

INFLUENCIA DE LA SST EN EL CAUDAL DE ECUADOR PARA LA ESTACIÓN HÚMEDA.

César QUISHPE-VÁSQUEZ, Sonia Raquel GÁMIZ-FORTIS,
Yolanda CASTRO-DÍEZ, María Jesús ESTEBAN-PARRA
Dpto. Física Aplicada, Universidad de Granada
cesarqv@correo.ugr.es

RESUMEN

Este estudio analiza la influencia de la SST del Pacífico tropical en la variabilidad del caudal en los ríos ecuatorianos para la temporada que presenta caudal máximo (de febrero a abril, FMA), durante el período 1979-2015. En primer lugar, se utilizó la pendiente de Sen para estimar las tendencias de los caudales en los meses de febrero, marzo y abril en 45 estaciones de medición ubicadas en diferentes cuencas en Ecuador, mientras que la significación estadística de estas tendencias se evaluó mediante la prueba de Mann-Kendall. Adicionalmente, mediante la técnica de descomposición en valores singulares (SVD) se han analizado los principales patrones de variabilidad acoplados entre la SST de invierno (de diciembre a febrero, DEF) del Pacífico tropical y el caudal de FMA. Los resultados muestran la existencia de dos modos principales acoplados, el primero asociado con El Niño canónico y el segundo con EL Niño Modoki. Este último parece ejercer una gran influencia sobre el caudal de FMA en la mayoría de ríos del Ecuador, mientras que el patrón asociado con El Niño tradicional resulta menos relevante. Los resultados derivados de este estudio podrían ayudar a la gestión de los recursos hídricos en Ecuador.

Palabras clave: Caudal, estación húmeda, SST, El Niño, El Niño Modoki, SVD.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of the tropical Pacific SST on the streamflow variability in the Ecuadorian rivers for the season presenting maximum streamflow (February to April, FMA), for the period 1979-2015. Firstly, the Sen's slope method was used to estimate the streamflow trends at 45 gauging stations on different basins in Ecuador, meanwhile the statistical significance of these trends was evaluated using the Mann-Kendall test. We apply the technique of singular value decomposition (SVD) to find the main coupled variability patterns between the SST and the streamflow. The results show the existence of two main coupled modes, the first associated with the canonical El Niño and the second one with EL Niño Modoki. This latter seems to exert a major influence over the FMA streamflow over most Ecuador, meanwhile the pattern associated with the traditional El Niño is less relevant. The results derived from this study could help for the management of water resources in Ecuador.

Key words: streamflow, wet season, SST, Niño Modoki, SVD.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han iniciado esfuerzos en Ecuador enfocados al estudio de la variabilidad climática y el análisis de la influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) en el comportamiento de las variables meteorológicas, como la precipitación y la temperatura (Tobar y Wyseure, 2018; Morán-Tejada et al., 2016). El clima de Ecuador se ve afectado por factores muy diversos como su ubicación alrededor de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la influencia del Océano Pacífico, la advección de humedad de la Cuenca del Amazonas y la compleja topografía de la Cordillera de los Andes (Rossel, 1999). Así, la distribución estacional de las precipitaciones en Ecuador, junto con la topografía andina, los tipos de suelo y la cobertura terrestre determinan la disponibilidad de recursos hídricos en el país (Tobar y Wyseure, 2018). Todos estos factores, junto con la disponibilidad de datos climáticos recientemente recuperados y proporcionados por los organismos competentes, hacen que el estudio de las tendencias y variabilidad climáticas en Ecuador sea particularmente interesante (Morán-Tejada et al., 2016).

Usualmente Ecuador se divide en cuatro regiones naturales: la costa, los Andes, el Amazonas y las Galápagos (Rossel, 1999). La costa ecuatoriana está significativamente influenciada por las corrientes oceánicas, siendo una región clave del fenómeno ENSO (Rasmusson y Carpenter, 1982). Se han llevado a cabo varias investigaciones sobre la extensión de la influencia ENSO hacia el interior del país (Rossel et al., 1999; Bendix et al., 2000; Morán-Tejada et al., 2016; Campozano et al., 2016). En general, todos los estudios mostraron que las anomalías positivas de precipitación durante el ENSO afectan principalmente desde la planicie costera de Ecuador hasta la vertiente occidental de los Andes. Rossel y Cadier (2009) encontraron que el relieve de los Andes corresponde al límite de la influencia positiva del ENSO. Sin embargo, no hay una explicación clara de hasta qué punto en los Andes se perciben los efectos del ENSO (Vuille et al., 2000; Morán-Tejada et al., 2016).

Por lo tanto, es necesario el análisis de la transición de la influencia del ENSO sobre los recursos hídricos ecuatorianos desde la planicie costera hacia la cordillera de los Andes (Pineda et al., 2013). Para esto, la mayoría de los estudios llevados a cabo hasta ahora utilizan diferentes índices de teleconexión de El Niño. Sin embargo, no existe acuerdo entre la comunidad científica sobre qué índice capta mejor los eventos ENSO (Hanley et al., 2003) o cuál es el que más afecta a todo el territorio (Tobar y Wyseure, 2018; Morán-Tejada et al., 2016). Además, la mayoría de los estudios analizan la precipitación de áreas particulares de Ecuador (Rossel y Cadier, 2009; Guenni et al., 2017; Pineda et al., 2013) o se centran en el estudio de correlaciones con índices específicos de El Niño. Los índices de teleconexión más utilizados son El Niño 1+2, El Niño 3.4, El Niño 3 o El Niño 4 (Tobar and Wyseure, 2018; Morán-Tejada et al., 2016; Vicente-Serrano et al., 2017), aunque otros, como el índice de Oscilación del Sur (SOI) o el índice multivariado ENSO (MEI) (Villar et al., 2009) también han sido utilizados. Sin embargo, recientemente, para regiones cercanas a Ecuador, algunos trabajos han mostrado la fuerte influencia sobre la precipitación de El Niño Modoki (ENM, Ashok et al., 2007; Tedeschi et al., 2013; Córdoba-Machado et al., 2015a, 2015b).

Por lo tanto, para lograr una mejor comprensión de la relación entre el ENSO y los recursos hídricos en Ecuador, se debe considerar toda la SST del Pacífico tropical. Esta información podría ayudar a mitigar tanto las inundaciones como los desastres procedentes de situaciones de sequía en Ecuador.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS.

Ecuador está ubicado en el noroeste de América del Sur, entre Perú y Colombia, dentro de la franja [1.58°N-3.48°S, 75.28-81.08°W]. Los datos analizados del caudal se obtuvieron del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). De aproximadamente 200 estaciones automáticas activas con series temporales de caudal mensual, solo se consideraron aquellas con un máximo del 15% de datos faltantes y con una duración de más de 39 años consecutivos. Se obtuvieron así un total de 45 series mensuales de caudal distribuidas por todo el país, para el período 1979-2015 (Figura 1).

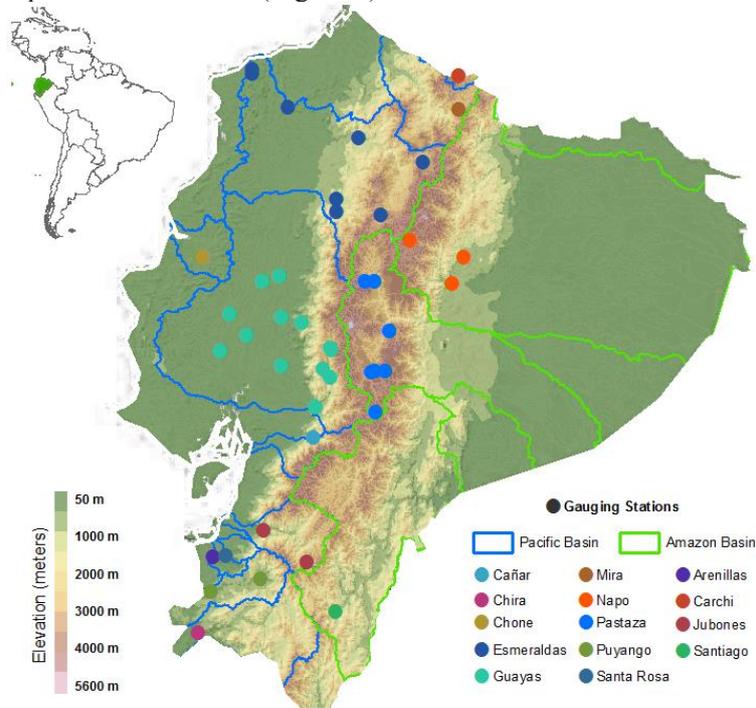


Figura 1. Ubicación de Ecuador que muestra el área de estudio, elevación y distribución espacial de las estaciones hidrológicas analizadas.

El relleno de los datos faltantes se llevó a cabo utilizando el paquete R Amelia II (Honaker et al., 2011), que realiza imputaciones creando múltiples rellenos del conjunto de datos incompletos. Se consideraron 5 imputaciones para la estimación de los valores faltantes totales para las series de caudales.

Como se puede ver en la Figura 1, Ecuador está atravesado por la cadena montañosa de los Andes, lo que le da al país una topografía compleja y una variedad de climas regionales. Además, su posición geográfica, alrededor de la línea ecuatorial y cerca

del Océano Pacífico, define los regímenes hidrológicos de los caudales ecuatorianos (Vuille et al., 2000). El ciclo anual de precipitación sobre Ecuador está controlado en gran medida por la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Sierra et al., 2015), que produce patrones de precipitación bimodal o unimodal sobre regiones específicas.

Tradicionalmente, tres regiones distintas caracterizan el territorio continental en términos de precipitación (Rossel et al., 1999): la costa, las tierras altas o Sierra, y las tierras bajas interiores orientales (la parte alta del río Amazonas), con la estación húmeda ocurriendo de diciembre a mayo (contando con 80% de la lluvia anual), y la estación seca de junio a noviembre.

Tobar y Wyserure (2018) analizaron los patrones de precipitación estacional y su distribución espacial para Ecuador, estableciendo para la zona amazónica una clasificación de precipitación uniforme, con lluvias más intensas que generalmente ocurren en julio y agosto, mientras que las regiones de la costa y la zona de Sierra de la parte pacífica presentan una estacionalidad más fuerte, con máximas precipitaciones en los meses de febrero a abril.

La Figura 2 muestra los ciclos anuales del caudal para dos estaciones representativas de la región costera de Ecuador y la zona correspondiente a la ladera Pacífica de los Andes. Como puede verse, ambas series temporales alcanzan los picos máximos de caudal durante los meses de febrero a abril, por lo que en el análisis de la variabilidad estacional del caudal se consideró el promedio de los meses febrero-marzo-abril (FMA).

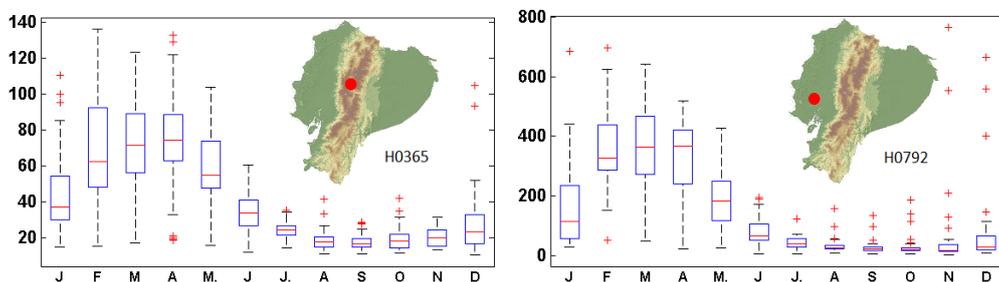


Figura 2. Representación de los ciclos anuales típicos de los caudales en dos estaciones localizadas en la región andina pacífica y costera de Ecuador. Las unidades son m^3s^{-1} .

Como variable predictora se ha utilizado la SST del Pacífico tropical, cubriendo el área $[120^{\circ}E-78.5^{\circ}W, 30^{\circ}S-25.5^{\circ}N]$, tomada del conjunto de datos HadISSTv1.1 (Rayner et al., 2003) procedentes del Centro Hadley para la Predicción e Investigación del Clima (Oficina Meteorológica de Reino Unido). A partir de ella se ha generado la SST estacional de invierno (mediante el promedio de los meses de diciembre-enero-febrero, DEF).

Se han utilizado también los índices típicos de teleconexión asociados con el fenómeno ENSO, obtenidos de la NOAA, que son: El Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4 y el SOI. Además, se utilizaron otros índices compuestos: el índice ENSO multivariable (MEI) obtenido de seis variables relacionadas con el nivel del mar, los vientos, la SST, la temperatura del aire y la nubosidad; el índice Trans-Niño (TNI) y

el índice El Niño Modoki (Ashok et al., 2007), ambos relacionados con los gradientes longitudinales de la SST en el Pacífico tropical, y este último considerado recientemente como un factor clave que impacta sobre la variabilidad de la precipitación en algunas áreas de Sudamérica (Grimm y Tedeschi et al., 2009; Córdoba-Machado et al., 2015a, 2015b, 2016).

3. METODOLOGÍA

En este estudio, las tendencias en las series de caudal para los meses de febrero, marzo y abril, se han calculado utilizando el método no paramétrico de Sen (Sen, 1968). La significación estadística de las tendencias estimadas se evaluó utilizando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) a un nivel de significación del 95% frente a la hipótesis nula de no existencia de tendencia.

Con el fin de evaluar la influencia de la SST del Pacífico tropical en los caudales de Ecuador, sin limitarnos a las regiones asociadas con los índices de teleconexión, se ha aplicado el método de descomposición en valores singulares (SVD) a la SST estacional de DEF y al caudal de FMA. Este método analiza la covariabilidad casi-coetánea entre los patrones de variabilidad de la SST del Pacífico tropical y el caudal de Ecuador durante la estación húmeda. La técnica SVD es una generalización del procedimiento de diagonalización que se realiza en el Análisis de Componentes Principales para matrices que no son cuadradas o simétricas.

La correlación entre la serie temporal de los coeficientes de expansión de cada variable, denominada fuerza relativa del acoplamiento (SF), mide la intensidad de la relación entre ellas, indicando qué tan fuertemente se relacionan los patrones acoplados. El mapa de correlación heterogéneo representa los coeficientes de correlación entre los valores de las series de caudal estacional en cada punto y los coeficientes de expansión de la SST. Una explicación más detallada de la técnica se puede encontrar en Björnsson y Venegas (1997). Como ya se ha mencionado, la técnica SVD se aplicó a valores casi-coetáneos para la estación húmeda (DEF de la SST y FMA del caudal). La selección de este promedio estacional para la SST se debe a que los episodios del ENSO a menudo suceden en DEF, pudiendo haberse disipado significativamente para FMA (Recalde-Coronel et al., 2014).

4. RESULTADOS

4.1 Tendencia del caudal

Los resultados del análisis de tendencias del caudal para los meses de febrero, marzo y abril se muestran en la Figura 3.

4.2 Modos de variabilidad acoplados SST-caudal casi coetáneos

Se realizó un análisis SVD de la SST de DEF del Pacífico tropical y los caudales de FMA de Ecuador. Este análisis reveló que el primer modo significativo de la SST corresponde al fenómeno tradicional de El Niño (Figura 4, columna superior izquierda), caracterizado por altas anomalías positivas de la SST en el Pacífico oriental y anomalías débiles negativas en el Pacífico occidental. La Tabla 3 y la Figura 5 muestran la correlación entre los coeficientes de expansión de los modos de

la SST de DEF y los índices de teleconexión asociados con el fenómeno de El Niño. Las correlaciones significativas más altas con los coeficientes de expansión del primer modo de la SST aparecen con los índices más comunes de El Niño: 0.97 con El Niño 3 y El Niño 3.4, -0.87 con el SOI y 0.83 con El Niño 1+2 y El Niño 4. A partir de un análisis de la correlación móvil (Figura 5) se puede concluir que estas correlaciones se mantuvieron estables durante todo el período de análisis 1979-2015. El primer modo de la SST es capaz de explicar el 35.4% de la fracción de covarianza cuadrada entre la SST de DEF y el caudal de FMA, con una correlación entre los campos de 0.77. El mapa de correlación heterogéneo asociado a este modo SST (Figura 4, fila central izquierda), muestra un número importante de estaciones con correlaciones positivas significativas a lo largo de la costa y correlaciones negativas en los Andes.

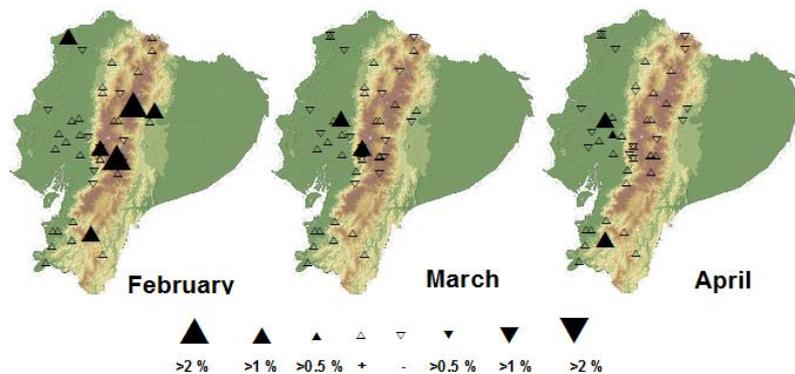


Figura 3. Tendencias del caudal para los meses de febrero, marzo y abril, para el período 1979-2015, en porcentaje respecto al promedio del caudal. La significación de la tendencia dada por la prueba de Mann-Kendall está marcada por triángulos sólidos (para un nivel de confianza del 95%).

El segundo modo acoplado de la SST (Figura 4, columna superior derecha) que explica el 25.2% de la fracción de covarianza cuadrada entre la SST y el caudal, mostró un fuerte acoplamiento, presentando una correlación entre los coeficientes de expansión de ambos campos de 0.78. El patrón espacial de la SST asociado a este segundo modo es similar al modo asociado con El Niño Modoki (Ashok et al., 2007). Este, muestra una estructura en forma de boomerang que presenta un núcleo de valores positivos de la SST en el Océano Pacífico central, rodeado de anomalías negativas de SST sobre el Océano Pacífico oriental y occidental. De la Tabla 3, se puede observar que este modo de la SST presenta los mayores valores de correlación con los índices asociados con ENM (-0.92 con el TNI y 0.85 con el índice ENM), y pasando también el test de estabilidad de dichas correlaciones (Figura 5b). Sin embargo, los índices más tradicionales de El Niño presentan correlaciones no estables con este segundo modo. El mapa de correlación heterogénea del caudal en Ecuador muestra correlaciones negativas generalizadas sobre la costa y los Andes, lo que indica una clara disminución del caudal durante la ocurrencia de eventos ENM.

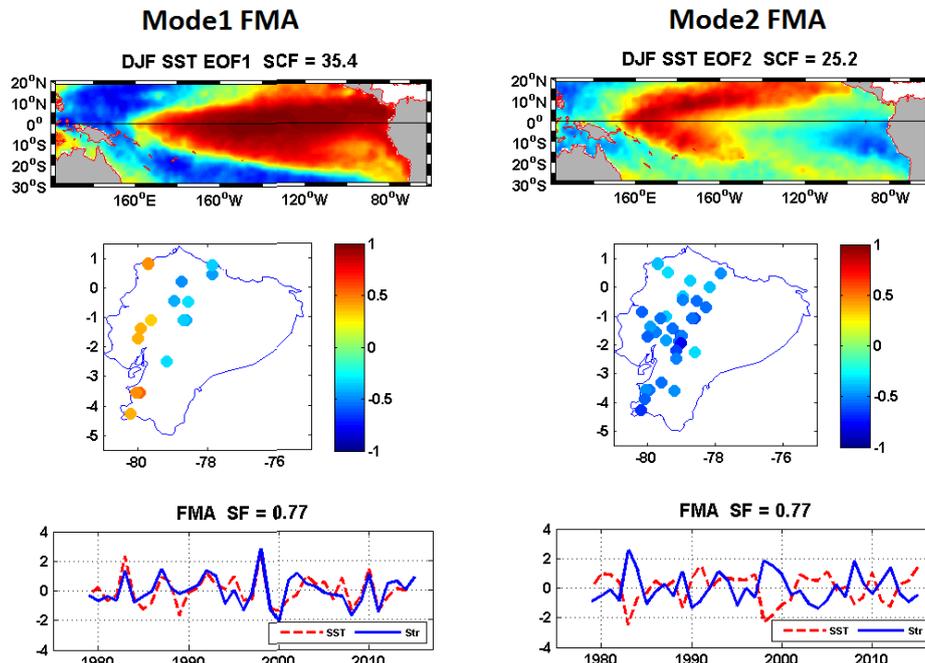


Figura 4. Modos principales de la SST de DEF (arriba), mapas de correlación heterogéneos (centro) y series de los coeficientes de expansión estandarizados (abajo) de la SST (rojo) y el caudal (azul), determinados por el análisis SVD entre los campos cuasi coetáneo de la SST de DEF del Pacífico tropical y el caudal de FMA en Ecuador, durante el periodo 1979-2015. Para los mapas heterogéneos, solo se muestran valores significativos al 95% de nivel de confianza.

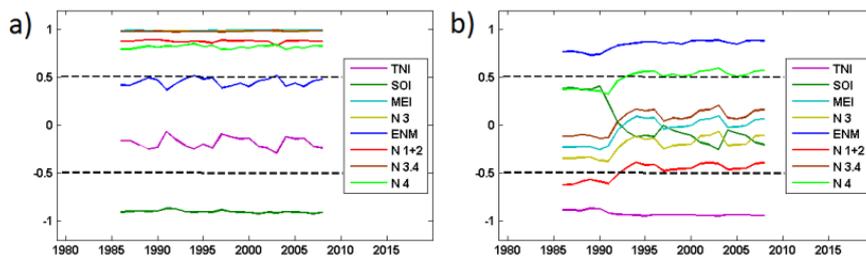


Figura 5. Correlaciones móviles (ventana de 15 años) entre las series de los coeficientes de expansión estandarizados de: a) el primer modo de la SST, y b) el segundo modo de la SST, y los diferentes índices de teleconexión asociados al fenómeno de El Niño. Las líneas discontinuas representan los umbrales del nivel de confianza del 95%.

	TNI	SOI	MEI	Niño 3	ENMI	Niño 1+2	Niño 3.4	Niño 4
Modo 1 SST DEF	-0.32	- 0.87	0.96	0.97	0.53	0.83	0.97	0.83
Modo 2 SST DEF	-0.92	-0.1	0.08	-0.1	0.85	-0.42	0.16	0.57

Tabla 3. Valores de correlación entre los índices de El Niño y las dos series de los coeficientes de expansión de la SST de DEF del Pacífico Tropical para el periodo 1979-2015. Los valores de correlación significativos al nivel de confianza del 95% se muestran en negrita.

5. CONCLUSIONES

Este estudio presenta una evaluación sobre la variabilidad espacio-temporal de los caudales en Ecuador en la estación húmeda, para el período 1979-2015. Para ello, en primer lugar, se analizaron las tendencias del caudal para los meses de febrero, marzo y abril. En segundo lugar, se examinaron las relaciones casi-coetáneas entre la SST del Pacífico tropical en invierno (DEF) y el caudal de FMA en el país.

A partir de los datos disponibles, se pueden distinguir dos regiones bien diferenciadas: la costa y la región andina del Pacífico. Para la región de la Amazonía Andina, solo unas pocas estaciones están disponibles y se encontraron tendencias no significativas en la mayoría de los meses analizados. El área de los Andes es la región que muestra las tendencias positivas significativas más altas, alcanzando pendientes superiores al 2% en febrero. La región de costa, muestra pocas tendencias significativas.

Con el fin de examinar la habilidad de la SST de DEF para predecir el caudal de FMA en Ecuador, se realizó un análisis de la variabilidad acoplada entre los campos mediante SVD. El primer modo de la SST de DEF encontrado se asocia con el fenómeno de El Niño canónico. Los valores de correlación más altos, estables en el tiempo, entre las series de expansión de este modo y los índices de teleconexión se encontraron con los índices de El Niño 3 y El Niño 3.4. Este modo de la SST presenta correlaciones positivas significativas con el caudal de FMA en la región costera, mientras que algunas correlaciones negativas aparecieron en las montañas andinas. Este resultado está de acuerdo con los reportados por Recalde-Coronel et al. (2014), quienes analizaron la predictibilidad de las precipitaciones de FMA en la costa y el Ecuador andino. Encontraron un patrón espacial similar de acoplamiento SST-precipitación que describe los efectos del ENSO canónico en el Pacífico tropical oriental sobre la precipitación en la línea costera de Ecuador, mientras que algunas estaciones en el noreste de los Andes mostraron una respuesta de lluvia opuesta. Del mismo modo, Morán-Tejada et al. (2016) también encontraron correlaciones positivas significativas entre el índice El Niño 1+2 y las precipitaciones de estaciones ubicadas cerca de la costa, mientras que encontraron correlaciones negativas entre El Niño 3.4 y las estaciones en los Andes.

El segundo modo acoplado de la SST de DEF, presenta un patrón espacial asociado con El Niño Modoki. Solo los índices de teleconexión de El Niño, que tienen en

cuenta el gradiente de temperatura entre el Pacífico tropical oriental y occidental, presentaron correlaciones significativas y estables con este segundo modo de la SST. Aunque ambos modos SST presentan una fuerza de acoplamiento similar (alrededor de 0.77) con sus correspondientes modos del caudal en FMA, los mapas de correlación heterogéneos revelaron que este segundo modo de la SST mostró una relación más amplia con la variabilidad del caudal que el fenómeno de El Niño canónico, presentando correlaciones negativas significativas generalizadas con las anomalías del caudal de FMA en la costa y los Andes del Pacífico en Ecuador. Esto indica que durante los eventos ENM se registra una disminución significativa en el caudal de FMA en todo el país.

Cabe señalar que la influencia encontrada para los eventos canónicos de El Niño de DEF en el caudal de FMA fue mucho más limitada, con solo algunas localidades mostrando correlaciones significativas. Para el área costera, se encuentra incluso una respuesta opuesta del caudal a la ocurrencia de estos dos tipos de eventos ENSO. Algunos autores han analizado la influencia del fenómeno de El Niño canónico sobre la precipitación en Ecuador (Morán-Tejada et al., 2016; Recalde-Coronel et al., 2014; Villar et al., 2009), identificando características que generalmente están de acuerdo con los resultados de este estudio. Sin embargo, ningún estudio, aparte de este, analiza el impacto de El Niño Modoki en los recursos hídricos de Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2013-48539-R y CGL2017-89836-R (MINECO-Spain, FEDER). La base de datos de caudal ha sido amablemente proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador.

REFERENCIAS

- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H.Y., Yamagata, T., 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res. Oceans* 112(C11), 27. <https://doi.org/10.1029/2006jc003798>
- Bendix, J., 2000. Precipitation dynamics in Ecuador and northern Peru during the 1991/92 El Niño: a remote sensing perspective. *Int. J. Remote Sens.* 21(3), 533-548. <https://doi.org/10.1080/014311600210731>
- Björnsson, H., Venegas, S.A., 1997. A manual of EOF and SVD analysis of climatic data. CCGCR Report No. 97-1. McGill University, Montreal, Québec, 52 pp.
- Campozano, L., Celleri, R., Trachte, K., Bendix, J., Samaniego, E., 2016. Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Adv. Meteorol.* 15. <https://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., 2015a. Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global Planet. Change* 124, 41-61. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.00>

- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., 2015b. Influence of tropical Pacific SST on seasonal precipitation in Colombia: prediction using El Niño and El NiñoModoki. *Clim. Dynam.* 44(5-6), 1293-1310. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2232-3>
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., 2016. Seasonal streamflow prediction in Colombia using atmospheric and oceanic patterns. *J. Hydrol.* 538, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.003>
- deGuenni, L.B., García, M., 2017. Predicting monthly precipitation along coastal Ecuador: ENSO and transfer function models. *Theor. Appl. Climatol.* 129(3-4), 1059-1073. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1828-4>
- Grimm, A.M., Tedeschi, R.G., 2009. ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. *J. Climate* 22(7), 1589-1609. <https://doi.org/10.1175/2008jcli2429.1>
- Hanley, D.E., Bourassa, M.A., O'Brien, J.J., Smith, S.R., Spade, E.R., 2003. A quantitative evaluation of ENSO indices. *J. Climate* 16(8), 1249-1258. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1249:aqeoei>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:aqeoei>2.0.co;2)
- Honaker, J., King, G., Blackwell, M., 2011. Amelia II: A Program for Missing Data. *J. Stat. Softw.* 45(7), 1-47.
- Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London, 202 pp.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J., Aguilar, E., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, Vicente-Serrano, S., 2016. Climate trends and variability in Ecuador (1966-2011). *Int. J. Climatol.* 36(11), 3839-3855. <https://doi.org/10.1002/joc.4597>
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem, *Appl. Statist.*, 28(2)126-135.
- Pineda, L.E., Willems, P., 2016. Multisite Downscaling of Seasonal Predictions to Daily Rainfall Characteristics over Pacific-Andean River Basins in Ecuador and Peru Using a Nonhomogeneous Hidden Markov Model. *J. Hydrometeorol.* 17(2), 481-498. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-15-0040.1>
- Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H., 1982. Variations in tropical sea-surface temperature and surface wind fields associated with the southern oscillation EL-NIÑO. *Mon. Weather Rev.* 110(5), 354-384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:vitsst>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:vitsst>2.0.co;2)
- Rayner, N.A., Parker, D.E., 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res-Atmos.* 108(D14), 37. <https://doi.org/10.1029/2002jd002670>
- Recalde-Coronel, G.C., Barnston, A.G., Munoz, A.G., 2014. Predictability of December-April Rainfall in Coastal and Andean Ecuador. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 53(6), 1471-1493. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-13-0133.1>
- Rossel, F., Le Goulven, P., Cadier, E., 1999. Areal distribution of the influence of ENSO on the annual rainfall in Ecuador. *Rev. Sci. Eau.* 12(1)

- Rossel, F., Cadier, E., 2009. El Niño and prediction of anomalous monthly rainfalls in Ecuador. *Hydrol. Process.* 23(22), 3253-3260. <https://doi.org/10.1002/hyp.7401>
- Sen, P.K., 1968. Estimates of regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63(324), 1379-1389.
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Vieira, S.C., 2015. Precipitation over Northern South America and Its Seasonal Variability as Simulated by the CMIP5 Models. *Adv. Meteorol.* 22.
- Tedeschi, R.G., Cavalcanti, I.F.A., Grimm, A.M., 2013. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. *Int. J. Climatol.* 33(6), 1382-1400. <https://doi.org/10.1002/joc.3519>
- Tobar, V., Wyseure, G., 2018. Seasonal rainfall patterns classification, relationship to ENSO and rainfall trends in Ecuador. *Int. J. Climatol.* 38(4), 1808-1819.
- Vicente-Serrano, S.M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Kenawy, A.E., ... Nieto, R., 2017. The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. *Clim. Dynam.* 48(1-2), 405-427. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3082-y>
- Villar, J.C., Guyot, J.L., 2009. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004). *J. Hydrol.* 375(3-4), 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>
- Vuille, M., Bradley, R.S., Keimig, F., 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *J. Geophys. Res-Atmos.* 105(D10), 12447-12460. <https://doi.org/10.1029/2000jd900134>