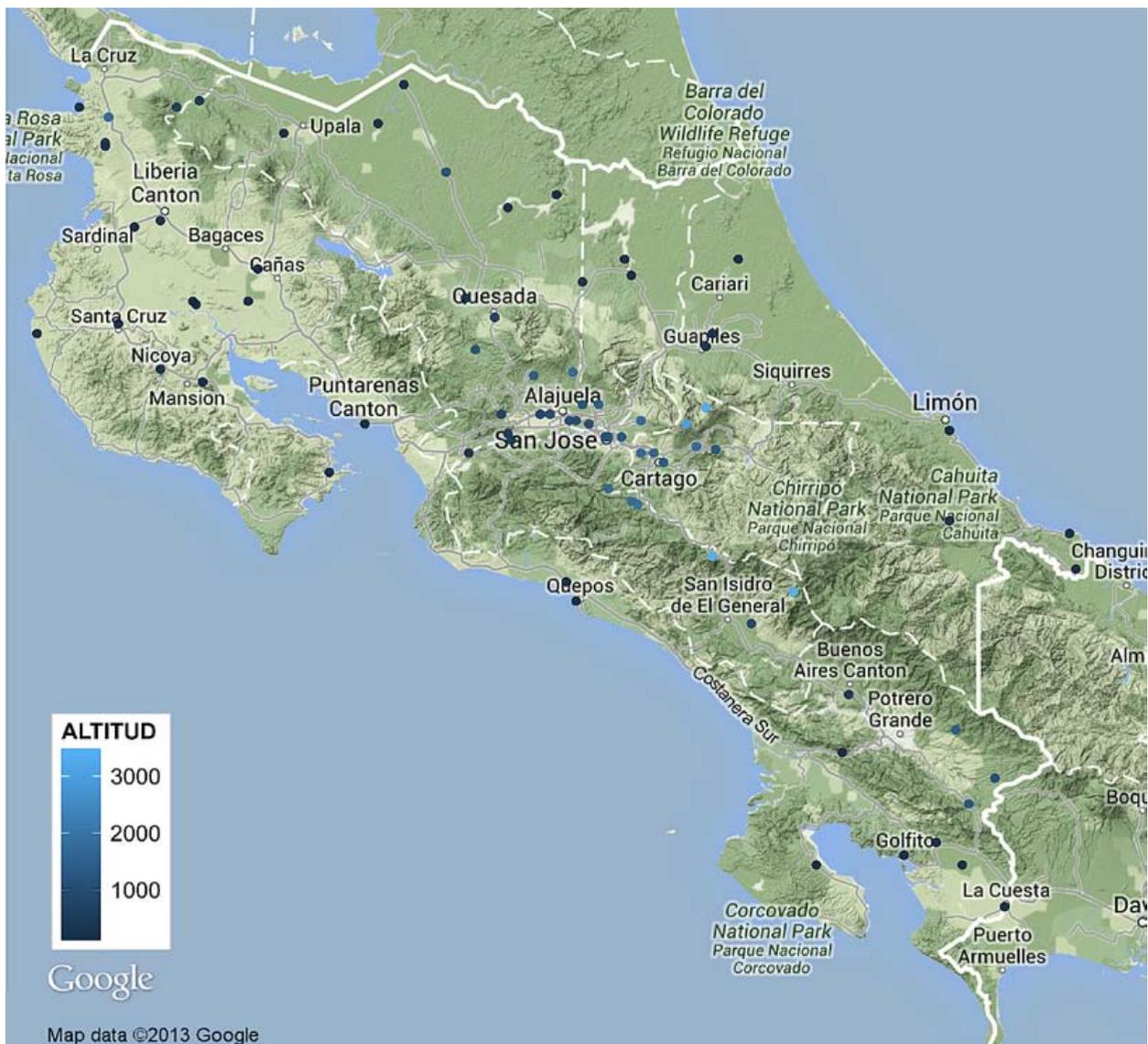


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas analizadas.

2.3. Características generales de MetCC

Para el desarrollo de los programas de control de calidad se hizo uso del software Python, particularmente de los módulos Numpy, Scipy, Matplotlib y PyQt. Tosi (2009), Vangast (2012) y Langtangen (2008) muestran ejemplos de las capacidades de dicho software. Python implementó en el IMN en el año 2009.

Se ha procurado que este paquete de programas cuente con las siguientes propiedades:

- a) Desarrollado en un programa de fuente abierta.
- b) Que pueda ser ejecutado sobre un número arbitrario de series temporales.
- c) Que utilice un lenguaje de programación intuitivo, claro, usando un código fácil de comprender y seguir por parte del equipo de desarrollo.
- d) Que el programa de desarrollo utilizado incentive la productividad e integración de diversas rutinas, así como aplicar un paradigma de programación moderno que permita un mantenimiento y mejoramiento de la herramienta.
- e) Estructura de diseño de software que permita la integración de futuros algoritmos de control de calidad.
- f) Acceso simple e intuitivo.
- g) Que la herramienta pueda implementarse en diversos sistemas operativos, tales como Windows y Linux.

En cuanto a las funcionalidades, estas van orientadas a satisfacer tres necesidades concretas:

- a) **Formato y edición de archivos de datos:** dentro del procesamiento de datos es necesario extraer datos de la base oficial y llevar a cabo diversas operaciones de eliminación de encabezados, extracción de columnas específicas, cambio de formato de datos de archivo de texto a formato de valores

separados por coma (“csv”) y marcación de datos atípicos.

- b) **Relleno de ejes temporales:** con el fin de garantizar que las series temporales tengan las mismas dimensiones, el procesamiento y control de calidad de los datos incluye completar los ejes temporales de las series. Muchas veces los datos extraídos de la base de datos oficial presentan brechas de datos faltantes, que no están referenciadas temporalmente. Completar el eje de tiempo significa detectar estas brechas y asignarles código de dato faltante a los datos no registrados. Esto se lleva a cabo para cualquier cantidad de series de datos, a partir de una fecha inicial y final definida para todas las series.
- c) **Controles de calidad de datos:** los datos son incorporados en la carpeta de trabajo de MetCC y las rutinas de control de calidad se ejecutan sobre un número arbitrario de archivos de datos horarios. De la ejecución de estos controles de calidad se generan reportes de los diversos algoritmos de control de calidad, que se aplican según el parámetro meteorológico analizado.

En la [figura 2](#) se muestran las diferentes etapas del procesamiento de datos horarios. Éstos son extraídos de la base de datos oficial del IMN, se eliminan los encabezados y se completan los ejes temporales, se efectúan los controles de calidad según el parámetro meteorológico seleccionado para el análisis.

Después de la ejecución de MetCC se efectúa un análisis de los reportes generados. En esta etapa el analista, luego de un proceso de análisis y validación de los datos atípicos generados, aísla los valores atípicos para todas las estaciones, genera un archivo de datos con los valores atípicos y utiliza una rutina de marcación (OMM, 1992) en la que los indicadores de alerta son incluidos en las series (véase Araya, 2007). La evaluación manual de los datos atípicos es recomendable y necesaria debido a que con ello se evita remover

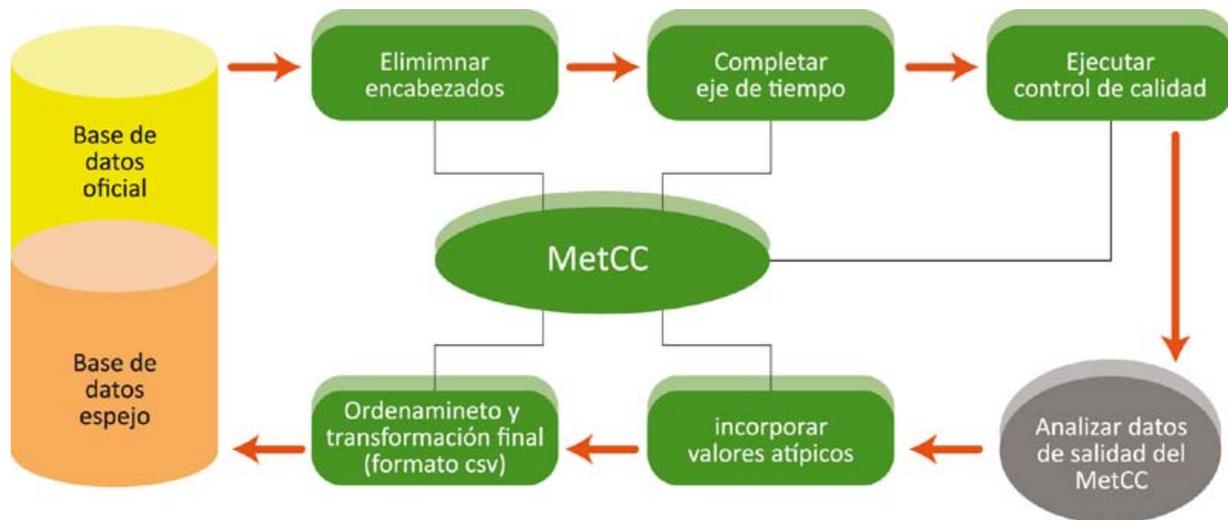


Figura 2. Fases del procesamiento y control de calidad efectuado.

de forma automática valores válidos del conjunto de datos (Kunkel, et al., 2005). A la hora de verificar manualmente los resultados, se ha definido una sistema de marcación de los valores atípicos detectados los cuales se asignan a los datos que no han pasado los criterios del control de calidad (OMM, 1992). Finalmente, estos datos con control de calidad son importados a la base espejo.

La figura 3 muestra el conjunto de carpetas que componen las diferentes salidas de MetCC. El

programa efectúa una serie de operaciones sobre los datos de forma independiente, y las salidas a dichos procesos van siendo almacenadas en diversas carpetas. Se puede observar que se cuenta con una carpeta general denominada “MetCC-GUI”, la cual da acceso al paquete. Dentro de esta carpeta se tienen otras cuatro, una de ellas destinada al almacenamiento de los datos que se desean procesar. La carpeta “datos_modif” está destinada para ciertos procesos de transformación de archivos, tales como la rutina para completar

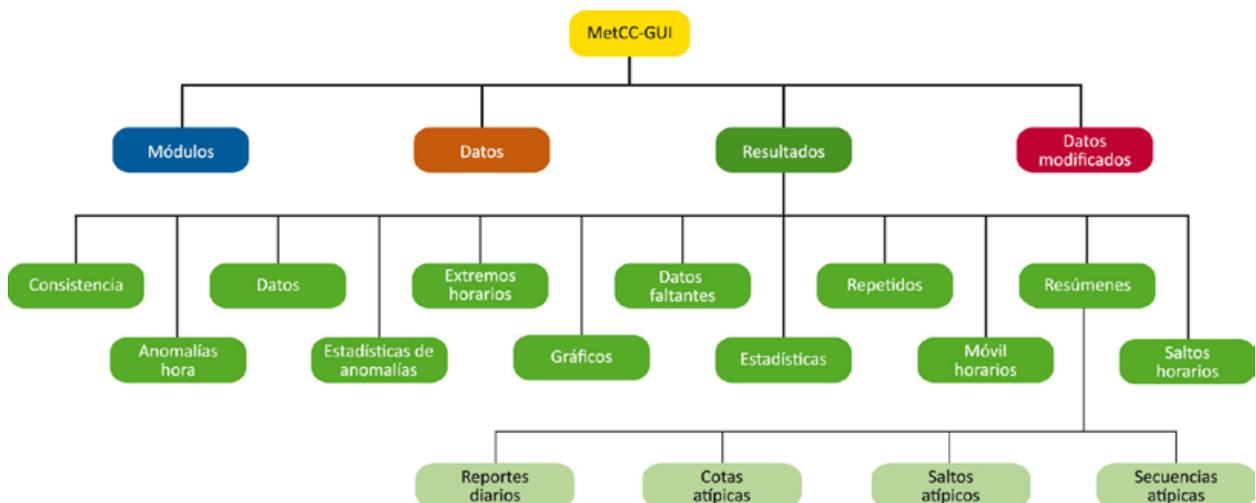


Figura 3. Distribución de carpetas dentro de MetCC.

ejes temporales, o conversiones de formato de texto a formato csv. La carpeta de resultados almacena una serie de carpetas que albergan las salidas del control de calidad propiamente dicho, y corresponde a resultados de diferentes etapas del control de calidad que se almacenan temporalmente, con el fin efectuar evaluaciones más detalladas, en caso de requerirse. En la carpeta resúmenes se almacenan los reportes finales, los cuales deben ser evaluados por el analista.

La figura 4 muestra las diferentes ventanas que presenta la interface gráfica del MetCC, la cual fue desarrollada en Qt y traducida a PyQt (Harwani, 2012). En la sección 4a se muestra la pestaña de inicio, la cual señala brevemente el propósito del paquete, así como el nombre de

los autores. La sección 4.b muestra la ventana de edición de MetCC, en la cual se accesan las rutinas dimensionamiento y manipulación de archivos de datos. Es importante indicar que cada una de estas rutinas es utilizada constantemente en el procesamiento y control de calidad señalado en la figura 2. En la ventana de edición, el usuario tiene acceso a rutinas para eliminar los encabezados generados por los archivos tal como salen de la base de datos, eliminación de filas repetidas, reemplazo de caracteres, incorporación y extracción de columnas, entre otros. La sección 4.c muestra la ventana que accesa la rutina para completar ejes temporales en las series horarias. Esta rutina da facilidad al usuario de completar archivos de datos, en resolución horaria y diaria. La sección 4.d presenta las opciones para control de calidad según el parámetro meteorológico

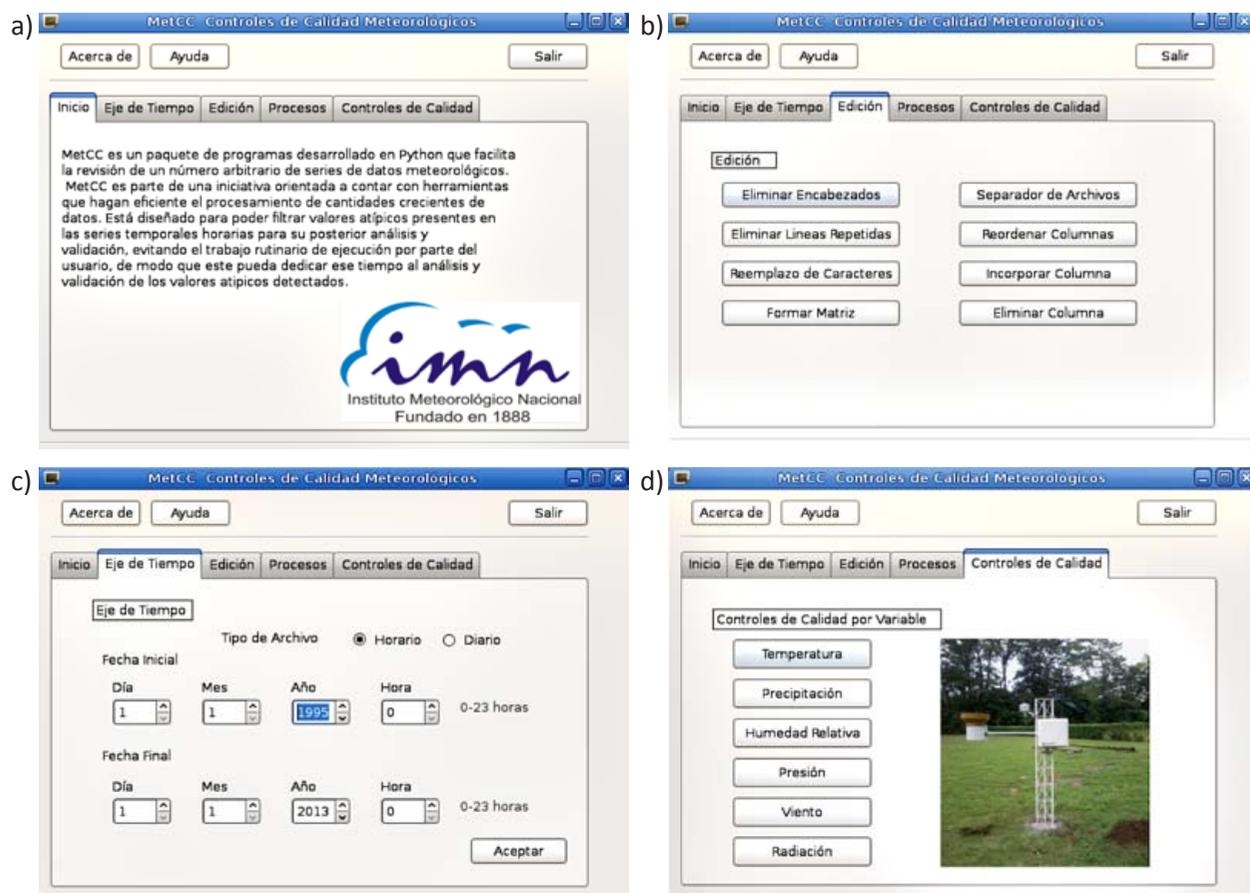


Figura 4. Interface gráfica de MetCC.

en cuestión. Dichos controles de calidad son discutidos en Araya (2011a, 2011b), en caso de que el lector desee familiarizarse más con ellos. Además, el manual del usuario presenta información adicional sobre su aplicación.

Cabe señalar, que el manual del usuario es accesible en forma de archivo con formato pdf al oprimir el botón de ayuda en la parte superior del menú, además, el botón “acerca de” da algunas indicaciones adicionales con respecto al producto, así como un logo asignado al paquete.

Los algoritmos de control de calidad difieren en ciertos aspectos según el parámetro y la resolución de los datos que se analice, aunque desde el punto de vista de la programación realizada en Python, los algoritmos de control de calidad son métodos dentro de clases iguales para todos los parámetros. Dichos algoritmos reconocen la diferencia de los parámetros meteorológicos, según los argumentos de entrada que se le van dando a dichos métodos en la clase respectiva.

3. Resultados y discusión

Para la prueba de esta herramienta se procesaron un total de 331 series temporales (72 para temperatura superficial del aire, 76 para humedad relativa, 57 para irradiancia y 63 para precipitación y viento). Se revisaron aproximadamente 12497000 filas de datos horarios.

Después de efectuar una corrida sobre los datos a analizar, MetCC genera reportes de los datos que no han pasado los criterios de control de calidad. Con el fin de ilustrar el tipo de situaciones que se pueden detectar usando este programa, se presentan algunos casos concretos de valores atípicos encontrados. En la [figura 5](#) se muestra como ejemplo, el caso de la estación meteorológica automática (EMA) de Laurel, localizada en el Pacífico Sur de Costa Rica. Se puede observar en el gráfico de la serie de tiempo, que se dan valores

relativamente bajos entre junio y julio del 2011. También se presenta en la [figura 6](#) el caso de la estación La Rebusca, en la cual visualmente se puede observar algunos valores atípicos. En el caso de Betania, Cutris se puede notar que la varianza de los datos resulta extraña al inicio de la serie, lo cual motiva una evaluación más a fondo de estos.

Los datos atípicos fueron aislados por el programa y fueron validados e indicados para su incorporación en la base espejo. Algunos criterios de validación que se aplican son por ejemplo: consulta de informes de gira, revisión de los programas de plataformas de recolección de datos (dataloggers) y la comparación con estaciones cercanas. Aunque es evidente que algunos valores atípicos no dejan duda con respecto a su condición de erróneos, por lo que la validación en esos casos se simplifica.

En el caso de los datos de viento, estos se dividen en seis subparámetros diferentes. En general, MetCC fue diseñado para poder efectuar diversas pruebas de calidad sobre las seis variables del parámetro viento, de forma simultánea (dirección angular, dirección predominante, número de casos en la dirección predominante, velocidad vectorial, velocidad escalar y desviación estándar de la dirección angular).

En la [figura 6](#) se muestran las brechas de valores consecutivos repetidos para un número arbitrario de datos. En este ejemplo se presenta el caso de direcciones angulares repetidas. Nótese que el valor umbral utilizado es de tres horas consecutivas. El algoritmo barre todas las series en busca de este tipo de brechas, las cuales analizadas en conjunto e interpretadas con el juicio del analista permiten identificar situaciones particulares que puedan estar explicando el comportamiento observado. Esta prueba ha sido de gran utilidad en la detección de valores que no varían por periodos prolongados de tiempo, facultando al analista para decidir sobre la validez de esa información.

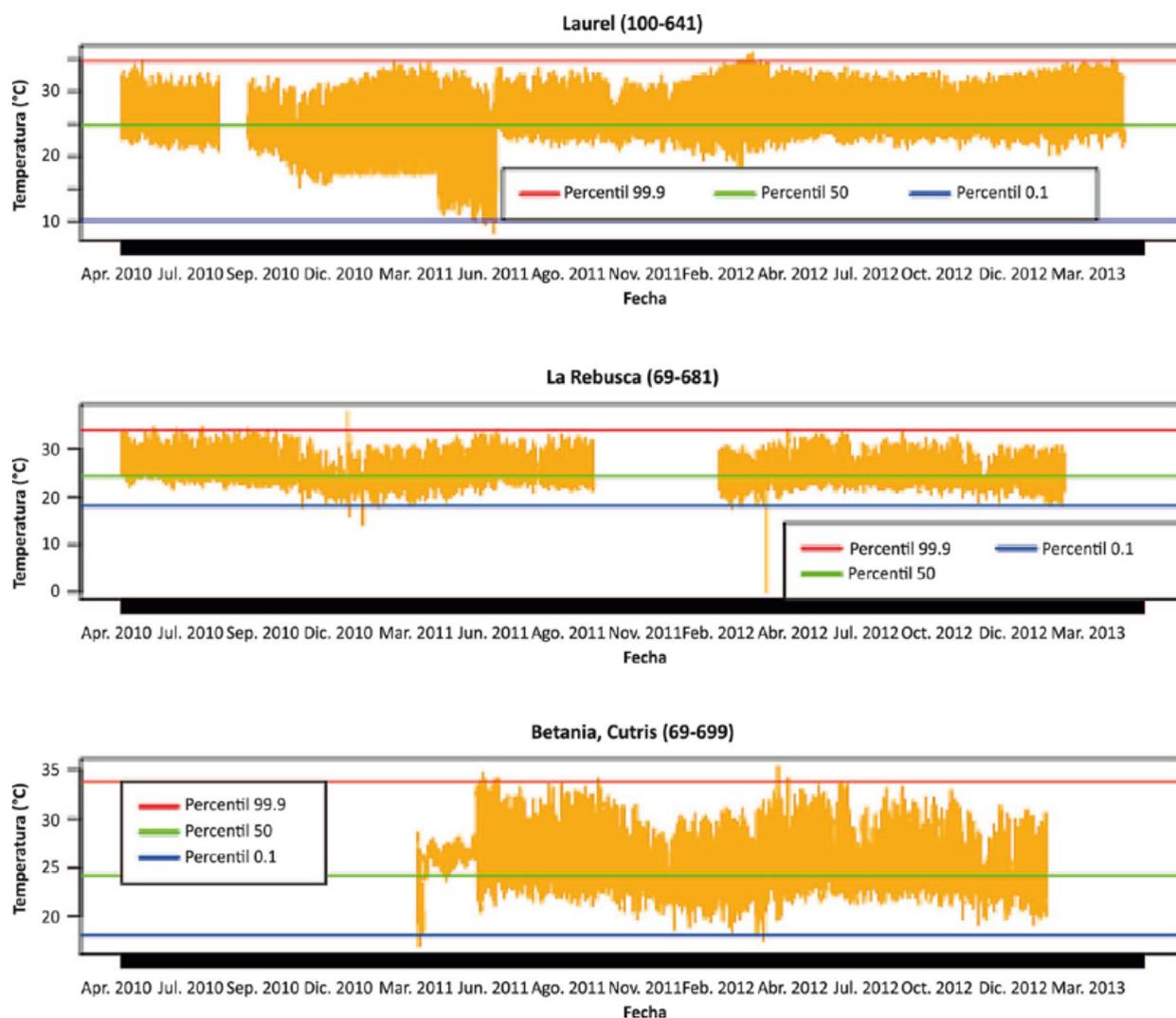


Figura 5. Series horarias de tiempo de la temperatura superficial del aire en donde se observan valores atípicos.

En la [figura 6a](#) se muestran valores de dirección angular repetidas para varias series, destacando la secuencia que se da en la estación meteorológica del Volcán Turrialba (73-143), indicando que la veleta se mantuvo en una dirección fija durante cierto número de horas. En la [figura 6b](#) se muestra el caso de direcciones predominantes que no varían durante aproximadamente 50 días consecutivos, para la estación meteorológica ubicada en el Parque Nacional Palo Verde (76-57). La [figura 6c](#) muestra secuencias largas para el caso de la estación meteorológica de Paquera (72-159) y Palo Verde. En la [figura 6d](#) se

observa las secuencias repetidas para datos de dirección vectorial, (73-143), con valores fijos de velocidad vectorial durante más de veinte horas consecutivas. En la [figura 6e](#) destaca el caso de la estación meteorológica de Altamira (98-95), donde se tiene una brecha de valores repetidos de 50 días consecutivos en que la velocidad escalar se mantiene fija. Igualmente, este reporte en particular efectúa dichas pruebas sobre los diversos subparámetros del viento, permitiendo al analista llevar a cabo una inspección más detallada para explicar qué puede estar provocando estas secuencias repetidas.

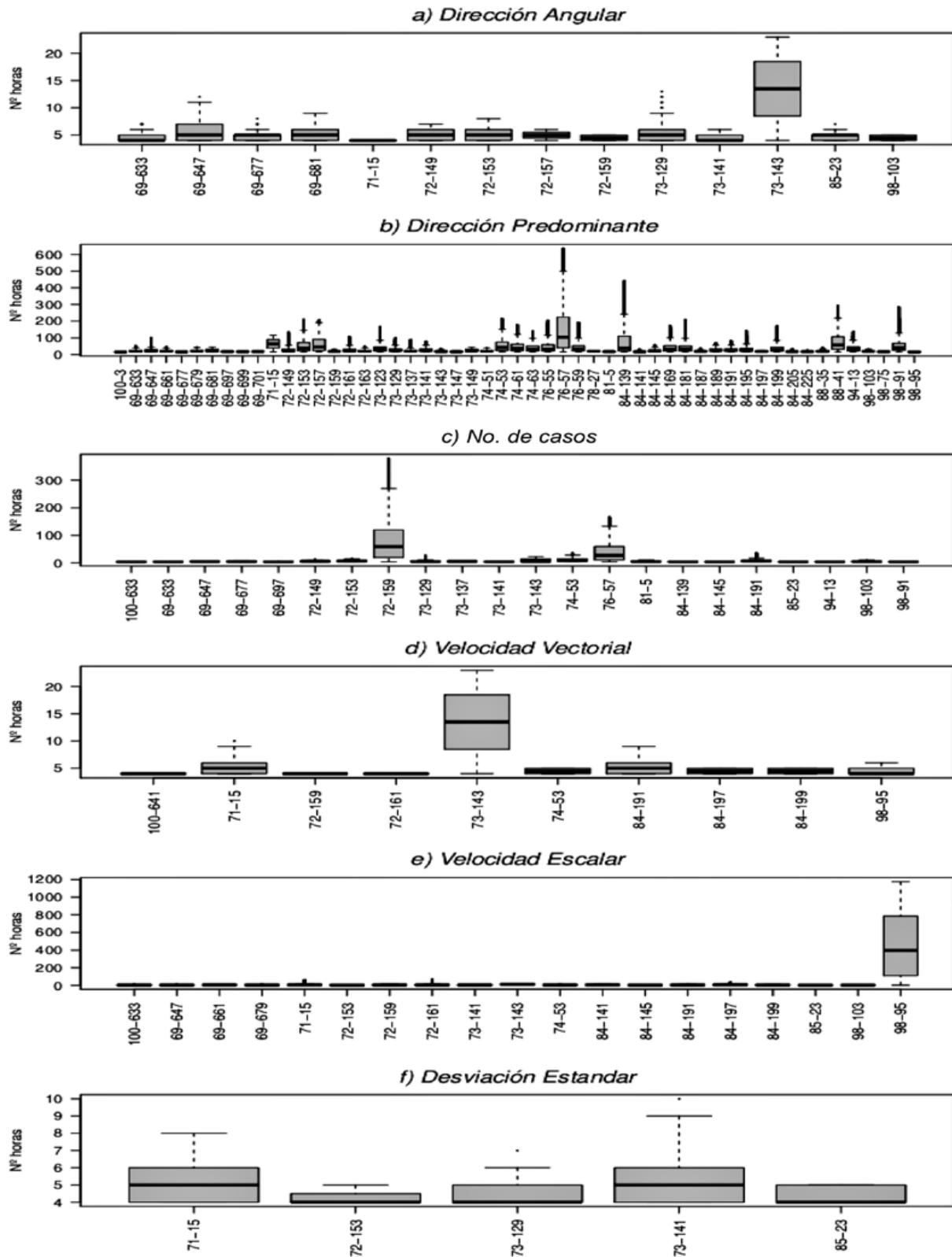


Figura 6. Brechas de direcciones angulares repetidas (secuencias mayores a tres horas) para horas consecutivas con dato repetido.

Con respecto a los datos de irradiación, estos se muestran en la [figura 7](#). Este parámetro se mide usando tres subparámetros diferentes: flujo neto de irradiación horaria (MJ/m^2), valor máximo y mínimo de irradiación (KW/m^2). En la [figura 7a](#) se presenta el caso de la estación meteorológica de Altamira, en la que se encontraron valores no plausibles al inicio de la serie, los cuales son fácilmente perceptibles usando un gráfico como este. La [figura 7b](#) muestra un histograma de frecuencias absolutas, de todos los datos atípicos encontrados para este parámetro meteorológico, en el periodo considerado. La [figura 7c](#) muestra que la mayoría de estos datos atípicos fueron valores cercanos a cero o bien valores negativos.

Finalmente, la [figura 7d](#) muestra los valores atípicos encontrados. Destacan los valores negativos encontrados en las series, los cuales se encuentran de forma uniforme en diferentes horas. Además de valores no nulos de irradiación en horas de la noche, cuya magnitud en esas horas es imposible de justificar usando argumentos físicos.

4. Conclusiones

El porcentaje de datos atípicos nunca superó el 0,7% de los datos de las series para los periodos de datos analizados utilizando MetCC.

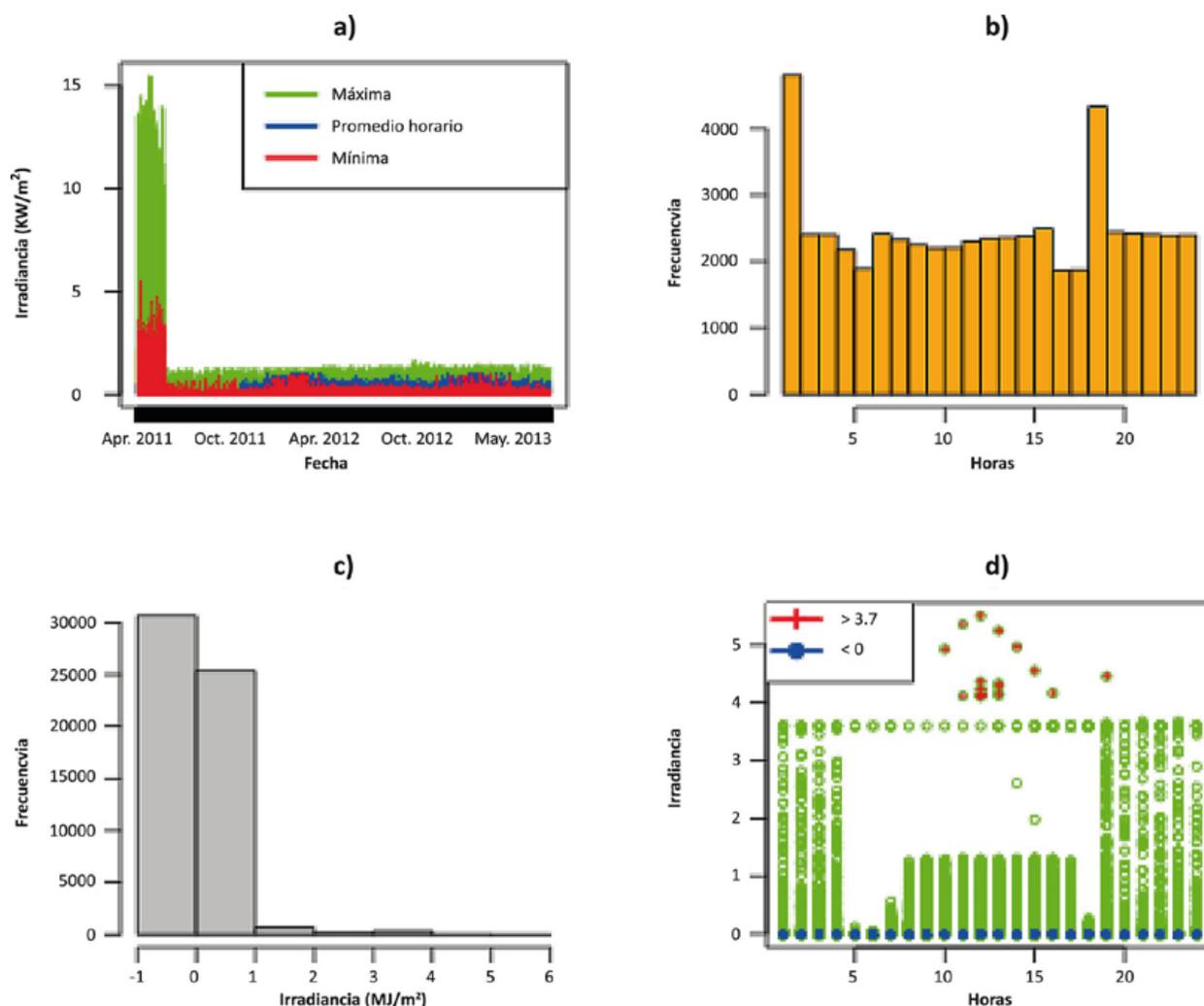


Figura 7. Resultados obtenidos usando MetCC en la detección de valores atípicos de irradiación.

Los programas de control de calidad utilizados anteriormente, requerían que una persona calificada estuviera ejecutándolos continuamente y evaluando cada serie temporal de forma individual, además requerían que la persona tuviese cierta familiaridad con el lenguaje de computación en el que fueron desarrollados. En la actualidad con el uso de MetCC se reducen los tiempos de búsqueda y detección de valores atípicos, a una ejecución en tiempo máquina operativamente manejable.

Con la implementación del software MetCC se pueden efectuar las pruebas y algoritmos de control de calidad sobre una cantidad arbitraria de series temporales, simplificando la labor del analista al darle reportes completos de aquellos datos que son detectados por los diversos algoritmos de control de calidad. Adicionalmente, MetCC posee una interface gráfica intuitiva que permite utilizar sus funcionalidades sin aludir a la línea de comandos, lo cual puede ser más cómodo para algunos usuarios. Además, aquellos usuarios que se sientan más cómodos con el uso de la línea de comandos en Linux tienen la opción de usar MetCC en esta modalidad.

Aunque el uso de este paquete de programas permite disminuir la cantidad de individuos cuya labor puede enfocarse a controles de calidad de datos meteorológicos, se requiere que quienes lo utilicen y lo validen tengan la debida experiencia sobre la interpretación de los resultados generados.

En particular, la aplicación de una evaluación manual requiere la participación de personal familiarizado con la climatología de los emplazamientos y de errores instrumentales que puedan explicar los valores atípicos que se encuentran (Araya, 2011b).

Como es el caso de cualquier control de calidad a profundidad de la información climática, el control de calidad de MetCC no excluye la intervención del criterio experto del proceso de revisión. Además, continúa siendo dependiente de la disponibilidad

de recurso humano calificado, principalmente en lo que se refiere al desarrollo y mejoramiento adaptativo de este paquete y al aspecto de validación de los datos atípicos encontrados.

Una aproximación al proceso de evaluación que podría mejorar el proceso de validación usando MetCC es el indicado por Kunkel et al. (2005), en el que un grupo de especialistas evalúan independientemente los reportes de datos atípicos y luego llegan a un consenso en cuanto a los indicadores de alerta asignados.

Como trabajos futuros, los autores han definido algunas posibles líneas de avance, las cuales pueden hacerla mucho más sensible en la búsqueda, detección y marcación de datos atípicos, estas son:

- a) Prueba permanente y validación de algoritmos de control de calidad: continuar con una actitud crítica en cuanto a la eficiencia de las herramientas que se tienen para poder mejorarlas continuamente, así como adaptarlas a nuevas necesidades y a los avances tecnológicos. En particular, continuar explorando con detalle la eficiencia de los algoritmos desarrollados, así como de otros aún no implementados y que podrían ser incluidos en MetCC en el futuro.
- b) Incorporación de controles de calidad espaciales: consiste en una metodología que permita analizar datos de estaciones cercanas y detectar valores que se estén desviando significativamente con respecto a algún valor regional.
- c) Dotar a MetCC con otras bondades que faciliten su interacción con páginas web y con bases de datos.

5. Referencias

Araya, J.L. (2007). *Algoritmos de Control de Calidad de Datos en Estaciones Meteorológicas Automáticas*. Tesis de Licenciatura. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. 172 pp.

- Araya, J.L. & Alfaro, E. (2008a). Prueba e Implementación de Algoritmos de Control de Calidad de Datos de Temperatura Superficial del Aire en un Contexto Operativo. *Tecnología en Marcha*. 21(3), 47-61.
- Araya, J.L. & Alfaro E., (2008b). Algoritmos de Control de Calidad para Detección de Secuencias Atípicas de Contactos en Pluviómetros de Balancín. *Tecnología en Marcha*. 22 (2), 63-78.
- Araya, J.L. (2011a). Resultados de un control de calidad de datos de temperatura superficial del aire y humedad relativa. *Tecnología en Marcha*. 24(1), 33-49
- Araya, J.L. (2011b). Resultados de un control de calidad para datos horarios de precipitación, irradiancia, velocidad y dirección de viento. *Revista de Climatología*. 11, 11-29.
- Beltrano, M.C. & Perini, L. (2004). *Italian Agrometeorological Service Procedures for Meteorological Data Quality Control*. Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. WMO-TD N° 1236, 243 p.
- Brock, F. & Richardson, J.S. (2001). *Meteorological Measurement Systems*. Oxford University Press, New York, 290 pp.
- DeGaetano, A.T. (1997). A Quality-Control Routine for Hourly Wind Observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 14, 308–317.
- Gandin, L.S. (1962). On operational techniques for computational analysis of Meteorological Fields. *Main Geophysical Observatory Trudy*. 124, 18-29.
- Gandin, L.S. (1988). Complex Quality Control of Meteorological Data. *Monthly Weather Review*. 116, 1137-1156.
- Graybeal, D.Y.; DeGaetano, A.T. & Eggleston, K.L. (2004). Complex Quality Assurance of Historical Hourly Surface Airways Meteorological Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 21, 1156–1169.
- Gronell, A. & Wijffels, S.E. (2008). A Semiautomated Approach for Quality Controlling Large Historical Ocean Temperature Archives. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 25, 990–1003.
- Harwani, B.M. (2012). *Introduction to Python Programming and Developing GUI applications with PyQt*. Course Technology. Boston, Massachusetts. 393 p.
- Hey, T.; Tansley, S. & Tolle, K. (2009). *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. Microsoft Research. Redmond, Washington. 287pp.
- Jiménez, P.A.; González-Rouco, J.F.; Navarro, J.; Montávez, J.P. & García-Bustamante, E. (2010). Quality Assurance of Surface Wind Observations from Automated Weather Stations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 27, 1101–1122.
- Kunkel, K.E.; David, R.; Hubbard, K.; Redmond, K.; Andsager, K.; Kruk, M.C. y Spinar, M.L. (2005). Quality Control of Pre-1948 Cooperative Observer Network Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 22, 1691–1705.
- Langtangen, H.P. (2008). *Python Scripting for Computational Science*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 750 pp.
- Lin, J. (2012). Why Python Is the Next Wave in Earth Sciences Computing. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93, 1823–1824.
- Liljegren, J.C.; Tschopp, S.; Rogers, K.; Wasmer, F.; Liljegren, L. & Myirski, M. (2009). Quality Control of Meteorological Data for the Chemical Stockpile Emergency Preparedness Program. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 26, 1510–1526.
- Meek, D.W. & Hatfield, J.L. (2001). *Single Station Quality Control Procedures. Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management*. WMO/TD No. 1074, 248 pp.

- Shafer, M.A.; Friebrich, C.A.; Arndt, D.S.; Fredrickson, S.E. & Hughes, T.W. (2000). Quality Assurance Procedures in the Oklahoma Mesonet. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 17,474-494.
- Schmidlin, T.W.; Wilks, D.S.; McKay, M. & Cember, R.P. (1995). Automated Quality Control for the "Water Equivalent of Snow of the Ground Measurement". *Journal of Applied Meteorology*. 34,143-151.
- Tosi, S. (2009). *Matplotlib for Python Developers*. Packt Publishing. 293 p.
- OMM (1992). *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos*. Vol. II. Nº 485. 329 p.
- Vangast, S. (2012). *Beginning Python Visualization*. Apress. New York. 363 p.
- Vejen, F.; Jacobson, C.; Fredrikson, U.; Moe, M.; Andresen, L.; Hellsten, E.; Rissanen, P.; Pálsdóttir, T. & Arason, T. (2002). *Quality*

Control of Meteorological Observations. Automatic Methods Used in the Nordic Countries. Nordklím, Nordic Co-operation within Climate Activities. Report Nº 8 KLIMA. 109 p.

- Wolfson, N.; Erez, J. & Alperson, Z. (1978). Automatic Real-Time Quality Control of Surface Synoptic Observations. *Journal of Applied Meteorology*. 17,449-457.

6. Agradecimiento

Se agradece al Instituto Meteorológico Nacional. En particular al Ing. Rodolfo Dávila Picado, por la ayuda con el desarrollo de la instancia en la base de datos para el almacenamiento de los datos con control de calidad, así como las diversas interfaces gráficas para interactuar con ésta. Se agradece además, al Sr. Víctor Hugo Gómez por el desarrollo de aplicaciones para facilitar la importación a la base de datos.

Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56

KARINA HERNÁNDEZ ESPINOZA¹

Resumen

Con el método FAO-56 se calcula la evapotranspiración de referencia para un cultivo de referencia “De una altura de 0,12m con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23”. Posteriormente se calcula el coeficiente del Tanque evaporímetro tipo A para conseguir la evaporación. Obteniendo así la evaporación promedio diaria para las siguientes seis Regiones Climáticas del país: 6 $mm\ dia^{-1}$ en Zona Caribe, 5,8 $mm\ dia^{-1}$ en Zona Norte, 7,6 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Norte, 4,8 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Central, 8,2 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Sur y 8 $mm\ dia^{-1}$ en Valle Central. El análisis de las gráficas de los acumulados mensuales muestran un patrón similar en cuanto a la distribución mientras que presentan una diferencia en el rango, donde los acumulados de la serie, reconstruida sobreestima la serie real.

PALABRAS CLAVE: EVAPORACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN, PENMAN, MONTEITH, FAO, MÉTODO FAO-56.

Abstract

The FAO-56 method gives us the reference evapotranspiration for the hypothetical grass reference crop with an assumed crop height of 0,12 m, a fixed surface resistance of 70 s/m and an albedo of 0,23. Calculate pan coefficient for Class A pan to obtain daily evaporation for six climatic regions of Costa Rica, to obtain the regional daily means evaporations data: 6 $mm\ dia^{-1}$ in Caribbean Region, 5,8 $mm\ dia^{-1}$ in North Region, 7,6 $mm\ dia^{-1}$ in North Pacific, 4,8 $mm\ dia^{-1}$ in Central Pacific, 8,20 $mm\ dia^{-1}$ in South Pacific and 8 $mm\ dia^{-1}$ in Central Valle. Month cumulative graphics shows a similar distribution but differs on range data, where the method over estimate real data.

KEYWORDS: EVAPORATION, EVAPOTRANSPIRATION, PENMAN, MONTEITH, FAO, FAO-56 METHOD.

1. Introducción

En la actualidad, Costa Rica carece de estudios que calculen los promedios diarios específicos de evaporación para cada región climática. Hasta ahora se ha utilizado un valor estándar de 5 $mm\ dia^{-1}$ para la estimación del inicio y conclusión de las épocas seca y lluviosa, en cualquier región del territorio nacional, esto tomando como base a Alfaro, Cid y Enfield (1998), donde se indica que el valor diario de la evaporación en Centroamérica varía entre 5 y 8 $mm\ dia^{-1}$.

El principal uso de la evapotranspiración se da en las ciencias agronómicas, cuya finalidad es conocer las necesidades hídricas del cultivo para un buen

desarrollo del mismo. Esto se obtiene restando al acumulado total de lluvia la cantidad de agua que se evapora, lo que representa el volumen de agua disponible.

El análisis de estas variables es indispensable en diversos aspectos, tales como la gestión de recurso hídrico, la planificación, la producción vegetal, los estudios ambientales y ecológicos, la fitopatología y la investigación, entre otros.

En el presente estudio, se utilizó el método FAO-56 para obtener la evaporación mediante el cálculo de la evapotranspiración y el coeficiente del tanque evaporímetro. Posteriormente, se estimaron los valores promedio mensuales de la

1 Licda. en Meteorología. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: khernandez@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.

evaporación para seis regiones climáticas de Costa Rica, con el fin de generar gráficos comparativos entre los acumulados mensuales de evaporación obtenidos con el modelo FAO-56 y los registros del tanque evaporímetro tipo A. Adicionalmente se logra demostrar que los promedios diarios de evaporación varían para cada una de dichas regiones.

2. Metodología

2.1. Datos meteorológicos

Se utilizaron datos diarios los cuales fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). La selección de las estaciones a utilizar se basó en los siguientes criterios: estaciones con registros de temperatura extrema, humedad relativa extrema, radiación, insolación, viento a 2 metros de altura y evaporación; estaciones en las cuales los años de registro para dichas variables sean los mismos; que sean representativas de las siguientes seis regiones climáticas definidas para Costa Rica: Pacífico

Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Valle Central, Zona Norte y Caribe. Se utilizaron las series de tiempo más extensas encontradas.

En el **cuadro 1** se muestran las estaciones seleccionadas para representar a cada región climática del país, los parámetros disponibles, los años analizados, las coordenadas y la elevación.

El **cuadro 2** muestra las estaciones estudiadas, así como el porcentaje de datos faltantes de cada variable, donde NA (no hay dato) indica la ausencia total de datos para ese parámetro meteorológico.

Para el relleno de datos faltantes se utilizaron las rutinas, programas y conclusiones definidas por Alfaro y Soley (2009). Este método utiliza predictores auto regresivos conocidos como AR(p), es un modelo lineal que utiliza los valores de “p” tiempos de muestreo anterior y posterior al dato para estimar el valor en un tiempo dado (Ulrych y Bishop,1975) y (Ulrych y Clayton,1976).

Para aquellas estaciones que no tenían registros de velocidad de viento a ninguna altura como

Cuadro 1. Nómina de estaciones meteorológicas seleccionadas

Número estación	Nombre estación	Región climática	Elevación (msnm)	Latitud (°)	Longitud (°)	Años	Parámetros
69579	Santa Clara, ITCR	Zona Norte	183	10,36	84,51	1987 a 1994, 1998 a 2000, 2006, 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
71002	La Mola	Caribe	94	10,34	83,67	2001, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
74020	Llano Grande, Liberia	Pacífico Norte	80	10,60	85,54	1976, 1978, 1981 a 1983, 1986, 1987, 1989.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
84023	Estación Experimental Fabio Baudrit	Valle Central	840	10,02	84,27	1974, 1975, 1977, 1978, 1980, 1982 a 1984, 1986 a 2000.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, radiación, viento, evaporación.
90009	Damas	Pacífico Central	21	9,50	84,21	2001, 2005 a 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, viento, evaporación.
98027	Pindeco	Pacífico Sur	401	9,15	83,34	1986 a 1991, 1998, 2001, 2003, 2004.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, viento, radiación, evaporación.

Cuadro 2. Porcentajes faltantes de los parámetros disponibles

Parámetro / Estación	Santa Clara, ITCR	La Mola	Llano Grande, Liberia	Estación Experimental Fabio Baudrit	Damas	Pindeco
Humedad relativa máxima	8	1	3	0	13	7
Humedad relativa mínima	11	2	5	6	18	10
Horas sol	12	13	7	2	6	6
Radiación global	NA	NA	NA	0	NA	9
Velocidad viento	NA	NA	NA	27	7	48
Temperatura máxima	13	1	1	1	2	0
Temperatura mínima	22	11	4	3	17	2
Evaporación	13	6	12	5	21	10

Santa Clara, La Mola y Llano Grande, se utilizó la constante de 2 ms^{-1} , recomendada por Allen, Pereira, Raes & Smith (1998), dado que éste es el valor promedio de 2000 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el mundo.

En el caso de las estaciones La Mola, Santa Clara, Llano Grande y Damas, debido a la falta de registros de radiación, se utilizó la metodología descrita en Allen et al. (1998), la cual se basa en la fórmula de Armstrong que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, además de la nubosidad.

En el caso de Pindeco, que tiene un porcentaje de datos faltantes del 48%, la razón por la que se decidió utilizar este registro en vez de la constante recomendada, es porque se consideró que para el caso de Costa Rica son más realistas los valores rellenados con el método auto regresivo, que la dicha constante. Además, de acuerdo con Muñoz, Fernández, Gutiérrez y Zarate (2002), el comportamiento anual de la velocidad del viento para la estación de Pindeco es uniforme y varía entre $0,8 \text{ ms}^{-1}$ y $1,7 \text{ ms}^{-1}$.

2.2. Modelo utilizado

La organización Food Agriculture Organization (FAO) en colaboración con la International

Commission for Irrigation and Drainage (ICID) y la World Meteorological Organization (WMO) decidieron crear la ecuación FAO-56 como un nuevo modelo estándar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Esta se establece utilizando el método Penman-Monteith, definiendo algunos parámetros constantes, ya que se basa en un cultivo de referencia, a saber: “un cultivo hipotético con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de 70 ms^{-1} y un albedo de 0,23”. Esta nueva propuesta reduce las imprecisiones del método utilizado anteriormente por la FAO y produce valores globales más consistentes de uso de agua en diversos cultivos (Allen et al., 1998).

En la ecuación 1 se muestra el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0), mediante el método FAO-56 en unidades de mm dia^{-1} . Los parámetros se calcularon mediante la metodología descrita en Allen et al. (1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{media}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde:

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

G : flujo del calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T_{media} : temperatura media del aire a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 : velocidad del viento a dos metros de altura (m s^{-1})

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor, ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Para el cálculo del coeficiente del tanque evaporímetro tipo A (K_p) en cada una de las seis regiones climática del país, se utilizó la ecuación de regresión 2 dada por Allen et al. (1998), ya que en Costa Rica este instrumento es el que posee registros más extensos para los datos de evaporación.

$$K_p = 0.108 - 0.086 u_2 + 0.0422 \ln(\text{BORDE}) + 0.1434 \ln(\text{HR}_{\text{media}}) - 0.000631 [\ln(\text{BORDE})]^2 \ln(\text{HR}_{\text{media}}) \quad (2)$$

Donde:

u_2 : velocidad del viento, ($1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 1 \text{ m s}^{-1}$)

HR_{media} : porcentaje de humedad relativa media diaria, $30\% \leq \text{HR}_{\text{media}} \leq 84\%$

BORDE : distancia del tanque al cultivo, ($1 \text{ m} \leq \text{BORDE} \leq 1000 \text{ m}$)

Posterior a la realización del cálculo de ET_0 y K_p , se utilizó la ecuación 3 para obtener el valor de la evaporación de referencia diaria, en cada región analizada.

$$ET_0 = E_{\text{pan}} * K_p \quad (3)$$

Donde:

u_2 : evaporación del tanque evaporímetro, (mm dia^{-1})

K_p : evaporación del tanque evaporímetro

3. Resultados y discusión

3.1. Comparación FAO-56 y Tanque evaporímetro tipo A

Los valores de evaporación se calcularon con el fin de promediar los acumulados mensuales totales, a partir de los valores diarios, para cada estación y se dividieron en la cantidad de años. La cantidad de años utilizados varía según la estación (cuadro 3).

En el cuadro 3 se muestran los valores extremos de los promedios mensuales, de la evaporación

calculada y el mes correspondiente a dicho valor extremo. Todas las estaciones presentan su valor máximo en el mes de marzo, a excepción de Llano Grande que muestra su valor máximo en el mes de abril. Además, únicamente Llano Grande (octubre) y Fabio Baudrit (septiembre) no presentaron su valor mensual mínimo en el mes de noviembre. Las variaciones entre dichos valores extremos presentadas por las estaciones en orden descendente son: Pacífico Sur 169 mm, Valle Central 140 mm, Pacífico Norte 110 mm, Zona Norte 85 mm, Pacífico Central 75 mm y Región Caribe 50 mm.

Como se muestra en la figura 1(a), la estación de Llano Grande en Liberia tiene un comportamiento mensual similar entre la evaporación estimada (verde) y observada (azul). Se puede apreciar además, que la ecuación sobreestima principalmente los valores obtenidos durante los meses lluviosos. En las figuras 1(b) y 3(b), se observa que las estaciones de La Mola y Pindeco presentan las mayores diferencias entre el modelo y la realidad.

En las seis gráficas contenidas en las figuras 1, 2 y 3, se puede observar la sobrestimación del método FAO-56, en relación con el Tanque evaporímetro tipo A. El comportamiento de la curva estimada y calculada tienen similitudes, sin embargo se encuentran diferencias importantes en el rango de éstas, debido a dicha sobrestimación.

En el análisis gráfico que muestra Lizano (2007), se observa que en el Pacífico Central y Sur ocurren dos leves disminuciones durante los meses de

Cuadro 3. Valores extremos mensuales de las diferencias de evaporación

Estación	Mes del valor máximo	Máximo (mm)	Mes del valor mínimo	Mínimo (mm)
Santa Clara	Marzo	225	Noviembre	140
Mola	Marzo	210	Noviembre	160
Llano Grande	Abril	300	Octubre	190
Fabio Baudrit	Marzo	355	Septiembre	215
Damas	Marzo	188	Noviembre	113
Pindeco	Marzo	279	Noviembre	110

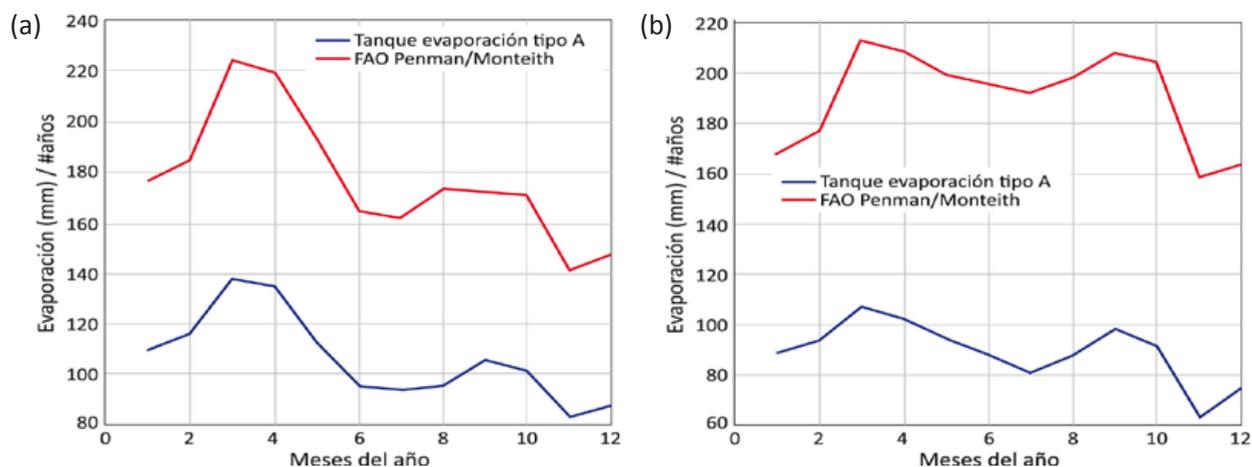


Figura 1. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 69579 – Santa Clara, ITCR, (b) Estación 71002 – La Mola.

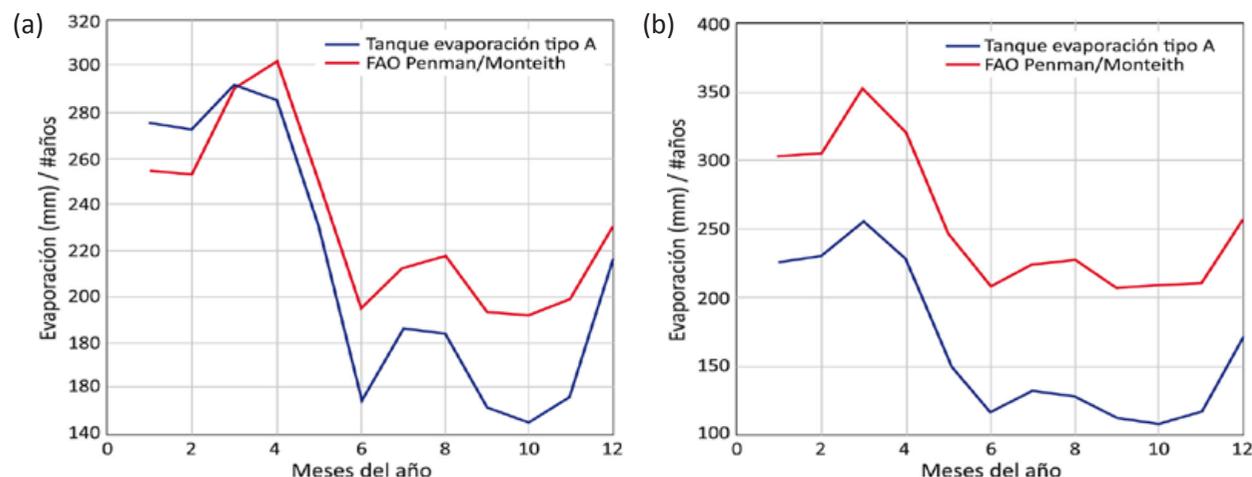


Figura 2. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 74020 – Llano Grande, Liberia, (b) Estación 84023 – Estación Experimental Fabio Baudrit.

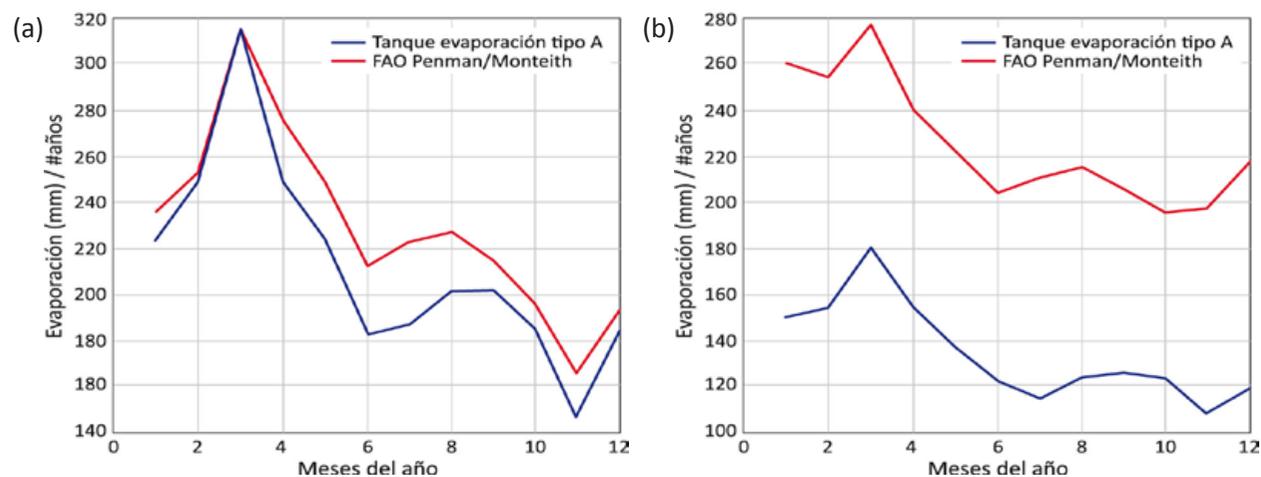


Figura 3. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 90009 – Damas, (b) Estación 98027 – Pindeco.

junio y agosto, lo cual coincide con el momento en que los vientos Alisios se aceleran nuevamente en el Caribe. Menciona además este autor, que para la costa Caribe los vientos nortes y los sistemas de alta presión en el Atlántico hacen que en esta región soplen los vientos Alisios intensamente, desde noviembre hasta abril, aumentando significativamente en julio lo que coincide nuevamente con el veranillo.

Mediante la observación de las figuras 1, 2 y 3, podemos evidenciar dentro del período de valores mínimos de evaporación, un leve aumento de dicha variable durante los meses de julio y agosto para las estaciones del Pacífico y Valle Central. En el caso del Caribe y la Zona Norte, el incremento se da en septiembre y octubre que son los meses más secos en esa región, donde el incremento varía entre 5 y 20 mm, lo cual refleja la presencia del veranillo en todo el territorio nacional.

3.2. Promedios regionales de evaporación

En el cuadro 4 se presenta el cálculo del promedio de evaporación diaria, mediante los métodos FAO-56 y Tanque evaporímetro tipo A, para el registro total de cada una de las series de tiempo. Comparando ambos métodos, se confirma la sobrestimación de la fórmula sobre las observaciones. La cantidad de años varía según sea la estación entre seis y 23, tal como se mostró en el cuadro 1.

Según las experiencias en el procesamiento de datos del tanque evaporímetro tipo A, las observaciones mencionadas por Hidalgo, Cayan y Dettinger (2005), en relación a la dependencia de la evaporación con respecto a otras variables climáticas y las deficiencias ya conocidas en el registro de los datos, se sabe que dichos registros podrían subestimar el valor real de evaporación.

Ramírez (1976) mediante el manejo de datos mensuales de evaporación, reconoce las

limitaciones al trabajar con evaporación, siendo el Tanque evaporímetro tipo A la única medida de evaporación en Costa Rica, además de todos los factores externos que afectan esta medición en caso de querer usarla como medida patrón, para la evaluación de las fórmulas de cálculo y construcción de series de evaporación.

Al observar la primera columna del cuadro 4, se puede notar que se cumple lo comentado por Alfaro, Cid y Enfield (1998), referente al valor promedio de la evaporación que varía entre 5 y 8 $mm\ día^{-1}$ para Centroamérica, pero también se evidencia que existen diferencias importantes en los promedios diarios, para cada una de las seis regiones climáticas del país aquí estudiadas.

Cuadro 4. Valores promedio de la evaporación diaria

Estación	Promedio ($mm\ día^{-1}$)	
	FAO-56	Tanque tipo A
69579 - Santa Clara	5,8	3,5
71002 - Mola	6,0	3,0
74020 - Llano Grande	7,6	7,0
84023 - Fabio Baudrit	8,0	5,0
90009 - Damas	4,8	4,5
98027 - Pindeco	8,2	4,0

4. Conclusiones

Al calcular los valores promedio de la evaporación regional, se evidencia que dichos valores varían entre la estimación del método FAO-56 y las observaciones del Tanque evaporímetro tipo A, ya que el método FAO-56 sobreestima las series de evaporación reales. Por esta razón, la curva de evaporación reconstruida se posiciona en valores más altos que los de la curva de valores reales, generando una brecha entre los valores promedio de la evaporación calculada y observada.

En la metodología actualmente utilizada para obtener la estimación del inicio y conclusión de

la época lluviosa en Costa Rica, se utiliza un valor diario de evaporación de 5 mm dia^{-1} para todo el territorio nacional, lo cual nos lleva a un valor umbral pentadal de 25 mm dia^{-1} para todo Costa Rica. La aplicación de los valores promedio diarios de evaporación obtenidos en esta investigación, para cada región climática, debe mejorar sustancialmente los resultados de las fechas del inicio y conclusión de la época lluviosa en nuestro país. Dichos promedios diarios de evaporación son: 6 mm dia^{-1} en la Zona Caribe, $5,8 \text{ mm dia}^{-1}$ en la Zona Norte, $7,6 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Norte, $4,8 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Central, $8,2 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Sur y 8 mm dia^{-1} en el Valle Central.

La aplicación de este modelo en Costa Rica requiere aún más calibración, ya que como pudo notarse algunas regiones como el Pacífico Sur y el Caribe, muestran una gran diferencia en cuanto al rango, entre el método FAO-56 y el Tanque evaporímetro tipo A.

El método FAO-56 utilizado para reconstruir los registros de evaporación, es robusto estadísticamente y por lo tanto su aplicación se torna difícil en aquellos casos en los que se carece de las series de tiempo que este modelo requiere para su cálculo.

Dicha metodología recomienda utilizar un valor constante de 2 ms^{-1} para aquellas estaciones que carecen de dicho registro, y este es un valor muy bajo para ciertas épocas del año y ciertas regiones como es el caso del Pacífico Norte. Esta constante es una posible fuente de error en los cálculos de la evaporación.

5. Referencias

- Alfaro, E.; Cid, L. & Enfield, D. (1998). Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Investigaciones Marinas*. 26, 59-69.
- 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.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water Requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hernández, K. (2013). *Estudio de la evaporación en Costa Rica y su aplicación para determinar el inicio y conclusión de la época seca y lluviosa*. Tesis de grado en Meteorología. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Hidalgo, H.; Cayan, D. & Dettinger, M. (2005). Sources of Variability of Evapotranspiration in California. *Journal of Hydrometeorology*. 6, 3-19.
- Lizano, O. (2007). Climatología del viento y oleaje a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 25(1-2): 43-56.
- Muñoz, C.; Fernández, W.; Gutiérrez, J. & Zarate, E. (2002). Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 9(1): 1-13.
- Ramírez, P. (1976). *Cálculo de la evaporación y la evapotranspiración en Costa Rica*. Tesis de grado en Meteorología. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ulrych, T.J. & Bishop, T.N. (1975). Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 13(1): 183-200.
- Ulrych T.J. & Clayton, R.W. (1976). Time series modeling and maximum entropy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 12: 188-200.

Reincidencia de eventos hidrometeorológicos extremos en Costa Rica durante el periodo 2000-2010

LUIS EDUARDO QUESADA HERNÁNDEZ¹
NURY SANABRIA VALVERDE²

Resumen

A partir de la base de datos sobre eventos hidrometeorológicos extremos del Instituto Meteorológico Nacional, se analizó el comportamiento de los frentes fríos y sistemas de bajas presiones que han impactado nuestro territorio en el período 2000-2010. Se caracterizó la frecuencia mensual del evento, la frecuencia mensual del impacto, la tendencia decadal y la distribución espacial a nivel de cantón por medio de la utilización de Sistemas de Información Geográfica. Ambos eventos tienen un comportamiento estacional en su frecuencia de aparición y su impacto está relacionado con situaciones de vulnerabilidad y características geográficas. La tendencia decadal muestra un aumento de ambos fenómenos, pero un impacto diferencial. El impacto de los frentes fríos ha disminuido mientras que el impacto de bajas presiones ha aumentado.

PALABRAS CLAVE: EVENTOS EXTREMOS, VARIABILIDAD CLIMÁTICA, FRENTE FRÍOS, BAJAS PRESIONES, SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Abstract

From the database of extreme weather events of the National Meteorological Institute, the behavior of cold fronts and low pressure systems that have impacted our country in the period 2000-2010 was analyzed. The monthly frequency of the event, the monthly frequency of impact the decadal trend and spatial distribution at the county level through the use of Geographic Information Systems are characterized. Both events have a seasonal pattern in their frequency and impact associated with vulnerabilities and geographical features. The decadal trend shows an increase of both phenomena, but a differential impact. The impact of cold fronts has decreased while the impact of low pressure has increased.

KEYWORD: EXTREME WEATHER EVENTS, CLIMATE VARIABILITY, COLD FRONTS, LOW PRESSURE SYSTEMS, SYSTEMATIZATION, GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS.

1. Introducción

Costa Rica es un país que por su posición geográfica se ve afectado por una gran variedad de eventos hidrometeorológicos de diverso tipo, intensidad y frecuencia. Cada año se contabilizan daños y pérdidas por varios millones de colones en la infraestructura y los procesos productivos, que afectan los sectores socioeconómicos más importantes del país.

Debido a lo anterior, existe un interés creciente por parte de la comunidad científica nacional de identificar y caracterizar los eventos hidrometeorológicos de mayor severidad. Estos análisis se basan en dos corrientes de investigación: los que evalúan los daños económicos y los estudios que miden la intensidad y la cantidad de dichos fenómenos (CEPAL 2011). Estos estudios han sido generados en el marco del cambio climático, en el cual se espera que la intensidad y la frecuencia de dichos eventos vayan en aumento.

1 Bachiller en Geografía. Universidad Nacional de Costa Rica. Correo electrónico: luiseduardo-1031@hotmail.com.

2 Licda. en Geografía. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: nury@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.

Algunos de estos estudios no incluyen la variable geográfica en el análisis, ya que no precisan adecuadamente los eventuales puntos de impacto, ni las relaciones entre inundaciones y sequías con la orografía, para realizar un análisis más profundo relacionando aspectos físicos y sociales.

En Costa Rica existen y se desarrollan algunas bases de datos que relacionan eventos hidrometeorológicos extremos, con los impactos causados. Una de las primeras bases corresponde al esfuerzo regional de la Red de Estudios Sociales en la Prevención de Desastres en América Latina (La RED), la cual se basa en diferentes fuentes para lanzar una herramienta en línea, que despliega información sobre impactos de desastres y que se conoce como la base de datos Desinventar. Otra base importante es la que maneja La Comisión Nacional de Emergencia (CNE) y que cuenta con la información que ellos mismos generan durante la atención de emergencias de diferente naturaleza. Más recientemente se concretiza una base de datos institucionalizada por MAG-MIDEPLAN, que tiene como objetivo contribuir con una herramienta robusta para la gestión del riesgo ante desastres de tipo hidrometeorológico y tectónico (Flores, Salas, Astorga y Rivera, 2010). Los resultados obtenidos de estos sistemas, demuestran la enorme utilidad que tiene este tipo de información para el análisis y gestión del riesgo climático en diferentes sectores productivos y sociales del país.

En lo referente a la información técnica del evento atmosférico, el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) ha venido desarrollando una base de datos a partir de la información publicada en los boletines meteorológicos mensuales. Aunque dicha información no se encuentra totalmente sistematizada, su análisis permite usarla en la caracterización espacial del impacto de una gran variedad de fenómenos atmosféricos.

El presente trabajo tiene como finalidad demostrar la utilidad de la base de datos sobre

eventos hidrometeorológicos extremos del IMN, enfocándose en la distribución espacial y temporal de dos de los fenómenos atmosféricos que más precipitación genera al país: los frentes fríos y las bajas presiones. Se caracteriza y analiza su tendencia para el periodo que abarca del 2000 al 2010, en Costa Rica.

2. Metodología

Se utilizó la base de datos del Instituto Meteorológico Nacional construida a partir de los boletines meteorológicos, la cual contiene información sobre las condiciones meteorológicas, datos de registro y documentación de eventos especiales. Se contó con un periodo de datos que va de 1980 al 2012, sin embargo, se escogió el periodo 2000-2010 como el piloto para el análisis.

Se homogenizó la información original dado que existían distintos niveles de detalle, metodologías de recolección y vacíos. Se generó una base de datos que respondiera a los intereses de la institución, la cual contó con una información general y se creó otra base de datos con un mayor nivel de detalle, poniendo énfasis en los poblados, distritos y cantones para facilitar el análisis posterior de la información.

Se introdujo la base de datos al Sistema de Información Geográfica (SIG), para lo que se utilizó la variable espacial de cantones, creando distintas columnas que corresponden al tipo de evento y asociando la cantidad de ocasiones que dicho evento afectó ese cantón. También se generó una capa de puntos, la cual se hizo relacionando los poblados que se registraron en la base de datos con una capa de puntos en el SIG.

Se analizó la incidencia de los eventos extremos en los poblados, a fin de obtener un panorama regional del impacto, además se generaron gráficas de frecuencia de impacto, distribución temporal de eventos y tendencia decadal.

3. Resultados

3.1. Análisis de los frentes fríos

Los frentes fríos son la expresión de dos variables distintas: las masas de aire y los frentes propiamente. Strahler (1974) define las masas de aire como “cualquier porción grande de la atmósfera inferior de temperatura y humedad constantes”, dichas masas de aire se clasifican según su temperatura en frías y cálidas. Cuando dos masas de aire con temperaturas distintas chocan, se produce la otra variable de estos eventos el frente, el cual es definido como una “línea de contacto entre el aire frío de origen ártico o polar y el aire cálido de origen subtropical”. La característica que distingue a los frentes fríos es la capacidad de generar lluvias fuertes y tormentas de grandes magnitudes, cuando interactúan con otras masas de aire con una mayor temperatura. El aire frío al ser más denso se mantiene cerca de la superficie, lo que provoca que las masas de aire cálido tengan que elevarse. Este evento se da con mucha violencia lo que origina nubes de desarrollo vertical como los cúmulos y cumulonimbos, los cuales están asociados a lluvias intensas.

Para el caso de Costa Rica, los frentes fríos se dan cuando las masas de aire polar que vienen del Océano Atlántico entran al mar Caribe e interactúa con las masas de aire tropicales que se originan en el Ecuador, este fenómeno ocurre debido a la circulación atmosférica la cual genera que distintas masas de aire en el planeta estén en constante movimiento.

Según lo anterior, se puede entender por qué los frentes fríos tienen una estacionalidad bastante marcada en comparación con otros eventos que se originan durante todos los meses del año, en la [figura 1](#) se puede observar la distribución mensual de los frentes fríos para el caso de Costa Rica, en el período 2000 - 2010.

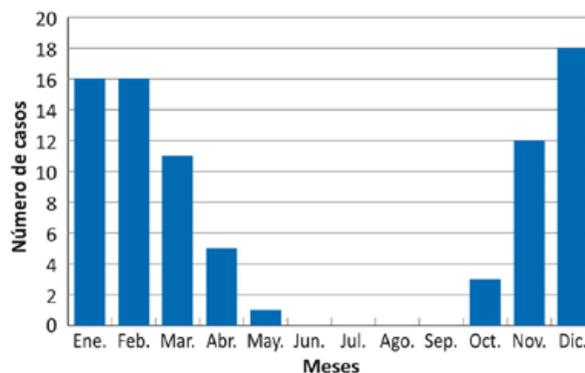


Figura 1. Distribución mensual de los frentes fríos (números de casos) registrados entre el 2000 y el 2010.

No todos los frentes fríos causan algún impacto social o productivo, algunos de ellos pueden afectar al país produciendo un aumento en la precipitación, sin embargo, su intensidad no llega a ser la suficiente como para causar inundaciones, deslizamientos o ráfagas de viento, que afecten algún sector social o productivo. Respecto a la distribución de los efectos de los frentes fríos en Costa Rica, se puede mencionar que las principales zonas afectadas por este evento son las ubicadas en el Caribe y la Zona Norte del país, ya que las nubes de tormenta ingresan por el mar Caribe y se extienden por este territorio. En la [figura 2](#) se presenta la distribución cantonal de los impactos por las lluvias asociadas a la presencia de frentes fríos, en el periodo 2000 - 2010.

El impacto de los frentes fríos en Costa Rica tienen un comportamiento espacial bastante uniforme, ya que afectan principalmente los poblados que se encuentran en las regiones climáticas del Caribe Norte, Caribe Sur y la Zona Norte, siendo el Caribe Norte la zona más afectada por este evento. El caso del cantón de Limón es bastante especial, dado que en el periodo 2000 - 2010 se vio afectado en 34 ocasiones, siendo el lugar donde se registra un mayor número de impactos. El hecho de que la mayor cantidad de la población e infraestructura pluvial de la región se concentra en este cantón, puede explicar el número de registros de daños (CNE, s.f.).

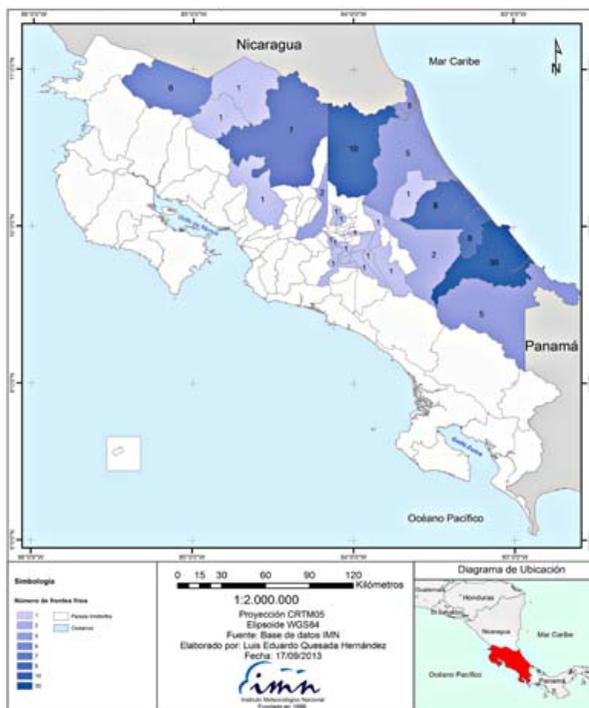


Figura 2. Distribución espacial de los impactos registrados por frentes fríos en el período 2000 – 2012. Costa Rica.

Otro aspecto a considerar en la distribución de los frentes fríos, es la posición geográfica del sistema montañoso. La ubicación de las cordilleras del país, constituye una barrera para el paso de las masas de nubes, generando así una lluvia orográfica a barlovento de la montaña que afecta principalmente el este del país.

No obstante lo anterior se puede notar que hay cantones que se encuentran en la Región Central y se ven afectados por los frentes fríos, debido a los diferentes pasos inter-montanos como por ejemplo el paso de la Palma, entre el volcán Irazú y el volcán Barva y el paso Coliblanco el cual se ubica entre el volcán Turrialba y el volcán Irazú. Dado las formaciones geomorfológicas antes mencionadas, se puede apreciar el ingreso de los cúmulos y los cumulonimbos, afectando así distintos cantones como por ejemplo Turrialba, Cartago y Jiménez. Sin embargo, la afectación de estos cantones es mucho menor en comparación al Caribe Norte, Sur y la Zona Norte, en los cuales

los frentes fríos generan daños principalmente en los meses de noviembre y diciembre. En cuanto a la distribución mensual de impactos, la figura 3 presenta el acumulado para el período de estudio.

Tanto en la zona norte del país como en el Caribe, los frentes fríos están asociados con inundaciones las cuales ocurren principalmente por dos variables, tal como se detalla en el cuadro 1.

La intensidad del frente frío es de mucha importancia, ya que distintos ríos ubicados en estas zonas se salen de su cauce natural dado el aumento del caudal que se genera por las intensas precipitaciones que provocan estos eventos, esto sumado al relieve que presentan las tres regiones afectadas, hace que sea muy fácil el desarrollo de inundaciones generando daños socioeconómicos

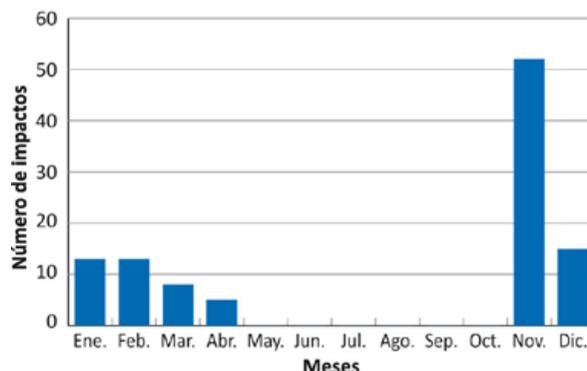


Figura 3. Distribución mensual de los impactos generados por frentes fríos. Período de análisis 2000-2012.

Cuadro 1. Variables que afectan las inundaciones en Costa Rica

Físicas	Antrópicas
Lluvia Estacional	Cambios de uso del suelo en las planicies aluviales
Eventos atmosféricos	Alteración de las cuencas hidrográficas
Lluvia Intensa	Mal diseño de la infraestructura hidráulica
Avenidas	Mala planificación urbana

Fuente: Comisión Nacional de Emergencia.

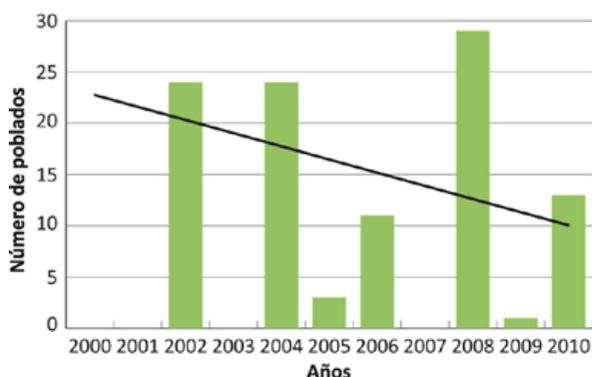


Figura 4. Número de poblados afectados por frentes fríos y su tendencia decadal. Período de análisis 2000-2013.

a las comunidades. En la figura 4 se puede observar el número de poblados afectados por frentes fríos en el periodo 2000-2010.

La tendencia lineal sugiere una disminución notoria de los impactos generados por los frentes fríos, sin embargo, se debe hacer la salvedad de que esto no refleja el hecho de que exista una disminución de los eventos. Como se puede observar en la figura 5 el número de frentes fríos va en aumento.

Tal como se muestra en la figura 5, el número de frentes fríos que llegan al país en el periodo analizado presenta una tendencia en aumento, esto principalmente a partir del año 2008. Si se comparan la figura 4 y la 5, se observa que durante el 2009 la cantidad de poblados afectados aumentó, sin embargo, entre el 2009 y el 2010 el número de afectaciones fue menor a pesar de que el número de frentes fríos aumentó. Es posible que los frentes fríos que llegaron no causaran mayor afectación, o bien, que la vulnerabilidad de algunos cantones haya disminuido y su capacidad para enfrentar situaciones extremas haya evitado mayores afectaciones.

Lo anterior se ve evidenciado en el 2008, año en el que se produjo la mayor cantidad de impactos, sin que este haya sido el de mayor cantidad de frentes fríos registrados. En este año se contabilizaron

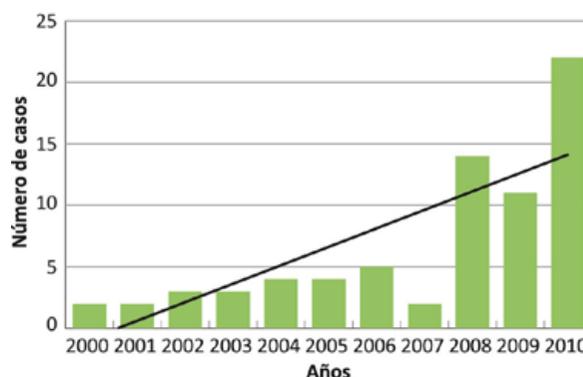


Figura 5. Número de frentes fríos registrados y su tendencia. Período 2000-2013.

14 frentes fríos, sin embargo, la cantidad de pueblos afectados por este tipo de eventos es de alrededor de 29. Por lo tanto, cabe destacar que la intensidad del evento, así como las variables antrópicas juegan un papel trascendental en la cantidad de daños que se reportan.

El número de frentes fríos que se están generando cada año va en aumento, siendo el periodo que va del 2008 al 2010 el más activo. Según Alvarado y Zarate (2005), una serie de factores podrían estar asociados al aumento de estos eventos. Cuando la Oscilación Ártica está en su fase negativa los frentes tienden a incrementarse, mientras que el número de empujes fríos tiende a disminuir cuando la Oscilación Ártica está en su fase positiva. Además, en presencia de El Niño hay un incremento en el número de frentes fríos que alcanzan Cuba. De lo anterior se puede entender que los frentes fríos no son un evento que se produzca de forma aislada, sino que hay muchas variables relacionadas a la variabilidad climática en diferentes escalas que son las encargadas de modificar el comportamiento de estos eventos.

3.2. Análisis de sistemas de baja presión

La evolución de bajas presiones en el océano puede originar huracanes, estos se inician

como una baja presión y si las condiciones de temperatura y viento son apropiadas, pueden continuar evolucionando a depresión tropical, luego a tormenta tropical y por último a huracán tropical, también llamados sistemas ciclónicos.

Las bajas presiones son sistemas en las cuales el aire cálido que se encuentra en una menor altitud es obligado a subir gracias a las masas de aire frío, vientos, temperatura y a la menor presión atmosférica. El movimiento es ciclónico, lo que genera la formación de nubes que posteriormente provocan lluvias intensas, debido a que, como se mencionó anteriormente, las bajas presiones pueden llegar a convertirse en huracanes. La formación de este evento depende de la distribución de los vientos en la atmósfera, de la circulación atmosférica y la temperatura.

Para Costa Rica en el periodo de estudio, los meses en los que más bajas presiones se presentaron fueron octubre con 19 casos y noviembre con 30 eventos. Según Alvarado (2013), las bajas presiones son fenómenos muy frecuentes en esta latitud, especialmente entre mayo y noviembre, debido a que en esa época el país se encuentra bajo el dominio de la Zona de Convergencia Intertropical y otros fenómenos ciclónicos que migran desde el Océano Atlántico. En la [figura 6](#) se muestra la distribución mensual de las bajas presiones en el periodo de estudio.

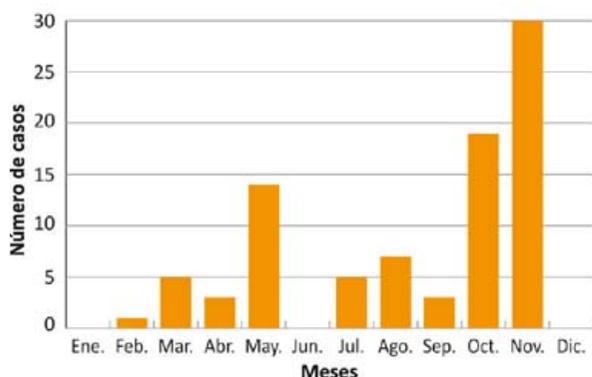


Figura 6. Distribución mensual de las bajas presiones registradas entre el 2000 y el 2010 en Costa Rica.

En lo referente al impacto en la población este es similar al generado por los frentes fríos, teniendo la máxima afección en los meses de agosto, octubre y noviembre, tal como se puede observar en la [figura 7](#).

La razón por la cual en estos meses es donde más daños se generan, se debe al aumento en las inundaciones asociadas a la saturación de los suelos. Es probable también, que el efecto acumulado de la precipitación durante la mayor parte del período lluvioso (mayo a noviembre), contribuya con los procesos de saturación y el aumento de caudales de los ríos.

La distribución de los impactos generados por las bajas presiones es más amplia que en el caso de los frentes fríos. Esto se debe a que las bajas presiones se pueden originar tanto en el Caribe como en el Pacífico, por lo que el impacto que se asocia se puede presentar en cantones de ambas vertientes.

En el caso de los frentes fríos el impacto es mucho más regional, esto debido al reforzamiento de los vientos Alisios y a la barrera continental que representa el sistema montañoso del país. Se puede notar que los cantones más afectados son aquellos que presentan un relieve más uniforme; además, este tipo de eventos tienen una mayor reincidencia en la región Pacífico Central, donde los cantones de Aguirre y Parrita son los que

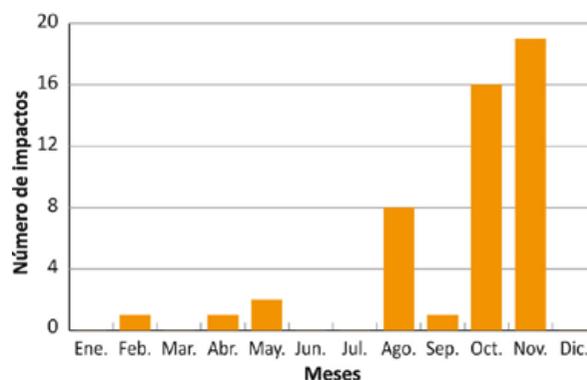


Figura 7. Distribución mensual de los impactos causados por las bajas presiones. Período de análisis 2000 y el 2010.

históricamente se han visto más afectados. La razón por la cual esta zona es la más afectada se puede asociar a la orografía que tiene el país, ya que todas las formaciones montañosas constituyen una barrera que limita el paso de los vientos húmedos que ingresan al país, por lo cual la poca distancia entre el núcleo de precipitación montaña arriba y la llanura, son el lugar propicio para que se produzcan inundaciones repentinas y sumamente erosivas en las partes altas de las cuencas.

Lo anterior se puede ejemplificar retomando el caso de Parrita y Aguirre, lugares en los cuales se encuentran cerros pertenecientes a la fila Brunqueña o Costeña que es un sistema montañoso secundario. Esta formación se extiende por la costa central y sur del Pacífico costarricense y cuenta con elevaciones de 500 a los 1500 msnm, lo que ocasiona que las nubes formadas por la baja presión generen lluvias en las partes altas, las que posteriormente llegan a afectar en la parte baja de

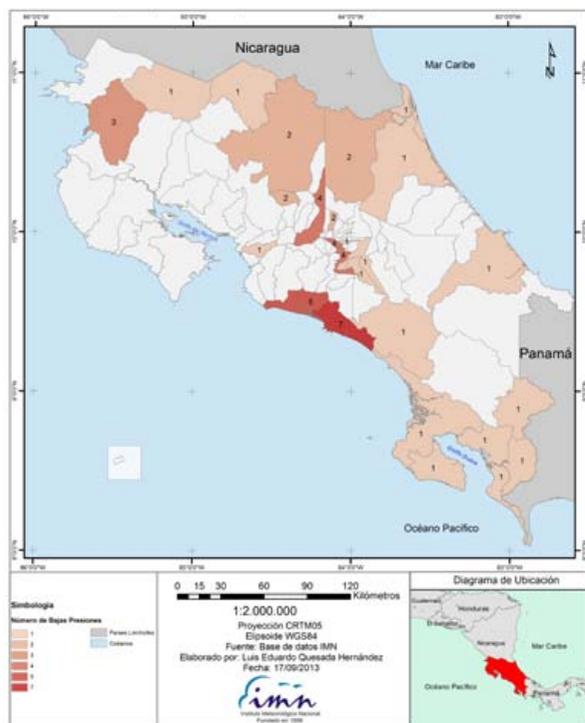


Figura 8. Distribución espacial de los impactos registrados por bajas presiones en el período 2000 – 2012. Costa Rica.

cuencas como la del río Parrita. Este fenómeno se repite a lo largo del país.

En la figura 8 se puede observar la distribución de los impactos asociados a las bajas presiones para Costa Rica, en el periodo 2000-2010.

En la figura 9, se puede observar el número de bajas presiones que realmente afectaron a una población en el periodo de estudio. Del total de 85 bajas presiones que se reportan en la base de datos, solo 48 afectaron realmente las poblaciones, por lo tanto se puede decir que un 56% de las bajas presiones registradas son las que ocasionaron daños directos a una población.

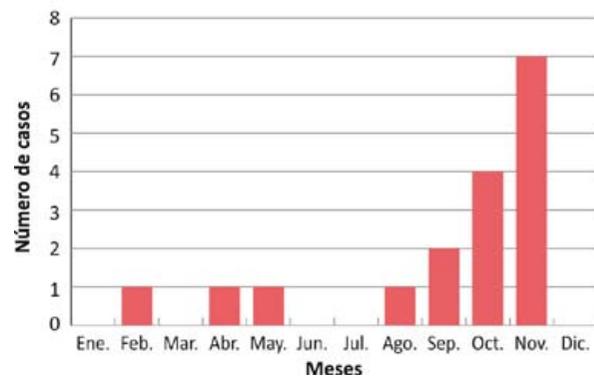


Figura 9. Número de bajas presiones que han afectado poblados. Período de análisis 2000-2013.

En lo que respecta a la distribución anual de las bajas presiones, esta es bastante irregular tal como se puede apreciar en la figura 10.

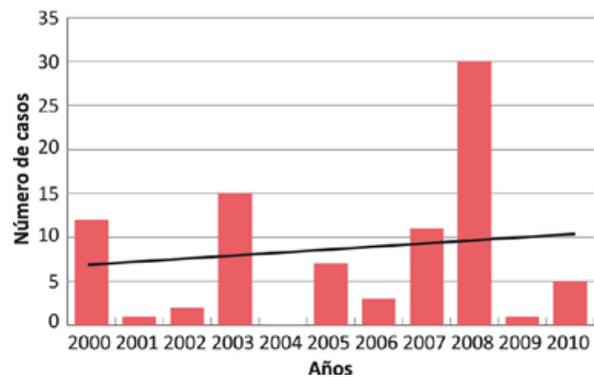


Figura 10. Número de bajas presiones registrados y su tendencia. Período de análisis 2000-2013.

Si bien es cierto no existe un patrón definido en el número de bajas presiones reportadas, si existe una tendencia de aumento aunque esta no es significativa.

4. Conclusiones

Dentro de las variables físicas que más influyen en la distribución de los eventos, está el relieve, dado que tanto en las bajas presiones como en los frentes fríos la orografía influye en la distribución espacial de las lluvias intensas, por lo tanto, los impactos están asociadas a una lluvia orográfica bien definida.

También cabe resaltar el mes de noviembre como el momento del año donde hay más poblados afectados por ambos eventos, esto se puede asociar a un punto en el cual los suelos se encuentran saturados, por lo que las inundaciones se originan con mucha más facilidad.

Es importante realizar un análisis de los eventos hidrometeorológicos extremos de forma interdisciplinaria, ya que estos responden a diversas variables tanto físicas como sociales. Al identificar áreas y grupos poblacionales vulnerables, es factible elaborar políticas y planes reguladores que establezcan las áreas de riesgo, así como proyectos de vivienda acordes a las situaciones ambientales que tiene cada cantón, capacitando además a las poblaciones locales en lo referente a los riesgos.

Si las medidas se toman con anticipación a la luz del cambio climático, se lograría planificar un desarrollo que minimice estos posibles riesgos que afectan las poblaciones del país, especialmente en la Zona Norte, el Caribe y el Pacífico Central.

5. Referencias

- Alvarado, L. (2013). *Resumen de Fenómenos Meteorológicos*. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica (en elaboración).
- Alvarado, L. & Zarate, E. (2005). *Posibles relaciones de cambio climático en Centroamérica y el Caribe suroccidental entre patrones lluviosos actuales y futuros*. Costa Rica: Proyecto PNUMA-TWAS.
- CEPAL, (2011). *La economía del cambio climático en Centro América. Reporte Técnico*. Recuperado de: http://www.eclac.org/publicaciones/xml/5/43925/2011-29-CambioClimatico-RT-L1016web_Cap_7.pdf
- CNE, (S.F.) *Deslizamientos, Inundaciones y Sismos*. Recuperado de: http://www.cne.go.cr/educacion_asesoria/7/Folleto_Deslizamientos.pdf.
- Flores, R.; Salas, J.; Astorga, M. & Rivera, J. (2010). *El impacto económico de los eventos naturales y antrópicos extremos en Costa Rica. 1988-2005*. Costa Rica: Unidad de Inversiones. MIDEPLAN.
- Strahler, A. (1974). *Geografía Física*. España: Editorial Omega.

La Oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica

DANIEL POLEO BRITO¹
ELADIO SOLANO LEÓN²
WERNER STOLZ ESPAÑA³

Resumen

Se llevó a cabo un análisis mensual del comportamiento de cada una de las ocho fases de la Oscilación Madden-Julian (MJO-siglas en inglés) y se obtuvo que para una amplitud (A) mayor que 1 se registró el doble de días en las fases 5, 6 en el trimestre diciembre-febrero (DEF) en relación con las otras fases. Las fases 1 y 2 triplican en días lo que acumulan las otras fases, en los meses de mayor cantidad de lluvia del periodo agosto-octubre (ASO), en la vertiente del Pacífico costarricense. Este comportamiento podría explicar un fortalecimiento de las precipitaciones en el Pacífico centroamericano durante el período ASO, reforzando el comportamiento bimodal de las precipitaciones. Se analizaron espectralmente las series de datos de lluvia de 12 estaciones meteorológicas de Costa Rica en un período de 38 años, filtrando previamente las frecuencias menores a 30 días, aplicando luego el método de la transformada de Fourier se obtuvo la señal con mayor potencia en periodos comprendidos entre 28 y 90 días, los cuales se asociaron con la MJO, siendo más frecuente la señal con período de 30 días. Se comparó la lluvia en cada una de las 8 fases de la MJO y se observó que cuando la $A > 1$ hay mayor diferencia en los acumulados de lluvia entre cada fase que cuando la $A < 1$. La vertiente del Pacífico cuando la $A > 1$ presentó casi tres veces más (menos) acumulados de lluvias durante las fases 1 y 2 (4, 5 y 6) de la MJO; contrariamente, el Caribe y Zona Norte presentaron dos veces más (menos) cantidad de lluvia acumulada en las fases 5 y 6 (1, 2 y 8) de la MJO.

PALABRAS CLAVE: OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN (MJO), ANÁLISIS ESPECTRAL MJO, MJO EN EL CARIBE, PRECIPITACIONES Y MJO, ANÁLISIS DE FOURIER Y MJO.

Abstract

Was performed a monthly analysis of the behavior of each of the eight phases of the Madden-Julian Oscillation (MJO-acronym in English) and was obtained for an amplitude (A) greater than 1 double days was recorded in phases 5, 6 in the December-February (DEF) quarter compared with the other phases. Phases 1 and 2 triples in days which accumulate other phases, in the months of highest rainfall in the period August-October (ASO) in the Pacific slope of Costa Rica. This behavior could explain the strengthening of rainfall in the Central American Pacific during the ASO period, reinforcing the bimodal behavior of rainfall. Series of rainfall data from 12 weather stations Costa Rica is spectrally analyzed over a period of 38 years previously filtering out frequencies below 30 days, then applying the method of the Fourier transform of the signal with more power during periods was obtained between 28 and 90 days, which were associated with the MJO, the most common being the signal period of 30 days. Rain in each of the eight phases of the MJO was compared and it was noted that when the $A > 1$, there is greater difference in the cumulative rainfall between each phase when the $A < 1$. The Pacific slope when $A > 1$ had almost three times more (less) accumulated rainfall during phases 1 and 2 (4, 5 and 6) of the MJO; contrary, the Caribbean and North Zone presented twice more (less) rainfall accumulated in phases 5 and 6 (1, 2 and 8) of the MJO.

KEYWORDS: MADDEN-JULIAN OSCILLATION (MJO), SPECTRAL ANALYSIS MJO, MJO IN THE CARIBBEAN, RAINFALL AND MJO, MJO AND FOURIER ANALYSIS.

- 1 Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: dpoleo@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.
- 2 Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: esolano@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.
- 3 Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: wstolz@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.

1. Introducción

La oscilación atmosférica de Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) es el modo predominante de la variabilidad intraestacional en los trópicos a escala planetaria. Esta oscilación modula, entre otras cosas, la temporada de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte y en otras regiones según Klotzbach (2010), el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y la actividad lluviosa convectiva en los trópicos. Sus impactos locales y remotos son de especial interés, dado que su predictibilidad es de alrededor de dos semanas según Ventrice et al. (2013). Por ende, podrían anticiparse con mayor antelación eventos de precipitaciones extremas o periodos muy lluviosos en la región centroamericana y del Caribe.

La actividad convectiva de la MJO se propaga hacia el este a lo largo del ecuador, a una velocidad de alrededor de 5 ms^{-1} y está particularmente confinada al Hemisferio Este, aunque su señal, en los niveles más altos de la troposfera, afecta los trópicos a nivel global según Ventrice et al. (2013).

La MJO se genera por la fuerte actividad convectiva que se desarrolla sobre el océano Índico y tiene un periodo de alrededor de 45 días (30-60 días) según Madden y Julian, (1972) y de 30-90 días, según Martin y Shumacher (2011).

Martin y Shumacher (2011) analizaron la influencia de la MJO en la actividad lluviosa del Mar Caribe, utilizando datos diarios de precipitación, viento y otras variables atmosféricas estimadas satelitalmente. Estudiaron la variabilidad intraestacional (30-90 días) y las lluvias caribeñas, vinculándolas con las fases de la MJO definidas por Wheeler y Hendon (2004).

Madden y Julian (1994) identificaron el núcleo convectivo de mayor precipitación, para monitorizar el desplazamiento zonal de la MJO, la cual se localiza primero sobre el sector occidental del océano Índico para luego propagarse hacia

el oriente sobre el océano Pacífico occidental y central. Dicho complejo convectivo se debilita cuando se desplaza sobre las aguas frías del Pacífico oriental.

Martin y Shumacher (2011) observaron cantidades anómalas de lluvia de hasta 50% por encima (debajo) del valor anual promedio, durante las fases 1 y 2 (5 y 6) de la MJO, en la región del Mar Caribe. Cuando las anomalías fueron positivas (negativas) en las fases 1 y 2 (5 y 6), las desviaciones del viento disminuyeron (aumentaron). Además, demostraron que las variaciones de los vientos en los niveles más bajos de la atmósfera, son más significativas en la región del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ). Asimismo, encontraron que la precipitación extrema sobre las islas caribeñas muestra una fuerte relación con las fases de la MJO, dado que los eventos de lluvias extremas más intensas fueron más frecuentes en las fases 1 y 2 en la región del Mar Caribe.

Torres (2012) demuestra que las fases de la MJO tienen relación con el comportamiento de la actividad lluviosa en Colombia. Por su parte Paegle, Byerle y Mo (2000) estudiaron el reforzamiento de las precipitaciones en Suramérica, como consecuencia del fortalecimiento de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur por la MJO.

Klotzbach (2010) estudió la relación entre la MJO y la cantidad de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico, logrando demostrar que en las fases 1 y 2 la frecuencia e intensidad de dichos fenómenos atmosféricos son significativamente mayores. Aunado a lo anterior, Alfaro, Solano y Quesada (2010) relacionaron dicha actividad ciclónica en el Mar Caribe con la ocurrencia de eventos extremos en el país, lo cual evidencia lo importante del estudio de la MJO.

Para determinar si las oscilaciones atmosféricas afectan el comportamiento de las variables meteorológicas de una región se recurre al análisis espectral de las series de tiempo.

Uno de los primeros estudios de este tipo enfocado a las oscilaciones de la Atmósfera Libre sobre América Central fue realizado por Amador (1975), aplicando filtros de paso alto y bajo con frecuencias entre cuatro y diez días aproximadamente. Amador (1975) realizó análisis espectrales de la temperatura, la altura geopotencial y las componentes zonal y meridional del viento, identificando con ello los efectos sobre Centroamérica de las ondas tropicales y ondas de Rossby, entre otros. Sin embargo, no se utilizaron datos de precipitación ni frecuencias mayores a 20 días para analizar la posible señal asociada de la MJO con el patrón lluvioso en Costa Rica.

El objetivo principal de este trabajo es investigar si existe relación entre el comportamiento de las lluvias en Costa Rica y la MJO.

1.1. Índice de seguimiento y diagrama de Wheeler-Hendon

Wheeler y Hendon (2004) desarrollaron un índice de monitorización de la MJO. Éste se basa en los coeficientes temporales (componentes principales) de las funciones empíricas ortogonales del viento zonal -cuasi ecuatorial- en 850 hPa, el viento zonal en 200 hPa y los datos de radiación de onda larga saliente (OLR) entre las latitudes 15°N y 15°S. A las primeras dos componentes principales las denominaron índices multivariados en tiempo real de la MJO 1 (MJO 2) -RMM1 y RMM2 respectivamente-. Dichos índices explican el 25% de la varianza de los campos atmosféricos originales, mientras que la tercera componente principal (EOF 3) explica el 6.1% de la varianza, razón por la cual se utilizan únicamente las dos primeras componentes principales.

Además, la MJO fue clasificada en 8 fases según Wheeler y Hendon (2004). Cuanto mayor (menor) sean su varianza y amplitud (ver ecuaciones 1 y 2) más (menos) intensa es la oscilación. La amplitud de la MJO se calcula según las ecuaciones 1 y 2.

$$\text{Varianza (V)} = (\text{RMM1})^2 + (\text{RMM2})^2 \quad (1)$$

$$\text{Amplitud (A) MJO} = (\text{Varianza})^{1/2} \quad (2)$$

En la figura 1 se muestra el diagrama de Wheeler-Hendon. La MJO de intensidad débil tiene amplitud menor que 1 y se circunscribe al círculo central de la figura. La convección profunda de la MJO se localiza en el océano Índico en las fases 2 y 3, fases 1 y 8 en el Hemisferio Occidental y África, fases 6 y 7 sobre el Pacífico Occidental y fases 4 y 5 en Oceanía.

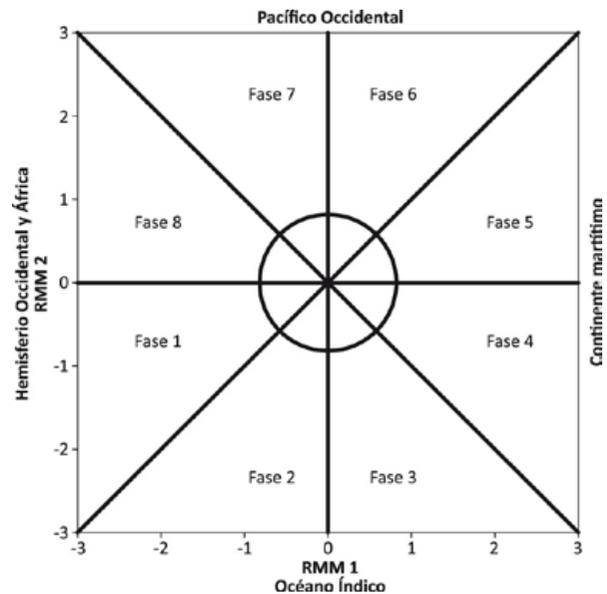


Figura 1. Diagrama de Wheeler-Hendon para localizar la oscilación de Madden-Julian según las 8 fases de la MJO. Adaptado de Wheeler-Hendon (2004).

1.2. Algunas características dinámicas de la MJO en función de sus ocho fases

Gottschalck, Kousky, Higgins y L'Heureux (2014) graficaron la velocidad potencial en el nivel atmosférico de 200 hPa sobre la región geográfica mostrada en la figura 2, en función de las fases de la MJO. El análisis se hizo para los periodos de noviembre a marzo (en adelante, periodo 1) y de mayo a setiembre (periodo 2), correspondientes a

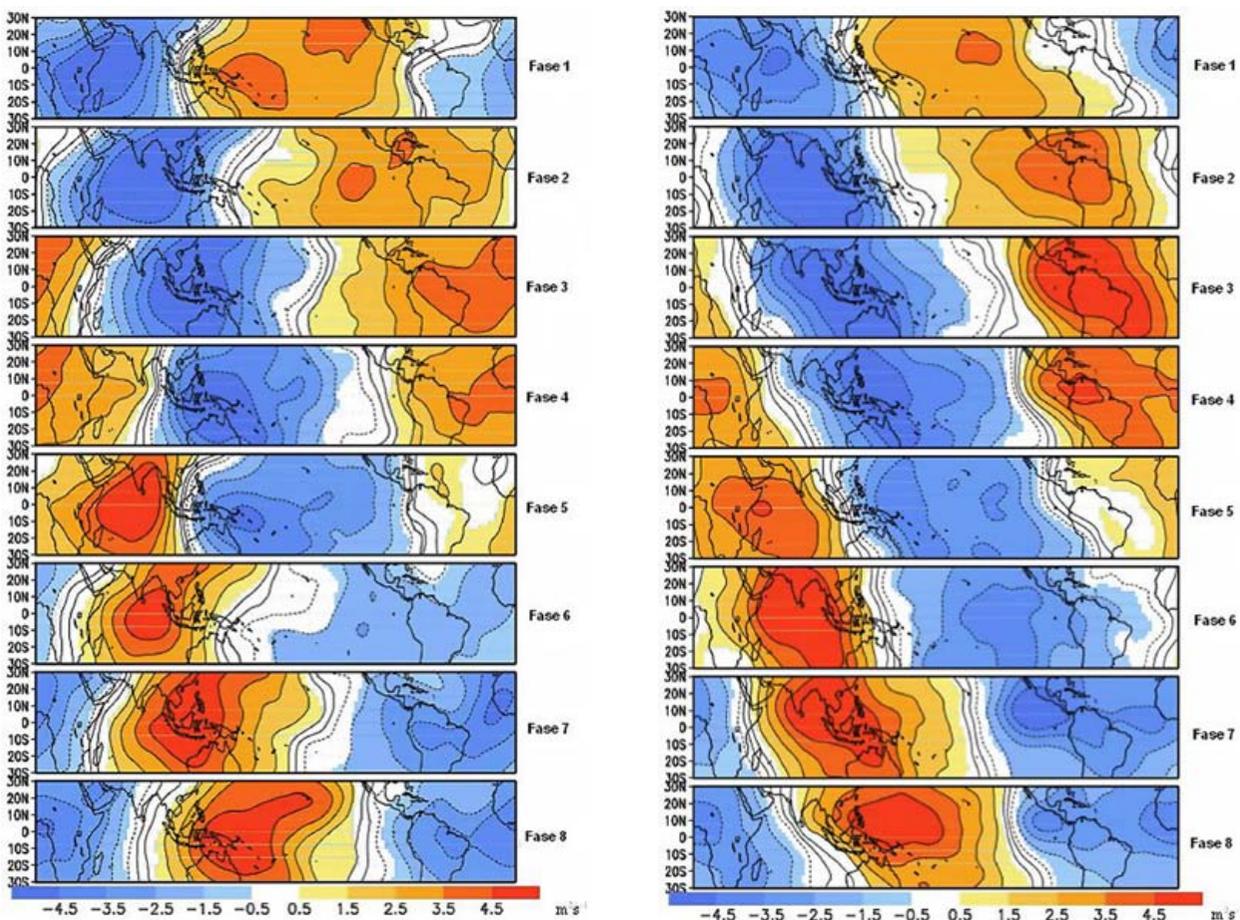


Figura 2. Anomalías de la velocidad potencial (m^2s^{-1}) en el nivel atmosférico de 200 hPa (1979-2004) en función de las fases de la MJO. Adaptado de Gottschalck (2014).

las estaciones seca y lluviosa, respectivamente, de la vertiente del Pacífico de Costa Rica.

Las fases 1, 2, 3 y 4 muestran convergencia en 200 hPa en ambos periodos, aunque con valores mayores en el periodo 2. Las fases 6, 7 y 8 reflejan patrones de divergencia con valores máximos, particularmente sobre la vertiente del Pacífico centroamericano. La fase 5 no muestra un patrón dominante de divergencia en ambos cuatrimestres. Los valores máximos de convergencias se detectan sobre la vertiente del Pacífico.

Los patrones de convergencia (divergencia) en altura deberían desfavorecer (favorecer) la actividad lluviosa convectiva sobre la región centroamericana.

La figura 3 muestra anomalías de presión atmosférica, de signo contrario, entre el Mar Caribe y la Vertiente del Pacífico centroamericano, particularmente en las fases 3, 4, 7 y 8 (3, 4, 5, 7 y 8), del periodo 1 (2). Si en el Mar Caribe la anomalía es positiva (negativa) y en el Pacífico, negativa (positiva), los vientos alisios se refuerzan (debilitan). En este último escenario el flujo monzónico se vería favorecido, particularmente en las fases 7 y 8 del periodo 2, correspondiente a la estación lluviosa del Pacífico centroamericano.

La fase 5 muestra anomalías negativas en ambos periodos sobre Costa Rica. Las anomalías del vector viento en el nivel atmosférico de 850 hPa y de la radiación de onda larga (OLR, por sus siglas en inglés) sobre el ecuador en la región del Pacífico y

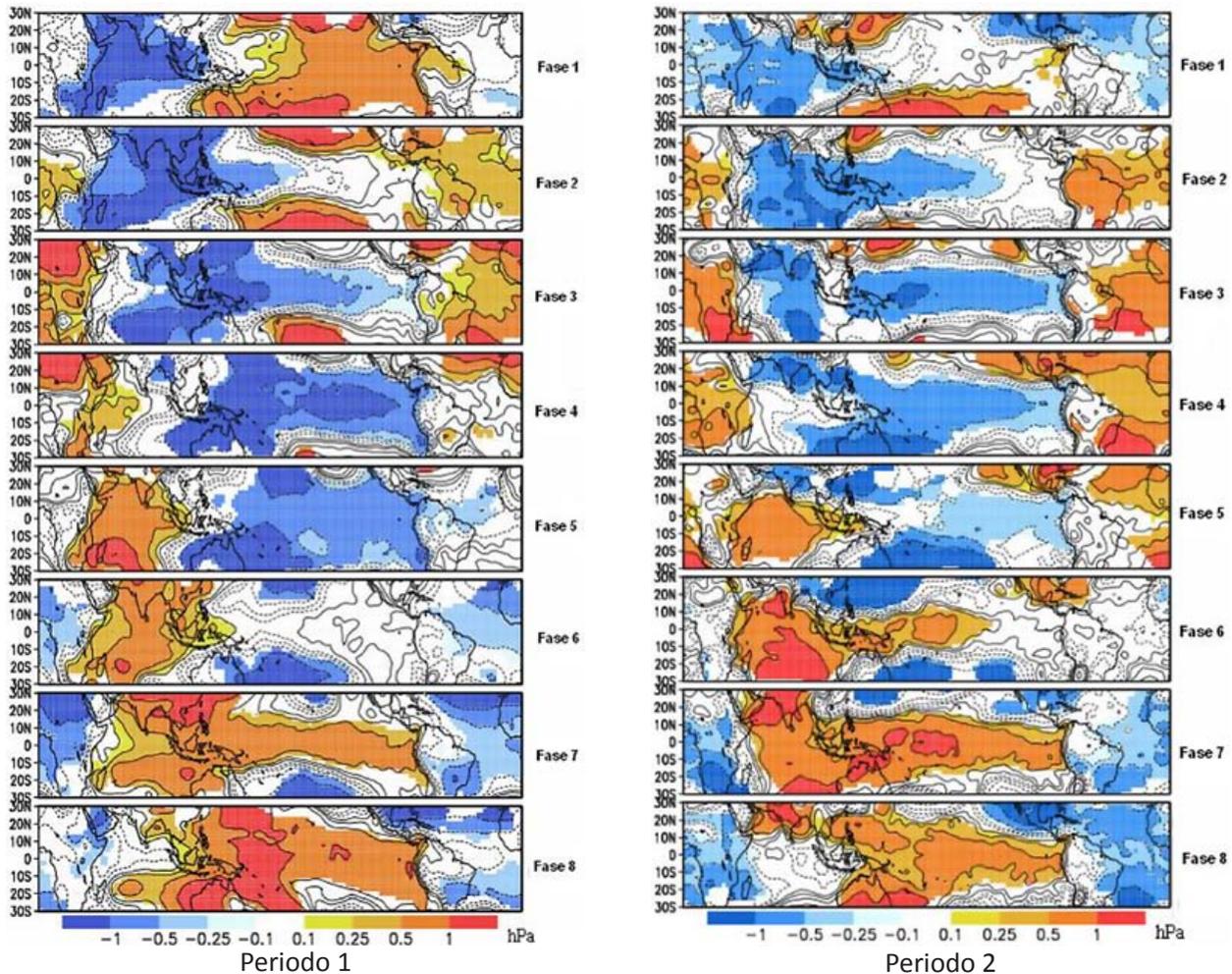


Figura 3. Anomalías de la presión atmosférica a nivel del mar (1979-2004) en función de las fases de la MJO. Adaptado de Gottschalck (2014).

particularmente sobre la región Centroamericana dependen de las fases de la MJO (ver figura 4).

En la figura 3 las zonas sombreadas informan de anomalías negativas de OLR menores que -7.5 , -15 , -22.5 y -30 Wm^{-2} y las rayadas, anomalías positivas mayores que 7.5 , 15 , 22.5 y 30 Wm^{-2} ; las flechas muestran las anomalías del viento estadísticamente significantes al 99%.

Las anomalías de vientos del oeste (ver figura 4) en las fases 1, 2 y 8 sobre la vertiente del Pacífico deberían favorecer la advección de humedad y los procesos convectivos sobre la región continental, y el fortalecimiento de la Zona de Convergencia

Intertropical o inclusive desplazarla hacia el norte de su posición climatológica. Al mismo tiempo, se registra sobre el mar Caribe una desintensificación del CLLJ y de la velocidad de los vientos alisios.

Por el contrario, las anomalías de viento del este en las fases 3, 4, 5, 6 y 7 implican tanto la intensificación de los vientos alisios sobre Centro América como del CLLJ, lo cual desfavorece la actividad lluviosa de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, aumentándola en su región caribeña. Las fases 1 y 8 de la MJO son las que muestran las mayores anomalías, tanto del viento del oeste como de la OLR.

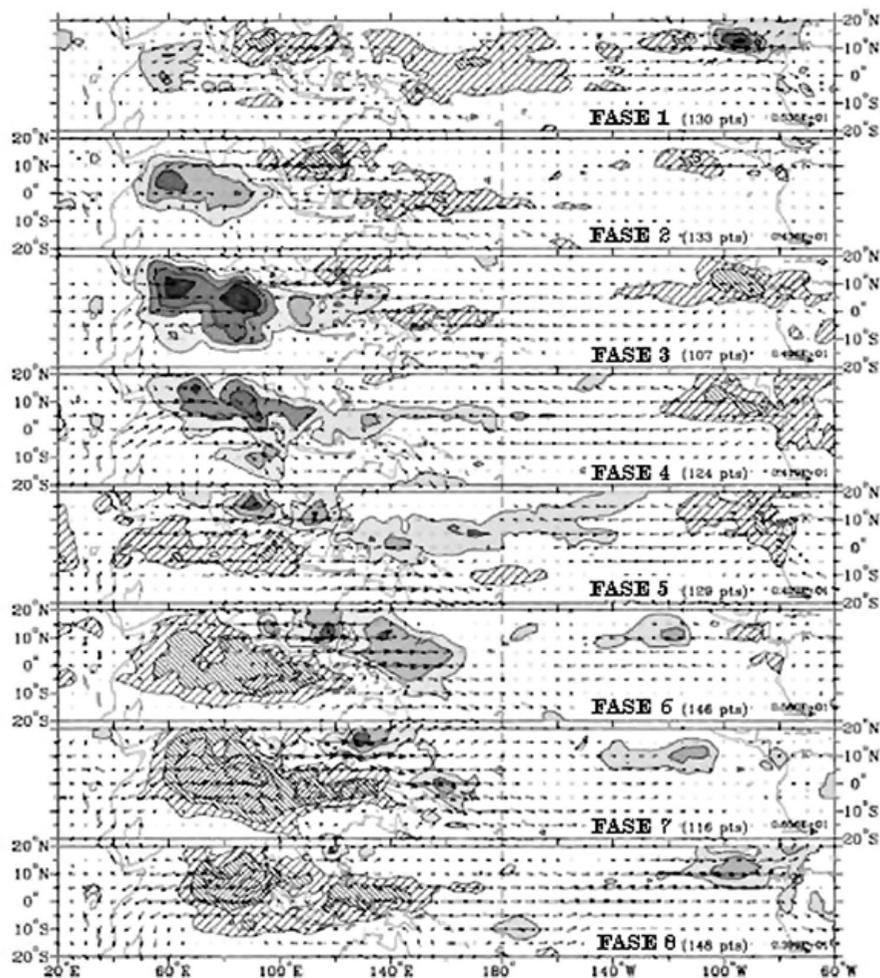


Figura 4. Anomalías del vector viento en el nivel atmosférico de 850 hPa y de la radiación de onda larga del periodo 1974-2003 de mayo-junio (exceptuando 1978) en función de las fases de la MJO. Adaptado de Wheeler-Hendon (2004).

2. Metodología

Se utilizaron datos diarios de 12 estaciones meteorológicas mecánicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (cuadro 1), con un registro de enero de 1975 a julio de 2013, exceptuando la estación meteorológica de Peñas Blancas cuyo periodo abarca hasta el año 2006. Los datos faltantes llegan a un máximo de 10 % y se completaron aplicando la técnica de Alfaro y Soley (2009).

La caracterización de la MJO se basa en las componentes RMM1, RMM2 y sus fases diarias

registradas por la Oficina de Meteorología de Australia (<http://www.bom.gov.au/climate/mjo>).

Se aplicó el método de filtrado Gaussiano de ventanas de paso bajo con frecuencia igual a 31 días a las series de datos diarios de lluvia para atenuar los espectros de altas frecuencias menores a 30 días. Para tal efecto se usó un filtro del paquete computacional Matlab (versión R2007). Posteriormente, se llevó a cabo el análisis espectral de los datos basándose en la metodología de Torrence y Compo (1998), para determinar si existía una señal de interés alrededor de 30-60 días. Para tal efecto se utilizó

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas mecánicas utilizadas en el estudio (1975-2013)

Cuenca Hidrológica	Número de estación meteorológica	Nombre	Latitud (°) Norte	Latitud (°) Norte	Longitud (°) Oeste	Longitud (°) Oeste	Altitud (m)	Vertiente
69	515	QUEBRADA AZUL	10	24	84	28	83	Caribe
69	556	CIUDAD QUESADA	10	17	84	22	1450	Caribe
73	10	CATIE, TURRIALBA	9	53	83	39	602	Caribe
81	3	LIMÓN	9	57	83	1	5	Caribe
85	6	PUERTO VARGAS, LIMÓN	9	43	82	48	3	Caribe
69	534	PEÑAS BLANCAS	11	12	85	36	80	Caribe
84	19	HDA. LA LAGUNA, CURRIDABAT	9	55	84	0	1240	Pacífico
84	6	HDA. CONCEPCIÓN, TRES RÍOS	9	57	84	8	997	Pacífico
94	2	MARÍTIMA	9	23	84	2	8	Pacífico
100	35	COTO 47	8	35	82	58	8	Pacífico
74	20	LLANO GRANDE, LIBERIA	10	35	85	32	80	Pacífico
72	111	PAQUERA	9	49	84	56	15	Pacífico

un análisis armónico de Fourier (ver ecuaciones 3 y 4), con una secuencia de N datos de entrada del resultado x (*análisis de Fourier*), donde N son los datos diarios de la precipitación. Luego, se aplicó la transformada rápida de Fourier (X) como un vector de longitud N, X (ecuación 4).

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n)e^{-j2\pi(k-1)(\frac{n-1}{N})} \quad 1 \leq k \leq N \quad (3)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k)e^{j2\pi(k-1)(\frac{n-1}{N})} \quad 1 \leq n \leq N \quad (4)$$

Se contabilizaron y graficaron las cantidades de días de la MJO en función de su fase con el fin de determinar si existían variaciones mensuales significativas en el periodo de estudio. Además, se diferenciaron los acumulados de lluvia asociados con amplitudes mayores y menores a 1 de la MJO.

Para determinar si existían diferencias entre los registros totales de lluvia y la oscilación mensual, se graficaron los acumulados de lluvia para cada fase de la MJO durante los meses de octubre y julio, con el fin de establecer si las tendencias de precipitación anual se repetían durante el mes más lluvioso (seco) en la vertiente del Pacífico

(Caribe) y durante el período de ocurrencia del Veranillo.

Martin y Shumacher (2011) sugieren que no existen diferencias estacionales entre los períodos de duración de las fases de la MJO, sin embargo, no presentaron una comparación mensual de la oscilación. Se graficaron las variaciones mensuales de la MJO para amplitudes mayores a 1 en cada una de las fases con una significancia estadística del 98%. Se buscaba encontrar algún tipo de sesgo de las fases 1 y 2 durante los períodos de mayor precipitación en la estación lluviosa de la vertiente del Pacífico de Costa Rica y algún predominio de las fases 4 y 5 durante la estación seca de la misma vertiente, en el periodo noviembre-abril.

Se comparó durante el mes de octubre el comportamiento de la MJO en Liberia, Coto 47 y Caribe Sur, con el fin de observar si existía alguna relación entre el mes más lluvioso de la vertiente del Pacífico o del Caribe y el comportamiento de la MJO, así como para el mes de julio, en el cual se presenta la primera parte del período canicular (Veranillo).

Además, se calculó el promedio de lluvia de todas las estaciones en las vertientes del Caribe y del Pacífico en función de cada una de las fases de la MJO para amplitudes mayores que 1, se calcularon las anomalías de precipitación y se graficaron para obtener un promedio de su comportamiento en cada región, en función de las fases de la MJO. Finalmente, se realizó un estudio de significancia estadística para muestras independientes con una prueba T de Student, para los casos donde las amplitudes mayores que 1 en cada una de las estaciones estudiadas a un intervalo de confianza de 95 %.

3. Resultados y análisis

3.1. Análisis espectral de los datos diarios de lluvia de alguna estaciones meteorológica de Costa Rica

El análisis espectral de los datos de lluvia diaria de las estaciones meteorológicas de la vertiente del Pacífico como Hacienda Curridabat, Quebrada, Liberia, Paquera y Coto 47, muestran la mayor señal espectral tiene períodos de 28 a 55, lo que podría identificarse con la MJO (ver [figura 5](#)). Las dos últimas son las que muestran las potencias más altas.

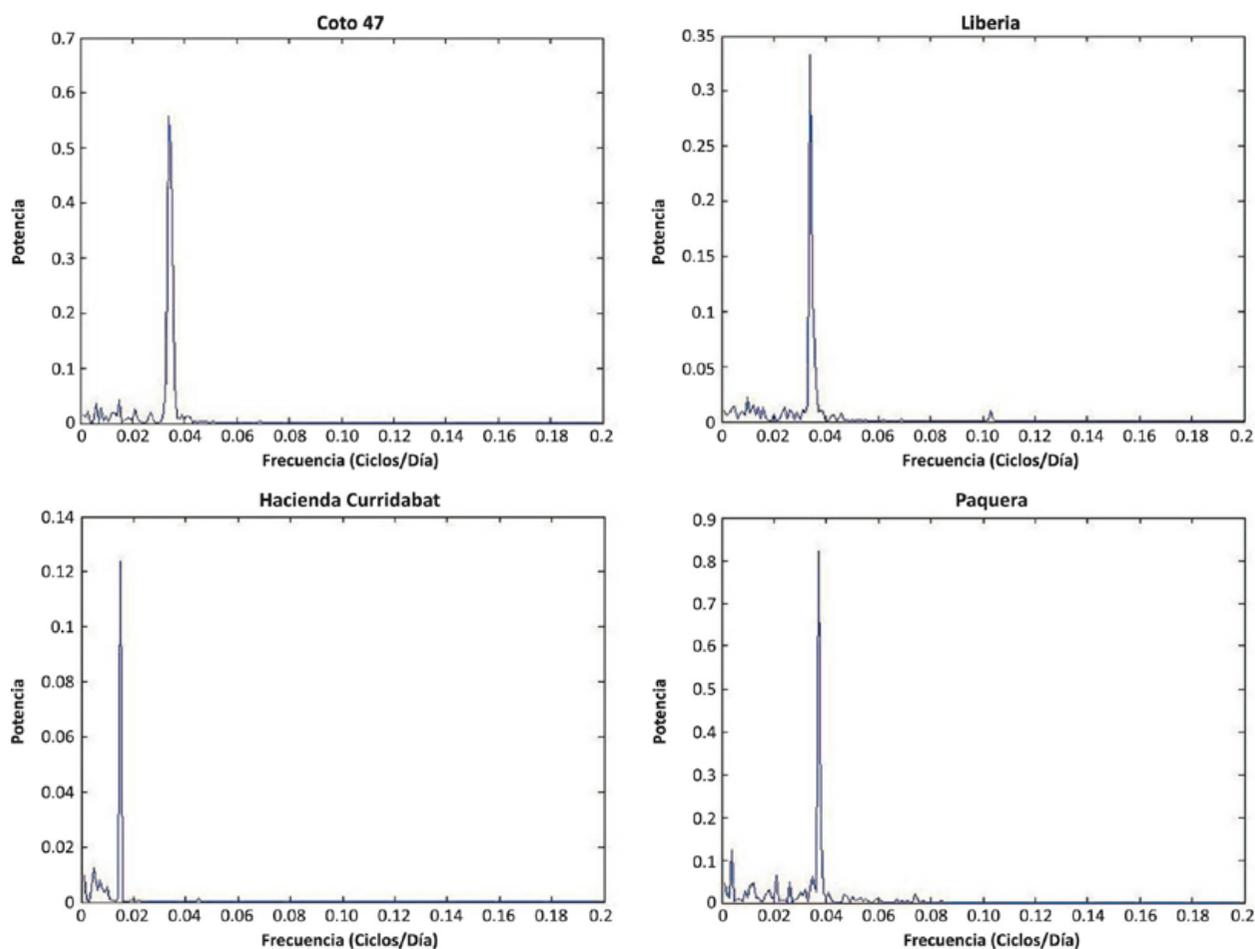


Figura 5. Análisis espectral con filtrado de 30 días aplicado a las estaciones de Coto 47 (mayor potencia día 29) y Liberia (mayor potencia día 28) (arriba-derecha), Hacienda Curridabat (día 55) (abajo-izquierda) y Paquera (día 31) (abajo-derecha) localizadas en el Pacífico y el Valle Central. (Potencia (mm/día) * 10^{-2}).

Quebrada Azul y Turrialba muestran una señal más clara alrededor de la frecuencia de interés (figura 6). En Limón y Puerto Vargas, vertiente caribeña del país, no se muestra una señal clara como en la vertiente del Pacífico, sin embargo, la mayor potencia se sigue registrando en el periodo de 29 a 50 días, equivalente a frecuencias de 0,02-0,04 ciclos/día (figura 7).

La detección de las señales espectrales asociadas con la MJO en las estaciones meteorológicas en

estudio, es de suma importancia desde el punto de vista de la predictibilidad del comportamiento de las lluvias, dado que el reforzamiento de éstas sería previsible en función de la estimación de la fase de la MJO presente sobre el país.

Dicho aumento de las lluvias podría favorecer la generación de eventos de precipitaciones extremos sobre lo normal en el país en particular y sobre el área centroamericana en general, de tal manera que podría anticiparse el aumento

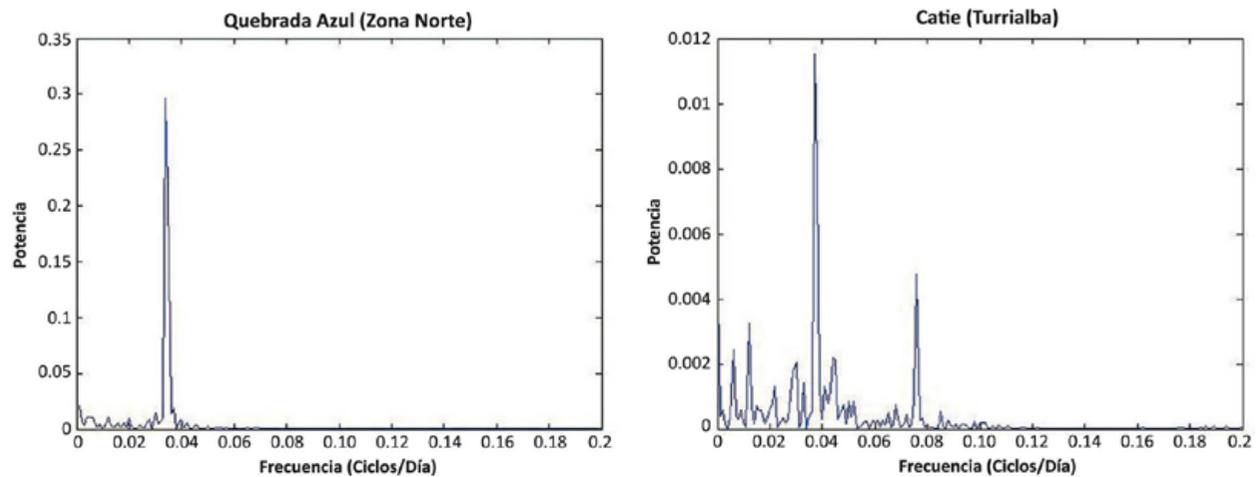


Figura 6. Análisis espectral con filtrado de 30 días aplicado a las estaciones en Quebrada Azul (Potencia $(\text{mm/día}) \cdot 10^{-2}$) (mayor potencia día 29) (izquierda) y CATIE (Potencia $(\text{mm/día}) \cdot 10^{-3}$) (derecha), en la Zona Norte y Caribe Norte respectivamente.

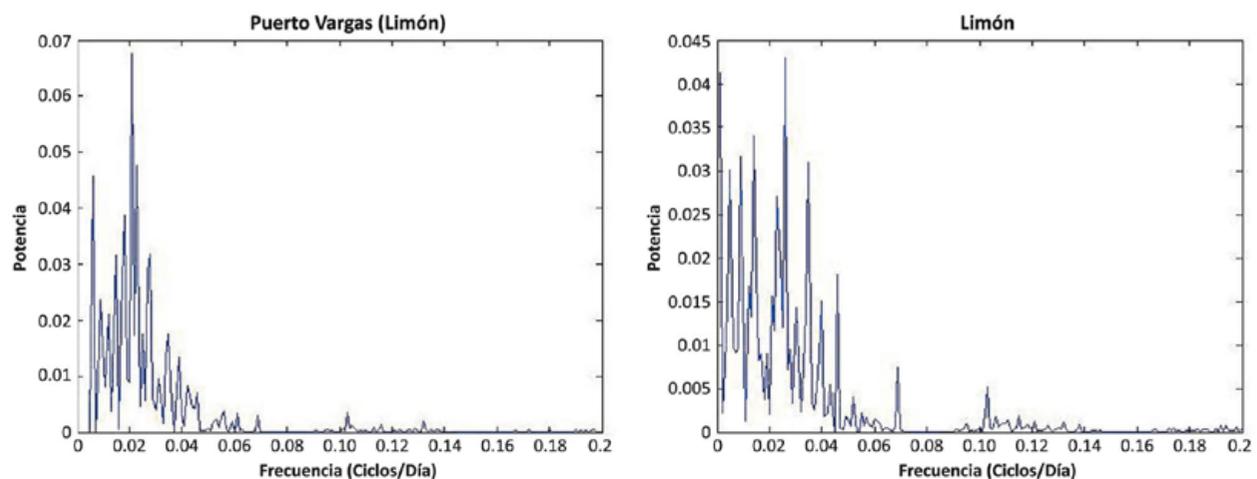


Figura 7. Análisis espectral con filtrado de 30 días aplicado a las estaciones en Puerto Vargas (mayor potencia día 50) (izquierda) y Limón (mayor potencia día 31) (derecha) del Caribe Sur costero. (Potencia $(\text{mm/día}) \cdot 10^{-3}$).

de la probabilidad de ocurrencia. Generalmente, el patrón lluvioso se relaciona con variables de mayor escala tanto temporal como espacial, sin embargo, estos resultados demuestran que existe una variabilidad y asociación importante entre el patrón lluvioso del país y la MJO.

3.2. Distribución mensual de las fases de la MJO

En la figura 8 se muestran las características mensuales relevantes, a saber: a) la fase 1 predomina en 50 días más en relación con las otras fases en julio, mes de Veranillo en la vertiente del Pacífico de Costa Rica, b) las fases 1, 2, 5 y 6

están presentes en igual medida en agosto, otro mes de Veranillo en la región centroamericana, c) la fase 5 acumula una mayor cantidad de días en los meses de setiembre y octubre, bimestre más lluvioso de la segunda etapa de la estación lluviosa en la vertiente del Pacífico, d) en el trimestre diciembre-febrero (correspondiente al invierno del hemisferio norte) predominan las fases 3, 6, 7 y 8, e), en mayo primer mes de la estación lluviosa del Pacífico, dominan las fases 7 y 8.

Todas las fases de la MJO están presentes a lo largo de los meses del año en mayor o menor medida, tal como lo plantearon Martin y Shumacher (2011), quienes indican que no existen diferencias estacionales importantes entre éstas.

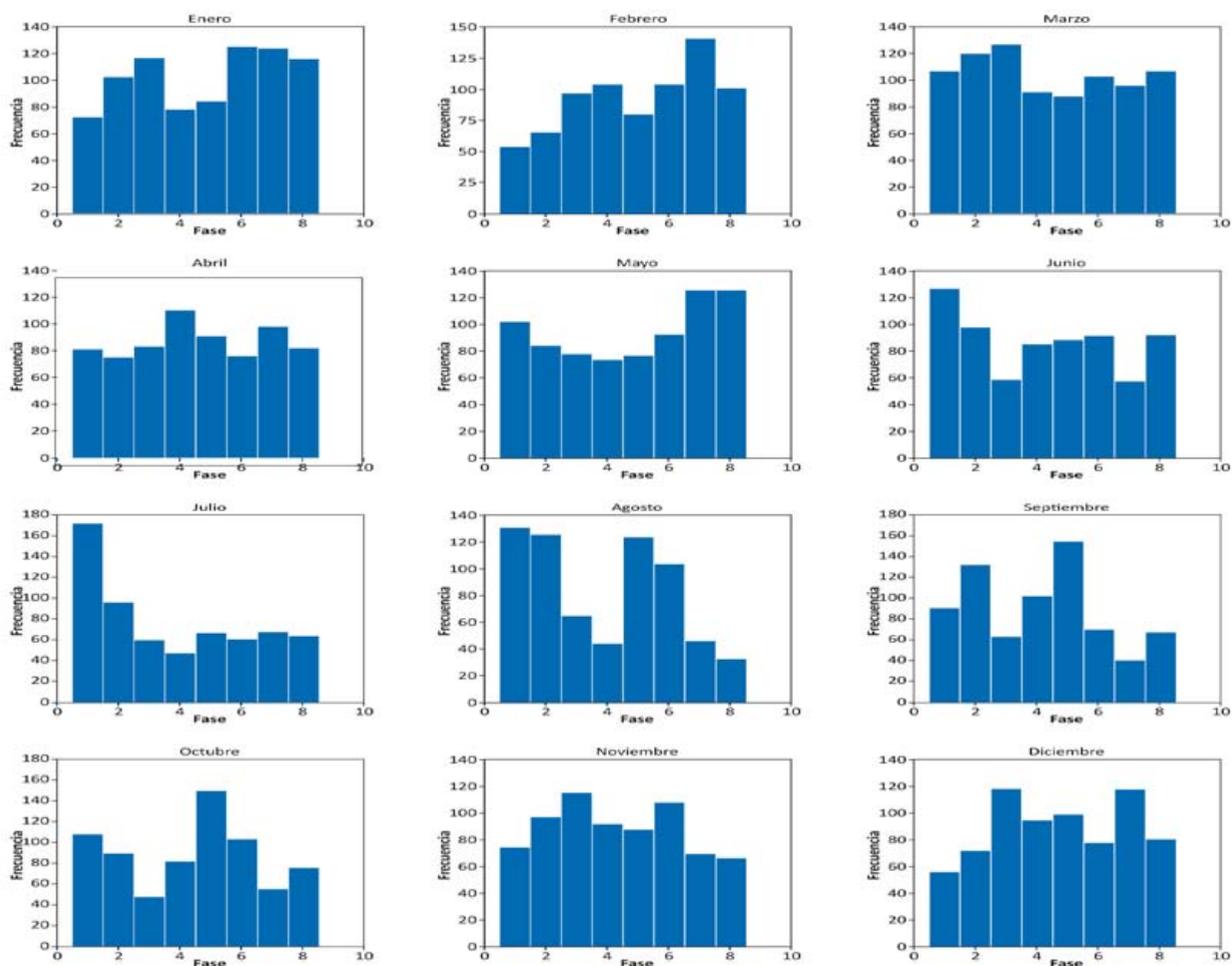


Figura 8. Cantidad total de días correspondientes a cada una de las fases de la MJO ($A > 1$) entre el periodo 1975-2013.

3.3. Lluvia acumulada en algunas estaciones meteorológicas en función de las fases de la MJO

Las figuras 9 y 10 muestran la lluvia acumulada en las estaciones meteorológicas en estudio, en función de las fases de la MJO, tanto para

amplitudes mayores como menores que uno. Las estaciones localizadas en la vertiente del Pacífico registran valores acumulados mayores en la fase 1 y 2, en comparación con el resto; en la región Caribe (Limón, Puerto Vargas y Turrialba) la fase 5 es la que muestra mayores cantidades, lo que estaría concordando con la disminución o

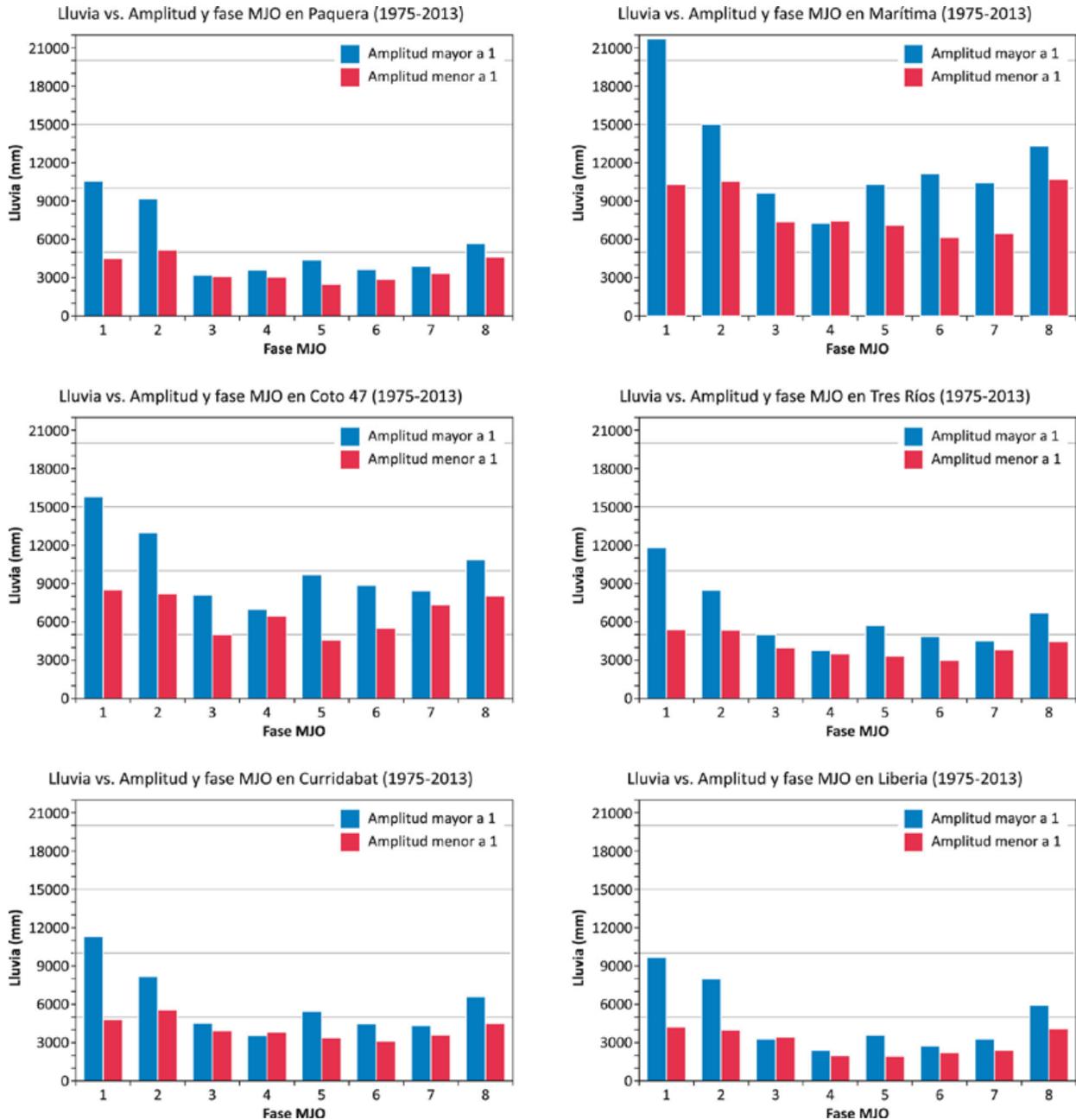


Figura 9. Lluvia acumulada (mm) para el período 1975-2013 en función de las fases de la MJO en la vertiente del Pacífico; amplitudes Fase mayores que 1 en color azul, menores que uno en rojo.

aumento, respectivamente de los vientos alisios y por ende del CLLJ, entre otros factores.

Cuando las amplitudes de la MJO superan el valor de uno, se presentan acumulados de lluvia superiores en relación a todos los casos en que la

intensidad es menor que uno, con excepción de la fase 4 en la estación de Curridabat (ver figura 9).

Los datos de la figura 10 reflejan el comportamiento de las estaciones meteorológicas en la costa caribeña. Tanto Limón como Puerto Vargas

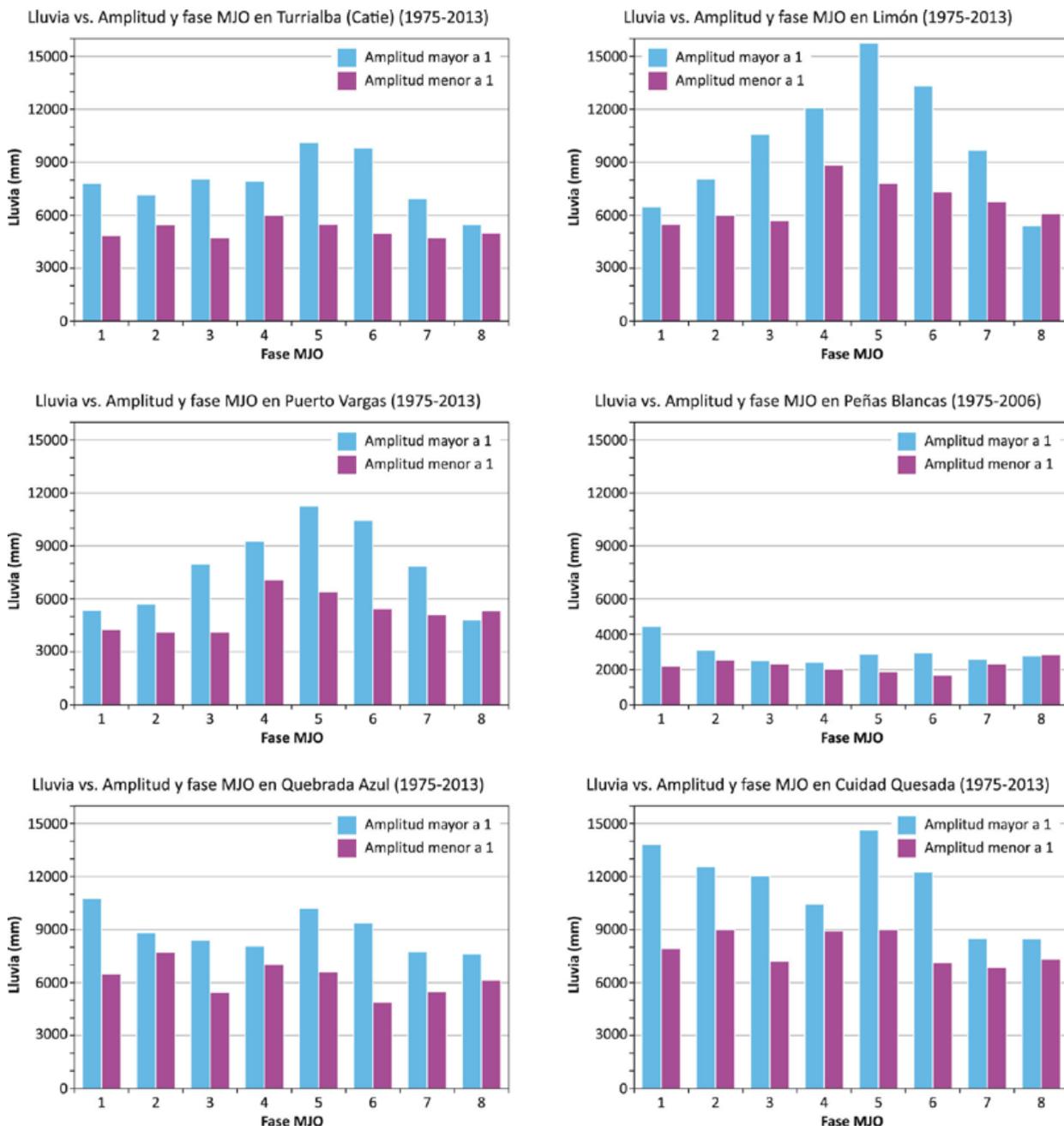


Figura 10. Lluvia acumulada (mm) para el período 1975-2013 (excepto Peñas Blancas) en función de las fases de la MJO en la vertiente del Caribe; amplitudes mayores que 1 en color celeste, menores que uno en morado.

reflejan que la fase 5 es la que muestra la mayor cantidad acumulada de lluvia; mientras que Peñas Blancas, Quebrada Azul y Ciudad Quesada muestran un escenario mixto, dado que tanto la fase 1 como la 5 registran cantidades mayores comparativamente con el resto de las fases.

El comportamiento de las precipitaciones de acuerdo a la fase de la MJO, es concordante en las estaciones que pertenecen a la vertiente del Pacífico; particularmente en las fases 1 y 2 se observan acumulados de lluvia que superaron en tres veces los montos acumulados en las fases 4 y 5. La fase 4 (fase 1) es la que presenta menos (más) cantidad de lluvia, durante el período de estudio.

Las anomalías de las lluvias en la vertiente del Caribe (ver [figura 10](#)), muestran que cuando la MJO tiene amplitudes > 1 éstas superan en más del 95% de los casos a las cantidades con amplitudes < 1 . Por otra parte, en las fases 3, 4, 5 y 6 se presentaron las diferencias más notorias: cuando la MJO tiene amplitudes > 1 , los montos de precipitación suelen ser mucho mayores que cuando se tienen amplitudes < 1 , llegando incluso a duplicarlos en algunos casos; no obstante, en las fases 1, 2 y 8 se obtuvieron diferencias de entre el 5 y el 30% en los acumulados de lluvia, teniéndose los montos más altos cuando la amplitud es > 1 , al igual que en las otras fases. En la estación de Peñas Blancas, los acumulados de lluvia en la fase 1 con amplitud > 1 prácticamente duplicaron los montos recolectados en esa misma fase, con amplitudes < 1 .

En las estaciones del Caribe Norte y Sur se obtuvieron acumulados de precipitación muy

similares, con mayores (menores) montos de lluvia en las fases 5 y 6 (1, 2 y 8), lo cual es aún más notorio en las estaciones (costeras) de Puerto Vargas y Limón, donde las fases más lluviosas (5 y 6) triplican los acumulados de las menos lluviosas (1, 2 y 8). Específicamente en la estación de CATIE, las diferencias son del doble en las fases más lluviosas (5 y 6).

Peñas Blancas muestra características típicas de estaciones del Pacífico y del Valle Central, donde los máximos de precipitación y las mayores diferencias entre las fases más intensas y débiles de la MJO se presentan en las fases 1 y 2. Por otra parte, la estación Quebrada Azul presenta un comportamiento mixto, con acumulados máximos de precipitación durante las fases 1, 5 y 6.

3.4. Lluvia acumulada en el mes de octubre en función de las fases de la MJO en algunas estaciones meteorológicas

Como se muestra en la [figura 11](#) la estación ubicada en Liberia muestra las mayores cantidades de lluvia en las fases 1, 2 y 3; por el contrario, los valores menores se observan en las fases 3, 6 y 7, estas fases acumulan menos de 4000 mm en Liberia), es decir, menos de la mitad de lo que acumulan las fases más activas. En Coto 47, la mayor cantidad de lluvia se registró en las fases 1 y 5 y la menor en las fases 3 y 7.

En la estación de Limón, la mayor (menor) cantidad de lluvia se acumuló en las fases 4 y 5 (3, 7 y 8), este incremento es concordante con el aumento del flujo de Alisios.

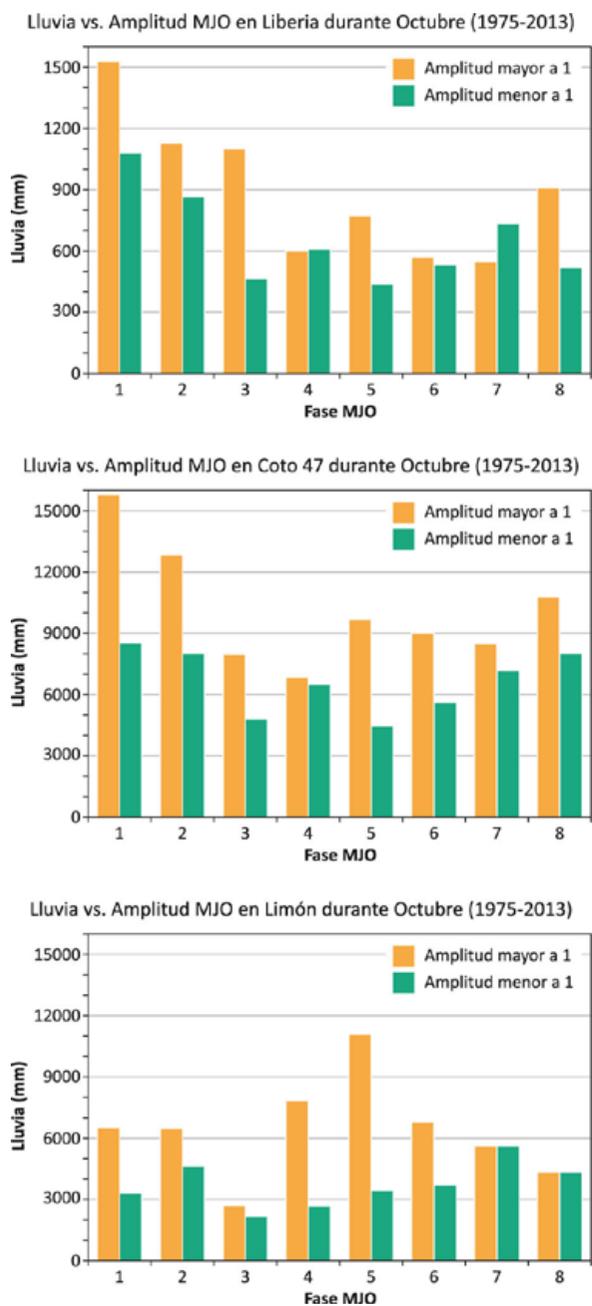


Figura 11. Lluvia acumulada en octubre (1975-2013) en función de las fases de la MJO en Liberia (Pacífico Norte), Coto 47 (Pacífico Sur) y Limón (Región Caribe).

3.5. Lluvia acumulada en el mes de julio en Liberia (Pacífico Norte) en función de las fases de la MJO

La figura 12 muestra que en los meses de julio en los que predomina la fase 1 se deberían reflejar veranillos menos perceptibles. Por el contrario, si están presentes las fases 4 y 5, los periodos caniculares deberían ser más intensos. Esta particularidad muestra que para anticipar el comportamiento de los Veranillos no basta con considerar, aisladamente, las oscilaciones de gran escala tanto espacial como temporal, sino que se debe prever la fase de la MJO que estará presente a corto plazo, lo que modularía el comportamiento de los periodos secos, en mayor o menor cuantía. La intensidad de los periodos de Veranillo depende también, del tipo de fase activo de la MJO.

Del mismo modo puede observarse, que hay una marcada diferencia entre las precipitaciones con amplitudes mayores a 1 en la fase 1 y el resto de

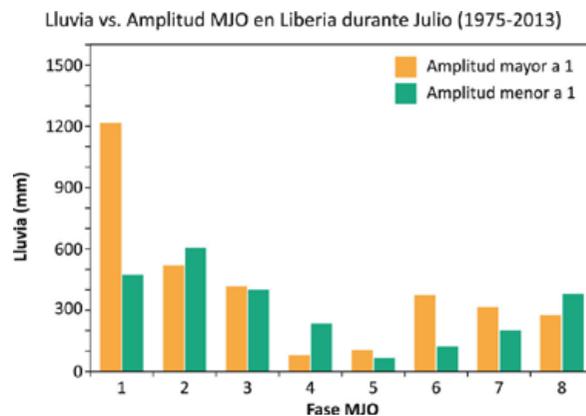


Figura 12. Lluvia acumulada en el mes canicular de julio (1975-2013) en función de las fases de la MJO en Liberia (Pacífico Norte).

las fases. En la mayoría de las fases los mayores acumulados de lluvia fueron cuando se tenían amplitudes mayores a 1, resaltando que hay una marcada diferencia cuando se observa la fase 1, con casi tres veces más lluvia cuando se tenía amplitud mayor a 1.

3.6. Anomalías porcentuales de lluvia en función de las fases de la MJO para las regiones del Pacífico y Caribe de Costa Rica

La figura 13 se muestra que la vertiente del Pacífico está asociada con un escenario deficitario de lluvias cuando predominan las fases 3, 4, 5, 6 y 7, con precipitaciones de hasta de un 30 % menos

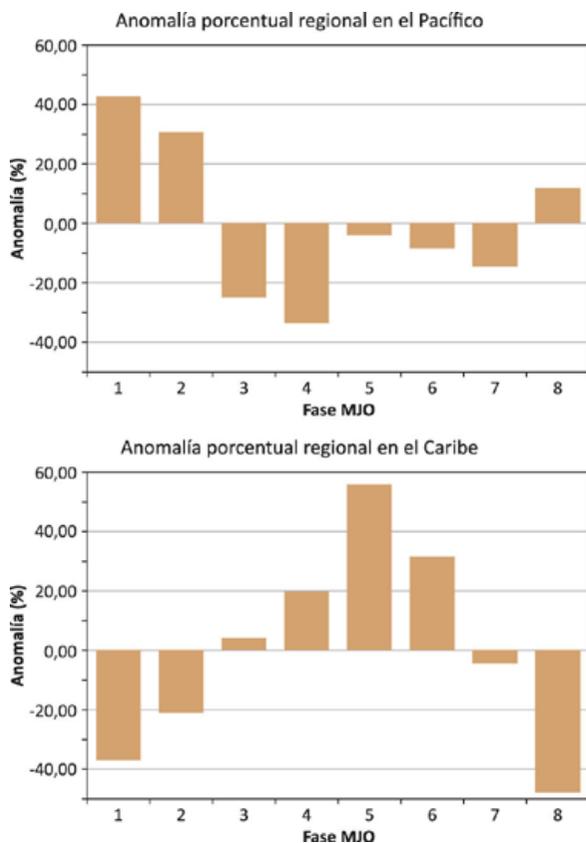


Figura 13. Anomalía porcentual de lluvia acumulada en función de las fases de la MJO ($A > 1$) para todas las estaciones de las vertientes del Pacífico y Caribe de Costa Rica.

durante la fase 4 de la MJO; por el contrario, se presentan superávits en las fases 1, 2 y 8, siendo las fases 1 y 2 las que presentan mayores valores entre 35 y 40 %. En la región Caribe se observan anomalías positivas en las fases 3, 4, 5, y 6, con hasta un 50 % más de acumulado de lluvia en la fase 5 en comparación con el promedio; los escenarios deficitarios se presentan en las fases 1, 2, 7 y 8. La fase 1 (5) es la de mayor superávit en la vertiente del Pacífico (Vertiente del Caribe).

4. Conclusiones

En el patrón lluvioso de Costa Rica existe una señal espectral con un período que oscila entre 30 y 55 días, la cual podría asociarse con la MJO tal y como se muestra en las figuras 5, 6 y 7. Es importante señalar, que al ser los resultados significativos al 98 % pueden ser concluyentes para las estaciones estudiadas.

La actividad lluviosa mensual podría verse reforzada o desfavorecida en función de la fase de la MJO imperante, hecho que estaría enmarcado dentro de la variabilidad climática de la región centroamericana.

Los periodos caniculares deberían ser desfavorecidos (favorecidos) por la presencia de la fase 1 (5) de la MJO. Esto podría explicar el porqué de la variabilidad en el comportamiento de los veranillos antes eventos similares del ENOS.

Cuando se analizaron las series de tiempo, se pudo observar que hay mayor cantidad de lluvia durante las diferentes fases cuando la amplitud de la MJO es mayor que 1. En la vertiente del Caribe se presenta mayor (menor) cantidad de precipitaciones durante las fases 4 y 5 (1 y 2) de la MJO. Se muestran estaciones con casi tres veces más precipitaciones durante los períodos de las fases 4 y 5, con varianzas menores que 1.

Cuando se comparan los acumulados de lluvia del período de 38 años en cada una de las fases, en la vertiente del Pacífico se presenta mayor (menor) cantidad de precipitaciones durante las fases 1 y 2 (4 y 5) de la MJO.

En la región del Caribe existen tres patrones diferentes de lluvia, cuando se relacionan los acumulados de lluvia y la fases de la MJO: un régimen costero muy marcado que responde a mayores patrones de precipitación durante las fases 4, 5 y 6; un régimen mixto que presenta máximos de precipitación similares a las condiciones que se presentan en el Pacífico y al régimen costero del Caribe; finalmente existe un régimen muy similar al que se presenta en la vertiente del Pacífico con máximos de precipitación durante las fases 1 y 2, tal y como lo muestra la estación de Peñas Blancas en la Zona Norte.

El aumento en las precipitaciones de la vertiente del Pacífico durante las fases 1 y 2 de la MJO, podría deberse a diversos factores entre los que se encuentran la intensificación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y su posicionamiento más al norte de lo habitual; el fortalecimiento de los sistemas de baja presión atmosférica durante estas fases como lo sugieren Maloney y Hartmann (2000), Klotzbach (2010) y Martin y Schumacher (2011).

El aumento de las lluvias en el Caribe durante las fases 5 y 6 de la MJO, podría estar ligado a un reforzamiento de los vientos alisios y al CLLJ al aumentar la convergencia en la zona de salida del jet.

Estos resultados son muy importantes, ya que podrían usarse para mejorar la predictibilidad y los pronósticos de lluvia, debido a las relaciones que existen entre las amplitudes, las fases y las precipitaciones en Costa Rica y la buena predictibilidad que se tiene para la fase y amplitud de la MJO.

5. Recomendaciones

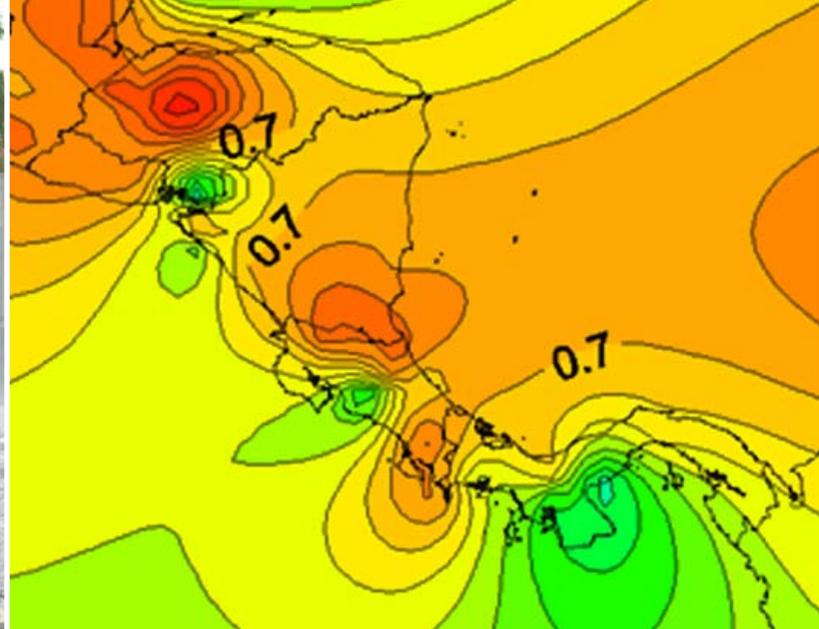
Se recomienda realizar un análisis similar con una mayor cantidad de estaciones meteorológicas, a fin de mejorar la distribución espacial y utilizar la MJO como índice predictor de las lluvias en el país, tanto para prever la actividad lluviosa mensual, como para prever eventos hidrometeorológicos extremos.

Además, para obtener mejores resultados en los análisis se podrían desarrollar índices de precipitación, con el fin de llevar a cabo la comparación de estos con cada una de las fases de la MJO y poder determinar umbrales en cada una de las fases y regiones del país.

6. Referencias

- Amador, J. (1975). *Análisis espectral de las oscilaciones de la atmósfera libre sobre América Central*. Tesis de Grado para optar al título de Licenciado en Meteorología. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.
- Alfaro, E.J.; Solano, F. & Quesada, A. (2010). Análisis del Impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe entre 1968-2007. *Diálogos, Revista electrónica de Historia*. 11(2). pp. 22-38.
- 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*. CIMPA-UCR. 60-75.
- Gottschalck, J.; Kousky, V.; Higgins, W. & L'Heureux, M. (2014). *Madden Julian Oscillation*. National Weather Center. Recuperado de: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_summary.pdf
- Klotzbach, P. (2010). On the Madden-Julian Oscillation-Atlantic hurricane relationship. *Journal of Climate*. 23, 282-293.

- Klotzbach, P. (2012). El Niño-Southern Oscillation, the Madden-Julian Oscillation and Atlantic basin tropical cyclone rapid intensification. *Journal and Geophysical Research*. 117, D14104, doi: 10.1029/2012JD017714.
- Madden, R.A. & Julian, P. (1972). Description of global-scale circulation cells in the Tropics with a 40–50 day period. *Journal of Atmospheric Science*. 29, 1109–1123.
- Madden, R.A. & Julian, P. (1994). Observations of the 40-50 Day Tropical Oscillation-A Review. *Monthly Weather Review*. 122 (5), 814-837.
- Maloney, E.D. & Hartmann, D. (1998). Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*. 11, 2387–2403.
- Maloney, E. & Hartmann, D. (2000a). Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*. 13, 1451–1460.
- Martin, E. & Shumacher, C. (2011). An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction. *Journal of Climate*. 813-824.
- Paegle, J.N.; Byerle, D. & Mo, K. (2000). Intraseasonal modulation of South American summer precipitation. *Monthly Weather Review*. 128, 837–850.
- Torrence, C. & Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bull. American Meteorological Society*. 79, 61–78.
- Torres, C. (2012). *Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano*. Tesis de Grado para optar al título de maestría en Meteorología. Facultad Ciencias, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Ventrice, M.; Wheeler M.; Hendon, H.; Schreck, C.; Thorncroft, C. & Kiladis; G. (2013). A modified multivariate Madden Julian Oscillation 1 index using velocity potential. *Monthly Weather Review*. Diciembre 2013, Vol. 141, No. 12. pp. 4197-4210.
- Wheeler, M. & Hendon, H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*. 132, 1917–22 1932.



Instituto Meteorológico Nacional

Sitios web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

