

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

ENOS y su influencia en sequías en la cuenca del río Paute, Ecuador

José David Romo Iglesias

Tutor: William Sacher Freslon

Quito, 2025

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional		
	Reconocimiento de créditos de la obra	
	No comercial	
	Sin obras derivadas	
Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia		

Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, José David Romo Iglesias, autor del trabajo intitulado “ENOS y su influencia en sequías en la cuenca del río Paute, Ecuador”, mediante el presente documento de constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

26 de mayo de 2025

Firma: _____

Resumen

El objetivo de esta investigación es examinar la relación entre el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y las sequías en la cuenca del río Paute, Ecuador, mediante el análisis de series temporales. Se busca comprender cómo las variaciones climáticas asociadas al ENOS impactan en la frecuencia e intensidad de las sequías en esta cuenca hidrográfica. Se recopilaron y analizaron datos climáticos históricos, incluyendo índices de sequía: SPEI, así como el Índice de El Niño Oceánico en la región 3.4 (ONI), para evaluar la posible relación de causalidad entre los eventos ENOS y los episodios de sequía.

Los resultados muestran que la influencia del ENOS en las sequías de la cuenca del río Paute es heterogénea, afectando de manera desigual diferentes áreas de la cuenca. Factores como la variación en los vientos y la humedad juegan un papel importante en la amplificación o mitigación de las sequías en ciertos sectores durante los eventos de ENOS. Además, se identificó que las sequías relacionadas con el ENOS tienen una frecuencia menor en comparación con otras, pero tienden a ser más severas, como las experimentadas en 2016 y 2023, donde la combinación de condiciones de baja humedad y la influencia de ENOS agravaron significativamente la severidad de los eventos.

A través del modelo de redes neuronales de memoria corto-largo plazo (LSTM), se concluyó que las variables más influyentes en la predicción de la sequía hidrológica en la cuenca son la temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo, ambas pueden ser alteradas por el ENOS. El análisis de vectores autorregresivos (VAR) por su parte, revela una relación estadísticamente significativa entre los eventos de ENOS y las sequías SPEI, sugiriendo una posible causalidad en ciertas condiciones climáticas.

Finalmente, se desarrolló un índice de permanencia de sequías, combinando índices de sequía meteorológicos, hidrológicos y agrícolas, como herramienta para el monitoreo y gestión de recursos hídricos. Este índice busca mejorar la comprensión de la duración e intensidad de las sequías, facilitando la toma de decisiones para mitigar sus efectos. Los hallazgos de este estudio aportan una base sólida para mejorar las estrategias de adaptación en la región, resaltando el papel del ENOS en la variabilidad climática que impacta la cuenca.

Palabras clave: variabilidad climática, vectores autorregresivos (VAR), análisis espectral

Al momento de escribir esta investigación, Ecuador y en particular la región austral, atravesaba una de las peores sequías registradas en la historia reciente. Recuerdo haberme reunido con mi tutor, William, en Cuenca para revisar los avances de la tesis.

La situación era tan crítica que, de manera irónica, nuestra conversación sobre las sequías en la cuenca del Paute transcurrió a la luz de una vela, consecuencia de los racionamientos eléctricos.

Si después de experiencias como está, aún no comprendemos la gravedad de la emergencia climática que enfrentamos, es poco lo que habremos aprendido de estos momentos difíciles que seguimos atravesando.

Agradecimientos

A mis padres, Alicia y Petronio: todo lo que soy se lo debo a su apoyo incondicional y a su amor inquebrantable. A ustedes, me debo por completo.

A Peto y Meli quienes me incentivaron en seguir este programa, sus palabras fueron el impulso decisivo para el desarrollo de esta etapa académica.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor, William Sacher Freslon, cuya colaboración y guía constante fueron fundamentales en este proceso. Mi admiración y gratitud por su compromiso.

A la gente de CIIFEN (Felipe, Pier, Martín), gracias por orientarme y proporcionarme los datos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Su apoyo fue clave en cada etapa.

Al ingeniero Hernán Larriva, de CELEC Sur, mi gratitud por su valiosa ayuda en medio de la emergencia energética, permitiéndome avanzar en el desarrollo de esta investigación.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas	13
Introducción.....	17
Capítulo primero Variaciones climáticas y las sequías	23
1. El cambio climático.....	23
2. Las sequías a escala global	26
3. Escenarios en Ecuador.....	26
3.1. Cambio climático en Ecuador	26
3.2. Sequías en Ecuador	28
4. El Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS).....	28
5. ENOS y el clima.....	31
6. ENOS y las sequías	33
7. ENOS, cambio climático y sequías en Ecuador	35
Capítulo segundo Metodología: Relaciones entre el ENOS y las sequías	37
1. Zona de estudio	37
2. Datos.....	38
2.1. Estaciones virtuales	39
2.2. Diagrama de flujo metodológico	40
3. Índice de sequías	42
3.1. Índice de sequías de precipitación (SPI)	42
3.2. Índice de sequías de caudales (SDI).....	44
3.3. Índice de sequía de humedad del suelo (SSMI).....	44
3.4. Índice de sequía de salud de la vegetación (SVHI)	45
3.5. Índice de sequía de temperatura (STI)	45
3.6. Índice de sequía de precipitación evapotranspiración (SPEI)	45
4. Análisis de series temporales	47
5. Contraste de Dickey-Fuller aumentado	47
6. Vectores autorregresivos (VAR).....	48
6.1. Orden del VAR.....	49
6.2. Contraste de causalidad de Granger	49
7. Análisis espectral.....	49
7.1. Transformada de Fourier Discreta (DFT)	50

7.2. Espectro de potencia.....	51
7.3. Espectro cruzado	51
7.4. Espectrograma	52
8. Redes neuronales.....	52
8.1. Redes neuronales recurrentes (RNN)	52
8.2. Redes de memoria corta y larga (LSTM).....	53
Capítulo tercero Resultados: Causalidad ENOS y las sequías en la Cuenca del Paute..	57
1. SPEI.....	57
2. Promedio espacial de SPEI.....	59
3. Promedio mensual de SPEI	61
4. Estacionariedad	65
5. Test Dickey-Fuller Aumentado	65
6. ENOS y SPEI	67
7. Modelo VAR	68
8. Análisis espectral.....	72
8.1. Espectros de potencia	72
8.2. Espectro cruzado	73
8.3. Espectrogramas	74
Capítulo cuarto Índice de permanencia de sequías.....	77
1. Índice de permanencia de sequías	77
2. Índice SDI.....	78
3. Redes neuronales.....	79
Conclusiones.....	85
Lista de referencias	87

Figuras y tablas

Figura 1. Intensidad de sequías en la cuenca del río Paute, mediante el índice SPI en años y meses específicos	21
Figura 2. Precipitaciones de la estación meteorológica de Guayaquil durante el periodo 1915 –1993 anotados los años con EN con ocurrencia de eventos de El Niño moderado y fuertes	21
Figura 3. Graficas de incremento de la temperatura media de la tierra en los últimos 150 años.....	24
Figura 4. Modelos de cambios en la temperatura global media y los incrementos de temperatura en los distintos puntos del planeta, siendo los más afectados los polos y las masas terrestres.	25
Figura 5. Temperatura media del Ecuador con información de 32 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país con datos hasta 2010, a partir de ahí se grafican los 4 escenarios RCP del IPCC. Con una línea negra que muestra la tendencia de los datos observados.	27
Figura 6. Anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en un evento El Niño (arriba) y un evento La Niña (abajo).	29
Figura 7. Regiones de El Niño en el Pacífico Tropical	29
Figura 8. Serie de tiempo del ONI desde 1980 hasta 2024. Los periodos por encima de cero se definen como eventos de El Niño y los periodos por debajo de cero, como eventos de La Niña.	30
Figura 9. Serie temporal del SOI en el periodo 1980 – 2024. Los periodos por encima de cero se definen como eventos de El Niño y los periodos por debajo de cero, como eventos de La Niña.	31
Figura 10. Variaciones porcentuales de la precipitación y la humedad en el suelo para los distintos escenarios de cambio climático planteados por el IPCC en su sexto informe.	33
Figura 11. Localización de la Cuenca del río Paute al Sur del Ecuador	38
Figura 12. Ubicación espacial de las estaciones virtuales proporcionadas por CIIFEN, para el seguimiento de las sequías	40
Figura 13. Diagrama de flujo metodológico y cumplimiento de objetivos de cada uno de ellos.....	42

Figura 14. Esquema de una red neuronal recurrente (RNN) del tipo Long short-term memory (LSTM).	53
Figura 15. Celdas de tipo LSTM conectadas entre sí, donde los datos de una celda anterior (t-1) son entradas de una celda presente (t), que a su vez alimenta a una celda futura (t+1).....	55
Figura 16. Diagramas de caja para las series de datos del índice SPEI en cada estación	58
Figura 17. Serie temporal del SPEI para la estación E000000095.....	59
Figura 18. Distribución espacial media de las condiciones de humedad o aridez de la cuenca del río Paute, mediante el uso del índice de sequía SPEI.....	60
Figura 19. Diagrama de caja de la Estación E000000095 que muestra la variación de cada mes del valor del SPEI en el periodo 2004-2024.....	61
Figura 20: Distribución mensual media, de los meses: enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio de los valores de SPEI para la cuenca del río Paute para los años 2004-2024.....	63
Figura 21: Distribución mensual media, de los meses: julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre de los valores de SPEI para la cuenca del río Paute para los años 2004-2024.....	64
Figura 22. Series de tiempo para el SPEI de la estación E000000095, en la parte superior la serie temporal por defecto y en la parte baja la serie temporal diferenciada.....	67
Figura 23. Series de tiempo del ONI y SPEI de la estación E000000095.....	68
Figura 24. Gráfico de raíces inversas del modelo VAR.....	69
Figura 25. Distribución espacial de la causalidad de Granger en la cuenca del río Paute, para establecer posibles sectores de mayor influencia del ENOS en las sequías definidas por el índice SPEI	71
Figura 26. Espectro de potencia para las series de ONI y SPEI diferenciadas.....	73
Figura 27. Espectro cruzado entre ONI y SPEI de la estación E000000095.....	73
Figura 28. Espectrograma de ONI y SPEI que indica frecuencia, magnitud y tiempo de los eventos	74
Figura 29. Índice de sequía de caudales del río Paute en Mazar	78
Figura 30. Ventanas de la serie temporal, en entrenamiento (train), validación (val) y prueba (test) de SDI en Mazar y SPEI en la estación E0000000096. Las líneas sólidas corresponden a la serie temporal de ONI y las Inter punteadas a la serie SPEI de la estación E0000000096.....	79

Figura 31. Diagrama de cajas de la raíz del cuadrado del error medio de cada uno de los índices en las 25 estaciones de la cuenca del río Paute.....	80
Figura 32. Serie de tiempo del índice de permanencia de sequías (IPS) para la estación E000000095 con los coeficientes determinados.....	82
Figura 33. Series de tiempo para la estación E000000095, de los índices: IPS, SDI, SVHI, STI, SSMI, SPI y SPEI	83
Tabla 1 Intensidad de la sequía según el valor del índice	47
Tabla 2 Resultados de aplicar el criterio Dickey-Fuller aumentado, en el que se evidencia que las series no son estacionarias $P > 0.05$ aceptando la hipótesis nula (H_0) de que la serie tiene raíz unitaria	65
Tabla 3 Resultados de aplicar el criterio Dickey-Fuller aumentado, en el que se evidencia que las series diferenciadas, son estacionarias $P < 0.05$ Rechazando la hipótesis nula (H_0) de que la serie tiene raíz unitaria	66
Tabla 4 Criterio de selección del número óptimo de rezagos para el modelo VAR	69
Tabla 5 Resultados de la aplicación del test de causalidad de Granger para la estación E000000095.....	70
Tabla 6 Resultados de la aplicación del test de causalidad de Granger para la estación E000000102.....	71
Tabla 7 Errores medios de cada índice, porcentaje de cada índice en el total y determinación del coeficiente	81

Introducción

Cambio climático y recursos hídricos

El cambio climático resulta un desafío para la gestión del recurso hídrico, ante ello el sexto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, indica que: los eventos extremos, como las sequías, serían más intensos y frecuentes (IPCC 2021, 9). De ahí la importancia de conocer los posibles escenarios a desarrollarse en función de las proyecciones de cambio climático y poder realizar planes, propuestas y programas que permitan mitigar sus efectos, así como, adaptarnos a estos posibles efectos futuros.

Las alteraciones al sistema hidrológico, relacionados al cambio climático, han recibido una importante atención en los últimos años; especialmente los que se relacionan con eventos extremos como sequías o inundaciones (Mora 2013, 9). No resulta ajeno, por lo tanto, la importancia al seguimiento de eventos como las sequías para plantear una serie de estrategias importantes que permitan establecer los lineamientos idóneos para mitigar sus efectos.

La región de sur américa es altamente vulnerable, en el aspecto socioeconómico y ambiental, ante los retos que significa el cambio climático (Núñez et al. 2023, 1). Por lo cual es importante generar información oportuna para la toma de decisiones, que ayuden a reducir la vulnerabilidad ante los eventos adversos que ocasiona el cambio climático, de los cuales podemos resaltar los fenómenos meteorológicos extremos como las sequías.

Sin embargo, el entendimiento de las sequías a nivel local se vuelve más complejo cuando se intenta comprender que variables infieren en el clima, más aún en regiones tan heterogéneas como el Ecuador; donde inciden varios factores como son: la topografía de los andes, las interacciones de las circulaciones de Hadley y Walker cercanas al ecuador, la alta tasa de radiación solar y la influencia de la costa del Pacífico, así como del atlántico (Chimborazo y Vuille 2021, 1581).

Comprender la compleja interacción entre estas variables puede ser una herramienta fundamental que ayude a generar modelos de predicción más precisos y, por lo tanto, permitir contar con más herramientas que nos permitan reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático.

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y variabilidad climática

Los patrones climáticos globales están experimentando cambios continuos que se reflejan tanto a nivel mundial como local. En América del Sur, por ejemplo, existen observaciones, bajo un escenario de calentamiento global, que indican la probabilidad que eventos meteorológicos extremos, como fuertes lluvias, se vuelvan más intensos (Youlton, et al. 2012, 330). Además, se prevé que las variaciones en las precipitaciones asociadas con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) podrían incrementarse en la segunda mitad del siglo XXI, según lo indica el IPCC en su informe de 2021.

Eventos de variabilidad climática recurrentes como El ENOS juegan un papel preponderante en la climatología global, a pesar de que se desarrolla en el océano pacífico, los efectos de este fenómeno no necesariamente ocurren únicamente en el Pacífico; sino que se extiende a escala planetaria. Se estima que este fenómeno influye en un 6,3 % de la variabilidad de precipitación a escala global (Vicente Serrano, López, et al 2011, 1).

El clima y su gran espectro de variables que influyen en él, juegan un rol determinante en la disponibilidad de agua (Landa, Magaña y Neri 2008, 13). Siendo la precipitación un factor que puede verse comprometido de dos maneras; o un exceso de precipitaciones o la reducción significativa de las mismas que pueda llegar a causar sequías, ya sean de tipo meteorológico, hidrológico, agrícola o socioeconómico. De ahí la importancia de profundizar en su entendimiento e interacciones con otros factores atmosféricos como la variabilidad climática.

Algunas investigaciones, como las realizadas por Oñate, Uchuari y Oñate (2020, 17) sugieren que existe una relación entre: los índices de variabilidad climática como: El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la ocurrencia de sequías. Por ejemplo, durante El Niño se manifiestan eventos secos en el Ecuador acompañados de una PDO en fase negativa.

Por otro lado, también se identificó que, las sequías y su variabilidad en la cordillera de los Andes, tiene una relación directa con el Fenómeno de El Niño, específicamente con la región denominada El Niño 3.4, en el pacífico central, donde las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) influyen en las precipitaciones (MAATE 2021, 50).

Sequías, variabilidad climática y sus efectos en la cuenca del río Paute

Las sequías representan fenómenos con un impacto significativo en los sistemas económicos y sociales (Vicente Serrano, Aguilar, et al. 2016, 1). Por esta razón, es crucial entender estos eventos, especialmente en áreas con condiciones particulares, como la cuenca del río Paute. Dicha comprensión es esencial para mitigar los efectos adversos que pueden surgir durante periodos prolongados de sequía.

La cuenca del río Paute es de importancia estratégica para el sector energético del país, y su estudio detallado es indispensable. Además, la complejidad de las sequías es ampliamente documentada en múltiples investigaciones, las cuales revelan que el cambio climático afecta variables críticas como: la temperatura, las precipitaciones y la escorrentía. Estas alteraciones tienen implicaciones directas en los procesos hidrológicos y en la gestión de recursos hídricos, según lo reportado por Mora et al. (2014, 140).

Los principales proyectos hidroeléctricos del país están en la cuenca del río Paute, obras que suministran de energía eléctrica a la red nacional y que, en condiciones normales, aportan un 40 % de energía eléctrica al país (Pozo 2018, 3). En el 2009 durante el periodo de estiaje, entre octubre y marzo especialmente entre los meses de diciembre y enero, el sector eléctrico del Ecuador paso por una situación crítica, debido a la disminución de los caudales de la Central Paute Molino, causando que el ministro de Electricidad y energía renovable adopte la decisión de racionamientos de la energía eléctrica en todo el país (Mera y Flores 2011, 22).

El cambio climático puede comprometer la soberanía energética del Ecuador, pues una menor generación eléctrica, vinculada a los años de sequía, en los que la generación hidroeléctrica se ve comprometida, puede llevar al país a la necesidad de compensar este déficit mediante la compra de energía a otros países, perdiendo ahí el control sobre su producción (Pardavila, Jemio y Navarro 2014, 73).

La ocurrencia de sequías en la cuenca del río Paute ha traído repercusiones a nivel nacional, tanto así que el año 2023, nuevamente se registró un evento de sequía hidrológica severa en la cuenca del río Paute, del mismo modo, llevo al ministro de energía a nuevamente optar por el racionamiento energético en todo el país, por falta del recurso agua en los embalses de la cuenca del Paute como son Mazar y Daniel Palacios.

Esta sequía hidrológica tuvo una duración de 118 días, y finalizó el 27 de diciembre del 2023, una vez que la empresa municipal de telecomunicaciones, agua potable, saneamiento y gestión ambiental del cantón Cuenca (ETAPA EP) mediante su

administrador de investigación y monitoreo, indico que las lluvias en las zonas de recarga hídrica permitieron estabilizar los flujos de agua (ETAPA EP 2023)

Las sequías son un fenómeno climático muy complejo, en el Ecuador las situaciones climáticas anómalas que pueden originar sequías son: (1) La situación septentrional anómala causada por la corriente fría de Humbolt; (2) La influencia del fenómeno de El Niño sobre los regímenes Hidro-pluviométricos; (3) La acción anticiclónica que bloquea la acción de los frentes, sistemas convectivos y depresiones, como es el caso de la sierra y las estribaciones orientales de la cordillera de los andes (Zhiña, Pacheco y Avilés 2016, 45).

Para comprender mejor la variabilidad temporal y espacial de la sequía en la cuenca del Paute, es crucial considerar diversas variables. Un enfoque que podría contribuir significativamente a desentrañar esta complejidad es el análisis conjunto de los patrones climáticos sinópticos y su interacción con el régimen costero del Pacífico, así como con las masas de aire húmedo tropical provenientes de la Amazonía (Pacheco, Parra y Avilés 2017, 46). Esta mirada de las sequías ofrece una perspectiva integral que reconoce la influencia recíproca entre estos sistemas climáticos y su impacto en la sequía a nivel de la cuenca.

Cabe indicar que los últimos años de sequías importantes en la cuenca del río Paute registradas en los años; 1985, 1987, 1990, 1992, 2002 (Pacheco, Parra y Avilés 2017, 44-5) en cierta medida coinciden con los años de ocurrencia de eventos moderados y fuertes de El Niño, como son los años de 1987, 1992 (Corporación Andina de, Fomento 2000, 23). Si se considera que el año 2023 también correspondía a un año con evento de El Niño, la sequía de ese año, indicada anteriormente, podría tener alguna relación con el evento de variabilidad climática.

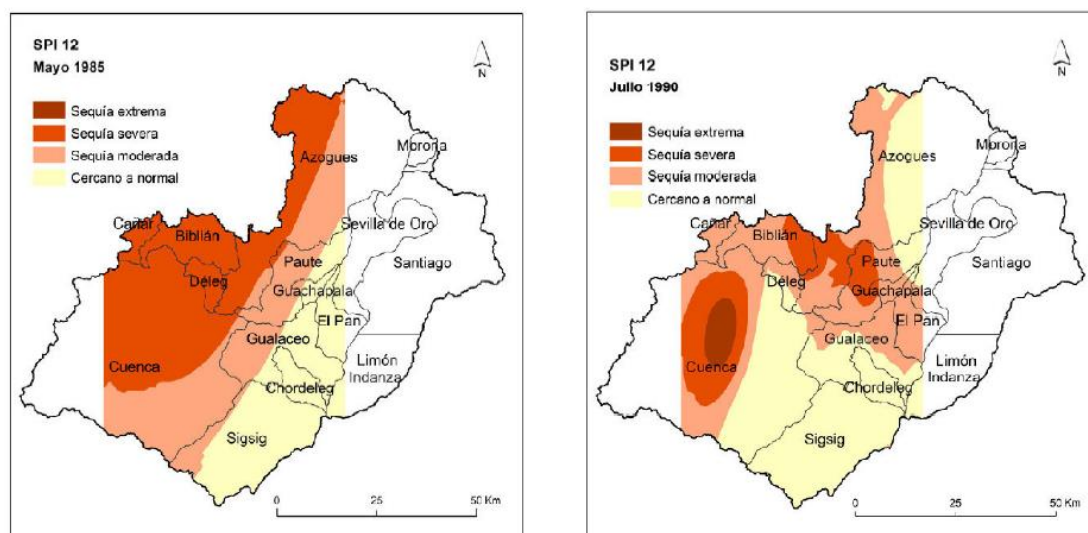


Figura 1. Intensidad de sequías en la cuenca del río Paute, mediante el índice SPI en años y meses específicos

Fuente: (Pacheco, Parra y Avilés 2017, 44)

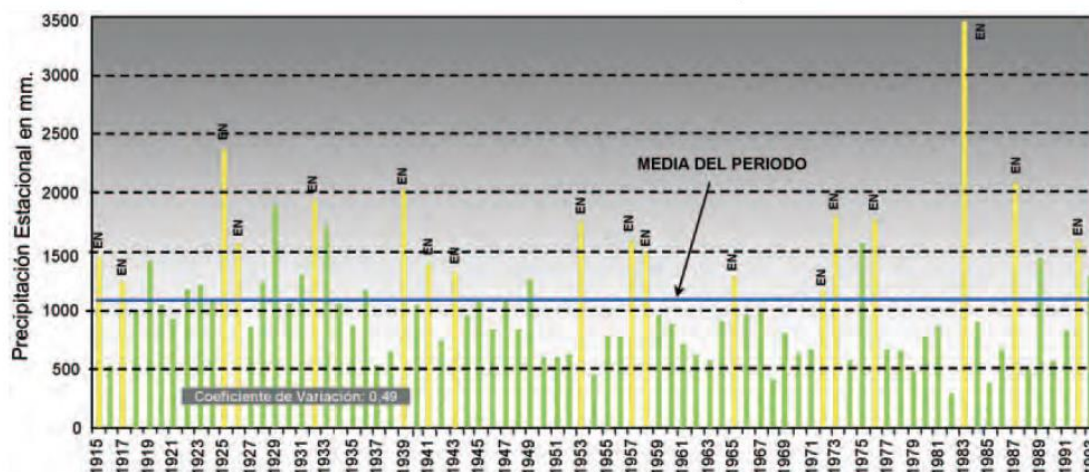


Figura 2. Precipitaciones de la estación meteorológica de Guayaquil durante el periodo 1915 – 1993 anotados los años con EN con ocurrencia de eventos de El Niño moderado y fuertes

Fuente: (Corporación Andina de, Fomento 2000, 23)

Objetivos de la investigación

Todo ello lleva al objetivo general del presente trabajo que consiste en explorar las relaciones entre el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y las sequías en la cuenca del río Paute, con el fin de comprender cómo las variaciones climáticas impactan en la frecuencia, intensidad y duración de las sequías en la región. Este objetivo general se desglosa en los tres objetivos específicos siguientes:

- Recopilar y analizar los datos climáticos históricos relacionados con el ENOS y las sequías en la cuenca del río Paute.

- Explorar la posibilidad de causalidad entre ENOS y episodios de sequías en la cuenca del río Paute mediante el uso de técnicas estadísticas multivariadas para series temporales
- Proponer un índice de permanencia de sequías, combinando distintos índices de sequía, para la gestión y seguimiento frente a las sequías en la cuenca del río Paute.

En términos metodológicos, para establecer la relación entre el ENOS y las sequías se propone el uso de técnicas estadísticas para el análisis multivariado de series temporales, de las herramientas usadas para ello destacan los Vectores autorregresivos (VAR) y el análisis espectral de series de tiempo mediante la transformada de Fourier.

Para finalizar, se ha implementado un modelo de redes neuronales que permitan dar seguimiento a las sequías de tipo hidrológico, medida como variación de caudales, y como otros índices de sequía, pueden ayudar a establecer la permanencia de las sequías en esta cuenca de estudio para el seguimiento y gestión de las sequías en este territorio de interés no solo local sino nacional.

El presente trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera, después de la presente introducción general se presenta el Capítulo 1, denominado Marco teórico, que aborda el estado del arte sobre las sequías en el mundo, en el Ecuador y en particular en la cuenca del río paute y como los eventos de variabilidad climática, como el ENOS, pueden relacionarse con estos fenómenos.

El capítulo dos corresponde al marco metodológico, que detalla el uso de las principales técnicas estadísticas usadas durante la investigación

Los resultados son consolidados y expuestos en el capítulo tres que expone los principales hallazgos de la investigación realizada y como estos van ayudando a responder las principales interrogantes del problema de estudio.

El capítulo cuatro presenta la propuesta del índice de permanencia de sequías que permite contar con una herramienta que permita dar un oportuno control y evolución de las sequías en la cuenca de estudio y que pueda ser usado por los tomadores de decisiones para la gestión óptima de la cuenca.

Finalmente, se cierra con una conclusión que presenta los puntos más importantes de la investigación y algunas perspectivas sobre posibles futuras investigaciones que se puedan dar en la cuenca.

Capítulo primero

Variaciones climáticas y las sequías

La relación del ser humano con la naturaleza enfrenta hoy en día un enorme desafío, ya que hemos contribuido significativamente a su deterioro. Un claro ejemplo de esto es la alteración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, un fenómeno que continúa agravándose desde la Revolución Industrial y que ha sido, en gran medida, responsable de la modificación del clima a nivel global. La comunidad científica advierte sobre los graves efectos del calentamiento global y el cambio climático inminente. A escala global, se espera que el aumento de la temperatura provoque una mayor frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como olas de calor, sequías, inundaciones, entre otros.

Sin embargo, los impactos futuros de eventos como las sequías a nivel planetario son inciertos, debido a la complejidad de las variables climáticas que influyen en el desarrollo y la persistencia de estos fenómenos. Además, los distintos tipos de modelos utilizados para su evaluación añaden más incertidumbre a las proyecciones.

En el caso de Ecuador, las evidencias del cambio climático son especialmente notables en la región andina, donde se proyecta un aumento tanto en la temperatura como en la variabilidad de los patrones de precipitación. Estos cambios también ocurren en el resto de regiones y podrían afectar significativamente a todo país, presentando un reto para su adaptación.

- ¿Qué factores pueden estar contribuyendo al aumento de la intensidad y frecuencia de las sequías a nivel global?
- ¿Cómo las variaciones climáticas globales y regionales pueden, en Ecuador, afectar la disponibilidad de agua y la ocurrencia de sequías en su territorio?

1. El cambio climático

Es un proceso global natural, que sucede de manera periódica en el planeta tierra (Molina, Sarukhán y Carabias 2017, 20-5). No obstante, en los últimos años, el ser humano es el principal causante de su alteración debido a las actividades que han llegado a modificar sustancialmente la composición de la atmósfera del planeta y con ello

incrementando la retención de la radiación infrarroja y por consiguiente el calentamiento medio del planeta.

El calentamiento global, causado por el ser humano, también llamado calentamiento global antrópico. Ocurre cuando las actividades, generalmente, asociadas al desarrollo extractivista, emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) como: Dióxido de Carbono, Metano, Óxidos de nitrógeno y los Clorofluorocarbonos (CFC). Mismos que tienen la capacidad de retener la radiación solar y calentar el planeta de manera global.

La cantidad de GEI presenta un incremento de manera exponencial a partir de la revolución industrial (ver Figura 3); siendo uno de los principales factores la quema de los combustibles fósiles. Esta modificación de la composición de la atmósfera tiene a la comunidad científica alertada sobre los posibles efectos adversos que pueden ocurrir con el incremento de la temperatura global media.

Cambios en la temperatura global en superficie con respecto al período 1850–1900

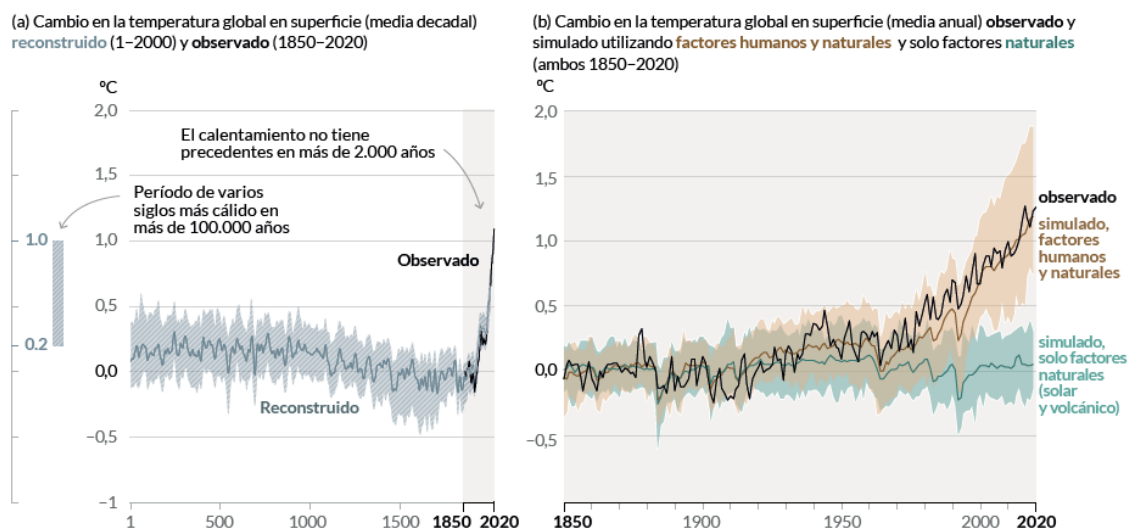


Figura 3. Graficas de incremento de la temperatura media de la tierra en los últimos 150 años. Fuente: (IPCC 2021, 6)

De acuerdo con información del sexto informe del IPCC, publicado en 2021, los niveles de CO₂ alcanzados en el 2019 fueron los más altos registrados en los últimos 2 millones de años; así como los niveles de CH₄ y N₂O fueron los más altos en los últimos 800.000 años. el aumento de estos gases este asociado al incremento de la temperatura media global.

Ante ello, los expertos establecen posibles escenarios futuros de cómo puede cambiar el clima considerando que se mantienen las emisiones de GEI a niveles similares

a los actuales, como el peor de los escenarios y escenarios alternativos considerando una reducción de emisión de los GEI como se ve en la Figura 4.

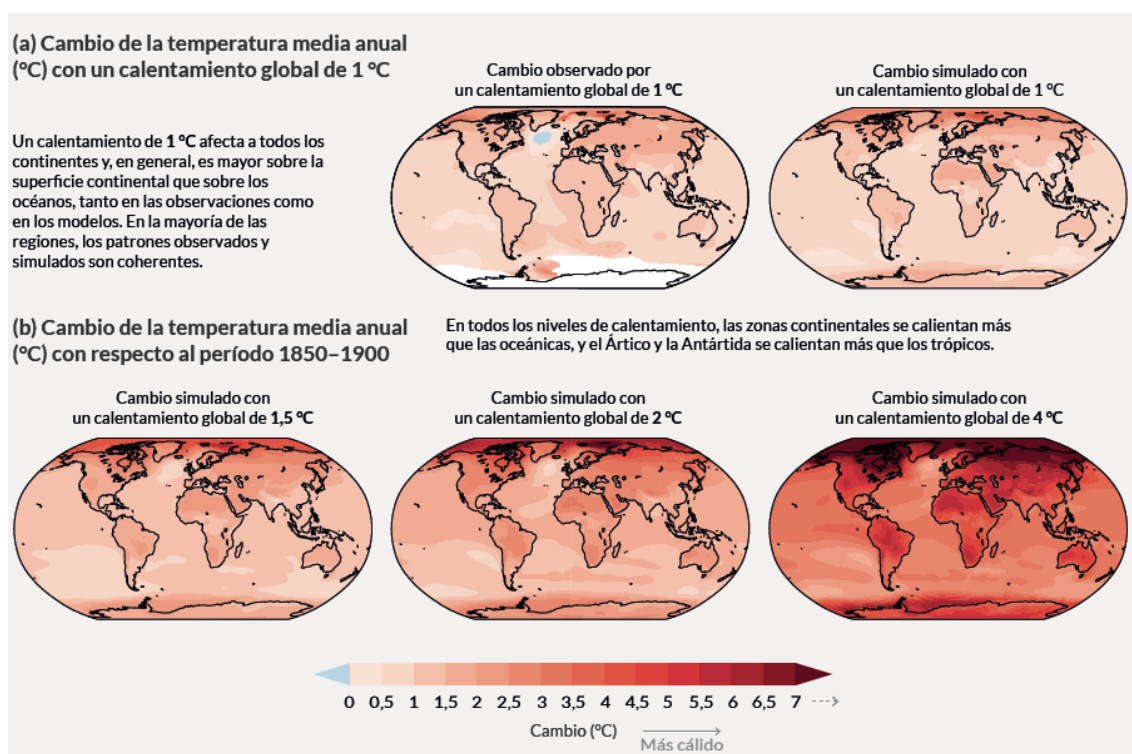


Figura 4. Modelos de cambios en la temperatura global media y los incrementos de temperatura en los distintos puntos del planeta, siendo los más afectados los polos y las masas terrestres.

Fuente: (IPCC 2021, 18)

Los posibles efectos que se pueden desencadenar producto de un incremento de la temperatura media global son varios, pero entre ellos destacan que producto de la influencia humana se ha provocado el aumento en la probabilidad de ocurrencia de fenómenos extremos desde 1950; tales como: olas de calor, sequías, incendios e inundaciones (IPCC 2021, 16-20).

Las proyecciones climáticas apuntan a que se podrá desarrollar una sequía grave a finales de este siglo en muchas zonas altamente pobladas del planeta, entre las que encontramos Europa, este de EE. UU., sudeste asiático y Brasil. Las consecuencias de ser verdadera esta predicción resultaría en efectos catastróficos sobre un enorme número de habitantes de nuestro planeta (Dai 2012, 58).

2. Las sequías a escala global

A escala global la tendencia de las sequías ante los escenarios climáticos futuros es compleja de evaluar, dada la variedad e incertidumbre de los efectos del CO₂ sobre las sequías. Por ejemplo, en varios sectores los modelos climáticos globales pronostican un descenso de las precipitaciones, pero de manera general no se esperan cambios substanciales en las sequías meteorológicas; Sin embargo, se evidencia un aumento en la intensidad de las sequías puede que tenga relación con el aumento de la demanda atmosférica de evapotranspiración, lo que puede traer serias afecciones en las sequías agrícolas y ecológicas (Vicente-Serrano, et al. 2022, 1-2).

No obstante, existen estudios que manifiestan que la divergencia entre la sequía meteorológica y la sequía por humedad del suelo es mayor, con cambios más negativos hacia la aridez en la sequía meteorológica, Algo que se relaciona a la elevada evaporación como consecuencia del aumento de la temperatura. (Xu, Chen y Zhuang 2018, 16). Aunque de manera general se pueda concluir que el cambio climático está añadiendo calor al sistema climático y parte de ese calor se destina a la desecación; Es posible que el cambio climático no provoque sequías, pero podría exacerbarlas y probablemente ampliará su dominio en la zona seca subtropical. (Trenberth, y otros 2013, 20).

3. Escenarios en Ecuador

3.1. Cambio climático en Ecuador

Las evidencias del calentamiento global en Ecuador despiertan el interés de varios investigadores, llegando al consenso de un evidente efecto, tanto para la temperatura media como para temperaturas máximas, de una tendencia creciente (Cáceres, Mejía y Ontaneda 1998, 3-4); esta se encuentra diferenciada según las regiones del país. De manera general, se puede indicar que las proyecciones establecen un calentamiento significativo en los Andes tropicales y que se acentúa a mayor altitud. (Urrutía y Vuille 2008, 13).

De acuerdo con los escenarios proyectados por los modelos climáticos globales (GCM) por sus siglas en inglés. En Ecuador se registra un incremento de la temperatura media entre los 0,5 y 1 °C para el periodo de 2011-2040 en todos sus escenarios, desde los optimistas hasta el pesimista. Y para los periodos posteriores los incrementos podrían

alcanzar valores superiores a 1 o 2 °C. siendo la región de la Costa y Amazonía las más afectadas. Mientras que para el periodo 2071-2100 se espera que las temperaturas medias sobrepasen los 2 °C en todo el país y las regiones Amazonía y Galápagos en los peores escenarios podrían superar los 3,5 °C por encima de los niveles medios del periodo 1981-2005 (Armenta, Vila y Jácome 2016, 43-59).

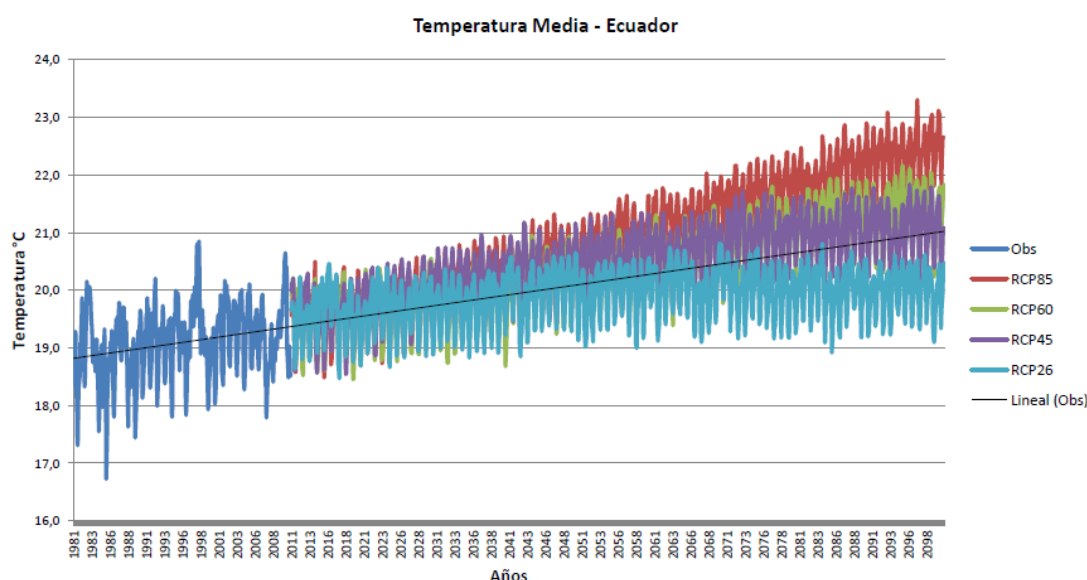


Figura 5. Temperatura media del Ecuador con información de 32 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país con datos hasta 2010, a partir de ahí se grafican los 4 escenarios RCP del IPCC. Con una línea negra que muestra la tendencia de los datos observados.

Fuente: (Armenta, Vila y Jácome 2016, 59)

Sin embargo, no solo el aumento de la temperatura es un efecto del calentamiento global en el país, ya que también se prevé con ello, que va a existir una modificación a los regímenes de precipitación en todo el territorio ecuatoriano. En algunos estudios como los realizados por León, Vásquez y Valderrama (2021, 19) que indica que, las precipitaciones en su mayoría, en el país, presentan datos decrecientes y que se ven influenciados por el clima de la zona y su proximidad al océano Pacífico o la elevación.

No obstante, estudios muestran resultados distintos, como el de Armenta, Vila y Jácome (2016, 103) que manifiestan que, de acuerdo con las proyecciones climáticas se proyecta un incremento de la precipitación en la región Galápagos, Costa y Sierra y la única que presenta un descenso es la región amazónica.

3.2. Sequías en Ecuador

Los escenarios futuros para la precipitación tienen una estrecha relación con la escala a la que se realiza el estudio, investigaciones regionales difieren de investigaciones locales debido a la precisión de los datos manejados y los modelos usados para la proyección de escenarios. De acuerdo con la investigación de (Chimborazo y Vuille 2021, 1593-4) las precipitaciones simuladas dependen del modelo usado, la resolución y la parametrización usada. Ya que varios modelos llevan implícito incertidumbres propias de los errores heredados de los modelos climáticos globales (GCM)

Otro aspecto importante que tiene relación con el cambio climático es la variabilidad climática y como responde a los distintos escenarios planteados por el IPCC. Uno de los eventos de variabilidad climática más estudiados es la variabilidad interanual del sistema oceánico-atmósfera, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este evento ocurre desde hace milenios atrás, incluso antes de que se lo denomine como El Niño, no obstante, poco se sabe de los elementos que causan el comienzo de un ciclo de El Niño; únicamente se conocen los signos que lo preceden en la interacción océano atmósfera (Maturana, Bello y Manley 2004, 15).

4. El Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

El ENOS es un evento de variabilidad climática que ocurre en una escala corta de tiempo, de alrededor de unos meses hasta pocos años y que principalmente cuenta con dos fases; la fase caliente, llamada El Niño y la fase fría, denominada la Niña. Este proceso consiste en la alteración del sistema Océano - Atmósfera en el Pacífico Tropical y se manifiesta como un incremento en la temperatura superficial del mar (El Niño) y viceversa, La Niña, está relacionada a un descenso en la temperatura superficial del mar como se observa en la Figura 6 (CIIFEN 2022).

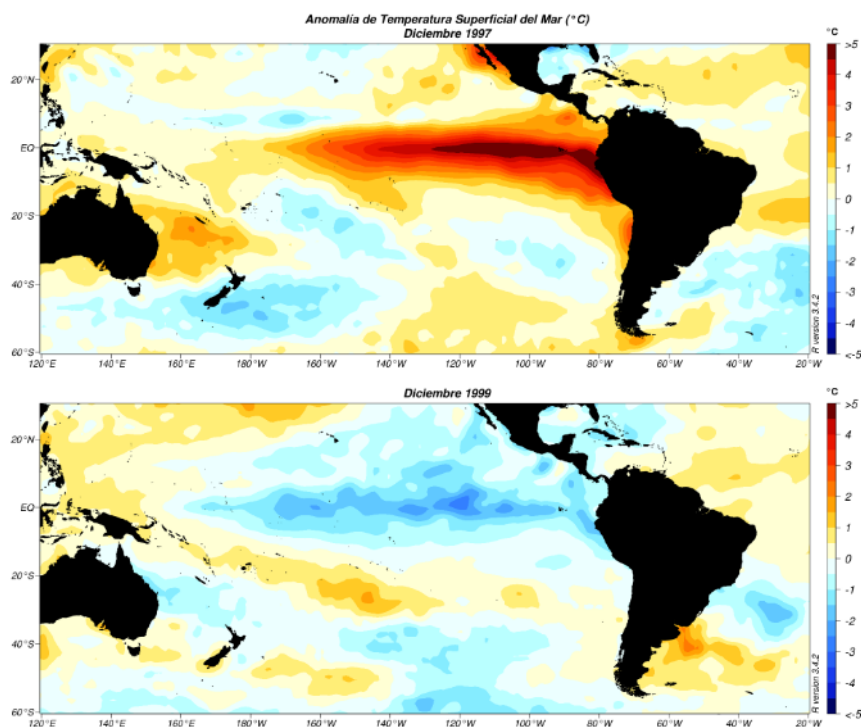


Figura 6. Anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en un evento El Niño (arriba) y un evento La Niña (abajo).

Fuente: CIIFEN

Para el seguimiento de la evolución del fenómeno de El Niño y La Niña, se establecen distintas regiones, de las que encontramos: la región Niño 4, que se encuentra en los intervalos de 160 °E hasta 150 °W; Niño 3 desde los 150°W hasta 90 °W; y la región 1+2, más próxima a las costas del oeste en Suramérica entre los 90 °W y 80 °W como se ve en la Figura 7.

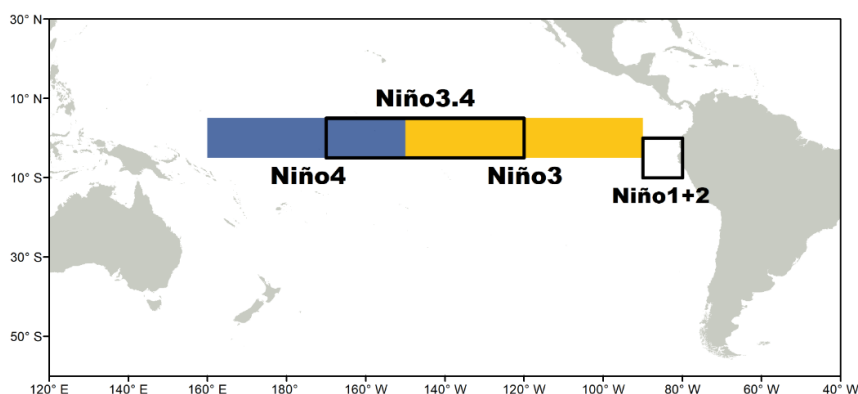


Figura 7. Regiones de El Niño en el Pacífico Tropical

Fuente: CIIFEN

La región Niño 3.4 corresponde al sector 5°N a 5°S, 170°W a 120° W. Sector en el cual se ha establecido el índice Oceánico del Niño (ONI) por sus siglas en inglés; que

consiste en monitorear las anomalías de temperatura superficial del mar en este sector. Se declara la presencia de un evento de El Niño cuando la anomalía de temperatura excede los $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un periodo de tres meses. Para que El Niño o La Niña suceda de manera completa, debe mantener las anomalías de temperatura durante 5 periodos consecutivos de tres meses (NOAA 2024).

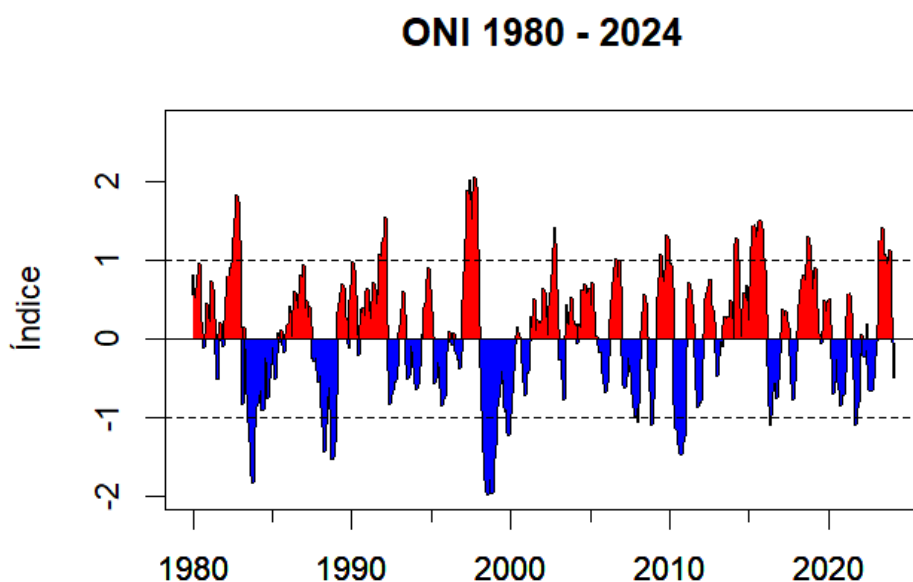


Figura 8. Serie de tiempo del ONI desde 1980 hasta 2024. Los periodos por encima de cero se definen como eventos de El Niño y los periodos por debajo de cero, como eventos de La Niña.

Fuente: Datos de la NOAA¹

Elaboración propia

Durante el estudio de El Niño y la Oscilación del Sur es continuo el cambio de estado entre: El Niño y La Niña y se lo ha denominado como la Oscilación del Sur, cuya periodicidad es muy irregular (Philander 1985, 2652-3), existiendo enormes variaciones entre episodios, cada uno con distintas duraciones e intensidades. No hay dos fenómenos iguales, ya sean fuertes, moderados o débiles (Axel et al. 2018, 535).

La Oscilación del Sur (SO) es un proceso de vaivén a escala global de la presión atmosférica a nivel del mar, que provoca cambios de aire entre los dos hemisferios y que se puede observar cómo anomalías de presión (desviaciones de la media) en la estación de Darwin $12,4^{\circ}\text{S } 130,9^{\circ}\text{E}$, en el norte de Australia y en Tahití $(17,5^{\circ}\text{S } 149,6^{\circ}\text{W})$, en el Pacífico sur (Steele, Thorpe y Turekian 2009, 502).

¹ National Oceanic and Atmosphere Administration – Oficina Nacional de Administración Oceánica y de la Atmósfera de EE. UU.

El índice de seguimiento de la oscilación del sur (SOI) por sus siglas en inglés, consiste en el seguimiento de las anomalías de presión atmosférica, a nivel del mar, en Tahití-Darwin y tiene una estrecha relación con los índices de anomalías de la temperatura superficial del mar (SST). Este índice se conoce como el índice tradicional del ENOS (NOAA 2024). Ver Figura 9

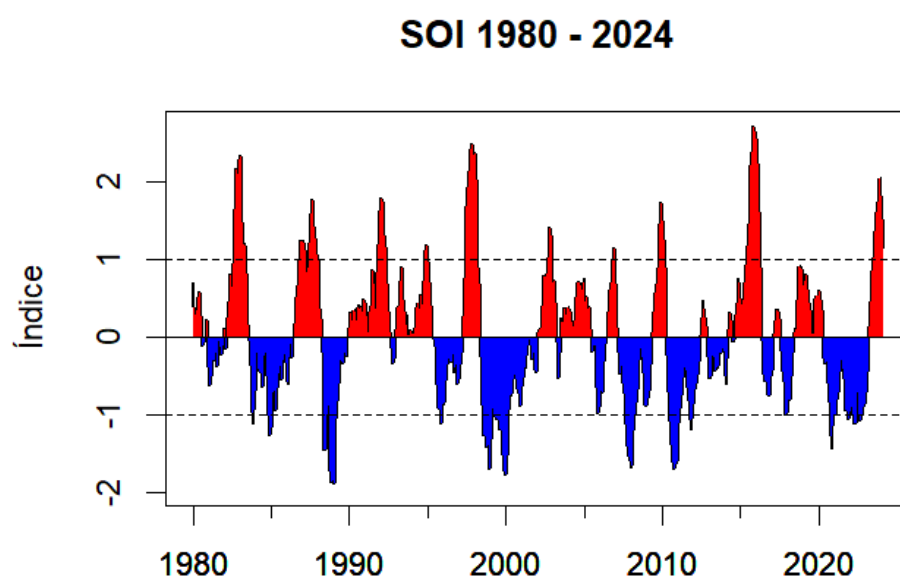


Figura 9. Serie temporal del SOI en el periodo 1980 – 2024. Los periodos por encima de cero se definen como eventos de El Niño y los periodos por debajo de cero, como eventos de La Niña.

Fuente: Datos de la NOAA

Elaboración propia

5. ENOS y el clima

El inicio de un evento de El Niño comienza cuando los vientos alisios se debilitan, provocando que las aguas del Océano Pacífico cercanas a Indonesia, calientes, se dirijan y acumulen en el ecuador de la costa sudamericana (Ecuador y Perú). Causando anomalías de temperatura en la superficie del mar. Mientras que el efecto contrario sucede al desarrollarse La Niña; es decir, los vientos alisios se fortalecen, enfriando la temperatura superficial del mar.

Durante la fase cálida, El Niño, en el océano Pacífico se modifican los patrones de circulación general atmosférica, por ejemplo, las zonas de baja presión, que, en escenarios normales, se encuentran en el lado oeste del Pacífico tropical se van desplazando hacia el este, provocando que las zonas de alta presión, que habitualmente,

se encuentran en la costa del Perú y Ecuador, donde hay pocas precipitaciones, en esta fase cálida sean zonas de alta precipitación (Maturana, Bello y Manley 2004, 16).

De manera contraria el evento de La Niña, que como se ha mencionado anteriormente, corresponde a la fase fría, viene acompañado de condiciones opuestas a lo que sucede en el evento de El Niño, es decir, en lugar de altas precipitaciones en algunos puntos, de la costa de Ecuador y Perú, tenemos eventos de escasez de agua, incluso sequías.

En virtud de lo antes mencionado es importante abordar la complejidad del ENOS, ya que podría ayudar a caracterizar mejor las sequías, así como identificar que efectos produce tanto de manera espacial y temporal. (Oertel, Meza y Gironás 20220, 171-2). La importancia de comprender a las sequías está ligada a que es uno de los fenómenos extremos que tendrá mayor frecuencia e intensidad debido al cambio climático (IPCC 2021, 17). No es de extrañarse, por ello, la necesidad de estudiar estos procesos con la finalidad de poder realizar planes de mitigación y adaptación a los eventos asociados a la falta de precipitaciones.

Los distintos escenarios climáticos planteados por los expertos indican un incremento de la intensidad de las sequías en algunas regiones del planeta como se puede observar en la Figura 10. Tanto a nivel de una reducción de las precipitaciones como de la cantidad de humedad del suelo.

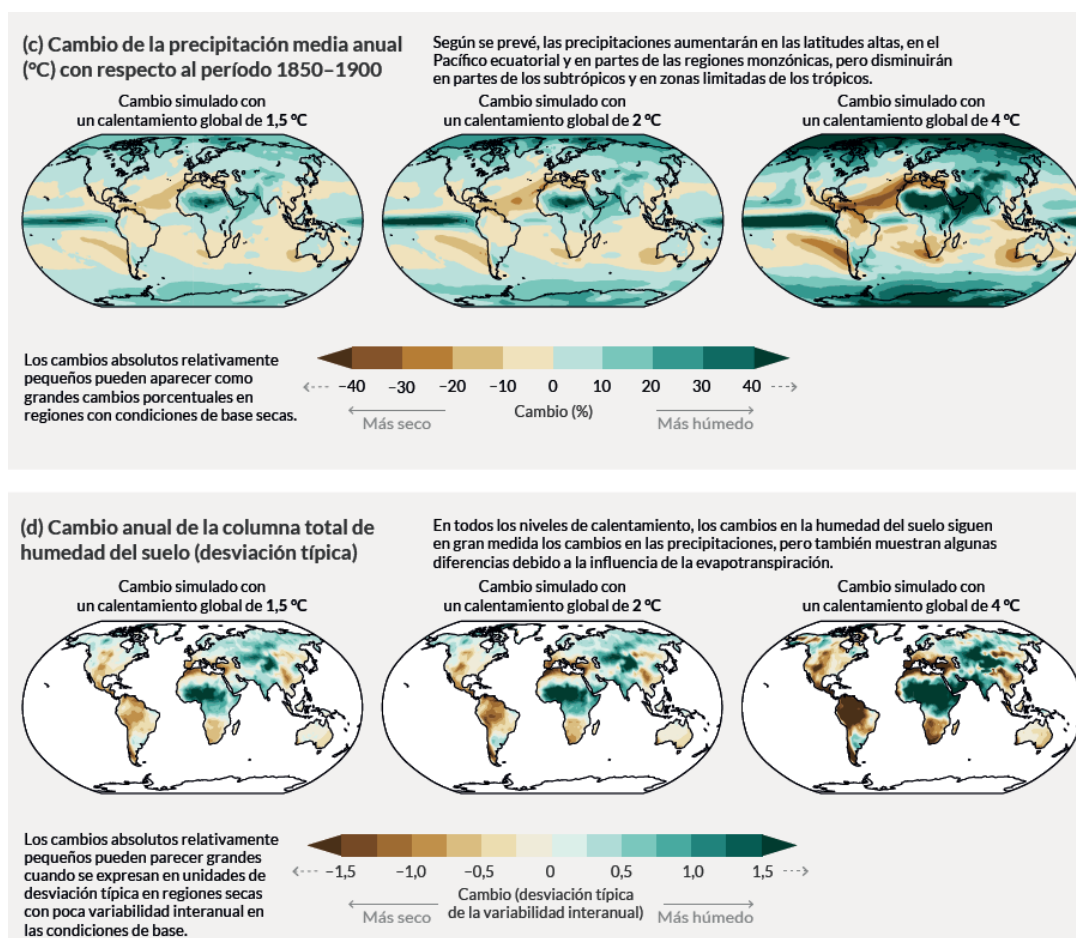


Figura 10. Variaciones porcentuales de la precipitación y la humedad en el suelo para los distintos escenarios de cambio climático planteados por el IPCC en su sexto informe.

Fuente: (IPCC 2021, 17)

El riesgo de ocurrencia de sequías está estrechamente relacionado con la diversidad de procesos climáticos como la climatología de cada región, mecanismos de procesos de circulación atmosférica y la variabilidad espacial y temporal de las variables climáticas (Vicente Serrano, Aguilar et al. 2016, 1). Por ejemplo, la relación entre: la lluvia y algunos índices climáticos como la temperatura superficial del mar (TSM), El índice Oceánico de el Niño (ONI) y el índice de Oscilación del Sur (IOS) (Zhiña, Pacheco y Avilés 2016, 45).

6. ENOS y las sequías

Los efectos en la perturbación de la circulación atmosférica, a escala global, ocasionada por el ENOS, se denominan: teleconexiones y que comprenden efectos marcados en la temperatura y las precipitaciones, por lo que se encuentra relacionado directamente con: sequías e inundaciones en las regiones teleconexionadas en cada fase

del ENOS (Dilley y Heyman 1995, 183). El efecto de El Niño-Oscilación del Sur, así como otros índices de variabilidad climática como: La Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO) y La Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) causan importantes variaciones meteorológicas. Por ejemplo, la AMO disminuye la temperatura del aire y las precipitaciones en el Pacífico Norte, y también está ligada a la disminución de humedad en esta zona. Así como el ENOS, durante su fase La Niña, genera una falta de precipitaciones en la zona ecuatorial de Sudamérica. De igual manera la PDO, en su fase negativa se relaciona con la reducción de humedad (Oñate, Uchuari y Oñate 2020, 16).

Esta relación entre eventos de variabilidad climática y condiciones meteorológicas e hidrológicas de una zona despiertan el interés de varios investigadores. Un estudio en Australia determinó que: Los indicadores del ENOS pueden ser usados para predecir con varios meses de antelación las precipitaciones de primavera en el este de Australia y las de verano al Norte del país (Chiew et al. 1998, 148).

Sin embargo, en ocasiones el efecto que pueden tener las oscilaciones del ENOS sobre las sequías no es tan claro; incluso estudios han identificado situaciones, en Estados Unidos, donde el impacto que puede ocasionar el ENOS sobre la sequía, se produce en el suroeste, las Grandes Llanuras y la cuenca baja del río Colorado, donde el ENOS en su fase fría favorece la sequía. No obstante, el ciclo estacional sobre la costa este y el sureste es débil. El impacto a largo plazo del ENSO es pequeño en estas zonas porque las respuestas de la precipitación al ENSO son de signo opuesto en invierno y verano. En estas zonas, un ENSO prolongado que dure dos o más estaciones no siempre favorece una sequía (Kingste C., Jae-Kyung E. y Soo-Hyun 2008, 5980).

Otro estudio exploró a mayor profundidad del efecto de El Niño Oscilación del sur, en el Sureste de Estados Unidos y determinó que: las condiciones persistentes del ENOS no favorecen la sequía persistente ni los periodos húmedos sobre el Sureste. Las condiciones favorables para la sequía son condiciones frías de ENSO en invierno seguidas de condiciones ENSO neutras en verano. Esto también explica por qué no hay sequías plurianuales en el sureste. Los fenómenos ENOS pueden durar más de 6 meses desde el invierno hasta el verano. Esto puede explicar por qué es probable que la sequía en el sureste termine en verano.

A decir de la influencia del ENOS en las precipitaciones que produce o deja de producir en Brasil se ha determinado que la relación entre los eventos ENOS y los déficits de precipitaciones (sequías) en el nordeste. Muestran una asociación, sin embargo, no total. Por ello, aunque algunos fenómenos El Niño importantes, como los de 1877-1878,

1891, 1900, 1907, 1932, 1941, 1958 y 1983, se asociaron a sequías graves en el nordeste de Brasil, muchos otros fenómenos El Niño (tanto fuertes como moderados) no mostraron esa relación (Kane 1997, 663).

De acuerdo a lo antes mencionado El ENOS se ha convertido en un indicador importante para la predicción del clima regional debido a su periodicidad estable, su señal persistente y su previsibilidad (Lv, Fan y Zhang 2022, 2). Es por esto que el conocimiento de este fenómeno permitirá mejorar las condiciones de los sistemas terrestres, mediante alertas tempranas y un monitoreo de la sequía que permia reducir las afecciones futuras de estos eventos (Vicente Serrano, López et al. 2011, 2).

Estudios realizados en Perú reconocen una relación entre la disponibilidad de precipitación y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Estos estudios sugieren la existencia de dos regímenes de precipitaciones: uno asociado a ENOS y otro no asociado a ENOS. Las estadísticas muestran que durante los años de ENOS, las regiones del Altiplano y del altiplano sur experimentan sequías, con una reducción promedio del 18% en las precipitaciones anuales. En contraste, la región costera norte recibe un 88% más de precipitaciones en comparación con los años sin ENOS (Tapley y Waylen 1990, 429).

7. ENOS, cambio climático y sequías en Ecuador

De manera general El Niño en el Ecuador en ciertas ocasiones, está ligado a un excedente en las precipitaciones en la región litoral o costa, de ellas destacan Santo Domingo, Los Ríos, Guayaquil, Colimes, El Oro, Chone, Manta y Jipijapa manifiestan una respuesta positiva durante un evento de El Niño. Es decir, que, durante estos eventos, las precipitaciones presentan valores superiores a los esperados. (Rossel 1997, 105). Las precipitaciones extremas generadas durante estos eventos generalmente causan serios impactos socioeconómicos en la zona, principalmente por inundaciones, que traen consigo, pérdidas económicas vinculadas a destrucción de cultivos, afecciones a la salud, como rebrotes de enfermedades y daños a la infraestructura (Bendix y Bendix 2005, 43).

El Evento de El Niño más significativo del siglo XX corresponde al fenómeno de 1997-1998, años durante los cuales los daños económicos que se dieron en el país alcanzaron porcentajes cercanos al 15 % del Producto Interno Bruto PIB del Ecuador en el año de 1997; y también significo un retraso al crecimiento de 1.2 puntos porcentuales menor a lo esperado antes de los daños (Corporación Andina de Fomento 2000, 62).

Investigaciones recientes destacan que los efectos del ENOS sobre los procesos de precipitación en las elevaciones altoandinas son muy complejos y su vinculación no resulta sencilla (Kiefer y Karamperidou 2018, 218). No obstante, anteriormente, se han encontrado correlaciones entre el ENOS y SPEI, En Ecuador, especialmente los índices SPEI con el índice El Niño 3.4 para la región de los Andes y el índice de el Niño 1+2 para la región litoral (Serrano Aguilar et al. 2016, 19).

Conclusiones que coinciden con estudios posteriores como los realizados por Hidalgo M. (2017) que manifiestan que: en la fase de El Niño, en la región interandina de Ecuador, la humedad y las precipitaciones disminuyen sus promedios; mientras que, en la fase de La niña, sucede lo contrario. Es decir, efectos opuestos entre la región litoral y la región andina. No obstante, no siempre ocurren sequías o incremento de lluvias durante las distintas fases del El Niño Oscilación del Sur, dependerá de la zona.

Si analizamos a mayor detalle que ocurre en la región interandina ecuatoriana podemos encontrar investigaciones en la cuenca del río Paute; que manifiestan que esta cuenca hidrográfica, está altamente influenciada por El Niño-Oscilación del Sur, especialmente durante la temporada de diciembre a febrero. Durante junio-agosto, su influencia es más débil y muestra la compleja interacción de otros factores climáticos. (Mora y Willems 2011, 268).

La importancia de profundizar en la investigación en esta cuenca también se ve reflejada en estudios complementarios como los de (Pacheco, Parra y Avilés 2017, 46) que menciona que los patrones de variabilidad temporal y espacial de la sequía en la cuenca del Paute que podrían explicarse más claramente si se analizaran en conjunto con datos de patrones climáticos sinópticos que se presentan en la región montañosa occidental que tiene influencia por el régimen costero del Pacífico y en la región montañosa oriental por las masas de aire tropicales húmedas provenientes de la Amazonía y del Atlántico.

Según el INAMHI, durante El Niño, el clima en esta cuenca hidrográfica no se ve significativamente afectado. Sin embargo, los periodos de sequía parecen estar asociados a la fase fría, conocida como La Niña. Asimismo, indica que, en la Amazonía, El Niño influye en la distribución de caudales mensuales, desplazando sus picos. También, la temperatura superficial del mar está relacionada con los volúmenes de agua que ingresan al embalse de Amaluza durante la fase de La Niña (INAMHI 2000, 5). Por lo tanto, esta relación no es completamente clara y se necesitan más investigaciones para comprender mejor el vínculo entre el ENOS y la variación de humedad en la cuenca del Paute.

Capítulo segundo

Metodología: Relaciones entre el ENOS y las sequías

Como alcance del estudio se ha escogido la cuenca del río Paute por su importancia a nivel nacional especialmente en el sector energético. Para evaluar las condiciones de sequía en esta cuenca se han usado varios índices que permiten abordar desde distintas perspectivas climáticas e hidrológicas las condiciones de sequías. Los datos históricos utilizados para este trabajo fueron proporcionados por el Centro Internacional de Investigación del Fenómeno de El Niño.

Para el análisis de los datos se han aplicado distintos métodos estadísticos para series de tiempo, entre los que destacan el uso de Modelos de Vectores Autorregresivos (VAR) y el análisis espectral de series de tiempo para examinar las relaciones entre el fenómeno de El Niño y las sequías. Es uso de estas dos técnicas permite determinar la posible relación entre los eventos de variabilidad climática provocados por el ENOS y las sequías de tipo meteorológicas. Siendo su finalidad lograr desarrollar el segundo objetivo específico de esta investigación.

1. Zona de estudio

La cuenca del río Paute se encuentra al sur del Ecuador (Figura 11), entre las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, tiene una superficie aproximada de 6437,4 km² y forma parte de la demarcación hidrográfica del río Santiago. Se emplaza geográficamente entre la cordillera Occidental y la Cordillera Oriental, en lo que se denomina la hoya del Paute. Comprende parte de la región interandina y posterior a ello alcanza la cuenca amazónica, generando un cambio altitudinal desde los 4400 msnm hasta los 540 msnm en la parte más baja.

La importancia de esta cuenca está vinculada al suministro energético del país; pues dentro de ella se encuentra el complejo hidroeléctrico Paute Integral. Mismo que aprovecha, en cascada, al río Paute para la generación eléctrica. Empezando por la central hidroeléctrica Mazar con una capacidad instalada de 170 Mw, seguida por la central Molino de mayor capacidad con 1100 Mw y la central eléctrica Sopladora, de 487 Mw. Juntas las tres contribuyen con un 38 % de la demanda energética del país (Orozco 2024)

Para garantizar la generación eléctrica de manera continua han sido implementado dos embalses, el primero de ello, conocido como Amaluza de una capacidad de 120 Hm³ y Mazar de 410 Hm³.

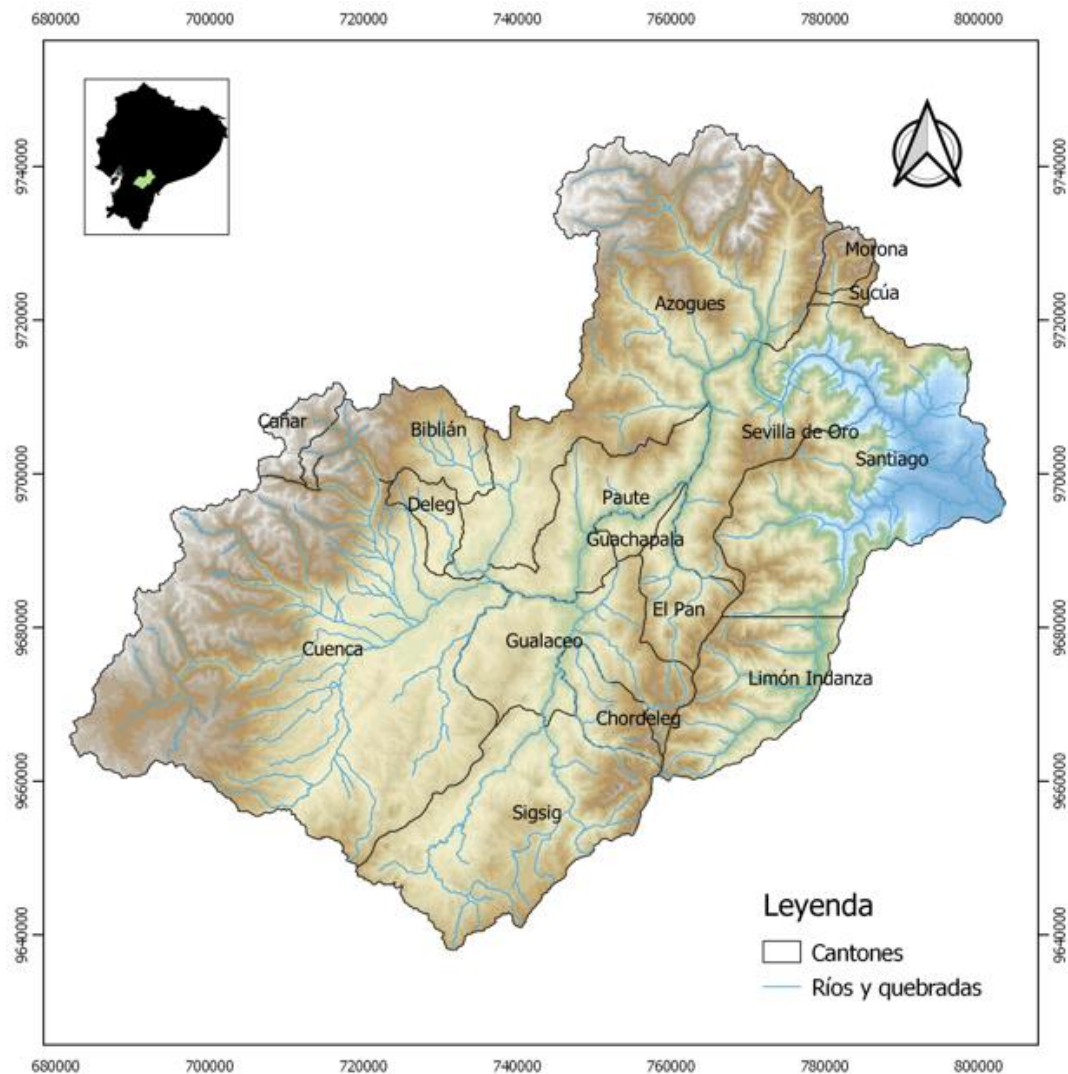


Figura 11. Localización de la Cuenca del río Paute al Sur del Ecuador
Fuente: Datos cartográficos Instituto Geofísico Militar del Ecuador (IGM)
Elaboración propia

2. Datos

Los datos usados para el monitoreo meteorológico de la Cuenca del río Paute, forman parte del proyecto Monitor de sequías, elaborado por el Centro Internacional de Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) y que son usados en conjunto con el INAMHI para la implementación del Plan Nacional de Sequías del Ecuador. Cabe

mencionar que los datos usados para el monitor de sequías provienen de información satelital y su frecuencia es mensual, desde enero del 2004 hasta enero del 2024.

Los datos suministrados corresponden a los índices de sequía de tipo meteorológico y agrícola, con ventanas temporales de 3, 6, 9, 12, 48 meses y entre los que encontramos: el índice estandarizado de precipitación (SPI), el índice estandarizado de temperatura (STI), el índice estandarizado de humedad de suelo (SSMI), el índice de salud de la vegetación (SVHI), y el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI).

De igual manera fueron proporcionados por la empresa CELEC. los datos históricos de caudales promedios mensuales del río Paute en la estación de Mazar, mismos que se usaron para obtener el índice estandarizado de caudales (SDI) y poder tener información a escala local.

Mientras que los datos asociados a variabilidad climática se obtuvieron de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, por sus siglas en inglés NOAA, mismos que comprenden las anomalías de temperatura superficial del mar en la zona El Niño3.4, conocido como Índice del Niño Oceánico por sus siglas en inglés (ONI).

2.1. Estaciones virtuales

Para el monitoreo hidrometeorológico de la cuenca del río Paute se son usadas las 25 estaciones virtuales, proporcionadas por CIIFEN, distribuidas en todo el territorio de la cuenca de Estudio, de manera que se podrán abordar de manera integral las incidencias de las variabilidades climáticas en toda la cuenca de manera integral (Figura 12).

Cabe mencionar que la ubicación de estas estaciones no es aleatoria y los técnicos de CIIFEN lo han establecido de la siguiente manera: priorizar coordenadas de estaciones meteorológicas que están operando o que dejaron de operar, con la intención de poder calibrar los datos a escala local y reducir el número de estaciones para optimizar el rendimiento computacional al momento de constituir el modelo nacional de Monitor de sequías.

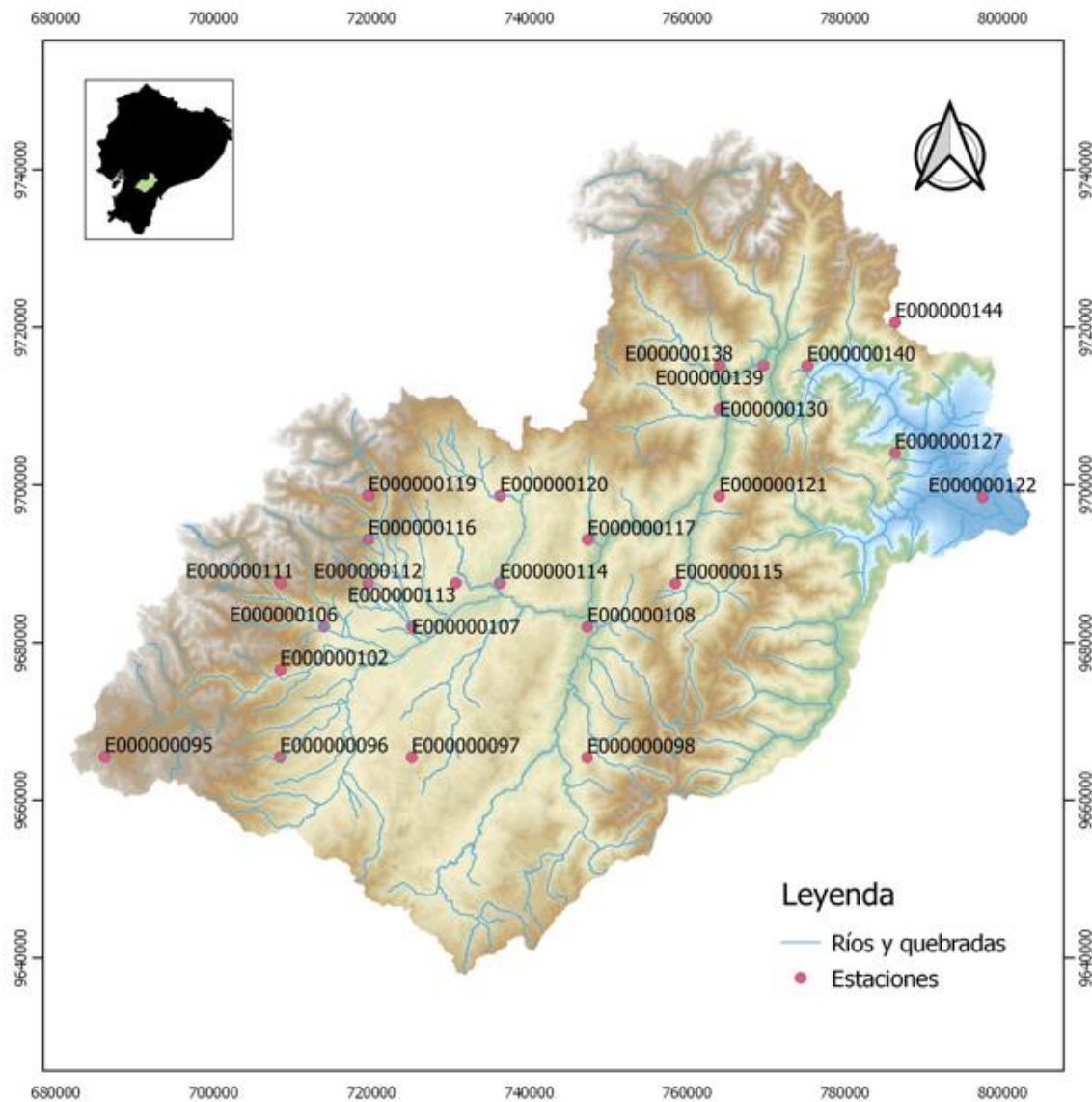


Figura 12. Ubicación espacial de las estaciones virtuales proporcionadas por CIIFEN, para el seguimiento de las sequías

Fuente: Datos CIIFEN

Elaboración propia

2.2. Diagrama de flujo metodológico

Con el propósito de ordenar la metodología empleada y la aplicación de cada una de ellas se presenta a continuación un diagrama (Figura 13) que reúne, ordenadamente, la ejecución de cada una de las técnicas y métodos usados, así como también, se indican los resultados esperados alineados los objetivos planteados en este estudio.

De manera preliminar tenemos la etapa de análisis y preprocesamiento de los datos hidrometeorológicos, misma que hace uso de los datos proporcionados por CIIFEN, CELEC y NOAA para poder construir hacer uso de las técnicas estadísticas

correspondientes para cumplir con los objetivos de la investigación. Esta etapa permite cumplir con el primer objetivo específico.

A continuación, con los datos preprocesados se construyen los modelos de vectores autorregresivos de cada una de las estaciones con el índice ONI, tarea que permite identificar la causalidad de una serie sobre la otra mediante el contraste de causalidad de Granger. Seguido de ello se realiza un análisis espectral de cada una de las series, tanto de ONI como del índice de sequías SPEI para poder identificar ciclos entre estos dos eventos. Con estas técnicas se identifican las relaciones entre el ENOS y las sequías dando cumplimiento al segundo objetivo específico.

Finalmente, para cumplir con el tercer objetivo específico, de lograr un seguimiento y permanencia de las sequías en la cuenca del río Paute se ha elaborado un índice combinado de sequías con los índices SPEI, SPI, SSMI, STI y SVHI cada uno con coeficientes que se han calibrado mediante un modelo de aprendizaje supervisado de redes neuronales recurrentes de tipo LSTM. La ponderación de cada uno de los coeficientes se obtiene mediante la capacidad de cada uno de los cinco índices mencionados previamente, en predecir un índice de sequías de tipo hidrológico (SDI) del río Paute en la estación de Mazar.

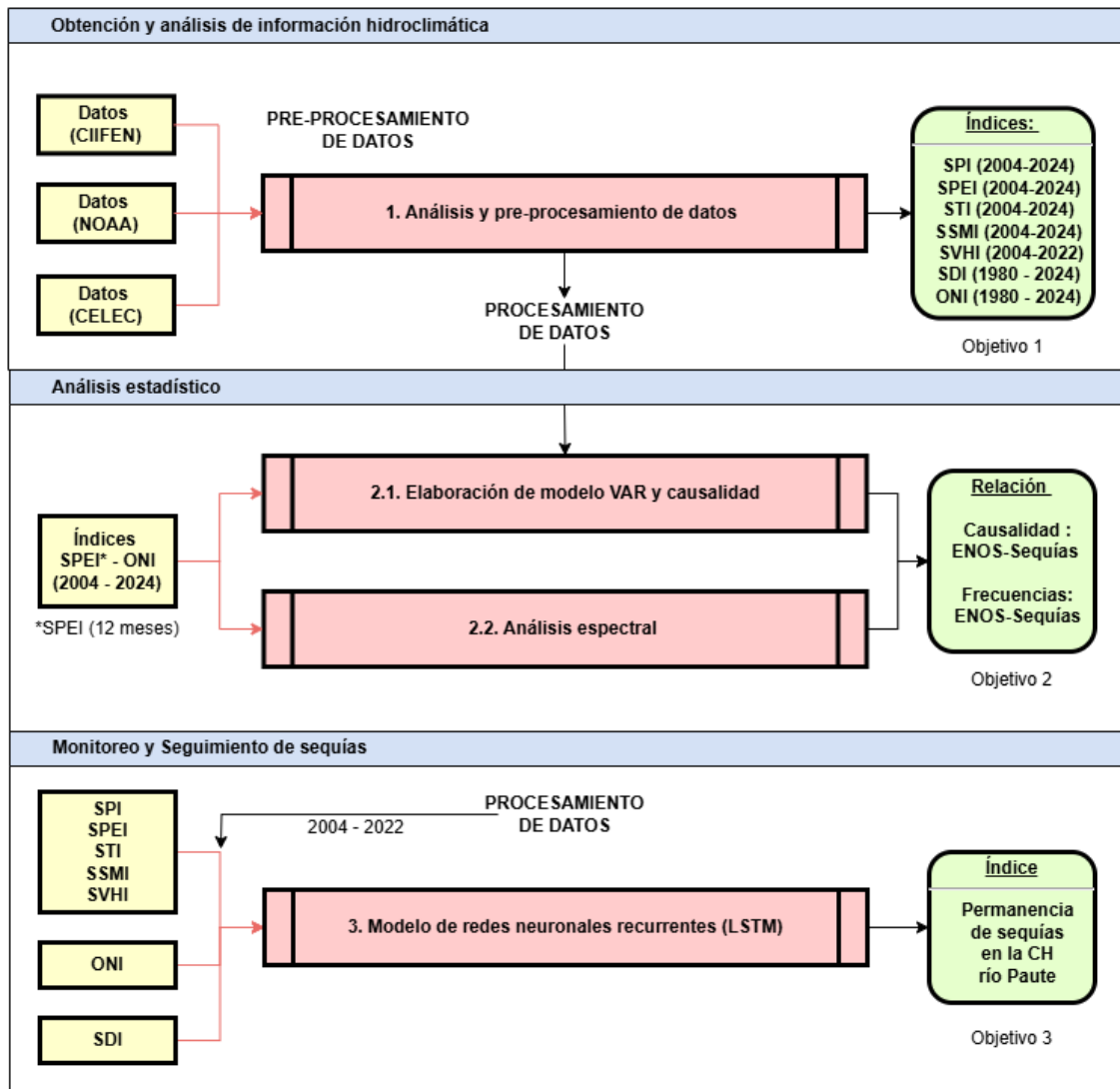


Figura 13. Diagrama de flujo metodológico y cumplimiento de objetivos de cada uno de ellos
Elaboración propia.

3. Índice de sequías

3.1. Índice de sequías de precipitación (SPI)

Este índice permite cuantificar el déficit de precipitación basándose en la probabilidad de precipitación (OMM 2012, 4), para distintas escalas temporales considerando la precipitación observada. Para calcular el SPI se usan datos mensuales para un periodo definido de tiempo, entre los que encontramos: 3, 6, 9, 12 y 48 meses, que son elegidos de manera arbitraria pero que se eligen dependiendo el tipo de fuente de agua afectada. Los datos acumulados del periodo escogido se ajustan a una función gamma para definir la relación de probabilidad de la precipitación. Una vez realizada

establecida esta relación se usa una estimación normal inversa que permite calcular la desviación de la precipitación para una densidad de probabilidad que tienen una distribución normal, es decir con media cero y desviación típica de uno (McKee, Doesken y Kleist 1993, 2).

Thom (1966) planteó una distribución que se ajusta a las series de tiempo de precipitación. Esta distribución Gamma se define por frecuencias o una función de densidad de probabilidad como:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \tau(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \text{ para } x > 0$$

Donde

- $\alpha > 0$ parámetro de forma

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

- n es el número de precipitaciones observadas
- $\beta > 0$ parámetro de escala²

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

- $x > 0$ precipitación acumulada
- $\tau(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy$ es la función Gamma

Entonces, la probabilidad acumulada para una ventana específica de tiempo se define como:

$$G(x) = \int_0^x g(dx) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^\alpha \tau(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx$$

Como la función Gamma es indefinida para valores de precipitación igual a cero ($x = 0$) y la precipitación si puede tomar este valor, entonces, la probabilidad acumulada pasa a ser:

² Para los parámetros α y β Thom (1966), propone utilizar las soluciones de máxima verosimilitud para estimar su valor de manera óptima.

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Donde:

- q es la probabilidad de un cero

Posterior a ello, la probabilidad acumulada $H(x)$ se transforma a una variable aleatoria normal estándar Z con media cero y varianza de uno, que se convierte en el valor del índice SPI. El método usado para ello es la transformación de equiprobabilidad. Conceptualmente el SPI representa un valor Z que indica el número de desviaciones típicas por encima o debajo de la media

A continuación, la probabilidad acumulada $H(x)$ se transforma en la variable aleatoria normal estándar Z con media cero y varianza uno, que es el valor del SPI. Se trata de una transformación de equiprobabilidad que, según Panofsky y Brier (1958), tiene la característica esencial de transformar una variante de una distribución (es decir, gamma) en una variante con una distribución de forma prescrita (es decir, normal estándar). De ese modo, la probabilidad de ser inferior a un valor dado de la variante será la misma que la probabilidad de ser inferior al valor correspondiente de la variante transformada (Edwards y McKee 1997, 21).

3.2. Índice de sequías de caudales (SDI)

Este índice se usa para determinar las sequías hidrológicas mediante datos mensuales del flujo de agua que circula por un determinado cauce. El proceso de cálculo de este índice es similar al SPI solo que usa caudales acumulados, en lugar de precipitaciones acumuladas, para los mismos periodos de tiempo de 3, 6, 9 y 12 meses (Nalbantis y Tsakiris 2008, 885).

3.3. Índice de sequía de humedad del suelo (SSMI)

Al igual que el SPI, este índice tiene un procedimiento de cálculo que busca calcular cuánto se aleja una variable respecto a la media histórica. En este índice la variable usada es la humedad del suelo (Sainz de la Maza y del Jesús 2020, 142).

3.4. Índice de sequía de salud de la vegetación (SVHI)

Este índice denominado índice de salud de la Vegetación permite determinar las condiciones de sequía mediante información satelital. Parte del principio de determinar como la disponibilidad de agua y la temperatura causan un estrés en la vegetación. Justamente las condiciones que causan este tipo de estrés son las sequías (Kogan 1997, 1418).

3.5. Índice de sequía de temperatura (STI)

Este índice también llamado índice estandarizado de temperatura se calcula mediante las variaciones de temperatura para periodos de tiempo específicos. Y nos permite conocer las condiciones de temperatura en un determinado sitio, donde los valores negativos indican condiciones de frío y los valores positivos indican condiciones de calor (Darabi et al. 2023, 6).

3.6. Índice de sequía de precipitación evapotranspiración (SPEI)

Para poder caracterizar las sequías, se ha hecho uso del Índice de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), propuesto por (Vicente Serrano, Beguería y López Moreno 2009, 1714-6), y se lo calcula mediante la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, en mm.

Este índice usa datos de precipitación y temperatura como parte de un balance hídrico simple, considerando los cambios en la evaporación en superficie, misma que es sensible a las reacciones de sequias causadas por el aumento de las temperaturas globales (Elbeltagi et al. 2022, 5).

$$D^{ij} = P_{ij} - ETP_{ij}$$

Donde: P_{ij} y ETP_{ij} están en mm

Y para estimar la Evapotranspiración potencial (ETP) el autor propone usar el método propuesto por Thornthwaite 1948, que es una relación simple que requiere únicamente la variable de temperatura media mensual.

$$ETP = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m$$

Donde:

- T es la temperatura media mensual en °C
- I es el índice de calor que se calcula como la suma de 12 valores de índice mensuales i , este último derivado de la temperatura media mensual mediante la fórmula: $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$

- m es un coeficiente que depende del índice de calor I

$$m = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,79 * 10^{-2} I + 0,492$$

- K es un coeficiente que refleja la humedad relativa y la velocidad del viento

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right)$$

NDM es el número de días del mes

N es el número máximo de horas de sol y se calcula:

$$N = \left(\frac{24}{\pi} \right) \omega_s$$

ω_s es el ángulo horario de la salida del sol que se calcula de la siguiente manera:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta)$$

φ es la latitud en radianes

δ es la declinación solar en radianes calculada como:

$$\delta = 0,4093 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi j}{365} - 1,405 \right)$$

Siendo j un día juliano medio del mes.

Finalmente, para poder obtener los valores del índice se debe calcular el acumulado de D_i en función del número de meses que se quieren agregar, siendo los comunes 1 a 3 meses para sequías cortas, de 6 a 12 para sequías medias y mayores a 12 meses para sequías extensas.

Los resultados obtenidos del índice pueden clasificarse como indica la Tabla 1.

Tabla 1
Intensidad de la sequía según el valor del índice

Rango de Valores	Condiciones
2.0 o más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Fuente: (OMM 2012, 6)

El rango de sequías considerado para este estudio es correspondiente a 12 meses, Se ha considerado esta ventana temporal ya que de alguna manera este intervalo de tiempo se relaciona con los niveles de agua en los cursos de agua, agua subterránea, reservorios, etc. (OMM 2012, 9).

4. Análisis de series temporales

Para poder realizar una contrastación entre los datos de las anomalías del índice de sequías (SPEI) y las anomalías de temperatura superficial (TSM) en la región Niño 3.4 (ONI) es necesario verificar la estacionalidad de los datos antes de poder construir el modelo de vectores autorregresivos (VAR)

5. Contraste de Dickey-Fuller aumentado

Este criterio es usado para poder determinar la estacionariedad de las series de tiempo (Peña 2005, 257); se dice que una serie de tiempo no es estacionaria cuando sus propiedades estadísticas, como son: la media y varianza, no son constantes a lo largo del tiempo.

Esta prueba, también llamada test de raíces unitarias, plantea una hipótesis nula (H_0) donde $\alpha = 1$ y como hipótesis alternativa (H_A) que $\alpha < 1$, para el modelo $x_t = \alpha x_{t-1} + u_t$ donde u_t es considerado ruido blanco. (Cowpertwait y Metcalfe 2009, 214).

En caso de requerir trabajar con series estacionarias y la serie no cuenta con estas características se pueden realizar operaciones a la serie para lograr la estacionariedad; entre las opciones más usadas se encuentra la diferenciación.

6. Vectores autorregresivos (VAR)

El método usado para determinar la relación de causalidad entre las variables ONI y SPEI es mediante la técnica estadística de Vectores autorregresivos (VAR), que forma parte de los métodos de análisis multivariados de series temporales. El uso de este tipo de técnica es útil cuando existe evidencia entre la simultaneidad entre un grupo de variables, y que sus relaciones se transmiten a lo largo de un número de periodos determinado (Novales 2016, 3).

Para entender las series temporales de datos y su interdependencia puede hacerse uso de un modelo de ecuaciones simultáneas, siempre que ellas contemplen rezagos de las otras entre sí. El método VAR proporciona la técnica de poder establecer pronósticos en sistemas variables de series interrelacionadas, donde cada variable permite pronosticar a las demás (Wbaldo 2005). El caso más simple son los vectores autorregresivos de primer orden o también llamados VAR(1) y con un solo rezago.

$$\begin{aligned} Y_{1t} &= m_1 + a_{11}Y_{1t-1} + a_{12}Y_{2t-1} + \varepsilon_{1t} \\ Y_{2t} &= m_2 + a_{21}Y_{1t-1} + a_{22}Y_{2t-1} + \varepsilon_{2t} \end{aligned}$$

En lo que se refiere a su denominación de autorregresivos, el método indica que cada variable Y_{nt} se expresa como la combinación lineal de valores de ella misma y valores rezagados de todas las otras variables del sistema.

En su forma matricial se define como:

$$Y_t = \begin{bmatrix} Y_{1t} \\ Y_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{1t-1} \\ Y_{2t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \end{bmatrix}$$

Donde:

- Y_{1t} es la primera variable, índices del ENSO, como el Niño 3.4 (ONI)
- Y_{2t} es la segunda variable que corresponde al índice de sequía SPEI
- a_{mn} son los coeficientes que se incorporan a cada valor de rezago
- Y_{1t-1} corresponde al valor anterior, también llamado rezagado de la variable Y_{1t}
- Y_{2t-1} corresponde al valor anterior, también llamado rezagado de la variable Y_{2t}
- ε_{1t} y ε_{2t} son los errores de cada ecuación

6.1. Orden del VAR

Para conocer el número óptimo de rezagos en un modelo de vectores autorregresivos se pueden usar varias pruebas estadísticas, entre las que destacan:

- LR: Test estadístico secuencial modificado
- FPE: Predictor de error final
- AIC: Criterio de información de Akaike
- SC: Criterio de información de Schwarz
- HQ: Criterio de información de Hannan - Quinn

6.2. Contraste de causalidad de Granger

Este proceso consiste en analizar la significación estadística de una variable con respecto a la otra variable, usando los rezagos de la una en la otra. Con ello se puede explicar cuando de una variable explica la otra variable de modelo (Novales 2016, 11-12).

$$Y_{1t} = c + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{1t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{2t-i}$$

Donde:

- α es la varianza de la variable Y_{1t-1}
- β es la varianza de la variable Y_{2t-1}

Y_{2t} no causa a Y_{1t} en el sentido de Granger si $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$

Se dice que esta prueba en realidad evalúa si el pasado de una variable, en este caso Y_{2t} contribuye o no a predecir a la variable Y_{1t} ; es decir, que tienen que ver con precedencia temporal más que causalidad (Sosa 2013)

7. Análisis espectral

Una vez identificada la causalidad entre las series de tiempo, la metodología del análisis espectral nos permite encontrar ciclos o frecuencias de eventos poco observadas en el dominio del tiempo; es por ello por lo que el análisis espectral a diferencia de los

modelos que trabajan en el dominio del tiempo permite analizar las series temporales en el dominio de la frecuencia. Esencialmente este método consiste en una modificación del análisis de Fourier para adaptarlo a funciones temporales estocásticas en lugar de deterministas (Chatfield 1995, 105). Esto quiere decir que mediante esta herramienta al trabajar con frecuencias estamos trabajando con ondulaciones, mismas que pueden tener distintas frecuencias.

El análisis espectral permite pasar de una serie de tiempo a una suma de senos y cosenos en distintas frecuencias y amplitudes (Montenegro García 2011, 345-51) Donde el principal objetivo radica en determinar los ciclos de las varias frecuencias que explicarían a una serie de tiempo Y_t

7.1. Transformada de Fourier Discreta (DFT)

Este procedimiento permite pasar de una serie de datos en dominio del tiempo a una representación del dominio de la frecuencia, se calcula mediante la siguiente expresión que usa exponentes complejos, aunque también se la puede expresar en términos trigonométricos, reales como son el coseno y el seno.

$$Y_{\omega} = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-i2\pi kn/N}, k = 0, 1, \dots, N-1$$

Donde:

- y_n es el valor de la serie en el dominio del tiempo
- Y_{ω} es la serie transformada al dominio de la frecuencia
- N es el número de datos de la serie
- i es la unidad imaginaria ($i^2 = -1$)

Si se quiere considerar la expresión en términos de cosenos y senos es la siguiente:

$$Y_{\omega} = \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - iy_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

7.2. Espectro de potencia

El espectro de potencia ayuda a determinar las frecuencias sobresalientes en una serie de datos. Y para poder calcular este espectro o también denominado densidad espectral de potencia se toman los valores de la función de covarianza como coeficientes de Fourier. Por lo tanto, la función de densidad espectral se define como la transformada de Fourier de la función de autocovarianza (Iyer y Chowdhury 2009, 84)

$$s_{\omega} = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=-\infty}^{\infty} R_j e^{-i\omega j}$$

Donde:

- S_{ω} es el espectro continuo de la serie y_n
- R_j es la función de auto covarianza simétrica al espectro

Esta herramienta es útil para buscar periodicidades escondidas en los datos de la serie o que en ocasiones suelen estar ocultos u oscurecidos por el ruido de la serie (Iyer y Chowdhury 2009)

7.3. Espectro cruzado

Al igual que en las series de tiempo existe una función para el análisis de dos series en el dominio del tiempo que se llama la correlación cruzada, que sirve para examinar la relación entre estas dos series; en el análisis espectral existe una herramienta que cumple un propósito similar y que se llama el análisis del espectro cruzado, que se obtiene de la siguiente manera:

$$f_{xy}(\omega) = \frac{1}{\pi} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_{xy}(n) e^{-i\omega n} \right]$$

Donde:

γ_{xy} es la covarianza cruzada entre las dos series de tiempo a analizar X_t y Y_t obtenida como:

$$\gamma_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (x_k - \bar{x})(y_{k+l} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^N (y_{k+l} - \bar{y})^2}}$$

f_{xy} es el espectro cruzado entre las dos series

7.4. Espectrograma

Una de las herramientas que ofrece el análisis espectral para poder analizar la frecuencia y su variación en el tiempo es el espectrograma; la que se representa en un sistema tridimensional: Tiempo, frecuencia y amplitud. Para poder construir este gráfico es necesario a la serie espectral obtenida previamente por la TDF y multiplicarla por una ventana. Esta ventana temporal se desplaza a lo largo del tiempo sobre la señal a analizar (Paz, Friedrich y Galasso 2020, 1).

8. Redes neuronales

Como se ha mencionado en el diagrama de flujo metodológico, para el seguimiento y monitoreo de las sequías en la cuenca del río Paute se construye un índice combinado de sequías, denominado índice de permanencia de sequías (Ips) Esta herramienta, formada por los 5 índices (SPI, SPEI, STI, SSMI y SVHI) asigna coeficientes o pesos a cada uno de ellos. Y estos coeficientes se han ajustado mediante la implementación de un modelo de redes neuronales recurrentes del tipo LSTM. Así se asigna un mayor peso al índice que tenga menor error en predecir el índice de sequías hidrológico SDI del río paute en la estación de Mazar. La eficiencia de cada modelo se obtiene usando el indicador de la raíz del error cuadrático medio.

Las redes neuronales son uno de los métodos de Aprendizaje Automático más exitoso (Montesdeoca 2016, 9). Esta herramienta constituye en sí misma el núcleo del aprendizaje profundo; dada sus características su aplicabilidad permite abordar una amplia gama de tareas altamente complejas, dada su versatilidad, escalabilidad y potencia (Gerón 2023, 375).

8.1. Redes neuronales recurrentes (RNN)

Este tipo de redes neuronales permite establece conexiones entre neuronas de una misma capa, o admitir, en el caso de que sean datos secuenciados, el ingreso de los datos de salida en un instante anterior a la neurona en un estado actual. Mediante esta conexión se consiguen redes neuronales con memoria a las que se las denomina *Recurrent Neural Networks* (RNN) por sus siglas en ingles (Centeno 2019, 34).

8.2. Redes de memoria corta y larga (LSTM)

Este tipo de red es una variación de una simple RNN; Posee la capacidad de aprender dependencias a largo plazo. Esto lo consigue mediante la implementación de 4 puertas en lugar de una (Gulli, Kapoor y Pal 2019, 285-286). De estas cuatro puertas, dos controlan la entrada de información, una la salida y otra es una puerta de olvido, que permite descartar información existente para que la celda pueda recordar datos nuevos (Figura 14).

Esta capacidad de las LSTM permite reducir el efecto de los gradientes de fuga que se producen cuando se tienen casos que presentan muchas repeticiones de multiplicaciones por un vector de pesos y que se perderían en la retro propagación (Kelleher 2019, 177).

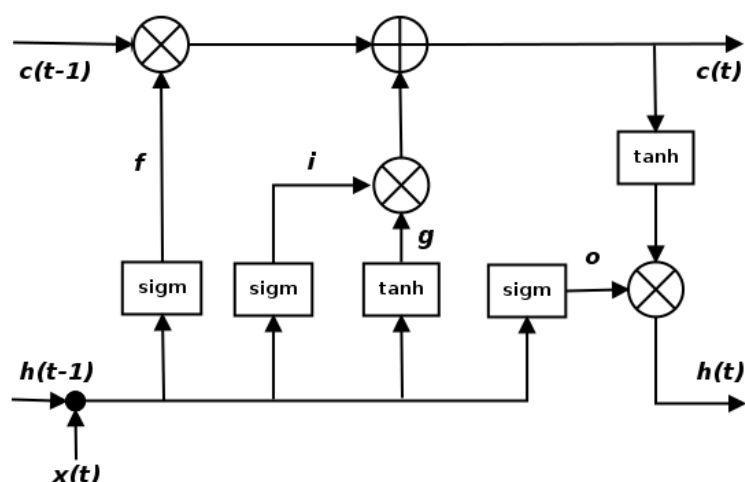


Figura 14. Esquema de una red neuronal recurrente (RNN) del tipo Long short-term memory (LSTM).

Fuente: (Gulli, Kapoor y Pal 2019, 286)

La línea superior (C_{t-1} a C_t) se conoce como la celda de memoria o estado de la célula y es la que permite almacenar información durante periodos de tiempo extensos (Montesdeoca 2016). Mientras que la línea que cruza la parte inferior (h_{t-1} a h_t) se la llama estado oculto. Finalmente, las cuatro puertas indicadas anteriormente son las rutas f , i , g y o que se convierten en los mecanismos por los cuales este tipo de celda resuelve el problema del gradiente de fuga o también llamado gradiente evanescente (Gulli, Kapoor y Pal 2019, 287).

La ruta “f” denominada así por las palabras en inglés *forget gate*, es una puerta que permite desechar información de la memoria que permitirá mantener el estado de la memoria en las mismas condiciones o descartará algún elemento.

$$f = \sigma(W_f h_{t-1} + U_f x_t + V_f c_{t-1})$$

Las puertas de entrada i y g permiten decidir qué parte de la información nueva se deberá almacenar en la celda de memoria. Para ello se parte de dos etapas una relacionada a la puerta “i” del inglés input gate, que define los valores a actualizarse. Mientras que una puerta “g” permite formar un nuevo vector con los valores nuevos que se podrían añadir al estado de la memoria.

$$i = \sigma(W_i h_{t-1} + U_i x_t + V_i c_{t-1})$$

$$g = \tanh(W_g h_{t-1} + U_g x_t)$$

Para poder refrescar el estado de la célula de C_{t-1} a C_t se multiplican los resultados de las operaciones anteriores, tanto de la ruta f con los valores anteriores y se suma la operación entre las rutas i y g

$$C_t = (f * C_{t-1}) + (g * i)$$

Finalmente, se debe elegir el tipo de información saldrá de la célula LSTM, esta salida es el producto de dos elementos previos, de un lado tenemos una puerta “o” output gate, que permite decidir los elementos a combinarse de la memoria y el segundo es una puerta ht que permite filtrar la salida de los datos.

$$o = \sigma(W_o h_{t-1} + U_o x_t + V_o c_{t-1})$$

$$h_t = o * \tanh(C_t)$$

Donde

- $W_i U_i V_i, W_o U_o V_o, W_f U_f V_f$ son valores que constituyen las matrices de peso parámetros de los vectores de sesgo que se van aprendiendo durante la fase de entrenamiento del modelo.
- σ es una función sigmoidea

- $\tanh$ es una función tangente hiperbólica

A manera de resumen, la Figura 15 esquematiza cómo funciona una red neuronal del tipo LSTM, como las salidas de una unidad anterior se convierten en entradas de una y así se van entretejiendo estas estructuras.

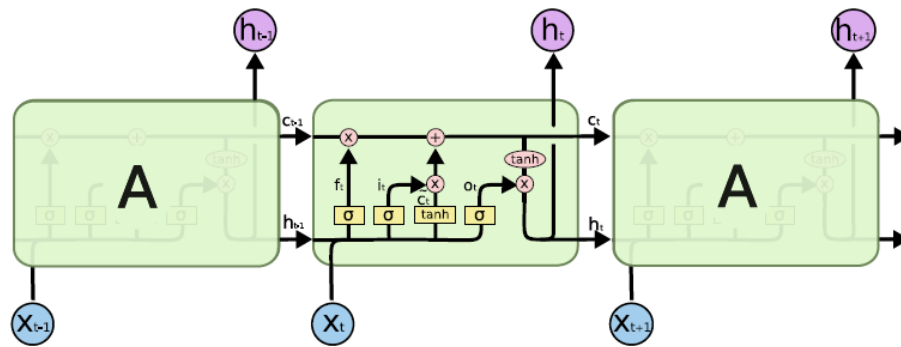


Figura 15. Celdas de tipo LSTM conectadas entre sí, donde los datos de una celda anterior (t-1) son entradas de una celda presente (t), que a su vez alimenta a una celda futura (t+1).

Fuente: (Gulli, Kapoor y Pal 2019, 287)

Capítulo tercero

Resultados: Causalidad ENOS y las sequías en la Cuenca del Paute

A partir de los datos históricos de 20 años en cada una de las 25 estaciones se identificaron las condiciones de sequía y humedad en la cuenca para distintos meses del año y los promedios históricos, mediante el índice de sequías de Precipitación Evapotranspiración SPEI. Tomando como base para las condiciones de sequía una ventana temporal de 12 meses.

Entre los resultados obtenidos se incluye: la representación geoespacial de las condiciones de sequía a nivel de cuenca y por estaciones; un análisis de la relación entre el fenómeno ENOS, representado por el índice ONI, y las condiciones de sequía en la cuenca, destacando que en algunas estaciones se ha encontrado evidencia de causalidad de Granger entre el ENOS y el SPEI. Finalmente se explora la relación a nivel de frecuencia, entre eventos ENOS y la ocurrencia de sequías evaluadas mediante SPEI. Esto permite profundizar en las fluctuaciones climáticas en la cuenca, así como las implicaciones del fenómeno ENOS en la dinámica de las sequías.

1. SPEI

A partir de los datos obtenidos se ha podido evaluar las condiciones de humedad o aridez de la cuenca mediante el uso geoespacial de las estaciones y sus valores correspondientes al índice de sequía. Los datos usados corresponden a una ventana temporal de 20 años y 2 meses; no obstante, los datos empiezan a marcar condiciones de sequía o humedad a partir del 2005, al considerar el año 2004 como el inicial para las condiciones de sequía a los 12 meses.

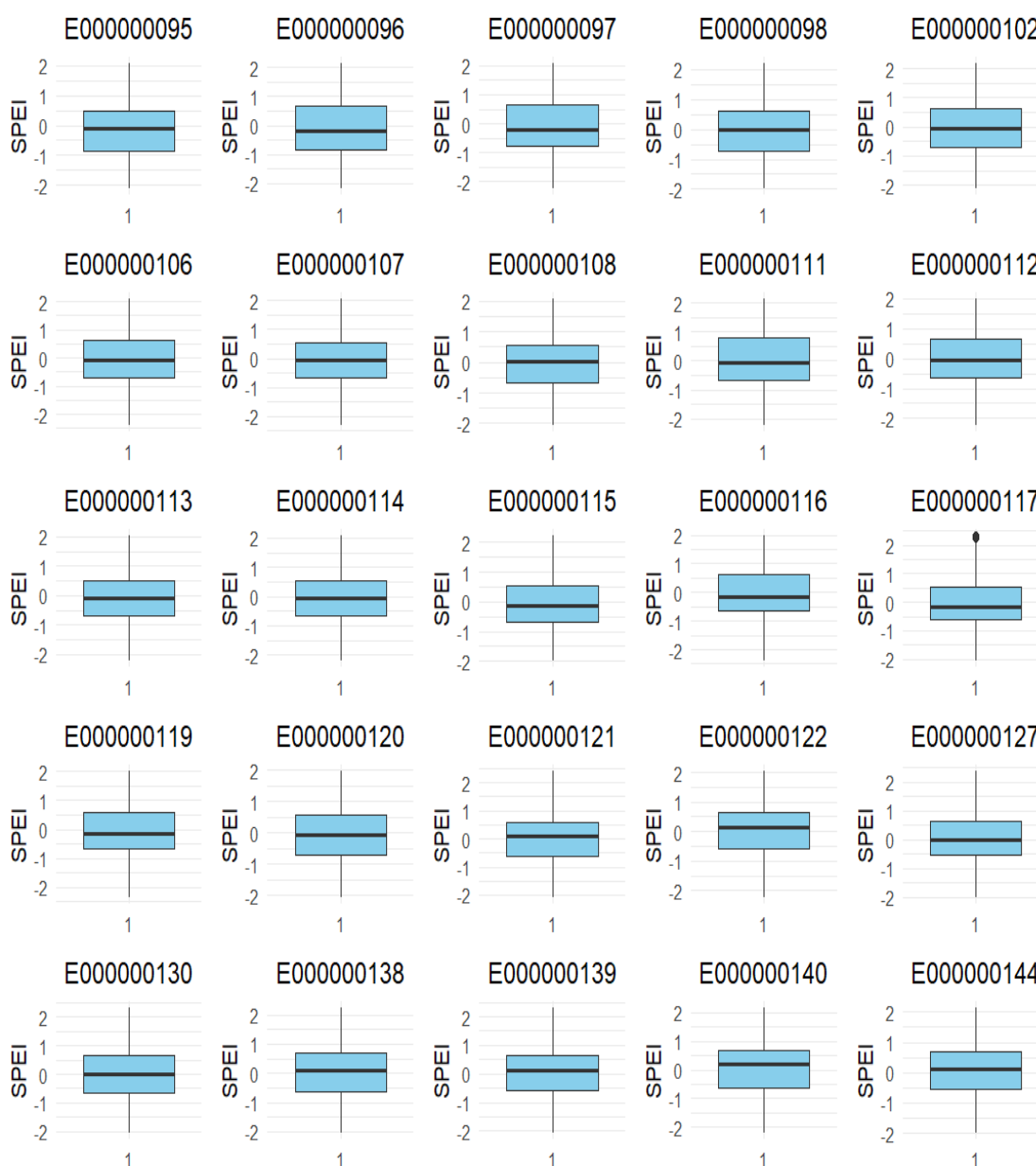


Figura 16. Diagramas de caja para las series de datos del índice SPEI en cada estación
Elaboración propia

En la figura 16, se pueden ver como los datos de sequía, evaluada bajo el índice SPEI, en cada una de las 25 estaciones tiene medias que se mantienen cerca de cero, es decir de condiciones neutras. No obstante, la concentración de datos difiere levemente entre estaciones, sin verse grandes cambios de manera general. Un ejemplo de ello podemos ver en la estación E000000095 en la Figura 17.

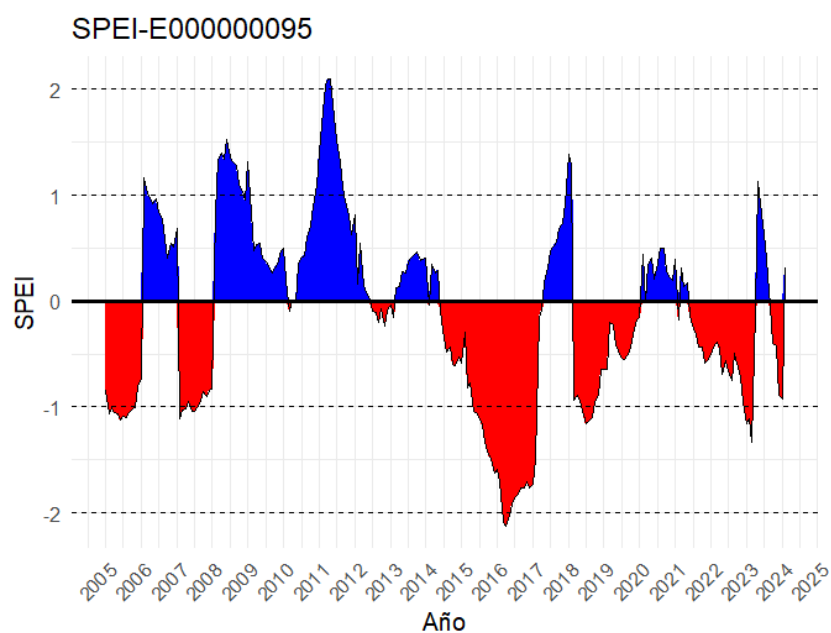


Figura 17. Serie temporal del SPEI para la estación E0000000095
Elaboración propia

2. Promedio espacial de SPEI

Para poder entender las condiciones de humedad en la Cuenca del río Paute, se ha planteado realizar un mapa con un promedio de los índices de sequía SPEI en cada estación. Mediante el método de interpolación *Spline* que basa su procedimiento mediante una función matemática que disminuye la curvatura global de la superficie, se obtiene una superficie suavizada que atraviesa con precisión los puntos de entrada (ESRI 2013).

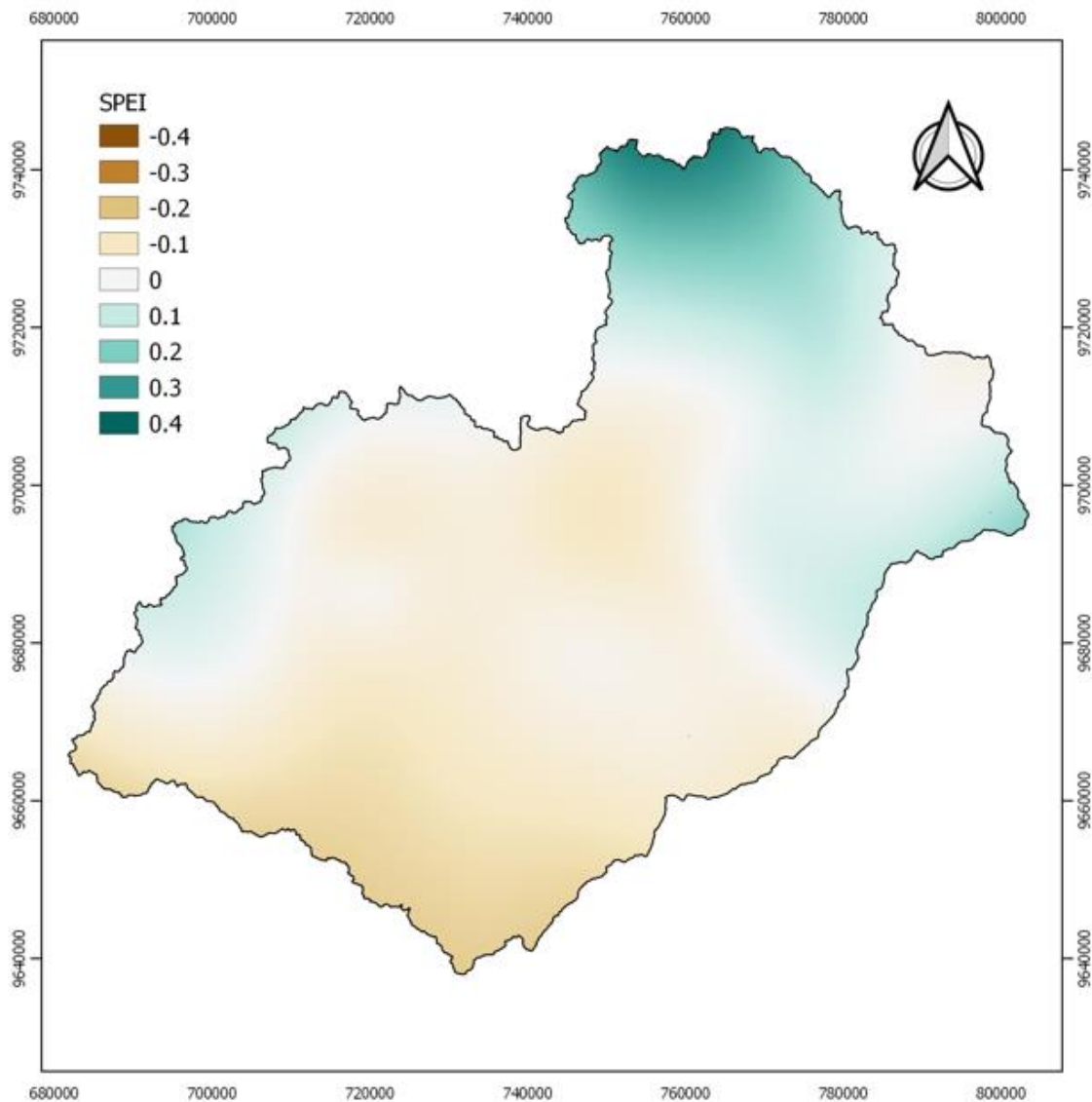


Figura 18. Distribución espacial media de las condiciones de humedad o aridez de la cuenca del río Paute, mediante el uso del índice de sequía SPEI
Elaboración propia

Como se puede verificar en la Figura 18, de promedios del índice SPEI, se puede corroborar que la zona oeste y central de la cuenca tiende ligeramente a la aridez, a pesar de sus valores no ser muy elevados y que sean considerados dentro de los normales según la escala del índice SPEI. De igual manera, se puede visualizar que la zona este y noreste tiende a ser más húmeda, aunque de igual manera sus valores no son muy significativos y se mantienen dentro de la escala normal.

De manera preliminar, se puede evidenciar que en el intervalo del 2004 al 2024 las condiciones húmedas se mantienen al este, en la región hacia la cuenca amazónica y las condiciones áridas se concentran en la región andina de la cuenca, como la cabecera de la cuenca y los valles interandinos, donde están ciudades importantes como: Cuenca,

Azogues, Biblián, Déleg, Gualaceo, Sigsig y Paute. Mientras que sectores como: Méndez, Guarumales, Sevilla de Oro, tienden levemente a la humedad.

3. Promedio mensual de SPEI

Como se puede visualizar en la Figura 16, vemos como a lo largo de los años se establece un patrón de comportamiento de las medias del índice SPEI, donde se observa que en los meses de: abril, mayo y junio los meses son menos propensos a pasar por un periodo de aridez, coincidiendo con los meses de lluvias de la zona; mientras que los meses de: agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, son más susceptibles a sufrir eventos de sequía. No obstante, esto no quiere decir que un evento de sequía no ocurra en cualquier mes del año, sino un registro histórico desde el 2004 hasta 2024 los promedios indican que meses son más propensos.

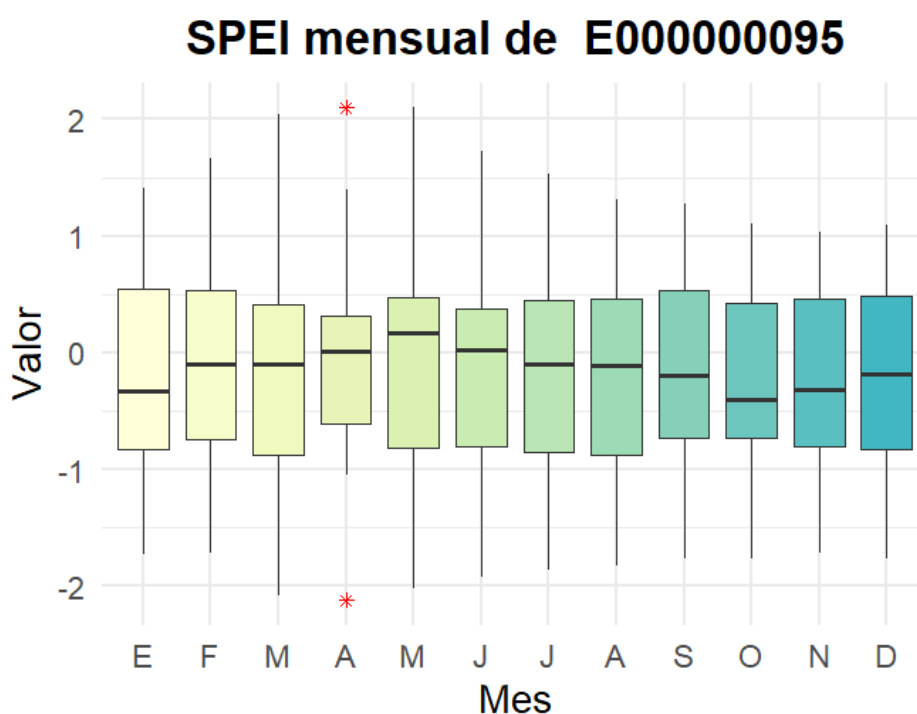


Figura 19. Diagrama de caja de la Estación E000000095 que muestra la variación de cada mes del valor del SPEI en el periodo 2004-2024

Elaboración propia

Para poder obtener una distribución espacial de cada mes en cada estación se obtenido los promedios mensuales durante la ventana de tiempo ante indicada y con ello se elaboraron 12 mapas (ver Figuras 20 y 21) que indican como se distribuyen las

condiciones de humedad-sequía en la cuenca en función de cada punto para cada mes del año

Los valores medios de los primeros 3 meses del año, muestran una predisposición de la cabecera de la cuenca hacia leves condiciones de aridez, mientras que en la parte baja, en la zona oriental las condiciones son neutrales, aunque con pequeñas zonas que tienden hacia las condiciones húmedas.

A diferencia de los tres primeros meses, desde abril hasta junio se evidencia un aumento de la tendencia hacia las condiciones húmedas en la parte alta de la cuenca, a la anteriormente se la ha llamado cabecera. Esto en cierta medida coincide con los meses que suelen tener mayores precipitaciones en estos sectores.

Entre julio y septiembre, las condiciones en la parte alta de la cuenca retornan su tendencia hacia la aridez, mientras que en la parte oriental los valores del índice empiezan a mostrar una tendencia hacia la humedad. Misma que se mantendrá hasta finalizar el año.

Desde octubre a diciembre se ve como en la parte alta de la cuenca las condiciones aridez se van consolidando, hasta noviembre y diciembre empiezan a atenuarse. No obstante, como se mencionó anteriormente en la parte oriental las condiciones de humedad empiezan a tomar fuerza e incluso alcanzan su máxima cobertura en el mes de diciembre.

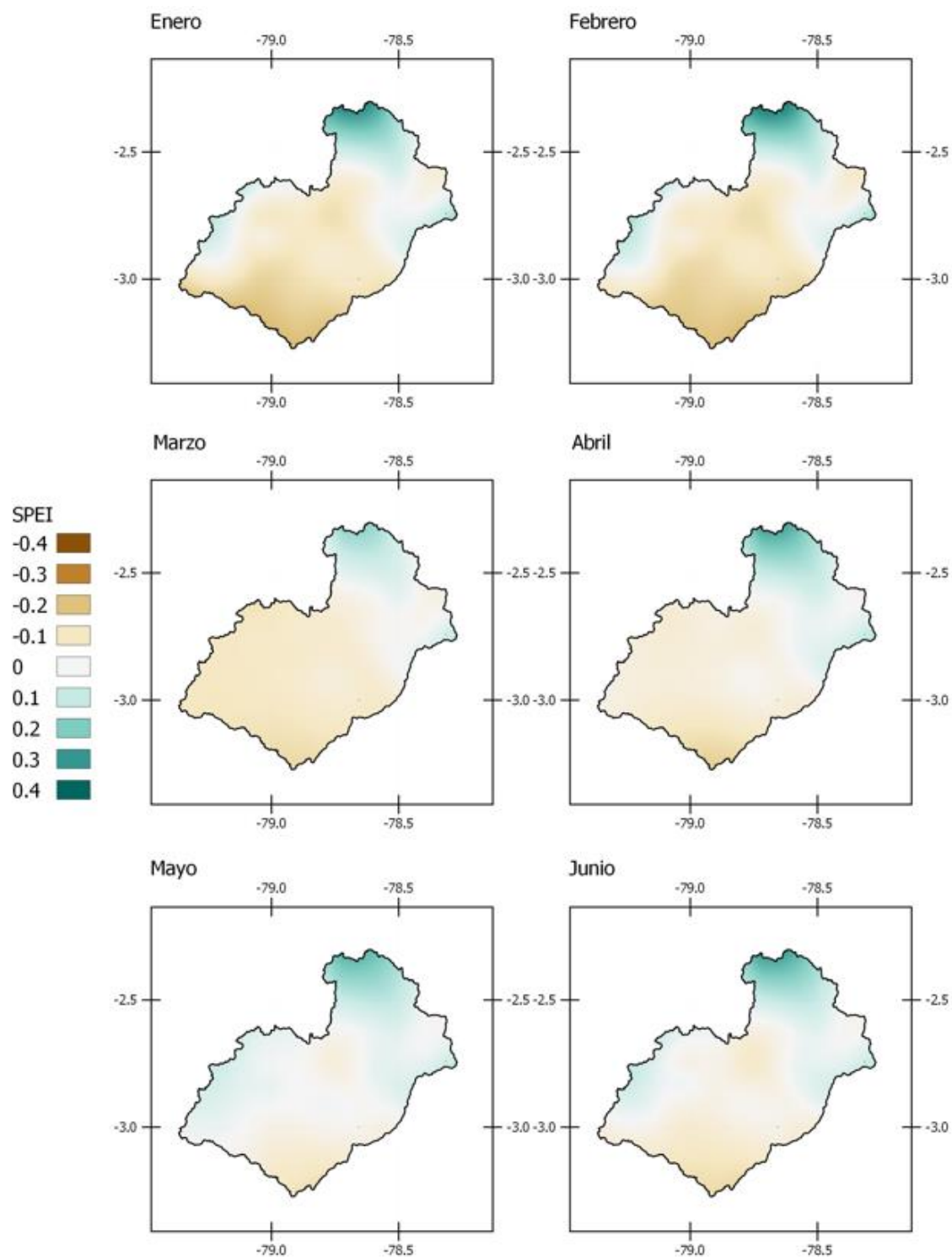


Figura 20: Distribución mensual media, de los meses: enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio de los valores de SPEI para la cuenca del río Paute para los años 2004-2024
Elaboración propia

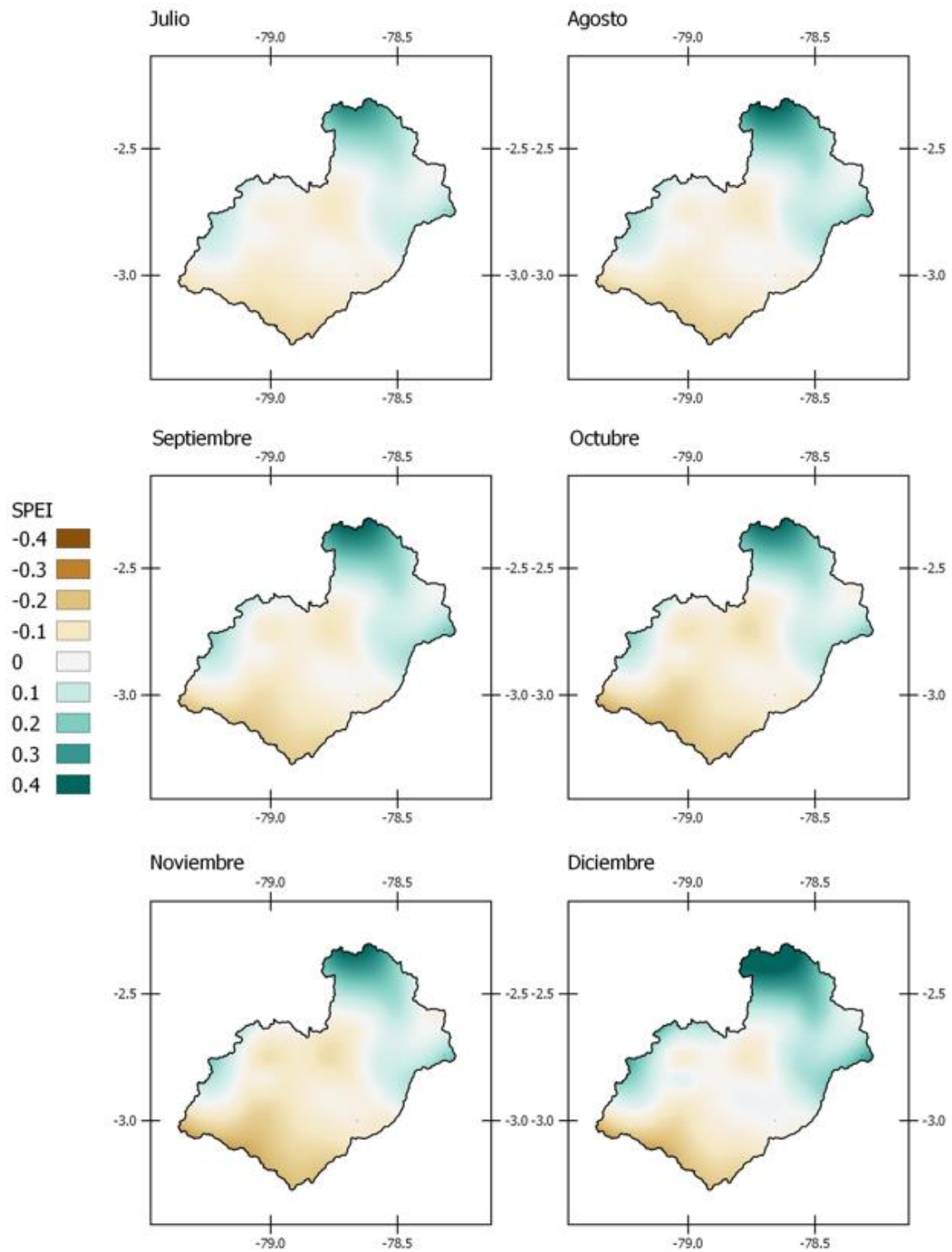


Figura 21: Distribución mensual media, de los meses: julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre de los valores de SPEI para la cuenca del río Paute para los años 2004-2024

Elaboración propia

4. Estacionariedad

Las series de las estaciones, ninguna cumple las condiciones de estacionariedad necesaria para la construcción de un modelo VAR, por lo tanto, se requiere aplicar una diferenciación para poder acondicionar las series de las estaciones para su uso en el modelo. Como se puede observar a continuación, el procedimiento de diferenciación permite obtener una media y varianza constantes.

5. Test Dickey-Fuller Aumentado

Este test plantea la hipótesis nula (H_0) que indica que la serie temporal tiene raíz unitaria, por lo tanto, no sería estacionaria. Por ello al aplicar el test vemos como el P valor = 0.0927, denominado Prob, en el cuadro siguiente, es mayor a 0.05 del nivel de significancia. Se encuentra en la zona de aceptación de H_0 , esto quiere decir la serie no es estacionaria.

Tabla 2
Resultados de aplicar el criterio Dickey-Fuller aumentado, en el que se evidencia que las series no son estacionarias $P > 0.05$ aceptando la hipótesis nula (H_0) de que la serie tiene raíz unitaria

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on E0000000095

Null Hypothesis: E0000000095 has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 12 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-2.608812	0.0927
Test critical values:				
1% level			-3.460453	
5% level			-2.874679	
10% level			-2.573850	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(E0000000095) Method: Least Squares Date: 09/12/24 Time: 20:35 Sample (adjusted): 2006M02 2024M02 Included observations: 217 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
E0000000095(-1)	-0.088177	0.033800	-2.608812	0.0098
D(E0000000095(-1))	0.125159	0.062344	2.007558	0.0460
D(E0000000095(-2))	0.073531	0.062761	1.171603	0.2427
D(E0000000095(-3))	0.031306	0.063092	0.496200	0.6203
D(E0000000095(-4))	0.039066	0.063015	0.619946	0.5360
D(E0000000095(-5))	0.001629	0.062884	0.025901	0.9794
D(E0000000095(-6))	0.008358	0.062919	0.132842	0.8944
D(E0000000095(-7))	0.026080	0.062759	0.415551	0.6782
D(E0000000095(-8))	-0.014516	0.062730	-0.231399	0.8172
D(E0000000095(-9))	0.088493	0.062825	1.408565	0.1605
D(E0000000095(-10))	0.137826	0.064905	2.123505	0.0349
D(E0000000095(-11))	0.109781	0.067281	1.631669	0.1043
D(E0000000095(-12))	-0.522935	0.067828	-7.709747	0.0000
C	-0.003207	0.021519	-0.149045	0.8817
R-squared	0.310393	Mean dependent var		0.004793
Adjusted R-squared	0.266231	S.D. dependent var		0.366216
S.E. of regression	0.313702	Akaike info criterion		0.581592
Sum squared resid	19.97697	Schwarz criterion		0.799650
Log likelihood	-49.10275	Hannan-Quinn criter.		0.669679
F-statistic	7.028492	Durbin-Watson stat		1.840674
Prob(F-statistic)	0.000000			

Elaboración propia

Este test se realizó para las 25 estaciones de la cuenca, resultando en que todas no existen las condiciones de estacionariedad. Por lo que se requiere de un proceso de normalización de los datos, como es la diferenciación para conseguir la estacionariedad de las series. Para verificar si las series diferenciadas son estacionarias, se realiza nuevamente la prueba y se verifica el P valor, como se muestra a continuación

Tabla 3

Resultados de aplicar el criterio Dickey-Fuller aumentado, en el que se evidencia que las series diferenciadas, son estacionarias $P < 0.05$ Rechazando la hipótesis nula (H_0) de que la serie tiene raíz unitaria

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on D(E000000095)

Null Hypothesis: D(E000000095) has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 11 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-6.929147	0.0000
Test critical values:	1% level		-3.460453	
	5% level		-2.874679	
	10% level		-2.573850	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(E000000095,2) Method: Least Squares Date: 09/12/24 Time: 20:34 Sample (adjusted): 2006M02 2024M02 Included observations: 217 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(E000000095(-1))	-1.421152	0.205098	-6.929147	0.0000
D(E000000095(-1),2)	0.505390	0.196980	2.565691	0.0110
D(E000000095(-2),2)	0.532881	0.187142	2.847472	0.0049
D(E000000095(-3),2)	0.517374	0.177082	2.921657	0.0039
D(E000000095(-4),2)	0.510401	0.166443	3.066523	0.0025
D(E000000095(-5),2)	0.467548	0.156181	2.993622	0.0031
D(E000000095(-6),2)	0.433552	0.145424	2.981309	0.0032
D(E000000095(-7),2)	0.419483	0.134538	3.117961	0.0021
D(E000000095(-8),2)	0.365530	0.123028	2.971121	0.0033
D(E000000095(-9),2)	0.416399	0.110025	3.784583	0.0002
D(E000000095(-10),2)	0.513288	0.092664	5.539230	0.0000
D(E000000095(-11),2)	0.574644	0.065784	8.735360	0.0000
C	0.004352	0.021625	0.201261	0.8407
R-squared	0.616995	Mean dependent var		0.005346
Adjusted R-squared	0.594465	S.D. dependent var		0.499570
S.E. of regression	0.318134	Akaike info criterion		0.605352
Sum squared resid	20.64673	Schwarz criterion		0.807835
Log likelihood	-52.68074	Hannan-Quinn criter.		0.687147
F-statistic	27.38583	Durbin-Watson stat		1.874227
Prob(F-statistic)	0.000000			

Elaboración propia

La diferenciación es una herramienta que permite lograr la estacionariedad en las series de tiempo sin cometer ningún tipo de modificación a los datos (Figura 22), ya que únicamente consiste en una resta, de los valores pasados a los presentes.

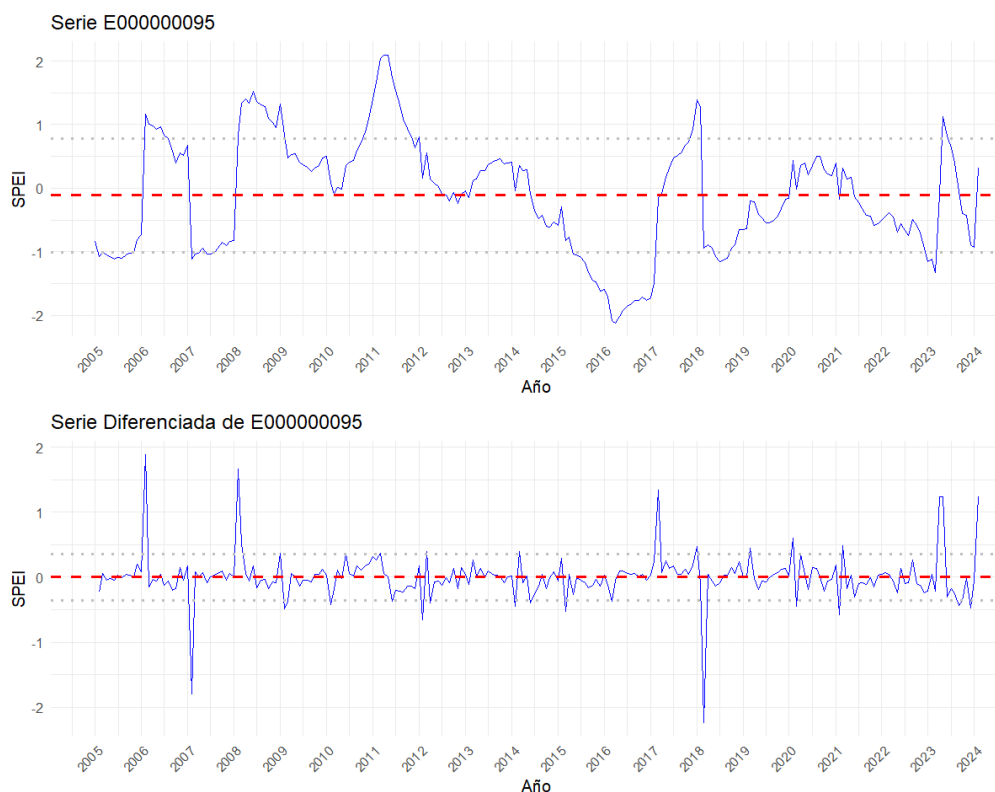


Figura 22. Series de tiempo para el SPEI de la estación E000000095, en la parte superior la serie temporal por defecto y en la parte baja la serie temporal diferenciada.
Elaboración propia

6. ENOS y SPEI

Si se observa en las series temporales del índice de variabilidad climática ONI y el índice de sequías usado SPEI, se pueden observar ciertas condiciones, entre las que destacan la contraposición entre fases cálidas de El Niño, donde el $ONI > 0$, coinciden con eventos de sequía, es decir $SPEI < 0$ y viceversa, en condiciones frías, conocidas como La Niña $ONI < 0$, se manifiestan condiciones húmedas $SPEI > 0$.

No obstante, estas condiciones no ocurren siempre, es decir el ONI, en fase de El Niño tiene cierta relación con las sequías presentadas en la cuenca del río Paute, pero no con todas las que ocurren. Convirtiéndole a este fenómeno en una fracción, aunque importante, no la única que está relacionada con la ocurrencia de las sequías.

Este comportamiento se produce en todas las estaciones de la cuenca, en algunas se acentúa más el índice SPEI, pero de manera general mantiene el mismo comportamiento antes descrito, a manera de ejemplo se observa la relación entre SPEI en E000000095 y ONI en la Figura 23.

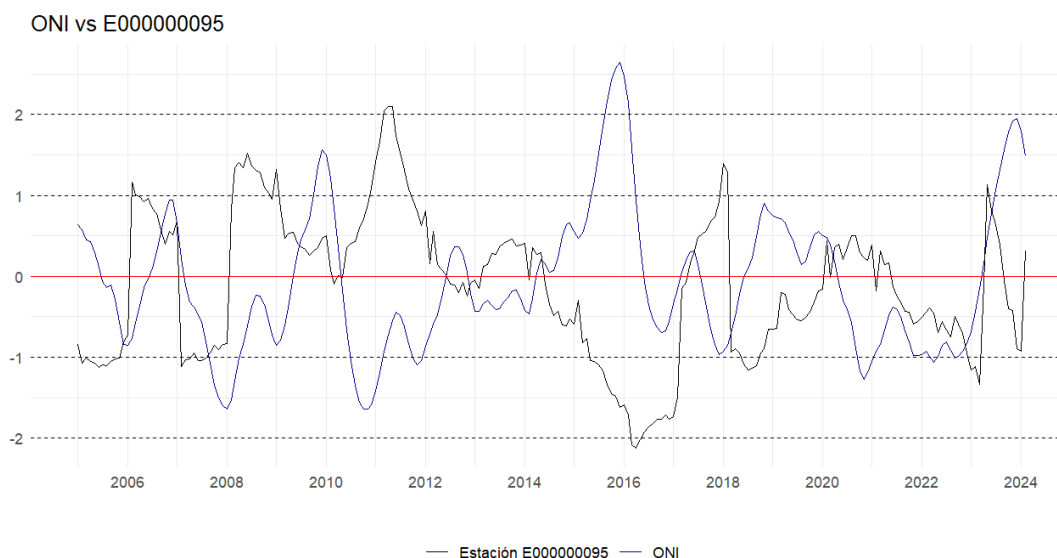


Figura 23. Series de tiempo del ONI y SPEI de la estación E000000095
Elaboración propia

7. Modelo VAR

Para construir el modelo VAR entre la serie de tiempo del ONI y los índices de Sequía SPEI de cada estación, se debe primero diferenciar las series para contar con series estacionarias, que como se indicó anteriormente, las series de SPEI, no eran estacionarias.

El modelo VAR se construye a partir de ecuaciones relacionadas entre sí mediante retardos en cada una de ella, el criterio de elección del número óptimo de retardos se explicó en el marco teórico y mediante las pruebas estadísticas necesarias, se ha identificado que el mejor resultado para definir la cantidad de rezagos es de 12 meses.

A continuación, se muestra la tabla generada por el software EViews en el que se indican las pruebas estadísticas realizadas para poder definir el número óptimo de rezagos, en cada una de esas pruebas se indica con un asterisco (*) cual es el número óptimo de rezagos, resultando así los 12 rezagos (Lag) como óptimo en la mayoría de pruebas.

Tabla 4
Criterio de selección del número óptimo de rezagos para el modelo VAR

VAR Lag Order Selection Criteria						
Endogenous variables: DIFFONI DIFFE095						
Exogenous variables: C						
Date: 09/13/24 Time: 14:47						
Sample: 2005M01 2024M02						
Included observations: 218						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-554.8474	NA	0.567189	5.108692	5.139742	5.121234
1	-39.09980	1017.300	0.005185	0.413760	0.506911	0.451385
2	148.6089	366.8069	0.000961	-1.271641	-1.116389	-1.208933
3	183.1217	66.80914	0.000726	-1.551575	-1.334222*	-1.463783
4	188.9433	11.16249	0.000714	-1.568287	-1.288833	-1.455412
5	194.9084	11.32817	0.000702	-1.586315	-1.244761	-1.448356
6	204.2243	17.52083	0.000668	-1.635085	-1.231430	-1.472043*
7	204.9121	1.281011	0.000689	-1.604699	-1.138942	-1.416573
8	206.5758	3.067812	0.000704	-1.583264	-1.055407	-1.370055
9	212.2807	10.41548	0.000693	-1.598906	-1.008948	-1.360613
10	215.1149	5.122285	0.000701	-1.588210	-0.936151	-1.324834
11	224.9307	17.56042	0.000665	-1.641566	-0.927407	-1.353107
12	233.4981	15.16969*	0.000638*	-1.683468*	-0.907208	-1.369926

* indicates lag order selected by the criterion
 LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)
 FPE: Final prediction error
 AIC: Akaike information criterion
 SC: Schwarz information criterion
 HQ: Hannan-Quinn information criterion

Elaboración propia

Y para poder verificar la estabilidad del modelo se obtiene las raíces inversas del polinomio característico (Figura 24) y que no deben ser mayores a uno (1), como se observa a continuación ninguna de las raíces del modelo tiene valores mayores o iguales a uno. Con estas características se puede decir que el modelo VAR es estable

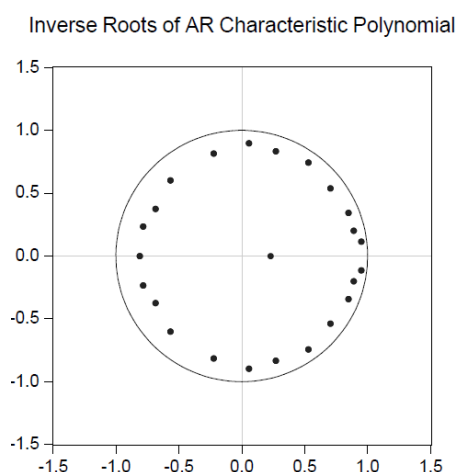


Figura 24. Gráfico de raíces inversas del modelo VAR
Elaboración propia

Una vez verificada la estabilidad del modelo y el número de rezagos óptimo se procede a realizar el test de Granger en cada una de las 25 estaciones, para poder verificar

si existe causalidad entre las variables del modelo. De acuerdo a este test, se obtiene el resultado de que ONI tiene causalidad de Granger a SPEI en la estación E00000095, ya que su P valor (Prob.) < 0.05 que es el nivel de significancia establecido. Es decir, que los valores de ONI pasados influyen en los valores de la variable dependiente SPEI de la estación e00000095.

También se puede afirmar que SPEI no tiene causalidad de Granger en ONI. Y este resultado resulta obvio, ya que el ONI es independiente de si se producen o no sequías en la cuenca del río Paute.

Tabla 5
Resultados de la aplicación del test de causalidad de Granger para la estación E00000095

VAR Granger Causality/Block Exogeneity Wald Tests Date: 09/13/24 Time: 14:50 Sample: 2005M01 2024M02 Included observations: 218			
Dependent variable: DIFFONI			
Excluded	Chi-sq	df	Prob.
DIFFE095	8.131667	12	0.7748
All	8.131667	12	0.7748
Dependent variable: DIFFE095			
Excluded	Chi-sq	df	Prob.
DIFFONI	28.37468	12	0.0049
All	28.37468	12	0.0049

Elaboración propia

Sin embargo, de las 25 estaciones analizadas, las correspondientes a: e000000102, e000000106, e000000107, e000000111, e000000112, e000000113, e000000114, e000000116, e000000117, e000000119, e000000120. No presentan causalidad de Granger ante la variable ONI. Algo que indica que los efectos relacionados al ENOS, no inciden en toda la superficie de la cuenca del río Paute.

Como se puede ver cuando se realiza el test de causalidad de Granger para la estación e000000102, este tiene su Pvalor (Prob.) $P > 0,05$ exactamente de 0,0789. Lo que indica que no existe causalidad entre el ONI y SPEI en esa estación.

Tabla 6

Resultados de la aplicación del test de causalidad de Granger para la estación E000000102

VAR Granger Causality/Block Exogeneity Wald Tests

Date: 09/18/24 Time: 18:17

Sample: 2005M01 2024M02

Included observations: 217

Dependent variable: D(ONI)

Excluded	Chi-sq	df	Prob.
D(E000000102)	7.248551	12	0.8408
All	7.248551	12	0.8408

Dependent variable: D(E000000102)

Excluded	Chi-sq	df	Prob.
D(ONI)	19.41850	12	0.0789
All	19.41850	12	0.0789

Elaboración propia

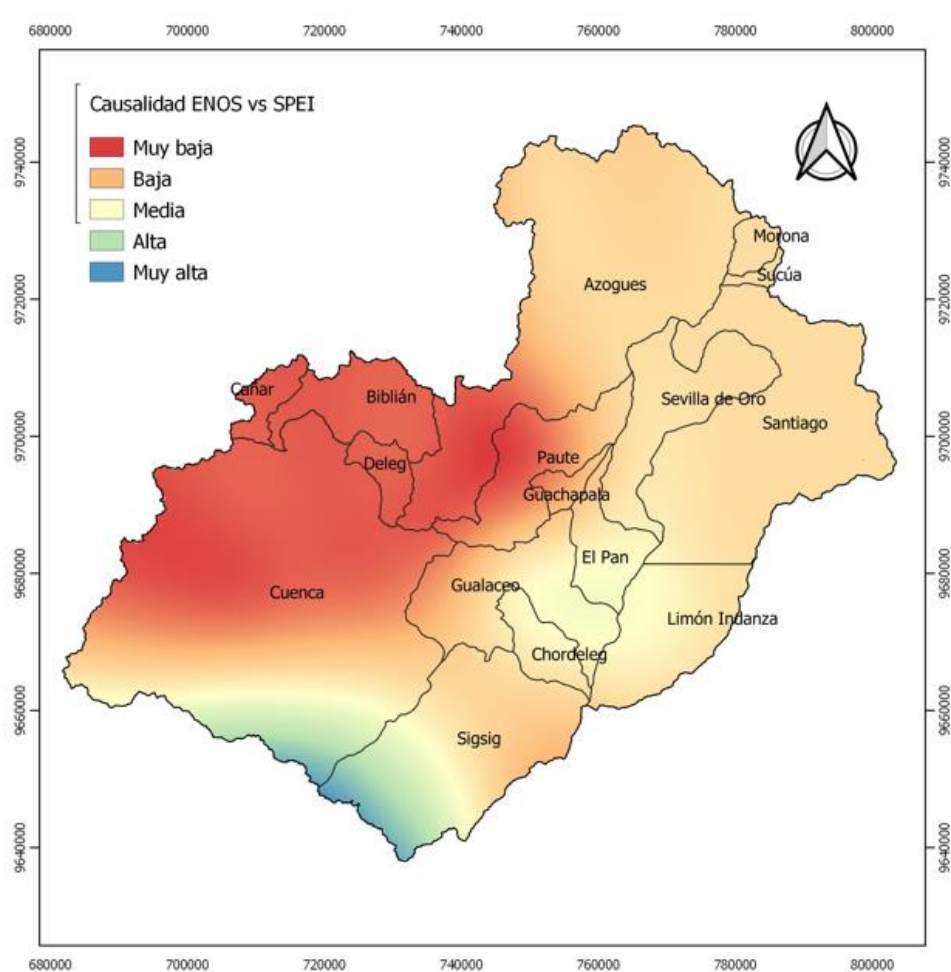


Figura 25. Distribución espacial de la causalidad de Granger en la cuenca del río Paute, para establecer posibles sectores de mayor influencia del ENOS en las sequías definidas por el índice SPEI

Elaboración propia

La Figura 25 indica la distribución de la influencia de la variabilidad climática, evaluada por el índice ONI, en las sequías en la cuenca del río Paute. Los puntos de menor incidencia son los páramos del sector centro oeste de la zona de aporte y ciudades como: Cuenca, Azogues, Biblián y Deleg. Estos puntos coinciden en cierta medida por estar en la cordillera occidental misma formación que reduce la influencia de las masas de aire oceánica llegando incluso hasta anular su influencia (Nouvelot y Pourrut 1984, 58-63).

No está demás indicar que las oscilaciones entre las fases de El Niño, no siempre causan sequías o exceso de precipitaciones en la cuenca del río Paute. Los efectos de El Niño son diversos y dependen de la zona a analizar. A la par también existen factores climáticos como la humedad, nubosidad, vientos, etc. que pueden verse modificados en los eventos de El Niño y estos podrían ser la combinación idónea para tener eventos climáticos extremos en la región, ya sean sequías o lluvias intensas.

El resto de cantones tienen una moderada y alta causalidad entre el ONI y SPEI. El método usado para poder interpolar los valores de causalidad de Granger en cada una de las estaciones distribuidas en la cuenca de aporte es *Spline*, de ArcGis, que se recomienda para generar superficies que varían levemente (ESRI 2013). Ya que no se espera un cambio brusco entre la causalidad y no causalidad en distintos puntos de la cuenca.

8. Análisis espectral

8.1. Espectros de potencia

Haciendo uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) se obtuvieron los espectros de potencia de las series temporales de ONI y SPEI (Figura 26), de lo que destaca la coincidencia de picos, en los dos espectros para las frecuencias bajas, es decir en los fenómenos que tienen larga duración en el tiempo. Algo que tiene sentido con la duración de los eventos de El Niño.

Además, es evidente que existen picos también en las frecuencias medias y altas del espectro de potencia de la serie SPEI, esto podría reflejar que existen eventos de sequía que no necesariamente tienen relación con El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur. En otras palabras, no todos los eventos de sequías están relacionados con el ENOS en la cuenca del río Paute.

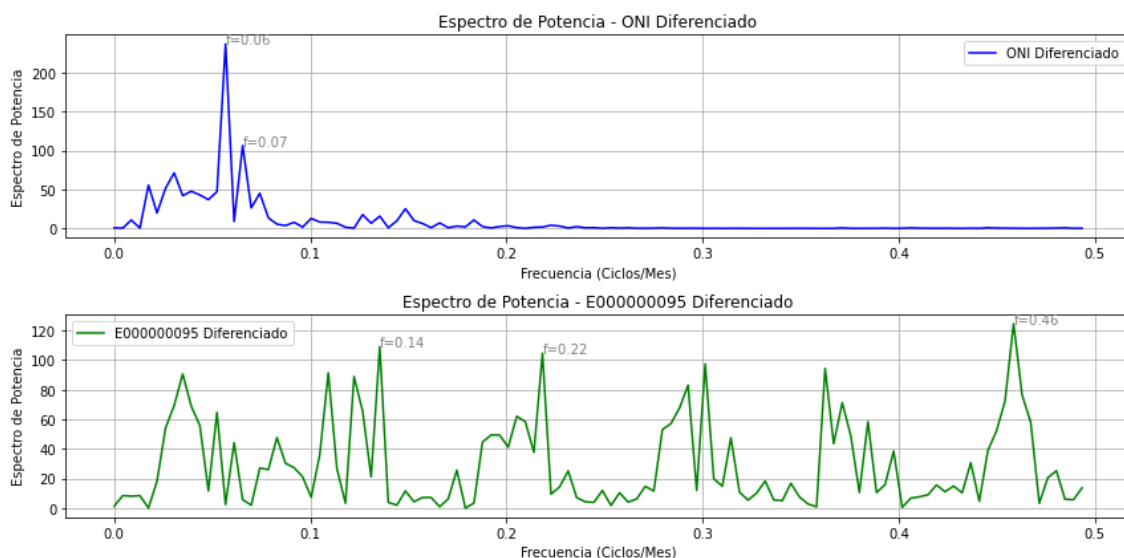


Figura 26. Espectro de potencia para las series de ONI y SPEI diferenciadas
Elaboración propia

8.2. Espectro cruzado

Este análisis permite conocer la covarianza entre las series temporales de ONI y de SPEI en el dominio de la frecuencia, y de acuerdo a lo generado se puede ver que los valores más altos, están en las bajas frecuencias y que van disminuyendo hacia las frecuencias medias y bajas.

Esto refuerza en cierta medida que estos eventos, de larga duración, como el ENOS tiene una relación con las condiciones hídricas en la Cuenca del río Paute como se ha indicado anteriormente. Al igual podemos decir que a medida que las frecuencias aumentan la relación entre el ENOS y las Sequías van disminuyendo tal como lo indica el espectro cruzado en la Figura 27.

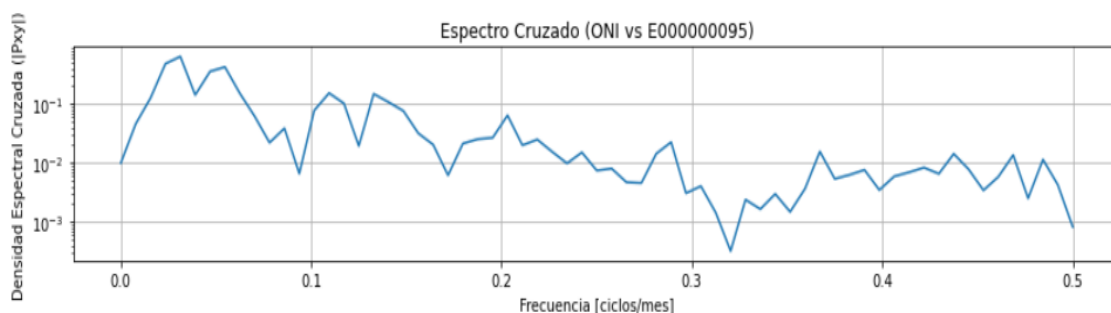


Figura 27. Espectro cruzado entre ONI y SPEI de la estación E000000095
Elaboración propia

8.3. Espectrogramas

Para obtener los espectrogramas tanto de ONI como de SPEI se ha partido de la transformada de Fourier de Tiempo Reducido (STFT) y con ello se obtiene la magnitud de la serie en un momento específico y su frecuencia. De Igual manera, se pueden ver como predominan las frecuencias bajas entre los eventos ONI y SPEI.

Lo que llama la atención es la magnitud de ciertos tiempos que puede indicar la estrecha relación entre la ocurrencia de fenómenos ENOS con las sequías y como esta relación es mucho más significativa en largos periodos de tiempo, esta relación se observa en la Figura 28

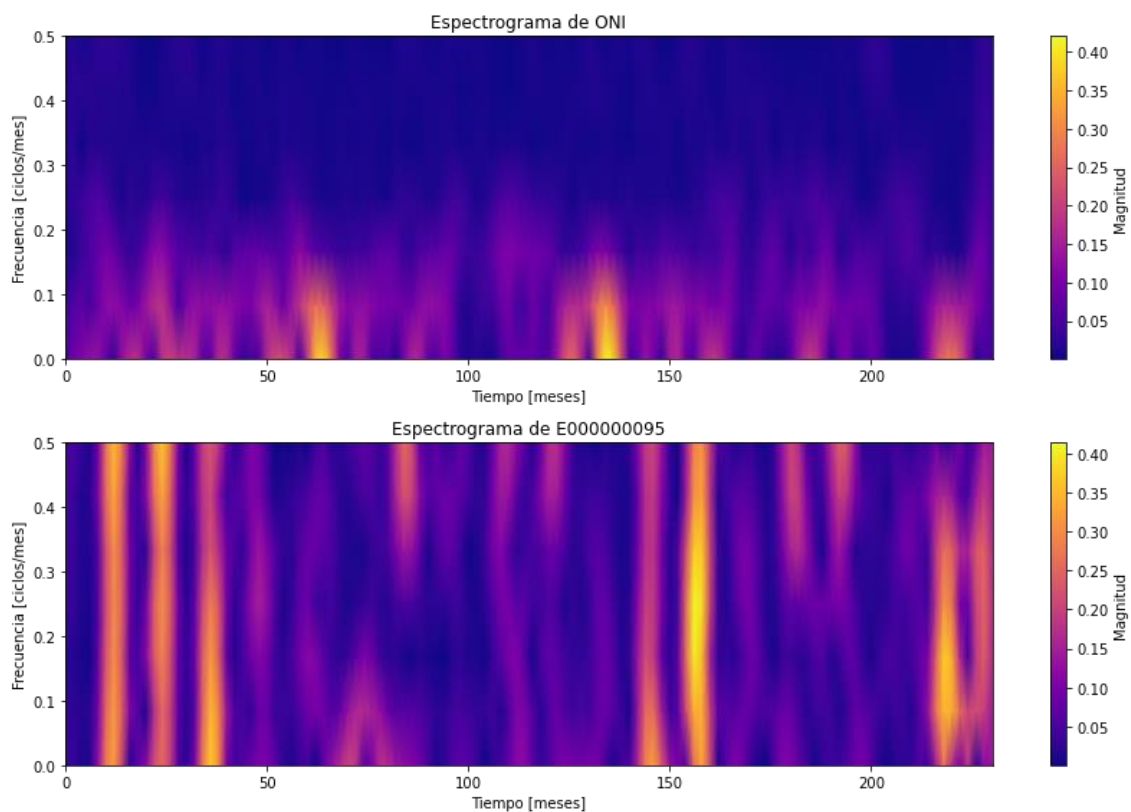


Figura 28. Espectrograma de ONI y SPEI que indica frecuencia, magnitud y tiempo de los eventos
Elaboración propia

Como se puede evidenciar la relación entre ENOS y Sequías no es siempre correspondiente, ya que, muchas sequías meteorológicas (SPEI) no siempre coinciden con eventos ENOS, esto puede deberse a que se necesitan otras condiciones complementarias para su desarrollo. Estudios han demostrado que El Niño, está presente en algunos episodios secos, en compañía de una PDO negativa que provoca sequías en

Ecuador y una AMO positiva que se relaciona con este tipo de eventos (Oñate, Uchuari y Oñate 2020, 1).

En Perú se han realizado estudios que manifiestan que las precipitaciones en los Andes centrales e incluso parte de la Amazonía presentan un déficit debido a la relación entre la Oscilación del Sur y las alteraciones en la circulación atmosférica del Atlántico, se sugiere que el anticiclón del Atlántico Sur podría fortalecerse y desplazarse hacia el norte. Esta situación podría ser responsable de las sequías recurrentes no solo en Perú sino también en el noreste de Brasil (Francou y Pizarro 1985, 15).

Los principales resultados de este análisis exploratorio de identificar la influencia del ENOS en las sequías en la cuenca del río Paute abordan que las sequías influenciadas por la variabilidad climática no suceden de manera homogénea en toda la cuenca de estudio. La cordillera oriental reduce esta influencia. Del mismo modo el análisis de las frecuencias nos arroja una serie de pistas sobre la relación entre las sequías y el ENOS en las bajas frecuencias, en periodos que van desde los 33 meses hasta los 17 meses.

Las técnicas metodológicas previamente usadas, tanto los modelos de Vectores Autorregresivos (VAR) y Análisis espectral, permiten dar respuesta al segundo objetivo específico de la investigación, que busca identificar la influencia de la variabilidad climática, expresada como el Índice de El Niño Oceánico en los periodos de estiaje en esta cuenca andina/amazónica.

Capítulo cuarto

Índice de permanencia de sequías

Este apartado de la investigación corresponde a establecer un mecanismo para el monitoreo y seguimiento de las sequías en la región de estudio; a la vez que permite identificar y plantear una propuesta del estado y permanencia de las sequías en la región, Con esta herramienta se busca dar respuesta al objetivo tres de esta propuesta de investigación al generar un instrumento valioso para el seguimiento y monitoreo de las sequías en esta delimitación hidrográfica.

Finalmente, a manera de entender cómo evolucionan las sequías en la cuenca del río Paute se ha implementado un índice de permanencia de sequías, mismo que recopila distintos tipos de índices de sequías (SPI, SPEI, STI, SSMI Y SVHI). Para con ellos construir un modelo de redes neuronales recurrentes de tipo LSTM que use cada uno de los cinco índices y nos permitan predecir el índice de sequía SDI en la estación de Mazar.

Los valores del error obtenido en cada uno de los modelos permiten construir un índice combinado, que facilita la generación de un modelo de permanencia de sequías en esta superficie. Para ajustar los coeficientes de cada uno de los índices utilizados, se tomó como serie objetivo el índice de sequías hidrológicas del río Paute (SDI) en la estación de Mazar y el error de cada uno de los índices (SPI, SPEI, STI, SSMI, SVHI) en predecir el índice SDI será ajustado para tener los coeficientes, siendo de mayor peso los que presenten un menor error en predecir la serie objetivo.

Este tipo de modelos demuestra ser eficaz en la representación de fenómenos hidrológicos complejos, como las sequías, al capturar las interacciones dinámicas entre variables complejas como suelen ser las variables climáticas; lo que aporta un enfoque novedoso y preciso para la gestión de recursos hídricos frente a eventos extremos.

1. Índice de permanencia de sequías

Para poder comprender como se constituyen las sequías a nivel de toda la cuenca del río Paute, es necesario establecer la relación entre distintos tipos de sequía. Mediante ellos se permite generar un instrumento para dar seguimiento integral a la sequía. Los índices usados para la implementación de esta herramienta son:

- Índice estandarizado de escurrimiento (SDI)
- Índice estandarizado de temperatura (STI),
- Índice estandarizado de precipitación (SPI),
- Índice estandarizado de humedad de suelo (SSMI),
- Índice de salud de la vegetación (SVHI), y
- Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI).

2. Índice SDI

Para poder calcular este índice se usaron datos hidrológicos facilitados por CELEC Sur, mismos que son recopilados por su red hidrológica en el río Paute, al ingreso al embalse de Mazar; Esta serie histórica de datos fue completado, por registro histórico de los datos en otro punto de aforo, que es previo al ingreso del embalse Molino, de la presa Daniel Palacios. El registro de sequías en este punto se indica en la Figura 29.

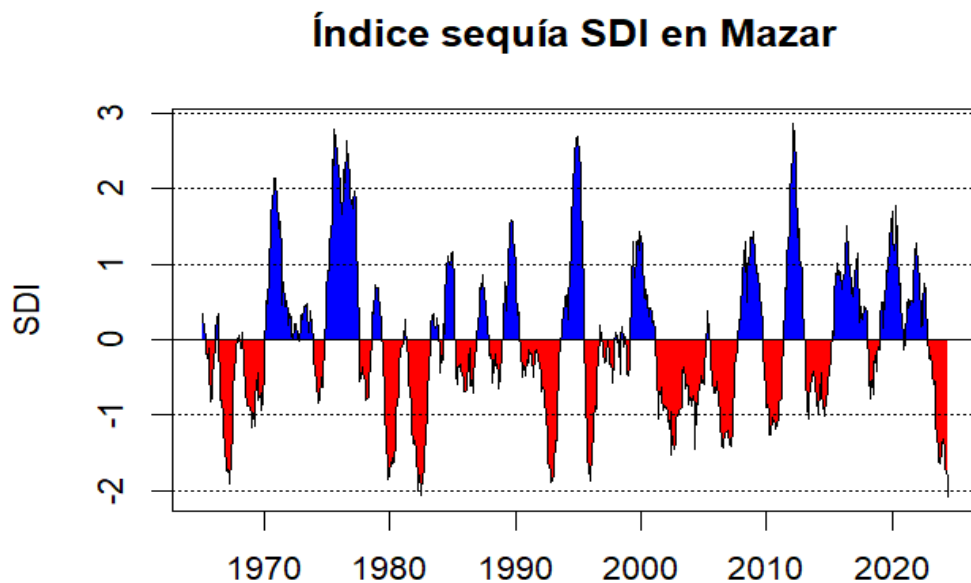


Figura 29. Índice de sequía de caudales del río Paute en Mazar
Fuente: Datos CELEC Sur
Elaboración propia

Estos datos de sequía hidrológica, son los únicos que se obtuvieron con información *in situ*, por lo que se considera una variable local ante la cual el resto de los índices deberán ajustarse para tener mayor incidencia a la realidad.

3. Redes neuronales

Para el desarrollo del modelo de redes neuronales se ha implementado un sistema de redes neuronales recurrentes del tipo LSTM, que usa como variables del modelo los siguientes índices: SPEI, SPI, SVHI, STI y SSMI para poder predecir el SDI del río Paute en Mazar. El modelo se ha constituido por las combinaciones entre el índice SDI con los 5 índices restantes.

Para el entrenamiento del modelo se ha dividido la serie temporal del 2004 hasta el 2022 que hay registro, en 3 ventanas, que corresponde a datos para: entrenamiento, validación y prueba (Subramanian 2018, 67-68) . Considerando las recomendaciones típicas se va a mantener una proporción de: El 80% de los datos para entrenamiento y 20% para validación para el entrenamiento de los hiperparámetros del modelo. Sin embargo, es importante que una fracción de los datos de validación, no sean usados para tomar decisiones sobre los hiperparámetros del modelo, a estos se los conoce como conjunto de prueba (Goodfellow, Bengio y Courville 2016, 121). Dividiendo así ese 20% en 10% para validación y 10% de prueba como se puede ver en la figura 30, de la serie temporal correspondiente a la estación E000000096

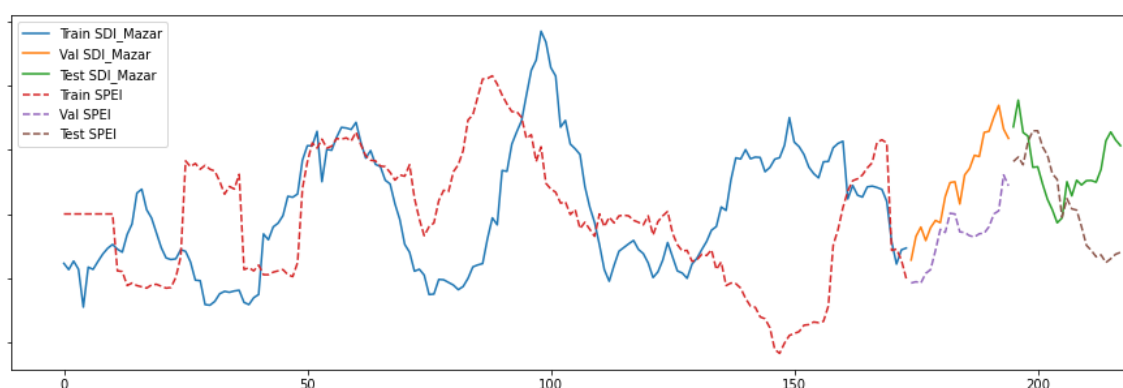


Figura 30. Ventanas de la serie temporal, en entrenamiento (train), validación (val) y prueba (test) de SDI en Mazar y SPEI en la estación E000000096. Las líneas sólidas corresponden a la serie temporal de ONI y las Inter punteadas a la serie SPEI de la estación E000000096
Elaboración propia

En la serie temporal SDI, el 80 % de los datos para entrenamiento están en color azul, el 10 % de datos para validación en color naranja y los 10 % restantes para la prueba están en color verde. De manera similar para la serie SPEI, en la estación E000000096, los datos de entrenamiento están en color rojo, los de validación en morado y los de prueba en café.

Una vez que realizados los distintos modelos de redes neuronales para cada uno de los cinco los índices y en las veinte y cinco estaciones virtuales, se obtuvieron los siguientes resultados del cuadrado del error medio (RMSE) para verificar la bondad del modelo para ajustarse a los datos reales. Estos valores se observan en la figura 30, mismos que muestran la dispersión de los valores obtenidos para cada una de las estaciones dentro de la cuenca.

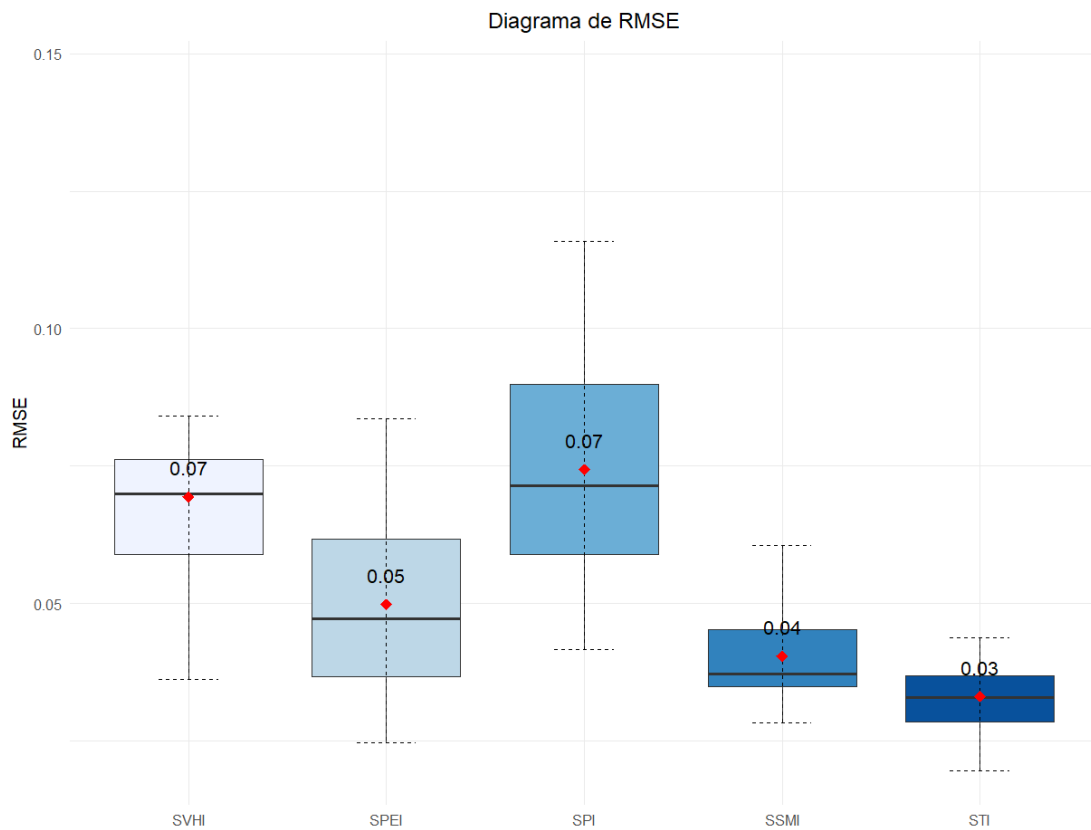


Figura 31. Diagrama de cajas de la raíz del cuadrado del error medio de cada uno de los índices en las 25 estaciones de la cuenca del río Paute
Elaboración propia

Los errores más altos indican una menor capacidad del modelo para poder predecir resultados, con estos datos obtenidos se ha empezado a construir un índice general de sequías, similar al que usa CIIFEN, para su monitor de sequías, pero el que varía por sus coeficientes, ya que estos se han obtenido mediante una estandarización de los valores de la raíz error medio cuadrático, asignando mayores pesos a los valores con menor error, en una escala de 0 a 1.

Tabla 7
Errores medios de cada índice, porcentaje de cada índice en el total y determinación del coeficiente

Índice	Media RMSE	Porcentaje	Invertir	Coeficiente
SVHI	0,0694	0,26	0,74	0,1850
SPEI	0,0498	0,19	0,81	0,2034
SPI	0,0743	0,28	0,72	0,1804
SSMI	0,0404	0,15	0,85	0,2122
STI	0,0331	0,12	0,88	0,2190

Elaboración propia

Quedando el índice de la siguiente manera:

$$I_{ps} = 0,1850 * I_{SVHI} + 0,2034 * I_{SPEI} + 0,1804 * I_{SPI} + 0,2122 * I_{SSMI} + 0,2190 * I_{STI}$$

Donde:

- I_{ps} es el índice de permanencia de sequía en un instante dado
- I_{SVHI} es el valor del índice SVHI para un instante
- I_{SPEI} es el valor del índice SPEI para un instante
- I_{SPI} es el valor del índice SPI para un instante
- I_{SSMI} es el valor del índice SSMI para un instante
- I_{STI} es el valor del índice STI para un instante

El índice de permanencia de sequías planteado se ha constituido a partir de la única variable obtenida en territorio, que es el dato histórico de caudales del río Paute en la estación de Mazar de CELEC. Es por ello que este índice tiende a ser una perspectiva integral de variables para el desarrollo y permanencia de sequías hidrológicas en la cuenca.

Como se puede ver en el índice planteado, las variables que más significancia tienen en la implementación del índice de permanencia son: STI, SSMI, SPEI y las que menor incidencia tienen son: SVHI y SPI. Esto nos permite tener una perspectiva general de que la temperatura, juega un rol importante en el desarrollo de las sequías, ya que esta se encuentra en cierta medida en los índices STI y SPEI.

Mientras que la disponibilidad de agua, en el suelo también es una variable de gran importancia para el desarrollo de sequías y que en cierta medida se encuentra contemplado por el índice SSMI y SPEI.

En lo que se refiere al estrés vegetal por la disponibilidad de agua, este no llega a ser una variable muy significativa en comparación con las mencionadas anteriormente. Finalmente se puede indicar que la cantidad de agua que llega a la cuenca como precipitaciones es una de las variables que menor incidencia llegan a tener en el desarrollo de las sequías.

Con ello se puede decir que varios aspectos son los que inciden en el desarrollo y permanencia de sequías, sin embargo, condiciones como las temperaturas elevadas y poca disponibilidad de agua en el suelo pueden ser los aspectos fundamentales al momento de poder cuantificar la incidencia que puede tener un evento.

El índice de permanencia de sequías I_{ps} muestra los periodos de sequías combinados entre los otros índices tal como se puede ver en la Figura 32.

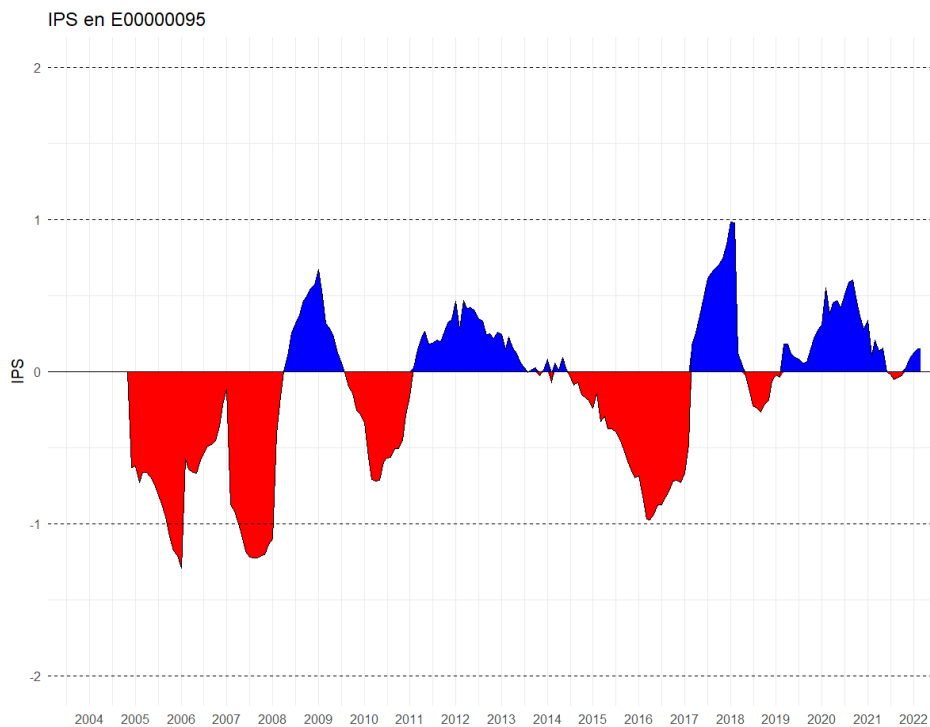


Figura 32. Serie de tiempo del índice de permanencia de sequías (IPS) para la estación E00000095 con los coeficientes determinados
Elaboración propia

Cabe mencionar que como se observa en la Figura 33, este índice de permanencia de sequías, logra captar los periodos de sequía significativos del índice de sequía SDI, no obstante, sus picos no se representan de manera proporcional, lo que puede ser una limitante en determinar la gravedad de la sequía. Sin embargo, constituye una herramienta que representa de manera cercana la duración de los eventos húmedos o secos, considerando como variable principal la cantidad de agua que circula por el río Paute.

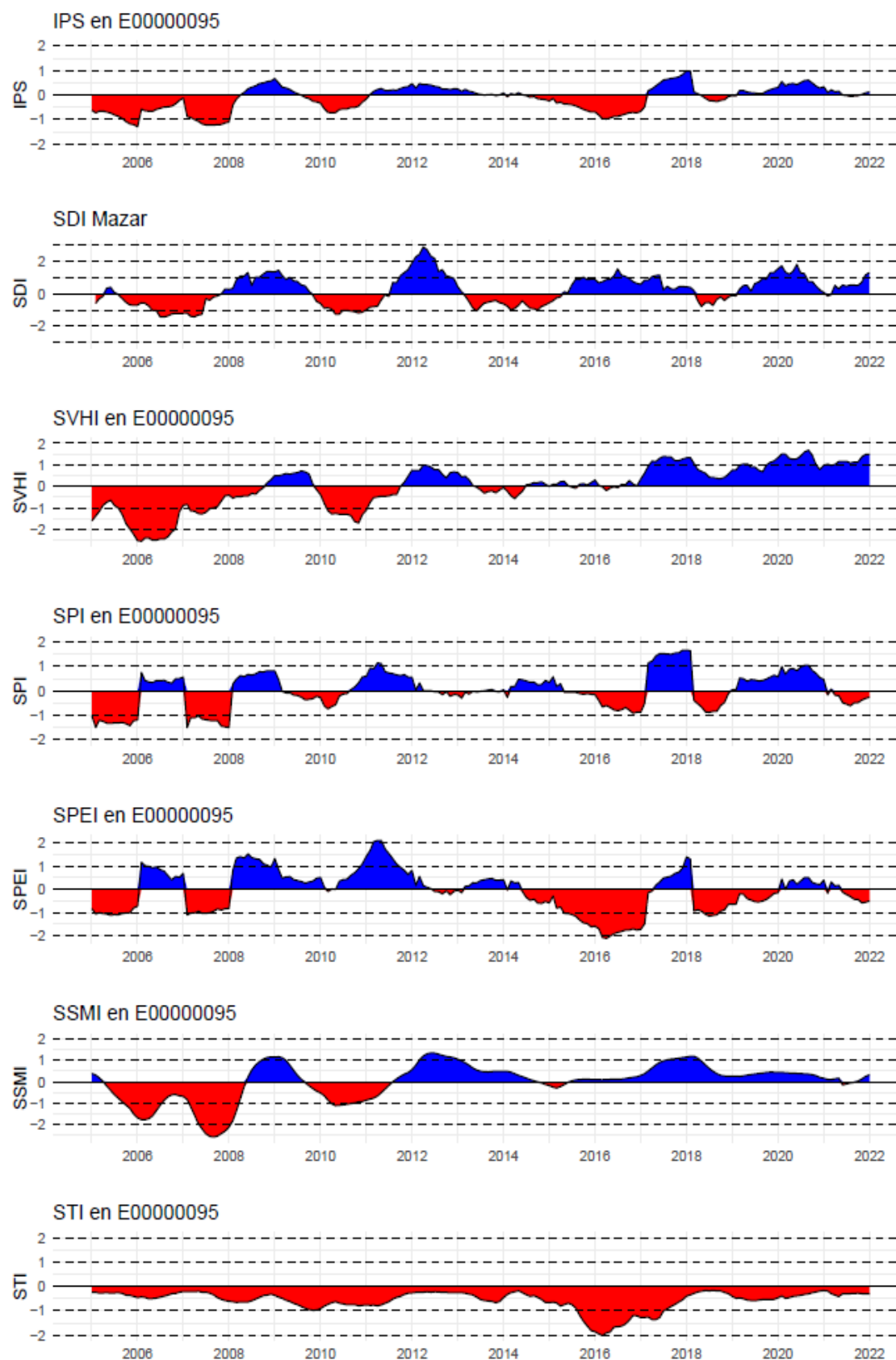


Figura 33. Series de tiempo para la estación E00000095, de los índices: IPS, SDI, SVHI, STI, SSMI, SPI y SPEI
Elaboración propia

Conclusiones

Los datos hidrometeorológicos proporcionados por CIIFEN y CELEC han demostrado ser de calidad, lo que ha permitido la implementación de modelos estadísticos robustos para analizar la relación entre el ENOS y el SPEI. Dada la confiabilidad de estos datos, ha sido posible identificar patrones significativos en la influencia del ENOS sobre las sequías en la cuenca del río Paute, así como desarrollar una herramienta eficaz para el seguimiento y monitoreo de estos eventos, contribuyendo a una mejor gestión del recurso hídrico en la región

El análisis con el modelo VAR revela una relación estadísticamente significativa entre los eventos de ENOS y las sequías tipo SPEI en la cuenca del río Paute, lo que sugiere una posible causalidad en ciertas condiciones climáticas, especialmente en variables como la humedad y la precipitación. Además, muestra que la influencia del ENOS en las sequías es heterogénea, afectando de manera desigual distintas áreas de la cuenca, probablemente debido a la alteración de factores meteorológicos clave, como los vientos y la distribución de la humedad, durante estos eventos.

El análisis del espectro indica que las sequías relacionadas con el ENOS se presentan con menor frecuencia en comparación con otros tipos de sequías en la cuenca del río Paute. Estas sequías, sin embargo, tienden a ser más severas y están asociadas a variaciones climáticas de baja frecuencia. Los espectrogramas confirman esta relación, indicando que estos eventos no son tan comunes, pero son significativos en términos de impacto

Los eventos de sequías evaluadas por el índice SPEI, en la cuenca del río Paute, cuando coinciden con el desarrollo del ENOS, pueden intensificarse, como ocurrió en las sequías de 2016 y 2023. La combinación de poca humedad en el suelo y la influencia de ENOS exacerba la severidad de estos eventos, generando sequías más prolongadas y de mayor magnitud, con efectos adversos tanto en los recursos hídricos como en la economía local.

En cuanto a la herramienta de seguimiento de las sequías en la cuenca del río Paute, se identifica que las variables más significativas para predecir la sequía hidrológica de tipo SDI, en el río Paute, son la temperatura (STI), la disponibilidad de agua en el suelo (SSMI), y la precipitación-Evapotranspiración (SPEI). Este índice compuesto constituye una herramienta útil para el monitoreo y gestión de los recursos hídricos, ya que permite

una mejor comprensión de la duración de las sequías, facilitando la toma de decisiones frente a eventos climáticos extremos.

Ante la recurrencia de eventos de sequía hidrológica en la cuenca del río Paute, es crucial resaltar que la fuerte dependencia energética del país en la generación hidroeléctrica podría verse comprometida si estos eventos se intensifican en el futuro. La centralidad en la cuenca del río Paute de la producción de energía hidroeléctrica subraya la vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional frente a las variaciones climáticas. En este contexto, la diversificación de la matriz energética se presenta como una alternativa estratégica para garantizar la seguridad energética. Promover el desarrollo de proyectos energéticos de menor escala, distribuidos en distintas regiones del país y basados en fuentes de energía renovables como la solar, eólica y geotérmica, permitiría reducir la dependencia de una sola fuente y mitigar los riesgos asociados a las fluctuaciones hídricas.

Es importante considerar en futuras investigaciones como el ENOS puede influir sobre las condiciones climáticas de la cuenca del río Paute, especialmente como el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) podría generar anomalías en los factores que constituyen las precipitaciones, así como en las condiciones de humedad en la cuenca.

Lista de referencias

- Armenta, Guillermo, Jorge Vila, y Pablo Jácome. 2016. *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)
- Timmermann, Axel, Soon-Il An, Jong-Seong Kug, Fei-Fei Jin, Wenju Cai, Antonietta Capotondi, Kim M. Cobb, Matthieu Lengaigne, Michael J. McPhaden, Malte F. Stuecker, Karl Stein, Andrew T. Wittenberg, Kyung-Sook Yun, Tobias Bayr, Han-Ching Chen, Yoshimitsu Chikamoto, Boris Dewitte, Dietmar Dommenges, Pamela Grothe, Eric Guilyardi, Yoo-Geun Ham, Michiya Hayashi, Sarah Ineson, Daehyun Kang, Sunyong Kim, WonMoo Kim, June-Yi Lee, Tim Li, Jing-Jia Luo, Shayne McGregor, Yann Planon, Scott Power, Harun Rashid, Hong-Li Ren, Agus Santoso, Ken Takahashi, Alexander Todd, Guomin Wang, Guojian Wang, Ruihuang Xie, Woo-Hyun Yang, Sang-Wook Yeh, Jinho Yoon, Elke Zeller, y Xuebin Zhangs. 2018. “El Niño - Southern Oscillation complexity”. *Nature* 559: 535-45.
- Bendix, A., y J. Bendix. 2005. “Heavy rainfall episodes in Ecuador during El Niño events and associated regional atmospheric circulation and SST patterns”. *Advances in Geosciences* 6: 43-9.
- Cáceres, Luis, Raúl Mejía, y Gonzalo Ontaneda. 1998. “Evidencias del cambio climático en Ecuador”. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 547-56.
- Centeno, Alba. 2019. “Deep Learning”. Tesis de maestría, Universidad de Sevilla.
- Chatfield, Chris. 1995. *The analysis of time series: An Introduction*, 5^{ta} ed. Boca Ratón, FL: Chapman & Hall / CRC.
- Chiew, F. H. S., T. C. Piechota, J. A. Dracup, y T. A. McMahon. 1998. “El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting”. *Journal of Hydrology* 204: 138-49.
- Chimborazo, Oscar, y Mathias Vuille. 2021. “Present-day climate and projected future temperature and precipitation changes in Ecuador”. *Theoretical and Applied Climatology* 137: 1581-97.
- Corporación Andina de Fomento. 2000. “Las lecciones de El Niño Ecuador”: *Memorias del Fenómeno El Niño 1997-1998*. Quito: Corporación Andina de Fomento.

- Cowpertwait, Paul, y Andrew Metcalfe. 2009. *Introductory Time Series with R*. New York: Springer
- Dai, Aiguo. 2012. "Increasing drought under global warming in observations and models". *Nature Climate Change* 2: 52-8.
- Darabi, Hamid, , Behzad Ghanbarian, Mohammad Reza Ghahraman, Mohammad Reza Moradi, y Mohammad Reza Nikoo. 2023. "Hydroclimatic trends and drought risk assessment in the Ceyha river basin: Insights from SPI and STI indices". *Hydrology* 10: 1-16.
- Dilley, Maxx, y Barry N. Heyman. 1995. "ENSO and Disaster: Droughts, Floods and El Niño/Southern Oscillation Warm Events". *Disasters* 19 (3): 183-91.
- Edwards, Daniel, y Thomas McKee. 1997. "Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales". Tesis de maestría, Universidad Estatal de Colorado, Fort Collins.
- Elbeltagi, Ahmed, Mohamed A. El-Sayed, Mohamed R. El-Sayed, y Mohamed R. El-Sayed. 2022. "Estimating the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index Using Data-Driven Techniques: A Regional Study of Bangladesh". *Water* 14 (1): 1-16.
- ESRI. 2013. "Cómo funciona la interpolación de distancia inversa ponderada". *ArcGIS Pro*. Accedido el 11 de septiembre de 2024. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>.
- Francou, Bernard, y Luis Pizarro. 1985. "El Niño y la Sequía en los Altos Andes Centrales: (Perú y Bolivia)". *Bulletin de l'Institut Français* 19 (1): 1-18.
- Gerón, Aurélien. 2023. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow*. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media.
- Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, y Aaron Courville. 2016. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gulli, Antonio, Amita Kapoor, & Sujit Pal. 2019. *Deep Learning with TensorFlow 2 and Keras*. Birmingham: Packt.
- INAMHI, IRD. 2000. *Modelación Hidrológica en la Cuenca del Río Paute*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- IPCC. 2021. "Resumen para Responsables de Políticas". En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1-42. Sexto Informe

- de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suiza: Cambridge University Press.
- Iyer, Vishwanathan, y Kaushik Chowdhury. 2009. "Spectral Analysis: Time Series Analysis in Frequency Domain". *IUP Journal of Applied Economics* 8 (2): 45-60.
- Kane, R. P. 1997. "Prediction of Droughts in North-East Brazil: Role of ENSO and Use of Periodicities". *International Journal of Climatology* 17 (6): 655-65
- Kelleher, John D. 2019. *Deep Learning*. Cambridge: The MIT Press Essential Knowledge Series.
- Kiefer, J., y C. Karamperidou. 2018. "High-Resolution Modeling of ENSO-Induced Precipitation in the Tropical Andes: Implications for Proxy Interpretation". *Advancing Earth and Space Science* 3 (2): 217-36.
- Kingste, C., Mo, Schemm Jae-Kyung E., y Yoo Soo-Hyun. 2008. "Influence of ENSO and the Atlantic Multidecadal Oscillation on Drought over United States". *Journal of Climate* 21 (23): 5962-82.
- Kogan, Felix. 1997. "Global Drought Watch from Space". *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (4): 621-36.
- Landa, Rosalva, Víctor Magaña, y Carolina Neri. 2008. *Agua y clima: Elementos para la adaptación al cambio climático*. México: SEMARNAT.
- León, Elvia, Vicente Vásquez, y María Valderrama. 2021. "Cambio en Patrones de Precipitación y Temperatura en el Ecuador: Regiones Sierra y Oriente". *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores* 8 (3): 45-60.
- Lv, Aifeng, Lei Fan, y Wenxiang Zhang. 2022. "Impact of ENSO Events on Droughts in China". *Atmosphere* 13 (1): 1-16.
- MAATE. 2021. *Plan Nacional de Sequía: Juntos Constituyendo la Resiliencia*. Quito: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.
- Materna, Jenny, Mónica Bello, y Michelle Manley. 2004. "Antecedentes históricos y descripción del Fenómeno El Niño, Oscilación del Sur". *Revista de Climatología* 12 (1): 45-60.
- McKee, Thomas, Nolan Doesken, y John Kleist. 1993. "The Relationship of the Drought Frequency and Duration to Time Scales". *Eighth Conference on Applied Climatology*, 179-84.
- Mera, Michael, y Sergio Flores. 2011. *Resultado de las acciones ejecutadas durante la crisis energética del 2009*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.

- Mo, Kingtse, y Jae Schemm. 2008. "Relationships between ENSO and Drought over the Southeastern United States". *Geophysical Research Letters* 35 (4): 1-5.
- Molina, Mario, José Sarukhán, y Julia Carabias. 2017. *El Cambio Climático*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Montenegro García, Alvaro. 2011. *Análisis de Series de Tiempo*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Montesdeoca, Besay. 2016. *Estudio de predicción en series temporales de datos meteorológicos utilizando redes neuronales recurrentes*. La Palma: Universidad de La Laguna
- Mora, D., y P. Willems. 2011. "Decadal Oscillations in Rainfall and Air Temperature in the Paute River Basin - Southern Andes of Ecuador". *Springer* 45 (3): 123-35.
- Mora, D. E., L. Campozano, F. Cisneros, G. Wyseure, y P. Willems. 2014. "Climate Changes of Hydrometeorological and Hydrological Extremes in the Paute Basin, Ecuadorean Andes". *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (3): 631-48.
- Mora, Diego. 2013. *Impacts of Climate Change on Catchment Runoff for the Paute River in the Southern Ecuadorian Andes*. KU Leuven, Science, Engineering & Technology.
- Nalbantis, I., y G. Tsakiris. 2008. "Assessment of Hydrological Drought Revisited". *Water Resource Management* 22 (6): 881-97.
- NOAA. 2024. "ENSO Indices". *National Weather Service*. Accedido el 30 de septiembre. <https://www.weather.gov/fwd/indices#>.
- Nouvelot, J., y P. Pourrut. 1984. "El Niño Phénomène Océanique et Atmosphérique: Importance en 1982-1983 et Impact sur le Littoral Équatorien". *ORSTOM* 45 (3): 39-65.
- Novales, Alfonso. 2016. *Modelos Vectoriales Autoregresivos (VAR)*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Núñez, Santiago, Santiago Mendoza, Hossein Tabari, y Patrick Willems. 2023. "Climate Change on Hydrometeorological and River Hydrological Extremes in Quito, Ecuador". *Journal of Hydrology* 45 (2): 123-35.
- Oertel, Melanie, Francisco Meza, y Jorge Gironás. 2020. "Observed Trends and Relationships between ENSO and Standardized Hydrometeorological Drought Indices in Central Chile". *Hydrological Processes* 34 (4): 123-35.

- OMM. 2012. "World Meteorological Organization". Accedido el 21 de agosto de 2024. https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf.
- Oñate, Fernando, Veronica Uchuari, y Arianna Oñate. 2020. "Large-Scale Climate Variability Patterns and Drought: A Case Study in South America". *Water Resources Management* 34 (4): 1-19.
- Orozco, Mónica. 2024. "Cortes de luz: Hidroeléctrica Paute-Molino sale de operación". *Primicias*. 21 de abril. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/cortes-luz-hidroelectrica-paute-operacion/>.
- Pacheco, Jheimy, Nathaly Parra, y Alex Avilés. 2017. "Análisis de la Sequía en la Cuenca del Paute Mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)". *Recursos Naturales, Ambiente y Cambio Climático* 45 (2): 41-9.
- Pardavila, Francisco, Luis Jemio, y Jaime Navarro. 2014. "Cambio Climático y Soberanía Energética en el Ecuador". *Revista Latinoamericana de Derecho y Políticas Medioambientales* 12 (2): 123-35.
- Paz, Martin, Guillermo Friedrich, y Christian Galasso. 2020. "Procesamiento de Señal Visualizado sobre un Espectrograma". *Revista Elektron* 45 (2): 123-35.
- Peña, Daniel. 2005. *Análisis de series temporales*. Madrid: Alianza Editorial.
- Philander, S. 1985. "El Niño and La Niña". *Journal of the Atmospheric Sciences* 42 (2): 123-35.
- Pozo, Andrea. 2018. *Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del Río Paute*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Rossel, Frédéric. 1997. *Influencia de El Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador*. Quito: INSEQ.
- Sainz de la Maza, M., y M. del Jesús. 2020. "Análisis de Sequías Históricas a Través de los Impactos Derivados". *Ingeniería del Agua* 45 (2): 141-56.
- Sosa Escudero, Walter. 2024. "Econometría de series temporales: Vectores autorregresivos (VAR)". *Universidad de San Andrés y UNLP*. Accedido el 11 de septiembre. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w23919w/Vectoresautorregresivos\(VAR\).pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w23919w/Vectoresautorregresivos(VAR).pdf).
- Steele, John, Steve Thorpe, y Karl Turekian. 2009. *Elements of Physical Oceanography*. London: Elsevier.

- Subramanian, Vishnu. 2018. *Deep Learning with PyTorch: A Practical Approach to Building Neural Network*. Mumbai: PACKT.
- Tapley, Thomas, y Peter Waylen. 1990. "Spatial Variability of Annual Precipitation and ENSO Events in Western Perú". *Hydrological Sciences* 45 (2): 429-46.
- Trenberth, Kevin E., Aiguo Dai, Gerard van der Schrier, Philip D. Jones, Jonathan Barichivich, Keith R. Briffa, y Justin Sheffield. 2013. "Global Warming and Changes in Drought". *Nature Climate Change* 4 (1): 17-22.
- Urrutía, Rocío, y Mathias Vuille. 2008. "Climate Change Projections for Tropical Andes Using a Regional Climate Model: Temperature and Precipitation Simulations for the End of the 21st Century". *Journal of Geophysical Research* 45 (2): 123-35.
- Vicente Serrano, Sergio, Santiago Beguería, Juan López Moreno, Luis Gimeno, Raquel Nieto, Enrique Morán-Tejeda, Jorge Lorenzo-Lacruz, y César Azorín-Molina. 2009. "A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index". *Journal of Climate* 22 (7): 1696-718.
- Vicente Serrano, Sergio, Santiago Beguería, Juan López Moreno, Luis Gimeno, Raquel Nieto, Enrique Morán-Tejeda, Jorge Lorenzo-Lacruz, y César Azorín-Molina. 2011. "A Multiscalar Global Evaluation of the Impact of ENSO on Droughts". *Journal of Geophysical Research* 116 (D20109): 1-15.
- Vicente Serrano, Sergio, Santiago Beguería, Juan López Moreno, Enrique Aguilar, Raquel Martínez, N. Martín-Hernández, C. Azorin-Molina, A. Sanchez-Lorenzo, A. El Kenawy, M. Tomás-Burguera, E. Moran-Tejeda, J. Revuelto, J. J. Nieto, A. Drumond, L. Gimeno, y R. Nieto. 2016. "The Complex Influence of ENSO on Droughts in Ecuador". *Climate Dynamics* 45 (2): 1-23.
- Vicente-Serrano, Sergio M., Dhais Peña-Angulo, Santiago Beguería, Fernando Domínguez-Castro, Miquel Tomás-Burguera, Iván Noguera, Luis Gimeno-Sotelo, y Ahmed El Kenawy. 2022. "Global Drought Trends and Future Projections". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 380 (2238): 20210285, 1-23.
- Londoño, Wbaldo. 2005. *Modelos de Ecuaciones Múltiples, Modelos VAR y Cointegración*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Xu, Lei, Nengcheng Chen, y Xiang Zhuang. 2018. "Global Drought Trends under 1.5°C and 2°C Warming". *International Journal of Climatology* 38 (6): 2375-85.

- Youlton, Cristian, Taís Shiratsubaki, Paulo Sanches, y Edson Wendland. 2012. “Influencia del fenómeno El Niño-La Niña y cambio climático en el patrón de lluvias en Sao Carlos-SP, Brasil”. *Estudios geográficos*, 325-31.
- Zhiña, Darío, Jheimy Pacheco, y Alex Avilés. 2016. “Modelos Estocásticos para el Pronóstico de Sequías en la Microcuenca del Río Chulco en Ecuador”. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas* 45 (2): 123-35.
- Zhiña, Darío, Jheimy Pacheco, Alex Avilés, Juan Pérez, María González, y Luis Martínez. 2019. “Climate Change Influences of Temporal and Spatial Drought Variation in the Andean High Mountain Basin”. *Atmosphere* 45 (2): 123-35.