

EVALUACIÓN DE LA OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN EN LA PREDICCIÓN DE NIVELES DE PRECIPITACIÓN DE LA COSTA ECUATORIANA

ASSESSMENT OF THE MADDEN-JULIAN OSCILLATION IN THE PREDICTION OF PRECIPITATION LEVELS OF THE ECUADORIAN COAST

Michele Trickey¹, M. Pilar Cornejo-Grunauer², Jonathan Cedeño²

Resumen

Continuando con el esfuerzo de mejorar el pronóstico estadístico de precipitación estacional en la costa sudamericana, datos mensuales de precipitación de tres regiones costeras del Ecuador (provenientes del producto GPCC Full Data Reanalysis Version 3) fueron analizados para ver su comportamiento con respecto a nuevos índices predictores. El análisis, que permitiría una estimación más consistente de los niveles estacionales de precipitación, se realizó con el programa WFCC/WTC distribuido por NOAA-OGP/UCR. Los índices predictores fueron basados en combinaciones lineales de la TSM promedio de la región Niño 3 y del índice de oscilación Madden-Julian (OMJ). Los resultados sugieren que los índices propuestos no mejorarían el esquema de predicción estacional ya existente, ya que los resultados estadísticamente más fuertes permiten pronosticar adecuadamente tan sólo el final de la estación lluviosa, los cuales tienen una utilidad limitada. Se sugiere que el mejoramiento moderado que se observó en dichos pronósticos resulta de la interferencia entre la señal del Niño 3 y efectos rezagados de la subsidencia asociada con la OMJ. Además, el método de análisis probado, el cual fue automatizado durante el presente estudio, se ha mostrado efectivo, facilitando evaluaciones futuras del esquema propuesto.

Palabras clave: Oscilación Madden-Julian, índices Niño, ENOS, probabilidad de lluvias, precipitación, Ecuador.

Abstract

In a continuation of the effort to improve statistical forecasting of seasonal rainfall along the South American coast, monthly precipitation data in three coastal regions of Ecuador (taken from the GPCC Full Data Reanalysis Version 3) were analyzed to see their response to new predictive indices. The analysis, which was meant to permit a more consistent estimation of seasonal levels of precipitation, was conducted using the WFCC/WTC program distributed by NOAA-OGP/UCR. The predictive indices were based on linear combinations of the Niño 3 regionally averaged SST and the Madden-Julian Oscillation (MJO) index. The results suggest that the proposed indices do not improve current seasonal predictions because strong statistical results were only obtained for forecasts at the end of the rainy season, when they are least useful. We suggest that the moderate improvements observed result from interference between the Niño 3 signal and the lagged effects of the subsidence associated with the MJO. The method of analysis used, which was automated through this study, has proven effective, simplifying future investigations of the proposed schema.

Keywords: Madden-Julian oscillation, Niño indexes, ENSO, rain probability, precipitation, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

La predicción estacional de lluvias a partir de modelos estadísticos y físicos es importante en el Ecuador tanto por sus potenciales aplicaciones agrícolas y de prevención en sectores estratégicos (e.g., energía hidráulica), como por sus otras implicaciones antropogénicas. Sin embargo, tal predicción sigue siendo imperfecta por la multiplicidad de factores que influyen en el clima del país. Se sabe que el ciclo ENOS está fuertemente ligado a la variabilidad interanual en el clima de la costa ecuatoriana. Sin embargo, su señal solamente explica una cierta fracción de la variación en precipitación (Rossel, 1997). Por lo tanto,

este estudio propone apoyar la búsqueda de nuevos predictores estadísticos, los cuales permitirán estimar consistentemente el campo de niveles estacionales de precipitación en la costa ecuatoriana. Este tipo de pronóstico estadístico sigue siendo importante en el sistema de predicción del país, debido a la baja resolución espacio-temporal de los modelos físicos (Coelho *et al.*, 2005; Martínez *et al.* 2008).

Siguiendo el esquema propuesto por Enfield *et al.*, 2003, se define los niveles de cualquier variable por terciles. En un año "alto de lo normal" (AN), el valor de la variable fue mayor a su valor en dos tercios de los años en el registro histórico. En un año "dentro de lo normal" (DN), el valor fue mayor al valor en un

¹ Department of Physics, Yale University. P.O. Box 208120. New Haven, CT, U.S.A. 06280-8120.

² Centro de Agua y Desarrollo Sustentable CADS, Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL., Guayaquil, Ecuador.

Artículo enviado el 7 de agosto de 2009

Artículo aceptado el 23 de diciembre de 2009

tercio de los años del registro. De la misma manera, la precipitación en los años que se denominan "bajo de lo normal" (BN) tiene un valor que equivale a 1/3 o menos del promedio histórico.

Entre los índices del Niño típicamente utilizados para pronóstico estadístico en el Ecuador, los primeros en ser desarrollados fueron los índices Niño. Éstos corresponden a anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) entre latitudes/longitudes determinadas del océano Pacífico, entre 5°N y 5°S. Entre todos los índices Niño, el Niño 3 (correspondiente a la TSM entre 90° - 150°W y 5°N - 5°S), ha sido identificado como el mejor predictor de eventos extremos de la precipitación para la región costera de Ecuador (Cedeño *et al.*, 2006).

Mientras tanto, estudios recientes indican que la adición del índice de Oscilación Madden-Julian (OMJ) al Niño1+2 mejora su correlación con niveles de precipitación en Guayaquil (Nieto, 2007). Esta oscilación, que tiene un periodo de 30-60 días (Madden y Julian, 1971), está marcada, en parte, por un aumento en la temperatura del mar. Por eso, tiene una influencia directa en los patrones de precipitación en la zona tropical entre 40°E y 120°W a través de células de convección (Donald *et al.*, 2006). A pesar de que las células no alcanzan la costa ecuatoriana, las variaciones en la OMJ, a través de una respuesta radiada de ondas Kelvin, afectan efectivamente al Ecuador (Zavala-Garay *et al.*, 2005). Aunque estudios previos indicaron que la fase y amplitud de esta oscilación no tiene un impacto directo en la precipitación al este de 140°W (Waliser *et al.*, 2003), otros trabajos más recientes sugieren que la OMJ sí puede tener efectos indirectos en la precipitación de la costa ecuatoriana (Donald *et al.*, 2006). Por lo tanto, los nuevos predictores evaluados en este estudio se basaron en una combinación del índice Niño 3 (el mejor predictor actual) y la OMJ.

Para reflejar la diversidad de los regímenes pluviométricos en el litoral, y para mejorar la utilidad práctica de lo analizado, el estudio se enfocará en tres regiones costeras: Chone, Guayaquil, Machala y sus cercanías, ubicadas en las provincias de Manabí, Guayas, y El Oro, respectivamente (Figura 1).

Chone, en el norte, está rodeado por las estribaciones de la cordillera costera. Guayaquil en cambio está situado al nivel del mar, en la cabecera del río Guayas. Machala, más al sur, está localizado entre las estribaciones de la cordillera de los Andes en el este y el canal de Jambelí (estuario externo del río Guayas) en el oeste. Las diferencias orográficas de las tres regiones las hacen útiles para la investigación de predicción climática a lo largo de una costa con un clima bastante variable. Además, las tres regiones representan intereses estratégicos para el Ecuador, siendo importantes centros de población, economía, agricultura y acuicultura.

Bajo estas condiciones, el objetivo principal de la presente investigación es evaluar si existe un índi-

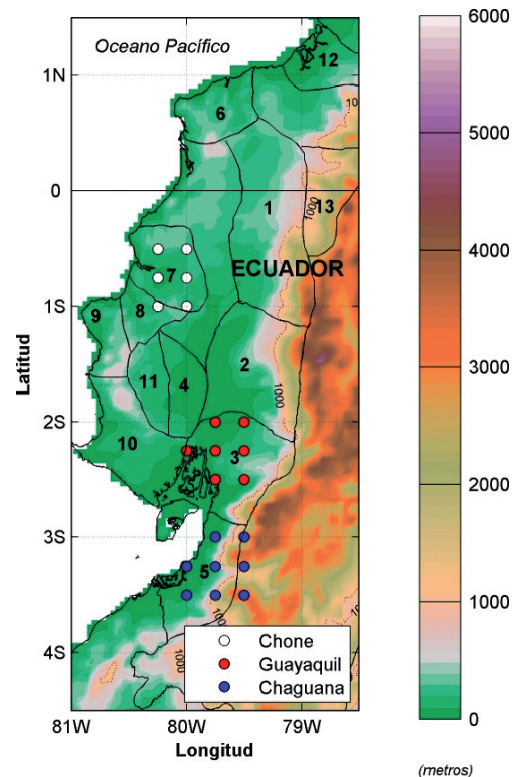


Figura 1. Zonas de precipitación homogénea, de acuerdo a Rossel *et al.*, 1998; y ubicación de los puntos de grilla usados en este estudio, de los cuales se extrajeron los datos de precipitación del producto GPCC.

ce que combine OMJ y Niño 3 que pueda mejorar la predicción de niveles de precipitación estacionales en localidades en la costa del Ecuador con orografía variable.

DATOS

Para la evaluación propuesta, se eligieron 22 series de tiempo de precipitación mensual que cubren tres regiones de la costa ecuatoriana (Chone, Guayaquil y Chaguana, Figura 2). Las regiones de variabilidad homogénea de precipitación en la costa ecuatoriana fueron definidas por Rossel (1998). Se obtuvieron las series del producto de precipitación GPCC Full Data Reanalysis Version 3 (Global Precipitation Climatology Center, Rudolf y Schneider, 2005). Se las interpoló linealmente a una resolución de 0.25° y se las validó con respecto a datos observados de la red de estaciones meteorológicas (Cedeño, 2008 y Cedeño y Cornejo-Grunauer, 2008). Estas series de tiempo corresponden a las variables dependientes en el esquema de análisis del WFCC y WTC, descrito más adelante.

Como variables independientes (predictores), se definió cinco índices en base a combinaciones lineales entre el índice Niño 3 y una variante de la OMJ, llamada desde ahora el índice-base OMJ. Debido a que la serie de tiempo base de la OMJ disponible

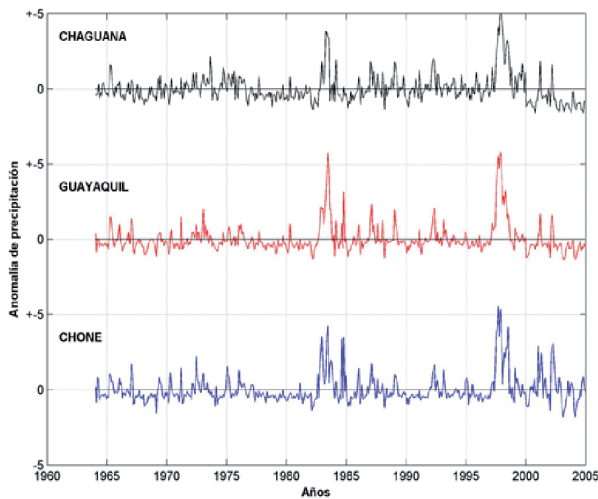


Figura 2. Vectores regionales de anomalías de precipitación correspondientes a las regiones Chone, Guayaquil y Chaguana.

desde el Buró de Meteorología de Australia (BoM) comienza en medios del 1974, y que las series de tiempo del GPCC vencen a fines del 2004, el período de evaluación fue definido entre los años de 1975-2004 (Figura 3).

El cálculo del índice-base OMJ se basó en la serie de tiempo de amplitud diaria de la OMJ desarrolla-

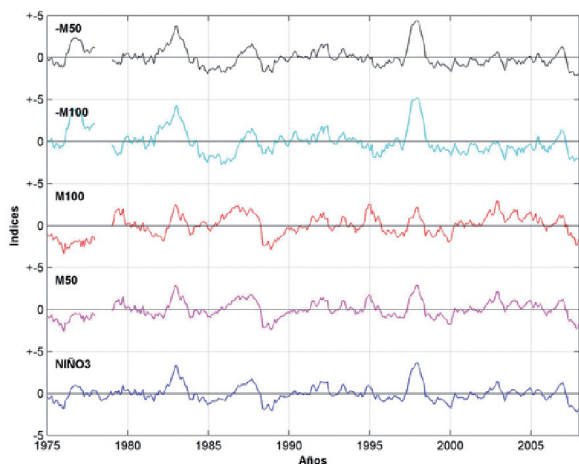


Figura 3. Índices climáticos utilizados como variables independientes.

do por Wheeler y Hendon (2004) y distribuida por el BoM. Esta amplitud es una medida de la intensidad de las dos primeras funciones empíricas ortogonales de variación en tres variables relacionadas con la OMJ, expresadas como índices multivariados RMM1 y RMM2. Se entiende que el valor de la amplitud de la OMJ tiene su máximo cuando hay una señal fuerte de la OMJ en algún sitio entre África y el Pacífico Oeste.

Para crear el índice-base de OMJ, se sumó para cada periodo mensual la amplitud diaria-cuadrada

de la OMJ, extrayendo luego las anomalías mensuales respectivas de estos valores según las siguientes expresiones:

$$s_{mes} = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (1) \quad m = \frac{s_{mes} - \overline{s_{mes}}}{\sigma_{mes}} \quad (2)$$

en donde a_i es la amplitud diaria del OMJ, n es el número de días en el mes indicado, σ_{mes} es la desviación estándar de los valores s del mes indicado, y m son los valores mensuales del índice-base OMJ. La derivación de este índice-base de OMJ se explica debido a que fue necesario convertir los datos diarios de la OMJ a mensuales, ya que existía la limitación de uso de series de tiempo de precipitación con frecuencia mensual para su análisis. Además, es la energía de la oscilación la que mide su impacto relativo en el comportamiento del océano y clima.

Los índices que se definió como variables independientes son definidos según las siguientes fórmulas (Tabla 1):

Tabla 1. Índices usados como variables independientes

Nombre de la variante	Formulación	Código design.
Niño 3	TSM promedio para el área de 150°W-90°W y 10°S-10°N.	Niño 3
Niño 3 y 100% OMJ	Niño 3 + OMJ	M100
Niño 3 y 50% OMJ	Niño 3 + 0.5*OMJ	M50
Niño 3 menos OMJ	Niño 3 - OMJ	-M100
Niño 3 menos 50% OMJ	Niño 3 - 0.5*OMJ	-M50

METODOLOGÍA

El programa EXEVER

El programa EXEVER (Alfaro *et al.*, 2002) permite realizar pronósticos estacionales de variables meteorológicas como precipitación, usando la teoría de los terciles. Para pronóstico en la costa de Ecuador usando índices del Pacífico central, su horizonte de pronóstico óptimo es de tres meses. El EXEVER contiene dos módulos desarrollados bajo ambiente MATLAB. La primera, denominada WFCC, permite calcular una Función de Correlación Cruzada (FCC) entre dos series de tiempo usando medias corridas (promedios móviles), basadas en el promedio normalizado de los productos de varianzas para varios rezagos, en donde se interpreta que para rezagos

negativos la variable independiente antecede a la variable dependiente:

$$c_{xy}[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} \frac{(x_i[t] - \bar{x})(y_i[t+k] - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$

en donde \bar{x} y \bar{y} son las medias muestrales; σ_x y σ_y son las desviaciones estándares de las series x y y de los variables independientes y dependientes, respectivamente, y k es el rezago elegido entre las series de tiempo.

El WFCC, además, calcula los niveles de confianza (90% y 95%) de este factor de correlación cruzada, definiéndolos como 1.645σ y 2.0σ , mientras σ^2 es el valor esperado del FCC en el caso de que los variables son ambos aleatorios y no correlacionados (Alfaro *et al.*, 2002). Un valor del FCC mayor de estos niveles de confianza permite rechazar la hipótesis que las series de tiempo no están correlacionadas.

El segundo módulo del EXEVER es el WTC, el cual construye la tabla de contingencia entre dos variables, además de calcular otros estadísticos que permiten evaluar el grado de asociación entre dos variables que se suponen correlacionadas positivamente o negativamente en el tiempo. Dado que el WTC fue desarrollado como herramienta para hacer pronóstico climático estacional, la utilidad práctica de sus salidas es una medida importante de la utilidad de nuevos predictores.

El cálculo de las tablas de contingencia toma como datos de partida los promedios móviles estacionales de las variables dependientes e independientes obtenidos desde el WFCC, los cuales son categorizadas en terciles: “bajo lo normal” (el tercio más bajo), “dentro del normal” (el tercio que contiene la mediana de los datos), y “alto de lo normal” (el tercio más alto). Después, despliega en forma de tabla el porcentaje de valores independientes de cada tercio que corresponden a años (1) bajo la normal (BN), (2) dentro de lo normal (DN), y (3) alto de lo normal (AN) de cada año (Figura 3). Cada observación tiene que pertenecer a una sola categoría (excluyentes) y las tres categorías agotan todas las posibilidades dentro de la “muestra” o conjunto de observaciones tomadas (Alfaro *et al.*, 2002).

Esta tabla ha sido útil en el pronóstico de niveles de lluvia porque permite extrapolar el patrón que existe entre dos series de tiempo hasta el año actual. Por ejemplo, si en los últimos años, se ve por la tabla de contingencia que un año con índice X bajo del normal, hay probabilidad de 55% de lluvias BN, 30% de lluvias DN, y 15% de lluvias AN, entonces se puede decir que las probabilidades de lluvias de cada nivel en el año actual son los mismos. La tabla de contingencia para esta extrapolación debe tener como

base unas series de tiempo de por lo menos 30 años, el periodo aceptado en climatología para la búsqueda de tendencias entre datos mensuales.

En el caso en que las variables no están correlacionadas, se espera que cada valor de la tabla sea de 33%, porque un tercio de los valores bajos de la variable independiente caerá en años BN de la variable dependiente, un tercio en años DN de la variable dependiente, y un tercio en años AN. En el caso de que las series de tiempo tengan una correlación positiva, se esperaría que los valores de la diagonal que va desde el extremo izquierdo superior al extremo derecha inferior sean altos. Exactamente lo opuesto – valores altos en la diagonal que discurre desde la izquierda a la derecha – se esperaría en el caso en que las series de tiempo tienen una correlación negativa.

Para medir el grado de divergencia entre las frecuencias observadas y esperadas (en base a la tabla de contingencia), el WTC también calcula el estadístico chi-cuadrado (χ^2), que permite evaluar que tanto se aleja una tabla de contingencia del caso aleatorio:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{(f_{ij} - 0.33)^2}{0.33} \quad (4)$$

El WTC también provee el nivel de significación del χ^2 , es decir, la probabilidad de que este valor no podría salir en el caso aleatorio, a partir de la distribución de valores posibles del χ^2 .

Sin embargo, el valor de χ^2 no indica el tipo de patrón encontrado en la tabla. Se pueden encontrar valores altos valores de χ^2 tanto en altas correlaciones (positiva y negativa), como en casos que no representan correlaciones como tales, pero que sí se desvían del esquema aleatorio esperado. Por eso, el χ^2 sirve solamente como medida de la utilidad de una tabla de contingencia cuando otros valores (de las diagonales y del FCC) también han sido analizados.

El Uso del Programa

El EXEVER, es decir, los programas WTC y WFCC, están construidas para correr aparte del ambiente de MATLAB. Sin embargo, también se incluye las rutinas correspondientes en lenguaje MATLAB. Esto permitió automatizar el proceso de obtención del FCC y de la tabla de contingencia, con las respectivas medidas de significación, para siete periodos temporales en cada data punto. Las variables independientes correspondieron a los promedios móviles de valores de tres meses de los índices climáticos, y las variables dependientes, a los promedios móviles de precipitación de los siguientes tres meses por punto de grilla. Los periodos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Periodos de evaluación de pronóstico

Meses del índice	Meses de precipitación
julio-agosto-septiembre (JAS)	octubre-noviembre-diciembre (OND)
agosto-septiembre-octubre (ASO)	noviembre-diciembre-enero (NDE)
septiembre-octubre-noviembre (SON)	diciembre-enero-febrero (DEF)
octubre-noviembre-diciembre (OND)	enero-febrero-marzo (EFM)
noviembre-diciembre-enero (NDE)	febrero-marzo-abril (FMA)
diciembre-enero-febrero (DEF)	marzo-abril-mayo (MAM)
enero-febrero-marzo (EFM)	abril-mayo-junio (AMJ)

Se eligió estos siete periodos porque la época lluviosa empieza en diciembre o enero y termina en abril o mayo. Por eso, la utilidad de un índice climático en predecir niveles de lluvia está determinada por su nivel de acierto en pronóstico para periodos que incluyen los meses entre diciembre y junio. Entre los periodos que solamente incluyen o uno o dos de estos meses, OND, NDE, y AMJ fueron incluidos, pero no MJJ. Esto se debió a que la utilidad de un pronóstico se basa más en predecir una estación cuando no ha empezado o apenas empezó, que en predecir las lluvias al final de la estación, las cuales normalmente siguen el patrón de inicio de la estación.

Métodos de Análisis

Para establecer la tasa de aciertos de los índices, en las tres localidades, para cada periodo mensual, se dividió el problema en dos partes: Primero se obtuvo un porcentaje de aciertos de la correlación cruzada para cada periodo, en cada localidad. Esto es el porcentaje de los puntos de grilla para cada localidad que tenían, en el periodo mensual elegido, un FCC que sobrepasó el nivel de significación 95%. De esta manera se seleccionó los índices que por lo menos tenían un nivel alto de correlación con las lluvias en años extremos (porque los años extremos pesan más en el FCC). Esto es el factor más importante en un predictor. Sin embargo, no mide su valor en la mayoría de los años, los cuales caen dentro de una desviación estándar del promedio. La segunda y más estricta medida, para medir el valor del pronóstico en años no extremos, fue el porcentaje de los puntos de grilla de cada localidad que lograron un alto nivel de significación del FCC, valores de significación de χ^2 superior al 80% y valores iguales o mayores de 33% en la diagonal de la tabla de con-

tingencia que transcurre de izquierda a la derecha. Esto permitió seleccionar los casos más distintos del caso aleatorio (por el χ^2) que tenían también la marca de correlación positiva (por la diagonal alta).

RESULTADOS

Los niveles de correlación fueron destacadamente mejores para periodos en que los meses pronosticados eran más secos, siendo el mejor pronóstico encontrado para el periodo EFM AMJ. Además, hubo correlaciones más altas en Machala que en Guayaquil, y en Guayaquil que en Chone. El índice M100 tuvo el desempeño más bajo de todos y, en algunas instancias, para pronosticar periodos relativamente secos, los índices M50, -M100, y -M50 sí lograron mejorar el pronóstico, encontrándose valores asociados altos de χ^2 y de la diagonal de la tabla de contingencia. Sin embargo, en términos generales el índice -M100 tuvo el mayor éxito en los pronósticos, por lo cual enfocaremos los resultados de sus salidas en este análisis.

Los índices Niño 3 y -M100 no lograron alcanzar un nivel de significación del FCC superior al 95% para los periodos SON DEF, OND EFM, y NDE FMA. Es decir, no correlaciones altas entre los índices y las series de tiempo de precipitación para los periodos en los cuales los tres meses pronosticados se situaron completamente dentro de la estación lluviosa. En Chone, los dos índices tampoco alcanzaron dicho nivel de significación para el periodo DEF MAM (Tabla 3).

En contraste, en cada punto de grilla de las tres regiones, el índice -M100 alcanzó un nivel de significación del FCC de 95% para los periodos JAS OND, ASO NDE, y EFM AMJ. Es decir, el factor de correlación cruzada entre índice y precipitación se mantuvo alto para los periodos en que por lo menos la mitad de la época pronosticada está dentro de la estación seca. Además, en Guayaquil y Chone, -M100 alcanzó los niveles referidos en todos los puntos de grilla para el periodo DEF MAM; no así Niño 3, que no consiguió tal nivel de significancia en al menos la mitad de puntos de grilla que conforman cada región.

En cuanto a valores altos del χ^2 y de la diagonal que correspondieron con valores altos del FCC, solamente se encontraron siete casos en que Niño 3 logró los tres aciertos en por lo menos uno de los puntos de grilla de la región.

En Guayaquil y Chaguana, -M100 alcanzó valores altos del χ^2 y de la diagonal en todos los puntos de grilla en el periodo de pronóstico EFM AMJ, mejorando la tasa de aciertos de Niño 3 por un punto en Guayaquil y tres en Chaguana. Dicho índice también tuvo una tasa de valores superiores al 75% durante DEF MAM en Chaguana.

Lo que más destacó fue la ausencia de niveles significativos altos de χ^2 y la diagonal para los periodos SON DEF, OND EFM, y NDE FMA, lo que se reflejó

también valores bajos de la FCC en aquellos periodos. Es decir, el pronóstico falló para los meses más lluviosos del año por cuanto sus niveles de FCC se mantuvieron bajos.

DISCUSIÓN

Los nuevos índices evaluados no sirvieron para mejorar consistentemente las perspectivas climáticas en comparación con los pronósticos estacionales ya existentes (mayormente basados en índices TSM). Sin embargo, la inclusión de la OMJ mejoró los pronósticos para el fin de la época lluviosa, sugiriendo que, por combinar nuevos índices con Niño 3, quizá se puede acercar a pronósticos cada vez más anticipados a la estación lluviosa. ¿Cómo se puede explicar este resultado?

Cuando la amplitud de la OMJ está alta, el índice -M100 tienen valores más bajos que Niño 3. Usualmente, esta señal trae niveles más bajos de lluvias. Asimismo, una amplitud baja de la OMJ hace que, en los índices -M100, la señal de Niño 3 aparezca más fuerte, lo cual normalmente trae niveles altos de precipitación. Este esquema es consistente con la observación de que, durante fenómenos El Niño, la amplitud de la OMJ es tan baja que apenas es notable. Esto también explicaría por qué los índices en estudio mejoraron la predicción al final de la estación lluviosa en Guayaquil y Chaguana, regiones en las cuales el clima se ve muy influenciado por lo que sucede en el mar circundante. En años Niño, la baja amplitud de la OMJ causaría que los índices restantes tengan valores altos, prolongando e intensificando la señal normalmente asociada con lluvias – consistente con los efectos de El Niño. Exactamente lo contrario ocurriría en años Niña: la señal de la OMJ sería normal o alto, o bajando o no afectando la señal

de Niño 3 al restar – consistente con la observación que, en los años Niña, a veces hay sequía y a veces no. Sin embargo, este esquema es muy simplificado, y no incluye los efectos de la fase de la OMJ (sólo su magnitud). Pero podría confirmar el supuesto patrón de OMJ en años Niño, y daría la flexibilidad necesaria para explicar el clima en años Niña.

¿Cuál sería el modo físico por el cual se den estos efectos? Se pensaría que una amplitud alta de la OMJ bien podría predecir niveles bajos de lluvias; no obstante, sería la causa de ondas Kelvin más fuertes, que llevarían más calor a la costa – consistente con el efecto opuesto (un incremento en la cantidad de lluvias). Lo opuesto se aplica para amplitudes bajas. La explicación más probable de esta aparente paradoja es que el valor del índice OMJ tres meses antes de los valores de precipitación no es el mismo que indica el periodo de la OMJ en el cual está afectando la costa durante el periodo de predicción. Por sus distintas fases, los efectos de la OMJ y los efectos de Niño no llegan a la costa al mismo tiempo. Entonces, un valor alto del índice OMJ podría corresponder a un valor más bajo de la respuesta oceánica a la OMJ llegando a la costa. Sin datos de precipitación de una frecuencia de por lo menos 20 días -- necesarios para resolver una oscilación de aproximadamente 40 días – no se puede determinar adecuadamente estos efectos. Lastimosamente, las series de tiempo de la mayoría de los índices no tienen esa resolución.

La explicación propuesta motiva varias preguntas en cuanto a la relación entre la OMJ y ENOS. Por ejemplo, la amplitud de la OMJ normalmente tiene un máximo en el verano boreal, haciendo inverosímil que la influencia de la OMJ se vea reflejada en el pronóstico cuando los meses de los índices pertenecen al invierno boreal. Esta inconsistencia quizá sea

Tabla 3. Correlaciones en Chone, Guayaquil, y Chaguana para Niño3 (N) y -M100 (M). Porcentaje de (1) factores de correlación cruzada altos (alcanzando 95% significación) y (2) FCCs altos combinados con un X² y diagonal alto para los cinco índices y los seis puntos de grilla cerca de Chone

Periodo Mensual	% de puntos con N.S. alto (95%)						% con FCC, X ² , y diagonal alto					
	Chone		Guayaquil		Chaguana		Chone		Guayaquil		Chaguana	
	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M
JAS OND	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00
ASO NDE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.00	0.86	0.00	0.13	0.13
SON DEF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OND EFM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NDE FMA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEF MAM	0.00	0.00	0.29	1.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.13	0.75
EFM AMJ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.17	0.86	1.00	0.63	1.00

debida a que la variabilidad estacional de la OMJ es más evidente en el Pacífico oeste que este (Zhang, 2005). También queda irresuelto cómo influyen otras fluctuaciones climáticas. La OMJ empezó a tener más influencia en el ciclo ENOS a partir de los noventa, cuando cambió la fase de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) desde su fase fría a la fase cálida (Barnett *et al.*, 1999). Reconociendo este problema, sin embargo tuvimos que escoger la inclusión de datos de ambas fases de la ODP para alcanzar el periodo de 30 años requisito para estudios climatológicos estacionales. Es evidente que el efecto de la ODP requiere más investigación.

Los resultados también tienen varias indicaciones interesantes aparte de su utilidad inmediata en pronóstico. En Chone, la falta de valores altos de χ^2 y el diagonal en EFM AMJ, aún cuando aparecen en Guayaquil y Chone, es consistente con la hipótesis que el clima de Chone no se explica por forzamiento remoto.

Además, la respuesta no homogénea de las regiones pluviométricas utilizadas en el estudio a los índices (habían instancias en las cuales la mitad de los puntos respondió a un índice, y la otra mitad no) atrae dudas en cuanto al esquema de regionalización definida por Rossel *et al.* (1998) para la costa ecuatoriana.

En cuanto al método de análisis utilizado, la automatización de los programas WTC y WFCC en MATLAB se comprobó como efectivo, facilitando en un futuro cercano la resolución de la multitud de preguntas dejadas abiertas por este y por otros estudios climáticos de la región.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue realizada con el soporte de la beca "Thomas C. Barry", la Universidad de Yale, y la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL.

REFERENCIAS

Alfaro E., F. Soley y D. Enfield (2002). Guía para el uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas. Ed. por FUNDESPOL-ESPOL, Guayaquil.

Barnett, T. P., D.W. Pierce, M. Latif, D. Dommengot y R. Saravanan (1999). Interdecadal Interactions Between the Tropics and Mid-Latitudes in the Pacific Basin. *Geophys. Res. Lett.* 26, 615-618.

Cedeño J. y M.P. Cornejo-Grunauer, 2008. Evaluation of Three Precipitation Products on Ecuadorian Coast. Presented as Poster at 3rd World Climate Research Program WCRP International Conference on Reanalyses, Tokyo, Japan. January 2008.

-----, 2008. Validación de Tres Productos de Precipitación en la Costa Ecuatoriana. Tesis de Grado de Oceanografía. FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

-----, T. De la Cuadra, K. Abata, M.A. Merizalde y M.P. Cornejo-Grunauer, 2006. Diagnóstico de Probabilidades de Lluvia Asociados a Eventos del Ciclo ENOS en la Costa Ecuatoriana. In: *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (Proceedings of 5th FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 369-374.

Coelho C.A.S. y D.B. Stephenson, 2005. Toward an Integrated Seasonal Forecasting System for South America. *J. Climate*, 19(15), 3704-3721.

Cornejo-Grunauer M.P., 1999. Variaciones Estacionales e Interanuales de la Climatología en la Zona Costera del Ecuador. Reporte Téc. FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

Donald A., H. Meinke, B. Power, A. de H.N. Maia, M.C. Wheeler, N. White, R.C. Stone y J. Ribbe (2006). Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.

Enfield D., E. Alfaro y J. Soley, 2003. Principios de Pronósticos Climáticos Estadísticos. Presentación Oral en el 3^{er} Foro de Perspectivas Climáticas de la Costa Oeste del Pacífico Sur (COF3-WCSA). Guayaquil, Ecuador, noviembre 2003.

Madden, R.A., y P. R. Julian, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* 28, 702-708.

---- y ----, 1994. Observations of the 40-50-Day Tropical Oscillation-A Review. *Mon. Wea. Rev.* 122(5), 814-837.

Martínez R., Á.G. Muñoz y M. Paredes, 2008. Progress on Seasonal Prediction in the Andean Region. Oral Presentation at 4th Alexander von Humboldt International Conference, The Andes: Challenge for Geosciences. Santiago de Chile, Chile, November 2008.

Nieto J., 2007. Modelo de Regresión Lineal Múltiple para Determinar Influencias del Índice Niño 1+2 y la MJO sobre las Precipitaciones en Guayaquil durante Enero-Febrero-Marzo y Abril. *Acta Oceanográfico del Pacífico* 14(1), 25-30.

Rossel F., 1997. Influencia de El Niño sobre los Regímenes Hidro-Pluviométricos del Ecuador. Serie Inundaciones y Sequías INSEQ, INAMHI-ORSTOM, Volumen 18, Tomos 1, 2 y 3.

Rossel F., R. Mejía, G. Ontaneda, R. Pombosa, J. Roura, P. Le Goulven, E. Cadier y R. Calvez, 1998. Régionalisation de l'influence du Niño sur les précipitations de l'Equateur. *Bull. Inst. Fr. Études Andines* 27(3), 819-827.

Rudolf B. y U. Schneider, 2005. Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using

in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey October 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.

Silva G., 1992. Análisis de la Variabilidad Climática de la Zona Costera Ecuatoriana utilizando Componentes Principales. Tesis de Grado de Oceanografía, FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

Vuille M, RS Bradley, F. Keimig, 2000. Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *J. Climate* 13(14), 2520-2535.

Waliser D.E., K. M. Lau, W. Stern, y C. Jones, 2003. Potential Predictability of the Madden-Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84, 33-50.

Wheeler M. y H. Hendon, 2004. An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index; Development of an Index for Monitoring and Prediction. *M. Weather Rev.* 132, 1917-1932.

Zavala-Garay J., C. Zhang, A.M. Moore y R. Kleeman, 2005. The Linear Response of ENSO to the Madden-Julian Oscillation. *J. Climate* 18(13), 2441-2459.

Zhang C., 2005. Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.* 43, RG2003, doi: 10.1029/2004RG000158.