

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD Y TENDENCIA CLIMÁTICA DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL RÍO ALTO PARAGUAY

ANALYSIS OF CLIMATIC VARIABILITY AND TREND OF THE HYDROMETEOROLOGICAL STATIONS OF THE ALTO PARAGUAY RIVER

Mauricio F. Villazón, Lucía Franco

Laboratorio de Hidráulica

Universidad Mayor de San Simón

mauricio.villazon@fcyt.umss.edu.bo

(Recibido el 21 de marzo 2024, aceptado para publicación el 8 de mayo 2024)

RESUMEN

La cuenca del Alto Paraguay, tiene ecosistemas de gran importancia debido a su rica biodiversidad y su papel crucial en la regulación de los recursos hídricos en la región. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un creciente interés en comprender los cambios que están afectando a esta zona. Aunque existen investigaciones previas sobre el cambio climático a nivel global, se ha reconocido la necesidad de realizar un análisis detallado de la variabilidad y tendencia climática específicamente en la cuenca del Alto Paraguay. La cuenca abarca una superficie aproximada de 600.000 km² entre Bolivia, Brasil y Paraguay. Este estudio analiza la variabilidad y tendencia climática de las estaciones hidrometeorológicas del Río Alto Paraguay, con el fin de proporcionar información fundamental para la toma de decisiones en la planificación, diseño y operación del Puerto Busch. De esa manera, garantizar su sostenibilidad y resiliencia frente a los desafíos climáticos presentes y futuros, utilizando el método de Perturbación de Cuantiles. Este método requiere dos series temporales: una de las series se toma como serie de referencia o línea base, mientras que la otra se selecciona como una subserie. Las subseries son subperiodos seleccionados de estas series temporales completas y representan los periodos de interés con una longitud 12 años en el presente estudio. Con la aplicación de este método se obtendrá las anomalías climáticas para cada estación analizada. Los resultados sugirieron que existe una fuerte variabilidad temporal, donde se exploró la posible teleconexión con los patrones del Índice de Oscilación del Sur IOS en eventos de lluvia. Se encontraron patrones donde las estaciones están iniciando un ciclo de periodo seco.

Palabras Clave: Variabilidad climática, Índice de Oscilación del Sur, Anomalías, Tendencia climática, Río Alto Paraguay.

ABSTRACT

The Alto Paraguay Basin has ecosystems of great importance due to its rich biodiversity and its crucial role in regulating water resources in the region. However, in recent years, there has been a growing interest in understanding the changes affecting this area. Although there is previous research on climate change at a global level, the need for a detailed analysis of climate variability and trends specifically in the Alto Paraguay Basin has been recognized, which covers an area of approximately 600,000 km² across Bolivia, Brazil, and Paraguay. This study analyzes the variability and climate trend of the hydrometeorological stations of the Alto Paraguay River, aiming to provide essential information for decision-making in the planning, design, and operation of the Puerto Busch, ensuring its sustainability and resilience in the face of current and future climate challenges, using the Quantile Perturbation method. This method requires two time series: one series is taken as a reference or baseline series, while the other is selected as a subseries. The subseries are subperiods selected from these complete time series and represent the periods of interest, with a length of 12 years in this study. The application of this method will provide the climatic anomalies for each station analyzed. The results suggested a strong temporal variability, where the possible teleconnection with the Southern Oscillation Index (SOI) patterns in rainfall events was explored. Patterns were found where the stations are entering a dry period cycle.

Keywords: Climate variability, Southern Oscillation Index, Anomalies, Climate trend, Upper Paraguay River.

1. INTRODUCCIÓN

En medio de un escenario global que muestra señales ineludibles de transformación climática, el cambio climático se destaca como uno de los desafíos más críticos y urgentes de este tiempo. La elevación constante de las temperaturas, los patrones de precipitación impredecibles y la creciente frecuencia de eventos climáticos extremos son signos inequívocos de una realidad climática en rápida evolución. A medida que la comunidad científica y las sociedades de todo el mundo se esfuerzan por comprender y abordar esta compleja problemática, la investigación sobre la variabilidad climática y las tendencias en contextos regionales adquiere un papel de vital importancia [4].

Los cambios en los ciclos y tendencias se han convertido en una preocupación global debido a sus posibles efectos en los ecosistemas y en las actividades humanas. En el caso de la cuenca del Alto Paraguay, se han observado cambios en

los patrones de precipitación, aumento de la temperatura y variaciones en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones.

La construcción del Puerto Busch, un proyecto futuro que se plantea como el puerto más grande de Bolivia con salida al Atlántico, es de vital importancia para el desarrollo económico y comercial del país. Sin embargo, es fundamental abordar los desafíos relacionados con la variabilidad climática y los eventos extremos, como las sequías e inundaciones, que podrían afectar la viabilidad y operación del puerto.

Por tanto, resulta imprescindible llevar a cabo un estudio detallado sobre la variabilidad climática en la región del futuro Puerto Busch. Este análisis permitirá comprender mejor los patrones climáticos históricos y evaluar las tendencias climáticas a largo plazo. Además, proporcionará información esencial para identificar los ciclos y las tendencias del recurso hídrico que afecta en la navegación y las operaciones portuarias.

El objetivo de este estudio es analizar la variabilidad y tendencia climática de las estaciones hidrometeorológicas del Río Alto Paraguay, con el fin de proporcionar información para la toma de decisiones en la planificación y operación del Puerto Busch, y garantizar su sostenibilidad y resiliencia frente a los desafíos climáticos presentes y futuros, utilizando el método de Perturbación de Cuantiles.

2. METODOLOGÍA

Los datos hidrométricos utilizados son niveles de agua medidos a nivel diario y agregados a nivel mensual. En cuanto a los datos meteorológicos son datos de precipitación diaria, medidos y registrados en las distintas estaciones meteorológicas. Estos datos fueron descargados de las plataformas SENAMHI y ANA. En la Tabla 1 se puede ver las estaciones recopiladas.

Como instrumento de recopilación de datos se utilizó fichas de registro diario y mensual de los datos hidrometeorológicos. Para organizar y sistematizar los datos se utilizaron planillas electrónicas con aplicación de macros, con las cuales se realizaron cálculos estadísticos y gráficos. Tanto los datos hidrométricos como meteorológicos se codificaron y tabularon en orden cronológico, después se realizó el análisis según las variables de estudio y los objetivos.

En base a las series de tiempo originales, obtenidas a través de la recopilación de datos, se procede a hacer el relleno de las mismas considerando estaciones tanto del lado boliviano como del lado brasilero, antecedendo a esto, se hizo el relleno de las series de tiempo de las estaciones brasileras entre sí mismas. De esta forma se obtienen las series temporales de forma completa y confiable de las estaciones hidrometeorológicas bolivianas, estas pueden verse en la Figura 1 y la Tabla 2.

Después de haber elaborado las series temporales completas de datos mensuales de precipitación y datos hidrométricos, se procederá a aplicar el método de perturbación de cuantiles para la obtención de gráficas de la anomalía climática.

Este método propuesto investiga los cambios históricos en los extremos clasificados, combinando aspectos de frecuencia utilizados en análisis de valores extremos, se analizan las oscilaciones y la variabilidad propia del sistema. La metodología y la teoría de este método están descritas a mayor profundidad en [6].

Estimación de los factores de perturbación:

- Definición de series, generar subseries con una longitud de L años de la serie de referencia.
- Clasificación de valores, extraer valores independientes de cada subserie y de la serie de referencia; en este estudio se consideran valores medios mensuales; estos valores se clasifican de mayor a menor valor, donde i es el orden de clasificación.
- Calcular los períodos de retorno empíricos para cada valor clasificado como la relación entre la longitud de la subserie y el rango del valor extremo. Los pasos 1 a 3 se repiten para cada posible subserie. N es el número total de años de datos.
- Definición de cuantiles, los valores anuales que corresponden a un periodo de retorno determinado de la línea base o del periodo de bloque se denotan como cuantiles.
- Para cada cuantil, la relación factor de perturbación (FP) se calcula como el valor respectivo en la subserie en relación con el de la serie de referencia con el mismo periodo de retorno.
- Finalmente, a partir del FP de todos los valores considerados (años en este estudio), se calcula un valor promedio para todos los cuantiles. Este FP promedio es una anomalía climática.
- Estas anomalías se compararán con la función senoidal encontrada en [1]. Estos datos se utilizaron para delimitar los eventos fuertes de El Niño y La Niña.

TABLA 1 – ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS RECOPIADA INICIALMENTE

N	PAIS	CODIGO	ESTACION	Longitud	Latitud	Tipo
1	BO	7145	Candelaria Sc	-58,9833	-18,6333	Meteorologica
2	BO	7022	Puerto Suarez Aeropuerto	-57,8192	-18,9789	Meteorologica
3	BO	7025	Quimome	-61,1667	-16,6833	Meteorologica
4	BO	7026	Robore	-59,7633	-18,3297	Meteorologica
5	BO	7068	San Francisco Sc	-61,4167	-15,3333	Meteorologica
6	BO	7028	San Ignacio de Velasco	-60,9619	-16,3817	Meteorologica
7	BO	7042	San Jose de Chiquitos Aerop	-60,7442	-17,8322	Meteorologica
8	BO	7041	San Matias Aeropuerto	-58,3992	-16,3317	Meteorologica
9	BO	7136	San Miguel	-60,9500	-15,9833	Meteorologica
10	BO	7173	Santiago de Chiquitos	-60,3333	-18,5000	Meteorologica
11	BR	1956004	CAMPO ALTO	-56,0890	-19,0030	Meteorologica
12	BR	1857000	CORUMBA	-56,3280	-17,9960	Meteorologica
13	BR	1560000	FAZENDA AREIAO	-60,0320	-15,4000	Meteorologica
14	BR	1657004	FLECHAS	-57,2580	-16,0390	Meteorologica
15	BR	2155001	NIOAQUE	-55,8250	-21,1500	Meteorologica
16	BR	1956001	PARAISO	-56,7120	-19,1730	Meteorologica
17	BR	1656002	POCONE	-56,5440	-16,3150	Meteorologica
18	BR	1559000	PONTES E LACERDA	-59,3540	-15,2160	Meteorologica
19	BR	1957006	PORTO ESPERANZA	-57,4370	-19,6010	Meteorologica
20	BR	1556007	SANTA EDWIGES	-56,1340	-15,6990	Meteorologica
21	BR	1755000	SANTO ANTONIO DO PARAISO	-55,2320	-17,4920	Meteorologica
22	BR	1457001	TANGARA DA SERRA	-57,4690	-14,6300	Meteorologica
23	BR	2057000	TARUMA	-57,6480	-20,2910	Meteorologica
N	PAIS	CODIGO	ESTACION	Longitud	Latitud	Tipo
1	BO	NVH	Gonzalo	-57,7814	-17,6700	Hidrometrica
2	BO	NVH	Mandiore	-57,5058	-18,2003	Hidrometrica
3	BO	NVH	La Gaiba	-57,7653	-17,7919	Hidrometrica
4	BO	NVH	Laguna Caceres	-57,7939	-18,9594	Hidrometrica
5	BO	NVH	Base Naval Tamengo	-57,7192	-18,9789	Hidrometrica
6	BO	NVH	Puerto Busch	-58,0353	-20,0653	Hidrometrica
7	BR	66090000	DESCALZO	-57,7489	-16,7328	Hidrometrica
8	BR	66126000	CERCA DE BELA VISTA DEL NORTE 2	-57,7906	-17,5181	Hidrometrica
9	BR	66130000	CERCA DE BELA VISTA DEL NORTE	-57,7	-17,75	Hidrometrica
10	BR	66132000	REFUGIO DE LAS TRES BOCAS	-57,43333333	-17,86666667	Hidrometrica
11	BR	66710000	POUSADA TAIAMA	-56,7747	-17,3656	Hidrometrica
12	BR	66750000	PORTO DO ALEGRE	-56,965	-17,6233	Hidrometrica
13	BR	66800000	AFILADO	-57,4886	-18,0386	Hidrometrica
14	BR	66805000	CERCA DEL AFILADO	-57,4964	-18,0531	Hidrometrica
15	BR	66820000	CORUMBÁ	-57,6517	-18,9947	Hidrometrica
16	BR	66880000	SAN GONZALO	-55,9706	-18,2597	Hidrometrica
17	BR	66885000	PORTO ROLOM	-56,1728	-18,3042	Hidrometrica
18	BR	66955000	PORTO ESPERANÇA 2	-57,4556	-19,6092	Hidrometrica
19	BR	66960000	PORTO ESPERANÇA 6 (EFNOB)	-57,4503	-19,6081	Hidrometrica
20	BR	66960008	PORTO ESPERANÇA	-57,4372	-19,6006	Hidrometrica
21	BR	66970000	COIMBRA FUERTE	-57,7917	-19,9203	Hidrometrica
22	BR	67005000	BAHÍA NEGRA (ANNP)	-58,1667	-20,2333	Hidrometrica
23	BR	67006000	BAIA NEGRO	-58,1666667	-20,2294444	Hidrometrica
24	BR	67020000	TARUMÁ	-57,6431	-20,29	Hidrometrica
25	BR		LADARIO	-57,6517	-18,9947	Hidrometrica

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2 – ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS RELLENADAS A LAS QUE SE LE APLICÓ EL MÉTODO PERTURBACIÓN DE CUANTILES

Pais	Codigo	Estacion	Latitud	Longitud	Tipo
BO	7022	Puerto Suarez Aeropuerto	-18,97889	-57,81917	Met
BO	7028	San Ignacio De Velasco	-16,38167	-60,96194	Met
BO	7042	San Jose de Chiquitos	-17,83222	-60,74417	Met
BR	1457001	TANGARA DA SERRA	-14,63	-57,469	Met
BR	1656002	POCONE	-16,315	-56,544	Met
BR	1657004	FLECHAS	-16,039	-57,258	Met
BR	1956004	CAMPO ALTO	-19,003	-56,089	Met
BR	1957006	PORTO ESPERANZA	-19,601	-57,437	Met
BR	2155001	NIOAQUE	-21,15	-55,825	Met
BO	NVH	Gonzalo*	-57,7814	-17,67	Hidro
BO	NVH	Mandiore*	-57,5058	-18,2003	Hidro
BO	NVH	Laguna Caceres	-57,7939	-18,9594	Hidro
BO	NVH	Base Naval Tamengo	-57,7192	-18,9789	Hidro
BR	67006000	BAIA NEGRO	-58,1667	-20,2294	Hidro
BR	66750000	PORTO DO ALEGRE	-56,965	-17,6233	Hidro
BR	66800000	AFILADO	-57,4886	-18,0386	Hidro
BR	66960008	PORTO ESPERANÇA	-57,4372	-19,6006	Hidro
BR	66820000	LADARIO	-57,6517	-18,9947	Hidro
BR	66970000	COIMBRA FUERTE	-57,7917	-19,9203	Hidro

* Estación a la que su serie fue modificada

Fuente: Elaboración propia.

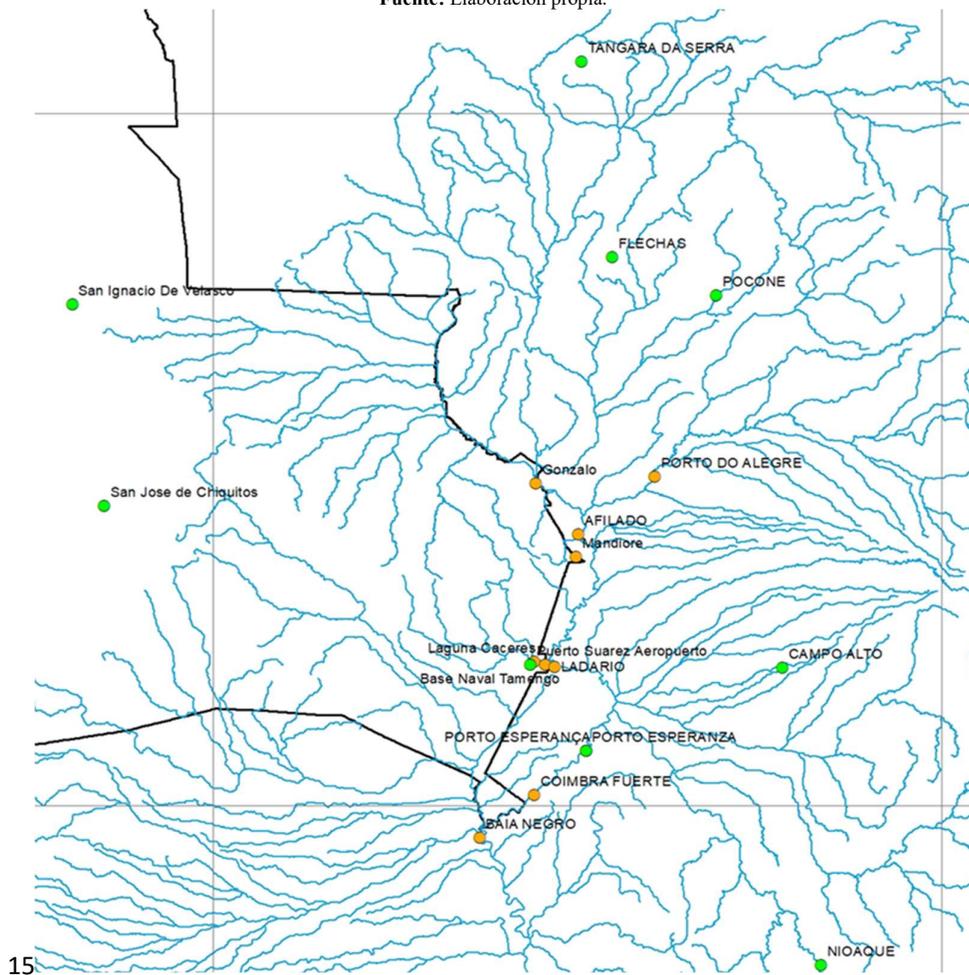
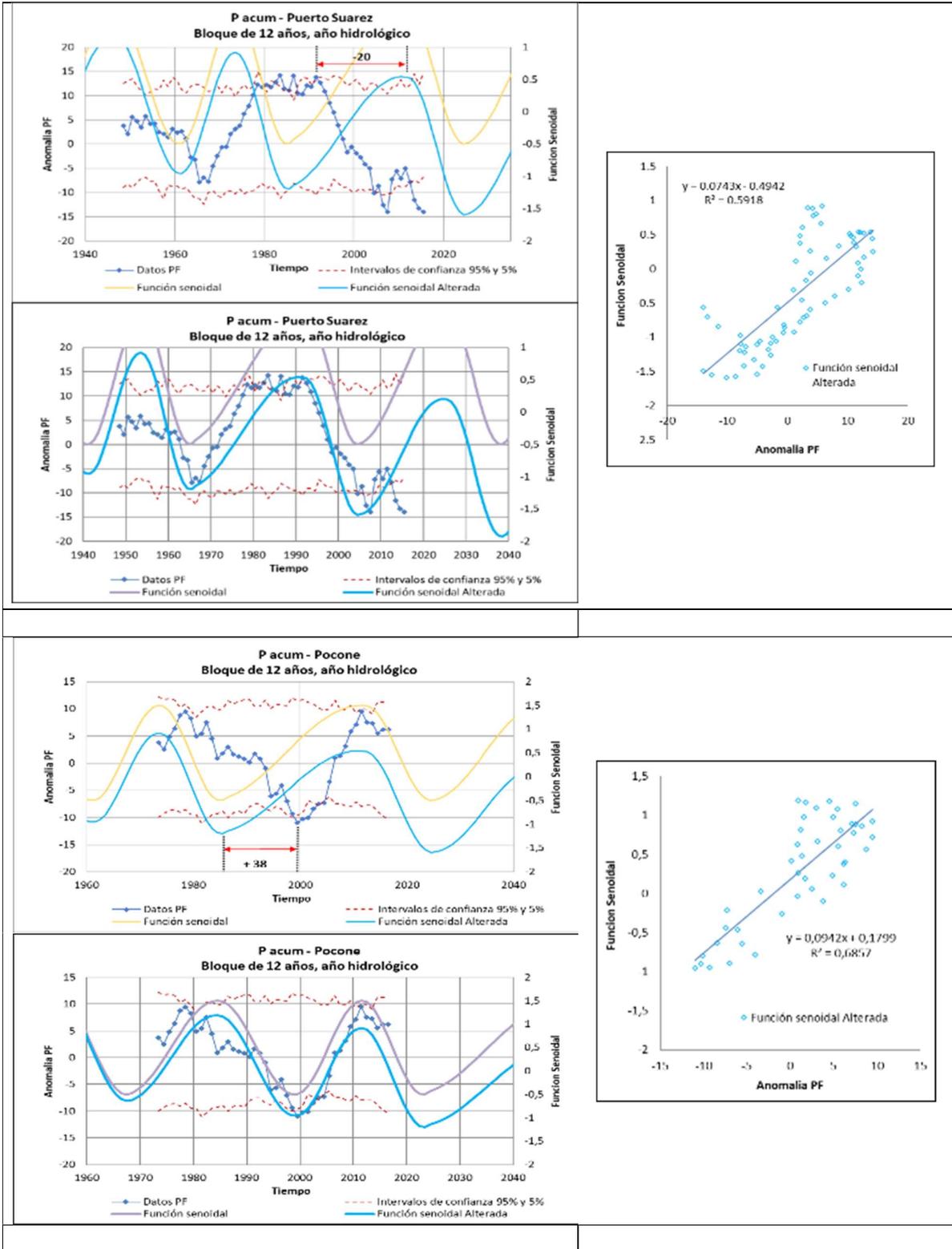


Figura 1: Ubicación de estaciones hidrométricas (naranja) y meteorológicas rellenadas (verdes).

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

Se aplicó el método de perturbación de cuantiles a cada una de las estaciones, en general, hay un comportamiento oscilatorio similar de las precipitaciones y niveles de agua con las anomalías climáticas en ENSO. Esto puede apreciarse en la Figura 2, no obstante, no se encuentran todas las anomalías calculadas, para mayor detalle puede revisarse en [3].



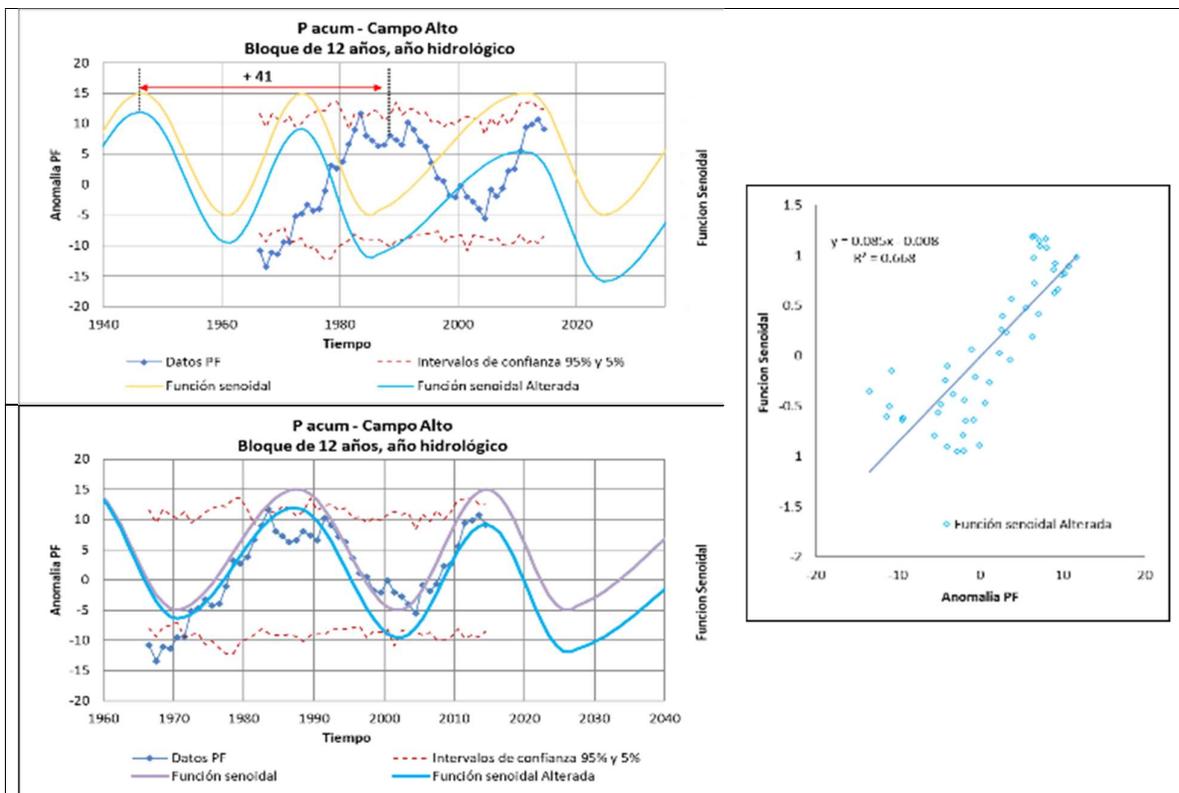
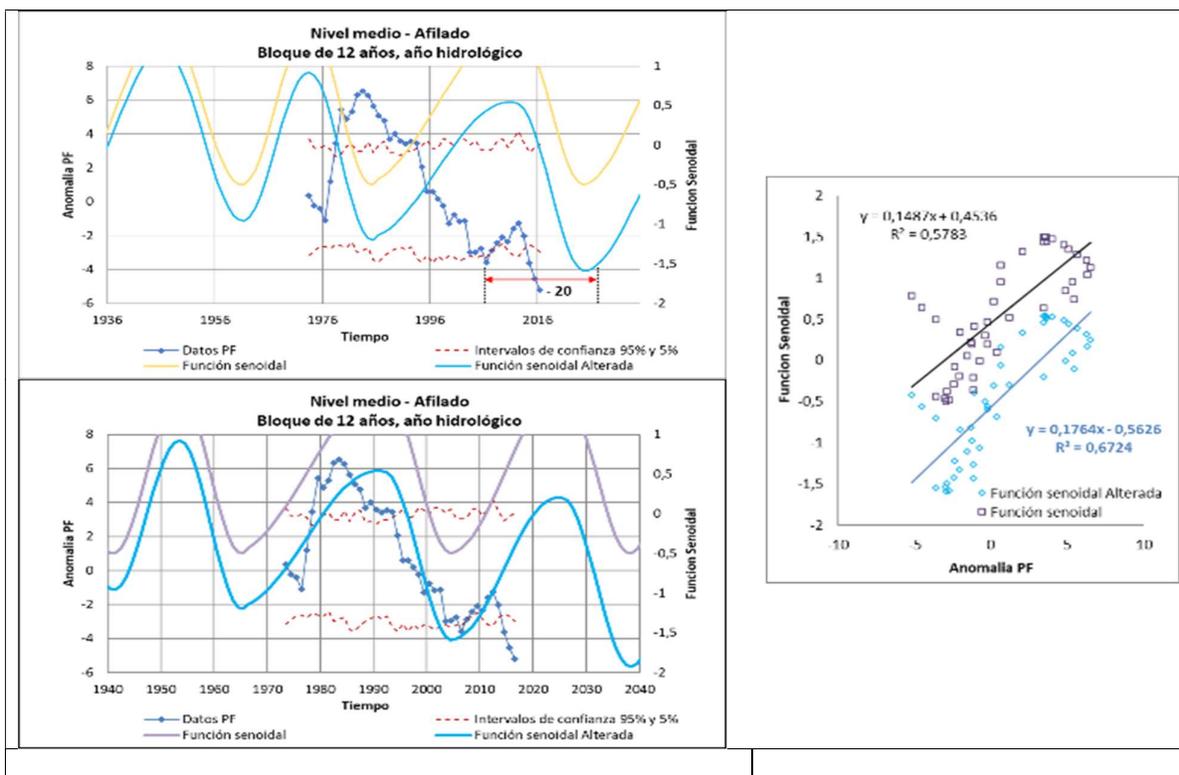


Figura 2: Factores de perturbación en las series de precipitación. Columna izquierda arriba: Anomalia climática basada en datos, y comparación con la función senoidal alterada (IOS) Columna izquierda abajo: Aproximación senoidal desplazada a la anomalía climática basada en los datos de nivel medio. Columna derecha: Dispersión de evaluación de bondad de ajuste de la aproximación senoidal desplazada.

Fuente: Elaboración Propia.



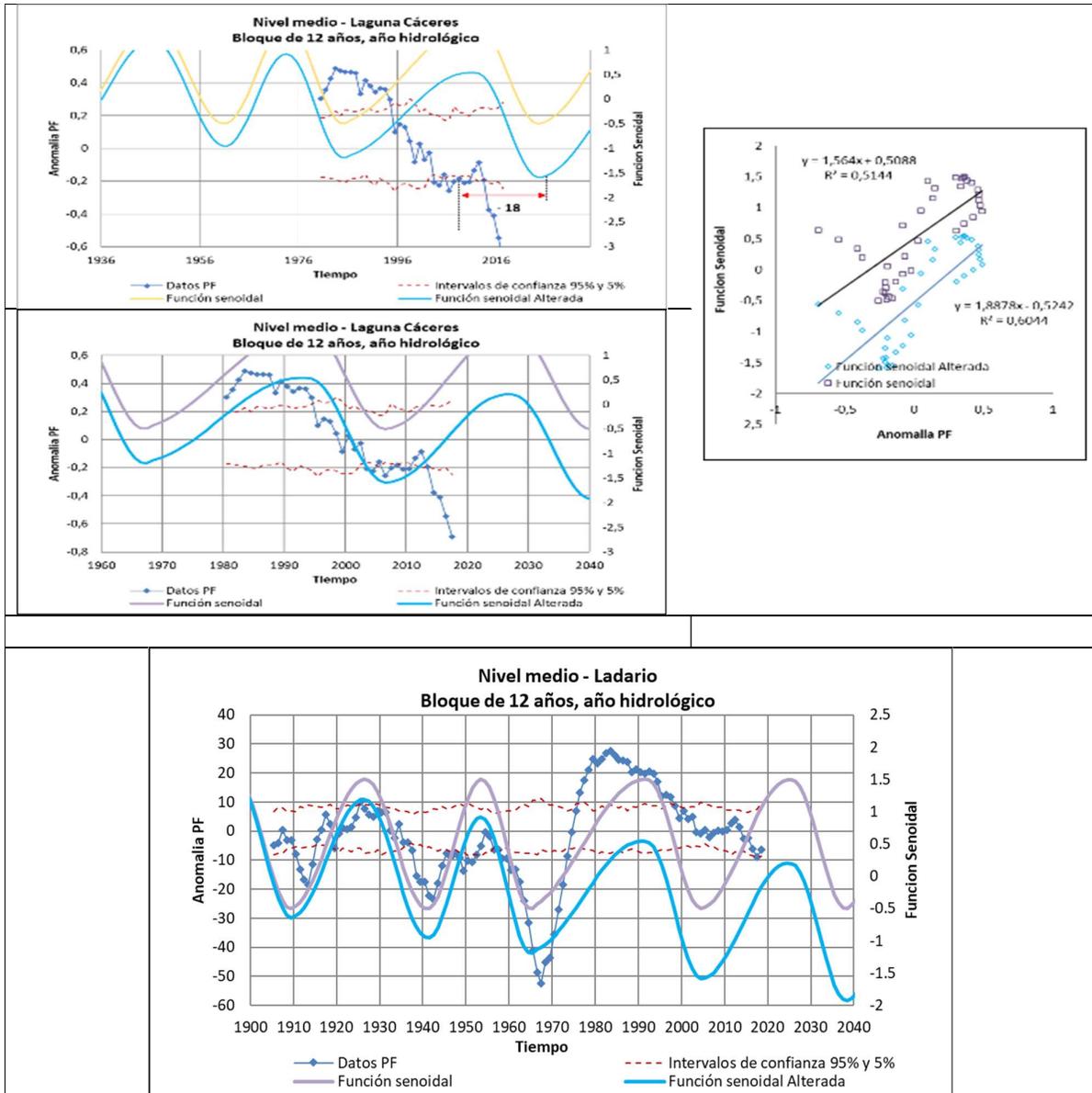


Figura 3: Factores de perturbación en las series de niveles de agua. Columna izquierda arriba: Anomalía climática basada en datos, y comparación con la función senoidal alterada (IOS) Columna izquierda abajo: Aproximación senoidal desplazada a la anomalía climática basada en los datos de nivel medio. Columna derecha: Dispersión de evaluación de bondad de ajuste de la aproximación senoidal desplazada
 Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 3 – CORRELACIONES PRODUCTO DEL AJUSTE DE LAS ANOMALÍAS A LA FUNCIÓN SENOIDAL ALTERADA EN BASE A LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

Código	Estación	Desplazamiento (Años)	Correlación
BO7022	Puerto Suarez Aeropuerto	-20	0,60 Positiva
BO7028	San Ignacio De Velasco	12	0,16 Positiva
BO7042	San Jose de Chiquitos	-24	0,28 Positiva
BR1457001	TANGARA DA SERRA	25	0,38 Positiva
BR1656002	POCONE	38	0,69 Positiva
BR1657004	FLECHAS	10	0,31 Positiva
BR1956004	CAMPO ALTO	41	0,67 Positiva
BR1957006	PORTO ESPERANZA	-24	0,28 Positiva
BR2155001	NIOAQUE	8	0,14 Positiva

Correlación mayor a 0,50 Correlación mayor a 0,35

Código	Estación	Desplazamiento (Años)	Correlación	
NVH	B.N. Tamengo	-17	0,63	Positiva
NVH	Gonzalo	-10	0,72	Positiva
NVH	Laguna Cáceres	-18	0,60	Positiva
NVH	Mandiore	47	0,84	Positiva
66970000	COIMBRA FUERTE	-20	0,62	Positiva
66960008	PORTO ESPERANÇA	-20	0,52	Positiva
66800000	AFILADO	-20	0,67	Positiva
67006000	BAIA NEGRO	-20	0,23	Positiva
66820000	LADARIO	-20	0,28	Positiva
66750000	PORTO DO ALEGRE	-20	0,62	Positiva

Correlación mayor a 0,65
 Correlación mayor a 0,60

Fuente: Elaboración propia.

En las estaciones Puerto Suárez, San Ignacio de Velazco, se ve una clara tendencia a una bajada en la actualidad (estamos en el ciclo de sequía), lo que conduce a condiciones secas en el ciclo entrante. Mientras tanto en las estaciones del lado brasilero como Campo Alto, Pocone y Porto Esperanza vemos que están en el ciclo alto o húmedo de la oscilación natural.

En cuanto a los datos de nivel de agua Figura 3, puede verse que los efectos del ENSO están altamente correlacionados temporal y espacialmente. Está claro que en este tiempo los niveles de las estaciones Base Naval Tamengo, Laguna Cáceres, Coimbra Fuerte, Porto Esperanza, Afilado, Porto do Alegre y Corumba (que es la estación con mayor data) están en una tendencia de bajada, lo que muestra que estamos entrando a condiciones secas.

Para cada estación se presenta en la Tabla 3, el desplazamiento en años que se hizo para ajustar de mejor manera las anomalías climáticas a la función senoidal producto de la variabilidad del IOS. Se puede ver que los desplazamientos no son iguales, sin embargo, se puede encontrar algunos patrones.

4. CONCLUSIONES

Se analizó la variabilidad y tendencia climática de las estaciones hidrometeorológicas del Río Alto Paraguay utilizando el enfoque de perturbación de cuantiles, para analizar anomalías basadas en datos de precipitación y nivel. Los resultados sugieren que existe una fuerte variabilidad temporal, con los patrones de oscilación IOS en eventos de lluvia. El estudio mostró que las condiciones extremas del IOS influyen en el régimen de precipitaciones del área de estudio. Después de las fases bajas de la oscilación del IOS, parecen ocurrir condiciones secas en la cuenca del Alto Paraguay, reduciendo así los niveles de agua, sin embargo, las fases positivas de la oscilación IOS (eventos Niña), conducen a condiciones más húmedas lo que conlleva al aumento de los niveles de agua.

Con el resultado encontrado se puede concluir que las series de las estaciones de la cuenca Alto Paraguay presentan oscilaciones de periodos más húmedos y periodos más secos, la longitud de estas oscilaciones está entre 15 y 20 años.

Los resultados evidencian que, de las 9 estaciones meteorológicas y 10 estaciones hidrométricas, 5 de las meteorológicas presentan un periodo seco entrante, las estaciones del lado boliviano. De las estaciones hidrométricas vemos que todas están en un ciclo seco, analizando la estación con mayor data que es Ladario se puede ver que a pesar de que estamos en pleno ciclo seco aun no es tan extremo como el periodo de sequía vivido durante los años sesenta. Este análisis sirve como un gran indicador del comportamiento del ciclo u oscilación entrante.

El conocimiento sobre los cambios de fase entre la precipitación y las anomalías IOS se puede utilizar para una mejor planificación. Está claro que estas anomalías climáticas podrían afectar a las actividades socioeconómicas basadas en el uso del agua, como la navegación fluvial y las actividades portuarias.

El estudio muestra la importancia de tener más precisión y tener registros amplios, homogéneos y consistentes, y la necesidad de extenderse a más estaciones de las 9 estaciones meteorológicas y 10 consideradas en este estudio. Parece pertinente extender las investigaciones sobre la variabilidad y tendencia climática en otras cuencas cercanas a la cuenca del Alto Paraguay y así poder tener más apreciación sobre la variabilidad climática en esta zona.

REFERENCIAS

- [1] A. G. Amaya, M. F. Villazon, and P. Willems, "Assessment of rainfall variability and its relationship to ENSO in a sub-Andean watershed in central Bolivia," *Water*, vol. 10, no. 6, 2018, Art. no. 701. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w10060701>.

- [2] Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, “Adaptación al cambio climático de los puertos marítimos en apoyo de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,” 2020. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/Global-Sustainable-Transport-Conference-2016>.
- [3] F. Lucia Franco, “Análisis de la variabilidad y tendencia climática de las estaciones hidrometeorológicas del Río Alto Paraguay,” 2023.
- [4] IPCC, “Cambio climático 2013: La base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático,” 2013.
- [5] Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, “Segunda Comunicación Nacional del Estado Plurinacional de Bolivia ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático,” 2009. [Online]. Available: www.minagua.gov.bo.
- [6] V. Ntegeka and P. Willems, “Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100-year time series of 10 min rainfall intensities at Uccle, Belgium,” *Water Resources Research*, vol. 44, no. 7, 2008, Art. no. W074471. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2007WR006471>.