

Artigo

Oscilaciones Macroclimáticas que Afectan la Oferta Hídrica en la Cuenca del Río Gachaneca; Boyacá-Colombia

Luís Beltrán¹ , Diana Cristina Díaz² 

¹*Facultad de Ciencias Ambientales e Ingenierías, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, Colombia.*

²*Departamento de Ciencias Básicas y Modelado, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.*

Recibido em: 10 de Julio de 2019 - Aceptado em: 12 de Julio de 2019

Resumen

Para estudiar la influencia de las oscilaciones macroclimáticas en la cuenca del río Gachaneca este trabajo estudió la variabilidad de la temperatura mínima, máxima e índices de precipitación estandarizada en la zona de la cuenca durante 1982-2015, y evaluó la relación de estas variables con El Niño Oscilación Sur (ENOS), la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y la Oscilación Cuasi-Bienal (OCB) mediante análisis de correlación canónica. Los porcentajes de varianza más altos explicados por las oscilaciones macroclimáticas en Diciembre-Febrero oscilan entre 34% y 38%, en Marzo-Mayo entre 15% y 20%, en Junio-Agosto entre 15% y 25% y en Septiembre-Noviembre entre 21% y 34%. En todos los casos el ENOS tiene la mayor influencia, seguido por la OAN. Durante DEF el área de estudio está más expuesta a eventos secos que aumentan el riesgo de agotamiento del recurso hídrico debido a la fase cálida del ENOS. La OAN indirectamente puede reforzar o atenuar los eventos de sequía debido a su relación con la magnitud de los vientos Alisios y la variabilidad del Atlántico tropical que tienen repercusión en la posición de la ZCIT y los procesos convectivos de la región.

Palabras-clave: variabilidad climática, El Niño oscilación Sur, oscilación del Atlántico Norte, oscilación cuasi-bienal, oferta hídrica.

Influence of the Macroclimatic Oscillations in the Gachaneca River Basin Weather Patterns; Boyaca-Colombia

Abstract

To study the influence of macroclimatic oscillations in the Gachaneca river basin this work studies the variability of minimum and maximum temperature and standardized precipitation indices in the basin area between the years 1982 and 2015, and evaluated the relation among these variables with El Niño Southern Oscillation (ENSO), North Atlantic Oscillation (NAO), and Quasi-Biennial Oscillation (OCB) by canonical correlation analysis. The results reveal that percentages of variance explained by macroclimatic phenomena in December-February range between 34% and 38%, in March-May between 15% and 20%, in June-August between 15% and 25% and in September- November between 21% and 34%. The most influential phenomenon is ENSO, followed by NAO. During DEF the study area is more exposed to dry events that increase the risk of depletion of water resources due to the warm phase of ENSO. The NAO can indirectly reinforce or mitigate drought events due to its relationship with the magnitude of the trade winds and the variability of the tropical Atlantic that have an impact on the position of the ITCZ and the convective processes of the region.

Keywords: climate variability, El Niño Southern oscillation, North Atlantic oscillation, quasi-biennial oscillation, water supply.

1. Introducción

Los recursos renovables de agua dulce per cápita a nivel mundial son menores cada día (FAO, 2017), así lo indica el Banco Mundial con base en los datos del sistema de información global sobre el agua de la Food Agriculture Organization (FAO); entre 1962 y 2014 los recursos descendieron en promedio un 55%. En el caso de Colombia disminuyeron con mayor rapidez, alcanzando un descenso del 63% en el mismo periodo; en 1962 la cantidad de recursos de agua dulce renovables per cápita para Colombia era de 122570 m³, 52 años después es de 44882 m³ (FAO, 2017). Debido a este continuo descenso es necesario aumentar el conocimiento y la vigilancia de la dinámica espacio-temporal de la precipitación, los caudales de los ríos, los niveles de los acuíferos, entre otros. Uno de los factores a estudiar es el de la variabilidad climática interanual en el país, ya que el entendimiento de la misma permite determinar los patrones climáticos de mayor influencia sobre las variables hídricas del país. Hasta el momento se ha establecido que en la escala interanual El Niño Oscilación Sur (ENOS) es uno de los patrones climáticos que más influye sobre la disponibilidad del recurso hídrico en Colombia y que ha causado los periodos de sequía más intensos en los últimos 40 años (Poveda *et al.*, 2006; Carmona y Poveda, 2012; Córdoba *et al.*, 2015). Además, ha surgido la hipótesis sobre la conexión entre el ENOS y oscilaciones como la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y la Oscilación Cuasibienal (OCB) que parecen tener influencia sobre el comportamiento de la precipitación y en consecuencia sobre los caudales y aguas subterráneas que constituyen los recursos renovables de agua dulce (Poveda *et al.*, 2006; 2011; Hoyos *et al.*, 2013; Díaz y Villegas, 2015).

El clima en Colombia está controlado por tres factores: el primero es la localización en la zona ecuatorial, lo cual implica que las variables climáticas son controladas, a escala estacional, por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre el territorio nacional (Poveda *et al.*, 2006). La segunda es la proximidad con el Océano Pacífico, el Mar Caribe y la Amazonía que aseguran aportes permanentes de humedad al interior del país y el tercero es la presencia de los Andes que favorece los procesos convectivos y la diversidad de climas en función de la altitud (Poveda, 2011; Díaz y Villegas 2015).

A escala interanual se ha determinado que El ENOS es el patrón climático que más influye sobre la variabilidad climática en el país. El ENOS es el resultado de la interacción océano-atmósfera que ocasiona anomalías positivas y negativas de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico tropical central y oriental, acompañadas de variaciones en el campo de la presión atmosférica en superficie y que influyen sobre el clima en diferentes partes del planeta (Tedeschi *et al.*, 2015). El ENOS presenta dos fases

opuestas conocidas como EL Niño (EN) y La Niña (LN), durante EN (LN) se presenta el incremento (descenso) anómalo de la TSM. Estudios sobre los efectos de cada fase sobre regiones del continente suramericano muestran cómo El ENOS está asociado con cambios en la circulación atmosférica, la precipitación (Ropelewski y Halpert, 1996; Paegle y Mo, 2002; Barreiro y Díaz, 2011; Steinhoff *et al.*, 2015), eventos extremos de precipitación (Hoyos *et al.*, 2013), y niveles de caudales en los ríos (Poveda *et al.*, 2006). Como lo mencionan Barreiro y Díaz (2011), una vez la señal del ENOS llega al continente suramericano las anomalías atmosféricas se modifican por la interacción con la superficie haciendo que los efectos sean diferentes para cada región. Los estudios también han mostrado que el impacto del ENOS sobre las variables como la precipitación y la temperatura se propaga de oeste a este del continente. En Colombia la región del país que experimenta el mayor impacto es la Andina mientras que la Orinoquía y la Amazonía son las menos afectadas, además EN está asociado con la ocurrencia de eventos extremos como sequías, heladas e incendios forestales y LN con lluvias torrenciales, inundaciones y deslizamientos (Poveda *et al.*, 2006; 2011; Hoyos *et al.*, 2013; Córdoba *et al.*, 2015; Tedeschi *et al.*, 2015).

Otra oscilación considerada es la OCB, que es el cambio en la dirección de los vientos zonales tropicales en la estratósfera que alternan entre este y oeste en un periodo entre 24-28 meses. La fluctuación en la dirección avanza desde la baja estratósfera hacia la alta tropósfera ocasionando esfuerzos cortantes verticales que modulan los procesos de convección profunda ecuatorial y afecta la frecuencia de los ciclones tropicales en el Atlántico, por esta razón surgió la hipótesis de una posible correlación entre la OCB y la precipitación en Colombia (Baldwin, 2001). Carmona y Poveda (2012) identificaron señales de periodo similar al de la OCB en las anomalías de precipitación; sin embargo, la existencia de esta banda cuasi-bienal en los registros de lluvia no es observada en todas las estaciones del país y aun no se puede generalizar esta relación.

También en la escala interanual se encuentra la OAN que denota la oscilación de la diferencia de presión atmosférica entre los centros de las bajas de Islandia y las altas de las Azores. La OAN afecta la intensidad de los Alisios del noreste, las formaciones tormentosas del Atlántico norte y el desplazamiento de la ZCIT sobre el Atlántico tropical, por tanto, indirectamente podría modificar el transporte de humedad desde el Atlántico hacia el continente americano (Visbeck *et al.*, 2001; Paegle, 2002; Whan y Zwiers, 2016).

Un aspecto que se debe tener en cuenta es que hasta el momento no hay un consenso respecto a cómo ENOS, OAN o OCB podrían de forma conjunta influir en el clima de la región tropical (Zhang *et al.*, 2018). Sólo se han propuesto algunos procesos físicos que podrían vincular ENSO y OAN y explicar su efecto sobre regiones como

Norte América, Asia y el Mediterráneo (Whan *et al.*, 2016; Li & Lau, 2012; Wang *et al.*, 2004; Alexander *et al.*, 2002; Cassou *et al.*, 2001), pero aún no se comprende completamente su efecto sobre el Caribe y la parte norte de Suramérica o específicamente sobre Colombia, esta es otra de las razones por las que el presente estudio puede aportar información en relación a si en las variables consideradas puede apreciarse relación conjunta. Uno de los mecanismos propuestos plantea que un evento ENOS que alcanza su máximo desarrollo durante DEF puede estimular las ondas Rossby que usualmente se extienden hasta el Atlántico Norte y allí modificar la estructura de las ondas cuasi-estacionarias que además se fortalecen con interacciones del flujo medio e influyen de esta forma en la circulación atmosférica sobre el Atlántico Norte durante el periodo EFM (Drouard *et al.*, 2015; Cassou y Terray, 2001; Alexander *et al.*, 2002). Otro mecanismo explica que la relación ENOS-OAN se establece porque el ENSO ocasiona anomalías de TSM en el Atlántico tropical las cuales posteriormente afectan la circulación atmosférica sobre el Atlántico, en especial durante los primeros meses del año (Whan *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2004; Visbeck *et al.*, 2001). También se ha considerado la formación de remolinos sinópticos que generan un proceso de dispersión de energía de las ondas sinópticas que viajan desde el Pacífico Norte hacia el Atlántico Norte ocasionando anomalías de circulación atmosférica de baja frecuencia (Li y Lau 2012). Durante eventos Niño se favorece el transporte de energía entre el Pacífico Norte y el Atlántico Norte en latitudes bajas. Por el contrario, durante eventos Niña la propagación ocurre en latitudes más altas, es menos intensa y tiene un menor alcance o influencia sobre Norte América y el Atlántico Norte (Drouard *et al.*, 2015; Li y Lau, 2012).

Recientemente Zhang *et al.* (2018) han propuesto que en efecto pueden ser varios los mecanismos que vinculan ENOS-OAN y que la razón por la cual es difícil establecer con claridad esta teleconexión radica en que la respuesta del Atlántico al ENOS varía de un evento a otro y que depende de la posición longitudinal en la que el evento ENSO se desarrolla con mayor intensidad, diferenciando entre aquellos que ocurren especialmente alrededor de la zona del Pacífico Oriental y los que se dan en el Pacífico Central. Con esta información preliminar entonces se abordará el problema analizando datos para un sector específico cuya oferta hídrica presenta cambios que pueden estar vinculados con las oscilaciones mencionadas.

Teniendo en cuenta que en la Cuenca del Río Gachaneca (CRG) se ubican dos embalses importantes para el abastecimiento de agua dulce y que presenta problemáticas por disponibilidad insuficiente de este recurso, el presente artículo analiza la posible relación conjunta entre EL ENOS, la OCB y la OAN y las variables atmosféricas de la CRG con el fin de identificar escenarios que ocasionen

disminución de la precipitación o sequías en la zona. El trabajo sigue la metodología propuesta por Díaz y Villegas (2015) quienes presentan el Análisis de Correlación Canónica (ACC) como una opción para evaluar este tipo de relaciones.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio (Fig. 1) corresponde a la zona donde se encuentra la CRG. La misma, está ubicada sobre la cordillera oriental de los Andes Colombianos. La ubicación de la zona respecto al continente se presenta en el Anexo 1. El río nace en un área de conservación conocida como páramo el Rabanal a 3.350 m sobre el nivel del mar, posee una longitud de cauce de 16.74 km, abarcando un área de 99.84 km², su caudal es regulado mediante dos embalses el último a su salida presenta para un periodo aproximado de 10 años un caudal medio de 1.1 m³/s, con máximos de 2.0 m³/s y mínimos de 0.91 m³/s. Se eligió esta zona de estudio porque allí se ubican dos importantes embalses para el abastecimiento de agua dulce y la comunidad de la zona conserva aún como ejes fundamentales para el sustento de la economía local esquemas básicos de producción agropecuaria y minera que han incrementado la presión intensiva y extensiva sobre el territorio de la CRG y han generado una problemática sobre el uso y distribución del recurso en la región.

2.2. Datos

Las oscilaciones climáticas fueron representadas utilizando índices cuyas series de tiempo fueron obtenidas del sitio web del Earth System Research Laboratory (ESRL, 2014), para el periodo 1982-2015. Para el ENOS se usó el Oceanic Niño Index, ONI por sus siglas en inglés, el cual es calculado como la media trimestral de las anomalías de la TSM medidas por el sensor ERSST.v3 en la región comprendida entre 5° N-5° S, 120° W-170° W, llamada región Niño 3.4. Para la OAN se eligió el índice OAN que se calcula como las anomalías de la diferencia de presión a nivel del mar entre Stykkisholmur (Islandia) que se toma como estación del norte, y Ponta Delgada (Azores), Lisboa (Portugal) y Gibraltar que se toman como estación del sur. Para representar la OCB se utilizó el promedio del viento zonal a 30 mbar de altura sobre el ecuador (ESRL, 2014).

Los datos de precipitación, temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) pertenecen a las únicas tres estaciones de la zona que cuentan con más de 30 años de registros, en este caso 1982-2015. La primera estación fue Villa Carmen ubicada en 5°30' N y 73°29' W, con una elevación de 2600 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). La segunda fue UPTC ubicada a los 5°33' N y 73°21' W, con una elevación de 2690 m s.n.m. y la tercera fue Villa

de Leyva ubicada a los 5°39 N y 73°32 W, con una elevación de 2215 m s.n.m. En la zona la precipitación es bimodal, con dos épocas húmedas alrededor de abril y octubre y dos temporadas secas centradas en enero y junio. En la Fig. 2 se presenta la climatología de la precipitación, la temperatura media, mínima y máxima, calculados para

1982-2015 con las series de las estaciones meteorológicas elegidas para el análisis de correlación canónica. En las tres gráficas se observa la similitud en el comportamiento bimodal de la precipitación con dos temporadas húmedas centradas en abril y octubre y dos secas alrededor de junio y diciembre.

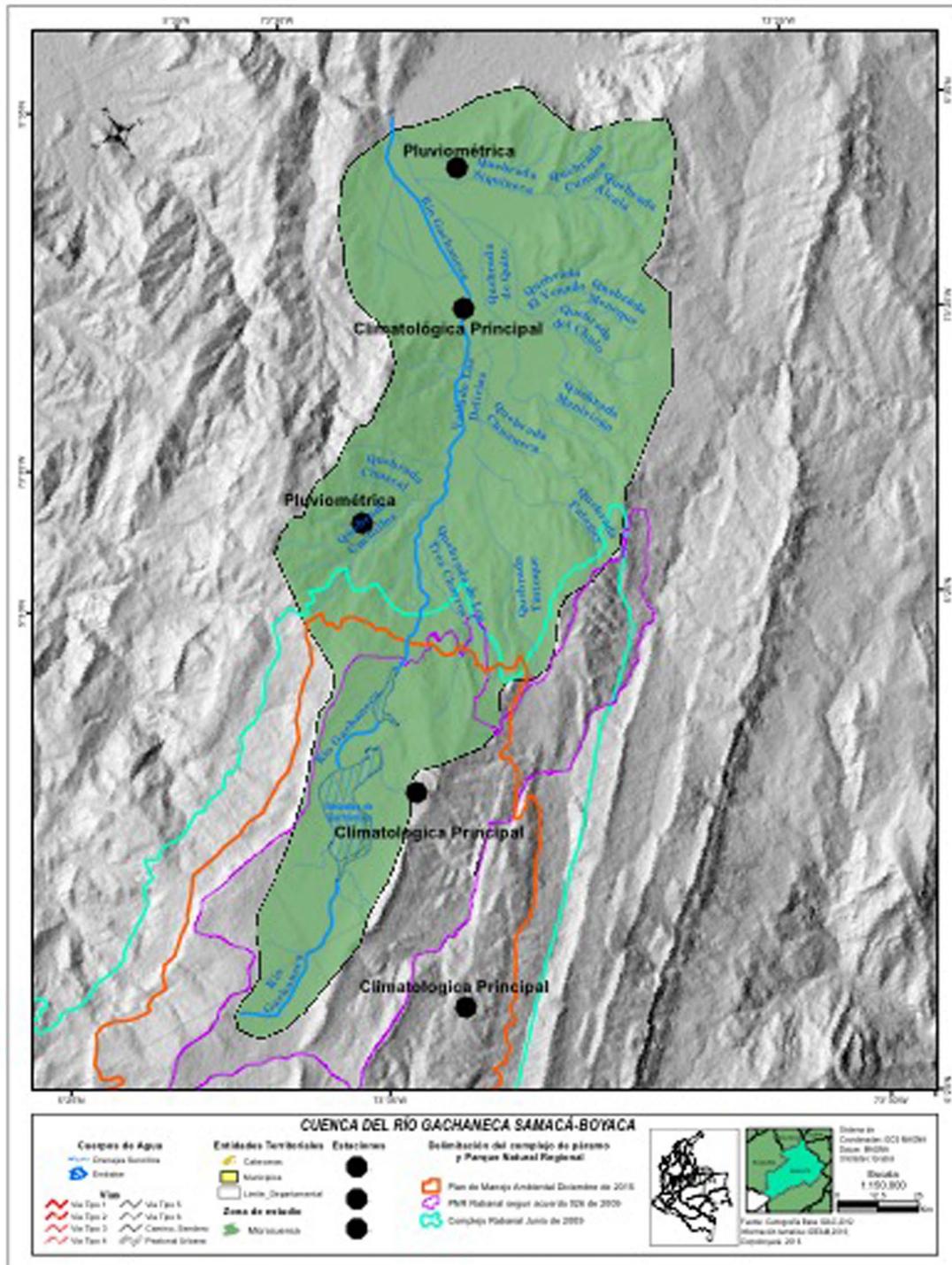


Figura 1 - Cuenca Río Gachaneca.

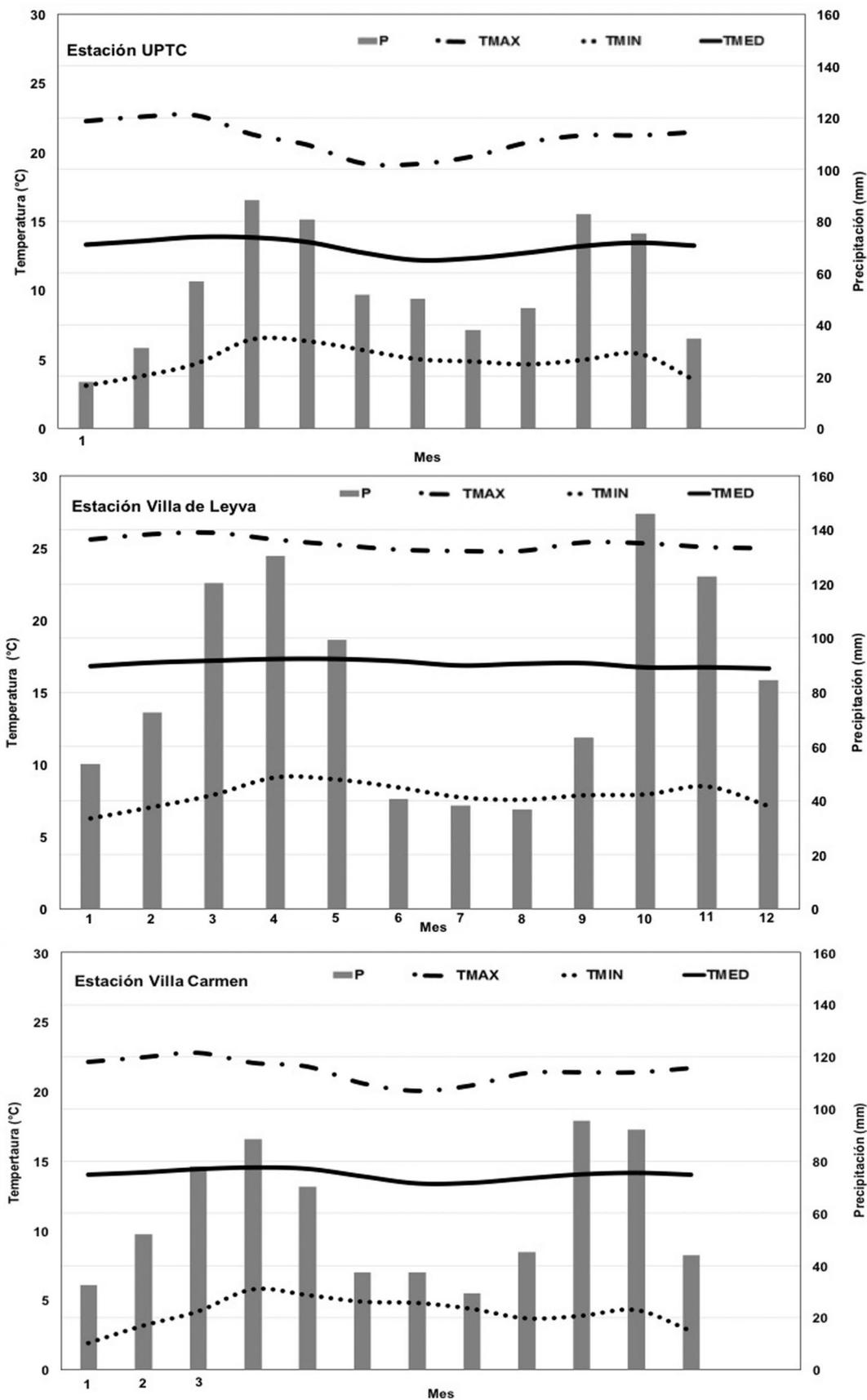


Figura 2 - Climatología de la precipitación, la temperatura media, mínima y máxima de las estaciones meteorológicas elegidas para el análisis de correlación canónica.

Para los análisis la variable precipitación no fue utilizada directamente, sino que se estimaron a partir de sus valores el índice estandarizado de precipitación, SPI por sus siglas en inglés. Los SPI son la transformación de los registros de precipitación en valores de la distribución normal estándar, cada valor representa el número de desviaciones estándar que un dato está alejado de su media muestral. Los valores menores a -1 se asocian a periodos de sequía y los mayores a 1 a exceso de humedad. El índice fue calculado en escalas de tiempo trimestral (SPI3), semestral (SPI6), anual (SPI12) y bienal (SPI24) siguiendo la guía de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2012). Las series de Tmax y Tmin fueron estandarizadas antes de realizar los ACC. Además en las series de datos no se encontró una tendencia significativa, y por tanto no fue necesario ningún proceso adicional. En Colombia las series de tiempo que suelen presentar tendencias claras son las de temperatura media, en particular en las zonas costeras, sobre el pacífico y el Caribe. Mientras que es menos frecuente hallar tendencias marcadas en las series de regiones ubicadas en la parte alta de los Andes (Cardona *et al.*, 2014; Pabón, 2012; Puertas *et al.*, 2011; IDEAM, 2017), como es el presente caso.

2.3. Análisis de Correlación Canónica (ACC)

El ACC es un método multivariado lineal que compara dos conjuntos de datos, uno independiente y otro dependiente. Para determinar cuántas dimensiones relevantes tiene la relación entre ambos conjuntos de variables el ACC conforma con ellos combinaciones lineales denominadas variables canónicas (VC) (Wilks, 2006). El cálculo de las VC se realiza a partir de las matrices de varianza y covarianza de las variables iniciales. Las correlaciones canónicas r_c entre las diferentes VC se suponen máximas y el método lo que pretende es determinar los pesos o cargas de cada término en la combinación lineal que permite esta máxima relación. Además de las cargas canónicas (CC) se calculan también las cargas canónicas cruzadas (CCC) tanto las CC como las CCC proveen información significativa de la relación entre los conjuntos

de variables originales (Carter, 2012; Díaz y Villegas, 2015). En el anexo 2 presentan más detalles de los cálculos en un ACC.

Antes de realizar los ACC se verificaron los supuestos exigidos por el método. El tamaño muestral mínimo sugerido es de 10 observaciones por cada variable, hecho que se cumple en todos los análisis realizados. El supuesto de multicolinealidad se revisó calculando las correlaciones entre las variables SPI, Tmax y Tmin que se eligieron por ser las de menor dependencia mutua. En todo caso si el supuesto de multicolinealidad no se cumpliera la técnica se puede aplicar aunque disminuye su capacidad para aislar el impacto de alguna variable única, haciendo que la interpretación pueda ser menos confiable, esto se puede compensar eligiendo umbrales para las CC y CCC que estén por encima de 0.2. En el caso de las series de los índices macroclimáticos las correlaciones estacionales calculadas oscilaron entre -0.14 y 0.18 y fueron no significativas, por lo tanto, todas las series de tiempo satisfacen la condición de mínima multicolinealidad. Para evaluar la confiabilidad de los resultados fue realizada la prueba F con la aproximación de Rao. La descripción completa de este tipo de prueba puede consultarse en Hair *et al.* (1998) y su implementación en Carter (2012). Fueron aceptados los resultados estadísticamente significativos, con un nivel de confianza, al menos del 90%. Para el presente estudio, se consideraron relevantes únicamente valores iguales o superiores a 0,4, en el caso de las CC y a 0,2, para las CCC, que son umbrales usuales cuando se trabaja con variables climáticas ya que tienden a presentar correlaciones entre ellas, (Stevens & Ruscher, 2014). Finalmente, los resultados de las CC dependientes y CCC independientes fueron multiplicados y graficados.

Todas las series fueron organizadas como series de tiempo trimestrales, diciembre-enero-febrero (DEF), marzo-abril-mayo (MAM), junio-julio-agosto (JJA) y septiembre-octubre-noviembre (SON), de cada serie original se obtuvieron cuatro series; de acuerdo con Stevens & Ruscher (2014) esta forma de disponer los datos maximiza la posibilidad de encontrar relaciones. Además la elección de los trimestres se realizó teniendo en cuenta las dos tem-

Tabla 1 - Variables dependientes (VD) para cada trimestre e independientes (VI) para todos los trimestres utilizadas en las cuatro ACC realizados por cada trimestre considerado. 4 Pruebas por cada trimestre y para cada lugar. Se ejecutaron en total 48 ACC.

	ACC	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
DEF	VD de DEF de VD	Tmin, Tmax, SPI3	Tmin, Tmax, SPI6	Tmin, Tmax, SPI12	Tmin, Tmax, SPI24
	VI de todos	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB
MAM	VD de MAM VD	Tmin, Tmax, SPI3	Tmin, Tmax, SPI6	Tmin, Tmax, SPI12	Tmin, Tmax, SPI24
	VI de todos	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB
JJA	VD de JJA VD	Tmin, Tmax, SPI3	Tmin, Tmax, SPI6	Tmin, Tmax, SPI12	Tmin, Tmax, SPI24
	VI de todos	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB
SON	VD de SON VD	Tmin, Tmax, SPI3	Tmin, Tmax, SPI6	Tmin, Tmax, SPI12	Tmin, Tmax, SPI24
	VI de todos	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB	ONI, OAN, OCB

poradas secas (DEF, JJA) y húmedas (MAM y SON) de esta región (ver Fig. 2). En los ACC fue evaluado el grado de relación de las series trimestrales de las variables meteorológicas, con las series trimestrales de los índices climáticos. En la Tabla 1 se indican las series trimestrales que conformaron los grupos en cada uno de los ACC. En los diferentes ACC los grupos de variables dependientes se conformaron con las series trimestrales de Tmin, Tmax y un solo índice SPI ($n = 3, 6, 12$ o 24), de un único periodo; el grupo de las independientes fue conformado por todas las series de los índices también con paso trimestral, es decir por las series trimestrales de ONI, OAN, OCB de todos los periodos: DEF, MAM, JJA y SON. Todas las pruebas descritas en la Tabla 1 fueron realizadas para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas.

Considerando que el objetivo es determinar si existe una relación de causalidad entre las VI y las VD, los trimestres de las VI son simultáneos o anteceden a los de las VD.

3. Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se presentan los coeficientes de correlación canónica (r_c) y la varianza explicada (V_e). Los valores de r_c y V_e obtenidos en el ACC DEF de todas las estaciones son mayores que los obtenidos en los ACC de los demás trimestres, es decir que las series de DEF de los índices macroclimáticos explican el mayor porcentaje de variabilidad de las series de SPI, Tmax y Tmin. En el ACC DEF, V_e oscila entre 38% y 21%, los mayores porcentajes se obtienen con SPI3 y van disminuyendo a medida que la escala temporal del SPI aumenta hasta obtenerse los valores más bajos con SPI24. En los demás ACC el comportamiento es similar pero los porcentajes son más bajos, solo a excepción de MAM, caso en que las mayores correlaciones y varianzas explicadas se dan para SPI12. El SPI3

estima las condiciones de humedad en periodos de corto y mediano plazo y el comportamiento de las lluvias estacionales, obtener porcentajes más altos con SPI3 sugiere que estas oscilaciones afectan el comportamiento estacional de la precipitación en la región de estudio, que como se aprecia en la Fig. 2, tiene mínimos y máximos diferenciables cada tres meses, entonces dependiendo del sentido de las relaciones cada oscilación podría reforzar o atenuar estas temporadas secas y húmedas.

En la Fig. 3 se graficaron los resultados de multiplicar las CC dependientes y las CCC independientes que superaron el umbral de 0.4 y 0.2 respectivamente, obtenidas para los casos en el que las variables dependientes fueron SPI3, Tmin y Tmax, que son los de mayores r_c y V_e ; las gráficas para los demás casos se encuentran en el anexo 3, en ellas se aprecia que la distribución de las barras es similar a las de la Fig. 3 pero con un menor número de barras que representen valores significativos, es decir que a mayor escala de SPI las relaciones son menos apreciables.

La Fig. 3 muestra con cuáles de las series meteorológicas se obtienen las mayores relaciones con las oscilaciones macroclimáticas de los diferentes trimestres. En la Fig. 3 por ejemplo se observa que se obtuvieron 60 casos significativos con las series meteorológicas de DEF, 28 con las de MAM, 26 con las de JJA y 32 con las de SON, siendo esto coherente con lo mostrado en la Tabla 2. De la totalidad 68 ocurren con las series trimestrales de ONI, 65 con OAN y tan solo 13 con QBO. Aunque con ONI y OAN el número es similar el producto de las cargas es mayor para los casos con las series de ONI. En cuanto al sentido de las relaciones con ONI prevalecen las relaciones directas con Tmáx e inversas con SPI3 y Tmin especialmente para el ACC de DEF, en los demás trimestres hubo menos datos significativos con los cuales poder determinar un único sentido que fuera reiterativo en todas

Tabla 2 - Coeficientes de correlación canónica (r_c) y porcentaje de varianza explicada (V_e).

ACC	Estación	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
		r_c	V_e	r_c	V_e	r_c	V_e	r_c	V_e
DEF	V. Carmen	0.80	0.34	0.77	0.34	0.76	0.29	0.74	0.22
	UPTC	0.87	0.34	0.86	0.31	0.75	0.23	0.71	0.21
	V. Leyva	0.88	0.38	0.86	0.27	0.80	0.30	0.80	0.21
MMA	V. Carmen	0.71	0.19	0.76	0.24	0.76	0.25	0.73	0.17
	UPTC	0.71	0.15	0.75	0.24	0.77	0.26	0.71	0.17
	V. Leyva	0.54	0.20	0.64	0.17	0.70	0.19	0.59	0.13
JJA	V. Carmen	0.66	0.15	0.67	0.15	0.76	0.14	0.73	0.13
	UPTC	0.79	0.25	0.74	0.22	0.76	0.21	0.73	0.19
	V. Leyva	0.77	0.21	0.64	0.12	0.72	0.15	0.62	0.12
SON	V. Carmen	0.75	0.21	0.75	0.21	0.69	0.18	0.70	0.18
	UPTC	0.84	0.31	0.84	0.30	0.83	0.27	0.83	0.25
	V. Leyva	0.79	0.34	0.81	0.28	0.77	0.22	0.76	0.15

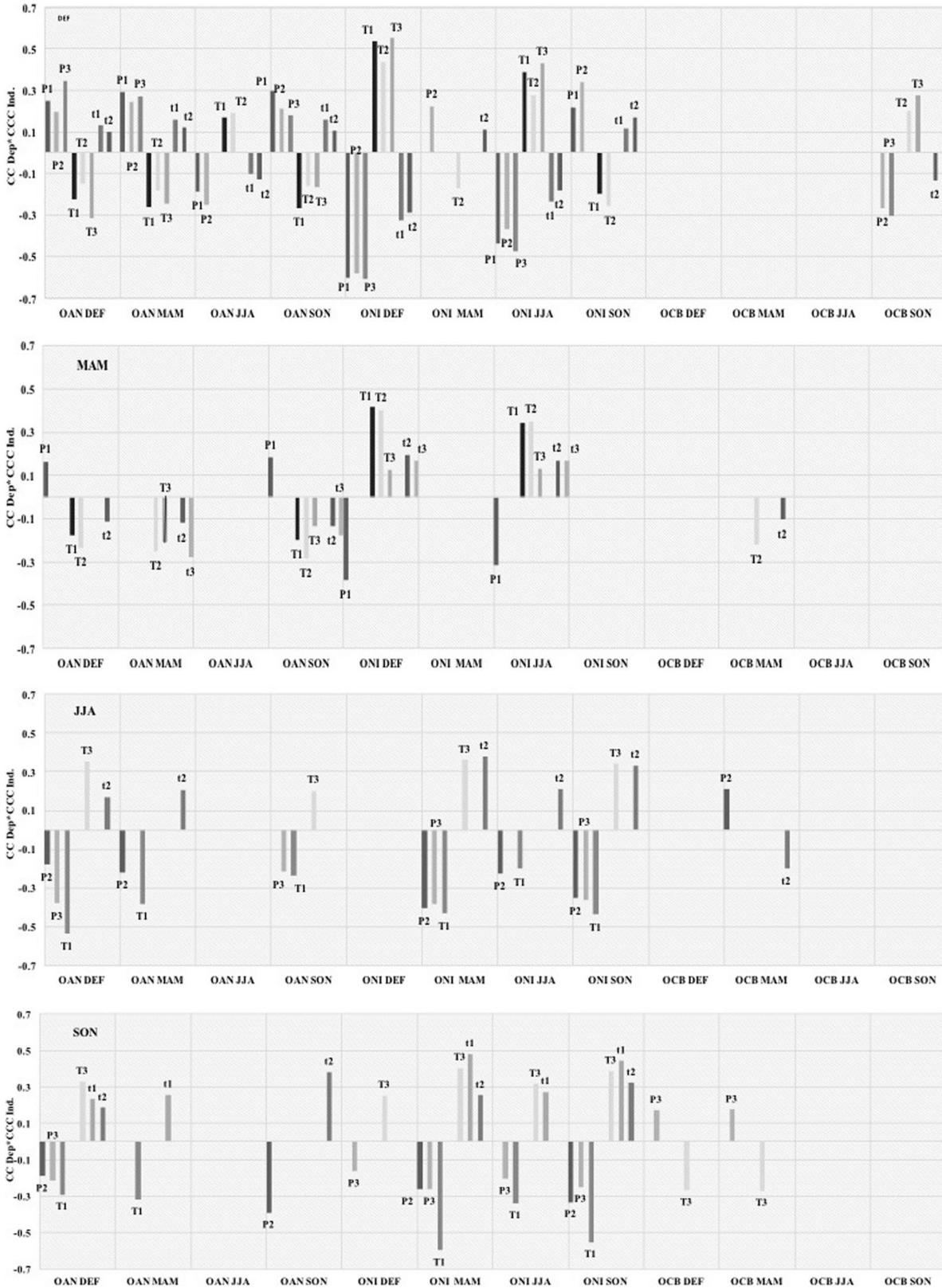


Figura 3 - Resultados de multiplicar las CC dependientes y las CCC independientes que superaron el umbral mencionado. En el eje x se ubican las variables del conjunto independiente y las barras de las 4 gráficas corresponden a las variables dependientes SPI3, Tmax, Tmin de cada trimestre DEF, MAM, JJA, SON representadas por las letras P, T y t respectivamente.

las estaciones. Estos resultados son coherentes con los estudios sobre el efecto del ENOS que como se mencionó en la introducción indican que valores positivos (negativos) de ONI se asocian a disminución (aumento) de la precipitación (Poveda *et al.*, 2006; Tedeshi *et al.*, 2015). En cuanto a la OAN se aprecia que el sentido de las relaciones de las series OAN de DEF y MAM con las series meteorológicas de los cuatro trimestres tiende a cambiar de signo y ser opuesto al obtenido con las series OAN especialmente de JJA, este hecho se cumple siempre con los SPI y con excepciones para Tmax y Tmin. Este cambio de sentido se puede vincular con el cambio de dirección del campo de vientos que ocurre semestralmente en función de la posición de la ZCIT y que depende indirectamente de la intensidad de los Alisios que regula la OAN (Díaz y Villegas, 2015). Finalmente se evidencia también que en cuanto a la OCB los valores significativos fueron muy pocos por lo que mediante esta metodología no se podría

inferir si en el área de estudio existe relación entre esta oscilación y las variables dependientes.

Teniendo en cuenta que los resultados fueron similares en los tres lugares la Fig. 4 contiene los valores promedio del producto de las CC y CCC obtenidos en los tres casos, en ella se observa el sentido de las relaciones entre las series y cómo varían según el trimestre.

La Fig. 4 muestra 12 gráficas organizadas en 4 filas y 3 columnas. Las 4 filas corresponden a los 4 trimestres considerados en el grupo de las VI. Las 3 columnas corresponde a las 3 VD consideradas, en cada gráfica el eje vertical representa el producto de las cargas y el eje horizontal los 4 trimestres de cada VD.

En las Figs. 3 y 4 se identifican cuáles combinaciones de relaciones entre índices y variables ocasionarían sequías fuertes, que es finalmente la motivación del presente artículo. Estos escenarios serían aquellos que hacen disminuir SPI y adicionalmente que Tmax aumente y

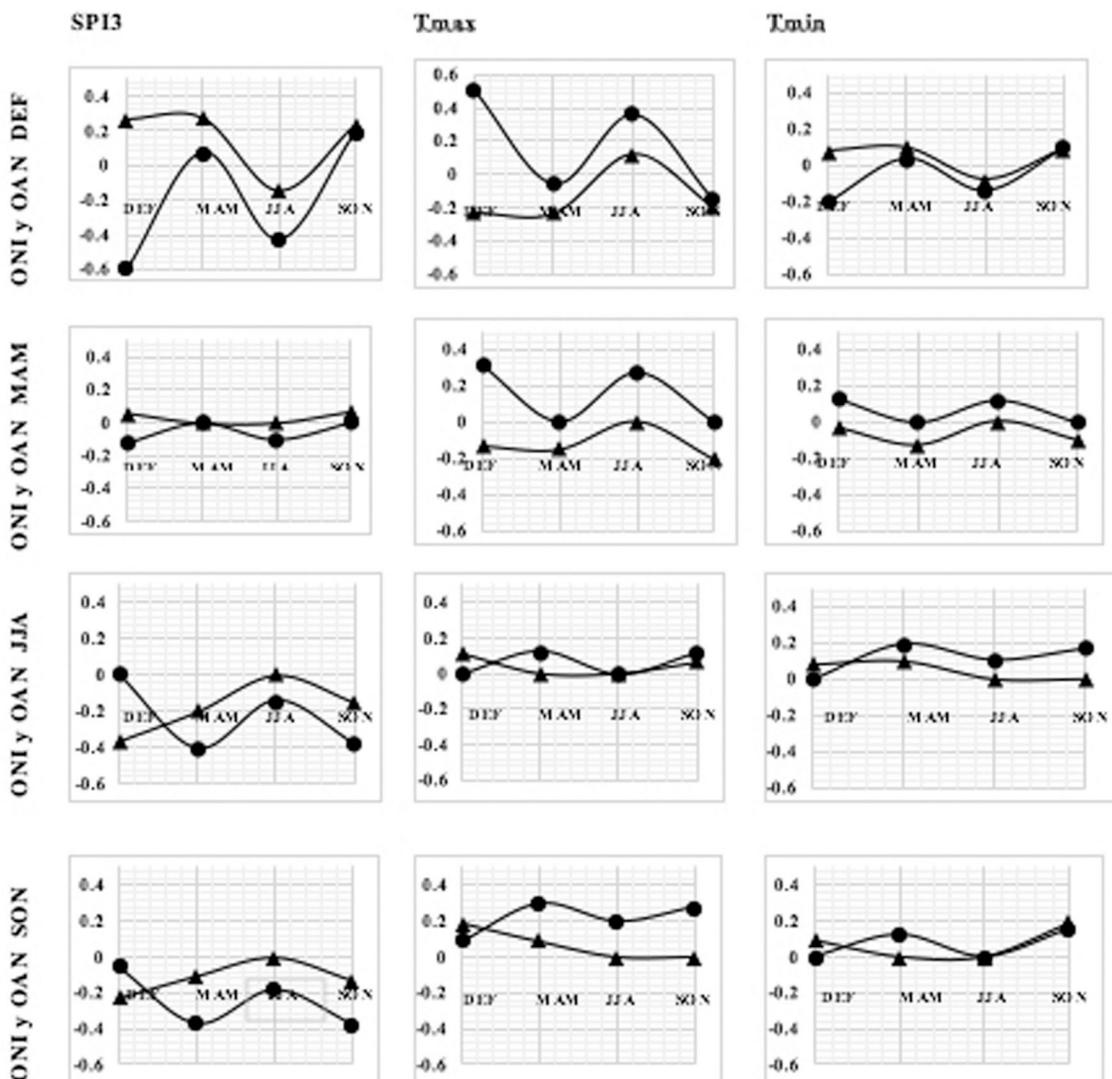


Figura 4 - Promedios de los productos entre CC dependiente y CCC independientes.

Tmín disminuya. Esta configuración de SPI disminuyendo y Tmax aumentando físicamente implica bajas precipitaciones y temperaturas muy altas lo que afecta la disponibilidad de agua, por otro lado Tmín disminuyendo puede originar episodios de heladas en las madrugadas con efectos adversos sobre el sector agrícola. De acuerdo a la Fig. 4 son más los casos en los que la relación entre SPI y ONI es inversa (valores negativos en el eje y), a relación de Tmax y ONI es directa (valores positivos en el eje y), y la relación de Tmín y ONI es inversa (valores negativos en el eje y). En cuanto a las relaciones con OAN se obtienen relaciones tanto inversas como directas con todas las variables sin embargo se repite con más frecuencia que si la relación de la variable con ONI es directa con OAN cambia de sentido.

Sin embargo, de todos los casos hay uno en particular (primera fila y columna de la Fig. 4), en el que se obtienen los mayores productos de las cargas canónicas, ese caso corresponde a la relación de los índices de ONI y OAN de DEF con SPI₃. El mayor valor se obtiene específicamente con SPI₃ de DEF, cuando la relación es inversa con ONI y directa con OAN del mismo trimestre, esto significa que un ascenso en el valor de ONI y un descenso en el de OAN simultáneamente corresponderían a un descenso en el valor de SPI₃ que se asocia a una mayor probabilidad de sequía que cualquier otro escenario que se pueda configurar o identificar en las gráficas. En trabajos como los de Ning y Bradley (2014), y Xie y Carton (2004), los autores también detectan asociaciones entre la precipitación y la temperatura del aire con el ENOS y la OAN, en sus investigaciones han encontrado que en efecto estas dos oscilaciones parecen afectar de manera conjunta las variables meteorológicas con la característica de que la relación es más fuerte cuando ENOS se encuentra en un EN de categoría fuerte o muy fuerte.

Para contrastar los resultados obtenidos con lo sucedido en el pasado, se revisaron los registros sobre las anomalías de precipitación por debajo de lo normal en la región donde se encuentra el área de estudio, durante eventos EN ocurridos durante 1982-2015. El estudio que se tomó como referencia fue el de Hurtado y González, (2015) quienes utilizaron 1500 estaciones para identificar dichas anomalías a nivel nacional. Con esta información se elaboró la Fig. 5, en ella se muestra de forma simultánea el índice ONI y OAN y se resalta con rectángulos cuando y qué porcentaje de tiempo, respecto a la duración total del evento, más del 50% de la región estuvo afectada por precipitaciones inferiores al 90% del promedio. Al comparar los índices durante los eventos se observó una característica recurrente, cuando la diferencia entre los índices ha sido mayor los eventos EN tienden a causar disminución de la precipitación durante más tiempo. Por el contrario cuando la diferencia entre los índices es menor las anomalías negativas de precipitación ocurren durante un tiempo más corto, incluso durante eventos de categoría fuerte a moderada. Por otra parte según instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, históricamente durante DEF han sucedido las mayores crisis por sequías, incendios forestales y heladas en el área de estudio y sus alrededores (Arango *et al.*, 2012; Hoyos *et al.* 2013). Todo lo anterior es coherente con lo expuesto en la Tabla 2 y las Figs. 3 y 4.

La discusión de los resultados se centra entonces alrededor de dos preguntas que son: ¿Cómo pueden el ENOS y la OAN de forma conjunta incidir sobre el clima de la región de estudio especialmente en DEF? y ¿Por qué cuando ONI toma máximos positivos y OAN negativos se configuran las condiciones que más disminuyen la precipitación? Teniendo en cuenta la expuesto en la introduc-

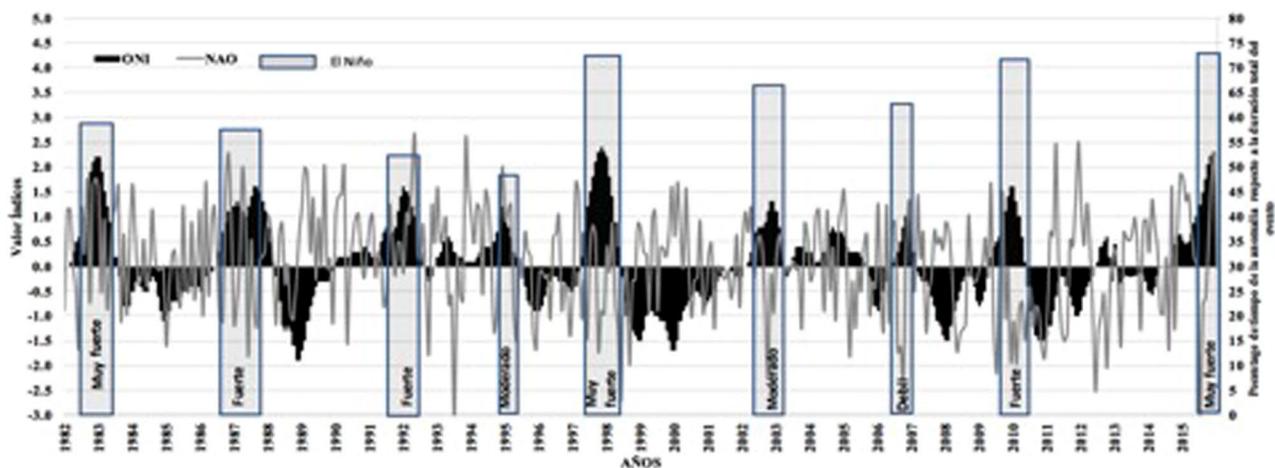


Figura 5 - Índice ONI, OAN y porcentaje de tiempo respecto a la duración total del evento que más del 50% de la región estuvo afectada por precipitaciones inferiores al 90% del promedio.

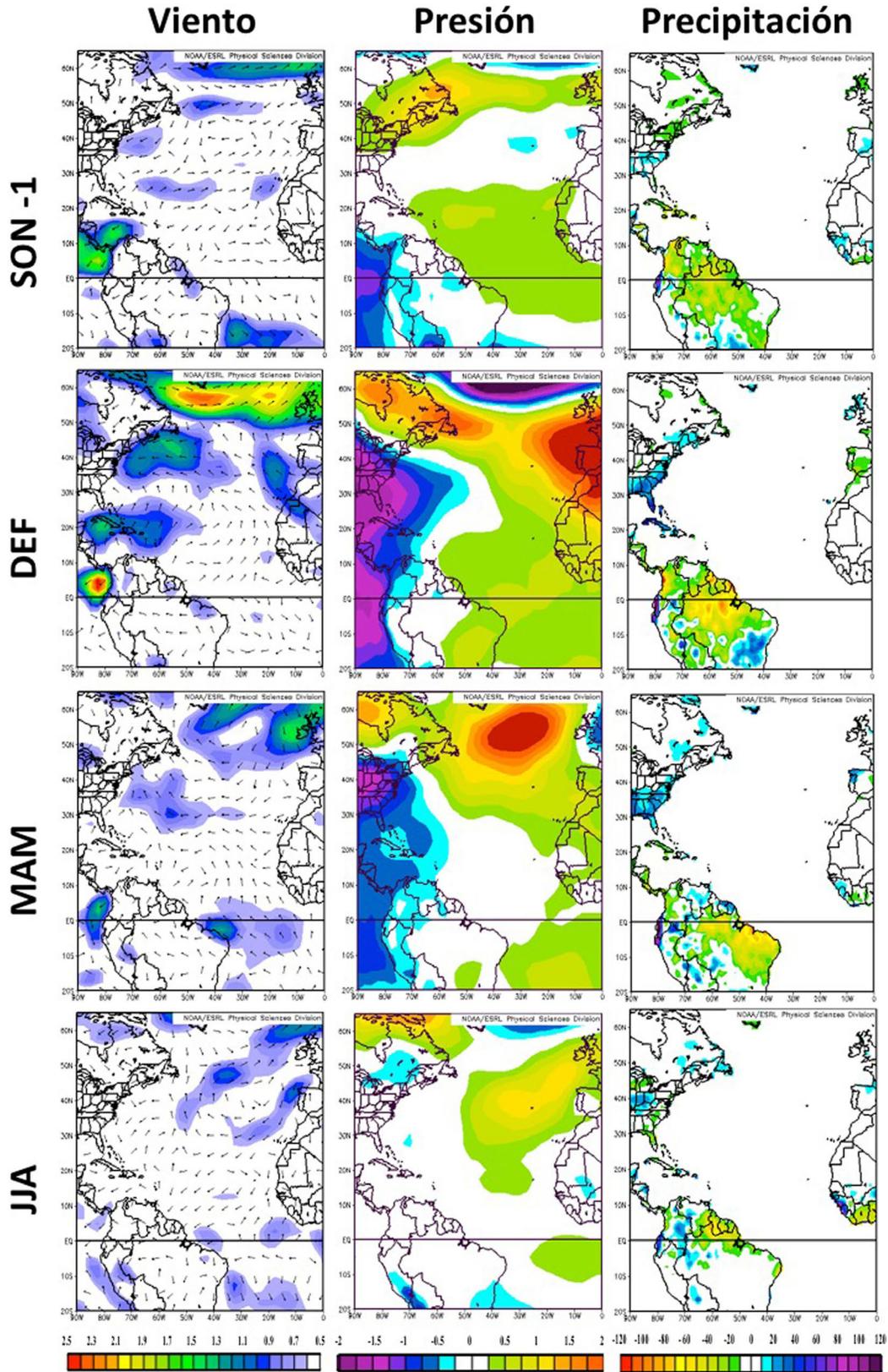


Figura 6 - Campo de anomalías de viento (m/s), presión a nivel del mar (mb) y precipitación (mm) conformados con la información de los años con los eventos cálidos de categoría fuerte y muy fuerte según el índice ONI. Periodo para la climatología 1982-2010. Fuente: Mapas elaborados desde el sitio de la Physical Sciences Division, Boulder Colorado (PSD 2019). Datos: The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project.

ción sobre la relación entre ENOS y OAN se puede identificar dos factores comunes en todas las investigaciones realizadas al respecto. El primero es que ante la ocurrencia de un evento ENSO que alcanza su máximo desarrollo durante el periodo DEF hay una respuesta en el Atlántico

que se refleja en la OAN en especial durante EFM, causando anomalías en la circulación atmosférica de diferentes sectores de hemisferio norte. El segundo aspecto es que un evento El Niño tiende a favorecer la fase negativa de la OAN. Entonces es comprensible que los resultados

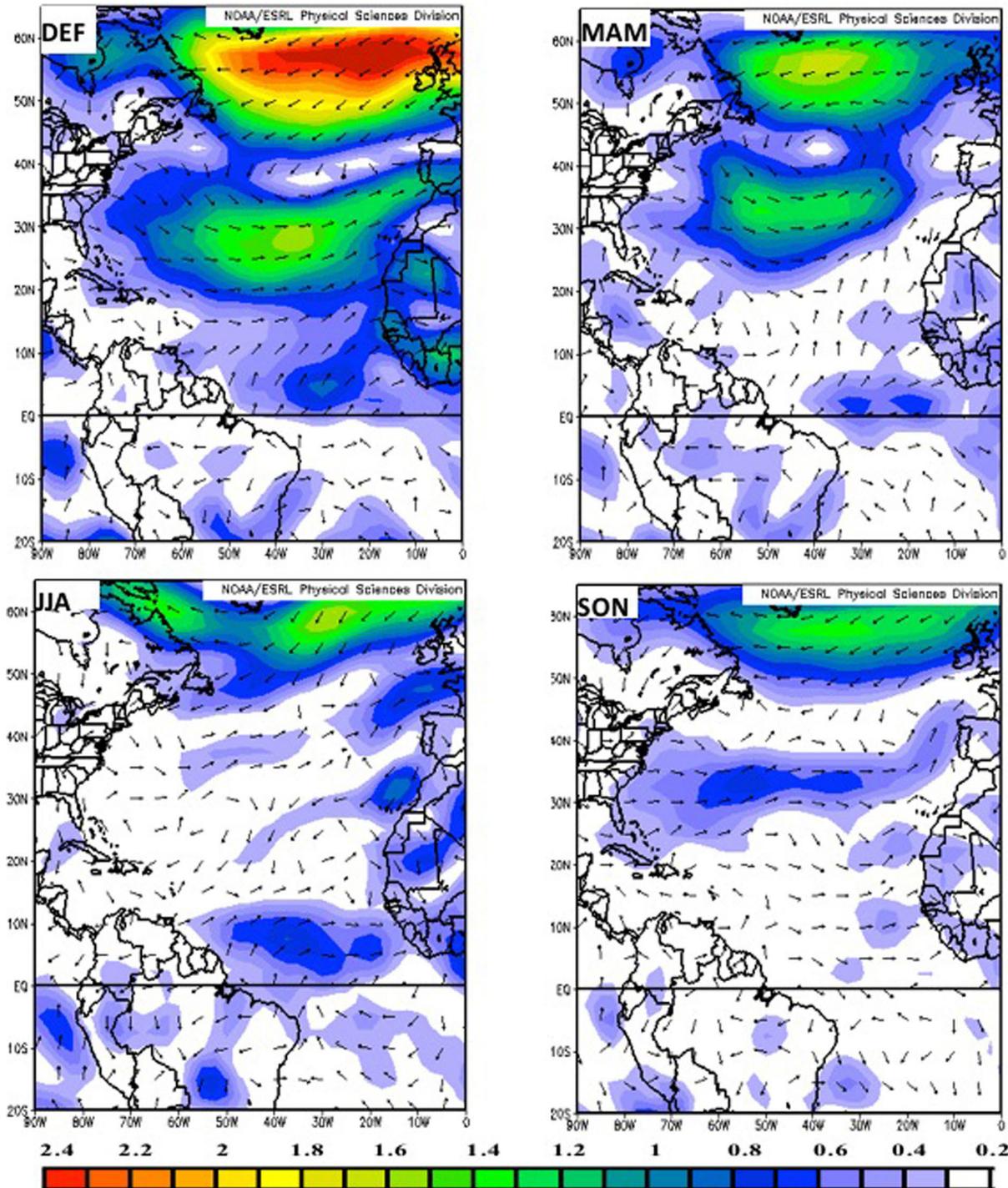


Figura 7 - Campo de anomalías de viento (m/s) tomando como condición valores negativos del índice OAN. Periodo para la climatología 1982-2010. Fuente: Mapas elaborados desde el sitio de la Physical Sciences Division, Boulder Colorado (PSD 2019). Datos: The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project.

de los ACC sugieran una influencia conjunta de estas oscilaciones sobre las variables analizadas en la zona de estudio, especialmente hacia final e inicio de año y qué el escenario que más favorece las condiciones de sequía corresponda a un índice ONI positivo asociado a un evento El Niño, y un OAN negativo asociado a un debilitamiento de los Alisios.

Para ilustrar la discusión y describir cómo se podría dar esta influencia sobre el país se analizan a continuación los procesos físicos asociados a la ocurrencia de los eventos El Niño que es la situación que se asocia con periodos atípicos de sequía en el área de estudio. Considérese el inicio de una fase cálida, que al evolucionar ocasiona una reducción del gradiente de TSM en el pacífico oriental, como lo explica Poveda *et al.* (2006), la primera consecuencia de la disminución de este gradiente de TSM es el debilitamiento de un jet de viento conocido como jet del Choco (JC) centrado en 5° N y 80° W a 925 hPa (Sierra *et al.*, 2018). Para ilustra estos procesos se construyeron los mapas de la Fig. 6.

Los mapas de la primera columna de la Fig. 6 muestran que en los eventos cálidos, en la zona costera sobre el Pacífico, las mayores anomalías de viento se presentan justo donde se halla el denominado JC, las anomalías son evidentes desde el periodo SON del año en que inicia el incremento de la TSM, es máximo durante DEF, y luego tiende a normalizarse durante los periodos siguientes. El debilitamiento del JC ocasiona que se disminuya el transporte de humedad desde el océano hacia el continente esencial para la formación de Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM) responsables de generar gran parte de la precipitación sobre el occidente y centro del país (Sierra *et al.*, 2018).

Los mapas de la segunda columna de la Fig. 6 muestran que además de la disminución de los CCM, se evidencian anomalías de presión sobre el sector occidental del país especialmente durante DEF, que como lo sugiere Poveda *et al.* (2006) se relacionarían con cambios en la ubicación de una sección de la ZCIT que tiende a desplazarse hacia el suroccidente del país. Estas anomalías en los campos meteorológicos durante eventos El Niño tienen como consecuencia final una reducción de los niveles de precipitación en el sector occidental (Paegle y Mo, 2002, Poveda *et al.* 2004, 2006), como se observa en los mapas de la tercera columna de la Fig. 6.

A estos procesos se suman entonces los efectos de la respuesta del Atlántico al ENOS. Teniendo en cuenta que El Niño favorece las condiciones de la fase negativa de la OAN en la Fig. 7 se graficaron las anomalías de viento durante esta fase, como puede apreciarse, la dirección de los vectores es opuesta a los Alisios en la región Caribe y norte de Suramérica lo que ayuda a reducir su intensidad, y con ello disminuir el transporte de humedad desde el Atlántico, modificando los procesos convectivos al interior de la ZCIT y reforzando la reducción de la precipita-

ción sobre el norte y centro del territorio nacional, como lo sugieren los resultados de los ACC y los mapas compuestos.

4. Conclusiones

Los resultados de los ACC realizados sugieren que el ENOS y la OAN de forma conjunta inciden sobre el clima de la región de estudio especialmente en DEF. En particular cuando ONI toma máximos positivos y OAN negativos se configuran las condiciones que más favorecen la disminución de la precipitación en la zona de estudio. En el sector occidental del país el ENSO debilita el Jet del Chocó y reduce la cantidad de CCM disminuyendo los niveles de precipitación sobre el occidente y centro del país, posteriormente la respuesta del Atlántico al ENSO tiene como consecuencia el debilitamiento de los Alisios afectando el transporte de humedad desde el atlántico, la ubicación y el desplazamiento de la ZCIT causando anomalías de precipitación sobre el sector norte y centro del país. Los resultados de la investigación son un insumo para las autoridades encargadas del manejo de la CRG y los embalses que contiene ya que se establece la época en la cual la cuenca está más expuesta a eventos secos y los diferentes escenarios que pueden darse dependiendo de la superposición de las fases de estas dos oscilaciones. Este hecho lo revelan los resultados del ACC y lo respalda la revisión de los registros de áreas afectadas por anomalías negativas de la precipitación.

Referencias

- ALEXANDER, M.A.; BLADÉ, I.; NEWMAN, M.; LANZANTE, J.R.; LAU, N.C.; SCOTT, J.D. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, v. 15, n. 16, p. 2205-2231, 2002.
- ARANGO, C.; DORADO, J.; GUZMÁN, D.; RUÍZ, J.F. **Variabilidad Climática de la Precipitación en Colombia Asociada al Ciclo el Niño, la Niña Oscilación Sur**. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia. 2012.
- BALDWIN, M.P.; GRAY, L.; DUNKERTON, T.; HAMILTON, K.; HAYNES, P.; RANDEL, W.; HOLTON, J.; ALEXANDER, M.; HIROTA, I.; HORINOUCHE, T.; JONES, D.; KINNERSLEY, J.; MARQUARDT, C.; SATO, K.; TAKAHASHI, M. The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, v. 39, n. 2, p.179-229, 2001.
- BARREIRO, M.; DÍAZ, N. Land-atmosphere coupling in El Niño influence over South America. *Atmospheric Science Letters*, v. 12, n. 4, p. 351-355, 2011.
- CARDONA-GUERRERO, F.; ÁVILA-DÍAZ, Á.J.; CARVAL-ESCOBAR, Y.; JIMÉNEZ-ESCOBAR, H. Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas (Colombia). *Tecnológicas*, p. 85-95, 2014.

- CARMONA, A.; POVEDA, G. Aplicación de la transformada de hilbert-huang en la detección de modos de variabilidad hidroclimática en Colombia. *Dyna*, v. 79, n. 175, p.72-80, 2012.
- CARTER T. BUTTS yacca: **Yet Another Canonical Correlation Analysis Package**. R package version 1.1. 2012
- CASSOU, C.; TERRAY, L. Oceanic forcing of the wintertime low-frequency atmospheric variability in the North Atlantic European sector: A study with the ARPEGE model. *Journal of Climate*, v. 14, n. 22, p. 4266-4291, 2001.
- CÓRDOBA-MACHADO, S.; PALOMINO-LEMUS, R.; GÁMIZ-FORTIS, S.; CASTRO-DÍEZ, Y.; ESTEBAN-PARRA, M. Assessing the impact of el Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, v. 124, p. 41-61, 2015.
- DÍAZ, D.; VILLEGAS, N.; Canonical correlation between large scale climate oscillations and surface meteorological variables in Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. v. 18, n. 2, p. 543-552, 2015.
- DROUARD, M.; RIVIÈRE, G.; ARBOGAST, P. The link between the North Pacific climate variability and the North Atlantic Oscillation via downstream propagation of synoptic waves. *Journal of Climate*, v. 28, n. 10, p. 3957-3976, 2015.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. Canonical correlation analysis. *Multivariate Data Analysis*, fifth ed. Prentice Hall Inc, Upper Saddle River, 29 pp, 1998.
- HOYOS, N.; ESCOBAR, J.; RESTREPO, J.; ARANGO, A.; ORTIZ, A. Impact of the 2010 e 2011 la Niña phenomenon in colombia, southamerica: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, v. 39, p. 16-25, 2013.
- HURTADO, G.; GONZÁLEZ, O. **Evaluación de la Afectación Territorial de los Fenómenos el Niño/la Niña y Análisis de la Confiabilidad de la Predicción Climática Basada en la Presencia de un Evento**. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia. 2015.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. **Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)**. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. 2017.
- LI, Y.; LAU, N.C. Contributions of downstream eddy development to the teleconnection between ENSO and the atmospheric circulation over the North Atlantic. *Journal of climate*, v. 25, n. 14, p. 4993-5010, 2012.
- NING, L.; BRADLEY, R.S. Winter climate extremes over the northeastern United States and southeastern Canada and teleconnections with large-scale modes of climate variability. *Journal of climate* v. 28, n. 6, p. 2475-2493, 2014.
- PABÓN CAICEDO, J.D. Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, v. 36, n. 139, p. 261-278, 2012.
- PAEGLE, J.; MO, K. Linkages between summer rainfall variability over southamerica and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, v. 15, n. 12, p. 1389-1407, 2002.
- POVEDA, G. WAYLEN, P.R.; PULWARTY, R.S. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 234, n. 1, p. 3-27, 2006.
- POVEDA, G.; ALVAREZ, D.; RUEDA, O. 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*, v. 36, n. 11-12, p. 2233-2249, 2011.
- PUERTAS, O.L.; ESCOBAR, Y.C.; ANGEL, M.Q. Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna*, v. 78, n. 169, p. 112-120, 2011.
- ROPELEWSKI, C.F.; HALPERT, M.S. Quantifying southern oscillation-precipitation relationships. *Journal of Climate*, v. 9, n. 5, p. 1043-1059, 1996.
- SIERRA, J.P.; ARIAS, P.A.; VIEIRA, S.C.; AGUDELO, J. How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia?. *Climate Dynamics*, p. 1-19. 2017.
- STEINHOFF, D.; MONAGHAN, A.; CLARK, M. Projected impact of twentyrst century enso changes on rainfall over Central America and northwest South America from cimp5 aogems. *Climate Dynamics*, v. 44, n. 5-6, p. 1329-1349, 2015.
- STEVENS, K.A.; RUSCHER, P.H. Large scale climate oscillations and mesoscale surface meteorological variability in the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River Basin. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 700-714, 2014.
- TEDESCHI, R.G.; GRIMM, A.M.; CAVALCANTI, I.F. Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 8, p. 2045-2064, 2015.
- VISBECK, M.H.; HURRELL, J.W.; POLVANI, L.; CULLEN, H.M. The North Atlantic Oscillation: past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 98, n. 23, p. 12876-12877, 2001.
- WANG, C.; XIE, S.P.; CARTON, J.A. Tropical Atlantic Variability: Patterns, Mechanisms, and Impacts. In C. Wang, S. P. Xie, & J. A. Carton (Eds.), *Earth's Climate*. Washington, D. C. **American Geophysical Union**, 2004.
- WHAN, K.; ZWIERS, F. The impact of ENSO and the OAN on extreme winter precipitation in North America in observations and regional climate models. *Climate Dynamics*, v. 48, n. 5-6, p. 1401-1411, 2017.
- WILKS, D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, second ed. *International Geophysics Series*, v. 59, Academic Press, p. 464, 2006.
- XIE, S.P.; CARTON, J.A. Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. *Earth's Climate*, p. 121-142. 2004.
- ZHANG, W.; WANG, Z.; STUECKER, M.F.; TURNER, A.G.; JIN, F.F.; GENG, X. Impact of ENSO longitudinal position on teleconnections to the NAO. *Climate Dynamics*, p. 1-18, 2018.

Recursos de Internet

- Earth system research laboratory -ESRL-. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series Database [online]. National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder (CO. USA). Disponible desde Internet en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/> (con acceso 20/10/2014). 2014.
- Food and Agriculture Organization -FAO-. 2017. Renewable internal freshwater resources per capita [online]. Disponible desde Internet en: <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC?view=chart> (con acceso 27/11/2017). 2017.
- PSD Physical Science División. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> (2019).
- World Meteorological Organization -WMO-. The Integrated Drought Management Program (IDMP). [online]. Disponible desde Internet en: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/drought/index_en.php (con acceso 20/10/2014). 2012.

Material Suplementario

El siguiente material es parte de este artículo.

- Anexo 1 - Ubicación de la Cuenca del Río Gachaneca
 Anexo 2 - Análisis de Correlación Canónica (ACC)
 Anexo 3 - En este anexo se presentan los resultados de los análisis de correlación obtenidos con las series de SPI de las

escalas temporales de 6, 12 y 24 meses. Como se puede observar en todas ellas se conserva que con las series de DEF se obtienen más y mayores relaciones significativas. Es decir que las oscilaciones macroclimáticas pueden explicar más de la variabilidad de las series de SPI, T_{máx} y T_{mín} de DEF. Aunque el valor de las cargas y la varianza explicada disminuye a medida que la escala de SPI aumenta, se siguen apreciando relaciones entre las series.

Figura A3.1 - Resultados de los análisis de correlación canónica. En las barras las letras P representa el SPI6, y T y t la temperatura máxima y mínima respectivamente, el número 1 significa que son las variables de la estación Villa del Carmen, el 2 de UPTC y el 3 de Villa de Leyva.

Figura A3.2 - Resultados de los análisis de correlación canónica. En las barras las letras P representa el SPI12, y T y t la temperatura máxima y mínima respectivamente, el número 1 significa que son las variables de la estación Villa del Carmen, el 2 de UPTC y el 3 de Villa de Leyva.

Figura A3.3 - Resultados de los análisis de correlación canónica. En las barras las letras P representa el SPI24, y T y t la temperatura máxima y mínima respectivamente, el número 1 significa que son las variables de la estación Villa del Carmen, el 2 de UPTC y el 3 de Villa de Leyva.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.