

MECANISMOS CAUSALES DE LA VARIABILIDAD DEL CAUDAL DEL RÍO MAGDALENA

Samir CÓRDOBA-MACHADO^{1,2}, Reiner PALOMINO-LEMUS^{1,2},
Sonia Raquel GÁMIZ-FORTIS¹, Yolanda CASTRO-DÍEZ¹,
María Jesús ESTEBAN-PARRA¹

¹ *Applied Physics Department, University of Granada, Granada, Spain*

² *Technological University of Chocó, Colombia*

scordobam1@ugr.es, rpalomino@ugr.es, srgamiz@ugr.es, ycaastro@ugr.es, esteban@ugr.es

RESUMEN

En este trabajo se analiza la variabilidad estacional del caudal del río Magdalena. Este es el río de mayor importancia socio-económica en Colombia. Mediante un análisis de correlaciones empleando ventanas móviles de 30 años, se han identificado varias regiones con teleconexiones estables significativas entre las anomalías del caudal estacional (Qs) del río Magdalena y los campos de anomalías de Temperatura Superficial del Mar (SST), Precipitación (Pt) y Temperatura sobre la tierra (Tp), de estaciones precedentes, durante el periodo 1936-2009. Para los retrasos establecidos desde uno hasta cuatro estaciones, las anomalías de caudal estacional del río Magdalena presentan correlaciones estables significativas con diferentes regiones de los tres campos analizados. Para la SST, son destacables las regiones estables que se obtienen sobre el Pacífico tropical (región de El Niño) durante los retrasos de una y dos estaciones. En el caso de la Pt y la Tp, las regiones estables se ubican sobre el Norte de Sur América, principalmente para el retraso de una estación. En gran medida, las teleconexiones estables encontradas entre el caudal estacional del río Magdalena y los campos de anomalías de Pt y Tp están conducidas por el campo de SST. La identificación de estas regiones como teleconexiones estables significativas podría mejorar la predicción estacional del caudal del río Magdalena.

Palabras claves: Predicción del caudal estacional, SST del Pacífico tropical, El Niño, Río Magdalena, Colombia.

ABSTRACT

The seasonal variability of Magdalena river streamflow is analyzed. This is the river with the greatest socioeconomic importance on Colombia. Using a moving correlation analysis of 30 years, several regions that show stable significant teleconnections between the seasonal streamflow (Qs) of Magdalena River and Sea Surface Temperature (SST), Precipitation (Pt), and Temperature over land (Tp) seasonal anomalies from previous seasons, have been identified during the period 1936-2009. For the lags from one to four seasons, the Magdalena River seasonal streamflow presents significant and stable correlations with different regions of the three fields analyzed. For the SST, are remarkable the stable regions that are obtained over the tropical Pacific (El Niño region) during the lags of one and two seasons. In the Pt and Tp fields, the stable regions are found over the north of America of South, mainly with lags of one season. Largely stable teleconnections found between the Magdalena River seasonal streamflow and the anomaly fields of Tp and Pt are driven by the SST field. The identification of these regions as significant stable teleconnections could improve the seasonal prediction of the Magdalena River flow.

Keywords: Seasonal streamflow prediction, Tropical Pacific SST, El Niño, Magdalena River, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La predicción sobre distintas variables hydro-climáticas es de gran importancia para la planificación, uso, manejo y gerencia de los recursos naturales de un país, así como para la prevención y atención de desastres naturales producidos por las fases extremas de la variabilidad climática. El agua es un recurso vital para los seres humanos y para los ecosistemas naturales, y se ha establecido que cambios en el ciclo del agua entre la tierra, el mar y el aire pueden generar impactos significativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad a través de sus efectos sobre los recursos hídricos (Arnell, 1995).

Las condiciones océano-atmosféricas, son asociadas frecuentemente con variaciones en el caudal de los ríos vía variaciones en la precipitación, la temperatura y la humedad del suelo (Dettinger and Diaz, 2000; Poveda et al., 2001). El más importante fenómeno de acoplamiento océano-atmósfera es El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), con un patrón con anomalías positivas de SST sobre el este del Pacífico tropical acompañado de anomalías negativas de SST en el oeste (Rasmusson and Carpenter, 1982). Diversos estudios han demostrado la fuerte relación y la gran capacidad predictiva que tiene la variabilidad de la SST asociada al ENSO sobre las fluctuaciones del caudal de los ríos en varias regiones del mundo (Poveda, et al., 2011; Sahu et al., 2011; Ionita et al., 2008). Así, Chiew and McMahon (2002), revelan la importante habilidad que posee el ENSO para predecir el caudal de 581 ríos distribuidos en todo el mundo. Ward et al. (2010) determinan el impacto del ENSO sobre varios ríos en del planeta, encontrando que para los ríos estudiados, el ENSO tiene mayor impacto sobre el caudal anual.

En particular, la variabilidad asociada con el ENSO es el principal mecanismo de forzamiento de la hidro-climatología de Colombia (Poveda y Mesa, 1997), influenciando de forma directa el medioambiente, la sociedad y la economía del país (IDEAM, 2002). De acuerdo con Poveda (2004), en general, durante El Niño se presenta una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, así como una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal. Consistentemente se presenta un incremento en las temperaturas medias del aire. Todas estas anomalías hidro-climáticas presentan alguna variabilidad regional y temporal, y están asociadas con efectos adversos sobre la agricultura y la producción agropecuaria, la generación de energía eléctrica, el transporte fluvial, y muchos ecosistemas. En general, los efectos de El Niño son más fuertes y más inmediatos sobre el occidente que sobre el oriente del país. Durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales, con las consecuentes pérdidas de vidas humanas, infraestructura y cosechas agrícolas.

Dada la importante influencia que tiene el ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia, en este trabajo se exploran las posibles teleconexiones que presenta el caudal estacional del río Magdalena con los campos de la SST, Pt y Tp. Además, también se evalúa la capacidad predictiva que dichos campos poseen sobre el caudal estacional. De esta forma pueden establecer las bases para el desarrollo de esquemas de predicción a largo plazo del caudal del río Magdalena basados en estas variables.

El presente estudio se ha estructurado con el siguiente orden: en la Sección 2, se presentan los datos y la metodología; en la Sección 3, se muestran los resultados encontrados y finalmente en la Sección 4, las conclusiones más destacadas.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

El río Magdalena (RM) es considerado el más importante de Colombia (Fig. 1a), debido a que su área de influencia ocupa el 25% del territorio continental colombiano, donde habitan cerca de 32 millones de personas y se genera aproximadamente el 85% del Producto Interior Bruto nacional. El RM atraviesa el territorio colombiano de sur a norte en medio de la bifurcación oriental y central de la Cordillera de los Andes, con una longitud total aproximada de 1600 km, desde su nacimiento a 3685 m de elevación, en la parte suroccidental del país sobre el Páramo de las Papas (Macizo Colombiano), hasta su desembocadura en el Mar Caribe.

Las series mensuales de caudal han sido proporcionadas por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Inicialmente se seleccionaron tres estaciones sobre el cauce principal del RM (Fig. 1a) con registros continuos de más de 35 años y sin datos faltantes en las series. Las correlaciones entre la serie de caudal mensual (/estacional) de la estación 2 y las series mensuales (/estacionales) de las otras dos estaciones (1 y 3), durante el periodo en común (1972-2010), presentan valores superiores a 0.8, lo que indica la fuerte relación que presenta el caudal en estas localizaciones. Dada esta fuerte relación entre las series de caudal, la estación 2 (74.4°W-6.5°N), ha sido seleccionada como representativa por poseer el mayor número de registros continuos, cubriendo el periodo 1936-2010. La homogeneidad de la serie mensual de caudal en la estación 2, ha sido comprobada mediante el test no paramétrico de Pettitt (Pettitt, 1979).

El caudal del RM en la estación 2 presenta un marcado ciclo estacional, con un comportamiento de tipo bimodal (Fig. 1b). Los valores máximos se registran en los meses de Abril-Mayo-Junio (AMJ) y Octubre-Noviembre-Diciembre (OND), mientras que los valores mínimos se presentan durante los meses Enero-Febrero-Marzo (EFM) y Julio-Agosto-Septiembre (JAS), debido al doble paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ITCZ) sobre Colombia (Poveda, 2004). En base a esto se han establecido las series estacionales del caudal mediante el promedio de las series mensuales de EFM (invierno), AMJ (primavera), JAS (verano) y OND (otoño), respectivamente.

Como variables predictoras, se han utilizado las bases de datos mensuales de: temperatura de la superficie del mar (SST), obtenida del Hadley Centre (HadISST, Rayner et al., 2003); la precipitación global (Pt), proporcionada por el Global Precipitation Climatology Center (GPCC), Version 6 Total Full (Schneider et al., 2014) y la temperatura media sobre la tierra (Tp), obtenida de la Climatic Research Unit (CRU-TS.3.10, Harris et al., 2014).

La metodología utilizada consiste en el desarrollo de un esquema de predicción basado en el análisis de correlaciones, en el cual se emplean retrasos temporales de 1, 2, 3 y 4 estaciones (Lag_1, Lag_2, Lag_3 y Lag_4, respectivamente) entre las campos predictores (SST, Pt y Tp) y el Qs que se desea predecir, de tal forma que un retraso de 1 estación (Lag_1) indica la predicción del Qs con una estación de adelanto, y un retraso de 4 estaciones (Lag_4) se refiere a la predicción del Qs con un año de antelación. Esto permite encontrar las teleconexiones entre los campos de las anomalías de SST, Pt y Tp, determinadas sobre regiones identificadas como predictores significativos y estables (Ionita et al., 2008). Siguiendo a Ionita et al. (2008) y Gámiz-Fortis et al. (2010), para determinar las regiones de las variables predictoras que muestran teleconexiones estables, se calculan las correlaciones entre las anomalías estacionales del caudal y las anomalías estacionales de la SST, Pt y Tp global, para 44 ventanas móviles de 30 años (iniciando en 1936). La correlación es considerada estable para aquellos puntos de rejilla donde las anomalías estacionales del Qs y los campos predictores están correlacionados significativamente en un nivel del 90% ($r = 0.317$) o del 80% ($r = 0.246$), para más del 80% del total de las ventanas móviles de 30 años, cubriendo el periodo 1936-2009. Además, sólo son seleccionadas aquellas regiones que agrupan una superficie mayor o igual que 5° latitud x 5° longitud en el caso de la SST, 2.5° latitud x 2.5° longitud en

Pt y 5° latitud x 5° longitud para Tp, con el fin de eliminar las áreas menos relevantes que pudieran incluir relaciones espurias teniendo en cuenta la resolución de cada base de datos. Finalmente, para configurar los mapas de correlaciones estables a partir del análisis anterior se promedia el valor de las correlaciones en las 44 ventanas móviles de 30 años.

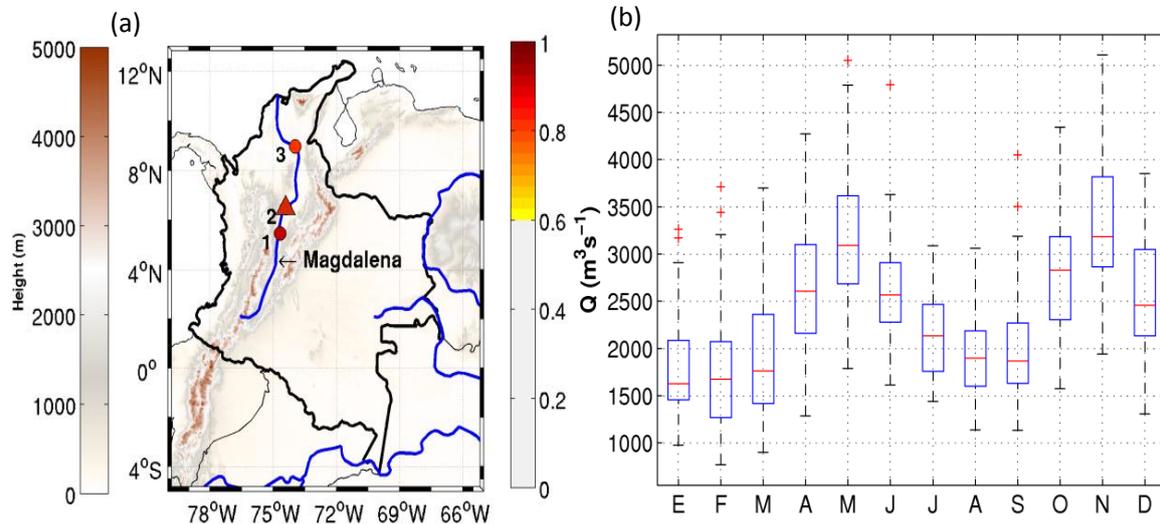


Fig. 1: (a) Localización de las estaciones de medida de caudal en el río Magdalena (Colombia). (b) Valores medios mensuales del caudal de la estación 2 en el periodo 1936-2010.

Una vez seleccionadas las regiones estables en los campos predictores, se aplica un Análisis de Componentes Principales (PCA) (Preisendorfer, 1988) sobre cada uno de los campos. Las primeras PCs obtenidas son evaluadas con los pasos anteriormente descritos con el fin de comprobar su significación y estabilidad. Las PCs que mantienen una correlación significativa y estable con el Qs, son consideradas como posibles predictores, representativos de los campos a los que se asocian, mientras que las regiones identificadas como significativas y estables están mostradas por los EOFs obtenidos del PCA. Para todos los análisis los niveles de significación estadísticas han sido calculados usando la prueba t de Student de dos colas.

3. RESULTADOS

3.1. Identificación de teleconexiones estables

Para mejor interpretación de los resultados en todas las figuras, las siglas de las estaciones del año correspondientes al campo predictor son denotadas con letras minúsculas (efm, amj, jas y ond), mientras que las siglas asignadas para el caudal estacional están en mayúsculas (EFM, AMJ, JAS y OND). El término (+1) al final de estas siglas (por ej. JEM+1) indica que el caudal estacional corresponde a la estación del año siguiente respecto al año del campo predictor. Además, para todos los paneles de las figuras, las columnas (de izquierda a derecha) corresponden a los retrasos establecidos entre el campo predictor y el Qs (Lag_1, Lag_2, Lag_3 y Lag_4). Además, los valores de correlación por encima del 90% (80%) del nivel de significación son mostrados dentro del contorno (fuera del contorno).

La Figura 2 muestra los mapas de correlaciones significativas y estables entre las anomalías del Qs y las anomalías de los campos predictores de SST (panel a), Pt (panel b) y Tp (panel

c). Para el caso de la SST (Fig. 2a), los retrasos a Lag_1 y Lag_2 presentan extensas regiones con correlaciones estables significativas (negativas y positivas) sobre el Océano Pacífico, siendo más marcada la relación encontrada entre la SST de otoño y el Qs del invierno siguiente (mapa ond_EFM+1, Lag_1), y menos relevantes las correlaciones entre la SST de invierno y el Qs del verano siguiente (mapa efm_JAS, Lag_2). El mapa de correlaciones estables entre la SST de otoño y el Qs de invierno (mapa ond_EFM+1, Lag_1) muestra un núcleo de fuertes correlaciones negativas que se extiende desde las costas de América hasta cubrir gran parte del Pacífico tropical central-oriental, bordeado por correlaciones positivas sobre el norte y el sur en el Pacífico occidental, configurando así, un patrón en forma de bumerang sobre el Océano Pacífico. Este patrón se muestra menos definido para las correlaciones durante las estaciones de AMJ, JAS y OND, a Lag_1, se debilita a Lag_2 y finalmente desaparece a Lag_3 y Lag_4. Este patrón de la SST envuelve las regiones del Pacífico tropical donde se desarrolla el fenómeno de El Niño (Rasmusson and Carpenter, 1982) y pone de manifiesto la importante relación que existe entre las anomalías de la SST sobre el Pacífico tropical y el Qs del RM. La SST estacional de varias regiones sobre los Océano Índico y Atlántico exhibe, en menor medida, correlaciones significativas estables con el Qs del RM, destacándose las correlaciones positivas (negativas) que se registran en el Océano Índico, mostradas en el mapa efm_EFM+1 a Lag_4 (ond_EFM+1, a Lag_1).

Las correlaciones significativas estables entre el Qs estacional y la Pt de estaciones precedentes (Fig. 2b) identifican regiones continentales definidas principalmente a Lag_1 y Lag_2, destacándose los núcleos con correlaciones positivas (> 0.4) sobre el norte de América del Sur (ond_EFM+1, efm_AMJ, jas_OND a Lag_1 y jas_EFM+1, ond_AMJ+1 a Lag_2) y Australia (ond_EFM+1 y jas_OND a Lag_1). Las regiones más notables para la Pt que muestran correlaciones estables negativas (< -0.4) se registran para el Qs de invierno a Lag_1 (ond_EFM+1) y se presentan sobre Asia, el este de África tropical y el sur tanto de América del Norte como de América del Sur. A Lag_3 y Lag_4, las regiones con correlaciones estables disminuyen y se muestran más dispersas, lo que dificulta el análisis. Sin embargo, se aprecian importantes regiones con correlaciones estables en la Pt del sur de América del Sur (efm_OND y jas_AMJ+1, a Lag_3) y del norte de América del Norte (ond_OND+1 a Lag_4). Las correlaciones sobre el norte de Sur América, muestran la fuerte relación que existe entre el Qs y la Pt de la estación inmediata anterior, con anomalías positivas (negativas) de la Pt asociadas con anomalías positivas (negativas) del Qs del RM en la estación siguiente.

Los mapas de correlaciones significativas y estables entre el Qs y la Tp (Fig. 2c), muestran amplias regiones con correlaciones negativas en América del Sur y África en todas las estaciones del año, a Lag_1. Además, aparecen correlaciones estables negativas (positivas) sobre el sur de Asia (América del Norte) principalmente para el Qs de EFM y AMJ (ond_EFM+1 y efm_AMJ, respectivamente). Para los mapas de correlación estable a Lag_2, Lag_3 y Lag_4, destacan las correlaciones significativas positivas en el norte de América del Norte y sobre el continente Africano. Las primeras (América del Norte) ocurren para el Qs de EFM (jas_EFM+1 a Lag_2) y OND (amj_OND a Lag_2) a Lag_2, y para el Qs de AMJ (jas_AMJ+1, a Lag_3); mientras que las segunda (África) se muestran para el Qs de EFM (mapa amj_EFM+1 a Lag_3) y AMJ (amj_AMJ+1 a Lag_4). También se aprecia un considerable centro de correlaciones negativas significativas estables entre la Tp de otoño y el Qs de la primavera siguiente sobre el sur de Asia (ond_AMJ+1, Lag_2).

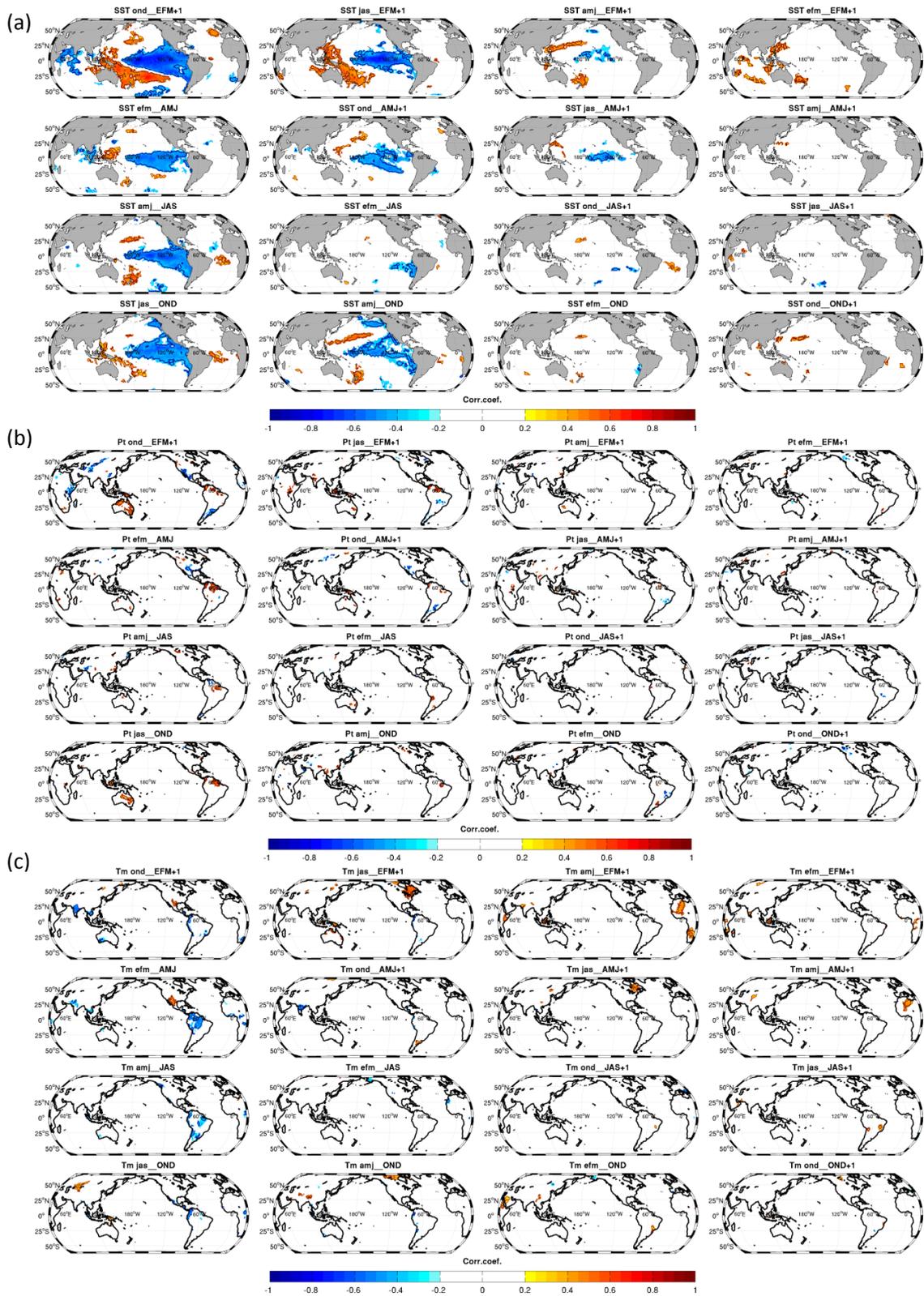


Fig. 2: Mapas de correlaciones significativas y estables entre el caudal y los campos predictores de: (a) SST, (b) precipitación –Pt– y (c) temperatura sobre tierra –Tp–, durante el periodo 1936-2009. Los valores por encima del nivel del 90% (80%) de significación están dentro (fuera) del contorno.

En resumen, el promedio de las correlaciones obtenidas a partir de las 44 ventanas móviles de 30 años, para todos los campos predictores, registra en la mayoría de los mapas de correlaciones estables valores positivos (negativos) mayores (menores) a 0.4 (-0.4), significativas al nivel del 90%. Además, la SST es el campo predictor que presenta regiones estables de mayor extensión correlacionadas significativamente con el Qs del RM, localizadas principalmente sobre el Océano Pacífico.

3.2. Obtención de predictores estables

Las variables predictoras del Qs del RM son identificadas a través del análisis PCA aplicado a las anomalías estandarizadas de las regiones que muestran correlaciones significativas y estables, identificadas previamente, entre cada campo predictor y el Qs del RM. Los resultados del PCA revelan que en general los primeros modos (EOFs) de cada campo predictor en todas las estaciones y para todos los retrasos tienen una estructura consistente con los respectivos patrones identificados en los mapas de estabilidad (Fig. 2). El primer modo (EOF1), en todas las estaciones y para todos los retrasos considerados, siempre explica más del 30% del total de la varianza en el campo predictor estable de la SST, 17% en la Pt, y 30% en la Tp.

La Figura 3 muestra la correlación móvil obtenida a partir de las ventanas móviles de 30 años entre el Qs estacional y las series temporales PCs de los campos predictores, que resultan estables, para todas las estaciones y retrasos considerados. En todos los casos la primera PC (PC1) resulta estable y registra más del 80% de los valores de correlación por arriba del nivel de significación del 90%. Las PCs1 obtenidas a partir del campo de Pt registran, los mayores valores de correlación con el Qs durante el periodo completo 1936-2009 en la mayoría de los retrasos establecidos (cuadro verde en la Fig. 3), mientras que la PC1 (PC2) del campo de SST presenta el mayor valor de correlación con el caudal de EFM (JAS) a Lag_4 (Lag_3) durante el mismo periodo.

La varianza explicada por los EOFs2 y EOFs3 en cada campo registra valores menos considerables comparados con los correspondientes EOFs1. Además, las PCs2 y PCs3, en la mayoría de los casos, no presentan correlaciones estables con el Qs (Fig. 3). Las series PCs2 del campo de Tp muestran correlaciones estables significativas para varios retrasos (p.e. Lag_1 hasta Lag_4, en OND), al igual que la serie PC2 de los campos Pt (p.e. Lag_2 en efm_JAS) y SST (p.e. Lag_3 amj_EFM+1).

La correlación entre el Qs y las series PCs1 de Pt, en los casos que presenta el valor más alto, oscila entre 0.5 y 0.78 en valor absoluto, y en todos ellos, resulta ser significativa y estable en un nivel por encima del 95%. Estas PCs1 de Pt presentan variaciones similares a las del Qs del RM sobre el mismo periodo, y al igual que el Qs están dominadas por oscilaciones interanuales (figura no mostrada). Las correlaciones entre las PCs1 del campo de SST y las PCs1 de los campos de Pt y Tp, registran los valores más altos a Lag_1 y Lag_2, en todas las estaciones. Estos valores oscilan entre 0.31 (0.37) y 0.86 (0.87) en valor absoluto, cuando se obtiene la correlación entre las PCs1 de la SST y las PCs1 de la Pt (PCs1 de Tp) en estos retrasos. Estos resultados indican que en gran medida las relaciones encontradas entre el Qs del RM y los campos de Pt y Tp están dominadas por la SST.

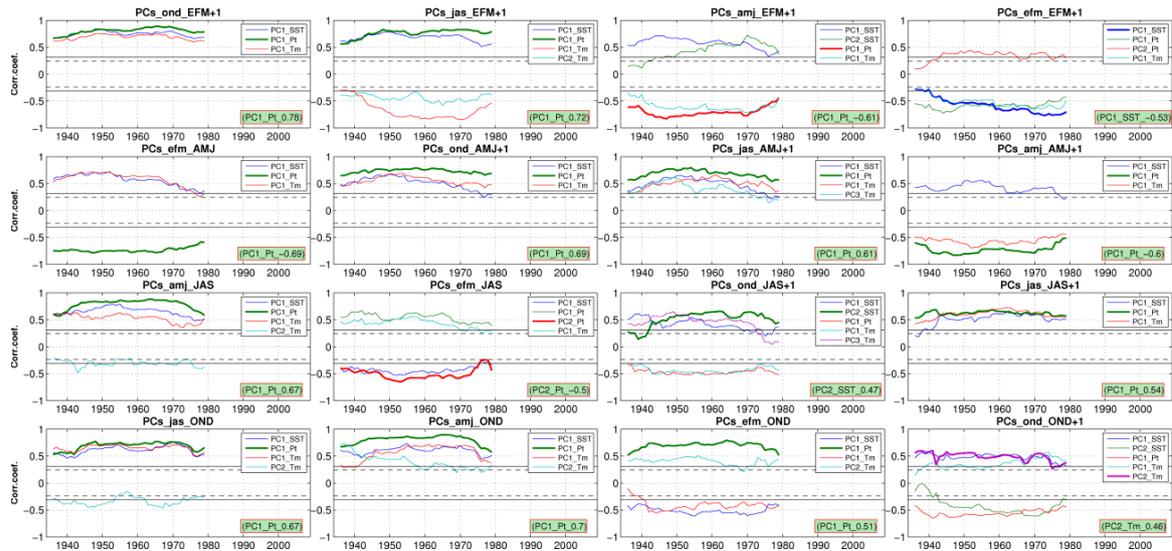


Fig. 3: Correlaciones móviles entre el caudal estacional y las series PCs estables de los campos predictores de SST (PC_SST), Pt (PC_Pt), y Tp (PC_Tp), para cada estación y retraso considerados. El cuadro verde destaca la serie PC que tiene el valor de correlación más alto durante el periodo 1936-2009.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se han investigado las posibles teleconexiones que presenta el Qs del río Magdalena con los campos predictores de SST, Pt y Tp, y se ha evaluado la capacidad predictiva que estos campos poseen sobre el caudal estacional para los retrasos de una hasta cuatro estaciones (Lag_1, Lag_2, Lag_3 and Lag_4), durante el periodo 1936-2009. Para todos los retrasos establecidos se han encontrado regiones con correlaciones estables significativas entre las anomalías del Qs del RM y las anomalías de los campos predictores. En lo que respecta al campo de la SST, se destacan grandes regiones con correlaciones significativas estables en el Océano Pacífico tropical, principalmente a Lag_1 y Lag_2. Estas regiones abarcan las áreas donde se desarrolla el fenómeno ENSO, evidenciando la fuerte relación que este fenómeno posee con la hidrología del país (Poveda et al., 2001; Tootle et al., 2008). Particularmente, las correlaciones significativas negativas encontradas entre el Qs del RM y la SST del Pacífico tropical sobre la región de El Niño han sido ya descritas por varios autores (Gutiérrez and Dracup, 2001; Poveda, 2004).

Los campos de anomalías de Pt y Tp muestran múltiples regiones con correlaciones estables con el Qs del RM, para todos los retrasos establecidos, siendo más destacadas las registradas sobre América del Sur, a Lag_1 y Lag_2. Además, las anomalías del caudal del río Magdalena también presentan relaciones estables con anomalías climáticas de regiones localizadas lejos del área de captación del río. Es conocido que la SST del Océano Pacífico está relacionada con la Pt y Tp en muchas regiones del planeta (Trenberth, 2002; Trenberth and Shea, 2005; Ropelesky and Halper, 1987), por lo que cabe pensar que, en gran medida, las teleconexiones encontradas entre el Qs del RM y los campos de Pt y Tp, estén conducidas por la SST, siendo estas teleconexiones en las variables continentales un reflejo de la variabilidad de la SST. Por tanto, muchas de las relaciones estables encontradas entre el Qs y dichos campos podrían estar controladas por la SST, mostrando la fuerte influencia que ejerce la SST sobre la Pt y la Tp en diversas regiones del planeta (Pabón y Montealegre, 1992).

Este trabajo muestra que las PCs directoras, asociadas a las anomalías de los campos predictores SST, Pt y Tp, sobre varias regiones del planeta que presentan correlaciones estables con el Qs del RM, proporcionan una fuente de predicción del Qs. Por tanto, el análisis llevado a cabo sienta las bases para el desarrollo de modelos de predicción del caudal estacional del río Magdalena, que incorporen la capacidad predictiva de los campos de SST, Pt y Tp a través de las teleconexiones encontradas, lo que podría contribuir a mejorar la capacidad de la predicción hidrológica en Colombia.

5. AGRADECIMIENTOS

La Universidad Tecnológica del Chocó y COLCIENCIAS financian los estudios de doctorado de S. Córdoba y R. Palomino en la Universidad de Granada, España. Los datos de caudal han sido proporcionados por el IDEAM-Colombia. El Ministerio español de Ciencia e Innovación, con financiación adicional de la Comunidad Europea with (Fondos FEDER), proyecto CGL2010-21188/CLI y el Gobierno Regional Andaluz, proyecto P11-RNM-7941, han financiado este estudio.

6. REFERENCIAS

- Arnell, N.W. (1995). Scenarios for hydrological climate change impact studies. The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change, H. R. Oliver and S. Oliver, Eds., NATO ASI Series I. Springer-Verlag, 393–396.
- Chiew, F.H.S. and McMahon, T.A. (2002). “Global ENSO-streamflow teleconnection, streamflow forecasting and interannual variability”. *Hydrological Sciences Journal*, 47 (3), 505-522. doi:10.1080/02626660209492950
- Dettinger, M.D. and Diaz, H.F. (2000). “Global Characteristics of Stream Flow Seasonality and Variability”. *J. Hydrometeorol.*, 1 (4):289-310. doi:10.1175/1525-7541.
- Gámiz-Fortis, S.R.; Esteban-Parra, M.J.; Trigo, R.M. and Castro-Díez, Y. (2010). “Potential predictability of an Iberian river flow based on its relationship with previous winter global SST”. *J. Hydrol.*, 385 (1–4), 143-149.
- Gutiérrez, F. and Dracup, J.A. (2001). “An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño–Southern Oscillation indicators”. *J. Hydrol.*, 246 (1–4), 181-196. doi:10.1016/s0022-1694(01)00373-0.
- Harris, I.; Jones, P.D.; Osborn, T.J. and Lister, D.H. (2014). “Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset”. *Int. J. Climatol.*, 34 (3):623-642. doi:10.1002/joc.3711.
- IDEAM. (2002). Efectos naturales y socioeconómicos del Fenómeno El Niño en Colombia. (Intituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Bogotá, D.C., Marzo), 58
- Ionita, M.; Lohmann, G. and Rimbu, N. (2008). “Prediction of Spring Elbe Discharge Based on Stable Teleconnections with Winter Global Temperature and Precipitation”. *J. Climate*, 21 (23), 6215-6226. doi:10.1175/2008jcli2248.1
- Pabón, J.D. y Montealegre J.E. (1992). Características Climáticas relevantes durante la Ocurrencia de los Fenómenos ENOS en el Noroccidente Sudamericano. Publicación especial del HIMAT:90
- Pettitt, A.N. (1979). “A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem”. *Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 28 (2), 126-135

- Poveda, G. (2004). "The hydro-climatology of Colombia: a synthesis from inter-decadal to diurnal timescales (in Spanish)". *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(107), 201-222
- Poveda, G.; Álvarez, D. and Rueda, Ó. (2011). "Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots". *Clim. Dynam.*, 36 (11-12), 2233-2249. doi:10.1007/s00382-010-0931-y
- Poveda, G.; Jaramillo, A.; Gil, M.M.; Quiceno, N. and Mantilla, R.I. (2001). "Seasonally in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia". *Water Resour. Res.*, 37 (8), 2169-2178. doi:10.1029/2000wr900395
- Poveda, G. and Mesa, O.J. (1997). "Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean-Atmospheric Phenomena". *J. Climate*, 10 (10), 2690-2702. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2690:fbhpit>2.0.co;2
- Preisendorfer, R.W. (1988). *Principal Component Analyses in Meteorology and Oceanography*. Elsevier.
- Rasmusson, E.M. and 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. doi:10.1175/1520-0493.
- Rayner, N.A. (2003). "Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century". *J. Geophys. Res.*, 108 (D14), doi:10.1029/2002jd002670
- Sahu, N.; Behera, S.; Yamashiki, Y.; Takara, K. and Yamagata, T. (2011). "IOD and ENSO impacts on the extreme stream-flows of Citarum river in Indonesia". *Clim. Dynam.*, 39 (7-8), 1673-1680. doi:10.1007/s00382-011-1158-2
- Schneider, U.; Becker, A.; Finger, P.; Meyer-Christoffer, A.; Ziese, M. and Rudolf, B. (2014). "GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle". *Theor. Appl. Climatol.*, 115 (1-2), 15-40. doi:10.1007/s00704-013-0860-x
- Tootle, G.A.; Piechota, T.C. and Gutiérrez, F. (2008). "The relationships between Pacific and Atlantic Ocean sea surface temperatures and Colombian streamflow variability". *J. Hydrol.*, 349 (3-4):268-276. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.058
- Trenberth, K.E. (2002). "Evolution of El Niño-Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures". *J. Geophys. Res.*, 107 (D8).
- Trenberth, K.E. and Shea, D.J. (2005). "Relationships between precipitation and surface temperature". *Geophys. Res. Lett.*, 32 (14):L14703. doi:10.1029/2005gl022760
- Ward, P.J.; Beets, W.; Bouwer, L.M.; Aerts, J.C. and Renssen, H. (2010). "Sensitivity of river discharge to ENSO". *Geophys. Res. Lett.*, 37 (12):L12402.