

Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica

ERIC J. ALFARO^{1,2,3} Y HUGO G. HIDALGO^{1,2}

Resumen

El ciclo anual de la precipitación en la vertiente del Pacífico de América Central, se caracteriza por tener dos máximos, uno entre mayo-junio y el otro entre setiembre-octubre, además de una estación seca de noviembre a abril y un periodo corto en el que las lluvias disminuyen durante julio-agosto, conocido como veranillo o canícula. En este trabajo se estudia la predictibilidad del veranillo, utilizando cuatro registros de precipitación diarios de las estaciones meteorológicas de Nicoya, Santa Cruz, Bagaces y Liberia, para el periodo 1937-2010 y localizadas en la cuenca del río Tempisque, provincia de Guanacaste, vertiente del Pacífico Norte de Costa Rica en América Central. Dentro de los aspectos considerados están la predictibilidad de la magnitud e intensidad del veranillo. Se explora la modulación de estos aspectos por fuentes de variabilidad climática asociadas con el Pacífico ecuatorial del Este (ENOS) y al océano Atlántico (AMO), incluyendo su variabilidad interanual y decenal. Cuando las anomalías normalizadas de ambos índices se comparan, se encontró que los eventos cálidos (fríos) del ENOS tienden a estar asociados con condiciones más (menos) secas durante el veranillo y estas condiciones se refuerzan cuando están asociados a su vez con condiciones de anomalías negativas (positivas) del AMO.

PALABRAS CLAVE: VERANILLO, CANÍCULA, VARIABILIDAD CLIMÁTICA, TEMPISQUE, PREDICCIÓN CLIMÁTICA ESTACIONAL, ANÁLISIS CATEGÓRICO, AMÉRICA CENTRAL

Abstract

On the Pacific slope of Central America, the precipitation annual cycle is characterized by two rainfall maxima in May-June and September-October, an extended dry season from November to April, and a shorter reduced precipitation period during July-August known as Mid-Summer Drought (MSD) or “veranillo” and “canícula” in Spanish. Four daily gauge stations records, e.g. Nicoya, Santa Cruz, Liberia and Bagaces, located in the Tempisque river basin, province of Guanacaste, North Pacific slope of Costa Rica in Central America, were studied to explore the predictability of the MSD from 1937 to 2010. Among the aspects considered are the predictability of the MSD intensity and depth of the minimum. The modulation of these aspects by climate variability sources such as the Equatorial Eastern Pacific (ENSO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) was lately explored, including their interannual and decadal variability. When the normalized comparison is performed between the indices, it was found that warm (cool) ENSO events tend to be associated with dry (wet) MSD conditions and this condition is reinforced during periods with negative (positive) AMO anomalies.

KEYWORDS: MID SUMMER DROUGHT, CLIMATE VARIABILITY, TEMPISQUE, SEASONAL CLIMATE PREDICTION, CATEGORICAL ANALYSIS, CENTRAL AMERICA

1 Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica.

2 Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.

3 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica.

Correos electrónicos: erick.alfaro@ucr.ac.cr, hugo.hidalgo@ucr.ac.cr

1. Introducción

Según Maldonado, Rutgersson, Alfaro, Amador y Claremar (2016), en la vertiente del Pacífico de América Central la precipitación muestra un ciclo anual bimodal. El primer valor máximo de la lluvia ocurre cuando las aguas oceánicas circunvecinas alcanzan temperaturas superficiales cercanas a los 29° C en la piscina cálida del Pacífico Tropical del Este (PTE) y la magnitud de los vientos alisios disminuye, provocando un incremento de la convección sobre la región y favoreciendo la migración hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Durante los meses de julio y agosto se observa un mínimo relativo en la precipitación, acompañado de un decrecimiento de la temperatura superficial del mar en la piscina cálida del PTE y un incremento de la magnitud de los vientos alisios. Esta reducción de las lluvias es conocida regionalmente como veranillo o canícula.

El segundo máximo de la precipitación en la vertiente del Pacífico de América Central, ocurre durante el trimestre de agosto-setiembre-octubre y es acompañado por una reducción de la magnitud de los vientos alisios y un incremento relativo de la temperatura superficial del océano, que puede alcanzar o superar los 28,5° C en la piscina cálida del PTE.

El veranillo ha sido ampliamente caracterizado en el PTE por estudios como los de Magaña, Amador y Medina (1999), Amador, Alfaro, Lizano y Magaña (2006) y Amador, Durán-Quesada, Rivera, Mora, Sáenz, Calderón y Mora (2016); y para estaciones pluviométricas en América Central por Alfaro (2002) y Maldonado *et al.* (2016). Sin embargo, tal y como lo señala Maldonado *et al.* (2016), el tema sobre los mecanismos físicos que gobiernan la ocurrencia del veranillo en la región sigue siendo un tema de investigación abierto y de debate (e.g. Magaña *et al.*, 1999; Karnauskas, Seager, Giannini, & Busalacchi, 2013; Herrera, Magaña & Caetano, 2015).

Específicamente en Costa Rica, Ramírez (1983) encontró que la parte central del Pacífico Norte es una de las regiones en donde está muy bien definido y es más intenso el veranillo, ahí se ubica la cuenca del río Tempisque, una de las más importantes del país. Ramírez (1983) observó, que en esta región el descenso de la lluvia se acentúa a partir del 1 de julio y que la precipitación suele aumentar de nuevo en la segunda quincena de agosto. Esto coincide con lo propuesto por Alfaro (2002), quién notó que la fecha más probable de ocurrencia del veranillo en dicha región se ubicaba entre el 5 y el 19 de julio.

En una caracterización reciente del veranillo en la cuenca del río Tempisque hecha por Alfaro (2014), se observó que el inicio de los eventos tiende a presentarse entre el 11 de junio y el 21 de julio, su mínimo en cuanto a la cantidad de lluvia registrada, entre el 9 de julio y el 4 de agosto, y el final entre el 28 de julio y el 30 de agosto. El 50% de las observaciones de la duración de los eventos se ubicaron en los 34,5 y 54 días, las intensidades de los eventos se observaron entre 4,3 y 8,5 mm día⁻¹ y entre 2,0 y 3,9 mm para las magnitudes, definida la intensidad como la precipitación promedio observada durante los eventos y la magnitud como a la cantidad de lluvia registrada durante el mínimo de todos los eventos estudiados. Dentro de los años más secos durante estos eventos se encuentran 1965, 1970, 1972, 1976, 1982, 1986, 2000 y 2001. Para la cuenca del Tempisque el evento de mayor duración se observó para el año 1999, sin embargo no fue el año que tuvo el veranillo más seco.

Lo anterior coincide en términos generales con Hernández y Fernández (2015), quienes caracterizaron el veranillo o canícula en la zona del Pacífico Norte utilizando valores umbrales pentadales de la evaporación, específicos para cada región climática del país, por medio del método FAO-56 Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia e identificando los puntos de inflexión en donde

la péntada de evaporación y precipitación coinciden, con lo cual se obtienen las ocurrencias del veranillo. El Pacífico Norte se caracterizó por un veranillo que va del 26-30 de junio al 15-19 de septiembre, con umbrales de 31-42 mm y 33-35 mm respectivamente.

Por su parte, Solano (2015) estudió y caracterizó el comportamiento de los veranillos en las cuencas de los ríos Nosara, Tempisque, Abangares y Jesús María, en el Pacífico Norte de Costa Rica, en el periodo 1981-2010, mediante el uso del método de Alfaro (2014). De las cuencas estudiadas en esa región Solano (2015) señala, que la cuenca del río Tempisque presentó los valores más bajos para la magnitud e intensidad de los eventos, con medianas observadas de 1,8 mm y 5,6 mm día⁻¹, respectivamente. También es la cuenca con una mayor duración de los eventos de alrededor de 46 días; los inicios más tempranos cerca del 21 de junio y los finales más tardíos alrededor del 16 de agosto, este último similar al valor de la cuenca del río Abangares. Por último, las fechas de los mínimos de los eventos del veranillo tienden a presentarse cerca del 17 de julio; resultados que verifican los obtenidos previamente por Alfaro (2014).

Alfaro (2014) exploró la modulación y la predicción de los aspectos relacionados al veranillo, debido a fuentes de variabilidad climática tales como el Pacífico ecuatorial del Este, en donde se observó que condiciones cálidas (frías) del índice Niño 3.4 durante el mes de junio, tienden a estar relacionadas con eventos más secos (más lluviosos) de veranillos. Dichos resultados fueron corroborados por Solano (2015) para las cuencas que estudió en el Pacífico Norte de Costa Rica. Sin embargo, Waylen y Quesada (2012) sugieren que el veranillo en América Central es menos (más) severo, cuando además el océano Atlántico está más cálido (frío) al compararlo con el Pacífico ecuatorial del Este.

Anteriormente Fallas-López y Alfaro (2012), utilizaron la técnica estadística del análisis de tablas de contingencia para elaborar esquemas predictivos de los campos de precipitación en América Central, incluyendo el veranillo, a partir de la primera componente principal de los registros de 146 estaciones con datos diarios. Dichos autores mostraron, que la intensidad de los veranillos está relacionada con los valores de los índices climáticos de abril y mayo de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (Enfield, Mestas-Núñez & Trimble, 2001) o AMO por sus siglas en inglés, de la Oscilación Decenal del Pacífico (Mantua, Hare, Zhang, Wallace, & Francis, 1997) o PDO por sus siglas en inglés, por índices de El Niño-Oscilación del Sur o ENOS (como el Niño 3 o el Niño 3.4), o por combinaciones de ellos. Específicamente, veranillos más intensos están asociados con valores en el tercil superior de los índices PDO+Niño 3 y Niño 3, y por valores en el tercil inferior de los índices AMO-Niño 3 y AMO-PDO. La respuesta en la intensidad de los veranillos disminuye para los terciles opuestos de los índices mencionados. Para los predictores de abril y mayo, los veranillos más (menos) intensos están asociados con valores en el tercil inferior (superior) del índice compuesto AMO-(PDO+Niño 3). Al considerar el inicio de los eventos de veranillo, se observó que su inicio temprano (tardío) se asocia con condiciones de El Niño (La Niña), AMO frío (cálido), AMO-Niño 3 y AMO-(PDO+Niño 3) con valores bajos (altos).

Los dos trabajos anteriores concuerdan en términos generales con los resultados recientes obtenidos por Maldonado *et al.* (2016), quienes mostraron que la intensidad y magnitud del veranillo puede ser predicho hasta con tres meses de anticipación utilizando la temperatura superficial del mar de los mares circundantes, como campo predictor en un esquema de modelos estadísticos de Análisis de Correlación Canónica. Los resultados mostraron que cuando se tienen condiciones más frías (cálidas) en junio en el Atlántico Tropical Norte, en conjunto con condiciones más cálidas

(frías) en el Pacífico ecuatorial del Este, se observa una tendencia hacia condiciones más (menos) secas durante los veranillos registrados en 25 estaciones meteorológicas de América Central.

Debido a la importancia del manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Tempisque, una de las principales de Costa Rica, se plantea como objetivo de este trabajo la predicción estacional del veranillo en esta región. De acuerdo a Maldonado *et al.* (2016), esta predicción es importante para la provincia de Guanacaste debido a que el veranillo, que es un evento de alta variabilidad tanto espacial como temporal, se desarrolla en la región todos los años y esta es una cuenca con actividades industriales y agrícolas importantes para el país, donde se ubica además la mayoría de la población de la provincia (Alfaro, 2014), por lo que podría afectar sectores socioeconómicos claves como la agricultura y abastecimiento de agua potable. Por ejemplo, muchos agricultores usan la entrada del veranillo como una indicación para determinar tiempos de siembra (García-Solera & Ramírez, 2012).

2. Metodología

Se usaron los registros de precipitación de cuatro estaciones pluviométricas, con registros acumulados diarios del trabajo de Alfaro (2014). Dichas estaciones son Bagaces (10.53° N, 85.25° W), Liberia (10.60° N, 85.54° W), Santa Cruz (10.26° N, 85.58° W) y Nicoya (10.15° N, 85.45° W). Las mismas tenían registros disponibles para los años 1974-2007, 1957-2010, 1937-2010 y 1949-2010, respectivamente. En ese mismo orden el porcentaje de datos faltantes fue de 1,0, 13,8, 22,2 y 6,7. Según Alfaro (2014), la utilización de los registros en forma conjunta permitió la caracterización del veranillo en esta cuenca entre los años 1949 y 2010, además del año 1937, es decir 63 eventos.

Siguiendo lo sugerido por Alfaro (2014), los datos faltantes de los registros diarios se rellenaron con un modelo autorregresivo de orden 1, de acuerdo a la metodología descrita por Alfaro y Soley (2009). Para minimizar las falsas interrupciones de los eventos de veranillo, debido a las perturbaciones que pueden afectar el análisis de variabilidad temporal de menos de un mes, como el debilitamiento de los vientos alisios, el acercamiento de la ZCIT (por presencia de bajas presiones en el Mar Caribe o en el PTE) y el derrame de lluvia desde la vertiente Caribe descritas en detalle por Ramírez (1983), se filtraron las series de tiempo con una media móvil triangular de 31 datos de acuerdo a Soley (1994). Luego, se calculó el promedio aritmético de todas las series ubicadas en una misma cuenca para producir un índice de precipitación.

Utilizando dicho índice, se examinaron los meses de mayo a setiembre para encontrar el mínimo de precipitación en ese periodo, el cual se tomó como la fecha del mínimo de precipitación del evento del veranillo durante ese año en particular. Para cada año, la fecha del inicio del evento se definió como el día en donde el índice empieza a disminuir y la fecha final de cada uno cuando esta serie deja de aumentar, considerando el cambio en la pendiente. La duración del mismo se estimó como la fecha del final menos la del inicio en días julianos. La intensidad de cada evento se asoció a la precipitación promedio diaria durante los eventos y la magnitud de cada uno de ellos se definió como el valor de precipitación localizado en el mínimo del valle de cada evento en particular. Como un ejemplo, se observó que el veranillo del año 1969 inició el 9 de junio y finalizó el 10 de agosto, para una duración de 63 días. El mínimo se ubicó el 14 de julio con una precipitación asociada de 1,1 mm (magnitud). La precipitación promedio (intensidad) estimada entre las fechas del inicio y final fue de 4,9 mm día⁻¹.

Del procedimiento anterior, se obtuvieron cinco series anuales para cada cuenca y se estudió su

relación con la variabilidad climática asociada con AMO y ENOS. Para ello se emplearon las diferencias normalizadas de las anomalías de los índices AMO y Niño 3.4, observadas durante el mes de junio para explorar relaciones de tipo predictivo, ya que la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del veranillo se registran en el mes de julio. Se usaron dos herramientas de análisis categórico para explorar estas relaciones (Agresti, 2002), la primera fue el análisis de Tablas de Contingencia propuesto por Alfaro, Soley y Enfield (2003), en donde tanto la serie anual asociada al veranillo como la del índice AMO-Niño 3.4 se categorizaron en tres clases a saber, Bajo lo Normal (BN), Normal (N) y Arriba de lo Normal (AN), para construir tablas de 3 x 3 de 9 categorías conjuntas. Los límites de clases se establecieron de acuerdo a los percentiles 33,33 y 66,67 en ambas series. Todas las series de las cinco características fueron introducidas en la Tabla de Contingencia, sin embargo sólo las series de la intensidad y la magnitud mostraron relaciones estadísticamente significativas, por lo que serán las únicas consideradas en el análisis posterior.

La segunda herramienta estadística correspondió a los modelos *logit*, construidos de acuerdo a lo explicado por Wilks (2011), de acuerdo a la ecuación:

$$y(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}}, \text{ (Ecuación 1)}$$

Para el ajuste de la ecuación anterior, el valor de x corresponde al valor de la anomalía del índice AMO-Niño 3.4 observada durante el mes de junio, y y es alguna de las cinco series binarias anuales sobre algún aspecto del veranillo, con valores de 1 asociados a la categoría AN o BN, según sea el caso, y 0 de otra forma. Nótese que este ajuste da como resultado dos series de probabilidad anuales (y_{AN} y y_{BN}) y se puede calcular una tercera asociada a la categoría N estimada como $y_N = 1 - y_{AN} - y_{BN}$. Las mismas se pueden multiplicar por 100 para expresarlas como porcentajes, es decir:

$$y_{AN} + y_N + y_{BN} = 100, \text{ (Ecuación 2)}$$

Lo anterior para todos los valores de las anomalías observadas del índice AMO-Niño 3.4 y durante todos los años que comprendió el estudio. El índice Niño 3.4 se obtuvo del repositorio del Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI, por sus siglas en inglés) (Consultado: 24 de junio de 2013, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/.NINO34/T+exch+table+text+text+skipanyNaN+table+.html>). El índice AMO se obtuvo del repositorio del Laboratorio de Investigación para el Sistema Tierra (ESRL, por sus siglas en inglés) (Consultado: 26 de agosto de 2014, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>).

Cabe destacar, que la metodología desarrollada en los párrafos anteriores, fue expuesta en el Foro de Predicción Climática de América Central (García-Solera & Ramírez, 2012) de Tegucigalpa en julio de 2013 y ha servido de insumo para foros posteriores como los celebrados en abril de 2014 en Ciudad de Guatemala, noviembre de 2014 en Ciudad de Panamá y julio de 2015 en Tegucigalpa, en donde se realizaron actividades de seguimiento y transferencia de la metodología hacia los participantes del Foro, así como la realización de ejercicios con estaciones de otros países de América Central.

El análisis de ondeletas fue realizado de acuerdo a la metodología de Torrence y Compo (1998), a través del sitio <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/> (última visita, 31/05/2017). La función usada para el cálculo de la misma fue la de Morlet y se contrastó el espectro contra uno teórico de ruido rojo, el cual compara el espectro observado con uno de un modelo autorregresivo de orden 1 (Wilks, 2011). El gráfico de ondeletas usado, permite ver la importancia relativa de las contribuciones asociadas con las diferentes oscilaciones presentes en la serie, en función del tiempo. Lo anterior muestra los meses en los

cuales oscilaciones de un periodo determinado, tienen mayor o menor potencia espectral asociada.

Se obtuvieron también los datos de la producción anual de arroz, de los informes anuales del Consejo Nacional de la Producción y de la Corporación Arrocera Nacional, para contrastar esta producción con la severidad del veranillo observado en Guanacaste, entre 1970 y el año 2010.

3. Resultados y discusión

Ninguna de las series asociadas con la caracterización del veranillo mostró una tendencia lineal estadísticamente significativa. La figura 1 muestra el análisis espectral de las series anuales de los índices AMO-Niño 3.4 (en junio), así como la de la intensidad y magnitud del veranillo. El análisis por ondeletas mostró periodicidades interanuales cerca de los tres años, las cuales podrían ser atribuidas al ENOS y cerca de los 8 a 10 años, lo que podría mostrar la influencia del océano Atlántico sobre la región u otra fuente de variabilidad decadal no considerada en este trabajo, sin embargo estas periodicidades se observaron por debajo del espectro teórico de ruido rojo.

El cuadro 1 muestra las relaciones observadas entre las anomalías observadas en junio del índice AMO-Niño 3.4 (filas) y la intensidad y la magnitud de los eventos (columnas) del veranillo en la cuenca de río Tempisque. No se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre este índice climático y algún otro aspecto asociado con el veranillo (e.g. inicio, final y duración de los eventos) en la cuenca. El análisis de esta Tabla de Contingencia (Cuadro 1) arroja que en ambas cuencas, el escenario seco (BN) es el más probable para condiciones con anomalía negativas (BN) del índice AMO-Niño 3.4, es decir, cuando el Atlántico se encuentra relativamente más frío que

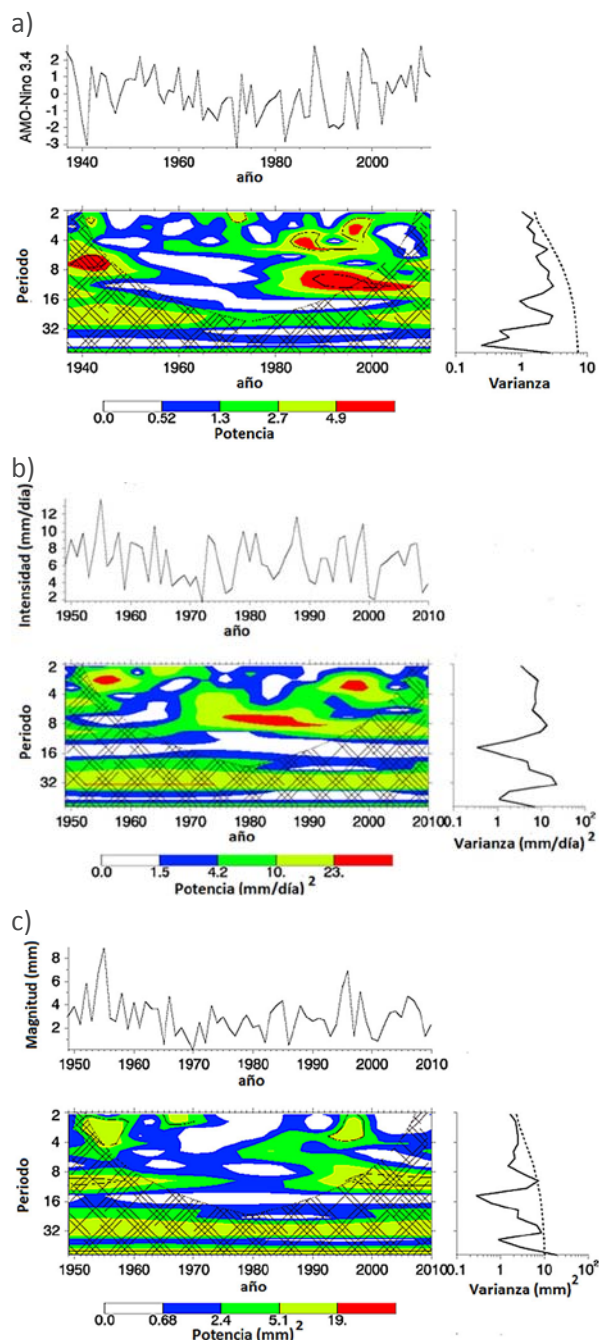


Figura 1. Series anuales de tiempo, el inferior izquierdo presenta el análisis de ondeletas y el inferior derecho el espectro, para a) el índice AMO-Niño 3.4 en junio, b) la intensidad y c) la magnitud del veranillo. Gráficos realizados de acuerdo a la metodología de Torrence y Compo (1998).

el Pacífico ecuatorial del Este, mientras que los eventos menos severos del veranillo, agrupados en la categoría (AN), son más probables cuando

Cuadro 1. Probabilidades empíricas condicionales para la intensidad y la magnitud del veranillo en la cuenca del Tempisque, dada una anomalía observada en junio del índice AMO-Niño 3.4.

		BN	Intensidad N	AN
		($\leq 5.1 \text{ mm día}^{-1}$)		($\geq 8.0 \text{ mm día}^{-1}$)
	BN (≤ -0.59)	48(10)**	38(8)	14(3)***
AMO-Niño 3.4	N	38(8)	38(8)	29(6)
Junio	AN (≥ 0.63)	14(3)***	29(6)	57(12)***

		BN	Magnitud N	AN
		($\leq 2.2 \text{ mm}$)		($\geq 3.4 \text{ mm}$)
	BN (≤ -0.59)	61(13)***	29(6)	10(2)***
AMO-Niño 3.4	N	29(6)	38(8)	33(7)
Junio	AN (≥ 0.63)	10(2)***	33(7)	57(12)***

Nota. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas y las categorías usadas son bajo lo normal (BN), neutral (N) y arriba de lo normal (AN). La correlación de Spearman para las series de la tabla superior e inferior fue de 0.46*** y 0.57***, respectivamente. Los asteriscos denotan la significancia estadística, donde $\alpha = 0.01 \rightarrow$ ***, $0.05 \rightarrow$ **, $0.10 \rightarrow$ *.

se asocian con anomalías positivas (AN) del índice AMO-Niño 3.4, es decir, cuando el Atlántico se encuentra relativamente más cálido que el Pacífico ecuatorial del Este.

Al observar la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del veranillo en el mes de julio, los resultados del cuadro 1 sugieren un esquema de tipo predictivo sobre la intensidad y la magnitud de los mismos, al igual que en Alfaro (2014). Estas relaciones predictivas se muestran en la figura 2, por medio del uso de modelos *logit*. El cuadro 2 lista los coeficientes ajustados para los escenarios BN y AN. Se observa que el único coeficiente no significativo al 99% ($|z| > 2.576$) fue el de la intensidad en la cuenca del Tempisque para el escenario BN, sin embargo es significativo al 95%.

Todos los modelos ajustados muestran que el escenario más probable para anomalías positivas (negativas) en el índice AMO-Niño 3.4 es el AN (BN) en la intensidad y magnitud del veranillo en la cuenca. Para fines de trabajo operativo, junio puede presentar algunos inconvenientes en su uso como predictor ya que por lo general los índices AMO y Niño 3.4 pueden estar disponibles una o hasta dos

semanas después de finalizado el mes junio, eso quiere decir que los índices de junio podrían estar listos precisamente cuando se está registrando el evento del veranillo. Adicionalmente, en los casos en que efectivamente el mínimo (magnitud) se registra en julio, la intensidad puede comenzar en junio o con mayor frecuencia a principios de julio. Lo anterior no invalida el hecho de que la relación encontrada en este estudio sea predictiva, pero dados los problemas señalados en su uso operacional, se podría explorar el uso de un esquema de prognosis perfecta (Wilks 2011), en donde se pueden usar pronósticos para el mes de junio de la TSM para calcular los índices, y de esta manera establecer una relación con los aspectos del veranillo estudiados. Nótese que aún así, la relación también tiene un uso potencial en diagnóstico.

Al comparar los resultados de los modelos obtenidos en este trabajo con los de Alfaro (2014) en la cuenca del río Tempisque, se observó que la significancia estadística de las Tablas de Contingencia y los modelos *logit* aumentó, al incluir en el análisis la variabilidad del océano Atlántico por medio del uso del índice AMO,

Cuadro 2. Coeficientes de los modelos *logit* ajustados

Modelos, Tempisque	β_0	β_1	z_0	z_1
Intensidad, y_{AN}	-0.86	0.78	-2.75	3.15
Intensidad, y_{BN}	-0.80	-0.58	-2.71	-2.56
Magnitud, y_{AN}	-0.88	0.83	-2.77	3.25
Magnitud, y_{BN}	-1.04	-1.13	-2.90	-3.62

Nota: coeficientes ajustados de acuerdo con la ecuación 1 para obtener las curvas de probabilidad de los escenarios arriba de lo normal (AN) y bajo lo normal (BN) en la cuenca del río Tempisque (ver fig. 2). Los valores de z representan el coeficiente obtenido dividido entre su error estándar. Los coeficientes significativos al 99% están mostrados con letra tipo itálica.

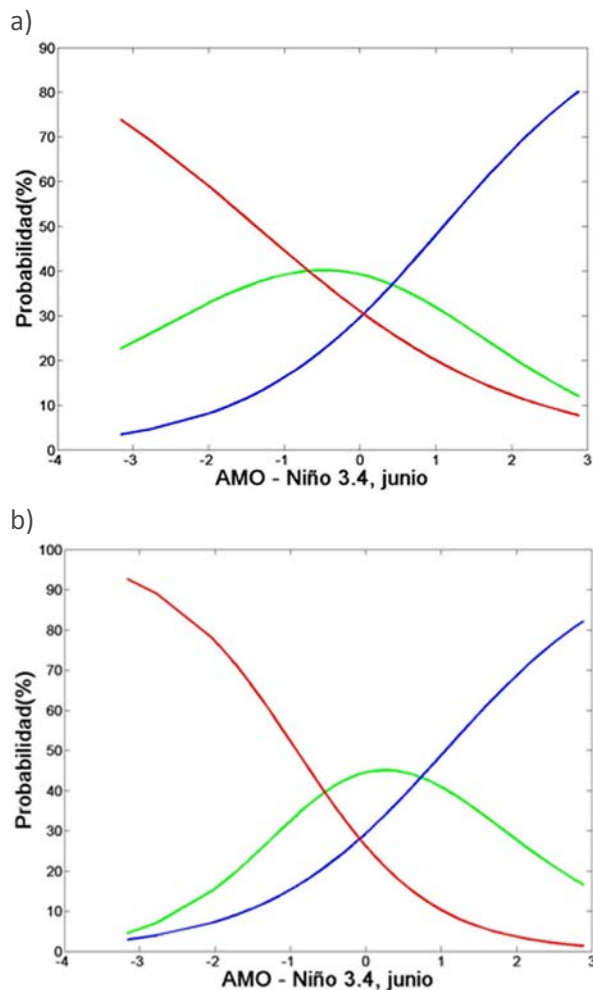


Figura 2. Modelos *logit* ajustados de acuerdo a la ecuación 1, para la a) Intensidad y b) Magnitud del *veranillo* en la cuenca del Tempisque, con x dado por la anomalía observada en el índice AMO-Niño 3.4 durante el mes de junio. La línea azul, verde y roja son para la probabilidad de los escenarios AN, N y BN, respectivamente de los modelos y_{AN} , y_N y y_{BN} , presentados en el cuadro 2.

ya que Alfaro (2014) consideró únicamente la variabilidad en el Pacífico ecuatorial del Este, por medio del uso del índice Niño 3.4.

Los resultados obtenidos con Tablas de Contingencia y con modelos *logit*, concuerdan en términos generales con los resultados obtenidos a nivel regional por Fallas-López y Alfaro (2012) y Maldonado et al. (2016). Lo anterior coincide y confirma el modelo conceptual de diagnóstico propuesto por Waylen y Quesada (2012), quienes explican que temperaturas más bajas (cálidas) de lo normal en el Atlántico Tropical Norte significan un reforzamiento (un debilitamiento) en el anticiclón subtropical del Atlántico Norte y de los vientos alisios. Cuando se combinan con temperaturas más (menos) cálidas (menor (mayor) presión atmosférica) en el Pacífico ecuatorial oriental, el gradiente de presión a través del istmo aumenta (disminuye), incrementándose (debilitándose) el efecto orográfico de la Cordillera de Guanacaste y de Tilarán. Cuando el Atlántico está más (menos) cálido, la consiguiente reducción (reforzamiento) de la fuerza de los vientos alisios reduce (aumenta) la precipitación en la mayor parte de la región.

La figura 3 muestra el gráfico de dispersión de la producción nacional de arroz, contra la lluvia observada en el mínimo del veranillo del año anterior, que es usada en este estudio como una medida de la magnitud del evento. Se observa que la producción de arroz tiende a estar igual o por encima de su mediana, cuando el veranillo no es tan severo, es decir, 14 casos. Por otro lado,

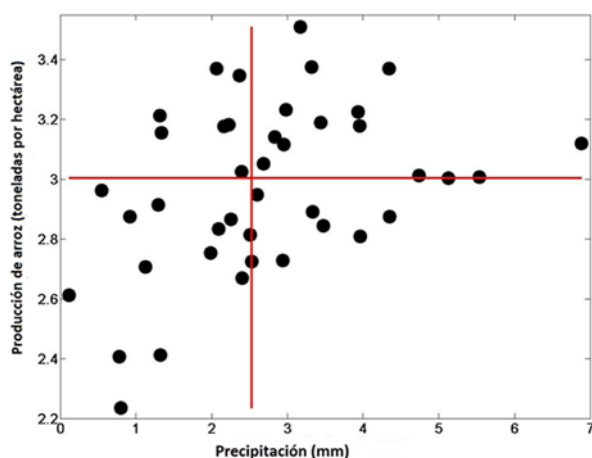


Figura 3. Gráfico de dispersión de la producción nacional anual de arroz contra la lluvia observada en el mínimo del veranillo del año anterior, que es usada en este estudio como una medida de la magnitud del evento, para el periodo 1970-2010 ($r_s = 0.37$, valor- $p = 0.017$). La línea roja horizontal y vertical corresponde a la mediana de los datos de la producción de arroz y de la magnitud del veranillo, respectivamente.

los veranillos severos que se observaron igual o por debajo de su mediana, se asociaron también con 14 casos en los cuales la producción nacional de arroz se observó por debajo su mediana. Sin embargo, al analizar los resultados de la figura 3 se debe tomar en cuenta algunos aspectos: que la producción nacional de arroz es una medida acumulativa de todo un año, mientras que el efecto del veranillo es por uno o dos meses, en función del ciclo fenológico del arroz. Además, las fechas de siembra se dan aproximadamente en agosto, cuando podría haber pasado lo más severo del veranillo. También hay que tomar en cuenta, que en el dato de producción anual se está considerando en la producción nacional el aporte del arroz con riego (aproximadamente un 34% del área sembrada es con este método, la cual varía año con año), el cual no necesariamente es afectado por el veranillo. Por último, en el cálculo de producción se incluyen zonas arroceras fuera de Guanacaste, como en el Pacífico Central-Sur, Caribe Norte y Zona Norte; donde el veranillo es más débil o inexistente. De hecho, alrededor de un 35% del arroz se siembra Guanacaste,

dato que varía también año con año. Debido a lo anterior, los resultados en la figura 3 podrían más bien indicar que existe un efecto modulador de las lluvias sobre Costa Rica, que impacta una región más amplia que Guanacaste y que esta relación AMO-Niño 3.4 podría estar modulando además las condiciones de precipitación previas al veranillo (e.g. Alfaro et al. 2016) y/o posteriores al mismo (Maldonado et al. 2013).

El control climático sobre la producción de arroz en la cuenca había sido sugerido por Villalobos (2001), mostrando que existe más probabilidad de obtener rendimientos por encima del promedio en períodos La Niña y/o inferiores a lo normal en fase El Niño, y que esto está asociado con la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones durante el ciclo del cultivo, superiores y/o inferiores a lo normal respectivamente y se determinó que bajo condiciones de fase cálida los rendimientos de arroz de secano, es decir, aquel no asistido por riego, disminuyen, debido principalmente a una disminución de las lluvias y un aumento en la temperatura en la región. Esta reducción fue reportada también por Retana (1999), quién encontró reducciones de hasta 10.000 y 30.000 toneladas para algunos de los eventos Niño estudiados, lo que repercute en pérdidas económicas importantes (Retana, Villalobos, Alvarado, Sanabria, y Córdoba, 2014). Retana y Solano (2000) agregan que, al haber una buena correlación entre años Niña y rendimientos de arroz mayores al promedio, y a pesar de existir una alta incidencia de inundaciones durante estos fenómenos océano-atmosféricos, se puede deducir que las inundaciones no han afectado mayormente el rendimiento de arroz observado en la región, ya que probablemente la capacidad hidrofílica del cultivo del arroz, le permite mantener su rendimiento en la región, aún con escenarios lluviosos importantes.

Por otra parte, Retana et al. (2014) señalan que el cultivo del arroz de secano en Guanacaste es especialmente susceptible ante disminuciones de

la precipitación durante los períodos del veranillo y durante setiembre-octubre, ya que las amenazas del clima en estas zonas básicamente se refieren a extremos secos que normalmente se asocian a la presencia de eventos El Niño, durante la época lluviosa, como sucedió durante el año 2015 (ver por ejemplo las notas periodísticas, *Sequía en Guanacaste deja millonarias pérdidas en caña, arroz y reses*, del 9 de junio de 2015, <http://www.teletica.com/Noticias/93067-Sequia-en-Guanacaste-deja-millonarias-perdidas-en-cana-arroz-y-reses-.note.aspx> y *Sequía en Guanacaste deja pérdidas totales en 714 hectáreas de arroz*, del 18 de setiembre de 2015 <http://www.elmundo.cr/sequia-en-guanacaste-deja-perdidas-totales-en-714-hectareas-de-arroz/>, última visita, 31/05/2017).

Según Alfaro (2014), la vertiente del Pacífico es la que reporta mayor cantidad de impactos asociados a déficit de lluvia junto con temperaturas por encima del promedio durante los eventos El Niño. Estas condiciones secas durante los eventos El Niño tienden a reforzarse cuando además se observan condiciones más frías de lo normal en el Atlántico Tropical Norte, durante el primer pico de la estación lluviosa (mayo-junio, Alfaro, Hidalgo & Mora, 2016), el veranillo (julio-agosto, Maldonado *et al.* 2016) y el segundo pico de la estación lluviosa (setiembre-octubre, Maldonado, Alfaro, Fallas & Alvarado, 2013).

4. Conclusiones

La metodología empleada permitió la caracterización del veranillo en una de las principales cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, a saber, río Tempisque, con problemas en la gestión del recurso hídrico. Los eventos del veranillo tienden a iniciar a principios de julio, con mínimos ubicados alrededor del 21 de julio y finalizando generalmente en los primeros quince días de agosto. En la cuenca del Tempisque estos eventos duraron alrededor de 45 días, con

precipitaciones promedio asociadas de 6,6 mm día⁻¹ y 2,7 mm de lluvia en sus mínimos.

Ninguna de las series asociadas con la caracterización del veranillo en este trabajo, mostró una tendencia estadísticamente significativa. El análisis de Tablas de Contingencia mostró que el escenario seco (BN) es el más probable para condiciones cálidas (BN) del índice AMO-Niño 3.4 (en junio), mientras que los eventos menos severos del veranillo, agrupados en la categoría (AN), son más probables cuando se asocian con anomalías positivas (AN) del índice AMO-Niño 3.4 (en junio). En ambos casos, los escenarios seco y húmedo fueron muy poco probables cuando se observaron condiciones de anomalías positivas y negativas en el índice AMO-Niño 3.4, respectivamente.

Por medio del uso de modelos *logit*, se pueden realizar escenarios de probabilidad sobre las condiciones BN, N y AN de la intensidad y magnitud del veranillo, dada una anomalía observada en el índice AMO-Niño 3.4 en el mes de junio. Los modelos ajustados mostraron que el escenario más probable para anomalías negativas (positivas) en el índice AMO-Niño 3.4 es el BN (AN) en la intensidad y magnitud del veranillo. Al observarse la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del *veranillo* en el mes de julio, estos resultados tienen potencial de uso en predicción estacional y los resultados de las Tablas de Contingencia, concuerdan con lo anterior. Sin embargo, para fines de trabajo operativo junio puede presentar algunos inconvenientes en su uso como predictor ya que por lo general los índices AMO y Niño 3.4 pueden estar disponibles una o hasta dos semanas después de finalizado el mes junio, eso quiere decir que los índices de junio podrían estar listos precisamente cuando ya se está registrando el evento del veranillo. Adicionalmente, en los casos en que efectivamente el mínimo (magnitud) se registra en julio, la intensidad puede comenzar en junio o con mayor frecuencia a principios de julio. Lo anterior no invalida el hecho de

que la relación encontrada en este estudio sea predictiva, pero dados los problemas señalados en su uso operacional, se podría explorar el uso de un esquema de prognosis perfecta (Wilks 2011), en donde se puede usar pronósticos para el mes de junio de la TSM para calcular los índices y de esta manera establecer una relación con los aspectos del veranillo estudiados. Nótese que aun así la relación también tiene un uso potencial en diagnóstico.

Se observó que la vertiente del Pacífico es la que reporta mayor cantidad de impactos asociados a déficit de lluvia, junto con temperaturas por encima del promedio cuando se observan condiciones cálidas en el Pacífico ecuatorial del Este y frías en el Atlántico Tropical Norte. Esta información, junto con los modelos predictivos elaborados, podría ayudar en el manejo y prevención de sectores socioeconómicos claves en la cuenca del río Tempisque, como lo son la agricultura (por ejemplo el sector arrocerero) y el suministro de agua potable para zonas residenciales y hoteleras.

Los resultados obtenidos mostraron, que la producción de arroz tiende a estar igual o por encima de su mediana cuando el veranillo no es tan severo y que durante los veranillos severos la producción nacional de arroz se observó por debajo su mediana. Sin embargo, varios cuidados se deben tomar en cuenta al analizar los resultados ya que la producción nacional de arroz es una medida acumulativa de todo un año y que el efecto del veranillo es por uno o dos meses, en función del mismo ciclo fenológico del arroz. Las fechas de siembra se dan aproximadamente en agosto, cuando podría haber pasado lo más severo del veranillo. Además, en el dato de producción anual, se está considerando en la producción nacional el aporte del arroz con riego que no necesariamente es afectado por el veranillo. Por último, en el cálculo de producción se incluyen zonas arroceras fuera de Guanacaste, como en el Pacífico Central-Sur, Caribe Norte y Zona Norte; donde el veranillo es más débil o inexistente. Debido a lo anterior,

los resultados mostrados en la figura 3 podrían más bien indicar que existe un efecto modulador de las lluvias sobre Costa Rica, que impacta una región más amplia que Guanacaste y que esta relación AMO-Niño 3.4 podría estar modulando además las condiciones de precipitación previas al veranillo (e.g. Alfaro *et al.* 2016) y/o posteriores al mismo (Maldonado *et al.* 2013).

Si bien es cierto, el entendimiento de las amenazas climáticas y la elaboración de un pronóstico para el veranillo contribuiría a la planificación de sectores clave, como el arrocerero en Guanacaste, Retana *et al.* (2014) hacen notar, que otras variables además de la climática, deben ser tomadas en cuenta, ya que el rendimiento de un cultivo no depende totalmente del factor clima. Son una serie de variables las que intervienen como son: suelo, genética, manejo, plagas, enfermedades, entre otras. Se ha observado por ejemplo, que sólo el 20% de la variabilidad en los rendimientos de arroz de secano en Guanacaste puede ser explicado por la precipitación y que no todos los eventos cálidos del ENOS producen el mismo efecto. Otro ejemplo es que la intensidad del veranillo explica solo 14% de la variabilidad de la producción de arroz en la figura 3.

5. Agradecimientos

Se agradece a los siguientes proyectos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica que suministraron tiempo y recursos: 805-B7-507, B6-143 (apoyados por VI-UCR y CONICIT-MICITT), B7-286 (apoyado por UCREA), B4-227, B0-065, A9-532 (apoyado por CSUCA-ASDI), A4-906 (PESCTMA-CIGEFI) y B0-810. Gracias a Paula Pérez, Elsie Troyo, Aarón Vega y Francisco Jiménez, por su ayuda con el procesamiento de la información. Los datos de las estaciones usadas fueron suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) y por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

6. Referencias

- Agresti, A. (2002): *Categorical data analysis* (2da Ed.). John Wiley & Sons, United States of America.
- Alfaro, E. J. (2002). Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 9, 88-103.
- Alfaro, E. J. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*. 62(4), 1-15.
- Alfaro, E.; Hidalgo, H. & Mora, N. (2016). Prediction of MJ rainfall season using CCA models. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 15(2), 5-19.
- Alfaro, E. y 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.
- Alfaro, E., Soley, J. y Enfield, D. (2003). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas* (Use of a Contingency Table for Climatic Applications). Guayaquil, Ecuador: ESPOL/ FUNDESPOL.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G. & Magaña, V.O. (2006). Atmospheric forcing in the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 101-142.
- Amador, J.; Durán-Quesada, A.; Rivera, E.; Mora, G.; Sáenz, F.; Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part II: seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *Revista de Biología Tropical*. 64, S23–S57.
- Enfield, D.B.; A.M. Mestas-Núñez & P.J. Trimble (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. 28, 2077-2080.
- Fallas-López, B. & Alfaro, E. (2012): Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista de Climatología*. 12, 61-79.
- García-Solera, I. & Ramírez, P. (2012). *Central America's Seasonal Climate Outlook Forum*. The Climate Services Partnership, 8 pp. Recuperado de: http://www.climate-services.org/sites/default/files/CRRH_Case_Study.pdf.
- Hernández, K. y Fernández, W. (2015). Estudio de la evaporación para el cálculo del inicio y la conclusión de la época seca y lluviosa en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 14, 18–26.
- Herrera, E.; Magaña, V. & Caetano, E. (2015). Air-sea interactions and dynamical processes associated with the midsummer drought. *International Journal of Climatology*. 35, 1569–1578. doi:10.1002/joc.4077.
- Karnauskas, K.B.; Giannini, A.; Seager, R. & Busalacchi, A.J. (2013). A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America. *Atmósfera*. 26, 261–281.
- Magaña, V.O.; Amador, J.A. & Medina, S. (1999). The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 12, 1577-1588.
- Maldonado, T.; Alfaro, E.; Fallas, B. & Alvarado, L. (2013). Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*. 33, 41-52.
- Maldonado, T.; Rutgersson, A.; Alfaro, E.; Amador, J. & Claremar, B. (2016). Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures. *Advances in Geosciences*, 42, 35-50. doi: 10.5194/adgeo-42-35-2016.

- Mantua, N.J.; Hare S.R.; Zhang Y.; Wallace J.M. & Francis R.C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78, 1069-1079.
- Ramírez, P. (1983). *Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica*. Informe Técnico. Nota de investigación No 5. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Retana, J. (1999). *Posibles efectos de la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur en la agricultura en la agricultura de Costa Rica. Un análisis cualitativo de las estadísticas de producción agropecuaria*. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Retana, J. & Solano, J. (2000). *Relación entre las inundaciones en la cuenca del Tempisque el fenómeno de la Niña y los rendimientos de arroz de secano en Guanacaste*. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Retana, J.; Villalobos, R.; Alvarado, L.; Sanabria, N. y Córdoba, J. (2014). *Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica: granos básicos*. En Tercera Comunicación Nacional. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica.
- Solano, E. (2015). *Análisis del comportamiento de los períodos caniculares en Costa Rica en algunas cuencas del Pacífico Norte y del Valle Central entre los años 1981 y 2010*. Tesis de Grado. Licenciatura. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Soley, F.J. (1994). Suavizamiento de series cronológicas geofísicas con ruido blanco y rojo aditivo. *Revista. Geofísica*. 41, 33-58.
- Torrence, C. & Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79, 61-78.
- Villalobos, R. (2001). Impacto del fenómeno El Niño sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 8(1), 19-25.
- Waylen, P. & Quesada, M. (2002). *The Effect of Atlantic and Pacific Sea Surface Temperatures on the Mid-summer Drought of Costa Rica*. En *Environmental Change and Water Sustainability*. J.M. García-Ruiz, J.A.A.A. Jones and J. Arnáez, editors. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza, España.
- Wilks, D.S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3ra. Ed.). San Diego, California: Academic Press.