

MONOGRAFÍA INVESTIGATIVA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO



Vigilada Mineducación

¿Cuál es el efecto del ENOS en los caudales de los ríos en Colombia?

What is the effect of ENSO on river flows in Colombia?

Juliana Ceballos Restrepo

Monografía Investigativa

Proyecto de Grado

Asesor

Juan Darío Restrepo Ángel

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS

GEOLOGÍA

MEDELLÍN

2024

CONTENIDO

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 4 |
| 2 | EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)..... | 4 |
| 3 | ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL | 5 |
| 3.1 | VARIACIONES CLIMÁTICAS EN COLOMBIA..... | 7 |
| 3.2 | VARIACIONES INTERANUALES..... | 7 |
| 3.3 | VARIACIONES ANUALES | 8 |
| 4 | ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI)..... | 8 |
| 5 | ENSO EN COLOMBIA | 9 |
| 6 | ANÁLISIS ENSO VS. HIDRO CLIMATOLOGÍA EN LOS RÍOS DE COLOMBIA..... | 10 |
| 7 | CONCLUSIONES | 19 |
| 8 | BIBLIOGRAFÍA | 20 |

Resumen

El fenómeno ENOS, junto con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), desempeña un papel crucial en la variabilidad de las precipitaciones y los caudales de los ríos en Colombia. Durante los eventos de El Niño, la ZCIT tiende a desplazarse hacia el sur, lo que resulta en una disminución significativa de las precipitaciones sobre el país. Esta reducción en las lluvias conduce a una disminución en los caudales de los ríos, lo que puede provocar sequías, escasez de agua y un impacto negativo en la agricultura, la producción de energía hidroeléctrica y los ecosistemas acuáticos.

En contraste, durante los eventos de La Niña, la ZCIT se fortalece y se desplaza hacia el norte, lo que resulta en un aumento en las precipitaciones sobre Colombia. Este incremento en las lluvias puede conducir a un aumento en los caudales de los ríos, aumentando el riesgo de inundaciones, deslizamientos de tierra y otros eventos extremos.

La interacción entre el fenómeno ENOS y la ZCIT crea un patrón complejo de variabilidad hidrológica en Colombia, con importantes implicaciones la adaptación al cambio climático.

Palabras Claves: ENOS (El Niño - Oscilación del Sur), Caudal, Precipitación, ZCIT(Zona de convergencia intertropical)

Abstract

The ENOS phenomenon, along with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), plays a crucial role in the variability of precipitation and river flow rates in Colombia. During El Niño events, the ITCZ tends to shift southward, resulting in a significant decrease in precipitation across the country. This reduction in rainfall leads to a decrease in river flow rates, which can cause droughts, water scarcity, and negative impacts on agriculture, hydroelectric power production, and aquatic ecosystems.

In contrast, during La Niña events, the ITCZ strengthens and shifts northward, resulting in an increase in precipitation over Colombia. This increase in rainfall can lead to higher river flow rates, increasing the risk of floods, landslides, and other extreme events.

The interaction between the ENOS phenomenon and the ITCZ creates a complex pattern of hydrological variability in Colombia, with significant implications for climate change adaptation.

Key Words: ENSO (El Niño - Southern Oscillation), Flow rate, Precipitation, ITCZ (Intertropical Convergence Zone)

1 INTRODUCCIÓN

El Niño- Oscilación del Sur se considera, desde diferentes literaturas, como una fase extrema proveniente de una serie de procesos atmosféricos y oceánicos, asociadas estrechamente a singularidades hidrológicas que ocurren en el trópico de América del Sur principalmente. Como consecuencia de la ocurrencia del ENOS, se producen épocas de extrema y larga sequía, lo que va estrechamente asociado al cambio en los caudales de las fuentes hídricas (IDEAM, 2012).

A pesar de ser un país con abundantes recursos hídricos, Colombia enfrenta importantes impactos derivados de la influencia del fenómeno ENOS en diversos escenarios climáticos y ambientales. Por esta razón, esta investigación se centra en responder a la pregunta: ¿Cuál es el impacto del fenómeno ENOS en los caudales de los ríos en Colombia?

Se han utilizado diferentes metodologías de interpolación de datos estadísticos para determinar la influencia del ENOS en la variabilidad de los caudales de los principales ríos de Colombia, como lo son el Cauca y Magdalena, y diferentes fuentes a lo largo del territorio.

Estudios como el de Fajardo y Franco (2004), realizado sobre la cuenca alta del río Magdalena, Pérez et al (2022), realizado sobre la cuenca del río Cali, Cesar Caviedes (1998), el cual habla sobre la influencia del ENOS sobre algunos ríos de América del Sur y Poveda et al (2010) y (2013) que hace énfasis en los ríos Colombia, permitieron identificar el efecto del ENOS sobre el territorio nacional y las afectaciones sobre las precipitaciones y los caudales de los ríos en el País.

Como resultado de la interpolación de las principales variables usadas en los trabajos anteriores, como lo son registros de precipitación, descarga de los ríos, humedad del suelo y la cobertura vegetal; se evidenció que durante el periodo de la Niña se producen estaciones más húmedas, es decir con mayor registro de precipitaciones, aumento en la descarga de los ríos, cobertura vegetal y humedad del suelo; mientras que durante el Niño se producen estaciones más secas de lo normal de manera que disminuyen exponencialmente los caudales de los ríos, principalmente los ubicados al occidente de Colombia, y a su vez disminuye la humedad y cobertura de los suelos (Poveda y otros, 2010).

2 EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)

El Niño es un calentamiento anómalo, tanto de las aguas superficiales del centro como del este del océano Pacífico tropical, que provoca una profundización de la termoclina oceánica y se encuentra

asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del océano Pacífico tropical (Poveda & Mesa, 1996).

Según el IDEAM, El Niño es el término originalmente usado para describir la aparición, de aguas superficiales relativamente más cálidas que lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Este calentamiento de la superficie del Océano Pacífico cubre grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta, entre ellas, el norte de Suramérica donde está situado el territorio colombiano. El fenómeno del Niño tiene un promedio de duración de doce (12) meses; sin embargo, han sido registrados fenómenos muy cortos, con duración de siete (7) meses (1946), y eventos prolongados hasta veintiocho (28) meses (1939- 1942). El calentamiento del océano relacionado con el fenómeno El Niño es recurrente, aunque no periódico y, en términos generales, se presenta entre cada dos (2) y cada siete (7) años (IDEAM, 2012).

Por su localización geográfica, Colombia, recibe la influencia directa de los procesos océano-atmosféricos del Pacífico tropical, asociados al ENOS. Lo que ha podido establecer la intensidad de los fenómenos del Niño y La Niña, donde se ha demostrado que está directamente en función con la temperatura superficial del océano y con el área cubierta por las mismas (Bocanegra, 2007). En el análisis de la información histórica, se puede encontrar que la variabilidad climática interanual en Colombia explica claramente las alteraciones producidas en las precipitaciones, estrechamente ligadas con los fenómenos El Niño y La Niña, que han ocasionado, a lo largo del tiempo, lluvias sequías extremas, respectivamente, en diferentes regiones del territorio colombiano (Bocanegra, 2007).

3 ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL

Según Fajardo y Franco (2004), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es conocida como la franja de bajas presiones que se encuentra sobre la zona ecuatorial, donde confluyen los vientos alisios del suroeste y del noreste; en el cual, gracias a las altas temperaturas, las masas de aire ascienden cargados de humedad (convección), originando nubosidad, que posteriormente condensan y causan fuertes precipitaciones. Cabe resaltar que la ZCIT es discontinua y su comportamiento puede variar de un lugar a otro, sea terrenos marinos o terrestres.

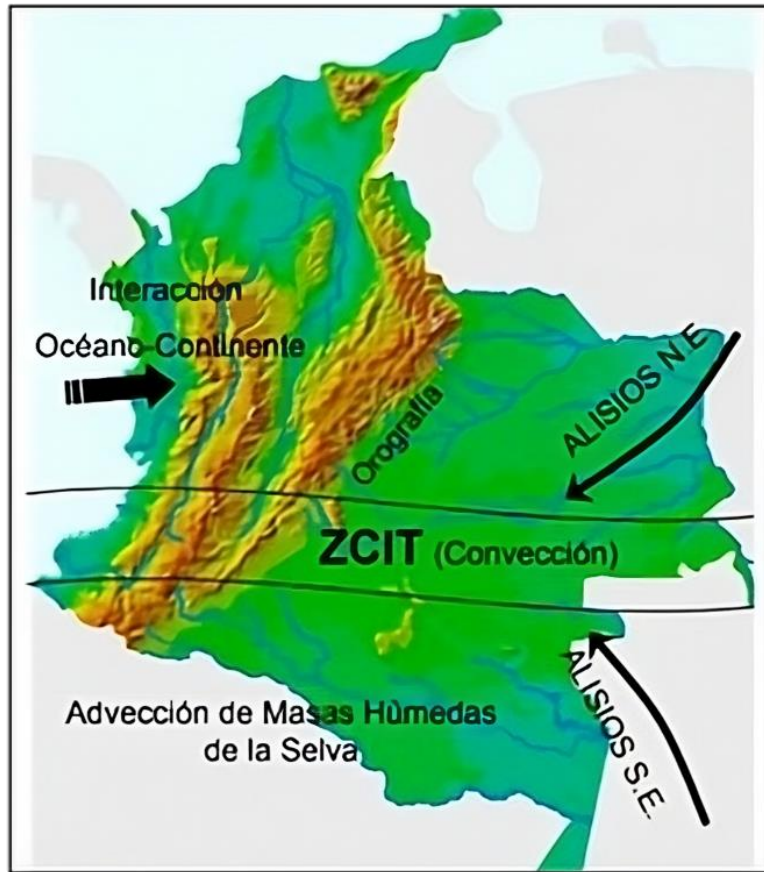


Imagen 1 Esquema de ubicación de ZCIT en Colombia. Tomada de (Fajardo & Franco, 2004).

Además, Fajardo & Franco (2004), hacen mención de la ZCIT como un sistema dinámico, producto de la confluencia de aire húmedo, traído desde el Atlántico y la Amazonía por los vientos Alisios del NE y SE, hasta latitudes bajas, donde se encuentra el territorio colombiano. Este movimiento lento de grandes masas de aire alimenta el cinturón de bajas presiones del ecuador y da lugar a importantes movimientos convectivos generando altos volúmenes de precipitación. Desde noviembre hasta mediados de marzo, el sur del territorio nacional se encuentra bajo la influencia de este sistema nuboso (ZCIT), registrando sobre la región montañosa sur el mayor porcentaje de precipitación caída durante el año.

La climatología de Colombia está dominada por los desplazamientos sur-norte-sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Zea, Eslava, & León, 2000). Donde se evidencia que la ZCIT se desplaza latitudinalmente sobre el segmento del océano Pacífico oriental, correspondiente al territorio colombiano entre 1° y 7° de latitud norte en promedio, y en su desplazamiento, el sector por donde se percibe mayor tiempo su presencia es alrededor de los 3° norte, donde se encuentra

el puerto de Buenaventura. Sin embargo, durante eventos ENSO esta posición extrema puede alcanzar los 5° de latitud Sur aproximadamente (Zea y otros, 2000).

3.1 VARIACIONES CLIMÁTICAS EN COLOMBIA

En Colombia, la temperatura está directamente relacionada por la posición geográfica y por su característico relieve. Estas particularidades definen la amplitud del ciclo anual y la variación espacial del clima. En la Zona Andina, el comportamiento de esta variable se define por la presencia de los diferentes pisos térmicos, los cuales se dan por la disminución de temperatura media del aire con el aumento de altura. El valor promedio de variación de temperatura con respecto a la altura se denomina Gradiente Térmico Vertical y tiene un valor de 0.65 °C/100 m. En las zonas de los valles interandinos, por lo general, se registran los valores más altos, caso contrario para las zonas de los altiplanos, áreas cercanas a páramos y nevados, donde se reportan las temperaturas más bajas (Fajardo & Franco, 2004).

Según Fajardo y Franco (2004), para Colombia, se resalta la estacionalidad y variación interanual, debido al poco tiempo de estudio de los fenómenos climáticos y a la corta longitud de muchas de las series de datos que posee el país. Es importante resaltar que en Colombia la principal causa de la estacionalidad (épocas secas y lluviosas) es la ZCIT, factor que favorece el comportamiento climatológico del país y como consecuencia, el caudal de los ríos a lo largo del territorio.

En la mayoría de las cuencas, de los principales ríos de Colombia, es común el comportamiento bimodal para la precipitación, lo que se manifiesta con dos estaciones secas y dos estaciones lluviosas al año; este régimen de precipitaciones influye directamente en el comportamiento del caudal y también en otras variables como la temperatura, humedad, evaporación y brillo solar.

3.2 VARIACIONES INTERANUALES

Las variaciones climáticas a escala interanual en Colombia, están controladas fuertemente por la ocurrencia del fenómeno océano- atmosférico El Niño – Oscilación del Sur (ENOS).

Según Poveda (2004), la magnitud de los cambios en los balances de agua y energía global, que ocurren durante las dos fases del ENOS (El Niño y La Niña), ocasiona fuertes alteraciones hidroclimáticas. Además, Poveda (2004) hace énfasis en estudios anteriores realizados por la Universidad Nacional de Colombia, que, durante El Niño, se presenta una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, así como la disminución en la humedad del suelo y coberturas vegetales (Poveda G. , 2004).

Además, Poveda (2004), menciona que durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecidas de los ríos, avalanchas e inundaciones, con consecuencias y pérdidas parciales, y, totales en algunos casos.

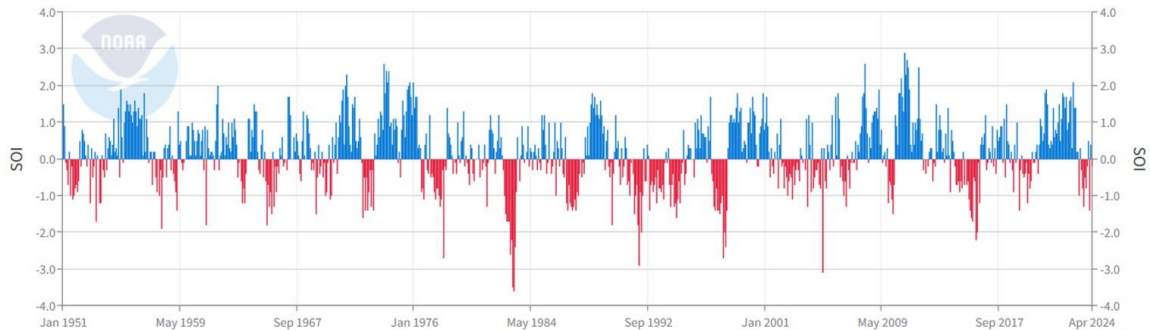
3.3 VARIACIONES ANUALES

El ciclo anual hidro-climático en Colombia está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), relacionada con el movimiento trans- ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este (Poveda G. , 2004).

4 ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI)

Según la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), el Índice de Oscilación del Sur (SOI) es un índice estandarizado basado en las diferencias observadas en la presión del nivel del mar entre Tahití y Darwin, Australia. El SOI es una medida de las fluctuaciones a gran escala en la presión del aire que ocurren entre el Pacífico tropical occidental y oriental (es decir, el estado de la Oscilación del Sur) durante los episodios de El Niño y La Niña. En general, las series temporales suavizadas del SOI se corresponden muy bien con los cambios en las temperaturas del océano en todo el tropical oriental. (NCEI, s.f.). La fase negativa del SOI representa una presión del aire por debajo de lo normal en Tahití y una presión del aire por encima de lo normal en Darwin. Los períodos prolongados de valores SOI negativos (positivos) coinciden con aguas oceánicas anormalmente cálidas (frías) en todo el Pacífico tropical oriental, típicas de los episodios de El Niño (La Niña). (NCEI, s.f.). Es necesario precisar que, si bien los fenómenos del Niño y La Niña no son periódicos, son recurrentes a través del tiempo.

Southern Oscillation Index (SOI)



Grafica 1 Comportamiento de Southern Oscillation Index -SOI. Tomado de <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>.

5 ENOS EN COLOMBIA

A partir de 1950, la NOAA cuenta con los datos de variables necesarias para el complejo entendimiento del ENOS, como las temperaturas de la superficie del océano y la presión atmosférica; que han servido para buscar relaciones entre los impactos causados por este fenómeno con las corrientes oceánicas “calientes” de algunos países. Igualmente, la NOAA ha establecido criterios generales para clasificar la intensidad del fenómeno que puede ser: débil, moderado o fuerte, en cuanto a la amenaza, lo que depende del grado de calentamiento promedio (UNGRD, 2016).

Es importante mencionar, que durante años los científicos han descubierto con ese corto registro de datos, importantes variaciones de distintas frecuencias, se necesita una serie mucho más larga, que permita complementar la frecuencia de variabilidades y poder determinar de qué factores depende las variabilidades de baja y muy baja frecuencia, cosa que los modelos actuales no pueden hacer. Estas variabilidades solo pueden ser observadas en series que abarquen un gran periodo de tiempo.

En Colombia, los periodos de ENOS registrados con mayor intensidad fueron entre los años 1982-1983, 1991-1992 y 1997-1998 (Cadavid, 2023).

Según Fajardo y Franco (2004), el ENOS que ocurrió entre 1982-1983 tomó por sorpresa a los científicos del mundo y obligó a poner en marcha el programa de monitoreo del Pacífico el cual culminó en 1994. Con la información obtenida a través del monitoreo y su posterior análisis, se diseñaron mejores modelos climáticos del Pacífico que permitieron que el ENOS 1997-1998 fuera

el primer evento que se pudo predecir con suficiente tiempo de antelación para que los gobiernos de los países que se verían afectados tomaran acciones de mitigación.

Entre 1982-1983 se produjo en el sur de África y en todo el Pacífico Occidental una larga sequía y en la parte oriental de Australia se sufrió la peor sequía de los últimos 200 años, también hubo sequías en Panamá, Costa Rica y el nordeste de Brasil. A la par de estas situaciones, en otras áreas del globo se presentaron fuertes lluvias, como en Perú y Ecuador (países directamente afectados por el fenómeno), el sur de Brasil, la parte septentrional de Argentina y el suroeste de EE. UU. (Fajardo & Franco, 2004) (UNGRD, 2016).

En Colombia, el fenómeno entre 1991-1992 tuvo calificativos de elevado mientras que en otras zonas tuvo calificativo de moderado. Hay que recordar que en esos años el país se vió sometido a un intenso racionamiento energético por los bajos niveles que tenían los embalses del Sistema Interconectado, que suple gran parte de la demanda energética de la nación.

En el ENOS ocurrido entre 1997-1998, Perú fue uno de los países más afectados sufriendo las intensas lluvias. El aumento de la temperatura superficial del océano (las temperaturas llegaron a casi 30 °C) generó que el nivel medio del mar superara en 25 cm el promedio en las costas, lo que combinado con las fuertes lluvias trajo poblaciones evacuadas por el avance del mar en tierra firme. Además, en el nororiente de Brasil, donde a causa de la sequía se generaron numerosos incendios en los estados amazónicos, generando pérdidas aproximadas de 50000 Km² de selva amazónica. En Uruguay, Kenia, Sudán, Polonia y República Checa se presentaron desbordes de ríos provocando inundaciones. En Mongolia y el Tíbet las temperaturas descendieron a 42 °C bajo cero con tormentas de nieve jamás registradas.

6 ANÁLISIS ENSO VS. HIDRO CLIMATOLOGÍA EN LOS RÍOS DE COLOMBIA

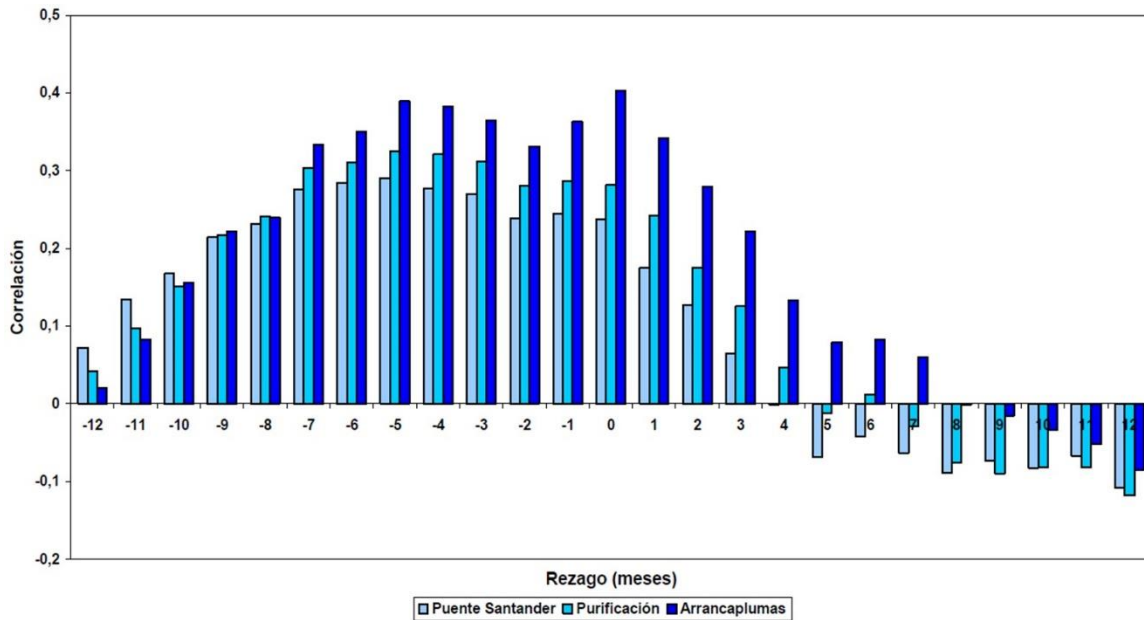
Durante los últimos 30 años, el fenómeno ENOS ha sido ampliamente estudiado con el fin de tener mayor conocimiento de su comportamiento y estar preparado ante las consecuencias naturales que este representa.

En Colombia, se han realizado estudios donde involucran el efecto de este fenómeno en los caudales de algunos de los principales ríos, utilizando diferentes metodologías para calcular y analizar la estrecha relación que implican las diferentes variables en el cambio de la cantidad de agua que fluye en una fuente hídrica en determinado tiempo.

A continuación, se mencionan algunos métodos que han sido utilizados:

Sobre la cuenca alta del Río Magdalena, se realizó un análisis estadístico con el fin de analizar la relación del ENOS y las variables hidrometeorológicas de caudal y temperatura (Fajardo & Franco, 2004). El resultado de estos análisis muestra que el caudal en el sector norte de la cuenca del río Magdalena presenta la mayor relación “directa” con las macro variables que definen el ENOS; lo que permite observar que, en promedio, la onda de afectación tiende a desplazarse en dirección norte-sur (de la parte baja a la alta de la Cuenca Alta del Magdalena), con una diferencia de dos meses aproximadamente entre las estaciones extremas que se analizaron (Puente Santander y Arrancaplumas)

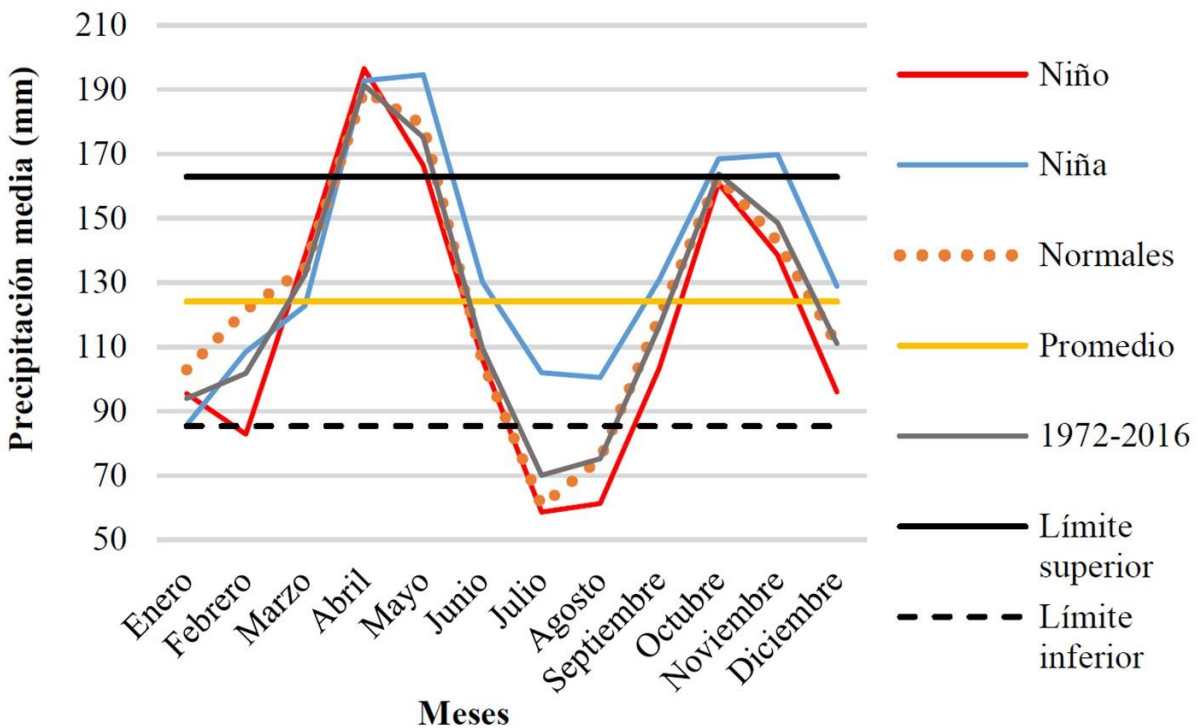
Además, el incremento de caudal presente en las fases NIÑA y el déficit del mismo en fases NIÑO, tienden a ser más marcados a medida que las estaciones ganan latitud, alcanzando los valores extremos en la estación Arrancaplumas, siendo el valor extremo máximo 20.0 % por encima de los promedios y el valor extremo mínimo 16.9%, por debajo de los mismos (Fajardo & Franco, 2004). Para la variable caudal se calculó la variación porcentual promedio respecto a los valores medios para las estaciones. Con los resultados obtenidos se realizó un composite para fase extrema tipo, tanto cálida como fría, de la variación porcentual por cada estación. Y para la variable temperatura, se calculó la variación promedio en forma de anomalía, realizando mapas de isolíneas de anomalías de temperatura promedio mediante el método Kriging durante cada fase extrema. Con los resultados obtenidos se realizó un composite para fase extrema tipo, tanto cálida como fría, de las anomalías de temperatura.



Grafica 2 Correlograma cruzada, series de caudal con SOI (sin Media Móvil). Tomado de (Fajardo & Franco, 2004).

A partir de esta gráfica se concluyó que existe una fuerte correlación entre las series de caudal y las variables macroclimáticas del ENOS, mostrando un rezago diferente para cada estación. Las correlaciones con el fueron positivas, ya que un aumento (NIÑA) o disminución (NIÑO) en este índice que muestra la variación de la presión atmosférica en el Océano Pacífico, tiene la misma tendencia en el caudal de la cuenca.

Sobre la cuenca del río Cali, se realizaron una serie de interpolaciones de datos a partir de las cuales se determinaron promedios para los diferentes fenómenos ENOS, lo que permitió conocer cuáles eran las zonas más afectadas por sequías y altas precipitaciones en la zona dicha cuenca. (Pérez y otros, 2022). Para ello, se analizó la distribución espacio temporal de las lluvias en la cuenca hidrográfica del río Cali, concluyendo que los regímenes de lluvia sobre la cuenca, durante todos los años estudiados, se comportan de igual manera, es decir, mayores precipitaciones en la parte alta y menores en la zona baja. No obstante, de acuerdo con los fenómenos de El Niño analizados, se observó una mayor afectación en la zona alta de la cuenca por la disminución de las lluvias en un 10%, teniendo en cuenta la información de 3 estaciones ubicadas en la parte alta, con una tendencia negativa, en los 45 años del periodo de estudio (1972-2016), los meses de mayor cuidado en la cuenca corresponden a abril, mayo y junio, con una mayor lámina de precipitación promedio, y a junio, julio y agosto, con una menor lámina de precipitación (Pérez y otros, 2022).



Grafica 3 Precipitación media mensual del periodo 1972-2016 en años Niña, Niño y normales. Tomado de (Pérez y otros, 2022). En el estudio realizado por Cesar Caviedes (1998), sobre la Influencia de ENOS sobre las variaciones interanuales de ciertos ríos en América del Sur, entre los que se encontraron ríos colombianos como Río Fundación, Río Magdalena, Río Cauca, Río San Juan y Río Mira; se realizó un análisis sobre tres condiciones océano- atmosféricas: El Niño, La Niña y Normal, analizando el promedio mensual de precipitación, determinando varianzas y aplicando una serie de “test” para calcular la similitud entre estas.

Como resultado, se obtuvo que, para los ríos de América del sur, se exhiben bajos caudales durante los años del Niño, en correspondencia con las bajas precipitaciones en las fases bajas del ENOS y se obtuvo, además, que las más altas descargas se observan durante los años de la Niña y “normales”. Para el Río Fundación, se evidenció una independencia de las fases del ENOS, ya que los caudales en años “normales” aparecen como los más altos, mientras que los caudales durante el Niño y La Niña son sensiblemente menores. Para el río San Juan, el primer pico anual durante El Niño tiene caudales no significativamente menores que las otras poblaciones, mientras que para el segundo pico las descargas durante La Niña son definitivamente mayores que durante el fenómeno “normal” y Niño (Caviedes, 1998).

Para los ríos Santa Rita, Magdalena, Sinú, Negro, Ranchería, Patía, entre otros, se usó la metodología planteada por Waylen y Caviedes (1990), para la estimación de los caudales máximos de distinto periodo de retorno en ríos de Colombia, usando una función de distribución de probabilidades mixta tipo I, según las fases del ENOS; donde se obtuvo que la media y la desviación estándar de los caudales máximos anuales observados aumenta con el fenómeno de La Niña. Además, se encontró que existe una diferencia relevante entre los caudales de La Niña respecto a El Niño y al “normal”; haciendo que sea necesario diferenciar las muestras de caudales de los diferentes ríos.

Teniendo en cuenta la variabilidad climática, se realizaron los análisis estadísticos para establecer cuál era la función de probabilidad más adecuada para la predicción de caudales máximos. Se compararon entonces las diferencias entre los caudales estimados para un periodo de retorno determinado por las funciones de distribución de probabilidad mixta y las funciones de probabilidad simples. Se encontró que las zonas donde es más notoria la diferencia entre los caudales estimados por las dos metodologías es en la Costa Atlántica Norte y en la región suroriental del país, en los ríos Sinú y Meta. Se considera necesario modelar los caudales máximos en donde el fenómeno ENOS tenga una influencia muy notoria, con funciones de probabilidad mixtas (Vargas & Poveda).

Sobre el valle del Río Cauca, se realizó una estimación promedio de la frecuencia de ocurrencia del ENOS de acuerdo a las variables hidro climáticas en los últimos 50 años. El resultado de este estudio arrojó que los caudales medios en el Valle del Cauca están fuertemente determinados por el fenómeno ENOS en sus fases cálida y húmeda. La tendencia es a un clima más seco cuando el Pacífico está en una fase cálida (El Niño) y la oscilación del sur es negativa, mientras que la fase fría está acompañada de mayores lluvias. Durante la ocurrencia de la fase cálida se han registrado los caudales mínimos históricos de los ríos de la región. Aunque esta relación es clara, no es simple ni lineal, puesto que hay casos de Niños muy intensos que no producen sequías tan fuertes (1982-1983) y de sequías fuertes que no están asociadas a períodos de ocurrencia del mismo; indicando esto, existen otras variables macro climáticas de gran influencia en el clima regional (Carvajal y otros, 1998).

Tabla 1. Comportamientos de los caudales máximos, medios y mínimos medios anuales de algunos ríos del Valle del Rio Cauca. Tomado de (Carvajal y otros, 1998).

| Río | Período | Años | Registro Total | | | Período de El Niño | | | Período La Niña | | |
|-------------|-----------|------|----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
| | | | Caudal medio (m ³ /s) | | | Caudal medio (m ³ /s) | | | Caudal medio (m ³ /s) | | |
| | Registros | | Max | Med | Min | Max | Med | Min | Max | Med | Min |
| Armaime | 1984-1994 | 10 | 8,2 | 5,0 | 1,6 | 3,4 | 2,5 | 1,6 | 7,4 | 7,4 | 7,4 |
| Bolo | 1960-1994 | 34 | 12,0 | 4,0 | 0,8 | 5,0 | 2,3 | 0,8 | 8,7 | 7,2 | 5,1 |
| Bugala Gde | 1976-1994 | 18 | 23,3 | 13,9 | 8,2 | 12,4 | 10,3 | 8,2 | 19,4 | 19,4 | 19,4 |
| Desbaratado | 1972-1994 | 22 | 5,8 | 2,6 | 0,8 | 4,0 | 1,9 | 0,5 | 5,3 | 4,1 | 3,1 |
| Fraile | 1961-1994 | 33 | 10,2 | 6,3 | 1,8 | 7,0 | 4,3 | 1,8 | 10,4 | 8,3 | 5,4 |
| Garrapatas | 1979-1994 | 15 | 19,0 | 13,0 | 8,1 | 10,9 | 9,7 | 8,1 | 15,8 | 15,8 | 15,8 |
| Jamundi | 1946-1994 | 48 | 7,3 | 4,2 | 1,5 | 4,7 | 3,8 | 2,9 | 8,0 | 7,1 | 5,0 |
| La Vieja | 1946-1994 | 48 | 152,0 | 88,0 | 47,0 | 75,6 | 60,4 | 47,0 | 156,0 | 127,6 | 83,3 |
| Ovejas | 1964-1994 | 30 | 28,4 | 18,4 | 11,1 | 19,5 | 13,8 | 8,3 | 28,3 | 23,8 | 16,4 |
| Palo | 1946-1994 | 48 | 33,6 | 15,3 | 4,7 | 12,0 | 9,1 | 4,7 | 23,1 | 19,5 | 15,0 |
| Quinamayo | 1970-1994 | 24 | 7,3 | 4,2 | 1,5 | 3,9 | 2,5 | 1,5 | 6,7 | 6,3 | 5,6 |
| Timba | 1946-1994 | 48 | 29,9 | 20,6 | 12,6 | 23,9 | 16,3 | 12,7 | 30,7 | 27,4 | 24,3 |
| Tuluá | 1945-1994 | 49 | 29,8 | 15,4 | 8,6 | 14,9 | 11,7 | 9,1 | 29,4 | 22,8 | 19,4 |
| Cauca | 1946-1994 | 48 | 301,0 | 193,0 | 113,0 | 184,0 | 146,0 | 112,8 | 350,6 | 268,6 | 178,9 |
| Cauca | 1961-1994 | 33 | 673,0 | 399,0 | 188,0 | 319,1 | 267,0 | 198,0 | 713,0 | 617,3 | 518,0 |
| | | | 89,4 | 53,5 | 27,3 | 46,7 | 37,4 | 27,9 | 94,2 | 78,8 | 61,5 |

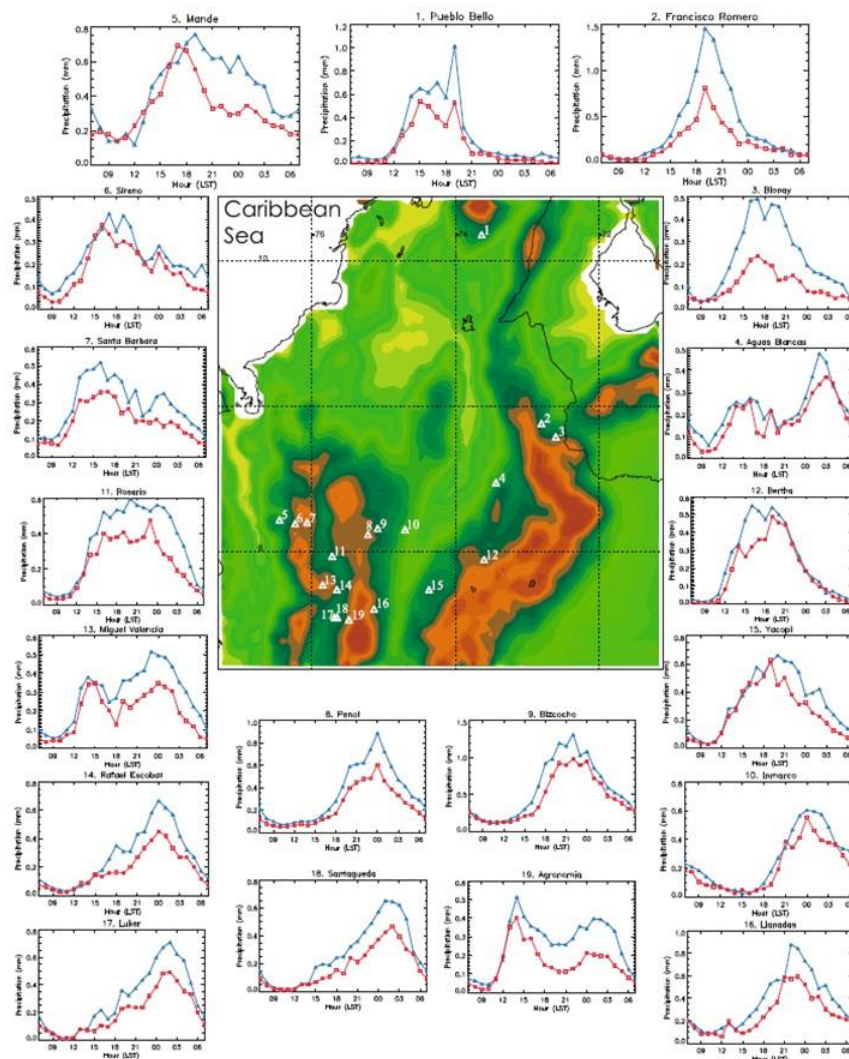
Los caudales medios de los ríos se incrementaron en un 47% respecto a los valores medios durante la ocurrencia de Anti-Niños, con un promedio de 68,2% en el evento más crítico (1988-89), alcanzando en algunos casos valores superiores al 100%.

Esta situación es crítica, ya que la torrencialidad de las cuencas favorece la acumulación de grandes volúmenes de agua en la zona plana (tierras cultivadas), generando pérdidas de vidas humanas y de cosechas, inundaciones, erosión, incremento de plagas y enfermedades endémicas entre otros.

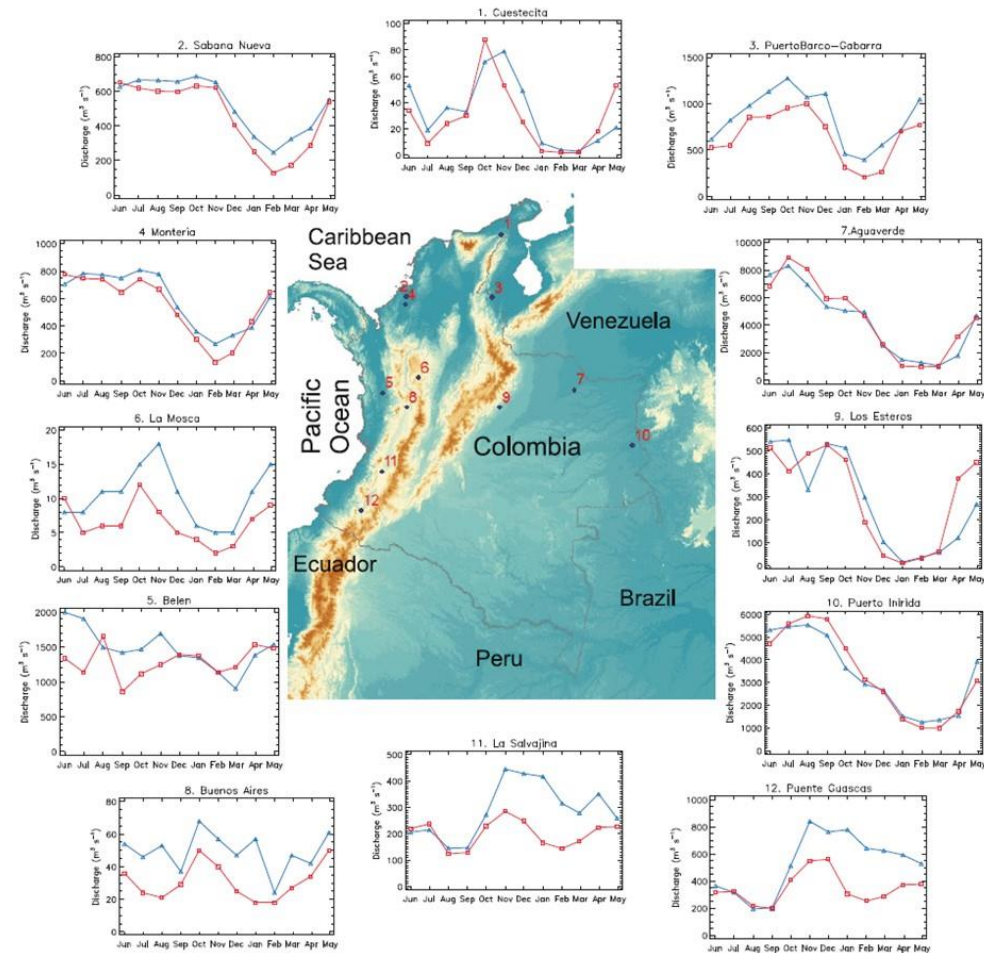
Según la información aportada en el estudio realizado por (Poveda y otros, 2010), donde se revisa un conjunto de anomalías hidro climáticas en escalas de tiempo interanuales, con énfasis en los Andes colombianos durante las fases extremas de ENOS; para propósitos de estimación, las anomalías de la precipitación, las descargas de los ríos, la humedad del suelo y el índice de vegetación están estadísticamente relacionadas con diferentes índices ENOS.

Para lo cual estiman, grafican y analizan la precipitación diaria en 19 ríos de Colombia durante el fenómeno del Niño y Niña (1972-1999) (**Grafica 4**), los caudales anuales promedio en 12 ríos de Colombia durante los fenómenos del Niño y Niña (1970-2000) (**Grafica 5**); la serie temporal de la humedad del suelo durante 10 días y las estimaciones de correlaciones rezagadas estacionales entre el Índice de Oscilación del Sur (SOI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en América del Sur tropical.

Los análisis de correlación cruzada estacional confirman que El Niño produce estaciones secas y más prolongadas en los Andes de Colombia y La Niña produce estaciones más húmedas de lo normal. Los datos de descarga de ríos y precipitaciones muestran que los efectos de ENSO aparecen antes y más fuertes en los Andes occidentales (Poveda y otros, 2010).



Grafica 4 Precipitación diaria en ríos de Colombia durante el fenómeno del Niño y Niña (1972-1999). Tomado de (Poveda y otros, 2010).

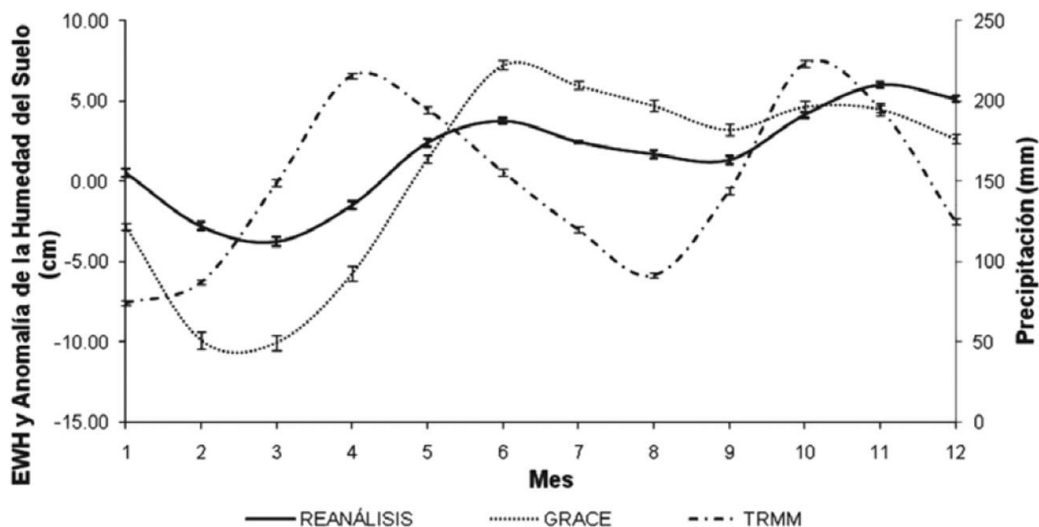


Grafica 5 Ciclo anual de caudales diarios máximos promedio durante El Niño (rojo), La Niña (azul) para ríos seleccionados en toda Colombia. Tomado de (Poveda y otros, 2010).

En la metodología descrita por (Giraldo & Poveda, 2013), mencionan una de las maneras de estimar los cambios en el almacenamiento continental de agua, definida como la cuantificación del campo gravitacional. Ésta se pudo determinar con diferentes misiones satelitales, entre ellas la misión GRACE; (Gravity Recovery and Climate Experiment), que realiza desde marzo de 2002, mediciones de los cambios espaciales y temporales del campo gravitacional terrestre. Los cambios observados en el campo gravitacional son comúnmente expresados en variaciones de altura equivalente de agua (EWH, por sus iniciales en inglés) (Giraldo & Poveda, 2013). EWH es una representación idealizada de las variaciones del almacenamiento de agua; es decir, es la medida del espesor de un estrato de agua que es necesario adicionar o remover de la superficie de la tierra si la fluctuación total del campo gravitacional es debida a un cambio en el almacenamiento de agua. La otra misión satelital de donde se tomaron datos importantes para este estudio fue La Misión de Medición de la Lluvia Tropical (Tropical Rain- fall Measuring Misión, TRMM) que es una

conjunción de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA), diseñada para monitorear y estudiar la dinámica espacial y temporal de la precipitación tropical y subtropical del (NASA, 2007).

Con la información obtenida del EWH, se presentaron los registros mensuales de los estimativos del coeficiente de correlación lineal de los diferentes centros de medición en las 5 regiones de Colombia: oriental, occidental, caribe, amazónica y Andina; donde se encontró buena correlación entre las series indicando la validez de los datos. La Grafica 6 que se muestra a continuación, es un ejemplo de los datos presentados en el estudio de (Giraldo & Poveda, 2013), donde se presentan los datos durante el ciclo anual de los valores promedios de precipitación, (TRMM), EWH (GRACE), y humedad del suelo (Reanálisis) para la región Andina.



Grafica 6 Relación entre el EWH y las anomalías de humedad del suelo. (Poveda y otros, 2010).

Cabe resaltar, que para la gráfica presentada, se observa que existe relación entre los comportamientos de las distintas series, y se identifica un desfase temporal en picos y valles de aproximadamente 1 a 2 meses entre los ciclos del EWH y humedad del suelo respecto al de la precipitación con atenuación en sus extremos (menor variabilidad), seguramente por los mecanismos que permiten regular el almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo. (Giraldo & Poveda, 2013).

Se enfatiza en que las correlaciones son mejores cuando la región analizada se encuentra más alejada de la costa, esto puede indicar alguna interferencia del océano en las soluciones de EWH.

El ciclo anual de EWH y la humedad del suelo para cada una de las regiones analizadas corresponde con el ciclo anual de la precipitación con rezago entre uno y dos meses.

Se concluye que, con el análisis de los datos satelitales obtenido, durante el desarrollo del ENSO, en este caso la fase cálida (El Niño), se presenta una disminución del EWH para cada una de las regiones analizadas y corresponde con rezago de uno o dos meses a las anomalías negativas en precipitación que ocurren en las diferentes regiones durante su aparición.

7 CONCLUSIONES

Los métodos estadísticos usados para estimar, analizar y calcular la incidencia del fenómeno ENOS sobre el caudal de los ríos en Colombia, según los estudios realizados en varios ríos importantes del país como lo son el río Cauca (Carvajal y otros, 1998), en el río Magdalena (Fajardo & Franco, 2004) y en algunos ríos de primer y segundo orden mencionados en (Caviedes, 1998) y (Cai y otros, 2020); son importantes para incursionar en el estudio a profundidad de este fenómeno, los factores y las variables que son importantes durante el desarrollo de éste.

Al graficar las precipitaciones durante los estudios anteriormente mencionados, concuerdan con la aparición de El Niño en la disminución de las precipitaciones y de manera directamente proporcional a los caudales de los ríos, específicamente en las cuencas medias y bajas, donde el transporte, sedimentación, filtración y evaporación de las fuentes hídricas han sido mayores.

Es importante mencionar, que, según los estudios realizados en los diferentes ríos de Colombia, donde se evaluaron datos a escalas temporales diferentes, las variables de precipitación, humedad del suelo, cobertura vegetal y descarga de los ríos, van estrechamente relacionados a la ocurrencia de ENOS, con mayor influencia en el occidente del territorio colombiano. Arrojando que, durante el Niño, las estaciones humedad disminuyen junto con el decrecimiento considerable en las precipitaciones, y a su vez, el caudal de las fuentes hídricas que son directamente afectadas. A diferencia de cuando ocurre La Niña, donde las estaciones húmedas aumentan junto con la ocurrencia de precipitaciones prolongadas en gran parte del territorio, disminuyendo así la temperatura promedio y aumentando la humedad del suelo y cobertura vegetal. Cabe resaltar que el ENOS ha sido estudiado desde hace aproximadamente 70 años, gracias a la ocurrencia de fenómenos que marcaron la diferencia en la historia del país. Sin embargo, aunque el conocimiento ha contribuido a mejorar la previsibilidad hidro climática, y mejora de estrategias para lograr un desarrollo sostenible, hace falta ahondar más en esta temática, debido a que este fenómeno no

siempre ocurre de la misma manera y no siempre afecta con la misma magnitud las mismas zonas del país.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Bocanegra, J. E. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá.
- Cadavid, M. E. (2023). El Niño y la oscilación del sur, efectos en Colombia. *Energia y Geociencias*, 18-21.
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., . . . Maren, J. A. (2020). Climate impacts of the El Niño– Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews | Earth & Environment*, 215-231.
- Carvajal, Y., M., H. M., & Jiménez, H. (1998). Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia [. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines Année*, 743-751.
- Caviedes, C. (1998). Influencia de ENOS sobre las variaciones interanuales de ciertos ríos en América del Sur. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, vol. 27, 627-641.
- Centre, B. o. (s.f.). EL NIÑO AND THE SOUTHERN OSCILLATION. *Bureau of Meteorology Research Centre*, 713-719.
- Fajardo, G., & Franco, J. (2004). *Análisis estadístico de la relación del fenómeno ENOS El niño oscilación sur en las variables hidrometeorológicas de caudal y temperatura en la cuenca alta del Río Magdalena*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Giraldo, G. G., & Poveda, G. (2013). VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO EN COLOMBIA. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 37 , 89-113.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J., Arango, A., & Ortiz, J. (2013). Impact of the 2010e2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 16-25.
- IDEAM. (2012). *Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia*. Bogotá.

- López, J. C., Royero, J. C., Otero-Díaz, L., & Ospino-Ortiz, S. R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *ACAD*, 527-546.
- Moura, M. D., & Vitorino, M. I. (2012). VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN TEMPO-EESPACIOASOCIADO AL ÁREA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL. *Revista Brasileña de Meteorología*, v.27, 475-483.
- NCEI. (s.f.). *National Center Environmental Information*.
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>
- Ortiz, M. A., Murillo, D. D., & Franco, V. V. (2022). Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la. *DYNA- Universidad Nacional de Colombia*, 168-178.
- Pérez, M. A., Montenegro, D., & Vargas, V. (2022). Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia. *DYNA*, 168-177.
- Philander, S. G. (2001). EL NINO SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) MODELS. *Princeton University*, 827-832.
- Philander, S. G., & Fedorov, A. (2003). IS EL NIÑO SPORADIC OR CYCLIC? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 579-594.
- Poveda, G. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 37*, 2169-2178.
- Poveda, G. (2004). *CAUDALES MÍNIMOS EN COLOMBIA: RELACIONES MACROCLIMÁTICAS, ESCALAMIENTO Y BALANCES HIDROLÓGICOS*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Poveda, G. (2004). Caudales mínimos en Colombia: Relaciones macroclimáticas, escalamientos y balances hidrológicos. En *SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE EVENTOS EXTREMOS MÍNIMOS EN REGÍMENES DE*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología en Colombia; una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *ACAD*, 201-222.
- Poveda, G., & Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en Mexico, Vol. XI*, 21-37.
- Poveda, G., & Mesa, Ó. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. En U. N. Colombia.

- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 37 , 2169–2178 .
- Poveda, G., Rueda, Ó. A., & Alvarez, D. M. (2010). Hydro-climatic variability over the andes of colombia associated with enso: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Clim Dyn*, 2233–2249.
- Restrepo, J. C., Ortíz, J. C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., & Aguirre, J. (2013). Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of Hydrology*, 266–281.
- Restrepo, J., & Kjerfve, C. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 137–149.
- Trenberth, K. E. (2001). EL NINO SOUTHERN OSCILLATION (ENSO). *National Center for Atmospheric*, 815-827.
- UNGRD. (2016). *Fenomeno del Niño- Análisis comparativo 1997-1998//2014-2016*. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Vargas, D. M., & Poveda, G. (s.f.). Análisis de Frecuencia de los Caudales Máximos Diarios en Ríos de Colombia Considerando las Fases del Fenómeno ENSO. *XVII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA* (págs. 184-193). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Zea, J., Eslava, J., & León, G. (2000). Zea, J., J. Eslava y G. León. 2000. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb. 1*, 31-38.