

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.

Berny Fallas López¹ y Eric J. Alfaro²

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

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

(Recibido: 09-Abr-2012. Publicado: 21-Nov-2012)

Resumen

Se utilizó la técnica estadística del análisis de tablas de contingencia para elaborar esquemas predictivos de los campos de precipitación 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. Se obtuvieron dos componentes principales para la precipitación, asociados con las vertientes Pacífico y Caribe de América Central. Debido a que uno de los objetivos de este estudio era el de apoyar al 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 la precipitación. Como predictores se utilizaron diferentes índices asociados con fuentes de variabilidad climática que influyen los patrones climáticos de América Central, usando uno o dos bimestres anteriores a la estación predicha. Se encontraron esquemas predictivos útiles para prácticamente todas las relaciones señaladas anteriormente y se observó que gran parte de la variabilidad de América Central se puede explicar con los índices asociados a El Niño (La Niña) (variabilidad interanual) y del Atlántico (AMO, principalmente, variabilidad multidecadal).

Palabras clave: Componentes Principales, América Central, Tabla de Contingencia, índices climáticos, variabilidad climática.

Abstract

The statistical technique of contingency table analysis was used to produce predictive schemes associated with rainfall in Central America. As a first step, principal component analysis was used to produce indices using 146 daily station records. Two rainfall components were obtained associated with Central America Pacific and Caribbean slopes. 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 in rainfall. Different climate indices 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. 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.

Key words: Principal Components, Central América, Contingency Table, climate indices, climate variability.

1. Introducción

América Central es un istmo considerablemente angosto, lo cual lo hace susceptible a las condiciones que imperan en las aguas que lo rodean, tanto del Océano Pacífico como del Mar Caribe, además de la compleja orografía que la compone, y que hace distinguibles dos vertientes con patrones lluviosos distintos entre sí, como son la Vertiente del Pacífico y la Vertiente del Caribe.

Un elemento que juega un papel importante en la región es la corriente en chorro de bajo nivel de los Mares Intra-Americanos. Según Amador (2008) dicha corriente se establece en junio, alcanzando su máximo absoluto en julio y debilitándose para el mes de setiembre. Durante el invierno boreal, dicho chorro muestra un máximo relativo, y juega un papel importante en la cortante vertical del viento, por lo que puede influir en el desarrollo de sistemas convectivos (Amador *et al.* 2000), tales como huracanes, o transferir energía a sistemas como ondas tropicales, realizando la actividad lluviosa asociada a éstas (Amador, 1998).

Además, las ondas tropicales son sumamente importantes como mecanismos productores de lluvia sobre la región. Dichas ondas se originan frente a las costas occidentales de África desde mayo a noviembre. La intensidad de dichas ondas está asociada a las temperaturas superficiales del mar en el Atlántico Tropical Norte (ATN), especialmente al inicio de la época lluviosa, ya que valores del ATN por encima de lo normal implican ondas tropicales más fuertes. Al finalizar el período lluvioso, tanto el Pacífico como el Atlántico Ecuatorial toman mayor significancia sobre las lluvias, probablemente debido a su relación con la estructura de la cortante vertical en la tropósfera del ATN (Wang *et al.* 2006).

Cabe agregar que Enfield y Alfaro (1999) mostraron que tanto el Océano Atlántico como el Pacífico están relacionados con las lluvias en la Cuenca del Caribe, y que la respuesta a las mismas depende de cómo las anomalías superficiales de temperatura se combinan en el Atlántico Tropical y Pacífico Ecuatorial Este. La respuesta más fuerte ocurre cuando el Atlántico Tropical muestra una configuración de dipolo transversal con respecto al Pacífico Tropical del Este, por lo que muestra un signo opuesto al del ATN. Cuando el ATN y el Pacífico Tropical tienen el mismo signo, la respuesta en las lluvias es más débil. Además, de acuerdo con Enfield y Alfaro (1999), en la parte sur de América Central hay una tendencia a que la estación lluviosa se presente de forma más temprana y termine más tarde cuando las temperaturas están cálidas en el ATN, mientras que temperaturas superficiales del Océano Pacífico ecuatorial oriental más frías también tienden a retrasar la salida de la época lluviosa.

América Central también está expuesta a los efectos de ciclones tropicales, especialmente del Caribe, debido a que estos sistemas tienen efectos tanto directos (cuando el centro del sistema toca el continente) como indirectos (asociados a flujos de alimentación del sistema, desplazando humedad de la Zona de Convergencia Intertropical sobre los países, afectando especialmente a la Vertiente del Pacífico de los mismos). Las condiciones anteriores suelen producir condiciones de temporal¹ en la Vertiente del Pacífico de América Central (Alfaro, 2007; Alvarado y Alfaro, 2003).

Otro mecanismo importante en la producción de lluvias son los empujes fríos en la época invernal. Dichos sistemas también producen temporales sobre la región, pero principalmente en la Vertiente del Caribe. Consisten en el desplazamiento hacia América Central y el Caribe de una masa de aire relativamente fría y seca, proveniente de latitudes medias o altas, lo cual hace que la masa de aire cálida y húmeda constituida por los vientos alisios retroceda al ser desplazada por la masa fría (Zárate, 2006).

Los totales de precipitación media anual varían enormemente en América Central debido a la diversidad topográfica. Totales anuales de menos de 1000 mm son típicos en las planicies de Guatemala, Honduras y el noroeste de Nicaragua, así como porciones de la costa Pacífica de El Salvador, Honduras y Panamá. En cambio, el norte y sur de los sectores montañosos de Guatemala y el sector montañoso en la zona limítrofe entre Costa Rica y Panamá reciben grandes cantidades de lluvia (superando los 2500 mm), así

¹Término usado generalmente en América Central para describir un periodo de lluvias continuas, entre débiles a moderadas, que se extiende varios días (Amador, 2008).

como en la zona costera del Caribe de Belice a Guatemala, la costa sur de Costa Rica y un sector de la costa Caribe de Panamá. En general, el sector Caribe recibe más lluvias que el Pacífico, como reflejo de la influencia de perturbaciones tropicales en el Caribe y la interacción del sistema montañoso con los vientos alisios (Taylor y Alfaro, 2005).

El análisis de las medias anuales en los ciclos de precipitación revelan dos modos dominantes distintos. El primero y más representativo se caracteriza por dos máximos de lluvia, uno en junio y otro en setiembre, y una época seca que se extiende de noviembre a mayo, con un mínimo relativo entre julio y agosto (Magaña *et al.* 1999) denominado en la región “canícula” o “veranillo”. Este patrón de lluvias es conocido ampliamente como régimen Pacífico. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se encuentra en su posición más sureste durante febrero y marzo, cuando se presentan fuertes vientos alisios así como altos valores tanto de radiación total como de horas sol. El inicio de la época lluviosa tiene lugar en promedio en el mes de mayo; sin embargo, hay una variación con respecto a la fecha, siendo más temprano en el sur y más tarde hacia el norte del istmo, lo cual está asociado al desplazamiento de la ZCIT (Taylor y Alfaro, 2005).

Las costas Caribe de Honduras, Costa Rica y Panamá, muestran un segundo modo en la precipitación, en donde es difícil definir una época seca para esta región, debido a lo homogéneo de las lluvias entre enero y mediados de octubre, con acumulaciones de 180 a 300 mm al mes. Este período acumula cerca del 60% del total anual de las lluvias sobre la región. Luego de mediados de octubre, se presenta un marcado aumento en los acumulados de precipitación hasta fin de año, con un máximo a inicios de diciembre. No se muestra tampoco una disminución en las lluvias para el mes de julio; al contrario, se presenta un máximo relativo, asociado a la intensificación del Chorro de Bajo Nivel (Amador, 1998).

Hoy en día las exigencias sociales van más allá de los pronósticos del tiempo diarios; existe la necesidad de saber cómo estarán las condiciones al menos con unos meses de anticipación, para la planificación de distintas actividades que dependen de las condiciones meteorológicas. De ahí la importancia del pronóstico estacional en campos como la hidrología, seguridad alimentaria, salud, economía y ganadería, entre otros. El presente estudio busca mostrar una nueva regionalización de la precipitación para el manejo rápido y eficiente a la hora de relacionar distintos índices atmosféricos y oceánicos que puedan servir como predictores de las componentes principales obtenidas y facilitar de alguna manera la realización de pronósticos estacionales en América Central, esto debido al importante insumo que eso aporta a diversos campos de toma de decisiones del área.

Debido a lo anterior, se hará uso de las relaciones presentes entre las componentes principales obtenidas de la precipitación y diferentes índices climáticos, para finalmente evaluar qué índices son los mejores para realizar los pronósticos estacionales según la época del año.

2. Datos y Metodología

La presente investigación ha sido realizada tomando en cuenta los períodos de pronóstico utilizados por el Foro de Perspectivas Climáticas de América Central (Donoso y Ramírez, 2001; García-Solera y Ramírez, 2012). 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 propone fraccionar este último cuatrimestre en los bimestres Diciembre-Enero (DE) y Febrero-Marzo (FM), debido a los diferentes patrones que se presentan en un bimestre u otro (Amador *et al.* 2006).

2.1. Base de Datos

En el presente estudio se utilizaron datos de precipitación de la base NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI-UCR), que comprende múltiples fuentes de información (Soley, 2005). Para el presente caso, solo se utilizaron datos puntuales de estaciones meteorológicas de Mesoamérica,

que han sido obtenidas mediante distintos proyectos de investigación en los cuales el CIGEFI ha formado parte. La variable utilizada fue la precipitación acumulada. Además de lo anterior se contó con estaciones usadas en el estudio de Aguilar *et al.* (2005), así como con datos de precipitación del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para la zona del Caribe de Costa Rica. En total fueron usadas 146 estaciones (figura 1). Cabe agregar que todos los datos usados habían sido previamente verificados en cuanto a la calidad de los mismos (Soley, 2005) en base a los criterios usados por la base NUMEROSA y los descritos en Aguilar *et al.* (2005).

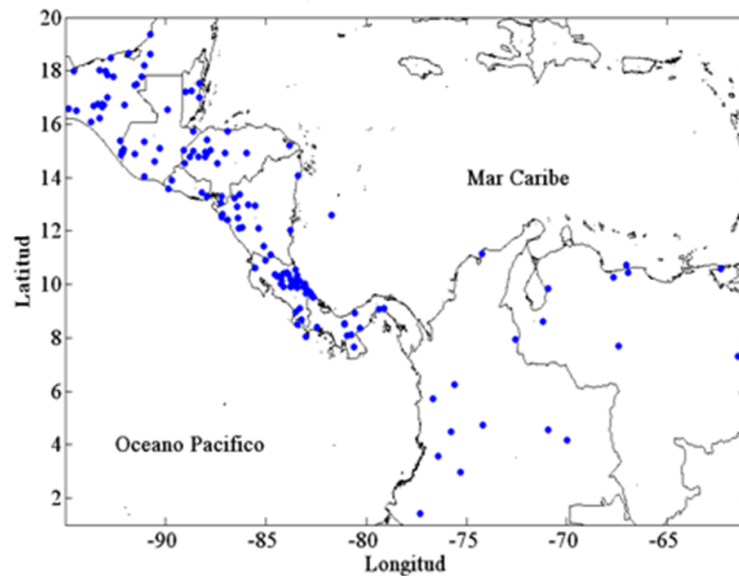


Fig. 1: Ubicación geográfica de las estaciones utilizadas en el presente estudio.

Para definir el período de estudio se usó el registro total de datos disponibles de las estaciones y se escogió el período de 30 años en que faltaban menos datos, el cual dio como resultado el período de 1971 al 2000 (figura 2). Las estaciones utilizadas presentaron menos del 30% de datos faltantes para el rango de años definido.

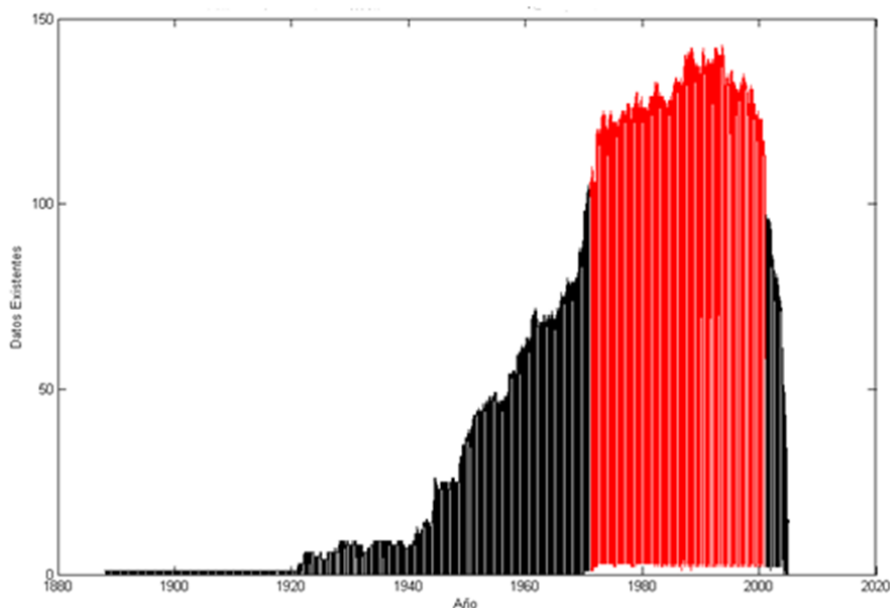


Fig. 2: Días con datos de precipitación en las estaciones mostradas en la figura 1. En rojo período con menor cantidad de datos faltantes.

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 “razonables”, consistentes tanto con la estadística como con la física de algunas de las señales captadas. Dicho método consiste en calcular una matriz de covarianza y obtener los vectores y valores propios, luego calcular las componentes principales y estimar los valores ausentes utilizando únicamente los primeros componentes principales. En la primera iteración, la matriz de correlación se calcula sólo con los pares de datos en los cuales no hay datos ausentes, y los componentes principales aproximando los valores ausentes con el promedio de la serie. Una vez realizado lo anterior, se obtiene una aproximación mejorada de los valores ausentes, usando todos los valores para calcular la matriz de correlación y los componentes principales. Nuevamente se repite el procedimiento, pero cada vez con una matriz de correlación mejorada.

2.2. Tabla de contingencia

Esta herramienta fue desarrollada por Alfaro *et al.* (2003), en la que una vez escogidas las variables dependientes e independientes, se busca que tengan una relación predictiva significativa, es decir que estén correlacionadas. Debido a que el grado de correlación puede cuantificarse mediante la función de correlación cruzada, se usan los valores promedio de la precipitación correspondiente para el período de meses en estudio como variable dependiente, dividido en M categorías, mientras que como variable independiente se utiliza algún índice atmosférico u oceánico dividido en N categorías.

En la práctica se ha encontrado que un número alto de categorías es difícil de interpretar por el gran número de posibilidades a considerar. Además, se ocuparía un número muy grande de datos para lograr un análisis estable de las $M \times N$ categorías. Al dividir las dos variables en terciles, es decir, haciendo $M = N = 3$, se obtienen 9 categorías conjuntas que permiten cierto grado de resolución y un número manejable de posibilidades. Por otro lado, una manera pragmática de enfocar la selección de 3×3 es que frecuentemente se busca un pronóstico que sea entendido fácilmente por el público en general usando conceptos tales como: normal, arriba de lo normal y abajo de lo normal.

Para analizar los distintos casos, en el presente estudio se procedió a usar diferentes índices atmosféricos y oceánicos como variables independientes, mientras que los valores de las componentes principales utilizadas representaron la variable dependiente.

El análisis con la tabla de contingencia incluye estadísticos tales como la prueba de chi cuadrado (χ^2), que es la medida de discrepancia entre las frecuencias observadas (f_{ij}) y esperadas (e_{ij}). Otro estadístico es la correlación de Pearson, que es apropiado cuando ambas variables se han categorizado y tiene un rango de $-1 \leq r \leq 1$. De esta manera, si:

$$var_0(r) = \frac{\sum_i \sum_j f_{ij} (R_i - \bar{R})^2 (C_j - \bar{C})^2 - ss_r^2 / n}{ss_r ss_c}$$

$$r^* = \frac{r}{2\sqrt{var_0(r)}}$$

r^* tiene valores cercanos a cero si las variables no están correlacionadas y la significación corresponde a 0.5. La significación de variables positivamente (negativamente) correlacionadas tiende a 1 (0) (Agresti, 2002).

2.3. Índices

Los índices usados en la presente investigación comprenden en su mayoría índices oceánicos y un índice atmosférico (Oscilación del Atlántico Norte, (NAO)²). Los demás índices usados fueron: Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)³, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)⁴, y Niño3 (N3)⁵. Luego

²<http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii>

³<http://www.cdc.noaa.gov/data/correlation/amon.us.long.data>

⁴<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>

⁵<http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>

se usaron combinaciones 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. De ahí que se utilizaran también las siguientes combinaciones de índices: AMO-N3, AMO-(PDO+N3), AMO-PDO, AMO+PDO, PDO+N3. De los anteriores, tanto el AMO como los índices de las regiones Niño han sido ampliamente estudiados; sin embargo en el presente estudio se busca ampliar dicha gama de índices usada para pronosticar estacionalmente. Parte de las combinaciones de los índices anteriormente mencionados están respaldadas por estudios realizados en otras regiones del planeta, como es el caso del PDO+N3 (Gershunov y Barnett, 1998), estudio en el cual se mostró que el estado de la PDO influye en la intensidad de la baja de las Aleutianas, cambiando las trayectorias de las tormentas más hacia el sur, mientras que el Niño provee un aumento en la fuente de humedad de las tormentas en el Pacífico Tropical Este, por lo que una baja de las Aleutianas débil durante una PDO fría junto con un fenómeno de La Niña desplaza las tormentas ciclónicas más al Norte, aumentando las precipitaciones al noroeste de los Estados Unidos, y haciendo menos frecuente el paso de las tormentas al suroeste de dicho país.

Los índices anteriores fueron aplicados con el uso de la tabla contingencia, para crear escenarios de los acumulados de las lluvias para los períodos utilizados por el Foro de Perspectivas climáticas de América Central: mayo-julio (MJJ), agosto-octubre (ASO), diciembre-enero (DE) y febrero-marzo (FM), de forma tal que se usó el promedio del bimestre que antecede al período de pronóstico, así como el bimestre anterior, evaluando así la confianza que se puede tener sobre la perspectiva calculada con un mes de anterioridad y observar su variación, usando el bimestre inmediatamente anterior al período de pronóstico o el bimestre con un mes de anterioridad. Mientras que en el caso del inicio de la época lluviosa, veranillo y su intensidad, así como el final de la época lluviosa, se usó el bimestre anterior y un bimestre que incluyera el mes en que se presentan dichos eventos, a modo simultáneo, ya que puede ser usado como esquema de pronóstico de prognosis perfecta (Wilks, 1995).

3. Resultados

3.1. Análisis de Componentes Principales

Se realizaron varios *scree test* (Wilks, 1995), una prueba que consiste en mostrar los autovalores o valores propios proporcionales a los porcentajes de varianza explicada por cada una de las componentes principales obtenidas, para obtener un adecuado criterio del número de componentes a retener, realizar el análisis correspondiente, y así obtener la mayor cantidad de información posible del conjunto de datos.

Para el caso de la precipitación (figura 3), se observa que con dos componentes principales se logra explicar buena parte de la variabilidad total del conjunto de datos. De ahí que en el presente estudio para el caso de la precipitación se usaron dos componentes principales, la primera explicando una varianza del 14.8% y la segunda un 9.6%. Las barras de la figura 3 fueron añadidas siguiendo a North *et al.* (1982), que determinaron que cuando las barras de error de dos autovalores se traslapan existe una degeneración efectiva de los modos traslapados. Cuando existe degeneración, los modos asociados comparten una misma “información” y entonces no se puede incluir sólo uno de ellos porque no se estaría tomando la señal completa.

La primera componente principal obtenida corresponde a estaciones que presentan un patrón bimodal (figura 4a) en las lluvias (régimen tipo Pacífico) y la segunda corresponde a estaciones con un régimen de lluvias de tipo Caribe (figura 4b). Se muestra además (figura 5) en qué regiones la correlación entre la componente principal y la región en América Central es mayor. En el caso de la componente principal uno, se observa cómo la correlación es mayor del lado Pacífico de América Central (figura 5a), mientras que la segunda componente la correlación es mayor del lado Caribe de la región (figura 5b), especialmente sobre Costa Rica, lo cual está asociado a una mayor cantidad de estaciones (30) usadas sobre dicha región. Además, sobresale que el Pacífico Sur también está correlacionado con esta componente, lo cual parece estar asociado a la cantidad de días con lluvias que se presentan sobre esta región.

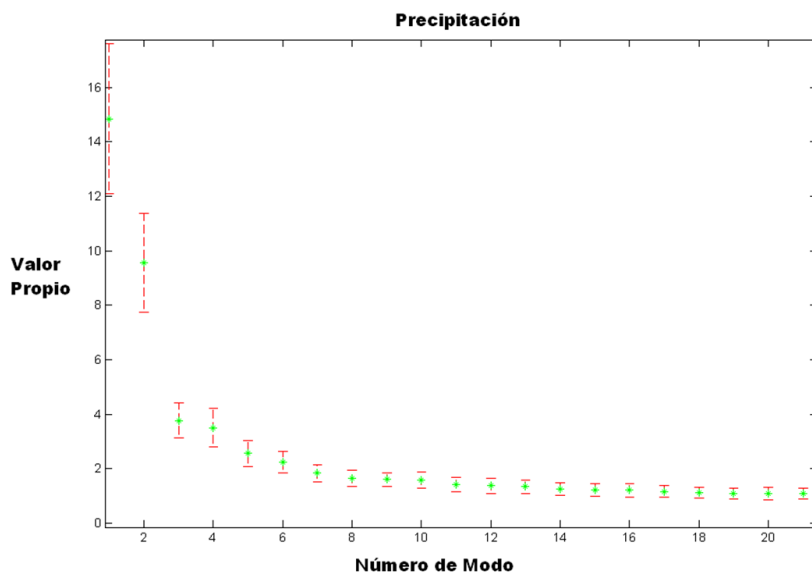


Fig. 3: Scree test correspondiente a la precipitación, para los primeros 21 autovalores.

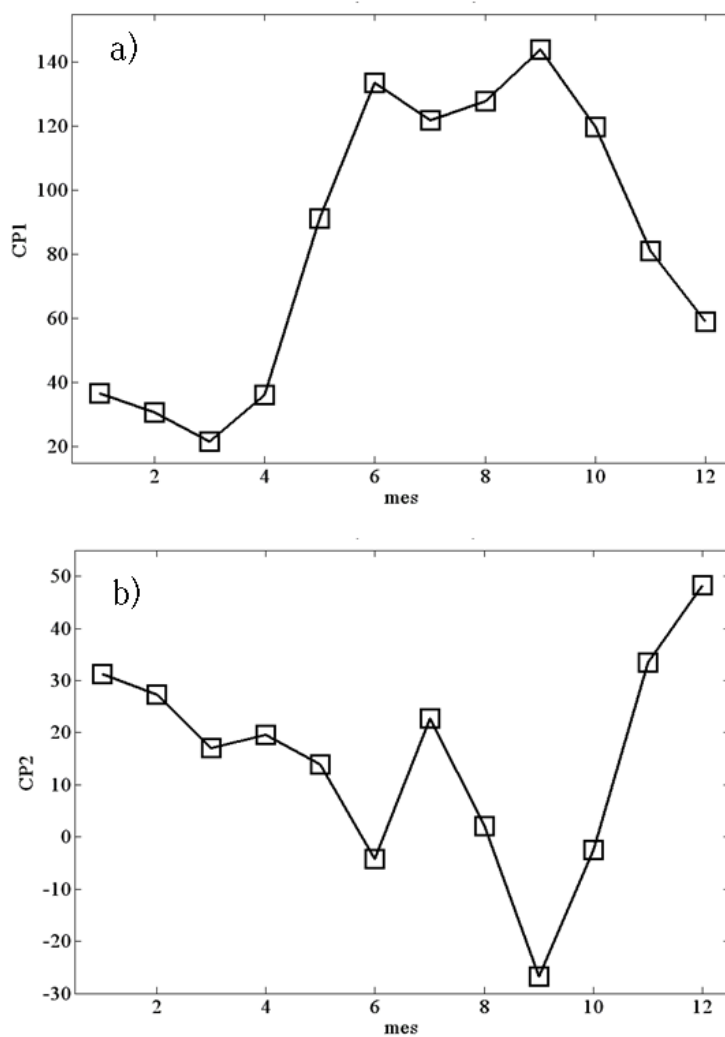


Fig. 4: Ciclo anual de las Componentes Principales 1 (a) y 2 (b) entre los años 1971-2000. Los valores corresponden al promedio mensual de los valores diarios normalizados de la componente principal.

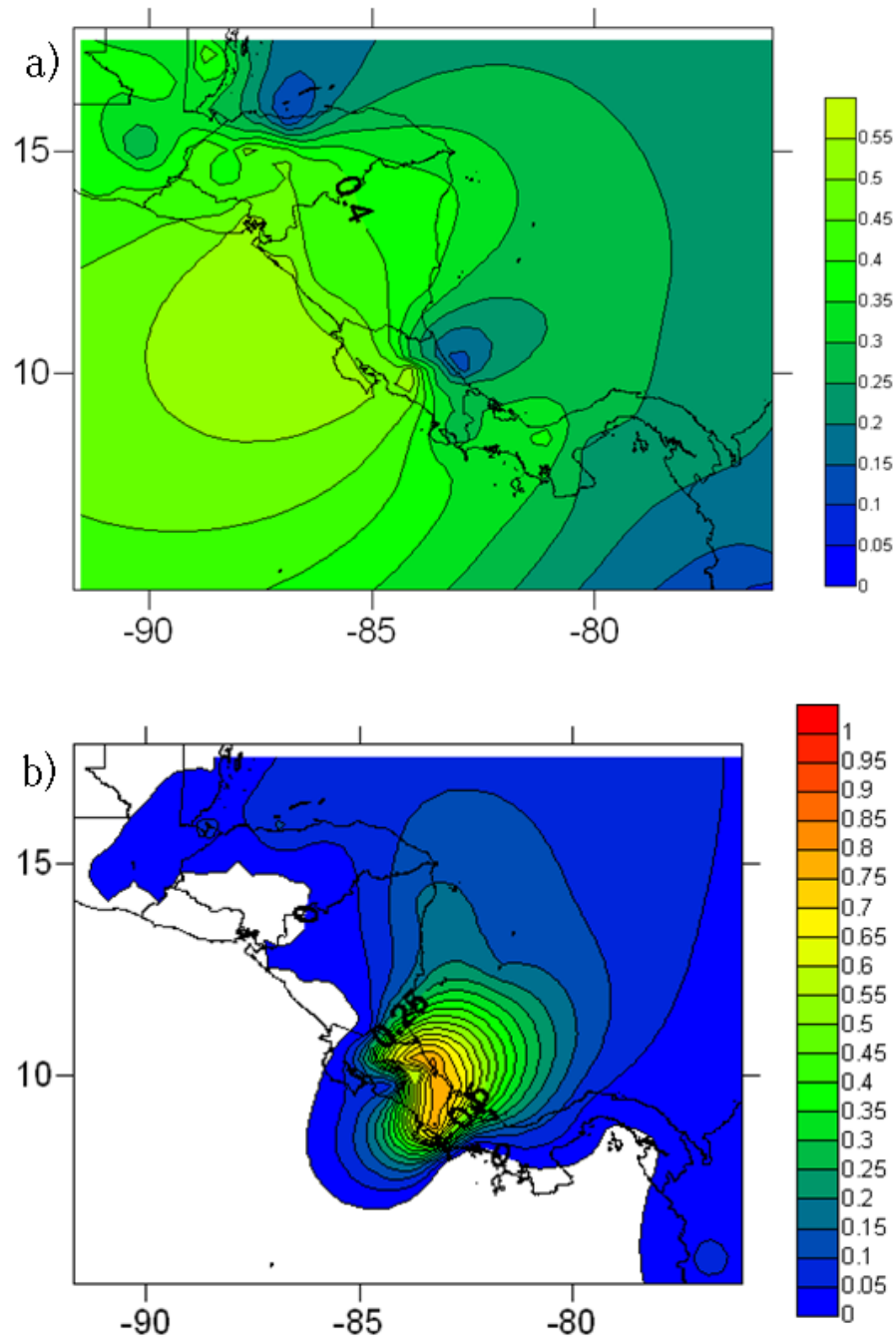


Fig. 5: Mapa de correlación para las Componentes Principales 1 (a) y 2 (b) de la precipitación.

3.2. Análisis de contingencia

3.2.1. Precipitación

Se procedió a evaluar los resultados de las tablas de contingencia de los distintos índices, escogiendo los que presentaban probabilidades más altas al compararlos con el escenario pronosticado por azar. Los resultados obtenidos se muestran en gráficos de triángulos para los mejores predictores (figura 6). A pesar de 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 ese umbral en los casos en que ninguno de los índices exceda dicho nivel de significancia. Los gráficos de triángulos de la izquierda (figura 6) corresponden a los que muestran probabilidades altas de que se presente un

escenario de lluvias por debajo de lo normal (primer tercil), mientras que los de la derecha muestran las probabilidades altas de que se encuentren las lluvias por encima de lo normal (tercer tercil). Además 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 horizontal bajo cada índice predictor para establecer el tercil en el que se encuentra el mismo: una línea roja (azul) indica que el índice predictor se encuentra en el tercil superior (inferior). En el caso de los gráficos correspondientes al inicio de la época lluviosa, inicio del veranillo y el término de la época lluviosa, los gráficos de la izquierda indican los índices que mejor pronostican una fecha más temprana que la climatológica para el inicio de la época lluviosa, del veranillo o del término de la época lluviosa, mientras que los gráficos de la derecha lo que muestran son los mejores índices para pronosticar un ingreso tardío de la época lluviosa, del veranillo o de la salida de la época lluviosa. Otra situación evaluada en el presente estudio se refiere a la probabilidad con que disminuyeron o aumentaron las lluvias durante el período en que se presentó dicho evento, lo cual significa que en el caso en que se presenten escenarios bajo lo normal, habría un menor impacto en las lluvias, mientras que un escenario por encima de lo normal lo que muestra es un mayor efecto del veranillo sobre las lluvias. Tanto el inicio de la época lluviosa, el veranillo y el término de la estación lluviosa, se obtuvieron de la primera componente principal (asociada a lluvias de tipo Pacífico), y se siguió la metodología de Enfield y Alfaro (1999). La segunda componente principal no fue utilizada ya que al tener un régimen tipo Caribe, esta región no muestra un período seco, ni de canícula, bien definido.

En la figura 6a, iniciando por el lado izquierdo se observa que el mejor índice para pronosticar un inicio adelantado de la época lluviosa, basándose en los valores obtenidos en los meses de febrero y marzo, es la diferencia normalizada del AMO-PDO (tercil alto), el cual muestra un 70 % de probabilidad de que la estación lluviosa se presente antes de las fechas climatológicas, un 0 % de que ingrese en condiciones normales, y un 30 % de que la época lluviosa se atrase en su ingreso, todo ello con un nivel de significancia que supera el 99 %. El triángulo de la derecha muestra que el índice N3 (tercil alto) es el mejor índice para un ingreso tardío de la época lluviosa, con un 50 % de probabilidades de que la estación lluviosa ingrese de forma tardía, un 30 % de que se dé en las fechas climatológicas, y un 20 % de que se adelante su fecha de inicio.

Usando el bimestre siguiente (figura 6b) se muestran los índices PDO y PDO+N3, para un ingreso temprano en la época lluviosa; sin embargo ninguno de los dos supera el 90 %, mientras que para un retraso en el inicio de la época lluviosa aparecen los índices de PDO+N3 y AMO-(PDO+N3), con significancias superiores al 90 %.

Algo importante de dichos resultados es la presencia del índice PDO en los dos bimestres evaluados.

En el trimestre de mayo, junio y julio (MJJ), se puede notar en la figura 7(a,b) que para los escenarios por encima de lo normal de la componente principal 1 predominan el AMO, AMO-N3 y N3; los dos primeros con valores en el tercil superior y el segundo en el tercil inferior, es decir, un Atlántico más cálido y un Pacífico frío traen consigo más lluvias (dipolo transversal). Además, un AMO+PDO en el tercil bajo trae lluvias por debajo de las normales en dicha componente. Mientras que para la componente principal 2 (figura 7 (c,d)), se resaltan el PDO y AMO+PDO, los cuales estando en el tercil superior (inferior) pronostican condiciones bajo (arriba) lo normal. En este trimestre resulta interesante que el índice de AMO+PDO está presente en ambas componentes principales, mostrando que dependiendo del tercil en que se encuentre traerá menos lluvias para una componente y más en la otra.

En el caso del inicio del veranillo, así como su intensidad (figura 8), buena parte de los predictores pueden ser usados para pronosticar escenarios de veranillos más o menos intensos, así como de veranillos con fechas de inicio adelantadas o atrasadas; es decir, casi en su mayoría los predictores son los mismos. En cuanto a su intensidad, valores del AMO, AMO-N3 y AMO-PDO en el tercil superior (inferior), así como el N3 en el tercil inferior (superior), implican veranillos menos (más) intensos; y valores en el tercil superior del PDO+N3 traen consigo veranillos más intensos. Usando los predictores de abril

y mayo, también se muestra el AMO-(PDO+N3) al que, ubicado en el tercil inferior (superior), se le asocian veranillos más (menos) intensos. Si se observa el inicio del mismo, sobresale que condiciones de El Niño (La Niña), AMO frío (cálido), AMO-N3 y AMO-(PDO+N3) con valores bajos (altos) traen consigo un inicio temprano (tardío) de la canícula. Cabe agregar que si se usa el bimestre de abril y mayo aparece el NAO, que con valores bajos (altos) retrasa (adelanta) la fecha del veranillo.

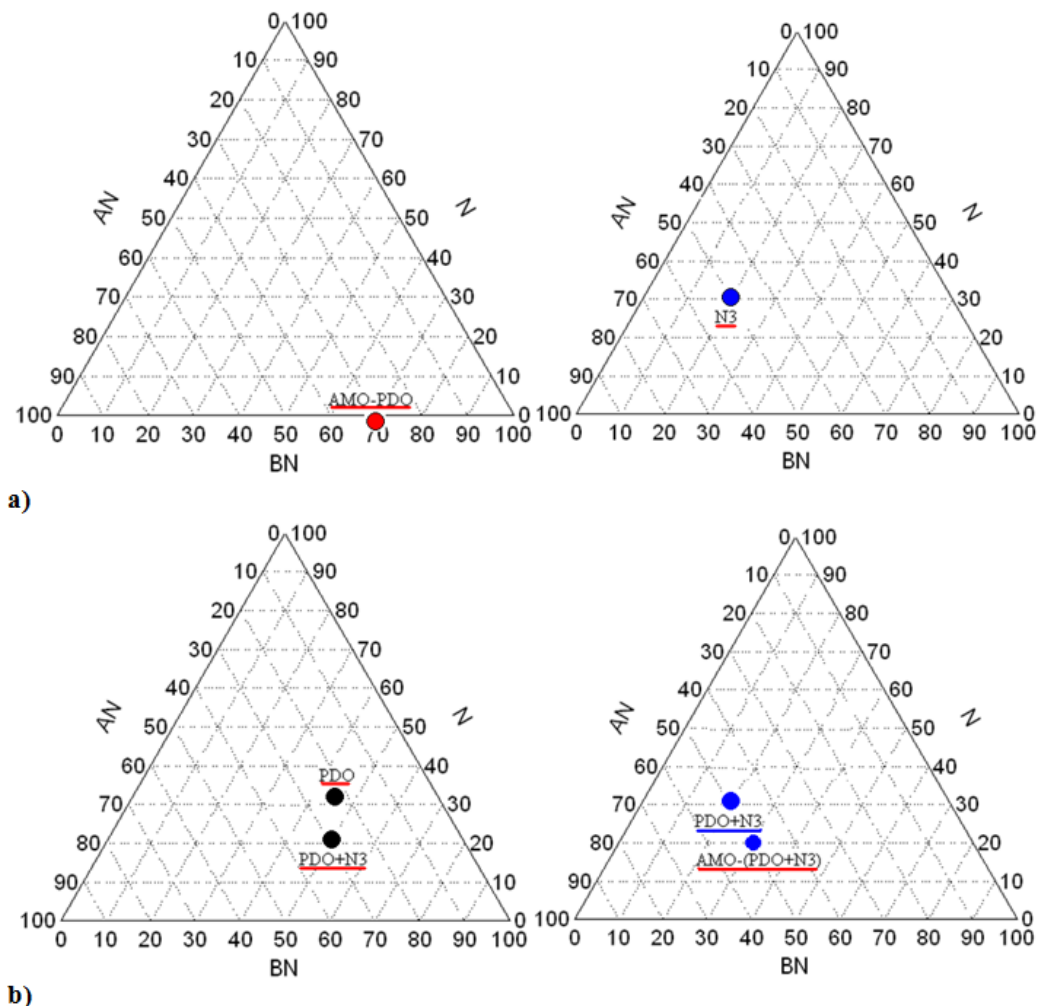


Fig. 6: Predictores para el inicio de la época lluviosa usando el bimestre de febrero y marzo (a) y abril y mayo (b). Escenarios Bajo lo Normal (Izquierda) y Arriba de lo Normal (Derecha). Significancia inferior al 90% con punto negro, del 90% al 95% con punto azul, del 95% al 99% en verde, y superiores al 99% en color rojo. La línea bajo el nombre del índice muestra el estado del índice: azul (rojo) para el tercil inferior (superior).

Para el trimestre de Agosto, Setiembre y Octubre (figura 9, a y b), se muestra para la componente principal 1 que los índices del AMO-N3 y AMO-(PDO+N3) con valores en el tercil bajo (alto), así como condiciones de El Niño (La Niña), traen consigo lluvias por debajo (encima) de los valores normales, pero un AMO con valores altos trae consigo lluvias por encima de las normales. Trabajando con la componente principal 2 (figura 9, c y d), aparecen nuevamente los índices AMO-(PDO+N3), AMO-N3, que estando en valores bajos (altos) pronostican lluvias por encima (debajo) de lo normal. Al igual que en el caso del trimestre MJJ, se pronostican escenarios contrarios para las componentes principales, usando un mismo predictor (en este caso AMO-N3 y AMO-(PDO+N3)) dependiendo del estado del mismo.

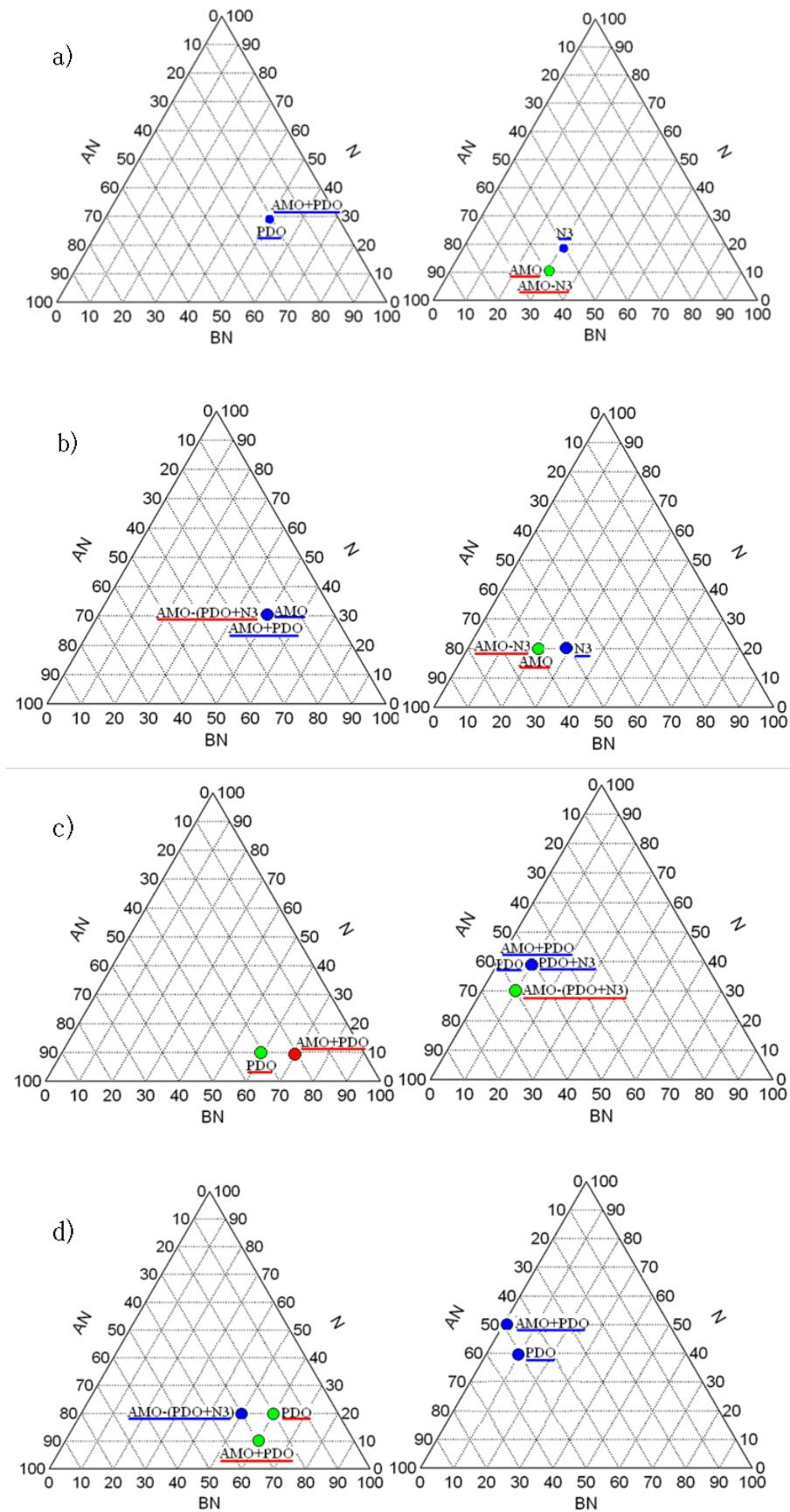


Fig. 7: Igual que en la figura 6. Predictores para el período Mayo, Junio y Julio (MJJ) de la Componente Principal 1 (2), usando el bimestre de Febrero y Marzo (a)(c), Marzo y Abril (b)(d). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

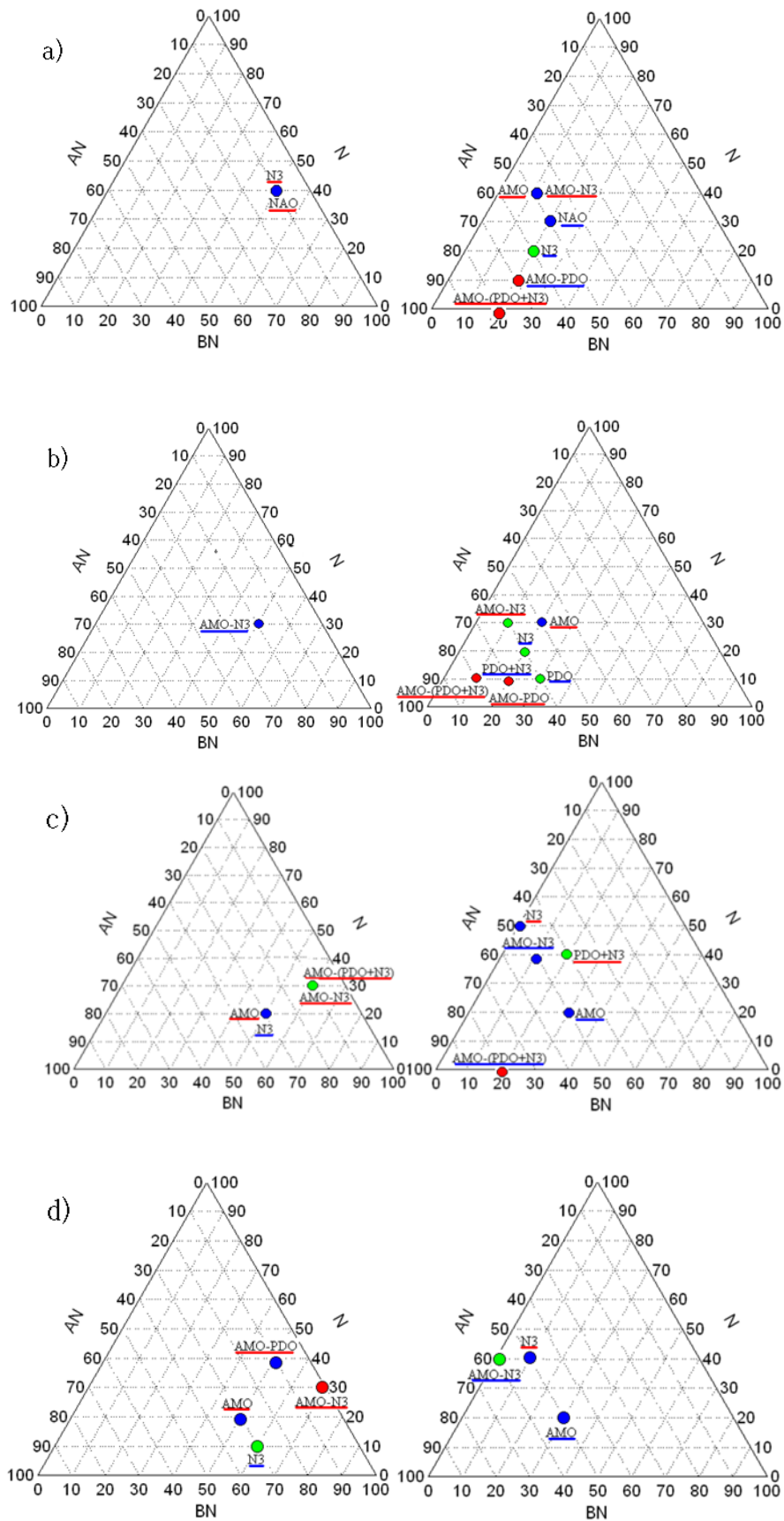


Fig. 8: Lo mismo que la figura 6. Predictores para el inicio del verano usando el bimestre de Abril-Mayo (a) y Mayo-Junio (b), así como su intensidad usando el bimestre de Abril-Mayo (c) y Mayo-Junio (d). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

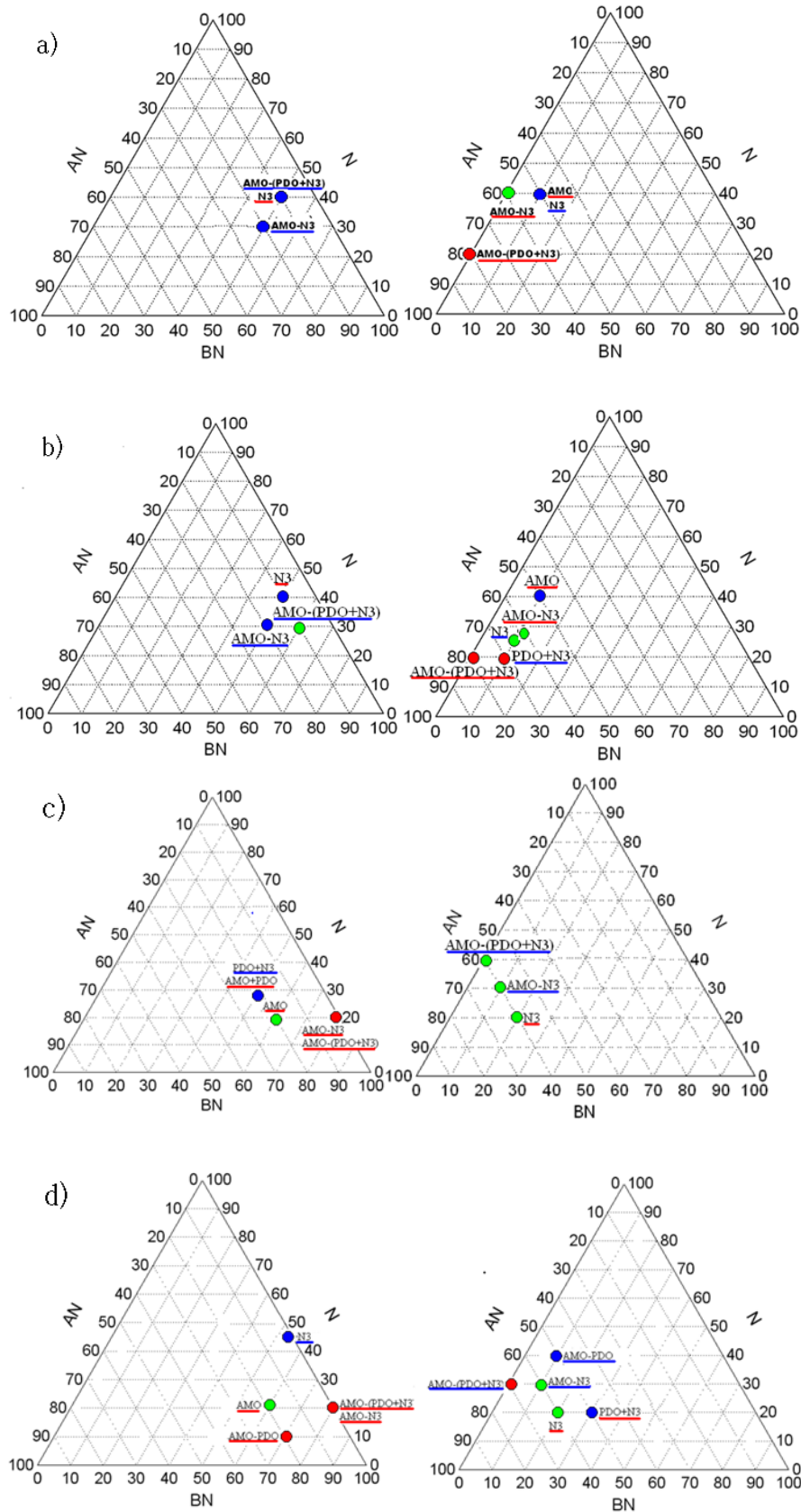


Fig. 9: Lo mismo que en la figura 6. Predictores para el período de Agosto, Setiembre y Octubre (ASO) para la componente principal 1 (2), usando el bimestre Mayo-Junio (a)(c) y Junio-Julio (b)(d). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

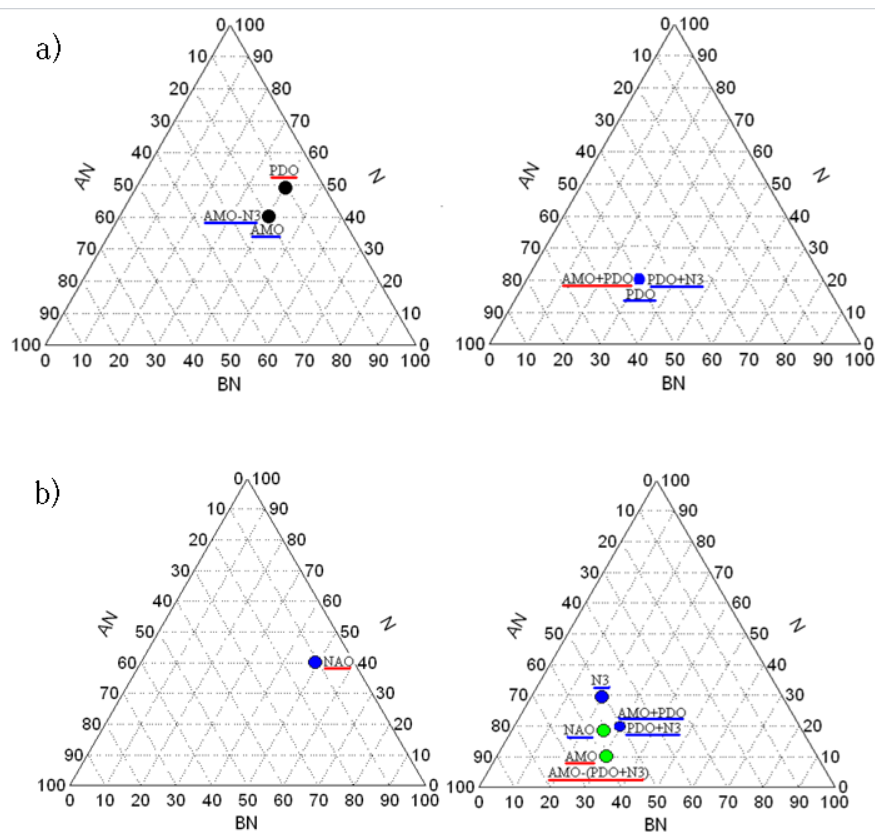


Fig. 10: Lo mismo que la figura 6. Predictores para el término de la época lluviosa usando el bimestre de Agosto-Setiembre (a) y Octubre-Noviembre (b). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

En cuanto al término de la época lluviosa (figura 10), está el AMO-N3 que con valores bajos trae consigo un adelanto de la salida de las lluvias sobre la región, solo que en el caso del bimestre de octubre y noviembre no superó el 90% de significancia. Valores en agosto y setiembre de PDO en el tercil bajo (alto) implican una salida tardía (temprana) de la época lluviosa. En el bimestre de octubre y noviembre el índice AMO-(PDO+N3) mostró que cuando se encuentra en el tercil alto se puede esperar una salida tardía de la época lluviosa, y lo contrario sucede cuando se encuentra en el tercil inferior, pero dicho resultado tampoco superó el 90% de confianza. Condiciones de NAO con valores altos (bajos) implican un anticipo (retraso) en el fin de las lluvias, con una significancia superior al 99% (90%).

Pronosticando para el bimestre de Diciembre y Enero (figura 11, a y b), en el caso de la componente principal 1 sobresale el índice del AMO+PDO, el cual estando en el tercil alto (bajo) trae lluvias por debajo (encima) de lo normal; sin embargo este índice, para el bimestre de octubre y noviembre, no superó el 90% de significancia. Valores de PDO en su tercil alto muestran valores por debajo de los normales en las lluvias de dicho bimestre, mientras que valores del AMO-N3 y AMO-(PDO+N3) altos, prevén lluvias por encima de las normales. Usando el bimestre de Octubre y Noviembre, condiciones de El Niño (La Niña) traen lluvias por abajo (encima) de los valores normales.

En el caso de la componente principal 2 (figura 11, c y d), valores de PDO+N3 y N3 altos traen consigo lluvias por debajo de las normales para los meses de diciembre y enero; sin embargo, en el caso del índice PDO+N3 correspondiente al bimestre de octubre y noviembre, no se supera el 90% de confianza. Resulta interesante lo obtenido con la NAO, ya que en ambos bimestres pronostica condiciones bajo las normales, aunque para setiembre y octubre lo hace estando en el tercil bajo, mientras que en octubre y noviembre es en el tercil alto, resultado que requiere de un estudio posterior. Para los escenarios por encima de lo normal, sobresalen los índices del AMO-N3 y AMO-(PDO+N3) en el tercil superior, así como cuando se presentan condiciones de Niña.

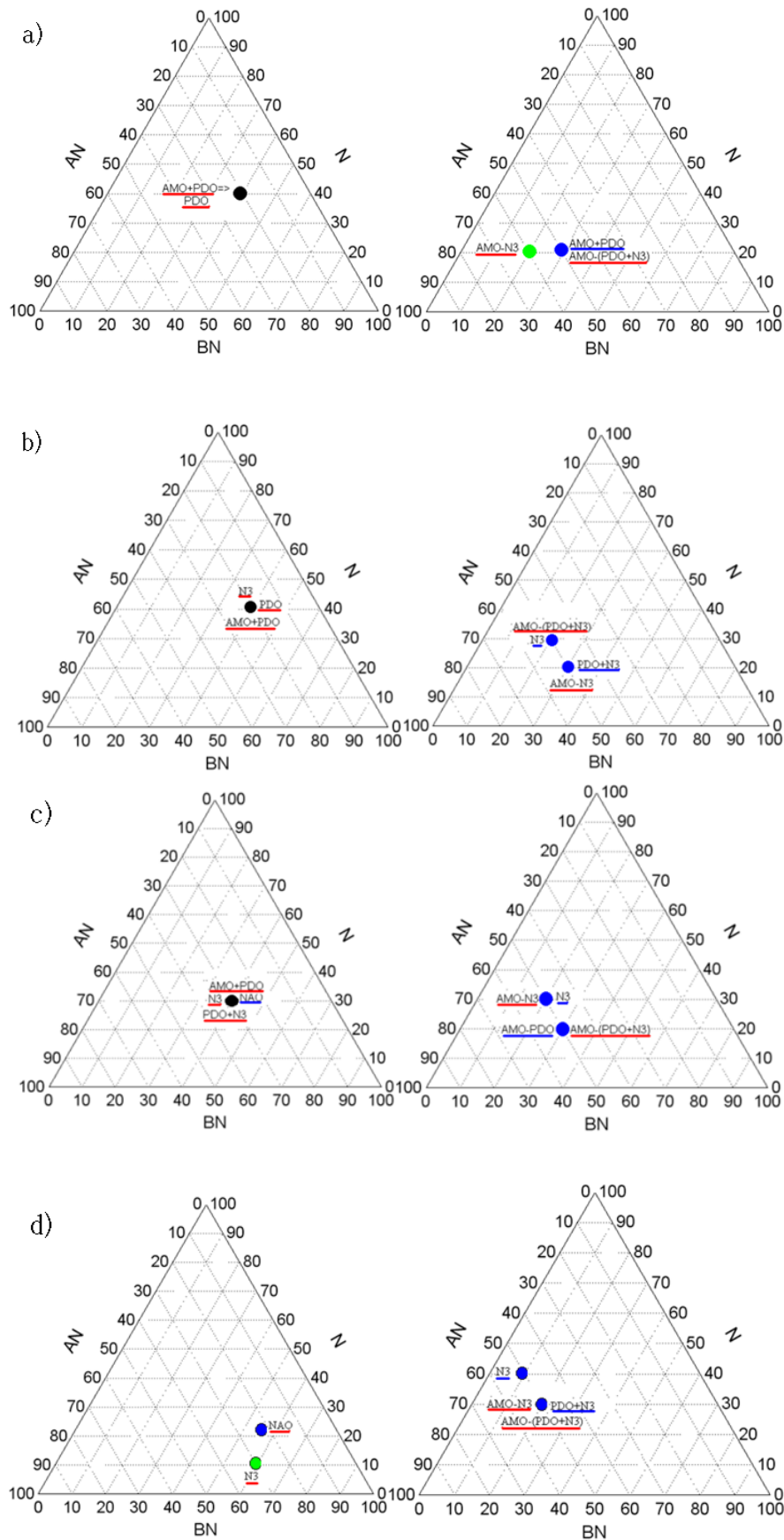


Fig. 11: Lo mismo que la figura 6. Predictores para el período de Diciembre y Enero de la componente principal 1 (2) usando los bimestres Setiembre-October (a)(c) and Octubre-Noviembre (b)(d). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) and Arriba de lo normal (Derecha).

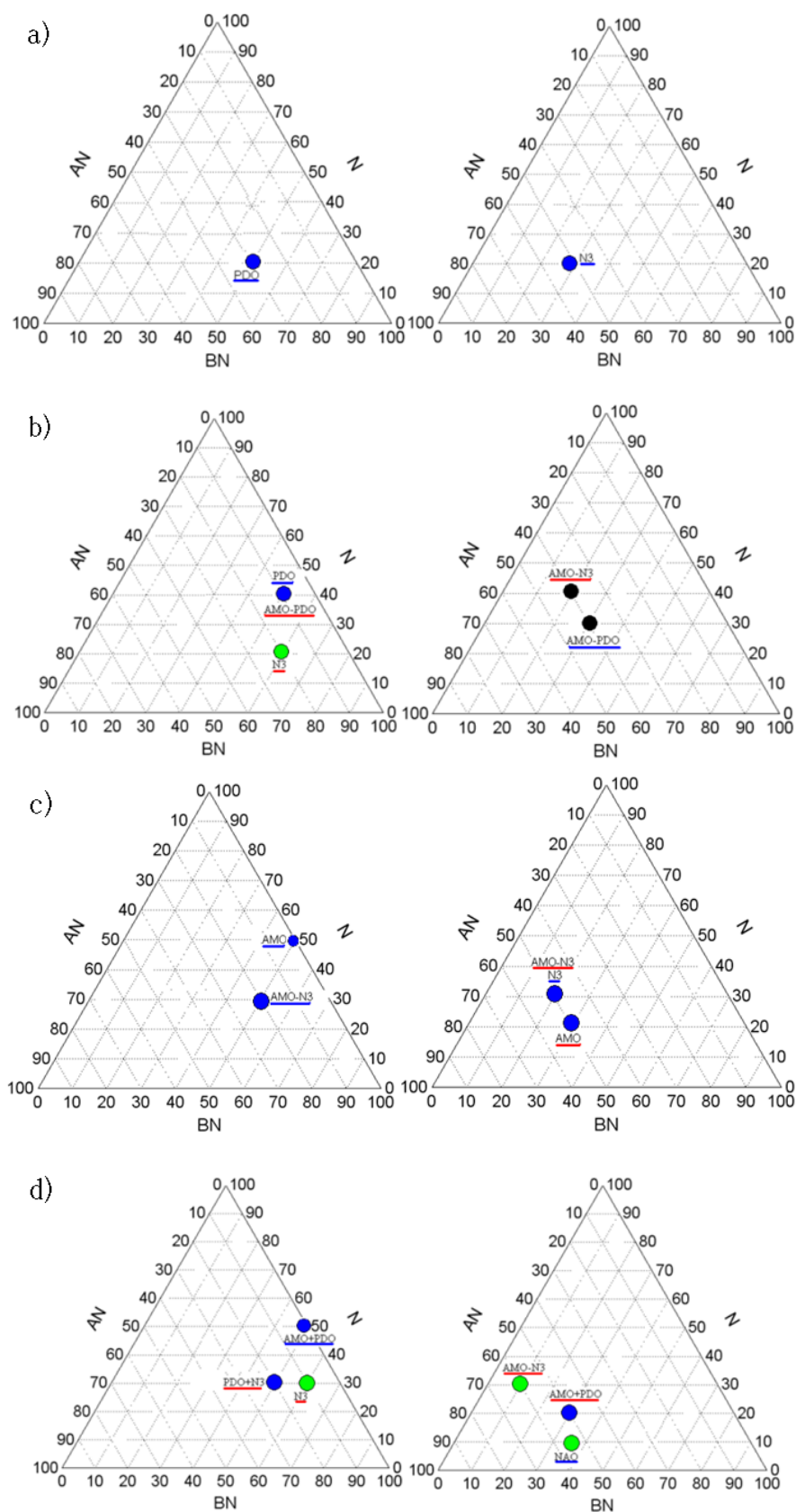


Fig. 12: Lo mismo que la figura 6. Predictores para el período de Febrero y Marzo de la componente principal 1 (2) usando el bimestre Setiembre-Octubre (a)(c) and Octubre-Noviembre (b)(d). Escenarios Bajo lo normal (Izquierda) y Arriba de lo normal (Derecha).

Los predictores para la lluvia de febrero y marzo (figura 12, a y b) de la componente principal 1 varían dependiendo del bimestre usado, sin embargo valores bajos (altos) del AMO-PDO pronostican lluvias por encima (debajo) de las normales, aunque el resultado correspondiente al bimestre de setiembre y octubre no supera el 90 % de significancia. Valores bajos del PDO traen consigo lluvias por debajo de las normales.

Para la componente principal 2 (figura 12, c y d) el AMO-N3 bajo (alto) pronostica lluvias por debajo (encima) de lo normal, pero en el caso correspondiente a octubre y noviembre no se superó el 90 % de significancia. En el bimestre de octubre y noviembre el NAO con valores bajos pronostica lluvias por encima de las normales, con una significancia superior al 95 %.

4. Conclusiones

Con la técnica de las componentes principales, útil para resumir la mayor cantidad de información de un conjunto de datos, en el presente estudio se pudo reunir la información más importante de las estaciones con patrón bimodal (tipo Pacífico) y lluvias con un comportamiento en el que no se presenta un período seco bien definido (Caribe), especialmente al sur de la región, lo cual está asociado a la densidad de estaciones usadas en el Caribe costarricense.

Los índices con mayor grado de confianza para pronosticar adelantos o atrasos en el inicio de la época lluviosa resultaron ser el AMO-(PDO+N3), PDO+N3, N3 y el AMO-PDO. Otros índices también fueron útiles, entre ellos el AMO cuando se usaba el bimestre de abril y mayo.

En el caso de las lluvias para el trimestre de mayo, junio y julio, para la componente principal 1, la mayoría de los índices superaron el 90 % de significancia, predominando el AMO, AMO-N3 y N3, mientras que para la componente principal 2 todos los índices usados superan el 90 % de significancia.

Para la intensidad del veranillo se mostró que depende de varios índices, siendo los más importantes el AMO, N3, AMO-N3 y AMO-(PDO+N3). La mayoría de los mismos superan el 90 % de significancia. Años El Niño (La Niña) o con índices AMO bajos (altos) predicen canículas más (menos) pronunciadas. La fecha de inicio de la canícula es más factible de ser pronosticada cuando existe un retraso en el inicio de la misma, debido a que los resultados obtenidos con mayor significancia y cantidad de índices están asociados a dicho escenario.

En el trimestre de agosto, setiembre y octubre, para la componente principal 1, la mayoría de los índices superaron el 90 % de confianza, estando presentes nuevamente los índices AMO, AMO-N3, N3 y AMO-(PDO+N3). El peso del índice del Atlántico tiene que ver con la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Oeste. Interesantemente aparecen para la componente principal 2 varios de los mismos índices usados para la componente principal 1, pero pronosticando escenarios opuestos; por ejemplo, el AMO cálido trae lluvias por encima de lo normal en el Pacífico, mientras que en la componente principal 2 pronostica lluvias por debajo de las normales, también con niveles de significancia superiores al 90 % en el mayor de los casos.

Se observó que para el Término de la Época lluviosa, nuevamente el AMO, AMO-N3, N3 y AMO-(PDO+N3), así como el NAO tienen los mejores niveles de significancia, mostrando que en condiciones de El Niño (La Niña) se puede adelantar (atrasar) el término de la época lluviosa.

Se obtuvo que para el bimestre de Diciembre y Enero, la componente principal 1 nuevamente está regida por el AMO-N3. Sobresale también el índice del AMO+PDO, mientras que para la componente principal 2 no se observó un índice con mucho peso, siendo los más importantes el N3 y el PDO+N3. Además se muestra que condiciones de Niña e índices AMO-N3 y AMO-(PDO+N3) con valores altos pronostican lluvias por encima de las normales en ambas componentes principales.

En el caso de Febrero y Marzo no se obtuvieron índices con tendencias que sobresalieran o fueran realmente consistentes. Parte de la razón se debe a que es un bimestre que se está pronosticando a un plazo aún más largo debido a que el Foro lo incluye en el pronóstico de diciembre y enero.

En resumen, se encontraron índices ya conocidos como son las temperaturas del Atlántico y de las regiones Niño. Sin embargo, la presente investigación muestra la presencia de otros índices como son el PDO y el NAO, los cuales, normalizados y asociados entre ellos, producen resultados útiles en el pronóstico estacional operacional, como es el caso del índice AMO-(PDO+N3), el cual se presentó en varios períodos de pronóstico con niveles de significancia altos. Además, dependiendo de la región de pronóstico (Pacífico o Caribe), los mejores índices para pronosticar las lluvias del período varían, e incluso dependen de la época del año.

Agradecimientos

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

Bibliografía

- Agresti A (2002): *Categorical data analysis* (2^a ed.). John Wiley & Sons, United States of America, 710 pp.
- Aguilar E, Peterson TC, Ramírez Obando P, Frutos R, Retana JA, Solera M, Soley J, González Santos I, Araujo RM, Rosa Santos A, Valle VE, Brunet India M, Aguilar L, Álvarez L, Bautista M, Castañón C, Herrera L, Ruano E, Siani JJ, Obed F, Hernández Oviedo GI, Salgado JE, Vázquez JL, Baca M, Gutiérrez M, Centella C, Espinosa J, Martínez D, Olmedo B, Ojeda Espinoza CE, Haylock M, Núñez R, Benavides H, Mayorga R (2005): Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003. *J. Geophys. Res.*, 110, D23107, 15 pp., doi:10.1029/2005JD006119.
- Alfaro E, Soley J, Enfield D (2003): *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas* (Use of a Contingency Table for Climatic Applications). Editado por ESPOL y FUNDESPOL, Guayaquil, Ecuador, 51 pp., ISBN 9978-310-00-2.
- Alfaro E (2007): Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. *Revista de Climatología*, 7:1-13.
- 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*, 16:59-74.
- Alvarado L, Alfaro E (2003): Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Tóp. Meteor. Oceanogr.*, 10:1-11.
- Amador JA (1998): A climatic feature of tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 5:91-102.
- Amador JA, Magaña V, Pérez JB (2000): The low level jet and convective activity in the Caribbean. Preprints of the 24th Conference in Hurricanes and Tropical Meteorology, May 29-June 2, 2000, Fort Lauderdale, Florida, Am. Met. Soc., pp. 114-115.
- Amador J, Alfaro E, Lizano O, Magaña V (2006): Atmospheric forcing in the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69:101-142.
- Amador JA (2008): The Intra-Americas Sea Low-Level Jet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146:153-188.
- Donoso M, Ramírez P (2001): Latin America and the Caribbean. 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.

- Enfield D, Alfaro E (1999): The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *J. of Climate*, 12:2093-2103.
- García-Solera I, Ramírez P (2012): Central America's Seasonal Climate Outlook Forum. The Climate Services Partnership, 8 pp. <http://climate-services.org/resource/central-american-climate-outlook-forum>
- Gershunov A, Barnett T (1998): Inter-decadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:2715-2725.
- Magaña V, Amador JA, Medina S (1999): The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Climate*, 12:1577-1588.
- North GR, Bell TL, Cahalan RF, Moeng FJ (1982): Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. *Mon. Wea. Rev.*, 110:699-706.
- Soley F (2005): Estado de la base de datos NUMEROSA. Informe técnico, Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Taylor M, Alfaro E (2005): Climate of Central America and the Caribbean. In: *Encyclopedia of World Climatology*, John E. Oliver (Ed.), Springer, Netherlands, pp. 183-189.
- Wang C, Enfield DB, Lee SK, Landsea CW (2006): Influences of Atlantic Warm Pool on western hemisphere summer rainfall and Atlantic Hurricanes. *Journal of Climate*, 19:3011-3028.
- Wilks DS (1995): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 373 pp.
- Zárate E (2006): Comportamiento de los empujes fríos que alcanzan Centroamérica y el Caribe. Documento Técnico, Comité Regional de Recursos Hidráulicos-Sistema de Integración Centroamericana y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, 24 pp.

