



EFECTOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA SOBRE LA HIDROLOGÍA DE LA AMAZONIA COLOMBIANA

Elizabeth Arango-Ruda¹ y Germán Poveda²

RESUMEN

El Niño-Oscilación del Sur, ENSO, es el principal modulador de la variabilidad climática global a escala de tiempo interanual. El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría) constituyen las fases extremas del ENSO y causan fuertes anomalías hidrológicas en el trópico sudamericano, incluyendo a Colombia. Se presenta un análisis cuantitativo de la influencia de las fases del ENSO en las principales variables hidrológicas de la Amazonia colombiana, que comprende: caudales medios mensuales de ríos, precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial e Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI). Se analiza el ciclo anual de los caudales medios mensuales para cada estación en cada una de las fases del ENSO. Adicionalmente, se lleva a cabo un análisis de correlaciones cruzadas rezagadas con el Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) y de correlaciones trimestrales cruzadas rezagadas entre el ONI y los caudales calculados para cada trimestre. Los resultados indican que no hay una señal clara del ENSO sobre las variables hidrológicas analizadas en la Amazonia colombiana, debido a que la intensidad, la amplitud y la duración de las fases del ENSO varían de evento a evento. Sin embargo, se evidencia una dinámica hidrológica diferente entre la Alta Amazonia y la Baja Amazonia, lo cual debe ser objeto de más investigaciones.

¹ Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia, earangor@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia, gpoveda@unal.edu.co

Palabras clave:

ENSO, variabilidad interanual, hidrología, caudal, Amazonia, Colombia.

ABSTRACT

El Niño-Southern Oscillation, ENSO, is the main modulator of global climate variability at the inter-annual time scale. El Niño (warm phase) and La Niña (cold phase) make up the extreme phases of ENSO and cause strong hydrological anomalies in the South American tropics, including Colombia. A quantitative analysis of the influence of the phases of the ENSO on the main hydrological variables of the Colombian Amazon is presented, which includes: average monthly flow rates of rivers, precipitation, evapotranspiration, surface runoff and Palmer Drought Severity Index (PDSI). The annual cycle of monthly average flow rates is analyzed for each station in each of the ENSO phases. In addition, an analysis of lagged cross correlations is carried out with the Oceanic Niño Index (ONI) and of quarterly lagged cross correlations between the ONI and the calculated flow rates for each quarter. The results indicate that there is no clear signal from ENSO on the hydrological variables analyzed in the Colombian Amazon region, because the intensity,

amplitude and duration of the ENSO phases vary from event to event. Nonetheless, different hydrological dynamics are observed between the Upper Amazon region and the Lower Amazon region, which should be the object of further research.

Key Words:

ENSO, inter-annual variability, hydrology, flow rate, Colombian Amazon region

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Amazonas es la más grande del planeta y conforma un sistema acoplado con la cordillera de los Andes (Poveda, Waylen y Pulwarty, 2006; Builes-Jaramillo y Poveda, 2018). Su red de canales y ríos drenan el agua desde los glaciares andinos hasta el océano Atlántico a través de páramos y yungas, bosques de alta montaña, bosques de niebla y bosques tropicales lluviosos y en la Baja Amazonia, sobre terrenos inundables y humedales que, en conjunto, desempeñan un papel importante en la modulación del ciclo hidrológico a escala global (Foley, Botta, Coe y Costa, 2002). Su sistema fluvial produce aproximadamente el 20 % de descarga de agua del mundo (Salati y Vose, 1984). Además, la cuenca amazónica contiene uno de los bosques lluviosos tropicales más extensos. Dicha masa forestal corresponde a aproximadamente 100 mil millones de toneladas de carbono, que equivalen a más de diez años de emisiones mundiales de combustibles fósiles (Davidson et al., 2012).

A escala interanual, el principal mecanismo de modulación de la variabilidad climática en Colombia es El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), un evento climático que ocurre irregularmente pero típicamente entre dos y siete años (Allan, Lindesay y Parker, 1996). El ENSO se manifiesta mediante dos fases extremas: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), ambas denominadas por el signo de las anomalías en las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico tropical. El Niño tiene una frecuencia promedio entre tres y cuatro años y consiste en el calentamiento prolongado de la temperatura superficial del océano en el Pacífico Central y Oriental, debilitando los vientos alisios superficiales del este

y alterando el patrón de circulación de la celda de Walker (Bjerknes, 1969). Por su parte, La Niña consiste en el enfriamiento de las temperaturas superficiales del mar en las mismas regiones y tiene una frecuencia promedio entre seis y ocho años. El ENSO tiene una variabilidad estacional, dado que su evolución se encuentra en fase con el ciclo anual (Jin, Neelin y Ghil, 1996; Stein, Timmermann y Schneider, 2011; Douglas, Knox, Curtis, Giese y Ray, 2017), ya que comienza durante la primavera del hemisferio norte (marzo a mayo) y alcanza su máximo desarrollo entre diciembre y febrero (Neelin, Jin y Syu, 2000).

Los efectos del ENSO se evidencian a lo largo de todo el planeta, con fuertes cambios en los patrones de temperatura y precipitación (Bjerknes, 1969; Philander, 1990; Rasmusson y Carpenter, 1983), las lluvias aumentan dramáticamente en algunas regiones, mientras que ocurren severas sequías en otras (Díaz y Markgraf, 2000; Holmgren, Scheffer, Ezcurrea, Gutiérrez y Mohren, 2001). La señal del ENSO se propaga hacia el este en el norte de Sudamérica, produciendo anomalías hidrológicas con un rezago de un mes sobre el oeste de Colombia (Poveda y Mesa, 1997; Poveda, Álvarez y Rueda, 2011) y de seis a diez meses en la cuenca del río Amazonas (Eagleson, 1994).

Los efectos del ENSO sobre la hidroclimatología de Colombia han sido estudiados y documentados en la literatura internacional desde las últimas tres décadas (Aceituno, 1989; Pabón y Montealegre, 1992; Poveda y Mesa, 1993 y 1997; Poveda, Jaramillo, Gil, Quiceno y Mantilla, 2001; Poveda et al., 2006 y 2011; Gutiérrez y Dracup, 2001; Poveda, 2004; Hoyos, Escobar, Restrepo, Arango y Ortiz, 2013; Córdoba-Machado, Palomino-Lemus, Gámiz-Fortis, Castro-Díez y Esteban-Parra, 2014 y 2016; Arias, Martínez y Vieira, 2015; Tootle, Piechota y Gutiérrez, 2008; Bedoya-Soto, Poveda, Trenberth y Vélez, 2018).

De las cinco principales regiones eco-biogeográficas de Colombia, las más estudiadas en relación con el ENSO han sido las regiones Caribe, Andina y Pacífica. En general, los efectos de El Niño (La Niña) sobre dichas regiones se manifiestan en disminución (aumento) en las lluvias, en los caudales mínimos, medios y máximos, así como en la humedad del

suelo y en una disminución de la actividad vegetal (Poveda *et al.*, 2001 y 2011).

Los efectos del ENSO sobre la hidrología de la región amazónica colombiana han sido poco explorados, principalmente, debido a la escasez de registros de variables hidroclimáticas con un período de tiempo suficientemente largo para cuantificar los efectos con una adecuada significancia estadística. Sin embargo, por los altos impactos socioeconómicos y ambientales que el ENSO impone sobre Colombia (Poveda y Mesa, 1997; Bedoya-Soto *et al.*, 2018), se plantea la necesidad de cuantificar los efectos de las dos fases del ENSO sobre la hidrología de la Amazonia de Colombia.

El presente trabajo tiene por objeto analizar la influencia de las dos fases del ENSO, El Niño y La Niña, sobre la variabilidad temporal de la hidrología de la Amazonia colombiana a una resolución de tiempo mensual.

El contenido del trabajo se distribuye de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la información relacionada con los datos hidrológicos y sus fuentes y, además, se explican los métodos estadísticos usados para el análisis. La sección 3 contiene los

resultados y la discusión de los análisis. Finalmente, en la sección 4 se exponen las conclusiones a las que se ha llegado una vez analizados e interpretados los datos.

DATOS Y MÉTODOS

Datos

Caudales medios mensuales

El conjunto de datos usados en esta investigación corresponde a 32 series de caudales promedios mensuales de estaciones ubicadas en los ríos más importantes de la Amazonia colombiana (ríos Putumayo, Caquetá, Vaupés y Amazonas) y algunos de sus afluentes. Las estaciones de registro de caudales se distribuyen geográficamente como se muestra en la figura 1, de acuerdo con la información consignada en el cuadro 1. Dichas series mensuales fueron obtenidas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM; <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>).



FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MEDICIÓN DE CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES DEL IDEAM.

La cartografía base, escala 1:500.000, usada para elaborar la figura 1 proviene del Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC- y del IDEAM. La capa Drenaje doble representa el “flujo de agua superficial que depende de la precipitación pluvial y/o afloramiento de aguas subterráneas y va a desembocar en otra corriente, en una laguna o en el mar” (IGAC, 2018). Las capas Zona hidrográfica y Área hidrográfica forman parte de la Zonificación hidrográfica completa

realizada para Colombia en cinco Áreas hidrográficas (Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico), que a su vez están divididas en Zonas hidrográficas y estas en Subzonas hidrográficas (Resolución 0337 de 1978 del HIMAT).

En el cuadro 1 se presenta la información detallada de las series de caudales promedios mensuales utilizadas en este estudio.

CUADRO 1. ESTACIONES DE LAS SERIES DE CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS. COLUMNAS 1, 2 Y 3, IDENTIFICACIÓN, CÓDIGO Y NOMBRE DE CADA ESTACIÓN. COLUMNAS 4, 5 Y 6, CORRIENTE, DEPARTAMENTO Y MUNICIPIO. COLUMNAS 7, 8 Y 9, ALTITUD EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR, COORDENADAS LATITUD Y LONGITUD. COLUMNA 10 Y 11, AÑO DE INICIO Y AÑO FIN DE LA SERIE. COLUMNA 12 Y 13, MESES FALTANTES PARA CADA SERIE Y CAUDAL PROMEDIO.

N°	Código	Estación	Corriente	Departamento	Municipio	Altitud	Latitud	Longitud	Año Inicio	Año Fin	Meses faltantes	Qmed
1	42067010	Los Cerros	Vaupés	Vaupés	Mitú	195	0.0° 54.0' 00.0"	70.0°46.0' 00.0"	1990	2013	39	940,2
2	42077010	San Antonio	Vaupés	Vaupés	Mitú	185	01° 13.0' 00.0"	70.0°43.0' 00.0"	1990	2014	12	1144,9
3	42077030	Pituna	Cudayari	Vaupés	Mitú	185	01° 17.0' 00.0"	70.0°19.0' 00.0"	1999	2014	58	87,0
4	46017010	San Ignacio	Caguán	Caquetá	San Vicente del Caguán	670	02° 06.0' 43.8"	74.0°46.0' 19.6"	1984	2009	50	248,8
5	46037060	Puerto Rico	Guayas	Caquetá	Puerto Rico	450	01° 55.0' 03.1"	75.0°09.0' 02.4"	1972	2009	131	206,9
6	44037120	Bocatoma 1	Dedo	Caquetá	Florencia	480	01° 38.0' 00.0"	75.0°38.0' 00.0"	1970	2014	6	0,9
7	44037050	Venezia	Ortegausa	Caquetá	Florencia	520	01° 33.0' 00.0"	75.0°31.0' 00.0"	1964	2014	23	100,5
8	44037080	Morelia	Bodoquero	Caquetá	Morelia	253	01° 29.0' 50.4"	75.0°43.0' 29.9"	1964	2014	38	46,2
9	44037090	Larandía	Ortegausa	Caquetá	Florencia	390	01° 29.0' 00.0"	75.0°29.0' 00.0"	1964	2009	68	161,8
10	44037100	Itarca	San Pedro	Caquetá	La Montañita	236	01° 31.0' 00.0"	75.0°28.0' 00.0"	1973	2013	12	77,3
11	47017110	Monopamba	Sucio	Nariño	Puerres	1650	00° 48.0' 00.0"	77.0°18.0' 00.0"	1981	2013	82	49,2
12	44017120	Piedra Lisa II	Mocoa	Putumayo	Mocoa	849	01° 12.0' 00.0"	76.0°39.0' 00.0"	1997	2013	70	40,9
13	44117010	La Tagua	Caquetá	Putumayo	Puerto Leguizamo	153	00° 03.0' 26.9"	74.0°40.0' 01.0"	2008	2010	10	2887,5
14	44137080	Puerto Las Brisas	Caquetá	Caquetá	Solano	132	00° 35.0' 52.7"	72.0°28.0' 06.6"	1984	2013	49	4692,2
15	44167020	Sta Isabel	Caquetá	Amazonas	Puerto Santander	118	0.1° 05.0' 00.0"	71.0°07.0' 00.0"	1995	2013	20	7287,5
16	44157030	María Manteca	Caquetá	Amazonas	Mirití-Paraná	114	0.1° 25.0' 00.0"	70.0°35.0' 00.0"	1987	2013	56	8725,7
17	44197020	Villareal	Caquetá	Amazonas	La Pedrera	102	01° 18.0' 00.0"	69.0°37.0' 00.0"	2000	2008	58	7751,8
18	47017060	Papas	Caquetá	Cauca	San Sebastián	2745	01° 53.0' 00.0"	76.0°41.0' 00.0"	1977	1981	17	0,2
19	47017070	El Edén	Putumayo	Putumayo	Santiago	2087	01° 06.0' 00.0"	76.0°56.0' 00.0"	1971	2010	51	28,3
20	47017100	Angosturas	Caquetá	Putumayo	Puerto Guzmán	325	00° 23.0' 00.0"	76.0°21.0' 00.0"	1984	1999	17	629,3
21	47017110	Andaquí	Caquetá	Cauca	Santa Rosa	460	1.0° 03.0' 00.0"	76.0°32.0' 00.0"	1983	2013	82	416,9
22	47017130	Las Joyas	Guamués	Nariño	Pasto	1550	00° 53.0' 00.0"	77.0°09.0' 00.0"	1988	2001	14	237,5
23	47017140	Pte Canal D	San Pedro	Putumayo	Colón	2123	01° 11.0' 00.0"	76.0°57.0' 00.0"	1981	2013	80	3,8
24	47017150	La Joya	Guineo	Putumayo	Villagarzón	350	0.0° 47.0' 00.0"	76.0°34.0' 00.0"	1981	2013	47	53,9
25	44017100	Canal B	Quinchoa	Putumayo	Santiago	2065	1.0° 06.0' 00.0"	76.0°58.0' 00.0"	1983	2000	17	629,3
26	47017200	Los Naranjos	Putumayo	Putumayo	Puerto Asís	897	0.0° 23.0' 00.0"	76.0°23.0' 00.0"	2007	2015	27	784,5
27	47017190	Bellavista	Putumayo	Putumayo	Puerto Asís	191	0.0° 23.0' 00.0"	74.0°34.0' 00.0"	2007	2015	14	1919,2
28	47047040	San Agustín	Putumayo	Amazonas	El Encanto	125	0.1° 36.0' 00.0"	73.0°29.0' 00.0"	2007	2015	19	2540,1
29	47077010	La Chorrera	Igara Paraná	Amazonas	La Chorrera	150	0.1° 26.0' 00.0"	72.0°47.0' 00.0"	1991	2012	39	334,8
30	47067020	Estrecho-Marandúa	Putumayo	Amazonas	Puerto Arica	120	0.2° 26.0' 00.0"	72.0°40.0' 00.0"	2007	2013	16	4003,5
31	47107010	Tarapacá	Putumayo	Amazonas	Tarapacá	98	0.2° 53.0' 00.0"	69.0°44.0' 00.0"	1990	1998	29	7489,6
32	48017030	Nazareth	Amazonas	Amazonas	Leticia	119	04° 07.0' 00.0"	70.0°02.0' 00.0"	1988	2014	7	27839,3

Con el propósito de correlacionar el ENSO con los caudales de los ríos de la Amazonia colombiana, se usó la serie mensual del Índice Oceánico de El Niño (ONI), cuyo comportamiento se puede observar en la figura 2. El ONI es el índice estándar que utiliza la Agencia Nacional de la Atmósfera y el Océano de los Estados Unidos (NOAA) para identificar la ocurrencia de eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical. Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4, una franja comprendida entre 5°N-5°S y 120°E-170°O.

Los eventos cálidos (anomalías positivas, El Niño) o fríos (anomalías negativas, La Niña), se identifican cuando el valor del índice ONI supera el umbral de +0.5°C para El Niño o es inferior a -0.5°C para La Niña, durante por lo menos cinco meses consecutivos. Esta es la definición operacional usada por la NOAA. La serie del ONI se obtiene de la página web: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt>

PRECIPITACIÓN

Los datos utilizados son del Reanálisis del Centro Nacional de Investigaciones Ambientales/Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCEP/NCAR) de Estados Unidos (Kalnay et al., 1996), así como del Reanálisis *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2) (Gelaro et al., 2017), específicamente la variable *Bias corrected total surface precipitation monthly*, a una resolución de 0.5 x 0.625 grados.

Evaporación

Se usó información del Reanálisis MERRA-2, específicamente la variable *Evaporation land monthly*, con una resolución espacial de 0.5 x 0.625 grados.

Índice de Sequías

Se usó el Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI), adaptado por Dai (Dai, Trenberth y Qian, 2004; Dai, 2011a y 2011b). Tal índice fue propuesto por Palmer (1965) para representar

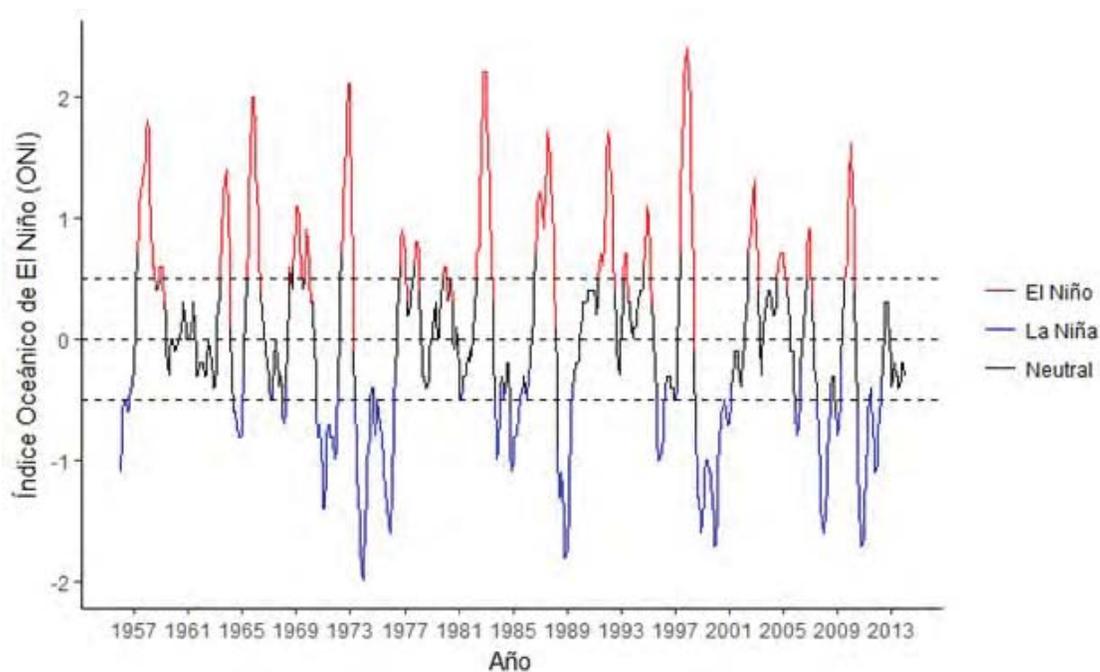


FIGURA 2. SERIE MENSUAL DEL ÍNDICE OCEÁNICO DE EL NIÑO (ONI).

la severidad de períodos secos y húmedos y está basado en datos de temperatura y precipitación promedios mensuales, así como de la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos en cada sitio. El PDSI es una medida estandarizada de las condiciones de humedad superficial que cuantifica la sequía meteorológica y, teóricamente, varía entre -10 (seco) y +10 (húmedo) y, por tanto, permite establecer comparaciones entre distintas regiones y períodos de tiempo (Dai *et al.*, 2004).

Escorrentía superficial

Se usaron datos del Reanálisis del Centro Nacional de Investigaciones Ambientales/Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCEP/NCAR) de Estados Unidos (Kalnay *et al.*, 1996).

MÉTODOS DE ANÁLISIS

Ciclo anual de caudales

Con el fin de cuantificar la influencia del ENSO sobre los caudales promedios mensuales de los ríos de la Amazonia colombiana, se estimó el ciclo anual de los valores mensuales promedio de las series de caudales para cada estación, teniendo en cuenta las tres categorías del ENSO (Trenberth, 1997): El Niño (caudales durante los meses de ocurrencia de El Niño según el índice ONI), La Niña (caudales durante los meses de ocurrencia de La Niña) y Neutral (caudales durante los meses sin eventos de El Niño o La Niña). El ciclo anual se estimó promediando los valores mensuales de los caudales de todos los años del período de registro, así como el ciclo anual promedio durante los eventos de El Niño, La Niña y Neutrales. Finalmente, se cuantificaron las diferencias entre estos grupos para evaluar el impacto de las fases del ENSO sobre los caudales de la región de estudio.

Estandarización de caudales

Para calcular las anomalías asociadas a las dos fases del ENSO, es necesario remover el ciclo anual promedio de las series de caudales medios mensuales.

Dado el interés en estudiar la variabilidad interanual (asociada al ENSO), se efectuó un proceso de estandarización de los caudales medios mensuales. Dicho procedimiento implica restar la media mensual, $\mu_{(i)}$, de cada uno de los valores observados, $Q_{(i,t)}$ y dividir la diferencia por la desviación estándar del respectivo mes, $\sigma_{(i)}$. Así, la serie de anomalías estandarizadas se construye como (Montgomery y Rugner, 1996):

$$q_{(i,t)} = \frac{Q_{(i,t)} - \mu_{(i)}}{\sigma_{(i)}}, [1]$$

en donde, denota los meses y $t = 1, \dots, T$, denota los años del registro de longitud total, T . Con esta transformación se logran: unas series mensuales de promedio nulo y desviación estándar unitaria; y remover el ciclo anual de las series mensuales de caudal, con el objetivo de extraer la variabilidad interanual.

Análisis de correlación de caudales

Se estimaron las correlaciones cruzadas rezagadas entre la serie del ONI (variable explicativa) y las series de caudal promedio mensual estandarizada (variable explicada), usando rezagos temporales de hasta doce meses para cada una de las series de caudales.

También se estimó la matriz de correlaciones trimestrales rezagadas. Se trata de correlacionar valores promedios de los distintos trimestres de cada año, entre el ONI y las series de caudales promedios trimestrales (en este caso sin estandarizar para no remover el ciclo anual). Así, por ejemplo, se correlaciona el promedio del ONI para los meses de junio, julio y agosto (JJA) con el valor promedio del caudal para una estación particular en los mismos meses (JJA); este tipo de correlación toma el nombre de correlación sincrónica o de rezago (0). De igual manera, las correlaciones se estiman de forma desfasada, tomando el mismo trimestre (DEF) del ONI correlacionado con los trimestres siguientes de los caudales para cada estación: marzo, abril, mayo (MAM), rezago (-1); junio, julio, agosto (JJA), rezago (-2); septiembre, octubre, noviembre (SON), rezago (-3). En todos los casos, el ONI antecede a los caudales.

Análisis de precipitación, evaporación, índice de sequías y escorrentía

Además de los análisis estadísticos indicados antes en relación con los caudales de los ríos de la Amazonia colombiana, se recurrió a estudiar el comportamiento de otras variables hidroclimáticas en el trópico americano, con especial énfasis en la Amazonia colombiana. Estas otras variables incluyen datos de precipitación, evaporación, así como el Índice de Severidad de Sequías de Palmer.

Para ello se estimaron las anomalías en la intensidad de la precipitación y de la escorrentía durante los eventos históricos de El Niño y La Niña, definidos según el criterio objetivo del valor del ONI. Las anomalías se estimaron con base en el período 1981-2010, usando información de los Reanálisis NCEP/NCAR y MERRA-2.

También se efectuó un análisis de correlación entre los campos de evaporación terrestre mensual y la precipitación superficial total del modelo MERRA-2 para los diferentes episodios de El Niño y La Niña.

Finalmente, se desplegaron los mapas del Índice de Severidad de Sequías de Palmer para los eventos históricos de El Niño y La Niña durante el período de estudio.

También, se hizo un análisis conjunto de los resultados obtenidos mediante las anomalías de los caudales de los ríos y los resultados obtenidos con la información de precipitación, evaporación y PDSI, con un doble propósito: verificar la coherencia de las anomalías de los caudales con las otras variables hidrológicas e identificar las fuentes de información y Reanálisis que mejor capturan las relaciones hidrológicas identificadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ciclo anual de caudales

Se calculó el ciclo anual promedio de las series de caudales mensuales, durante los meses identificados por el índice ONI como El Niño, La Niña y Neutros. Los niveles de los ríos de la cuenca amazónica normalmente siguen el ciclo anual de la precipitación asociada con la oscilación latitudinal de la Zona de

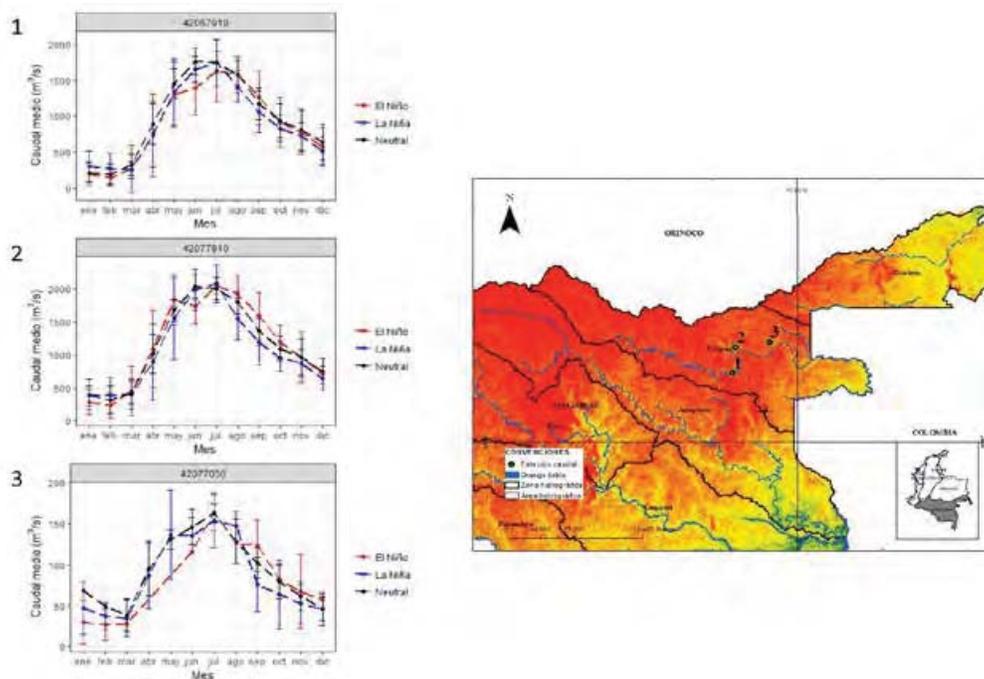


FIGURA 3. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DE EL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA VAUPÉS. LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual produce máximos valores en los caudales medios durante el verano del hemisferio norte (junio a agosto) y mínimos durante el invierno (diciembre a marzo). Las figuras 3 a 8 ilustran el carácter unimodal del ciclo anual promedio de caudales mensuales en la Amazonia colombiana.

El análisis presentado se refiere a cuatro regiones en la Amazonia colombiana: Vaupés, Caguán, Caquetá y Putumayo. En la zona hidrográfica Vaupés se observa que los caudales se incrementan levemente durante los eventos de La Niña, especialmente en la primera mitad del año (enero a junio), sin embargo,

en la segunda mitad del año los caudales parecerían aumentar levemente durante El Niño (figura 3).

Un comportamiento similar se observa en la zona hidrográfica Caguán, en donde se presentan aumentos en los caudales durante El Niño, particularmente en la segunda mitad del año, desde junio hasta octubre. En los otros meses del año los efectos del ENSO en sus fases opuestas no son muy diferenciables (figura 4).

Los caudales pertenecientes a la zona hidrográfica Caquetá presentan incremento de los caudales durante los meses de El Niño y disminución en la fase opuesta (figuras 5 y 6).

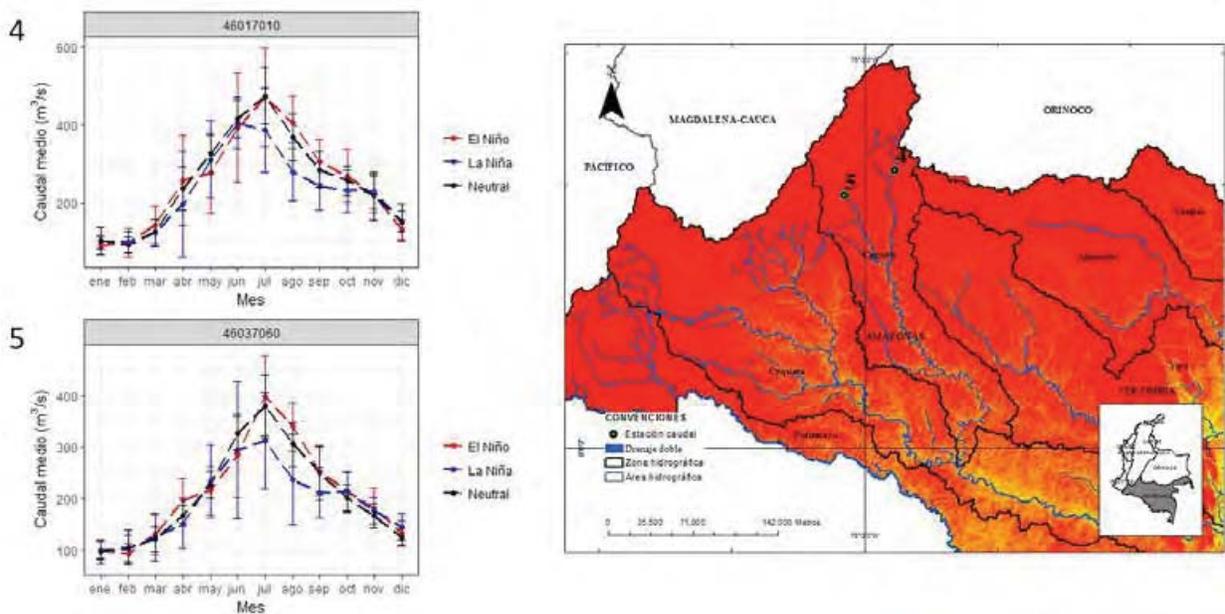


FIGURA 4. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DE EL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA CAGUÁN. LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

El ciclo anual de los caudales promedios de los ríos pertenecientes a la zona hidrográfica Putumayo (aguas arriba), refleja el paso de la Zona de Convergencia Intertropical con un pico de caudales en el mes de julio y caudales más bajos a principios y finales del año. Es evidente el aumento de los caudales durante los meses de El Niño y su disminución

durante los meses de La Niña, mucho más marcado en la segunda mitad del año (figura 7). En las estaciones ubicadas en esta misma zona hidrográfica Putumayo, pero aguas abajo, se evidencia el mismo comportamiento, especialmente en el periodo de junio a agosto (figura 8).

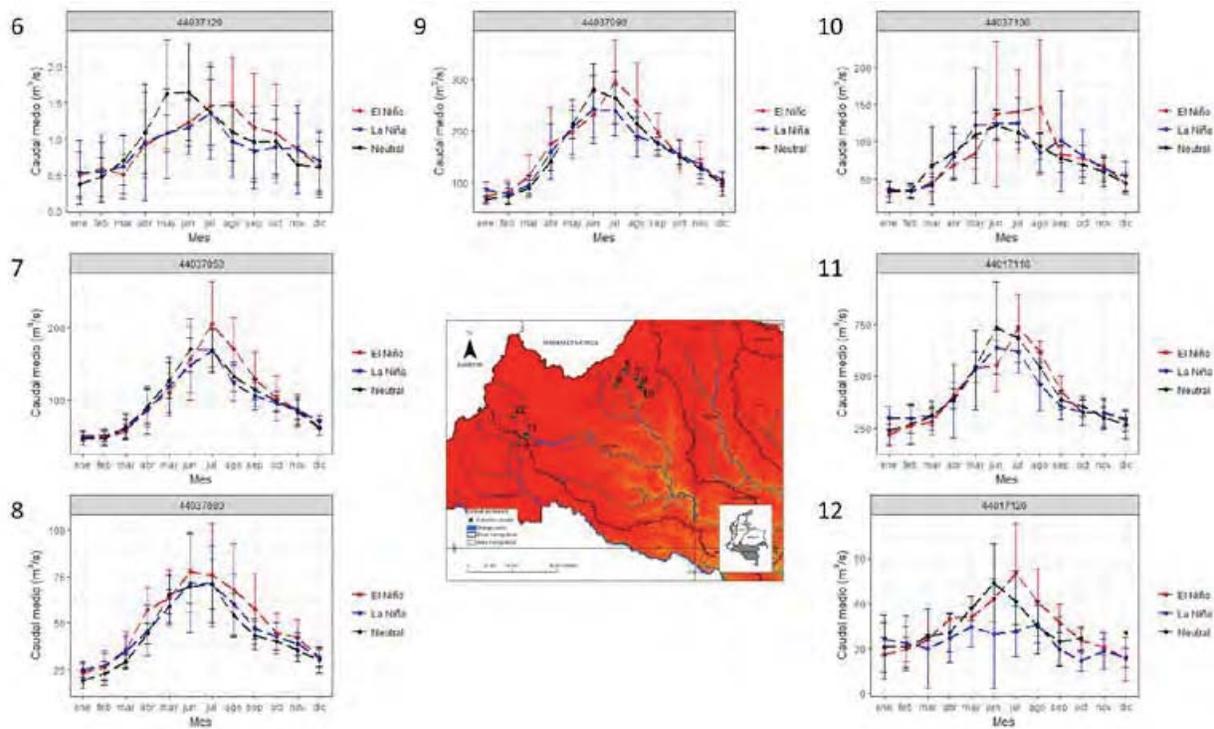


FIGURA 5. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DEL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA CAQUETÁ (AGUAS ARRIBA). LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

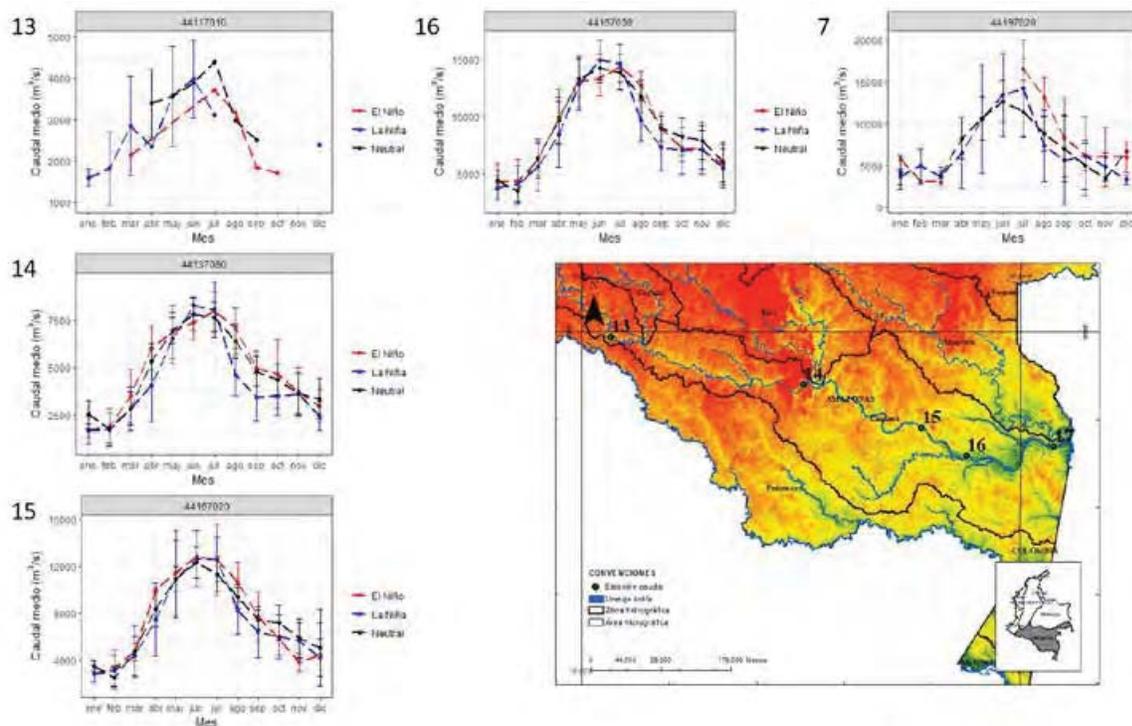


FIGURA 6. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DEL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA CAQUETÁ (AGUAS ABAJO). LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

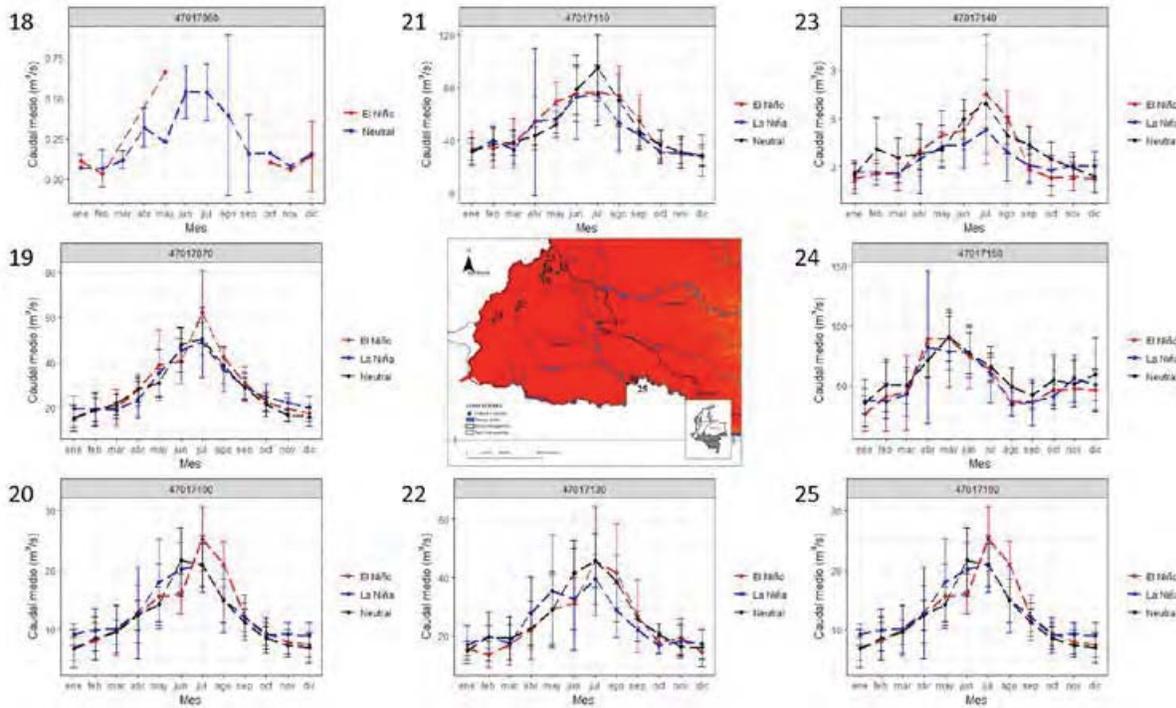


FIGURA 7. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DE EL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA PUTUMAYO (AGUAS ARRIBA). LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

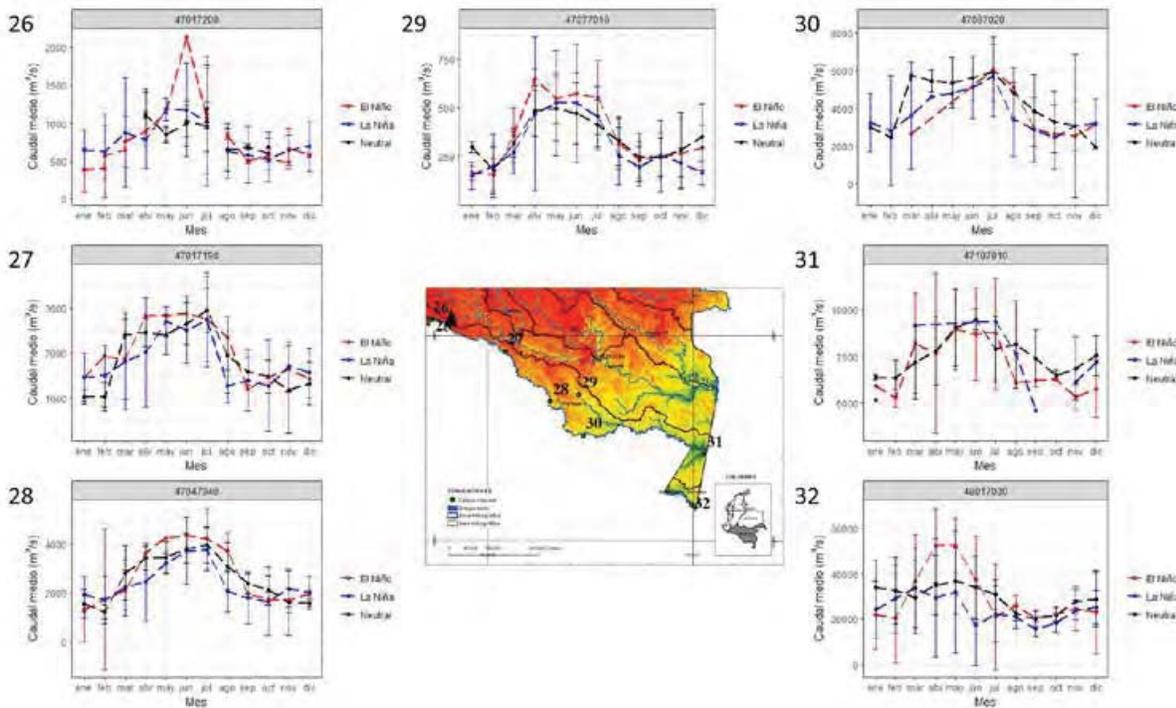


FIGURA 8. CICLO ANUAL PARA LOS CAUDALES EN LOS MESES DE EL NIÑO (ROJO), LA NIÑA (AZUL) Y NEUTROS (NEGRO), PARA ALGUNAS ESTACIONES UBICADAS EN LA ZONA HIDROGRÁFICA PUTUMAYO (AGUAS ABAJO). LAS BARRAS DE ERROR DENOTAN EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN DE LA MEDIA, σ_i/\sqrt{n} .

Estandarización de series de caudales promedios mensuales

Las series de caudales promedios mensuales estandarizadas fueron graficadas conjuntamente con la serie del ONI, con el fin de hacerlas comparables. La figura 9 muestra las series de caudales mensuales estandarizados en dos estaciones de registro, junto con la serie del ONI. Estas series se utilizaron para estimar los coeficientes de correlación simultáneos (rezago cero) y rezagados (entre -12 y 12 meses de rezago).

Anomalías estandarizadas de caudales

Las variaciones en la temperatura superficial del mar durante ambas fases del ENSO provocan fluctuaciones importantes del clima en el mundo entero y, una vez comenzadas, esas anomalías pueden durar un año o, incluso, más. Como ya se ha mencionado, los eventos de EL Niño y La Niña comienzan en la primavera del hemisferio norte (marzo a mayo) del año inicial (Año 0) y tienen su máxima intensidad entre los meses de diciembre (Año 0) y febrero

(Año +1). A su vez, los episodios de El Niño son, generalmente (aunque no siempre), seguidos por episodios de La Niña. Por ejemplo, el intenso episodio de El Niño de 1997/1998 fue seguido por un largo episodio anómalo de La Niña, que empezó hacia mediados de 1998 y terminó a principios de 2001 (WMO, 2018).

Debido a esto, se estudiaron las anomalías estandarizadas para los siguientes eventos de El Niño: 1987-1988, 1991-1992, 1994-1995, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005, 2009-2010; y para los eventos de La Niña: 1984-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1999-2000, 2007-2008 y 2010-2011.

La figura 10 (y la figura 11) muestra la evolución de los caudales estandarizados (promedios representados con una línea más gruesa) durante los años de comienzo (Año 0) y de finalización (Año +1) de los eventos históricos de El Niño (La Niña), en siete estaciones ubicadas en cinco ríos de la Amazonia colombiana (Amazonas, Putumayo, Caquetá, Caguán y Vaupés). Las anomalías hidrológicas causadas por El Niño (La Niña), difieren en tiempo, amplitud y duración.

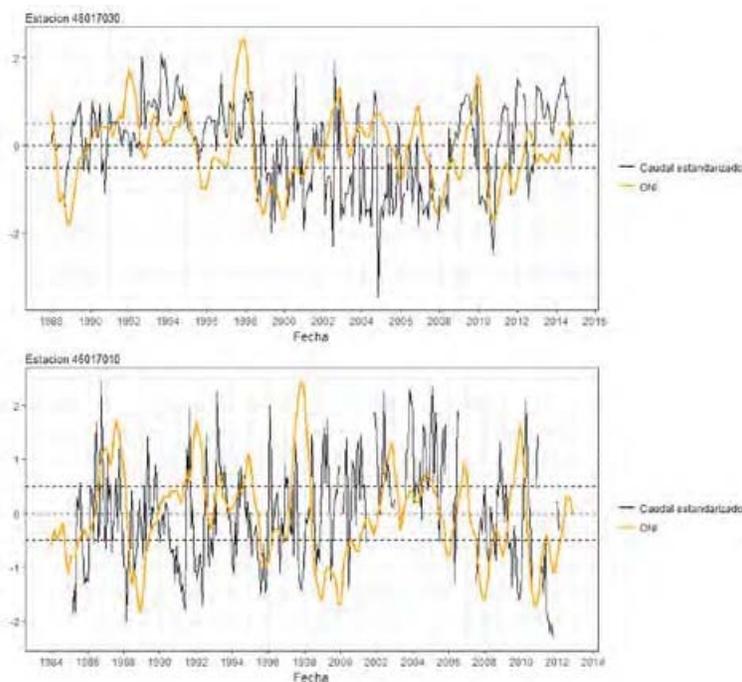


FIGURA 9. SERIES ESTANDARIZADAS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y DEL ÍNDICE OCEÁNICO DE EL NIÑO (ONI). LA ESTACIÓN 46017030 (PANEL SUPERIOR) ESTÁ UBICADA SOBRE EL RÍO AMAZONAS (AGUAS ABAJO) Y LA ESTACIÓN 46017010 (PANEL INFERIOR) ESTÁ UBICADA SOBRE EL RÍO CAGUÁN.

Las anomalías durante eventos de El Niño oscilan entre valores positivos y negativos en algunas estaciones, sin embargo, en otras la oscilación es menor permaneciendo por encima de cero durante un año y por debajo en el otro. De igual manera con la amplitud y la frecuencia de oscilaciones, siendo mayor en las estaciones ubicadas en la Alta Amazonia que en las estaciones de la Baja Amazonia (figura 10).

Durante eventos de La Niña las anomalías de caudal tienden a ser negativas, especialmente en las estaciones ubicadas en la Alta Amazonia, reflejando una relación de disminución de caudales durante la fase fría del ENSO (figura 11).

El análisis de las anomalías de caudal para las dos fases del ENSO da cuenta de cómo estos eventos pueden conducir a fuertes variaciones sobre los

caudales de esta región, es decir, cada evento de El Niño (La Niña) es diferente al igual que sus efectos.

La figura 12 (y la figura 13) muestra los gráficos de las anomalías de caudal para los distintos eventos de El Niño (La Niña). Dichos gráficos permiten concluir que los efectos de los distintos eventos de El Niño y La Niña son mezclados, con aumentos de caudales en algunos casos y disminución en otros casos. Parecería existir una cierta coherencia de las anomalías de caudales en distintas estaciones para el mismo evento de El Niño o La Niña.

Las anomalías de los eventos de El Niño de 1974-1975, 2002-2003 y 2004-2005 fueron, en promedio, predominantemente positivas. Mientras que durante los eventos de La Niña 1995-1996, 1999-2000, 2007-2008 y 2010-2012 fueron predominantemente negativas.

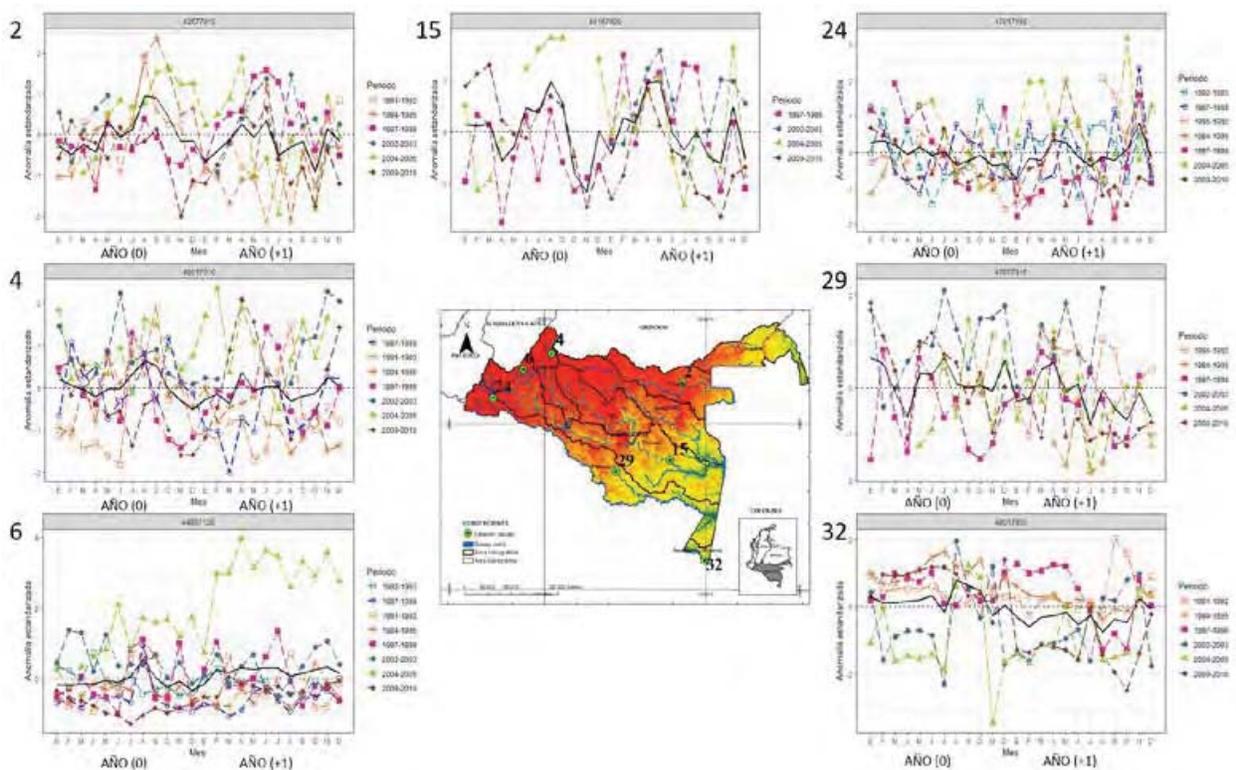


FIGURA 10. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS ANOMALÍAS ESTANDARIZADAS EN SIETE ESTACIONES DE MEDICIÓN DEL CAUDAL DE RÍOS, DURANTE EVENTOS HISTÓRICOS DE EL NIÑO DENOTADOS POR COLOR, PARA EL AÑO DE INICIO (AÑO 0) Y EL AÑO SIGUIENTE (AÑO +1). LA LÍNEA NEGRA DENOTA EL PROMEDIO DE LAS ANOMALÍAS.

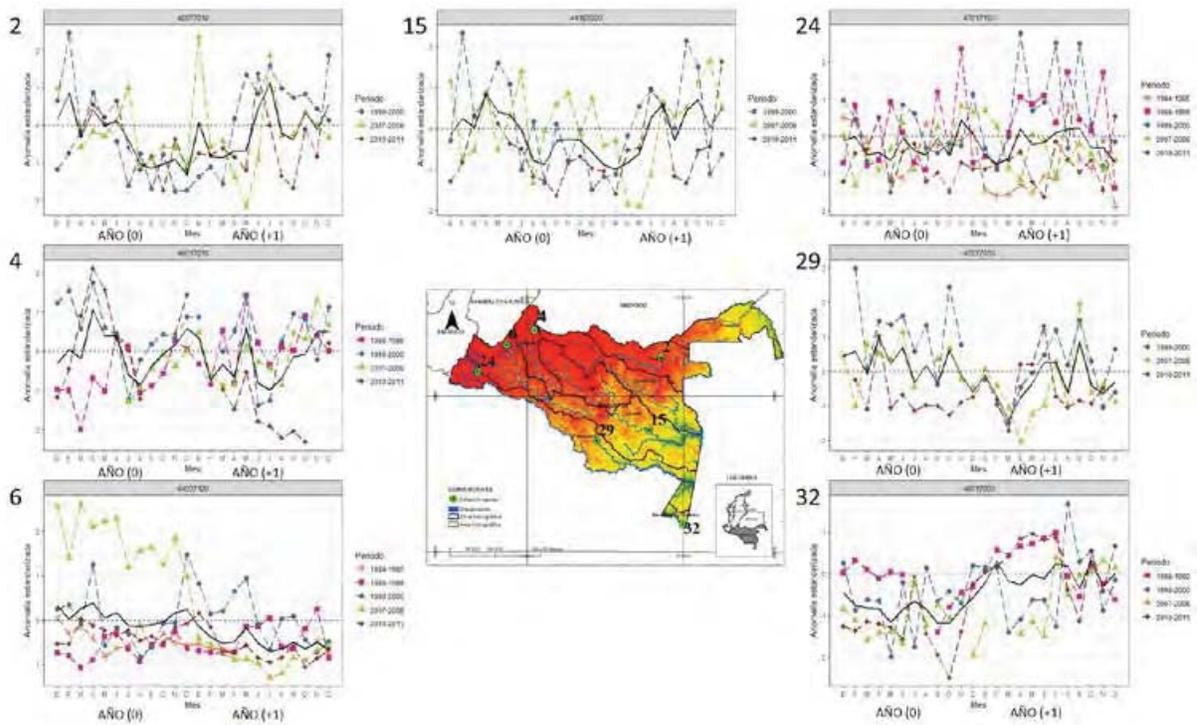


FIGURA 11. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS ANOMALÍAS ESTANDARIZADAS EN SIETE ESTACIONES DE MEDICIÓN DEL CAUDAL DE RÍOS, DURANTE EVENTOS HISTÓRICOS DE **LA NIÑA** DENOTADOS POR COLOR, PARA EL AÑO DE INICIO (AÑO 0) Y EL AÑO SIGUIENTE (AÑO +1). LA LÍNEA NEGRA DENOTA EL PROMEDIO DE LAS ANOMALÍAS.

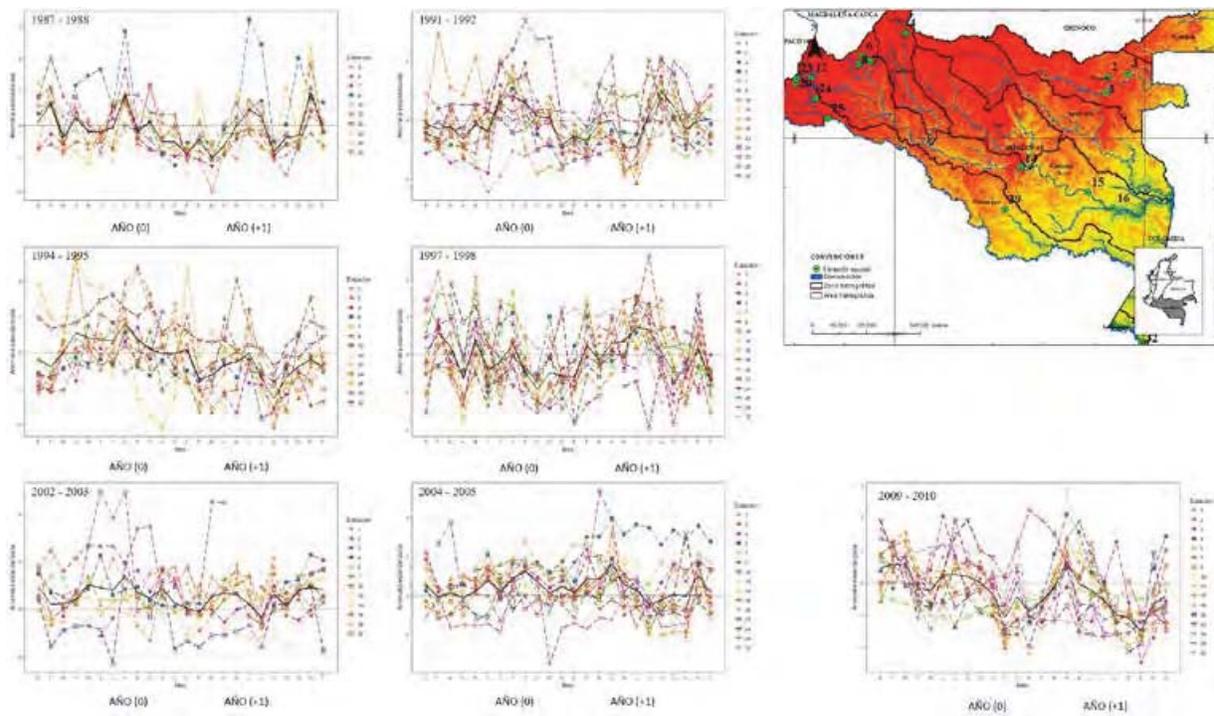


FIGURA 12. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS ANOMALÍAS ESTANDARIZADAS EN SIETE ESTACIONES DE MEDICIÓN DEL CAUDAL DE RÍOS, DURANTE EVENTOS HISTÓRICOS DE **EL NIÑO** DENOTADOS POR COLOR, PARA EL AÑO DE INICIO (AÑO 0) Y EL AÑO SIGUIENTE (AÑO +1). LA LÍNEA NEGRA DENOTA EL PROMEDIO DE LAS ANOMALÍAS.

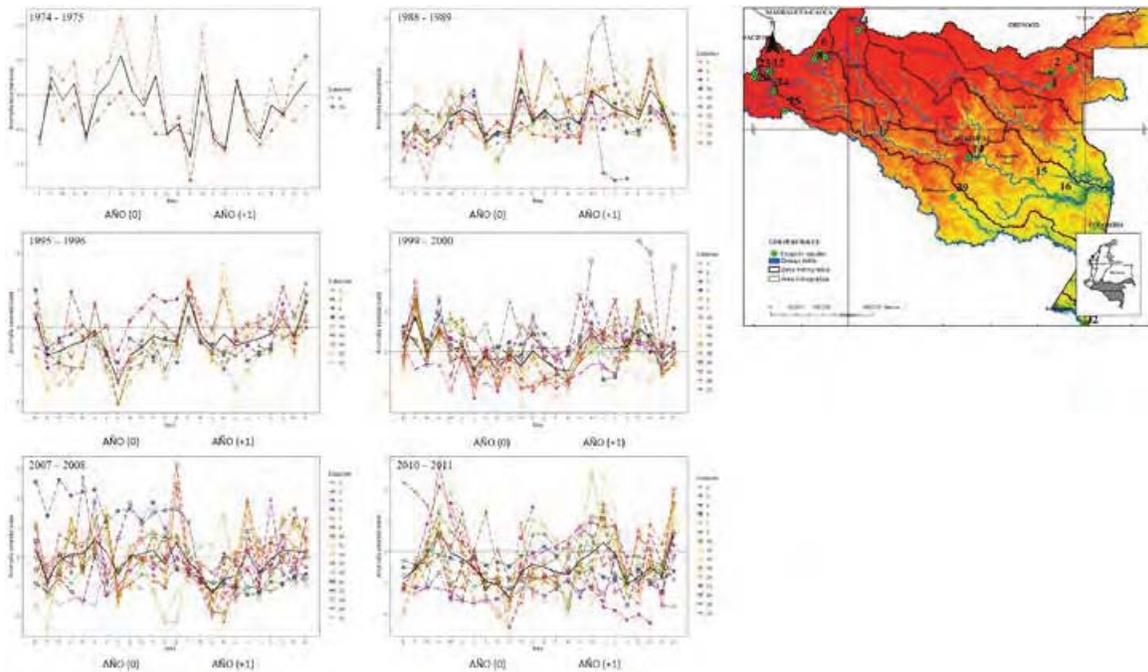


FIGURA 13. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS ANOMALÍAS ESTANDARIZADAS EN SIETE ESTACIONES DE MEDICIÓN DEL CAUDAL DE RÍOS, DURANTE EVENTOS HISTÓRICOS DE LA NIÑA DENOTADOS POR COLOR, PARA EL AÑO DE INICIO (AÑO 0) Y EL AÑO SIGUIENTE (AÑO +1). LA LÍNEA NEGRA DENOTA EL PROMEDIO DE LAS ANOMALÍAS.

Análisis de correlación entre las series del ONI y de caudales

En la figura 14 se presentan los resultados de los análisis de correlaciones cruzadas para rezagos entre -12 y 12 meses. Los rezagos negativos cuantifican la correlación en el caso en que el ONI antecede a los caudales estandarizados y viceversa para los rezagos positivos.

Los correlogramas cruzados rezagados entre el ONI y las series estandarizadas de caudal indican que el ONI tiene un efecto retardado de tres, cuatro y cinco meses sobre los caudales en la mayoría de las estaciones. Además, las correlaciones positivas tienen coherencia con los gráficos del ciclo anual para años de El Niño, La Niña y Neutros. En algunas estaciones se evidencia que eventos de El Niño tienen correspondencia con un aumento en las anomalías de los caudales, mientras que en eventos de La Niña tienen disminución. Por otro lado, se evidencian valores de correlación muy bajos (la mayoría no significativos) y esto se le atribuye a

la “frontera climática” que presenta una señal del ENSO mezclada en esta región. Tal “frontera climática” entre Colombia y Ecuador se refiere a que las anomalías hidrológicas causadas por los diferentes eventos de El Niño no son siempre del mismo signo: a veces son de déficits y otras veces son de excesos hidrológicos, pero esa delimitación no es completamente clara ni unívoca en el tiempo.

Una pregunta relevante en relación a la cuantificación de los efectos del ENSO sobre la hidrología de la Amazonia colombiana, se refiere a cuáles son los trimestres del año que son afectados de manera más fuerte por el ENSO. Para ello se estimaron los coeficientes de correlación cruzados trimestrales entre las series trimestrales del ONI y de los caudales promedios trimestrales (en este caso sin estandarizar). En la figura 15 se presentan las matrices de correlaciones trimestrales cruzadas rezagadas, calculadas para siete estaciones en la Amazonia colombiana. Los resultados muestran valores de correlación bajos para las siete estaciones de caudal examinadas, lo que refuerza la idea de que el ENSO no presenta una señal clara en esta región (figura 15).

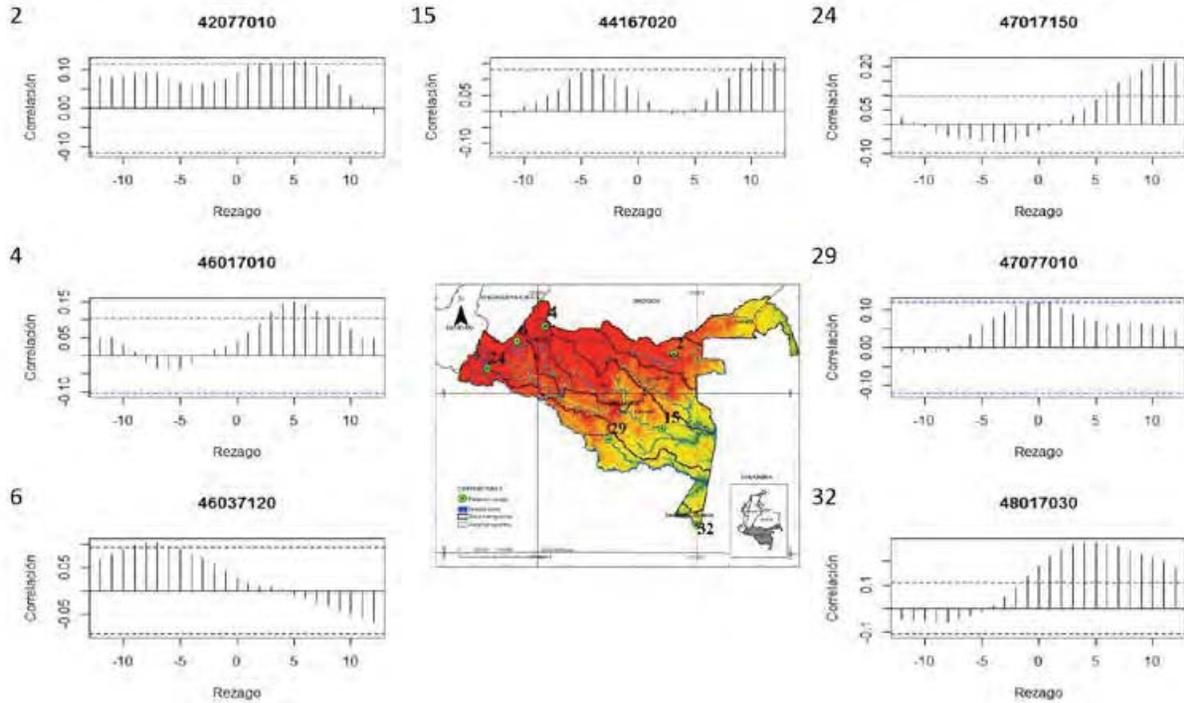


FIGURA 14. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CORRELACIÓN REZAGADA ENTRE LA SERIE DEL ÍNDICE OCEÁNICO EL NIÑO (ONI) Y LAS SERIES DE CAUDALES MENSUALES ESTANDARIZADOS EN ESTACIONES UBICADAS EN LAS ZONAS HIDROGRÁFICAS DE INTERÉS.

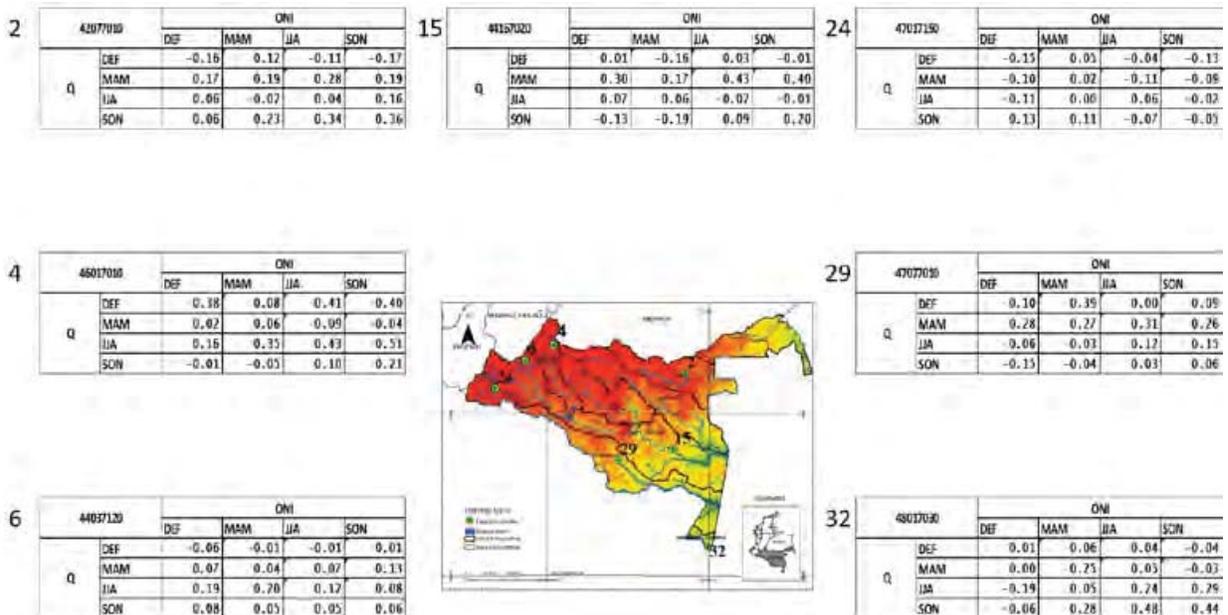


FIGURA 15. RESULTADOS DE LAS MATRICES DE CORRELACIÓN CRUZADA ENTRE LAS SERIES TRIMESTRALES DEL ONI Y DE LOS PROMEDIOS TRIMESTRALES DE LOS CAUDALES OBSERVADOS (SIN ESTANDARIZAR) PARA SIETE ESTACIONES LOCALIZADAS EN RÍOS DE LA AMAZONIA COLOMBIANA.

Efectos del ENSO sobre la precipitación, la evaporación, el Índice de Sequía y la escorrentía

El diagnóstico de los efectos de El Niño y La Niña sobre las otras variables del ciclo hidrológico se basa en el comportamiento de la precipitación, la escorrentía, la evapotranspiración y el Índice de Sequías, con información obtenida del Reanálisis y bases de datos descritos anteriormente.

La figura 16 muestra los resultados de las anomalías en los campos de intensidad de la precipitación (mm/día), en el norte de América del Sur, para los distintos eventos de El Niño, durante el período de estudio, según datos del Reanálisis NCEP/NCAR. Las anomalías se estiman con respecto al período 1981-2010. Una primera inspección indica que

dicha variable se comporta de manera diferente para la Alta Amazonia (Alto Caquetá) y para la región del Vaupés (que se denominará como Baja Amazonia). La síntesis de los resultados de las anomalías identificadas en los distintos eventos de El Niño sobre las regiones de la Alta y Baja Amazonia, se presenta en el cuadro 2 para las cuatro variables y bases de datos descritas con anterioridad. La información del cuadro 2 es producto de la interpretación de: la figura 16, Anomalías de precipitación (NCEP/NCAR); la figura 17, Anomalías de precipitación (MERRA-2); la figura 18, Correlación entre los campos de precipitación y evapotranspiración (MERRA-2); la figura 19, Comportamiento del Índice de Severidad de Sequías de Palmer y la figura 20, Escorrentía superficial.

Los resultados presentados en el cuadro 2 permiten extraer las siguientes conclusiones:

CUADRO 2. COMPORTAMIENTO DE DIVERSAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS DURANTE LOS DISTINTOS EVENTOS HISTÓRICOS DE EL NIÑO PARA LAS REGIONES DE LA ALTA Y BAJA AMAZONIA COLOMBIANA: ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN LOS REANÁLISIS NCEP/NCAR (COLUMNA 3) Y MERRA-2 (COLUMNA 4). COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN (COLUMNA 5), ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍAS DE PALMER (COLUMNA 6) Y ANOMALÍAS DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL REANÁLISIS NCEP/NCAR (COLUMNA 7).

Evento El Niño	Amazonia	Anomalías Precipitación NCEP/NCAR (mm/día)	Anomalías Precipitación MERRA-2 (mm/día)	Correlación P vs E MERRA-2	PDSI	Escorrentía (kg/m ²)
Abril 1982 – Junio 1983	Alta	-1,0	-1,0	0,4	2,0	0,75
	Baja	1,5	-2,0	-0,6	1,0	1,5
Septiembre 1986- Febrero 1988	Alta	-1,0	-0,4	0,3	1,0	0
	Baja	0,0	-0,8	0,3	1,0	0,5
Mayo 1991 – Junio 1992	Alta	-1,5	-1,0	0,6	-2,0	0
	Baja	0,0	-3,0	-0,6	-0,5	0
Septiembre 1994 – Marzo 1995	Alta	-1,0	0,0	0,6	1,0	0
	Baja	-1,5	0,0	-0,6	3,0	0
Mayo 1997 – Mayo 1998	Alta	-4,0	2,0	0,7	0,5	-1,0
	Baja	-2,0	-1,0	-0,4	1,0	-2,0
Junio 2002 – Febrero 2003	Alta	1,0	0,0	0,3	1,0	0,5
	Baja	-0,5	0,0	-0,6	2,0	-0,5
Julio 2004 – Febrero 2005	Alta	1,0	0,0	0,7	2,5	-0,5
	Baja	-1,0	2,5	-0,6	1,0	-1,5
Septiembre 2006–Febrero 2007	Alta	0,0	1,0	0,5	2,0	-2,0
	Baja	0,0	2,0	-0,6	3,0	-3,0
Julio 2009 – Marzo 2010	Alta	2,0	0,0	0,3	2,0	2,0
	Baja	0,5	0,0	-0,3	3,0	1,0
Noviembre 2014 – Marzo 2016	Alta	2,0	2,0	0,6	-	0
	Baja	0,0	2,0	-0,5	-	0
Rango y Promedio	Alta	[-4,0 a 2,0] -0,3	[-1,0 a 2,0] 0,3	[0,3 a 0,7] 0,5	[-2,0 a 2,5] 1,0	[-2 a 0,75] -0,02
	Baja	[-2,0 a 1,5] -0,3	[-3,0 a 2,5] 0,0	[-0,6 a 0,3] -0,5	[-0,5 a 3,0] 1,6	[-3,0 a 1,5] -0,39

1. Mediante el Reanálisis NCEP/NCAR se identifican, en general, anomalías negativas (disminución) en la intensidad de la precipitación durante los eventos de El Niño, del orden de 0,3 mm/día tanto para la Alta como para la Baja Amazonia.
2. Mediante el Reanálisis MERRA-2 se identifican, en general, anomalías positivas (aumento) en la intensidad de la precipitación durante los eventos de El Niño, del orden de 0,3 mm/día para la Alta Amazonia, y una mezcla de aumentos y disminuciones para la Baja Amazonia, lo cual se evidencia en un valor promedio nulo para las anomalías.
3. Los valores del coeficiente de correlación entre los campos de la precipitación y de la evapotranspiración indican que, mayoritariamente se presenta un comportamiento diferente entre la Alta Amazonia (coeficiente de correlación de 0,5) y la Baja Amazonia (coeficiente de correlación de -0,5). Este es un resultado muy interesante, porque denota una dinámica hidrológica diferente entre ambas regiones de la Amazonia colombiana y que es necesario profundizar la investigación sobre ese tema.
4. Los valores del PDSI indican, en general, una mayor presencia de humedad en el suelo durante los eventos de El Niño, lo cual se evidencia en un valor promedio de 1,0 para la Alta Amazonia y de 1,6 para la Baja Amazonia.
5. Los valores de las anomalías en la escorrentía, según el Reanálisis NCEP/NCAR indican anomalías negativas, más en la Baja Amazonia que en la Alta Amazonia.

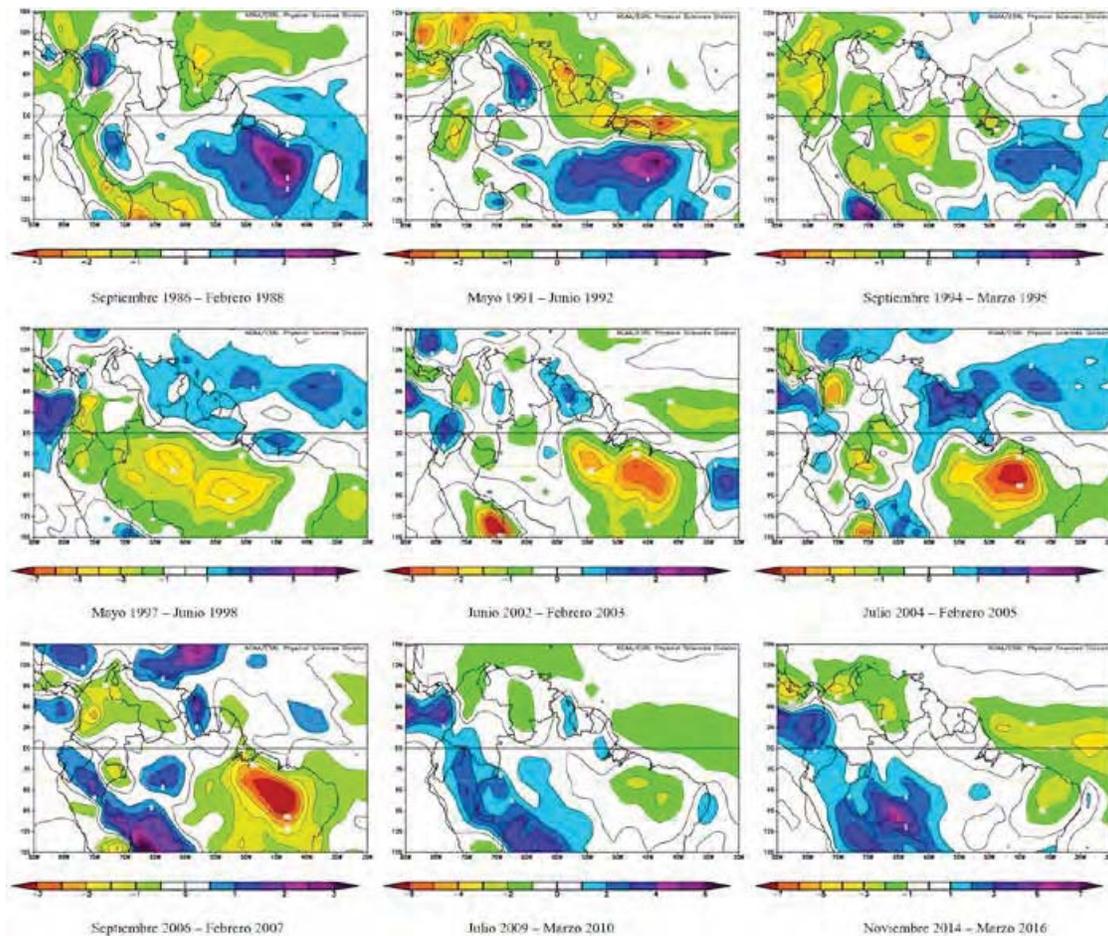


FIGURA 16. ANOMALÍAS EN LOS CAMPOS DE INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN (MM/DÍA) EN EL NORTE DE AMÉRICA DEL SUR, PARA LOS DISTINTOS EVENTOS DE EL NIÑO DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO, SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS NCEP/NCAR. LAS ANOMALÍAS SE ESTIMAN CON RESPECTO AL PERÍODO 1986-2016.

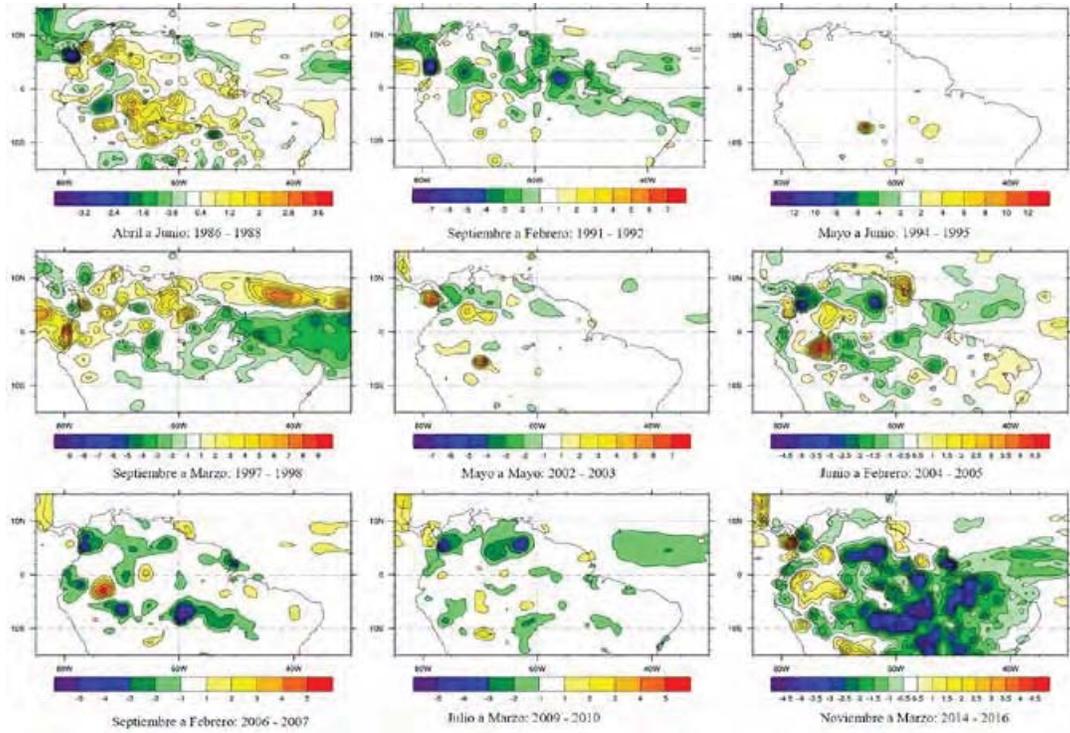


FIGURA 17. ANOMALÍAS EN LOS CAMPOS DE INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN (MM/DÍA) EN EL NORTE DE AMÉRICA DEL SUR, PARA LOS DISTINTOS EVENTOS DE EL NIÑO DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO, SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS MERRA-2. LAS ANOMALÍAS SE ESTIMAN CON RESPECTO AL PERÍODO 1986-2016

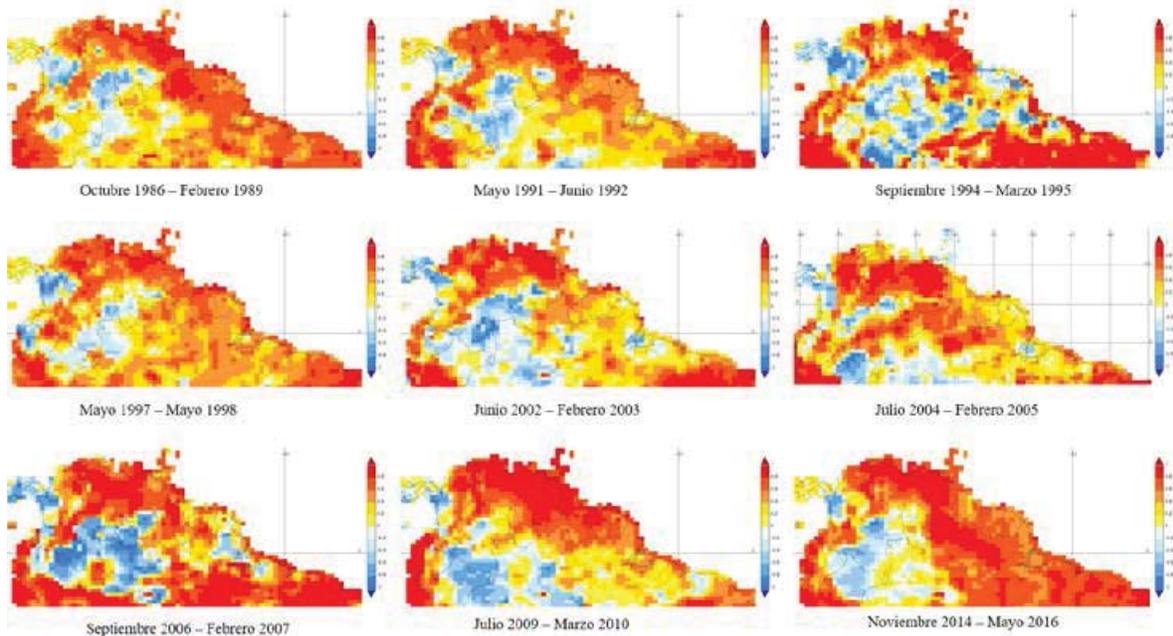


FIGURA 18. MAPAS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS DE EVAPORACIÓN TERRESTRE MENSUAL Y LA PRECIPITACIÓN SUPERFICIAL TOTAL SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS MERRA-2 PARA DIFERENTES EVENTOS DE EL NIÑO. FUENTE DE LOS DATOS: SISTEMA DE DATOS EN LÍNEA GIOVANNI, DESARROLLADO Y MANTENIDO POR NASA GES DISC (ACKER Y LEPTOUKH, 2007).

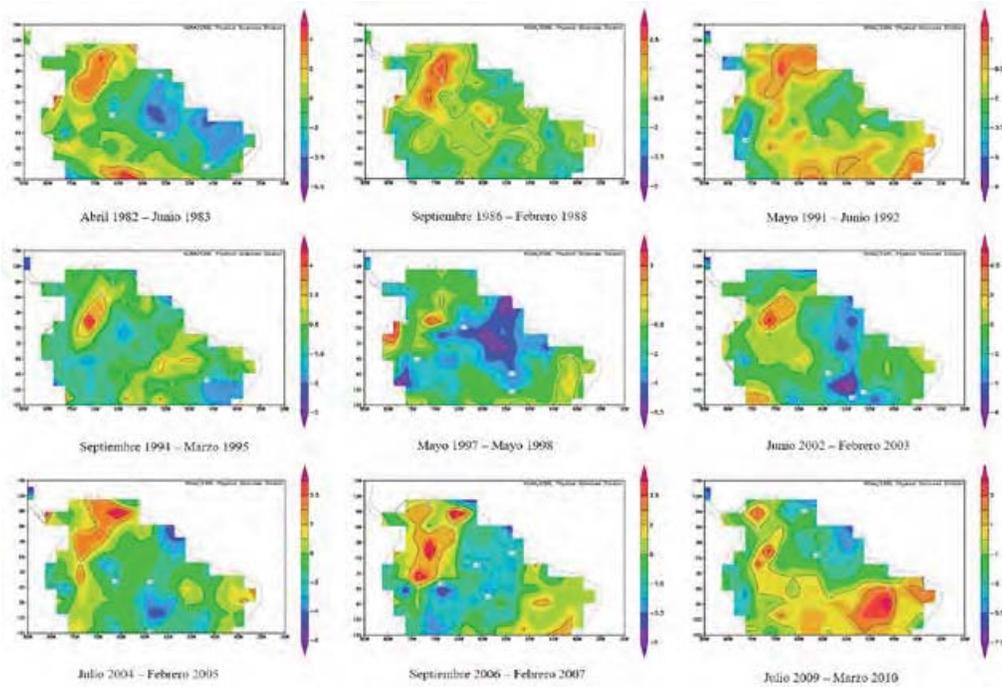


FIGURA 19. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍAS DE PALMER (PSI) DURANTE LOS EVENTOS DE EL NIÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO 1982-2010.

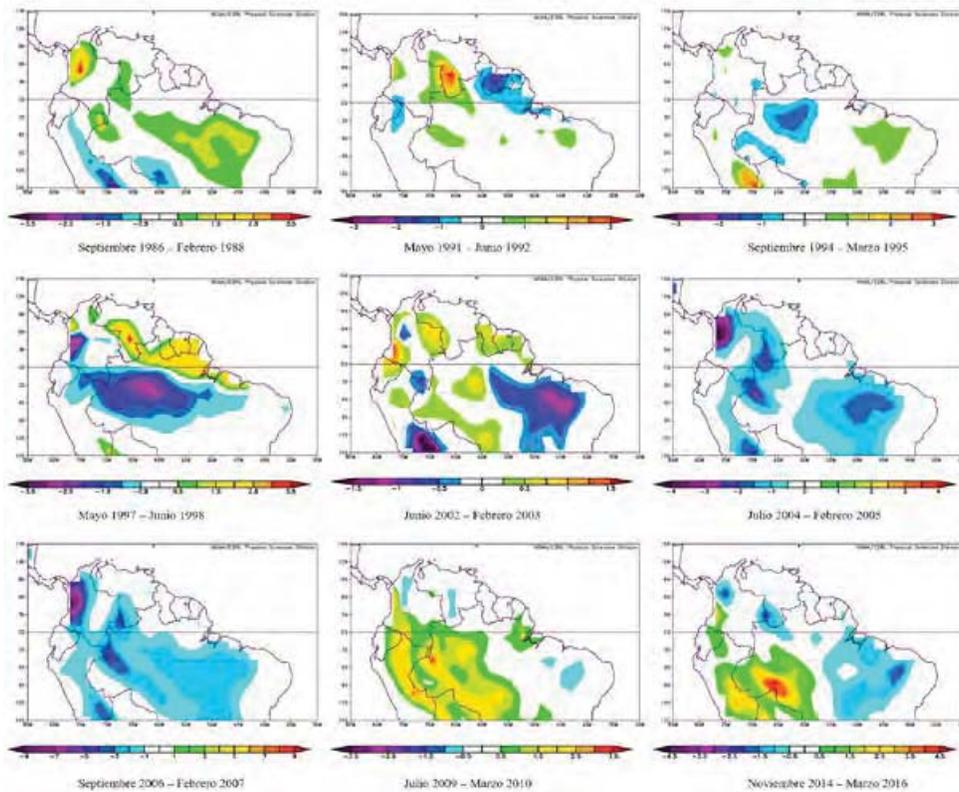


FIGURA 20. COMPORTAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DURANTE LOS EVENTOS DE EL NIÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO 1986-2016.

La figura 21 muestra los resultados de las anomalías en los campos de intensidad de la precipitación (mm/día), en el norte de América del Sur, para los distintos eventos de La Niña (1984-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1998-2001, 2005-2006, 2007-2008, 2010-2012, 2017-2018), según datos del Reanálisis NCEP/NCAR. Las anomalías se estiman con respecto al período 1984-2018. Aquí se reitera la anotación hecha para los gráficos de esta variable durante los eventos de El Niño: una primera inspección indica que dicha variable se comporta de manera diferente para la Alta Amazonia (Alto Caquetá) que para la región del Vaupés (Baja Amazonia). La síntesis de los resultados de las anomalías identificadas para los distintos eventos de El Niño sobre las regiones de la Alta y Baja Amazonia, se presenta en el cuadro 3 para las cuatro variables y bases de datos descritas anteriormente. La información del cuadro 3 es producto de la interpretación de: la figura 21, Anomalías de precipitación (NCEP/NCAR); la figura 22, Anomalías de precipitación

(MERRA-2); la figura 23, Correlación entre los campos de precipitación y evapotranspiración (MERRA-2); la figura 24, Comportamiento del Índice de Severidad de Sequías de Palmer y la figura 25, Escorrenría superficial.

Los resultados del cuadro 3, para el caso de La Niña, ponen de presente las siguientes conclusiones:

1. Mediante el Reanálisis NCEP/NCAR se identifican, en general, anomalías positivas (aumento) en la intensidad de la precipitación durante los eventos de La Niña, del orden de 0,68 mm/día para la Alta Amazonia y de 0,8 mm/día para la Baja Amazonia.
2. Mediante el Reanálisis MERRA-2 se identifican, en general, anomalías positivas (aumento) en la intensidad de la precipitación durante los eventos de La Niña, del orden de 0,12 mm/día para la Alta Amazonia, y de 0,55 mm/día para la Baja Amazonia.

CUADRO 3. COMPORTAMIENTO DE DIVERSAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS DURANTE LOS DISTINTOS EVENTOS HISTÓRICOS DE LA NIÑA PARA LAS REGIONES DE LA ALTA Y BAJA AMAZONIA COLOMBIANA: ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN LOS REANÁLISIS NCEP/NCAR (COLUMNA 3) Y MERRA-2 (COLUMNA 4). COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN (COLUMNA 5), ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍAS DE PALMER (COLUMNA 6) Y ANOMALÍAS DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL REANÁLISIS NCEP/NCAR (COLUMNA 7).

Evento La Niña	Amazonia	Anomalías Precipitación NCEP/NCAR	Anomalías Precipitación MERRA-2	Correlación P vs E MERRA-2	PDSI	Escorrenría (kg/m ²)
Octubre 1984 – Agosto 1985	Alta	-0,5	0	0,6	-2	0,6
	Baja	1	-1	-0,5	-1,4	1,5
Mayo 1988 – Mayo 1989	Alta	-2,5	2	0,4	0,5	-0,5
	Baja	1,5	2	-0,6	-1	1,5
Agosto 1995 – Marzo 1996	Alta	-0,5	0	0,6	-0,5	0,5
	Baja	-1,5	3	0,4	-2	-1,0
Julio 1998 – Febrero 2001	Alta	-0,6	0	0,4	-	0
	Baja	-0,6	0,4	-0,6	-	-0,4
Noviembre 2005 – Marzo 2006	Alta	1,5	0	0,6	2	-0,5
	Baja	0	1	-0,6	3	-2,0
Junio 2007 – Julio 2008	Alta	2,5	-1	0,8	2,5	0,25
	Baja	2	0	0,4	2	0
Junio 2010 – Marzo 2012	Alta	2,5	0	0,2	0,5	0
	Baja	2	-1	0	0,5	-0,5
Octubre 2017 – Marzo 2018	Alta	3	0	0,6	-	3,0
	Baja	2	0	-0,6	-	2,0
Rango y Promedio	Alta	[-2,5 a 3] 0,68	[-1,0 a 2,0] 0,12	[0,2 a 0,8] 0,53	[-2, a 2,0] 0,5	[-0,5 a 3,0] 0,44
	Baja	[-1,5 a 2,0] 0,8	[-1,0 a 3,0] 0,55	[-0,6 a 0,4] -0,26	[-2,0 a 3] 0,18	[-2,0 a 2,0] 0,23

3. Los valores del coeficiente de correlación entre los campos de la precipitación y de la evapotranspiración indican que, mayoritariamente se presenta un comportamiento diferente entre la Alta Amazonia (coeficiente de correlación de 0,53) y la Baja Amazonia (coeficiente de correlación de -0,26). Aquí también se evidencia una dinámica hidrológica diferente entre ambas regiones de la Amazonia colombiana y la necesidad de profundizar las investigaciones al respecto.
4. Los valores del PDSI indican, en general, una mayor presencia de humedad en el suelo durante los eventos de La Niña, lo cual se evidencia en un valor promedio de 0,5 para la Alta Amazonia y de 0,18 para la Baja Amazonia.
5. Los valores de las anomalías en la escorrentía, según el Reanálisis NCEP/NCAR indican anomalías positivas, más en la Alta Amazonia que en la Baja Amazonia.

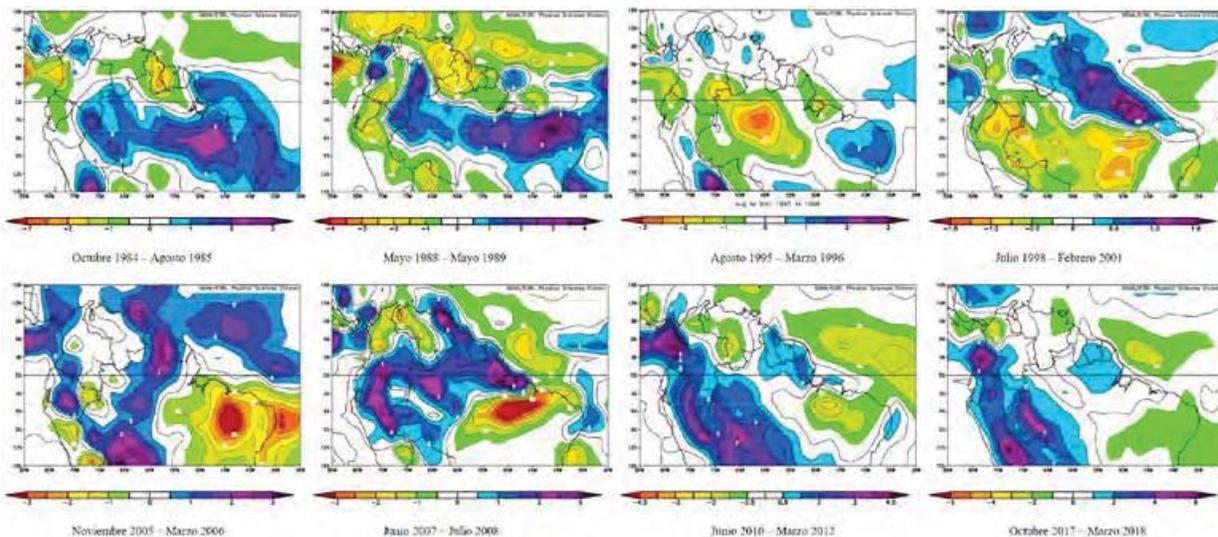


FIGURA 21. ANOMALÍAS EN LOS CAMPOS DE INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN (MM/DÍA) EN EL NORTE DE AMÉRICA DEL SUR, PARA LOS DISTINTOS EVENTOS DE LA NIÑA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO, SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS NCEP/NCAR. LAS ANOMALÍAS SE ESTIMAN CON RESPECTO AL PERÍODO 1984-2018.

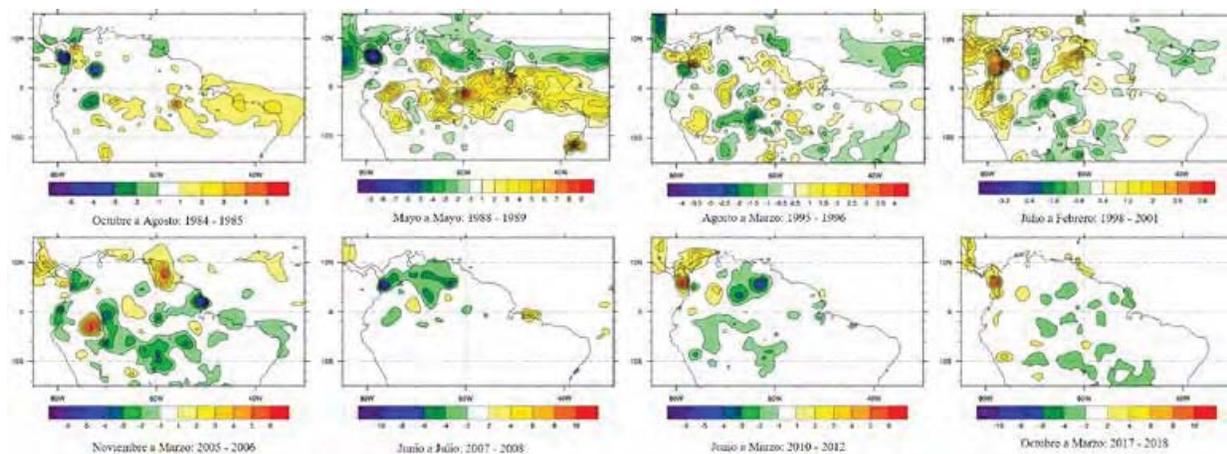


FIGURA 22. ANOMALÍAS EN LOS CAMPOS DE INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN (MM/DÍA) EN EL NORTE DE AMÉRICA DEL SUR, PARA LOS DISTINTOS EVENTOS DE LA NIÑA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO, SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS MERRA-2. LAS ANOMALÍAS SE ESTIMAN CON RESPECTO AL PERÍODO 1984-2018.

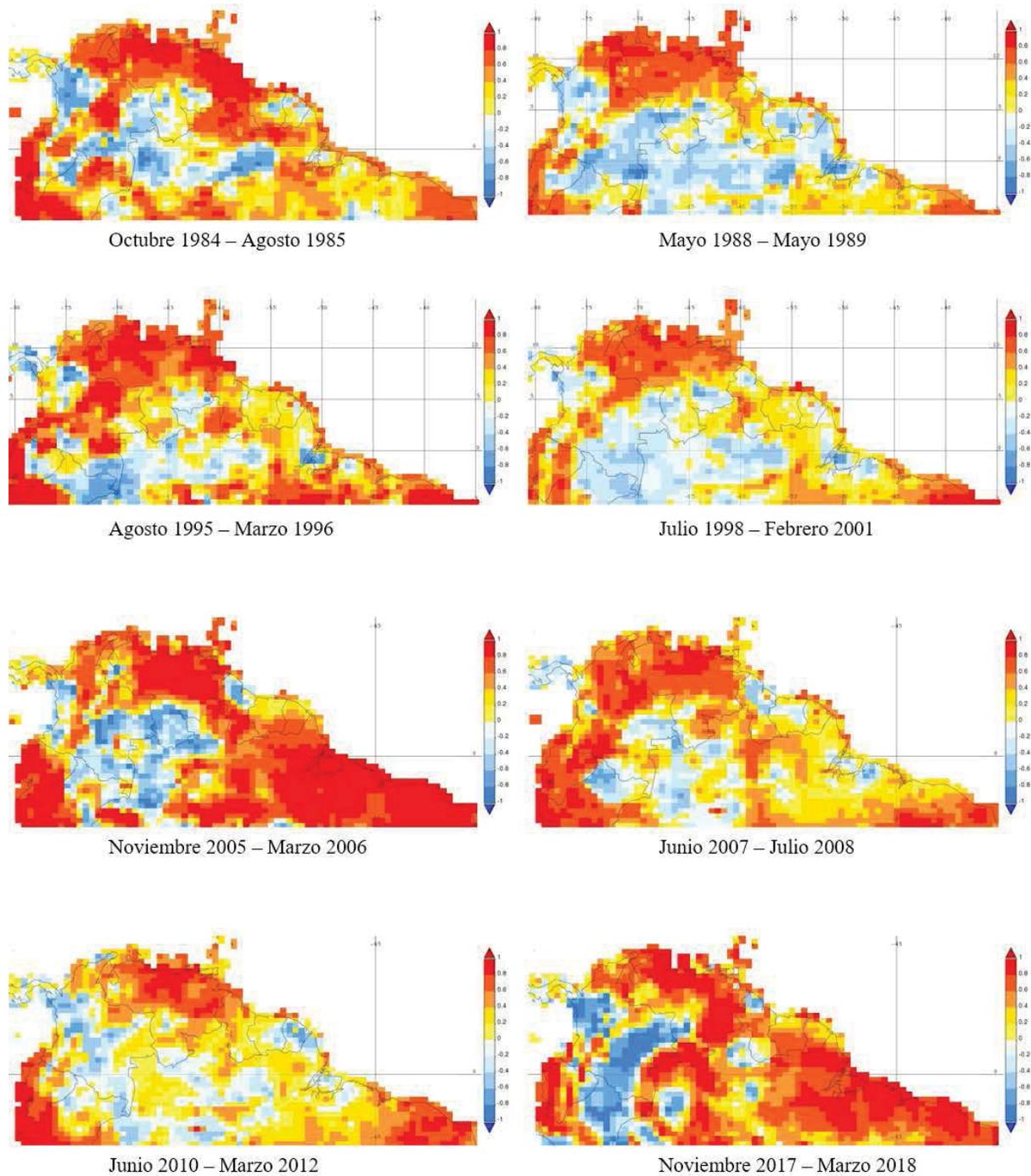


FIGURA 23. MAPAS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS DE EVAPORACIÓN TERRESTRE MENSUAL Y LA PRECIPITACIÓN SUPERFICIAL TOTAL SEGÚN DATOS DEL REANÁLISIS MERRA-2 PARA DIFERENTES EVENTOS DE LA NIÑA. FUENTE DE LOS DATOS: SISTEMA DE DATOS EN LÍNEA GIOVANNI, DESARROLLADO Y MANTENIDO POR NASA GES DISC (ACKER Y LEPTOUKH, 2007).

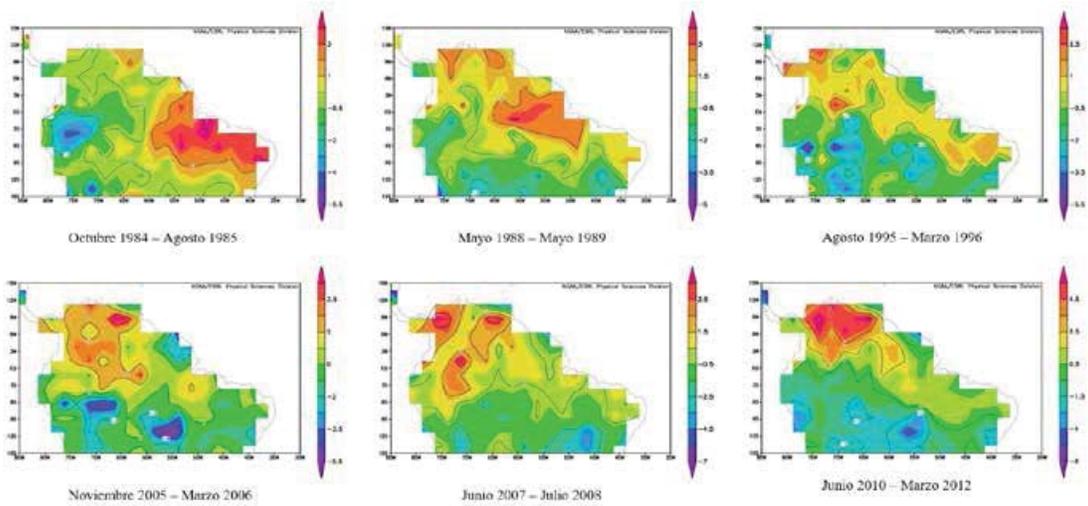


FIGURA 24. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍAS DE PALMER (PSI) DURANTE LOS EVENTOS DE LA NIÑA DEL PERIODO DE ESTUDIO 1984-2012.

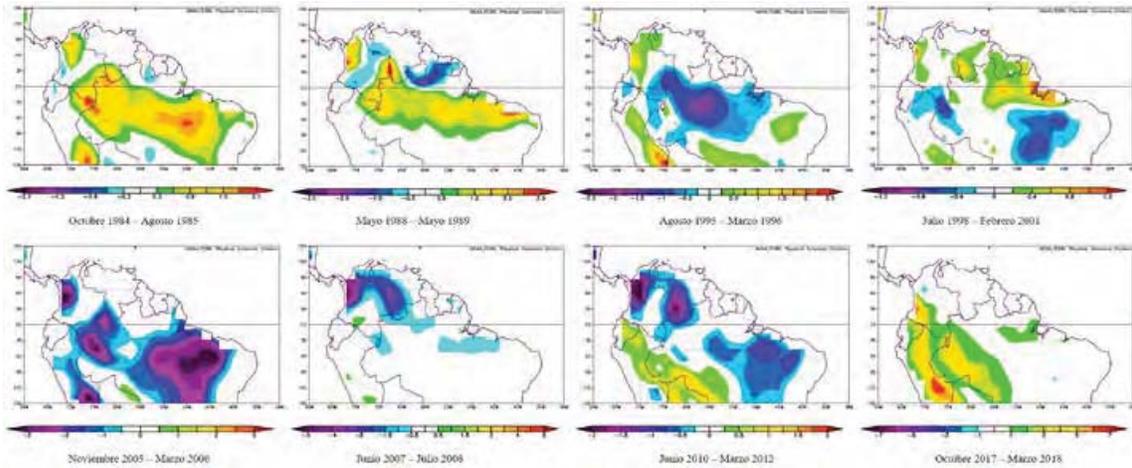


FIGURA 25. COMPORTAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DURANTE LOS EVENTOS DE LA NIÑA DEL PERIODO DE ESTUDIO 1984-2018.

CONCLUSIONES

El ciclo anual de los caudales medios en la cuenca amazónica es de tipo unimodal, con valores máximos (mínimos) durante el verano (invierno) del hemisferio norte, reflejando la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical.

Los resultados del estudio indican que los efectos de El Niño y La Niña sobre la hidrología de la Amazonia colombiana son mezclados y no exhiben una relación definitivamente clara, aunque las anomalías tienden a ser positivas (aumentos) durante la

fase fría (La Niña) y negativas durante la fase cálida (El Niño).

La Amazonia colombiana está localizada en un límite climático en donde los efectos de El Niño y La Niña cambian de signo, y de allí que la señal del ENSO no sea tan clara como en otras regiones del país. Muchos más estudios y con series de tiempo más largas, serán necesarios para detectar dicha señal con claridad y significancia estadística y, más aún, para entender los mecanismos físicos que la explican, tanto desde el punto de vista de las teleconexiones

como de las retroalimentaciones suelo-atmósfera, que juegan un papel fundamental en la dinámica del ENSO sobre la cuenca amazónica.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de precipitación, escorrentía, evaporación y del Índice de Severidad de Sequías de Palmer, provenientes del Reanálisis NCEP/NCAR y MERRA-2, fueron suministrados por NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EE. UU., de su sitio Web en <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Las figuras 22 y 23 fueron producidas usando el sistema de datos en línea Giovanni, desarrollado y mantenido por NASA GES DISC.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno, P., 1989 – On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: upper-air circulation, *Journal of Climate*, 2: 341-355.
- Aceituno, P., Prieto, M., Solari, M., Martínez, A., Poveda, G. y Falvey, M. (2009). The 1877-1878 El Niño episode: Climate anomalies in South America and associated impacts. *Clim. Change*, 92, 389-416.
- Acker, J. y Leptoukh, G. (2007). Online analysis enhances use of NASA Earth science data, *Eos, Trans. AGU*, 88(2), 14-17.
- Allan, R., Lindesay, J. y Parker, D. (1996). *El Niño Southern Oscillation and Climatic Variability*. Collingwood, Vic., Australia: CSIRO.
- Arias, P., Martínez, J. y Vieira, S. (2015). Moisture sources to the 2010-2012 anomalous wet season in northern South America. *Clim. Dyn.*, 45, 2861-2884.
- Bedoya-Soto, J., Poveda, G., Trenberth, K. y Vélez, J. (2018). Interannual hydro-climatic variability and the 2009-2011 extreme ENSO phases in Colombia: From Andean glaciers to Caribbean low-lands. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-018-2452-2
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 97, 163-172.
- Botta, A., Ramankutty, N. y Foley, J. (2002). Long-term variations of climate and carbon fluxes over the Amazon basin. *Geophys. Res. Lett.*, 29(9), 1319. doi:10.1029/2001GL013607
- Builes-Jaramillo, L. y Poveda, G. (2018). Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes-Amazon system. *Water Resources Research*, 54(5), 3472-3489. doi: 10.1029/2017WR021338
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S., Castro-Díez, Y. y Esteban-Parra, M. (2014). Influence of tropical Pacific SST on seasonal precipitation in Colombia: Prediction using El Niño and El Niño Modoki. *Climate Dynamics*, 44, 1293-1310.
- . (2016). Seasonal streamflow prediction in Colombia using atmospheric and oceanic patterns. *Journal of Hydrology*, 538, 1-12. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.04.003.
- Dai, A. (2011a). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008. *J. Geophys. Res.*, 116, D12115.
- . (2011b). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 45-65.
- Dai, A., Trenberth, K. y Qian, T. (2004). A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydromet.*, 5, 1117-1130.
- Davidson, E., De Araujo, A., Artaxo, P., Balch, J., Brown, I., Bustamante, M. y Wofsy, S. (2012). The Amazon Basin in transition. *Nature*, 481, 321-328.
- Díaz, H. y Markgraf, V. (eds.). (2000). *El Niño and the Southern Oscillation, Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Nueva York, EE.UU.: Cambridge University Press.
- Douglass, D., Knox, R., Curtis, S., Giese, B. y Ray, S. (2017). Historical phase-locked El Niño episodes. *Atmos. Clim. Sci.*, 7(01), 48-64. doi:10.4236/acs.2017.71005
- Eagleson, P. (1994). The evolution of modern hydrology (from watershed to continent in 30 year). *Advances in Water Resources*, 17, 3-18.
- Foley, J., Botta, A., Coe, M. y Costa, M. (2002). El Niño–Southern Oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1132. doi: 10.1029/2002GB001872

- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M., Todling, R., Molod, A., Takacs, L. y Zhao, B. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, 30, 5419-5454.
- Gutiérrez, F. y Dracup, J. (2001). An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño-Southern Oscillation indicators. *J. Hydrol.*, 246(1), 181-196.
- HIMAT. (1978). Resolución 0337 por medio de la cual se adopta un sistema de codificación para las estaciones hidrometeorológicas. Bogotá D.E.: Ministerio de Agricultura.
- Holmgren, M., Scheffer, M., Ezcurra, E., Gutiérrez, J. y Mohren, G. (2001). El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 89-94.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J., Arango, A. y Ortiz, J. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Appl. Geogr.*, 39, 16-25. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.11.018
- IGAC (2018). Drenaje Doble, Escala 1:100.000, Cartografía Base-IGAC. [Dataset] http://datos.igac.gov.co/datasets/2fb3223d1f3143ddbbedd5fd5d27c0b17_0
- Jin, F., Neelin, J. y Ghil, M. (1996). El Niño/Southern Oscillation and the annual cycle: Subharmonic frequency-locking and aperiodicity. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 98 (2-4), 442-465.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L. y Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77,437-472.
- Montgomery, D. y Runger, G. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Neelin, J., Jin, F. y Syu, H. (2000). Variations in ENSO phase locking. *J. Climate*, 13,2570-2590.
- Pabón, J. y Montealegre, J. (1992). Manifestación El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la costa Pacífica colombiana. *Boletín ERFEN*, 31, 3-11.
- Palmer, W. (1965). *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45. Dept. of Commerce, Washington, D.C.
- Philander, S. (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. San Diego, EE.UU.: Academic Press.
- Poveda, G. (2004). Caudales mínimos en Colombia: Relaciones macroclimáticas, escalamiento y balances hidrológicos. Seminario Internacional sobre Eventos Extremos Mínimos en Regímenes de Caudales: Diagnóstico, Modelamiento y Análisis. Medellín, Colombia, 23 al 25 de junio de 2004.
- Poveda, G., Álvarez, D. y Rueda, O. (2011). Hydroclimatic 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. *Climate Dynamics*, 36,2233-2249.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M., Quiceno, N. y Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178.
- Poveda, G. y Mesa, O. (1993). Metodologías de predicción de la hidrología colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Atmósfera*, 17, 26-39.
- (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale oceanic atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10, 2690-2702.
- Poveda, G., Waylen, P. y Pulwarty, R. (2006). Modern climate variability in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 234, 3-27.
- Rasmusson, E. y Carpenter, T. (1983). The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. *Mon. Weather Rev.*, 111, 517-528.
- Salati, E. y Vose, R. (1984). Amazon basin: a system in equilibrium. *Science*, 225,129-138.
- Stein, K., Timmermann, A. y Schneider, N. (2011). Phase synchronization of the El Niño-Southern Oscillation with the annual cycle. *Phys. Rev. Lett.*, 107, 128501.
- Tootle, G., Piechota, T. y Gutiérrez, F. (2008). The relationships between Pacific and Atlantic Ocean sea surface temperatures and Colombian streamflow variability. *J. Hydrol.*, 349(3-4), 268-276.
- Trenberth, K. (1997). The definition of El Niño. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78(12), 2771-2777.
- WMO 2018. WMO El Niño/La Niña Updates Archive. [Dataset] http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/enso_updates.html

