

Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali

El niño and la niña analysis influence in the monthly water supply at Cali River basin

ÁLVARO JAVIER ÁVILA DÍAZ

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: alvaro.avila@correounivalle.edu.co

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ingeniero Agrícola. Doctor en Ingeniería. Profesor Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Director del Grupo de Investigación Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: yesid.carvajal@correounivalle.edu.co

SERGIO ENRIQUE GUTIÉRREZ SERNA

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: serguti@univalle.edu.co

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad del Valle

Palabras clave: cambio climático, cuenca río Cali, fenómeno ENOS, oferta hídrica, variabilidad climática.

Key words: Cali river basin, climate change, climate variability, ENSO Phenomenon, offer water.

RESUMEN

El aumento en la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, asociados a la varia-

bilidad climática o al cambio climático, se ha convertido en el principal problema ambiental del siglo XXI al hacer más vulnerables las sociedades humanas. En el trópico, la variabilidad

climática interactúa con el cambio climático, haciendo difícil distinguir entre sus respectivos impactos dada la fuerte influencia de la primera en las condiciones normales del clima. El objetivo de la investigación consistió en analizar la oferta hídrica mensual en la cuenca del río Cali durante la ocurrencia de eventos extremos asociados al ENOS (El Niño Oscilación del Sur), donde se estudiaron los efectos de este fenómeno en la oferta hídrica de la cuenca, y se establecieron correlaciones significativas de variables asociadas a ENOS (MEI, ONI, SOI, T NIÑO 3-4) con las precipitaciones mensuales y el caudal de sus principales afluentes. Se concluye que la oferta hídrica decrece en un 40 % en épocas del fenómeno El Niño y aumenta su disponibilidad hasta un 65 % en épocas del fenómeno La Niña. Los resultados obtenidos aportan adelantos en los estudios hidrometeorológicos, con el fin de reducir la incertidumbre al riesgo de sequías e inundaciones que generalmente ocurren durante las fases extremas del ENOS.

* * *

INTRODUCCIÓN

Según Bedoya *et al.* (2010), es posible que en algunas regiones, sobre todo en países ecuatoriales, los efectos relacionados a la variabilidad climática (VC) predominan sobre los del cambio climático (CC). Los países situados en la zona ecuatorial, como Colombia, están bajo la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), franja donde se encuentran los vientos alisios procedentes del norte y noreste del hemisferio norte y los vientos del sur y sureste del hemisferio sur, que afectan las condiciones climáticas del país (Hurtado, 2010). Estas alteraciones afectan directamente las actividades agrícolas, pecuarias y pesqueras, así como la producción y sustentabilidad económica de la región (Bernal, 2010).

ABSTRACT

The frequency of hydrometeorological extreme events associated with Climate Variability and / or climate change is increasing, making human societies more vulnerable, so is becoming a critical environmental issue of the 21st century. In tropics, climate variability interacts with climate change, making especially difficult to distinguish among their respective impacts, due to the strong influence of the first in the current climate conditions. The impacts of ENSO (El Niño Southern Oscillation) on water availability of the Cali River Basin were analyzed. Significant correlations among variables associated with ENSO (MEI, ONI, SOI, T NIÑO 3-4) and monthly rainfall in the basin, and flow of main tributaries rivers were obtained. We conclude that the water supply decreased about 40 % during periods of “El Niño” and increased is availability to 65 % on La Niña periods. The Results will provide advances in hydrometeorological studies, in order to reduce uncertainty of the risk of droughts and floods that usually occur during the ENSO extreme phases.

En Colombia, la variabilidad climática y el cambio climático ocasionan frecuentes anomalías en la precipitación que impactan fuertemente la sociedad y los sectores productivos (Sedano, 2012; Carvajal, 2012), debido principalmente a sequías e inundaciones (Quintero *et al.*, 2012). Estas anomalías dinamizan el ciclo hidrológico en la región principalmente por dos factores: 1) hay una mayor radiación solar, causada por su ubicación en la zona ecuatorial, y 2) existe una fuerza activa de gravedad en la región, debido a que la cordillera de los Andes se divide en tres al ingresar al país. Teniendo en cuenta que según el DANE (2011), el índice de pobreza supera el 46 % en las ciudades y 65 % en el campo, estamos ante una situación crítica de vulnerabilidad, que implica la necesidad de abordar la influencia de ENOS en la oferta hídrica del país. Adicionalmente, en el

2011 en Colombia se alcanzó un nivel de pobreza de 34,1 % según estudio realizado por el DANE (2011), situación que aumenta la vulnerabilidad a la ocurrencia de desastres y deja amplios sectores con baja capacidad de respuesta ante eventos catastróficos. Cabe destacar que en el país el impacto generado por la temporada de lluvias y a ENOS en la fase Niña durante el periodo 2010-2011 fue de 3.219.492 damnificados con un costo por daños totales que ascendió a US\$ 4870 millones (Gómez, 2011).

Conocer el porcentaje de reducción o aumento de la precipitación y el caudal que se presenta en la cuenca cuando ocurren las fases extremas de ENOS permite avanzar hacia un mejor conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica de la cuenca. La fase fría de ENOS (La Niña), en Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies (Poveda, 2004), las cuales tienen repercusiones sobre el manejo del recurso hídrico y la sociedad. Por su parte, durante la fase cálida (El Niño) ocurren sequías, incendios forestales, racionamientos de energía, etc. Estudios recientes (Guarín y Ochoa, 2011; Poveda y Sánchez, 2006) se han centrado en analizar los impactos sobre posibles cambios futuros o proyecciones en las temperaturas, precipitaciones y caudales de los ríos como consecuencia de la VC influenciada por el CC; en estos estudios se resalta la importancia de vincular los resultados a la gestión actual del agua, en función de su déficit o exceso.

El presente trabajo enfatiza en el estudio de los regímenes de lluvia y de caudal relacionados con las fases extremas de ENOS que ocasionan alteraciones en los procesos naturales que conforman el ciclo hidrológico y están afectando la dinámica y la distribución espacio-temporal de la oferta hídrica en las diferentes regiones del país, tanto en cantidad como en calidad (Ideam, 2002). Este es el caso de la cuenca río Cali, donde se generan lluvias intensas y crecientes en los ríos, en épocas de La

Niña, que ocasionan inundaciones en la ciudad y afectan la calidad del agua del río para el abastecimiento en la ciudad; esto ocasiona interrupciones del suministro, debido a la contaminación física por las altas cargas de sedimento (Ávila, 2012).

El presente trabajo consistió en seleccionar variables macroclimáticas (VM) encargadas del monitoreo de ENOS en el océano Pacífico tropical para asociarlas con variables hidrometeorológicas en la cuenca de estudio a una escala temporal mensual; esto con el objetivo de determinar el grado de correlación temporal de las fases extremas del fenómeno ENOS y las variables de precipitación y caudal mensual. Se presenta una metodología adaptada que aporta a la estimación en la predicción de la hidrometeorología de cuencas torrenciales andinas, logrando una mayor aproximación al conocimiento científico más preciso de cómo el fenómeno impacta en el régimen hidrológico. De esta forma, los resultados aportan insumos para la adaptación frente a la VC y CC, en aras de definir estrategias para la gestión del recurso hídrico y mejorar la planificación y su uso sostenible y eficiente (Puertas y Carvajal, 2008; Martelo, 2003).

METODOLOGÍA

En el marco de este estudio se correlacionaron las variables macroclimáticas asociadas al fenómeno ENOS con las variables hidrometeorológicas de la cuenca río Cali y se analizó la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca. A continuación se presenta el desarrollo metodológico.

Descripción de la zona de estudio

Al suroccidente colombiano, en el Valle del Cauca, se encuentra la cuenca hidrográfica del río Cali (figura 1), con un área de 215 km², la cual hace parte del Parque Natural Farallones de Cali, tercero más importante de los Andes ame-

ricanos por su alta biodiversidad y especies endémicas. Según Empresas Municipales de Cali (Emcali), el río Cali contribuye con el 20% del suministro de agua que toma Santiago de Cali. Tiene una capacidad de producción de 1,8 m³/s que surte de agua potable aproximadamente a 500.000 usuarios; adicionalmente, el río sirve como sistema de drenaje y es considerado patrimonio cultural, paisajístico y ornamental de la ciudad.

Red de medición e información hidrológica

En principio se seleccionaron las estaciones representativas de la zona de estudio (ver figura 1;

posteriormente se recopiló la información hidrometeorológica, que comprende un periodo común de registros entre 1973-2010 (precipitación mensual y caudal medio mensual), y cartográfica (modelo digital del terreno, red hídrica y entre otros). Esto con el objetivo de determinar las principales características fisiográficas, morfométricas e hidrológicas de la zona de estudio, tales como: elevación, tiempo de concentración y rezago, precipitación media, pendiente media, entre otros parámetros e índices que permiten inferir el comportamiento del régimen hidrológico del área de estudio. Cabe destacar que la información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

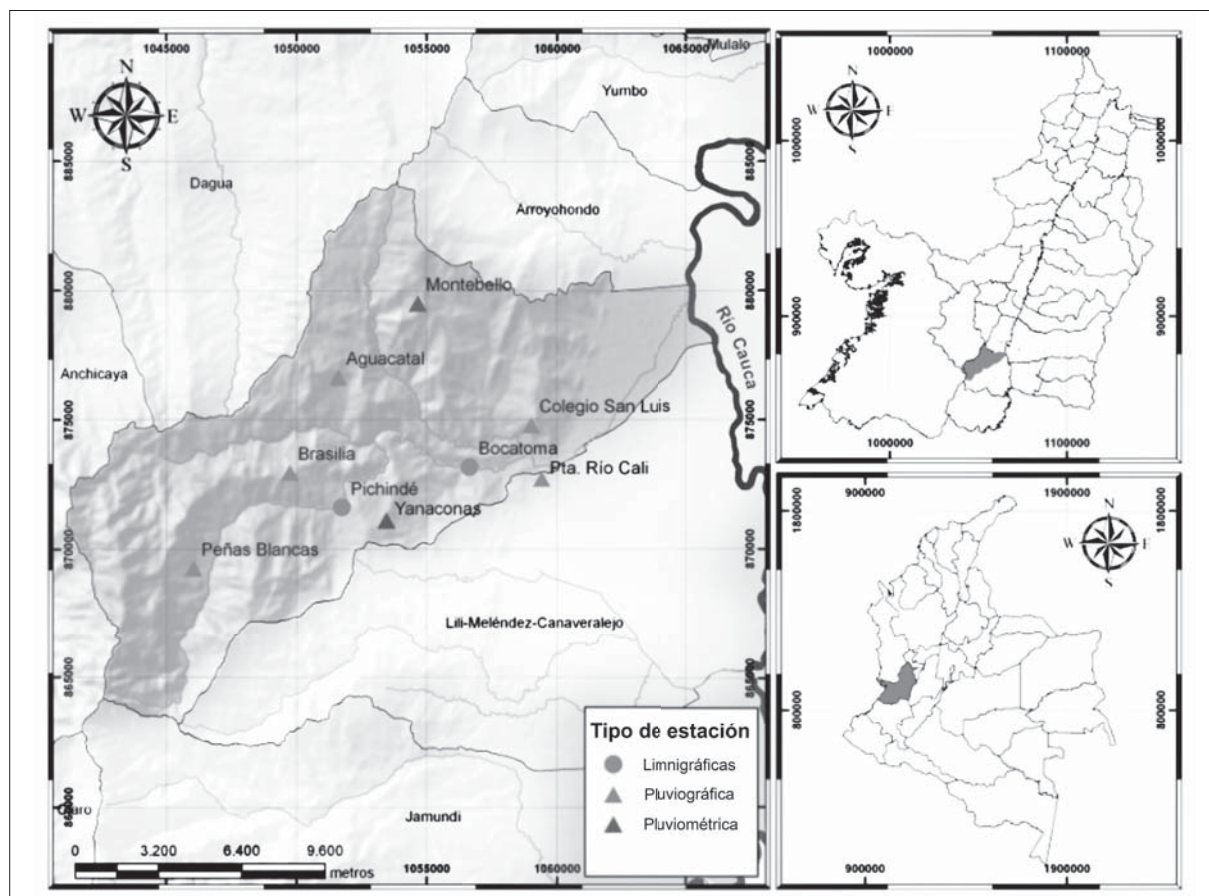


Figura 1. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Cali y localización de las estaciones hidrometeorológicas

Fuente: grupo IREHISA.

Se cuantificaron los datos faltantes de cada estación pluviométrica con el fin de seleccionar aquellas que tienen un porcentaje de datos faltantes menor al 10% del total. Para las estaciones hidrométricas, estos se calcularon aplicando regresiones lineales entre los datos mensuales de las estaciones limnigráficas; posteriormente se realizó su estimación, utilizando el método racional deductivo propuesto por Guevara, que permite completar en las series de precipitación hasta un máximo de once datos faltantes por año (Guevara, 2003), apoyándose en la información que brindan los periodos con información completa de la red hidrometeorológica seleccionada. Cabe resaltar que la CVC tiene una extensa toma de datos en la zona de estudio que supera los 30 años de toma de registro, periodo idóneo para trabajar con series de datos climáticos (Castro y Carvajal, 2010).

El estudio de homogeneidad de series hidrológicas es un aspecto fundamental en el análisis hidrológico, por lo que es necesario tener en este tipo de estudios conocimiento inicial del comportamiento de la información. Se realizó el Análisis Exploratorio de Datos (AED) que estuvo compuesto de dos partes: (I) análisis gráfico (gráfica de serie de tiempo, diagrama de cajas, histogramas, gráfica de normalidad), y (II) análisis confirmatorio, por medio de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas siguiendo la metodología propuesta en Castro y Carvajal (2010).

Análisis de anomalías estandarizadas

Para conocer cuánto aumentaron o disminuyeron las precipitaciones y los caudales medios mensuales en la cuenca, ante la ocurrencia de un evento extremo asociado a ENOS, se determinaron los periodos en los cuales ocurrieron dichos eventos (El Niño y La Niña); luego se hizo uso de la ecuación (1) para calcular las anomalías promedio de las variables precipitación y caudal mensual, estimando estadísticos de la media durante

los eventos de El Niño y La Niña, con respecto a años normales (noENOS).

$$Anomalia\ X_i EN_{mese\ i} = \left(\frac{X_i\ El\ Niño\ mes\ i - X_i\ medio\ Normal\ mes\ i}{X_i\ medio\ Normal\ mes\ i} \right) * 100 \quad (1)$$

Correlación entre variables macroclimáticas asociadas al fenómeno El Niño Oscilación del Sur y variables hidrometeorológicas de la cuenca río Cali

Es importante resaltar que la intensidad de la fase extrema del fenómeno ENOS depende de la magnitud de las anomalías en las variables monitoreadas de dicho fenómeno, tanto en el océano como en la atmósfera. Esta intensidad, aunque influye en la formación de eventos extremos en determinadas regiones, es diferente de la magnitud y del impacto producido sobre las actividades humanas (Sedano, 2012). Teniendo en cuenta que el país está regido en la zona andina por un comportamiento bimodal de lluvias, con dos periodos húmedos y dos periodos secos durante el año, el efecto de las fases extremas en la región depende de la época del año y de las diferentes condiciones de vulnerabilidad de los sectores productivos (Inzunza, 2001).

Las VM asociadas al fenómeno ENOS que se usaron en este estudio se seleccionaron teniendo en cuenta la ubicación donde es registrada la información, la vigencia de funcionamiento y la relación de estas variables con la hidrometeorología de la zona de estudio. Para esto se siguió la metodología usada en Puertas y Carvajal (2008), en la cual se hace un estudio de la incidencia de ENOS en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia. Para el presente caso de estudio se hace énfasis sobre las variables hidrometeorológicas correlacionándolas con las VM que se explican a continuación:

(I) La temperatura en la superficie del mar (TSM), definida como la anomalía mensual de esta variable en cuatro sectores del océano Pacífico alrededor de la línea ecuatorial, denominadas en orden

de este a oeste: NIÑO 4, NIÑO 3-4, NIÑO 3, NIÑO 1+2. Un índice de TSM alto (positivo) indica la ocurrencia de El Niño (fase cálida), pero para este estudio solo se usó la temperatura en la región NIÑO 3-4, que según estudios realizados (Bedoya *et al.*, 2010; Puertas y Carvajal, 2008; Paredes y Guevara, 2010; Poveda *et al.*, 2002; Carvajal, 2004), indican que de todas las regiones en el Pacífico tropical donde se mide la temperatura del océano Pacífico, esta es la que mejor correlación presenta con la hidroclimatología colombiana. (II) El índice de oscilación del sur (SOI), que se define como la diferencia de las anomalías mensuales de presión atmosférica estandarizadas entre un centro de alta presión en Tahití (17° S, 150° O) y un centro de baja presión cerca de Darwin (12° S, 131° E); la fase cálida de ENOS está asociada a un SOI negativo. (III) El índice multivariado de ENOS (MEI), que relaciona las principales variables en el océano Pacífico: presión a nivel del mar, componentes zonal y meridional de los vientos de superficie, temperatura de la superficie del océano, temperatura del aire en la superficie y nubosidad; valores positivos del MEI se relacionan con El Niño (Puertas y Carvajal, 2008). (IV). El índice oceánico de El Niño (ONI) que es el resultado de la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la región Niño 3-4. Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia del evento El Niño. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por cinco meses consecutivos o más indican la ocurrencia del evento La Niña (Guarín y Ochoa, 2011).

El análisis de correlación cruzada es usado para medir el grado de asociación lineal entre dos variables, y se refiere al grado de variación conjunta que existe entre las variables relacionadas (Carvajal *et al.*, 2007). En el estudio se estimaron coeficientes de correlación de Pearson (r), por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre variables cuantitativas (Puertas y Carvajal, 2008), relacionando las VM

asociadas a ENOS con las variables de precipitación y caudal en la cuenca.

Para determinar si los coeficientes de correlación obtenidos tienen un valor estadísticamente significativo, se determinó el valor de significancia de los resultados con la probabilidad (p) de obtener un valor para el estadístico tan extremo como el realmente observado, si la hipótesis nula fuera cierta; para este caso de estudio, se rechazó la hipótesis nula de independencia lineal, es decir, la hipótesis de que el coeficiente de correlación vale cero en la población, y se determinó que existe relación lineal significativa cuando el nivel crítico p fue menor que el nivel de significancia establecido en 5 % (Puertas y Carvajal, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó por medio del análisis exploratorio de datos, y se realizó con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrometeorológica de las series históricas anuales de precipitación y caudal que se utilizaron en el estudio. En la tabla 1 se presentan los resultados del AED.

En la tabla 1 se observa que la proporción de datos faltantes es menor que 10 % para las series hidrometeorológicas analizadas y que el resultados del AED indica que ninguna de las estaciones debe ser excluida del estudio.

Análisis de las series de precipitación y caudal

La precipitación media anual multianual del periodo de estudio es de 2042 mm y oscila entre 3600 mm y 1200 mm en las partes alta y baja respectivamente, presentando un comportamiento bimodal temporal. Existe una estrecha relación entre los regímenes hidrológicos y climatológicos; sin embargo, los meses de mayores lluvias no coinciden con los del caudal, presentándose el

desfase de un mes; esto debido a que después de un periodo seco las precipitaciones iniciales recargan la matriz del suelo, reportando caudales mayores un mes después. Por otro lado, al final de un periodo húmedo el caudal medio mensual desciende significativamente, cuando la reserva hídrica del suelo comienza a agotarse. Se determinó de acuerdo con los resultados que el caudal medio anual del río Cali es de 3,7 m³/s, con valores máximos instantáneos que oscilan entre 0,2 m³/s en fuertes estiajes y 193 m³/s en periodos de lluvias intensas, generalmente asociados a El Niño y La Niña, respectivamente.

Por otra parte, se observó que el año hidrológico no coincide necesariamente con el año sidéreo, es decir, el periodo que convencionalmente transcurre entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de un mismo año (Bedoya *et al.*, 2010). El año hidrológico se estableció de junio a mayo, para intentar reflejar adecuadamente el comportamiento de las variables climáticas involucradas sobre la cuenca del río Cali (ver figura 2).

Tabla 1. Resultados del análisis exploratorio de datos para las estaciones analizadas

Variable Climática	Estación	Proporción datos Faltantes (%)	Análisis gráfico	Análisis cuantitativo	Resultados AED
Precipitación (mm)	Brasilia	1,26	A	A	A
	Peñas Blancas	1,77	A	A	A
	Yanaconas	7,81	A	A	A
	Montebello	1,11	A	A	A
	San Luis	4,35	R	A	A
	Planta Río Cali	1,84	A	A	A
Caudal (m ³ /s)	Pichindé	8,71	A	A	A
	Bocatoma	9,44	A	A	A

*A: Aprueba, R: Rechaza.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de la incidencia dl ENOS en las anomalías de precipitación (mm) y caudal (m³/s)

De acuerdo con los resultados, en la fase La Niña los incrementos promedios son elevados para los registros de precipitación anual en los periodos de 1973-1974 y 1975-1976 con valores de 28 y 25 % por encima de la media respectivamente. Para la temporada de lluvias comprendida entre 2010-2011, la única estación que contaba con datos al momento del estudio fue la estación Peñas Blancas, que presentó un incremento del 38 % con respecto a su media anual del año hidrológico (MAH) en sus registros históricos; en el resto de años hidrológicos no hay un incremento notable en la anomalía de precipitación (figura 2). El caudal presenta anomalías en los periodos de la fase fría La Niña de: 1973-1974, 1975-1976, 1988-1889 y 2010-2011, con incrementos promedio de 41, 64,24 y 65 % respecto al valor de la media MAH. Adicionalmente, se encontró que para el último periodo 2010-2011 se presentó La Niña más fuerte en los últimos 38 años, ya que ocurrieron los caudales medios más altos registrados, con un incremento del 65 % de la anomalía de caudal con respecto a la MAH (figura 3).

En relación con los resultados en la fase cálida El Niño, las consecuencias en los registros de las variables analizadas no fueron tan evidentes, ya que el cambio no es significativo con respecto al decremento de la MAH, excepto para dos periodos: (I) 1976-1977, que presentaron una disminución promedio de precipitación y caudal de 39 y 25 % y (II) 1991-1992, que representó una disminución promedio de 34 y 38 % para la precipitación y caudal anual respectivamente.

Análisis de la correlación entre variables macroclimáticas asociadas al ENOS y las hidrometeorológicas (precipitación y caudal)

Los extremos del ENOS (El Niño y La Niña) afectan el clima del territorio nacional y tienen efectos,

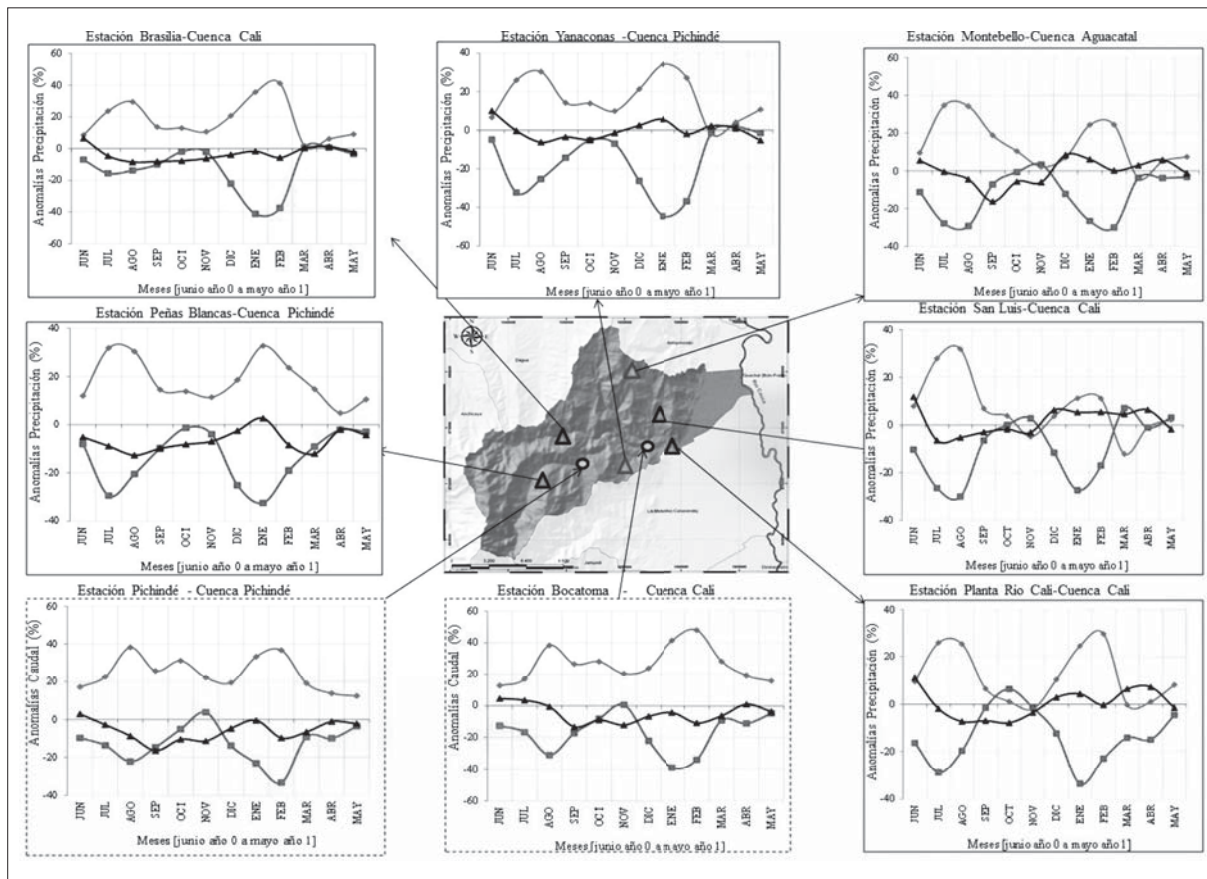


Figura 2. Porcentaje de anomalías de precipitación y caudal mensual (estaciones Pichindé y Bocatoma)

Fuente: elaboración propia.

en particular, sobre la magnitud y los componentes del ciclo hidrológico (Bedoya, *et al.*, 2010). En la distribución espacial de las estaciones en la cuenca del río Cali, se observó (figura 3) que los efectos del ENOS sobre la precipitación se presentan con mayor intensidad al occidente y centro (estaciones La Teresita, Brasilia y Peñas Blancas, con un r promedio de $-0,18$; $-0,17$ y $-0,16$ respectivamente) que al oriente de la cuenca (estaciones Planta Río Cali, Montebello y San Luis, con un r promedio de $-0,14$; $-0,12$; $-0,10$, respectivamente), teniendo en cuenta que los resultados de las correlaciones presentadas obtuvieron un valor de significancia menor de $0,000$; esto reafirma los resultados obtenidos por Poveda *et al.* (2002), en los que se menciona que espacialmen-

te la correlación entre los índices representativos del ENOS y la hidrometeorología es menor en el oriente colombiano. También se observó (tabla 2) que los rezagos entre -1 y 1 mes presentaron mejores correlaciones con las VM, con excepción del ONI, donde las mejores correlaciones se presentaron con un rezago anticipado de -3 meses.

En general, las correlaciones de las estaciones pluviográficas involucradas en el estudio presentaron un comportamiento similar, donde el punto máximo de la curvatura se observó en los rezagos entre -1 y 0 meses, (r entre $-0,24$ para el índice Niño 3-4, y $-0,31$ para el índice MEI); valores que después de este punto presentaron tendencia a cero como se observa en la figura 5. En el

investigación

caso de las estaciones limnigráficas, el comportamiento de la gráfica presenta mayor uniformidad con su máximo valor entre los rezagos 0 y 1 mes ($r=-0,44$), cuyo valor de coeficiente es mayor en comparación con las precipitaciones donde el coeficiente máximo fue de $r=-0,31$ (tabla 2). Esto indica que el comportamiento de los caudales en la cuenca está mayormente influenciado por el fenómeno ENOS que la precipitación; cabe resaltar que todos los datos que se graficaron y se presentaron en las tablas, fueron los que presentaron

mayor valor de r y un p menor a 5 % lo que quiere decir que son estadísticamente significativos.

Las correlaciones obtenidas con la precipitación y caudal en la cuenca del río Cali muestran relaciones inversas con la TSM (Región Niño 3-4), el NOI y el MEI, y proporcional con el SOI; es decir, cuando la temperatura del océano Pacífico aumenta, se reducen las precipitaciones en la región, y cuando el gradiente de presiones en la atmósfera aumenta, las precipitaciones también

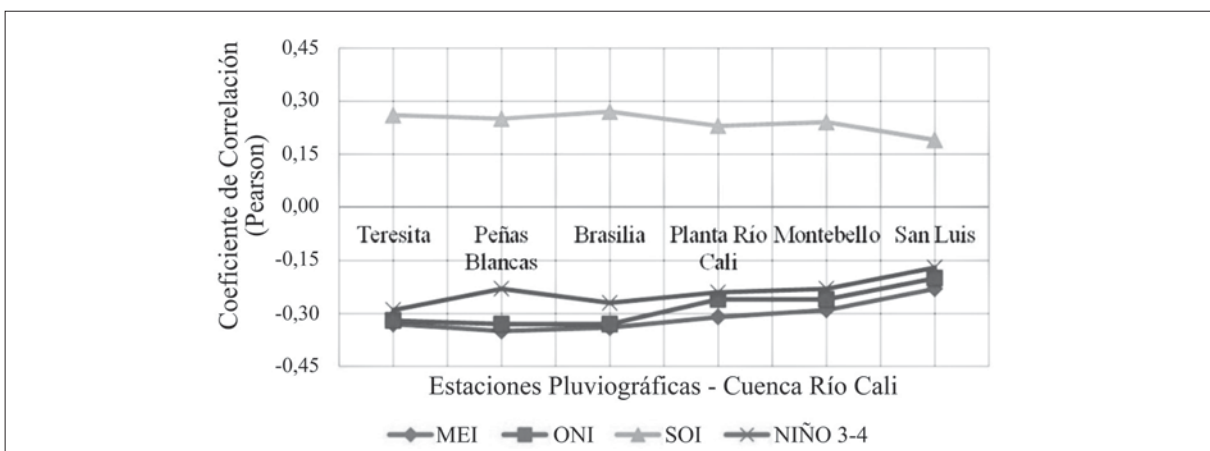


Figura 3. Relación VM del ENOS, con las estaciones pluviográficas de la cuenca del río Cali

Fuente: elaboración propia.

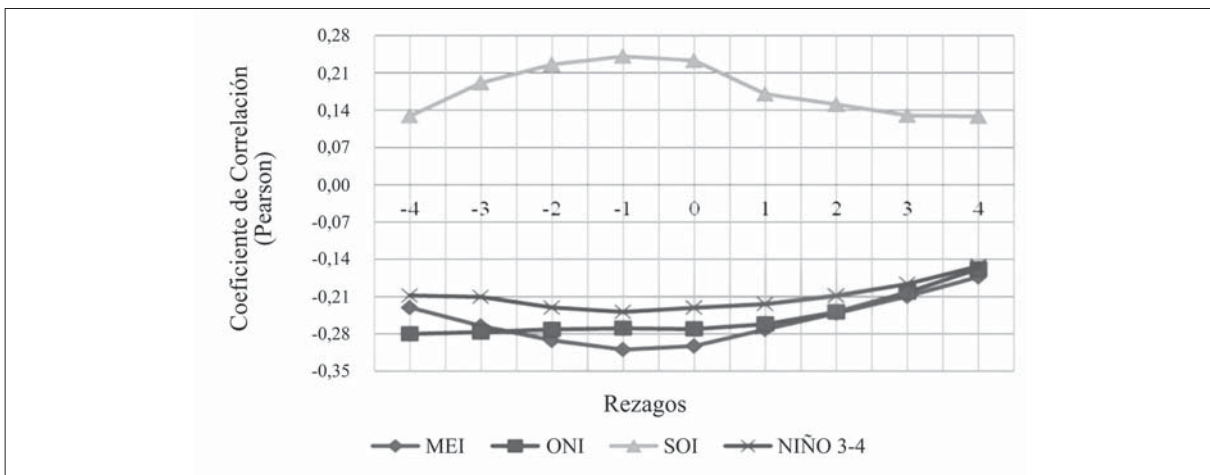


Figura 4. Comportamiento de los coeficientes de correlación (Pearson) vs. Rezago mensual (precipitación)

Fuente: elaboración propia.

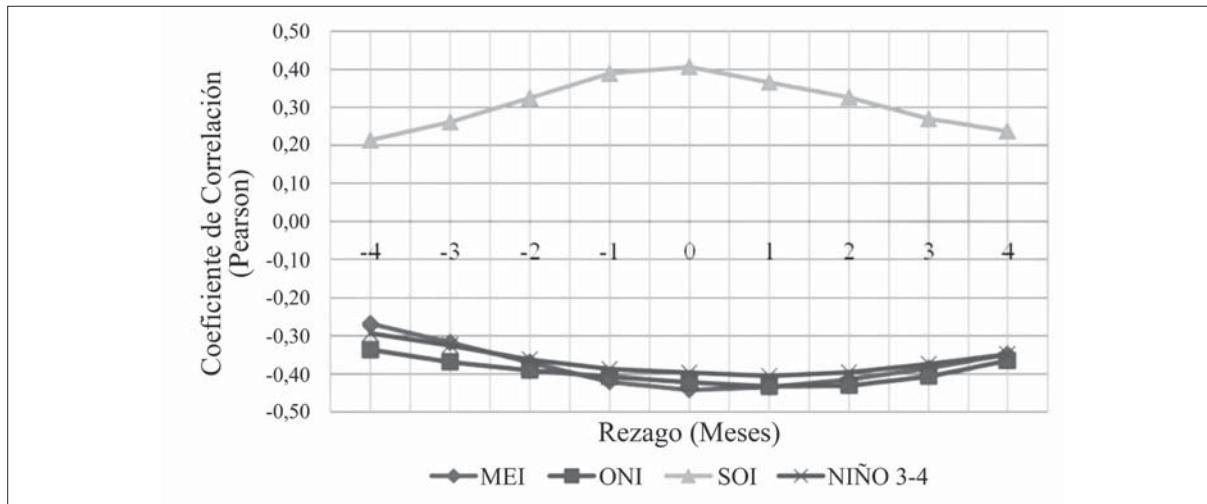


Figura 5. Comportamiento de los coeficientes de correlación (Pearson) vs. Rezago mensual (caudal)

Fuente: elaboración propia.

lo hacen, lo cual se puede asociar a una posible reducción de viento húmedo hacia el territorio colombiano (Carvajal, 2004).

La tabla 2 muestra el promedio de los coeficientes de correlación Pearson encontrados, donde los mayores valores se obtuvieron con el índice MEI. Lo anterior se atribuye al mayor número de variables que esta reúne, lo que concuerda con otros estudios (Guarín y Ochoa, 2011; Carvajal, 2004; Gutiérrez, 2013), en los que la duración y magnitud de los eventos hidrológicos extremos en las cuencas del país se ven fuertemente influenciadas por las fases extremas de ENOS (Bedoya *et al.*, 2010). La variable MEI es la VM que mayor uniformidad presentó; con respecto a los valores de r , su comportamiento viene de menor a mayor hasta el rezago 0, y luego va disminuyendo conforme van aumentando los rezagos (figura 4 y 5).

La diferencia o igualdad de signos entre los coeficientes de correlación indica la relación inversa (-) o directa (+) que existe entre las variables. Los coeficientes de temperatura sobre la superficie del océano Pacífico son de signo opuesto a los coeficientes obtenidos para las estaciones de precipitación; esto indica que un incremento de la temperatura en el océano Pacífico está asociado

Tabla 2. Mejores correlaciones promedio entre las VM asociadas al ENOS y las variables hidrometeorológicas.

Variables Macroclimáticas del ENOS	R* [Precipitación]	Rezago** [Meses]	p***	R* [Caudal]	Rezago** [Meses]	p***
MEI	-0,31	-1	0,000	-0,44	0	0,000
ONI	-0,28	-3	0,000	-0,43	1	0,000
SOI	0,24	-1	0,000	0,41	0	0,000
NIÑO 3-4	-0,24	-1	0,000	-0,41	1	0,000

* R: Coeficiente de Correlación de Pearson (promedio). ** Rezago positivo: encabeza la variable de ENOS y viceversa. *** p: Significancia estadística del 5% ($p < 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

con una disminución de la precipitación en la zona de estudio. La explicación física de este proceso se relaciona con la alteración del gradiente de temperaturas del océano Pacífico entre las costas de Colombia y Perú que influye en la hidrometeorología de la zona, perturbando la advección de aire frío y húmedo del océano Pacífico hacia el interior de Colombia. Así mismo, los eventos

hidrológicos extremos generan una retroalimentación positiva sobre sí mismos: condiciones de sequía por un forzamiento de mesoescala producen disminución de la precipitación, y por tanto, disminución de la humedad del suelo, que a su vez reduce la evapotranspiración, lo que ocasiona una menor disponibilidad de humedad para la convección atmosférica, lo que produciría lluvias convectivas (Castro y Carvajal, 2010). Lo anterior también es válido para periodos muy lluviosos asociados a La Niña.

Aunque las estaciones limnigráficas de la cuenca se encuentran distanciadas geográficamente, se observó un comportamiento similar en el valor de las correlaciones entre las estaciones, con su máximo valor en los rezagos -1 y 0 meses, en relación a las variables asociadas al ENOS. Se encontró que las variables MEI y SOI tienen más incidencia sobre los caudales de la estación del río Pichindé, a diferencia de la variable ONI que presenta mayor incidencia en los caudales de la estación Bocatoma; por su parte el índice NIÑO 3-4 se comporta similarmente sobre estas dos estaciones.

Se obtuvieron valores consistentes con correlaciones cruzadas máximas que oscilaron entre -0,45 (Pichindé) y -0,44 (Bocatoma) a un rezago entre 0 y 1 mes con la hidrología de la región; las mayores correlaciones promedio en la variable caudal se obtuvieron para el MEI con un coeficiente de correlación de -0,44 a 0 meses de rezago, seguido por el ONI con -0,43 a 1 mes de rezago.

Las correlaciones entre las VM y los caudales fueron mayores que las obtenidas con las precipitaciones; esto se debe en parte a que los caudales en las cuencas presentan una mayor persistencia significativa, debido al proceso de almacenaje de agua en los acuíferos o a las condiciones de humedad antecedente en el suelo, que aportan una mayor memoria histórica en las series de caudal. Una de las razones por la que los niveles de correlación no tiene un valor alto, es porque los fenómenos de VC, que gobiernan el clima de Co-

lombia, están controlados en gran medida por la zona de confluencia intertropical, y por la dinámica de los océanos de las cuencas del Amazonas y el Orinoco. Lo anterior resulta en una compleja respuesta hidrológica que, entre otros aspectos, dificulta la construcción de escenarios de cambio climático que apoyen la toma de decisiones para determinar el comportamiento de los recursos hídricos ante presiones de VC y CC con bajos niveles de incertidumbre (García *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La inclusión de las VM como variables auxiliares mejora el entendimiento de la hidrología de la cuenca. El comportamiento de los caudales en la cuenca está mayormente influenciado por el fenómeno el ENOS que las precipitaciones, lo que se ve reflejado en mayores valores de correlación sobre la variable caudal ($r=-0,44$) que los de la variable precipitación ($r=-0,31$). Esta metodología puede ser utilizada para la predicción de eventos extremos en el estudio de la variabilidad climática para entender las relaciones de ENOS o fenómenos similares con la hidrología de la zona de estudio.

Las variables macroclimáticas ONI y MEI son las que tienen mayor incidencia sobre las variables hidrometeorológicas analizadas, con un coeficiente de correlación significativo entre el 24 y el 44 %, lo que es una aproximación a la estimación del porcentaje de influencia del fenómeno ENOS sobre las variables precipitación y caudal, determinando que la oferta hídrica en la zona de estudio decrece en un 40 % en épocas de la fase El Niño y aumenta su disponibilidad hasta un 65 % en épocas de La Niña.

La planificación y el manejo de recursos hídricos debe considerar el pronóstico o la ocurrencia de eventos asociados al ENOS. Igualmente las decisiones sobre gestión del recurso, asignación de cuotas de agua, manejo de crecientes, y aún en aspectos de salubridad y epidemias para los cuales

se tenga pronósticos o cuando se esté presentando el fenómeno ENOS.

Los meses en que se presentan mayores anomalías de caudal ocurren en coincidencia con los periodos de mayor estiaje en el ciclo anual, lo que hace más crítica la situación, dado que hace más notoria la reducción de los caudales del río Cali; esto debido a que sus valores oscilan entre 0,8 y -2,1 m³/s, y la fracción de agua extraída aguas arriba de las estaciones limnigráficas durante estos periodos es significativa comparada con la magnitud del caudal de estiaje. Por eso se recomienda que este aspecto sea considerado para la estimación del régimen de caudal ambiental que debe permanecer en el río, para no afectar los ecosistemas y servicios ambientales que presta a la comunidad.

FINANCIAMIENTO

Del proyecto titulado “Cuencas claves en Colombia para la implementación de la nueva política de la gestión integrada del recurso hídrico”, COL-CUENCAS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo, Universidad del Valle, IDEAM y UNESCO-IHE, por el suministro a los recursos físicos y las condiciones locativas mínimas necesarias que garantizaron la adecuada ejecución de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos IREHISA de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, por el apoyo a esta investigación y a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por el suministro de la información.

REFERENCIAS

- Ávila, A. (2012). *Simulación hidrológica utilizando HEC-HMS como herramienta para estimar caudales máximos en la cuenca hidrográfica del río Cali*. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.
- Bedoya, M., Contreras, C. y Ruiz, F. (2010). Capítulo 7. Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. *Estudio Nacional del agua 2010*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Colombia, pp. 282-320.
- Bernal, O. (2010). *Uso del pronóstico en el sector agropecuario*. Trabajo presentado en el I congreso nacional del clima 2010 “El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, julio 13 a 15 de 2010.
- Carvajal, Y. (2004). *El uso de funciones ortogonales empíricas y análisis de correlación canónica en el estudio de la variabilidad hidrometeorológica, aplicación al Valle del Cauca-Colombia*. Tesis de Doctorado. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2004.
- Carvajal, Y., Correa, G., Muñoz, F. (2007). *Modelos de predicción de caudal utilizando variables macroclimáticas y técnicas estadísticas multivariadas en el Valle del río Cauca*. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Colombia, 6, 67-81.

- Carvajal, Y. (2012). Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático? *Revista Memorias*, 9(16), 105-119.
- Castro, M. y Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 15-25.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2011). *Boletín de prensa-pobreza monetaria y multidimensional en Colombia*. Recuperado de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/%20condiciones_vida/pobreza/boletin_pobreza_2011.pdf.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F. y Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 36, 60-64.
- Gomez, H. (2011). *Foro por el Agua. Impactos y respuestas a la ola invernal 2010-2011. Retos para superar la vulnerabilidad a los fenómenos de origen natural en Colombia*. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C.
- Guarín, G. y Ochoa, A. (2011). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño*. “Índices macroclimáticos, precipitación y producción en Urabá”. Tesis de Maestría. Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Guevara, J. (2003). *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Imprenta Universidad Central de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología. Mérida, Venezuela.
- Gutiérrez, S. (2013). *Análisis de la influencia de el fenómeno ENOS “El Niño - Oscilación del Sur” en la oferta hídrica trimestral de la cuenca hidrográfica del río Dagua, Valle del Cauca*. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.
- Hurtado, G. (2010). *El clima: Origen y aplicaciones*. Trabajo presentado en el I congreso nacional del clima 2010 “El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático”. Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, julio 13 a 15 de 2010.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM. (2002). *Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno el niño en Colombia*. Ministerio del medio Ambiente. Bogotá D.C., Colombia.
- Inzunza, J. (2001). Tema 7. Cambio Climático Global. *Pedagogía en Ciencias Naturales y Carreras de la infancia*. Universidad de Concepción. Chile. Recuperado de <http://www2.udec.cl/~jinzunza/infancia/tema7.pdf>
- Martelo, M. (2003). *Influencia de las variables macroclimáticas en el clima de Venezuela*. Dirección de hidrología, meteorología y oceanología – dirección general de cuencas hidrográficas – Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela.
- Paredes, F. y Guevara, E. (2010). “Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en los llanos de Venezuela”. *Revista Bioagro*, 1, 3-10.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., Mejía, J., Barco, O. y Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6, 121-130.

- Poveda, G. (2004). “La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna”. *Revista Ciencias de la Tierra*, 28(107), pp. 201-221.
- Poveda G. y Sánchez, J. (2006). *Predicción de Caudales medios mensuales utilizando métodos espectrales y redes neuronales*. Trabajo presentado en el XVII Congreso Nacional de Hidráulica e Hidrología, Popayán, Colombia, septiembre 14 a 16 de 2006.
- Puertas, O. y Carvajal, Y. (2008). “Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer”. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 23, pp. 104-118.
- Quintero, M., Carvajal, Y., Aldunce, P. (2012). “Variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo”. *Revista Luna Azul*, 34, pp. 257-271.
- Sedano, K., Carvajal, Y., Ávila, A. (2012). “¿Cómo nos afecta el cambio climático en Colombia? Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia”. *Revista Semillas*, 46/47, pp. 47-53.
- Sedano, K. (2012). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*. Tesis de Maestría. Departamento de ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España.