



Reconstrucción de series de caudal mensual empleando datos del Índice de Oscilación del Sur (IOS) para la cuenca del río Beni, Bolivia.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

Diego Inturias Guzmán

Dirigido por:

Dr. Mauricio Villazón Gómez

Dr. Ángel Udías Moinelo

Alcalá de Henares, a 06 de junio de 2022

I. ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS | 5 |
| 2.1. Justificación | 5 |
| 2.2. Objetivos..... | 6 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 7 |
| 3.1. Zona de estudio..... | 7 |
| 3.2. Base de datos | 9 |
| 3.4. Modelo de función de transferencia | 12 |
| 3.4.1. Modelo Dinámico Autorregresivo (DARX)..... | 13 |
| 3.4.2. Identificación de estructura del modelo | 14 |
| 3.4.3. Etapas de aplicación de la metodología..... | 16 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 19 |
| 4.1. Estimación de caudales en la estación Rurrenabaque a partir de la serie del Índice de Oscilación del Sur (Escenario 1). | 19 |
| 4.2. Estimación de caudales en la estación Peñas Amarillas a partir de la serie de caudal de la estación Rurrenabaque (Escenario 2). | 27 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 31 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 33 |

II. ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Subcuenca del Río Beni con salida en la estación hidrológica Rurrenabaque (Elaborado a partir de datos SRTM, www.usgs.gov)..... | 8 |
| Figura 2. Registros mensuales del IOS junto a los eventos históricos La Niña y El Niño (obtenido de BOM, www.bom.gov.au). | 10 |
| Figura 3. Caudal de la cuenca del río Beni en la estación Rurrenabaque; (A) serie de caudal para el periodo 1967 – 2016; (B) serie de caudal desestacionalizada, 1967 – 2016, las flechas rojas indican eventos El Niño y las flechas azules indican eventos La Niña; (C) serie IOS con umbrales de eventos La Niña y El Niño. (Elaborado a partir de datos del repositorio Hybam y BOM). | 11 |
| Figura 4. Serie de caudal mensual observado para las estaciones de Peñas Amarillas y Rurrenabaque (elaborado a partir de datos del SENAMHI Bolivia, www.senamhi.gob.bo). | 12 |
| Figura 5. Flujo de trabajo aplicado en el análisis del escenario 1. | 17 |
| Figura 6. Flujo de trabajo aplicado en el análisis del escenario 2. | 18 |
| Figura 7. Coeficiente de correlación cruzada entre las series IOS y caudal de la estación Rurrenabaque (obtenido de la aplicación de la librería forecast/RStudio). | 19 |
| Figura 8. Serie de tiempo IOS perturbada con la serie de caudales medios mensuales multianuales. | 20 |
| Figura 9. Coeficiente de correlación cruzada entre la serie de tiempo IOSp perturbada y la serie de caudal de la estación Rurrenabaque. | 20 |
| Figura 10. Mejor ajuste del modelo simulado, periodo: 09/1976 – 09/2016. | 22 |
| Figura 11. Validación del modelo, periodo: 09/1967 – 08/1976. | 23 |
| Figura 12. Eficiencias R2 del modelo simulado en relación a los datos observados: a) Calibración; y b) Validación..... | 23 |
| Figura 13. Estimación de serie de caudal mensual para el periodo 09/1944 – 08/1967 en la estación de Rurrenabaque, con base en los resultados de mejor ajuste del modelo dinámico autorregresivo..... | 24 |
| Figura 14. Categorización de caudales máximos observados, simulados y ajustados (aplicación de un factor de perturbación); (A) enero; (B) febrero; (C) marzo; (D) abril; (E) Mayo; (F) caudal máximo por año hidrológico..... | 25 |
| Figura 15. Determinación de eficiencias R2 en los escenarios analizados; (A) situación inicial resultado de la calibración del modelo; (B) Perturbación 1; (C) Perturbación 2; (D) Perturbación 3. | 26 |
| Figura 16. Series de caudal simulada y ajustada aplicando el criterio de mayoración por cuartiles. | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 17. Serie de caudal mensual reconstruida para el periodo 04/1876 – 08/1967..... | 27 |
| Figura 18. Estimación de serie de caudal mensual para el periodo 09/1944 – 08/1967 con base en los resultados de mejor ajuste del modelo..... | 28 |
| Figura 19. Implementación del modelo de función de transferencia, periodo de calibración 09/2008 – 09/2016..... | 29 |
| Figura 20. Validación del modelo de función de transferencia, periodo 09/2003 – 08/2008. | 30 |
| Figura 21. Eficiencias R2 de la implementación del modelo de función de transferencia: a) Periodo de calibración; y b) Periodo de validación..... | 30 |
| Figura 22. Estimación/reconstrucción de caudales para el periodo 09/1967 – 08/2003 a partir de la serie de caudal en la estación Rurrenabaque. | 30 |

III. ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación de desempeño según los indicadores de eficiencia NSE y R2..... | 16 |
| Tabla 2. Indicadores de eficiencia R2 y NSE del modelo de función de transferencia. | 21 |
| Tabla 3. Parámetros obtenidos para la estructura del modelo [1 2 0]. | 22 |
| Tabla 4. Valores de factores de perturbación para mayoración de caudales simulados. . | 26 |
| Tabla 5. Indicadores de eficiencia R2 y NSE para las estructuras de función de transferencia..... | 28 |
| Tabla 6. Parámetros constantes obtenidos para la estructura del modelo [2 1 0]. | 29 |

IV. ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Serie de caudal mensual reconstruida para el periodo 04/1876 – 08/1967, Estación Rurrenabaque.

Anexo 2. Serie de caudal mensual reconstruidos para el periodo 09/1967 – 08/2003, Estación Peñas Amarillas.

V. TABLA DE ABREVIATURAS

BOM. Oficina de Meteorología del Gobierno de Australia

CCF. Coeficiente de Correlación Cruzada

DARX. Dynamic autoregressive exogenous variables

ENOS. El Niño-Oscilación del Sur

FT. Función de Transferencia

IOS. Índice de Oscilación del Sur

IOSp. Índice de Oscilación del Sur Perturbada

NSE. Indicador de Eficiencia de Nash-Sutcliffe

R2. Coeficiente de Determinación

RIV. Refined Instrumental Variable

SA. América del Sur

SENAMHI. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

SO-Hybam. Servicio de Observación de Recursos Hídricos de la Cuenca
Amazónica

TNA. Índice del Atlántico Norte Tropical

TSM. Temperatura de la Superficie del Mar

YIC. Young Identification Criterion

RESUMEN

En el presente estudio se ha analizado la reconstrucción de caudales mensuales, en un periodo previo al monitoreo hidrológico (1967 – 2016), para la cuenca del río Beni, estación Rurrenabaque (pie de monte de Amazonia Boliviana), a partir de datos históricos (1876 – 2016) de la serie mensual del Índice de Oscilación del Sur (IOS) que caracteriza los eventos del fenómeno El Niño y La Niña. En un primer análisis se ha perturbado la serie IOS por el factor correspondiente a la media mensual multianual de la estación Rurrenabaque. A partir de la serie de caudal mensual observado y serie IOS perturbada, se ha implementado un modelo autorregresivo de función de transferencia, en el que se obtuvieron respectivamente eficiencias de Nash and Sutcliffe $NSE = 0.72$ y $NSE = 0.73$, para el proceso de calibración y validación del modelo. Estos caudales simulados fueron afectados por un factor de mayoración de cuartiles, en el que se ha mejorado la estimación de los caudales máximos simulados. A través del modelo ajustado se ha reconstruido la serie de caudal mensual para el periodo 04/1876 – 08/1967. Los resultados de este trabajo muestran la utilidad de la información climática exógena y la aplicación de métodos de función de transferencia, en la generación de información hidrológica dentro de una cuenca hidrográfica con datos limitados.

ABSTRACT

In the present study, the reconstruction of monthly flows has been analyzed, in a period prior to hydrological monitoring (1967 - 2016), for the Beni river basin, Rurrenabaque hydrological gauge (foothills of the Bolivian Amazon), based on historical data (1876 – 2016) of the monthly series from the Southern Oscillation Index (SOI) which characterizes the El Niño and La Niña events. In a first analysis, the IOS series has been perturbed by the factor corresponding to the multiannual monthly average of the Rurrenabaque station. From the observed monthly flow series and disturbed SOI series, an autoregressive transfer function model has been implemented, in which Nash and Sutcliffe efficiencies of $NSE = 0.72$ and $NSE = 0.73$ were obtained, respectively, for the calibration and validation process of the model. These simulated flows were affected by a quartile increase factor, in which the estimation of the maximum simulated flows has been improved. Through the adjusted model, the monthly flow series has been reconstructed for the period 04/1876 – 08/1967. The results of this work show the usefulness of exogenous climatic information and the application of transfer function methods, in the generation of hydrological information within a hydrographic basin with limited data.

1. INTRODUCCIÓN

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) influye en América del Sur (SA) al modificar un conjunto único de procesos meteorológicos vinculados a la convección inducida por el calentamiento costero, la circulación de Walker o las anomalías de la circulación atmosférica relacionadas con el tren de ondas de Rossby. Los impactos de El Niño en SA presentan un patrón con inundaciones a lo largo de la costa oeste de Ecuador y Perú, y Colombia, y sequía en la Amazonía y el noreste del continente (Cai, McPhaden, & Grimm, 2020).

Los registros climáticos y los cálculos del modelo de circulación general sugieren que las variaciones interanuales en el régimen de precipitaciones y, por lo tanto, la descarga del Amazonas pueden estar vinculadas a cambios en la circulación general de la atmósfera sobre el Océano Pacífico tropical asociados con el fenómeno El Niño Oscilación del Sur. Los principales eventos ENOS, por ejemplo, 1925 – 1926 y 1982 – 1983, se reflejan en caudales bajos pronunciados. El efecto contrario, también es evidente, caudales altos asociado con la fase positiva de la Oscilación del Sur. Las aguas inusualmente frías del Pacífico oriental en 1989 también están acompañadas por una alta descarga en el Amazonas (Richey, Nobre, & Deser, 1989).

En la Amazonía, el evento El Niño de 2015-16 generó condiciones de sequía extrema (Jiménez- Muñoz, 2016), y que estas se ven amplificadas por las tendencias subyacentes del cambio climático, generando un mayor riesgo de incendios en el Amazonas (Erfanian, Wang, & Fomenko, 2017). Asimismo, otro año identificado y categorizado como extremadamente seco corresponde al evento El Niño 1983 (Marengo & Hastenrath, 1993).

La reducción de las precipitaciones y los bajos niveles de agua de los ríos en el norte de la Amazonía tienden a coincidir con El Niño fuerte o muy fuerte, como en 1912, 1926, 1983 y 1987 (Marengo J. A., 1992).

Por otro lado, la respuesta de la lluvia a los eventos de El Niño Oscilación del Sur cambia de una región a otra de la cuenca del Amazonas, y no se observa una relación clara en la parte suroeste de la cuenca (Marengo J. A., 2009). En la Amazonía occidental, algunas inundaciones recientes se asociaron con eventos de La Niña (1989, 1999, 2011 y 2012). También se observa mayores precipitaciones

de verano en los llanos del norte de Bolivia durante los episodios de La Niña, período 1960-2009 (Espinoza, 2013). En las cuencas altas del Beni-Mamoré, Bolivia (suroeste de la cuenca Amazonas) se observan señales inversas, con menores precipitaciones durante El Niño en los Andes por encima de los 1500 m y menores precipitaciones durante La Niña en los llanos central y sur (Ronchail & Gallaire, 2006).

El 30% de la variabilidad de la descarga del Río Beni (Amazonía Boliviana) se explica por los eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el 25% por las temperaturas de la superficie del mar en el Atlántico tropical. En el piedemonte andino y en las tierras bajas, el ENOS explica el 45% de las descargas, pero las diferencias en las longitudes de las series también pueden contribuir a este mejor resultado. Por el contrario, la relación con el Atlántico tropical sur es solo una tendencia y no es estadísticamente significativa (Ronchail, et al., 2003).

También, se ha visto una tele-conexión con los ciclos de Niños y Niñas en el régimen hidrológico en Bolivia, donde los valles y parte de las zonas altas se secan y la amazonia se inunda en presencia de un evento Niño fuerte. Los ciclos identificados tienen una duración de 15 años en promedio (Villazon, 2016).

Los modelos de función de transferencia son útiles para evaluación y procesamiento de datos ambientales y científicos. La aplicación del modelo entre las mediciones de la variable de Oxígeno Disuelto y horas de sol medidas sobre el río Cam en Cambridge, mostraron resultados de análisis directo, rápido y objetivo, que revela que la naturaleza potencialmente cambiante de la relación entre las variables se puede representar mediante estos modelos (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007). La aplicación en modelos hidrodinámicos con enfoque en inundaciones, relacionando las variables de resistencia de flujo en el lecho, velocidad, caudal, y niveles de agua, mostraron resultados notables en el uso de modelos de función de transferencia (Gómez, 2012).

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

2.1. Justificación

En el clima de la cuenca amazónica se presenta una variedad de fenómenos hidrometeorológicos e hidroclimáticos extremos que afectan el sistema socioeconómico de la región y, en ocasiones, generan situaciones de desastre. Las sequías y las inundaciones son los fenómenos hidroclimáticos extremos de mayor relevancia. La variabilidad de la precipitación que regula la recurrencia de estos fenómenos presenta una mayor frecuencia de sus valores extremos en el sur de la cuenca (Amazonía boliviana y un sector entre Bolivia y Brasil). El análisis del estado de los sistemas expuestos a los embates de la sequía señaló que la vulnerabilidad es mayor en la parte alta andina (Amazonía boliviana, peruana y ecuatoriana), y respecto a las inundaciones, se encontró que la mayor vulnerabilidad se ubica en un amplio sector del suroriente, en localizaciones a lo largo del río Amazonas y en el piedemonte de los Andes (Río Beni); toda la zona plana contigua al río Amazonas o de sus afluentes presenta vulnerabilidad alta o muy alta (Pabón-Caicedo, et al., 2018).

La serie de la estación de Rurrenabaque, pie de monte de la cuenca del río Beni (Bolivia), aunque muestra una débil relación entre la TSM (Temperatura de la Superficie del Mar) TNA (Índice del Atlántico Norte Tropical) y la descarga del periodo húmedo, se han visto anomalías de descarga positivas cuando la TSM del Pacífico ecuatorial es más baja de lo normal (eventos La Niña). Por lo que, varias inundaciones estuvieron relacionadas con eventos La Niña, por ejemplo, los años 1999 y 2011 fueron eventos extremos La Niña (Molina-Carpio, et al., 2017).

Un análisis entre las series del Índice de Oscilación del Sur (IOS) y de los ríos Trombetas y el Jy-Paraná ubicados en los lados este y oeste de la cuenca amazónica brasileña respectivamente, muestra que las descargas de los ríos amazónicos se correlacionan positivamente con la serie de IOS. Los resultados sugieren que la serie IOS es un predictor potencial, al menos cualitativamente, de las descargas mensuales de los ríos en la América del Sur Tropical, especialmente cuando el valor absoluto de IOS es alto. Dado que la serie IOS existe desde 1880, este puede ser un parámetro valioso en los análisis de regresión estadística para reconstruir la serie temporal de caudales en ríos con series cortas, de los cuales,

casi siempre, los únicos datos con los que cuentan los hidrólogos para planificar, especialmente en la región amazónica (Molion & Moraes, 1987).

En marco de lo descrito, es evidente la necesidad de contar con información de los volúmenes de descarga en las cuencas dentro de Amazonía Boliviana, por un lado es importante para fines de planificación hidrológica, y por otro para mejorar las predicciones de caudal de eventos hidrológicos influenciados por fenómenos hidrometeorológicos e hidro climáticos extremos.

Se espera que los resultados del trabajo den pie a mejorar las predicciones de los caudales, tanto a priori como a posteriori, utilizando datos exógenos como el Índice de Oscilación del Sur, y otras variables que puedan tener un rol relevante de correlación con los fenómenos hidro-climáticos extremos.

2.2. Objetivos

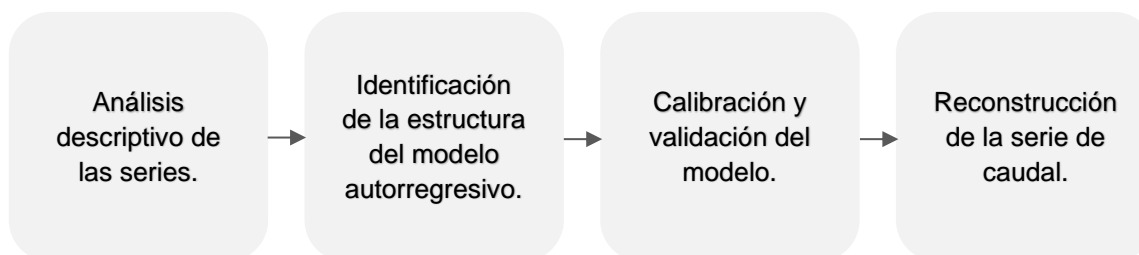
El objetivo de este trabajo es reconstruir la serie de caudal mensual en el periodo 1876-1967 para la estación hidrológica de Rurrenabaque (cuenca del Río Beni, pie de monte de Amazonia Boliviana) empleando datos del Índice de Oscilación de Sur (IOS), mediante la aplicación de un modelo de función de transferencia.

Como objetivos secundarios se plantean:

- i. Realizar un análisis descriptivo a la serie de caudal mensual de la estación Rurrenabaque (periodo con datos disponibles de 09/1967-09/2016), y a la serie del IOS para el periodo 09/1876-09/2016.
- ii. Calibrar y validar el modelo autorregresivo de función de transferencia, entre la serie exógena (IOS) y serie endógena (estación de Rurrenabaque).
- iii. Reconstruir la serie de caudal mensual para la estación de Rurrenabaque, con los parámetros obtenidos del modelo implementado, para el periodo 09/1876-08/1967
- iv. Reconstruir la serie de caudal mensual de la estación Peñas Amarillas, ubicada aguas debajo de la estación Rurrenabaque, a partir de los datos de caudal de la estación Rurrenabaque.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se explica el enfoque de la reconstrucción de caudales mensuales empleado que consiste en la técnica de función de transferencia de un modelo autorregresivo con datos de entrada de una serie exógena. El siguiente esquema muestra las principales etapas del método utilizado.



El modelo de función de transferencia fue aplicado a los siguientes dos escenarios:

- Serie de tiempo de caudal en la estación hidrológica de Rurrenabaque (1967-2016), empleando como serie exógena el Índice de Oscilación del Sur (1876-2016).
- Serie de tiempo de caudal de la estación hidrológica Peñas Amarillas (2003-2016), empleando como serie exógena los caudales de la estación hidrológica de Rurrenabaque (1967-2016).

3.1. Zona de estudio

La cuenca del Río Beni se ubica al este de la Cordillera de los Andes en Bolivia, entre los 14° y 18°S y los 66° y 69° E (Figura 1). Se extiende sobre un rango altitudinal de 200–6450 m.s.n.m. y una superficie de 70.000 km², que representa el 25% de la subcuenca del Beni y el 6,3% del territorio de Bolivia (Rivera, 2019). Su topografía es variada, ya que presenta zonas altas o cordilleranas en sus regiones del oeste y del sur, pasando por zonas de transición o valles interandinos, para posteriormente confluir en el subandino, que es el límite natural con el llano beniano (Molina-Carpio J. , et al., 2019). Según los registros históricos disponibles el caudal medio mensual en la desembocadura, estación Rurrenabaque, es de 2043.19 m³/s, para el periodo hidrológico 1967-2016.

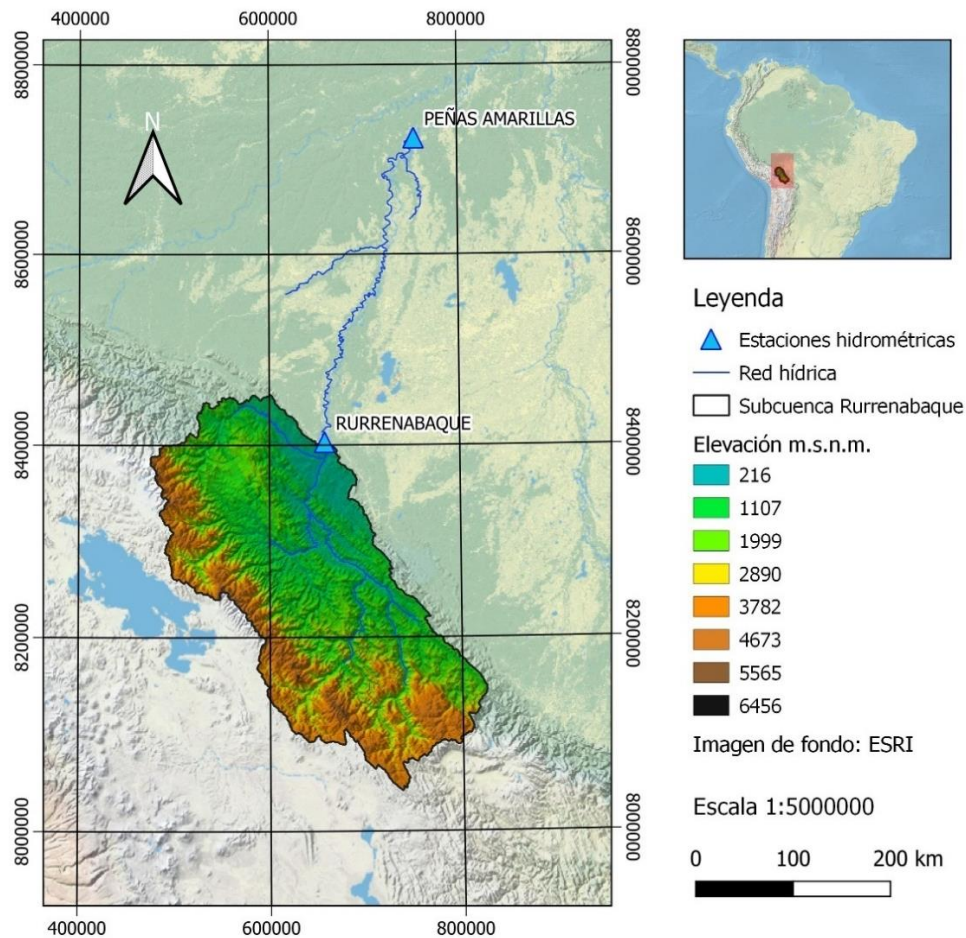


Figura 1. Subcuenca del Río Beni con salida en la estación hidrológica Rurrenabaque (Elaborado a partir de datos SRTM, www.usgs.gov).

La interacción entre la topografía compleja y la circulación atmosférica a gran escala (p. ej., el sistema monzónico sudamericano, la interacción del flujo sudamericano de bajo nivel, las intrusiones de los vientos del sur, etc.) crea una distribución espacial compleja de las precipitaciones (Molina-Carpio J. , et al., 2019). Se ha visto que no existe una relación clara entre la precipitación anual y la altitud, pero se observa una fuerte variabilidad espacial de las precipitaciones, desde menos de 300 mm/año en algunos valles andinos en el lado de sotavento de la cordillera hasta 6000 mm/año en las laderas de la cordillera flanco de los Andes expuesto a vientos alisios húmedos (Yungas) y en posiciones que favorecen un fuerte levantamiento de aire (Espinoza J.C. et al., 2009). En el centro de la región del Beni, los promedios de precipitación anuales se distribuyen entre 1600 y 2000 mm al año, aumentando hacia el borde de los Andes y llegando a más de 5000 mm sobre las cabeceras de los tributarios andinos (Roche, 1990).

En los Andes, las cuencas hidrográficas están fuertemente contrastadas; desde subcuencas semiáridas y altamente erosionables incisas en el Altiplano (subcuenca del río La Paz), hasta subcuencas hiperhúmedas densamente vegetadas en la Cordillera Oriental (valles de las Yungas), o la región pie de monte del Alto-Beni (Guyot, Jouanneau, & Wasson, 1999).

3.2. Base de datos

Los datos mensuales de las dos estaciones hidrológicas fueron proveídos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), y el repositorio del Servicio de Observación de Recursos Hídricos de la Cuenca Amazónica (SO-Hybam). La serie del Índice de Oscilación del Sur fue adquirido del sitio web de la Oficina de Meteorología del Gobierno de Australia (BOM).

Se seleccionaron las estaciones hidrológicas de Rurrenabaque y Peñas Amarillas en base a la importancia de la cuenca, la calidad de datos, y la longitud de registros históricos disponibles. Las dos cuencas están localizadas en la cuenca del Río Beni. Los periodos de datos disponibles fueron 1967-2016 en la estación de Rurrenabaque y 2003-2016 en la estación de Peñas Amarillas.

Respecto a la serie del Índice de Oscilación del Sur (IOS), el periodo de datos disponibles fue 1876-2016 (Figura 2). El IOS da una indicación del desarrollo y la intensidad de los eventos de El Niño o La Niña en el Océano Pacífico, y se calcula utilizando las diferencias de presión entre Tahití y Darwin.

Los valores negativos sostenidos del IOS inferiores a -7 a menudo indican episodios de El Niño. Estos valores negativos suelen ir acompañados de un calentamiento sostenido del Océano Pacífico tropical central y oriental, una disminución de la fuerza de los vientos alisios del Pacífico. Los valores positivos sostenidos del IOS superiores a +7 son típicos de un episodio de La Niña. Están asociados con vientos alisios del Pacífico más fuertes y temperaturas del mar más cálidas en el norte de Australia. Las aguas en el Océano Pacífico tropical central y oriental se vuelven más frías durante este tiempo (Australian Government, 2022).

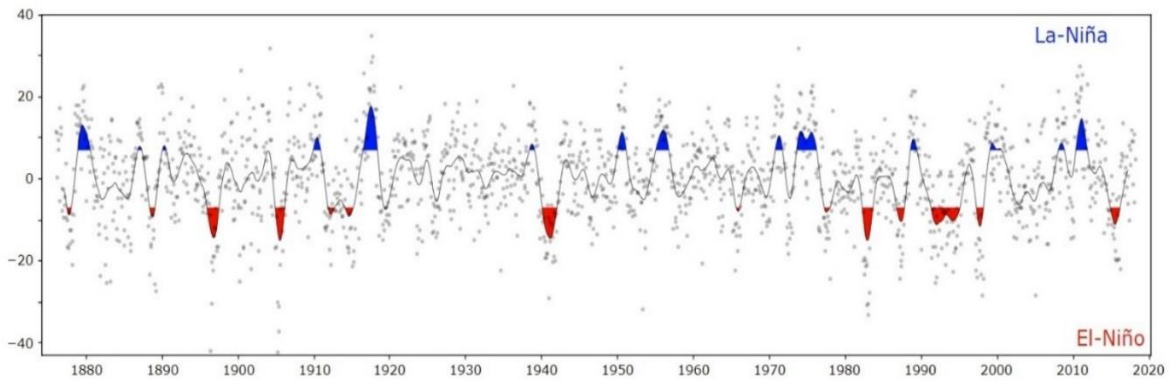


Figura 2. Registros mensuales del IOS junto a los eventos históricos La Niña y El Niño (obtenido de BOM, www.bom.gov.au).

3.3. Análisis descriptivo de los datos

Las características que destacan de la serie de caudal del río Beni, en la estación de Rurrenabaque, son su magnitud y su hidrograma estacionalmente marcado (Figura 3A). Según los registros históricos disponibles el valor medio mensual de caudal para el periodo hidrológico 1967 al 2016 es 2043.19 m³/s, el caudal mínimo mensual varía entre 251.97 y 1006.32 m³/s y el caudal máximo mensual entre 1802.93 y 12197.96 m³/s. Según (Espinoza, et al., 2014) se reportan condiciones húmedas sin precedentes en el verano de 2014 (diciembre-marzo) en el suroeste de la Amazonía, en el que la descarga en el río Reni (estación Rurrenabaque) ha sido un 380% superior a la normal.

Con el objetivo de analizar la variabilidad de la serie de caudal de una forma más clara se ha quitado la estacionalidad de la serie, y sobre la cual se ha marcado con flechas de color azul y rojo, los eventos extraordinarios La Niña y El Niño registrados por el IOS, respectivamente (Figura 3B), donde se observa que la mayoría de los eventos El Niño coincide con periodos de déficit y la mayoría de los eventos La Niña con periodos de exceso. La Figura 3C muestra la serie mensual y la tendencia del IOS para el periodo 1967-2016, y los umbrales que categorización de eventos La Niña y El Niño.

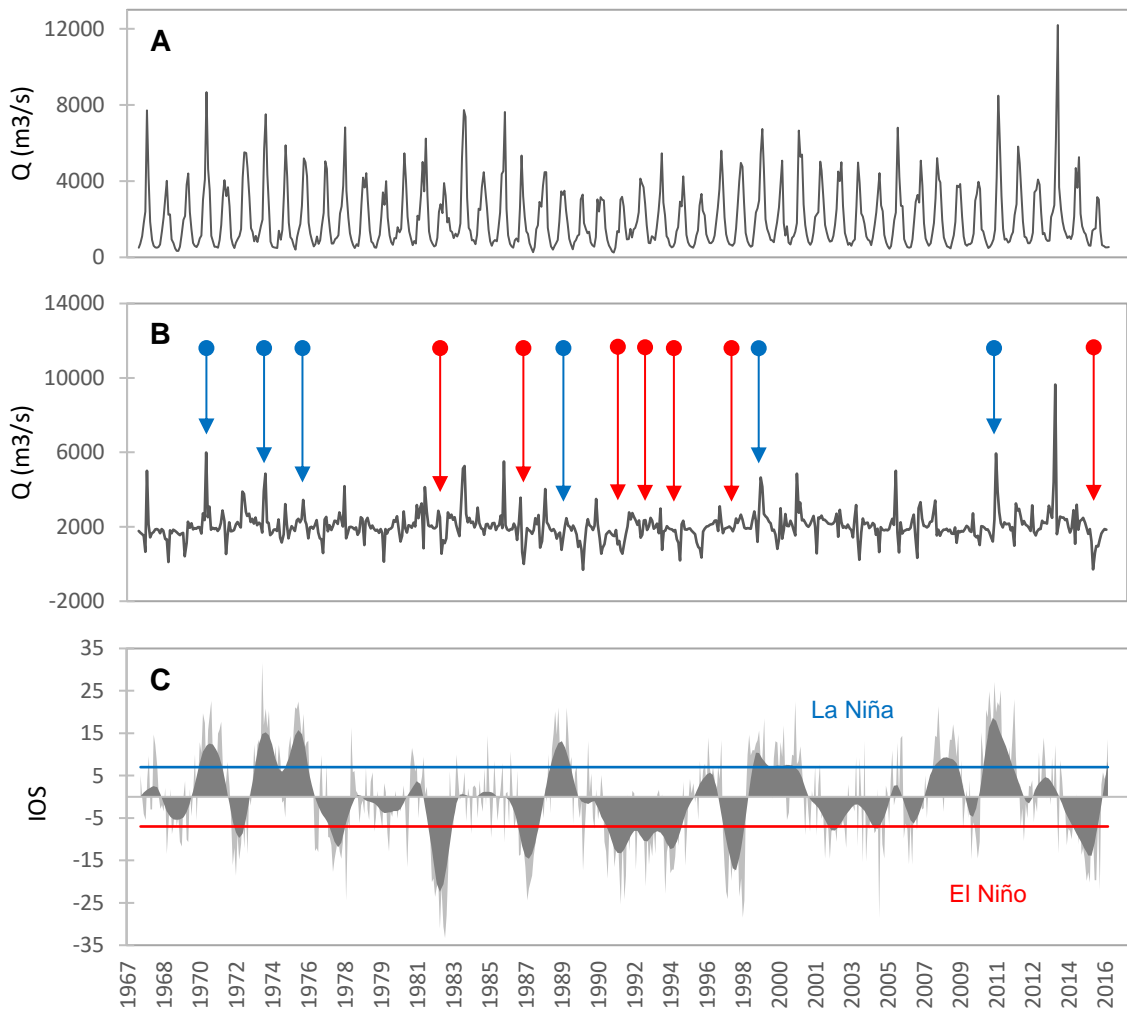


Figura 3. Caudal de la cuenca del río Beni en la estación Rurrenabaque; (A) serie de caudal para el periodo 1967 – 2016; (B) serie de caudal desestacionalizada, 1967 – 2016, las flechas rojas indican eventos El Niño y las flechas azules indican eventos La Niña; (C) serie IOS con umbrales de eventos La Niña y El Niño. (Elaborado a partir de datos del repositorio Hybam y BOM).

Respecto a la estación de Peñas Amarillas, localizada sobre el río Beni a una distancia aproximadamente de 350 km aguas debajo de la estación Rurrenabaque, para el periodo hidrológico 2003 – 2016, tiene valor medio mensual de caudal de 2642.32 m³/s, el caudal mínimo mensual varía entre 454.78 y 1362.79 m³/s y el caudal máximo mensual entre 2655.20 y 10656.61 m³/s.

La Figura 4 muestra las series de caudal mensual histórico registrado en la estación de Peñas Amarillas (09/2003-09/2016, 13 años hidrológicos).

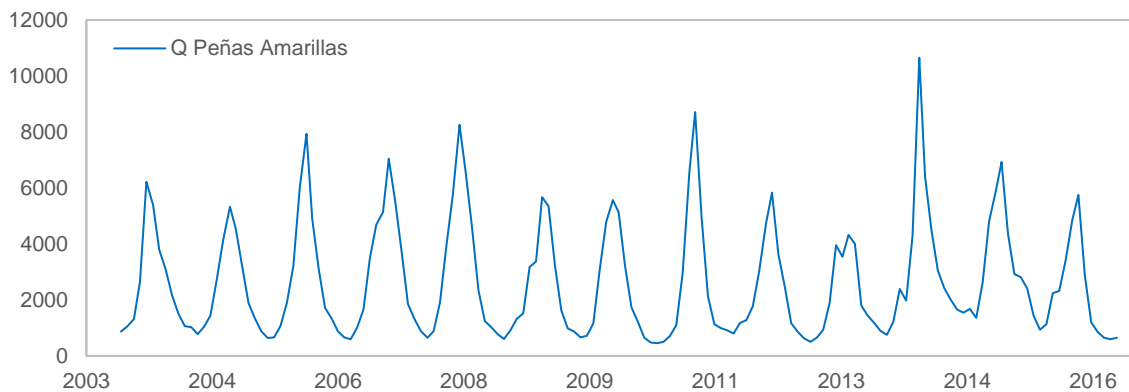


Figura 4. Serie de caudal mensual observado para las estaciones de Peñas Amarillas y Rurrenabaque (elaborado a partir de datos del SENAMHI Bolivia, www.senamhi.gob.bo).

3.4. Modelo de función de transferencia

Un modelo de función de transferencia es aquel que describe una respuesta dinámica, suponiendo que X mide el nivel de una entrada a un sistema dinámico. Supongamos que el nivel de X influye en el nivel de salida de un sistema Y . Por lo general, debido a la inercia del sistema, un cambio en X de un nivel a otro no tendrá un efecto inmediato en la salida, sino que producirá una respuesta retardada con Y eventualmente llegando al equilibrio en un nuevo nivel. Nos referimos a tal cambio como una respuesta dinámica. Supondremos que las observaciones de entrada y salida se realizan a intervalos de tiempo equiespaciados. El modelo de función de transferencia asociado se denominará entonces modelo de función de transferencia discreta (Box, Jenkins, Reinsel, & Ljung, 2016).

El modelo Dinámico Autorregresivo con entradas Exógenas (DARX) es empleado en este estudio a través de la herramienta CAPTAIN Toolbox¹. El método y la herramienta se halla descrito en detalle en (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007).

El pronóstico y retrospectiva son una parte inherente de estos métodos, que emplean algoritmos de interpolación óptima del filtro de Kalman (Harvey, 1989) y suavizado a intervalos fijos (Bryson, 1969), para las muestras faltantes en la serie de tiempo. Si las observaciones que faltan se encuentran inmediatamente después de la última muestra o antes de la primera, se producen pronósticos y retrospectivas óptimos de manera similar.

¹ CAPTAIN TOOLBOX. Herramienta de análisis y pronóstico de series de temporales.

3.4.1. Modelo Dinámico Autorregresivo (DARX)

El modelo DARX (Dynamic autoregressive exogenous variables) es una extensión del modelo DAR (Dynamic Auto-Regression) que incluye como dato de entrada series de tiempo exógena que afecta la variable “dependiente” y_t en una forma dinámica, y los valores pasados de la variable dependiente también son regresores del sistema (Young P. C., 2011). Todos los parámetros que afectan las variables exógenas y los valores pasados de la variable dependiente (variables endógenas) pueden ser parámetros que varían en el tiempo. Para el caso de una variable simple de entrada exógena u_t , el modelo tiene la siguiente forma,

$$y_t = -a_{1t}y_{t-1} - a_{2t}y_{t-2} - \dots - a_{nt}y_{t-n} + b_{0t}u_{t-\delta} + b_{1t}u_{t-\delta-1} + \dots + b_{mt}u_{t-\delta-m} + e_t \quad [1]$$

Donde:

- y_t : Variable dependiente (variable endógena).
- u_t : Dato de entrada exógena.
- a_n : Parámetro que afecta a la variable dependiente con retardo y_{t-n} .
- b_m : Parámetro que afecta a la entrada exógena con retardo $u_{t-\delta-m}$.
- δ : Número de muestras de tiempo de retardo (retardo temporal puro).
- e_t : Ruido de tiempo discreto con media cero.

El modelo [1] se puede escribir en la misma forma de regresión lineal que se consideró anteriormente pero con el vector de regresión ahora denotado por $z(t)$ y un vector de parámetros denotado por (ρ) para enfatizar las diferencias, es decir de siguiente forma,

$$y_t = z^T_t \cdot \rho + e_t \quad [2]$$

Donde, ahora:

$$z^T_t = [-y_{t-1} \quad -y_{t-2} \dots \quad -y_{t-n} \quad u_t \quad u_{t-1} \dots \quad u_{t-m}] \quad [3]$$

$$\rho_t = [a_{1t} \quad a_{2t} \dots \quad a_{nt} \quad b_{0t} \quad b_{1t} \dots \quad b_{mt}] \quad [4]$$

3.4.2. Identificación de estructura del modelo

La estructura del modelo de Función de Transferencia (FT), descrita como $[a_n b_m \delta]$ requiere ser identificada adecuadamente y estar basada en los datos, antes de la aplicación de los modelos autorregresivos. Está fuertemente vinculada con la 'identificabilidad' del modelo; después de todo, todo el objetivo de la identificación de la estructura del modelo es la inferencia basada en datos de un modelo identificable. La estructura del modelo a menudo está lejos de ser fácil de "determinar" (Young P. C., 2011).

Para la identificación de esta estructura se emplea la función RIV (Refined Instrumental Variable) a través de la herramienta Captain Toolbox (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007), que proporcionan diagnósticos estadísticos de estimación de parámetros que caracterizan el modelo de función de transferencia.

Las dos medidas estadísticas utilizadas, para la identificación de la estructura del modelo, son el Coeficiente de Determinación RT_2 , basado en el error de respuesta, que es una medida simple del ajuste del modelo (donde la unidad indica un ajuste perfecto); y el criterio YIC (Young Identification Criterion), que proporciona una medida combinada de ajuste y eficiencia paramétrica, con valores negativos grandes que indican un modelo que explica bien los datos de salida, sin parametrización excesiva.

El primero de ellos está relacionado con el conocido Coeficiente de Determinación, RT_2 , que se deriva del análisis de regresión, donde proporciona una medida de qué tan bien el modelo de regresión explica la variable dependiente (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007).

$$R_T^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}; \quad \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} (e_t - \bar{e}_t)^2; \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} (y_t - \bar{y}_t)^2 \quad [5]$$

En el contexto de identificación de transferencia de función \bar{e}_t es $y_t - \bar{x}_t$ entre la medida y_t y la salida del modelo simulado FT \bar{x}_t . En otras palabras, RT_2 proporciona una medida de cuánto de la varianza σ_y^2 asociada con el resultado del modelo medido y_t se explica por la parte determinista del modelo FT. Esta salida determinista del modelo es muy importante ya que explica que parte de la salida

que se estima es causada por la entrada u_t . Un problema con RT2, si se usa solo, es que puede favorecer modelos sobre parametrizados, que a menudo pueden explicar bien los datos: en otras palabras, necesitamos otra medida que, al mismo tiempo que garantiza una buena explicación de los datos definidos por un alto valor RT2, también evita tal parametrización excesiva y sugiera un modelo identificable que es paramétricamente eficiente (Young P. C., 2011).

El criterio YIC es más complejo y utiliza términos logarítmicos, de modo que los modelos mejorados se indican mediante valores cada vez más negativos.

$$YIC = \log_e \left\{ \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} \right\} + \log_e EVN; \quad [6]$$

$$EVN = \frac{1}{n_\rho} \sum_{i=1}^{i=n_\rho} \frac{\sigma^{-2} \cdot p_{ii}}{\rho_i} \quad [7]$$

El primer término es una medida relativa de qué tan bien el modelo explica los datos. El segundo término se relaciona con el condicionamiento de la matriz de productos cruzados de variables instrumentales y es una medida de la potencial sobreparametrización en el modelo. En particular, $\sigma^{-2} \cdot p_{ii}$ son los errores estándar de las estimaciones de los parámetros, donde los errores estándar más grandes implican valores YIC más pobres. El mayor valor negativo de YIC asegura un mejor ajuste del modelo (Young P. C., 2011).

Respecto a los criterios estadísticos utilizados para evaluar el desempeño de los métodos implementados, se ha empleado el Indicador de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación R2. El indicador NSE es una estadística normalizada para determinar la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos, lo que indica la concordancia entre los datos observados y los simulados (Nash & Sutcliffe, 1970). El Coeficiente de Determinación (R2) describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. Va de 0 a 1, con valores más cercanos a 1 que indican menos varianza de error.

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (xobs(i) - ysim(i))^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (xobs(i) - \overline{xobs})^2 \right]} \quad [8]$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i^n (xobs(i) - \overline{xobs}) \cdot (ysim(i) - \overline{ysim}) \right]^2}{\sum_i^n (xobs(i) - \overline{xobs})^2 \cdot \sum_i^n (ysim(i) - \overline{ysim})^2} \quad [9]$$

Donde:

- $xobs(i)$: Datos observados en el mes (i).
- \overline{xobs} : Media de los datos observados.
- $ysim(i)$: Valor simulado por el modelo en el mes (i).
- \overline{ysim} : Media de los valores simulados.
- n : Número total de observaciones.

La clasificación del desempeño de los indicadores de eficiencia, y para evaluaciones con período de tiempo mensual, se presentan en la Tabla 1 (Moriasi, et al., 2007).

Tabla 1. Clasificación de desempeño según los indicadores de eficiencia NSE y R2.

| Clasificación de desempeño | NSE | R2 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| Muy bueno | 0.75 < NSE ≤ 1.00 | |
| Bueno | 0.65 < NSE ≤ 0.75 | ≥ 0.60 |
| Satisfactorio | 0.50 < NSE ≤ 0.65 | |
| Insatisfactorio | ≤ 0.50 | |

3.4.3. Etapas de aplicación de la metodología

El análisis fue realizado en cuatro partes interrelacionadas: 1) Se ha recopilado y realizado un análisis descriptivo a las series mensuales de caudal y del Índice de Oscilación del Sur; 2) Se ha perturbado la serie del IOS por el factor de la media mensual multianual (aplicado solo a la estación de Rurrenabaque) incluyendo el desfase encontrado en el cálculo del coeficiente de correlación cruzada; 3) Se ha implementado el modelo autorregresivo de función de transferencia, en el que se

ha calibrado y validado el modelo; 4) Se ha ajustado los caudales máximos simulados por un factor de mayoración de cuartiles (aplicado solo a la estación de Rurrenabaque). Finalmente, se ha reconstruido la serie de caudal a partir del modelo ajustado.

La metodología fue aplicada a dos escenarios. En el primer escenario se ha estimado los caudales mensuales para la estación de Rurrenabaque con datos del IOS. En el segundo escenario se ha estimado los caudales mensuales para la estación Peñas Amarillas a partir de los datos de la estación Rurrenabaque, en este último escenario no se incluye en el análisis la variable del IOS. La Figura 5 y Figura 6 muestra esquemáticamente el flujo de trabajo planteado.

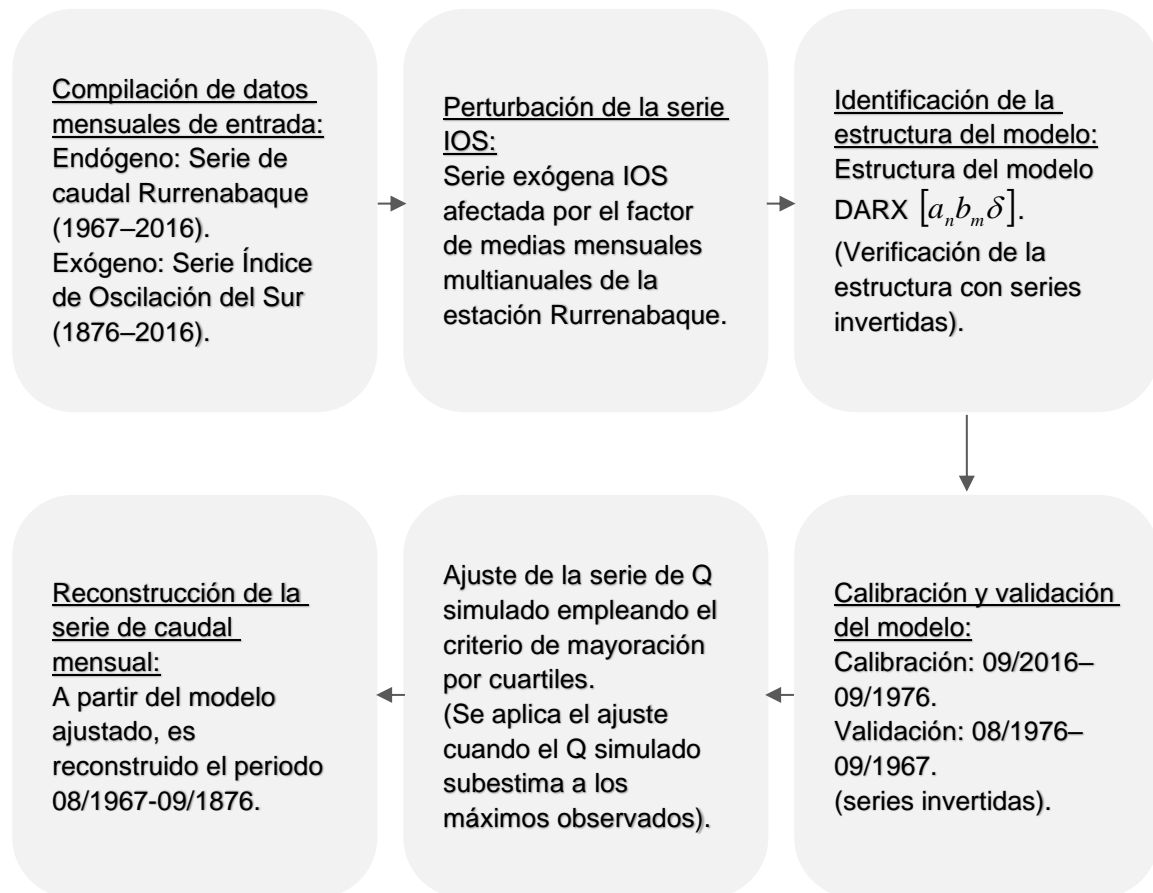


Figura 5. Flujo de trabajo aplicado en el análisis del escenario 1.

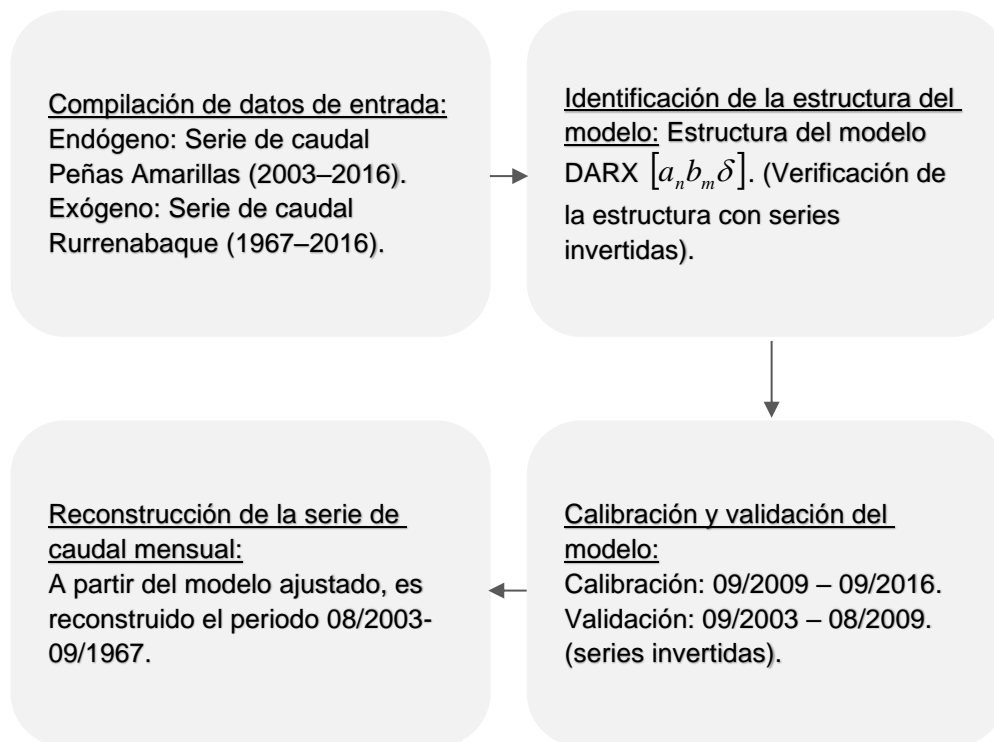


Figura 6. Flujo de trabajo aplicado en el análisis del escenario 2.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección describe los resultados de la aplicación del modelo autorregresivo de función de transferencia para los dos escenarios propuestos:

- Escenario 1. Serie de tiempo de caudal en la estación hidrológica de Rurrenabaque (1967-2016), empleando como serie exógena el Índice de Oscilación del Sur (1876-2016).
- Escenario 2. Serie de tiempo de caudal de la estación hidrológica Peñas Amarillas (2003-2016), empleando como serie exógena los caudales de la estación hidrológica de Rurrenabaque (1967-2016).

4.1. Estimación de caudales en la estación Rurrenabaque a partir de la serie del Índice de Oscilación del Sur (Escenario 1).

Partiendo de la hipótesis de una posible tele-conexión entre la serie mensual de caudal de la estación hidrológica Rurrenabaque y el Índice de Oscilación del Sur, un primer análisis fue realizado calculando el Coeficiente de Correlación Cruzada CCF, que se define como la correlación cruzada se define como la correlación entre una serie X_t en un tiempo dado, t , con otra serie en un tiempo anterior o posterior, Y_{t+k} . (Guevara Díaz, 2014). Se obtuvo un valor máximo de 0.1401 para un desfase de 3 meses (lag+3), lo cual es un indicador de una baja correlación, no obstante, se observa una relación marcada en el comportamiento estacional que se supone como una característica de un sistema con variaciones estacionales (Figura 7).

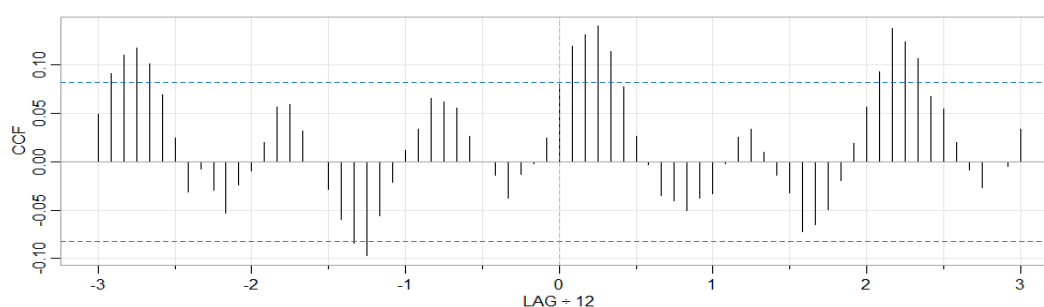


Figura 7. Coeficiente de correlación cruzada entre las series IOS y caudal de la estación Rurrenabaque (obtenido de la aplicación de la librería forecast/RStudio).

Con base en el comportamiento estacional observado en el gráfico anterior y a fin de encontrar una mejor correlación entre las series de análisis, se ha planteado perturbar la serie de tiempo de IOS empleando como factor la serie de caudal media mensual multianual del periodo disponible de dato de la estación hidrológica

Rurrenabaque y también se ha aplicado el desfase de 3 meses encontrado en el análisis del CCF. A este efecto, para evitar valores negativos en la nueva serie, fue añadido un valor de 40 a toda la serie de IOS. La Figura 8 muestra la serie del Índice de Oscilación del Sur Perturbada (denotada como IOSp) en relación a la serie de caudal observado en el Río Beni.

La serie perturbada IOSp genera un valor de 0.86 en el análisis del coeficiente de correlación cruzada, en el que no se observa un desfase (lag) y se ha visto la variación estacionalidad muy pronunciada (Figura 9), algo que se esperaba debido al factor de perturbación utilizado.

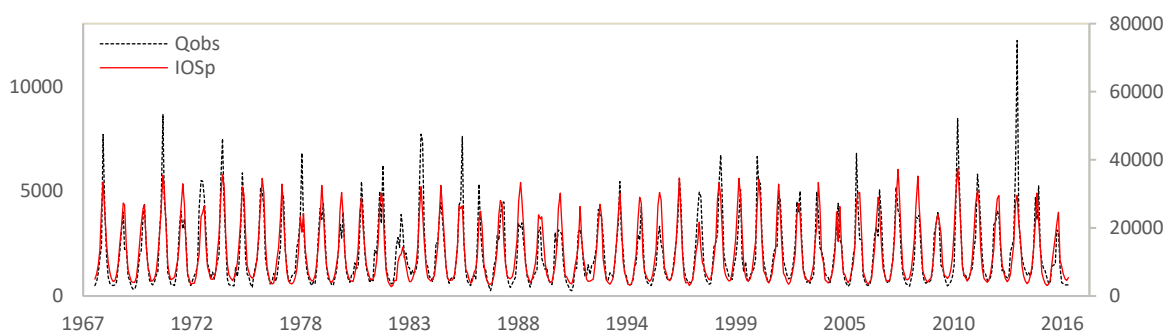


Figura 8. Serie de tiempo IOS perturbada con la serie de caudales medios mensuales multianuales.

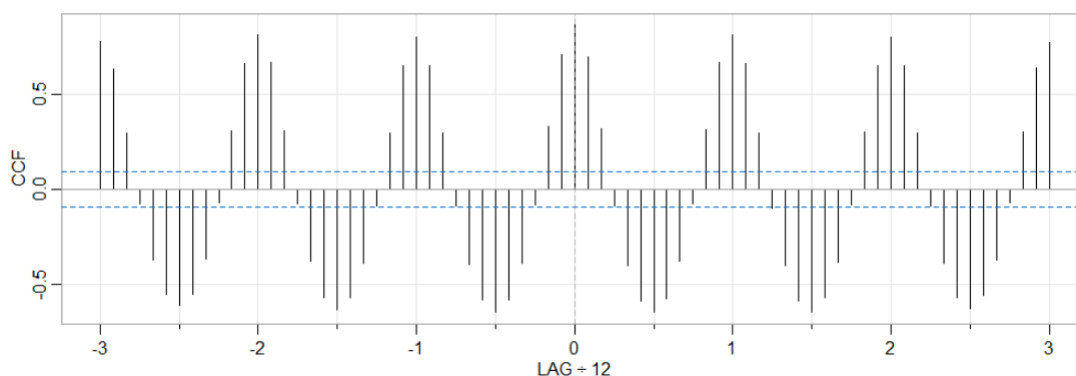


Figura 9. Coeficiente de correlación cruzada entre la serie de tiempo IOSp perturbada y la serie de caudal de la estación Rurrenabaque.

Partiendo de estos resultados de correlación, fue implementado el modelo de función de transferencia, en el que se ha asumido como periodo de calibración los años 09/2016 – 09/1976, y para la validación del modelo, entre los años 08/1976 – 09/1967.

La identificación de una estructura óptima del modelo, que reproduzca mejor la serie de datos de entrada empleando la serie de datos exógenos, fue el primer análisis realizado, que además comprende el periodo de calibración. Dicha

estructura de función de transferencia $[a_n b_m \delta]$ define la cantidad de parámetros (a_n) (b_m) y pasos de tiempo de retardo puro (δ) del modelo dinámico autorregresivo. La herramienta CAPTAIN Toolbox de análisis y pronóstico de series temporales (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007) fue empleada para identificar la estructura óptima. Los criterios adoptados fueron los siguientes: 1) utilizar la series de entrada invertidas en tiempo y verificar la estructura sin inversión; 2) Los parámetros (a_n) y (b_m) no varían en el tiempo, se consideran constantes; 3) Se ha fijado el límite de un año hidrológico para el retardo puro (δ), no obstante, se ha verificado valores superiores al año hidrológico.

La evaluación de la eficiencia y ajuste en el proceso de identificación de la estructura óptima del modelo se realizó a través de dos indicadores estadísticos; el coeficiente de determinación RT2, basado en el error de respuesta, que es una medida simple del ajuste del modelo (donde la unidad indica un ajuste perfecto); y el criterio de identificación de Young (YIC), que proporciona una medida combinada de ajuste y eficiencia paramétrica, con valores negativos grandes que indican un modelo que explica bien los datos de salida, sin parametrización excesiva (Taylor, Pedregal, Young, & W., 2007).

El modelo DARX fue implementado para el periodo de calibración 09/1976-09/2016 (41 años hidrológicos), en el que se ha verificado el ajuste de 8 estructuras, obteniéndose eficiencias entre 0.75-0.77, y 0.69-0.72, para R2 y NSE, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de eficiencia R2 y NSE del modelo de función de transferencia.

| No | Estructura del modelo $[a_n b_m \delta]$ | YIC | RT2 | R2 | NSE |
|----|---|-------|--------|--------|------|
| 1 | [1 2 0] | -7.88 | 0.7375 | 0.7676 | 0.72 |
| 2 | [5 1 0] | -3.80 | 0.7003 | 0.7610 | 0.70 |
| 3 | [1 1 0] | -2.69 | 0.7314 | 0.7566 | 0.69 |
| 4 | [4 1 0] | -2.18 | 0.7120 | 0.7609 | 0.70 |
| 5 | [7 7 0] | -1.48 | 0.7401 | 0.7718 | 0.71 |
| 6 | [3 2 0] | -0.82 | 0.7352 | 0.7684 | 0.71 |

| No | Estructura del modelo [$a_n b_m \delta$] | YIC | RT2 | R2 | NSE |
|----|---|------|--------|--------|------|
| 7 | [1 3 0] | 0.08 | 0.7387 | 0.7676 | 0.72 |
| 8 | [7 1 0] | 0.27 | 0.7373 | 0.7620 | 0.69 |

La estructura del modelo [1 2 0] es la que mejor se adapta a las series de entrada (IOS perturbada y caudal observado), por lo tanto, se considera adecuado para la estimación de caudales en la estación hidrológica Rurrenabaque. Los parámetros de la estructura del modelo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros obtenidos para la estructura del modelo [1 2 0].

| Parámetros (a_n y b_n) | a_1 | b_0 | b_1 |
|------------------------------|---------|--------|---------|
| Valor | -0.3154 | 0.1510 | -0.0425 |

El modelo calibrado muestra un buen ajuste en los periodos secos y en general una representación aceptable de los periodos de crecidas, no obstante, existe una subestimación de los caudales en periodos de crecidas extremas (Figura 10, Figura 12a).

El modelo fue validado para un periodo de 9 años hidrológicos comprendidos entre los años 09/1967 y 09/1976, obteniéndose una eficiencia igual $R^2 = 0.81$ (Figura 11, Figura 12b). Se ha visto que el modelo logra reproducir los caudales en periodos secos y la mayoría de los eventos con crecidas, no obstante, se observa una subestimación en los periodos con crecidas extraordinarias.

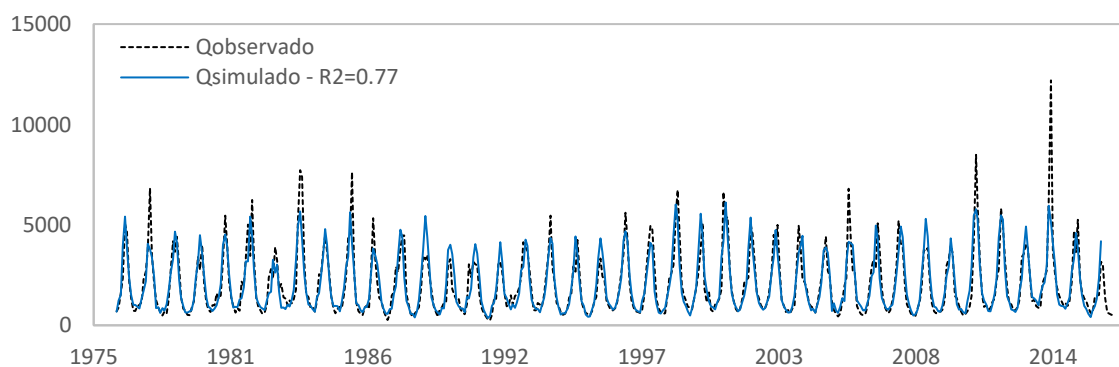


Figura 10. Mejor ajuste del modelo simulado, periodo: 09/1976 – 09/2016.

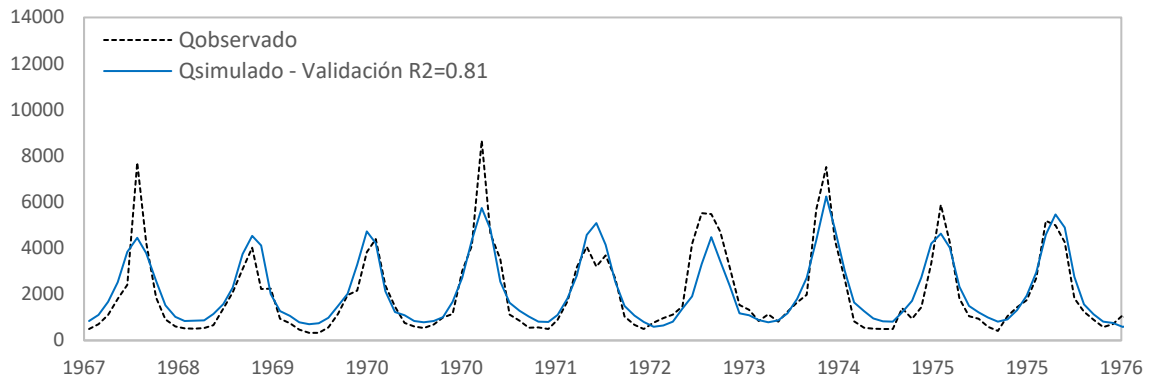


Figura 11. Validación del modelo, periodo: 09/1967 – 08/1976.

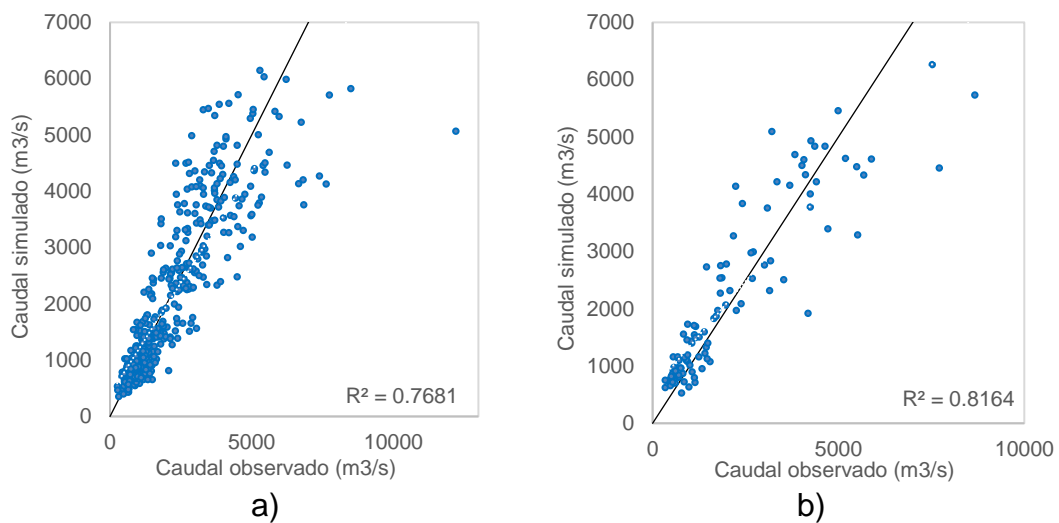


Figura 12. Eficiencias R2 del modelo simulado en relación a los datos observados: a) Calibración; y b) Validación.

En relación a las eficiencias calculadas para el periodo de calibración y validación (Figura 12), se destaca que el periodo de calibración contiene al evento hidrológico del año 2014, el cual es categorizado como un evento sin precedentes de crecida extraordinaria, en el que se registró un caudal máximo del 380% sobre la normal (Espinoza, et al., 2014). Se ha visto que el valor de este evento hidrológico afecta el desempeño de la eficiencia en la calibración.

Con base en los resultados del modelo, se ha reconstruido la serie de caudal mensual para el periodo 08/1967-04/1876, en el cual, al igual que en el periodo de calibración y validación (Figura 12), es de esperar que exista una subestimación en los meses de crecida, para este periodo reconstruido (Figura 13). Por lo tanto, un análisis de mayoración por cuartiles es aplicado a los caudales máximos simulados y en base a los caudales máximos observados.

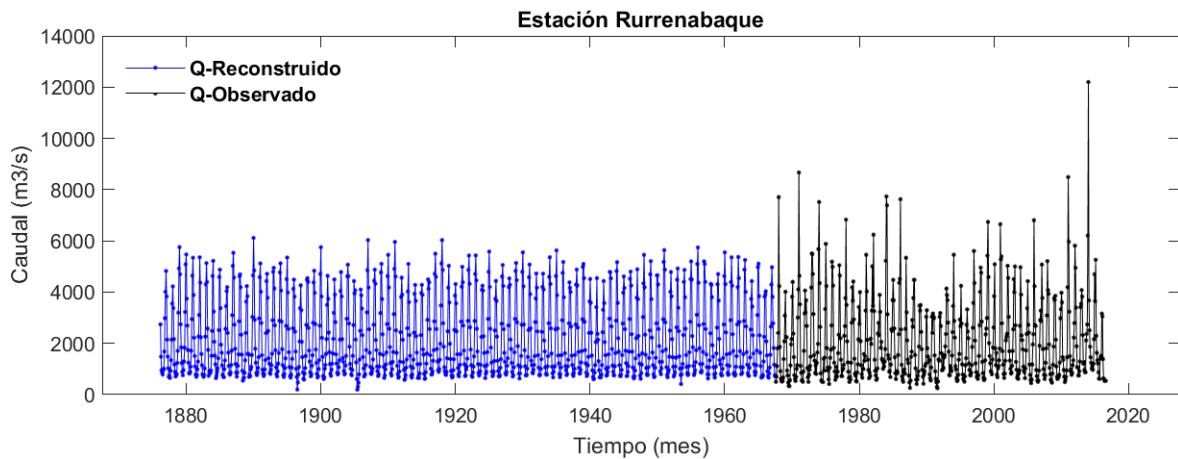


Figura 13. Estimación de serie de caudal mensual para el periodo 09/1944 – 08/1967 en la estación de Rurrenabaque, con base en los resultados de mejor ajuste del modelo dinámico autorregresivo.

Partiendo de estos resultados, se realizó el análisis de mayoración por cuartiles empleando un factor de perturbación, enfocado en el periodo de crecidas, para ello se ha considerado los siguientes tres tipos de perturbación:

- 1) Factor de perturbación a los caudales máximos para cada año hidrológico;
- 2) Factor de perturbación a los caudales máximos en el rango de los meses de enero a marzo; y
- 3) Factor de perturbación a los caudales máximos en el intervalo de enero a mayo.

La Figura 14 muestra la relación entre los caudales observados y simulados, categorizados de mayor a menor, para los meses de enero a mayo (Figura 14 A, B, C, D y E) y los máximos por año hidrológico (Figura 14F). A partir de esta relación se obtienen los factores de mayoración, y estos fueron aplicados a los 3 análisis propuestos.

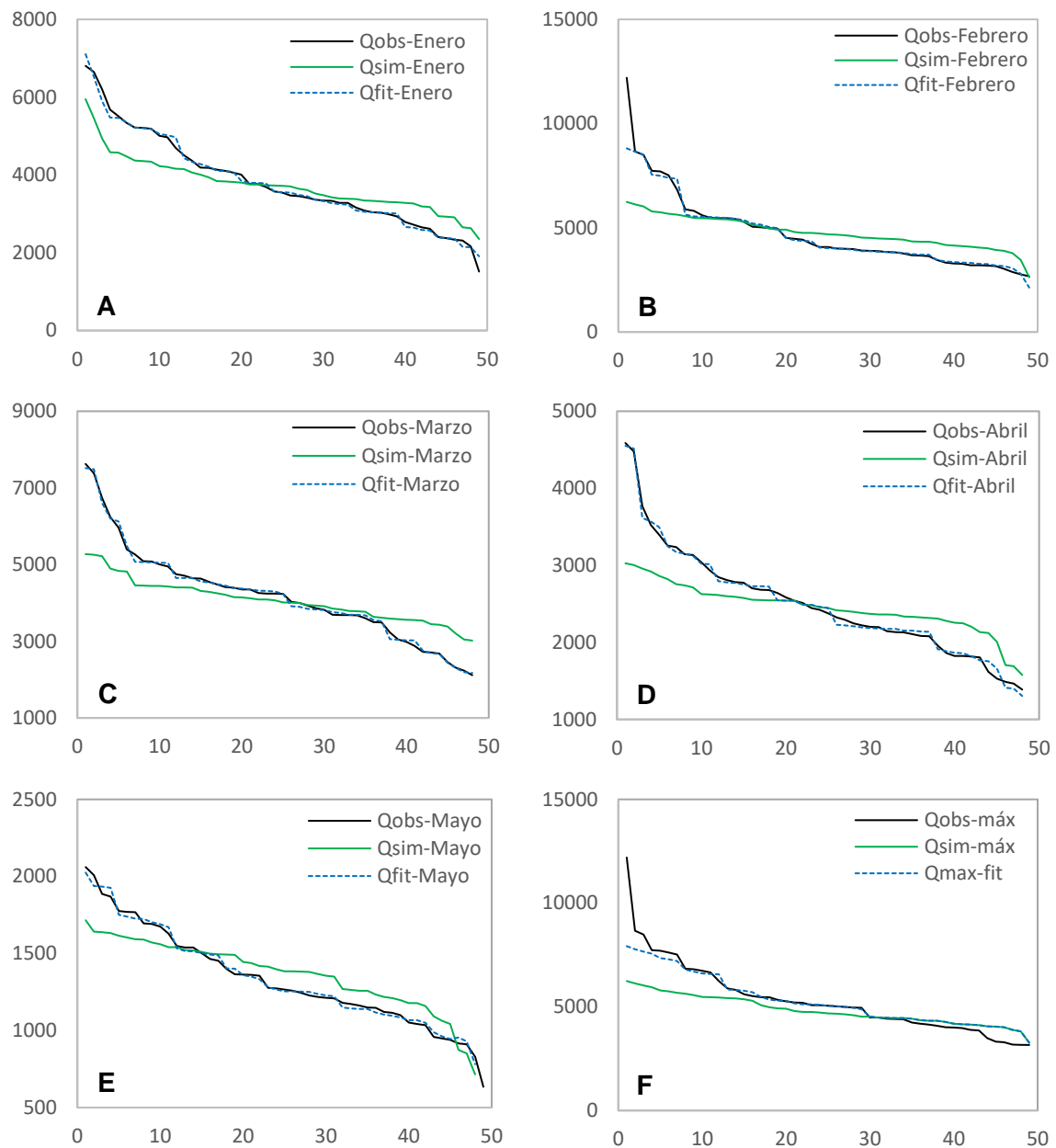


Figura 14. Categorización de caudales máximos observados, simulados y ajustados (aplicación de un factor de perturbación); (A) enero; (B) febrero; (C) marzo; (D) abril; (E) Mayo; (F) caudal máximo por año hidrológico.

Se obtuvieron eficiencias R^2 de 0.7675, 0.7431 y 0.7393, para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente (Figura 15). Se optó por ajustar los caudales simulados empleando los factores hallados en el escenario 1 de acuerdo al rango de magnitud de caudal (Tabla 4). Se ha visto una mejora considerable en la reproducción de los caudales máximos (Figura 16).

Tabla 4. Valores de factores de perturbación para mayoración de caudales simulados.

| Magnitud de caudal (m ³ /s) | Factor |
|--|--------|
| > 5670 | 1.27 |
| 5445 – 5670 | 1.21 |
| 4530 – 5444 | 1.08 |

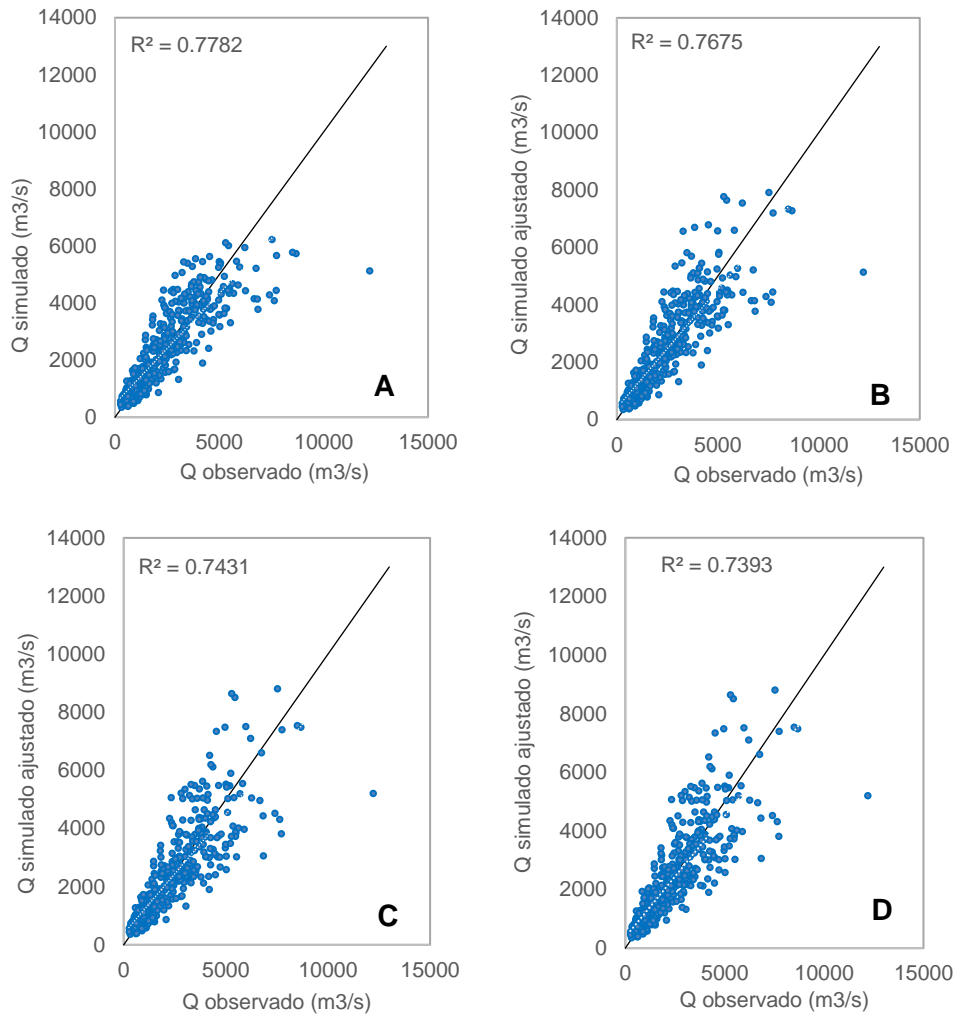


Figura 15. Determinación de eficiencias R2 en los escenarios analizados; (A) situación inicial resultado de la calibración del modelo; (B) Perturbación 1; (C) Perturbación 2; (D) Perturbación 3.

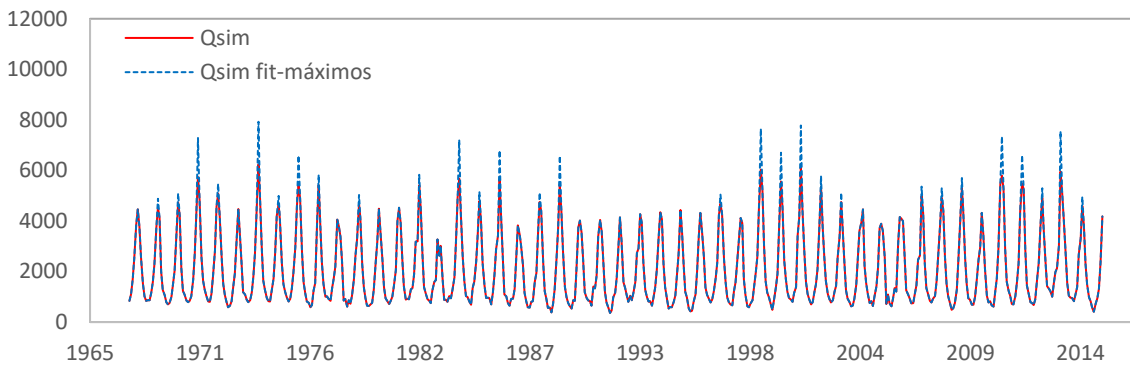


Figura 16. Series de caudal simulada y ajustada aplicando el criterio de mayoración por cuartiles.

Los caudales mensuales reconstruidos para el periodo 08/1876 – 04/1876 fueron también ajustados por el factor de mayoración, aplicados a los valores máximos de cada evento hidrológico. Se ha visto que la serie reconstruida mejoró la estimación de los caudales máximos (Figura 17). Los valores reconstruidos de caudal mensual pueden ser consultados en Anexo I.

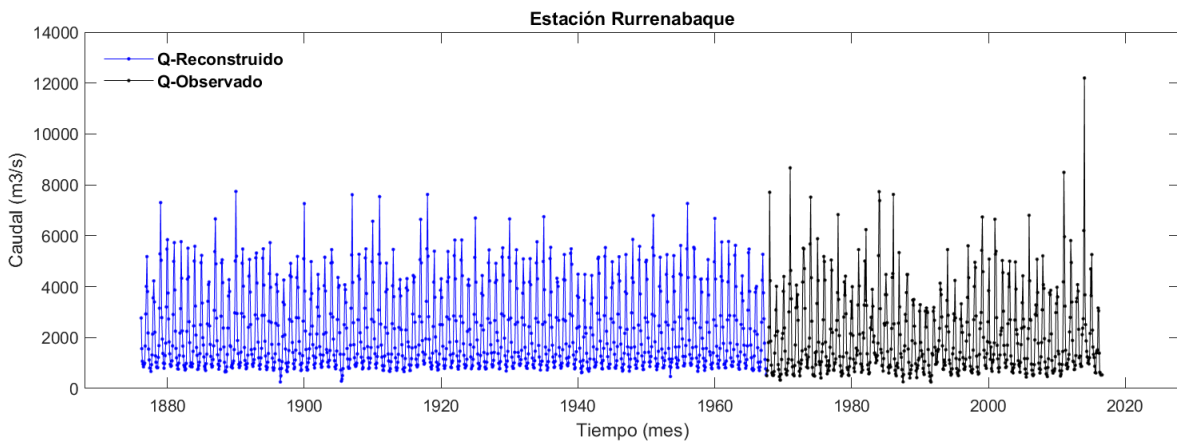


Figura 17. Serie de caudal mensual reconstruida para el periodo 04/1876 – 08/1967.

4.2. Estimación de caudales en la estación Peñas Amarillas a partir de la serie de caudal de la estación Rurrenabaque (Escenario 2).

El modelo DARX fue aplicado para la reconstrucción de las series de caudal en la estación Peñas Amarillas, empleando como dato de entrada exógena la serie de caudal de la estación Rurrenabaque (sin ser afectada por la serie IOS).

El análisis de correlación cruzada entre ambas series generó un valor de CCF = 0.875, sin presencia de desfase (lag 0), además se ha visto una marcada estacionalidad entre ambas series (Figura 18).

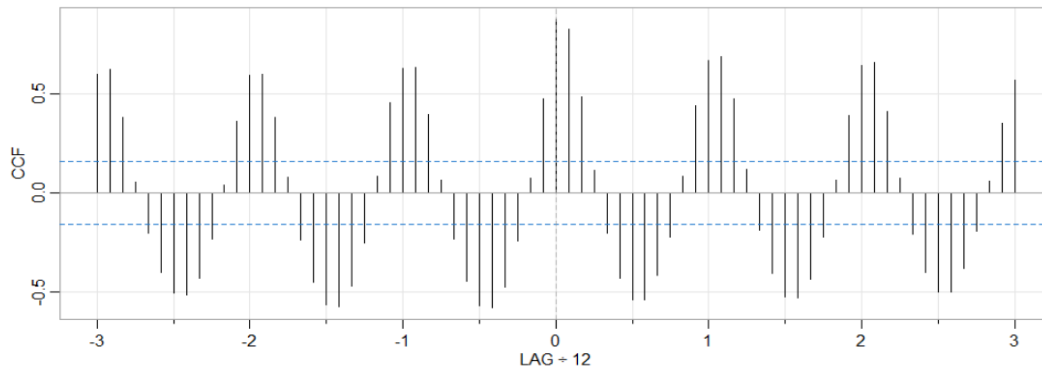


Figura 18. Estimación de serie de caudal mensual para el periodo 09/1944 – 08/1967 con base en los resultados de mejor ajuste del modelo

El modelo DARX fue implementado para el periodo 09/2008 – 09/2016 (periodo de calibración, 8 años hidrológicos), en el que se verificaron 9 estructuras de función de transferencia $[a_n b_m \delta]$, donde se obtuvieron eficiencias R2 y NSE entre 0.74 – 0.86, y 0.39 – 0.74, respectivamente (Tabla 5). Se ha encontrado que la estructura [2 1 0] es la que mejor se ajusta, para la cual los parámetros se describen en la Tabla 6.

Tabla 5. Indicadores de eficiencia R2 y NSE para las estructuras de función de transferencia.

| No | Estructura del modelo $[a_n b_m \delta]$ | YIC | RT2 | R2 | NSE |
|----|---|-------|-------|--------|------|
| 1 | [1 1 0] | -5.27 | 0.821 | 0.7406 | 0.66 |
| 2 | [2 1 0] | -2.25 | 0.823 | 0.7636 | 0.74 |
| 3 | [4 2 0] | -1.26 | 0.827 | 0.8356 | 0.39 |
| 4 | [3 1 0] | -0.85 | 0.825 | 0.7626 | 0.69 |
| 5 | [4 1 0] | -0.28 | 0.826 | 0.7625 | 0.69 |
| 6 | [5 2 0] | -0.10 | 0.825 | 0.8370 | 0.40 |
| 7 | [9 3 0] | -0.05 | 0.837 | 0.8663 | 0.71 |
| 8 | [6 2 0] | 0.50 | 0.822 | 0.8371 | 0.43 |
| 9 | [6 1 0] | 0.65 | 0.828 | 0.7632 | 0.68 |

Tabla 6. Parámetros constantes obtenidos para la estructura del modelo [2 1 0].

| Parámetros (a_n y b_n) | a_1 | a_2 | b_0 |
|------------------------------|--------|-------|-------|
| Valor | -0.389 | 0.189 | 0.850 |

Resultado del proceso de calibración se alcanzó eficiencias de $R^2=0.77$ y $NSE=0.74$, en el que se ha visto un mejor ajuste en la reproducción de los caudales para periodos secos en comparación con el ajuste para periodos de crecidas (Figura 19, Figura 21a).

La validación fue realizada para el periodo 09/2003–08/2008 (5 años hidrológicos), y se obtuvieron eficiencias de $R^2=0.78$ y $NSE=0.56$. A diferencia del proceso de calibración, se observa un ajuste aceptable en los periodos secos, sin embargo, el modelo subestima los periodos de crecidas (Figura 20, Figura 21b).

Las eficiencias halladas en el proceso de calibración y validación del modelo muestran desempeños satisfactorios según la clasificación propuesta por Moriasi, et al., 2007. No obstante, el periodo con disponibilidad de datos (13 años hidrológicos) en la estación Peñas Amarillas podría considerarse como una limitación para ajustar un modelo de función de transferencia.

Partiendo de los resultados del modelo calibrado y validado, la serie de caudal mensual fue reconstruida para el periodo 09/1967 – 08/2003 (Figura 22), en el que el modelo reproduce la variabilidad (serie de tiempo exógena, estación Rurrenabaque) entre eventos húmedos y secos de los años hidrológicos y conserva el orden de magnitud de caudal de la estación Peñas Amarillas. Los valores de caudal mensual reconstruidos se hallan disponibles en el Anexo II.

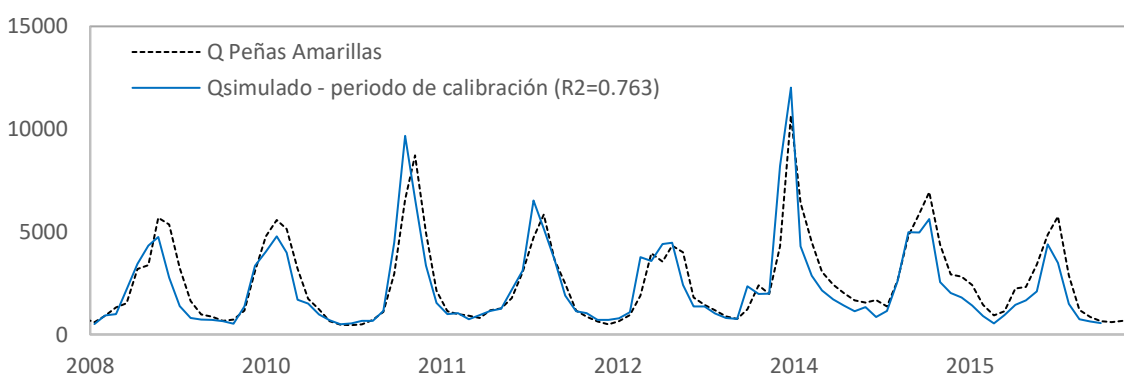


Figura 19. Implementación del modelo de función de transferencia, periodo de calibración 09/2008 – 09/2016.

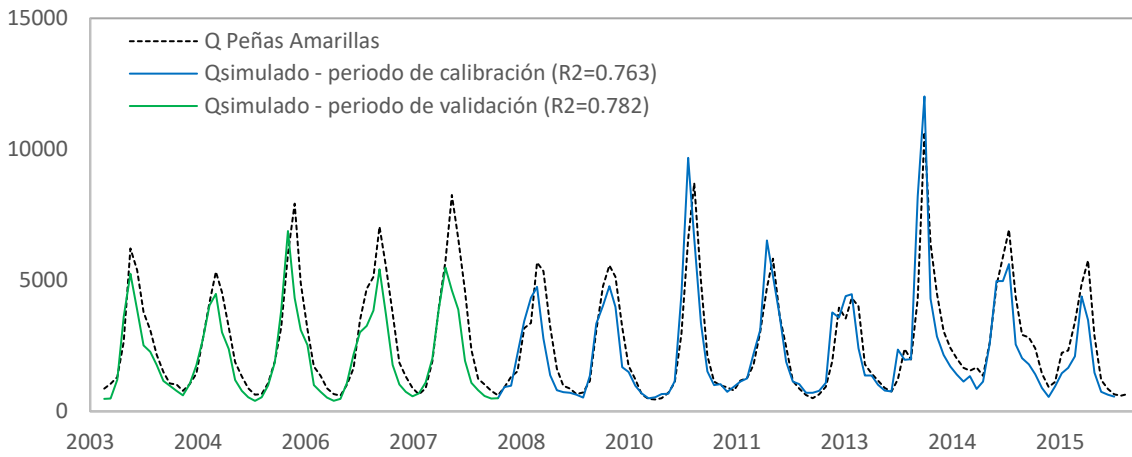


Figura 20. Validación del modelo de función de transferencia, periodo 09/2003 – 08/2008.

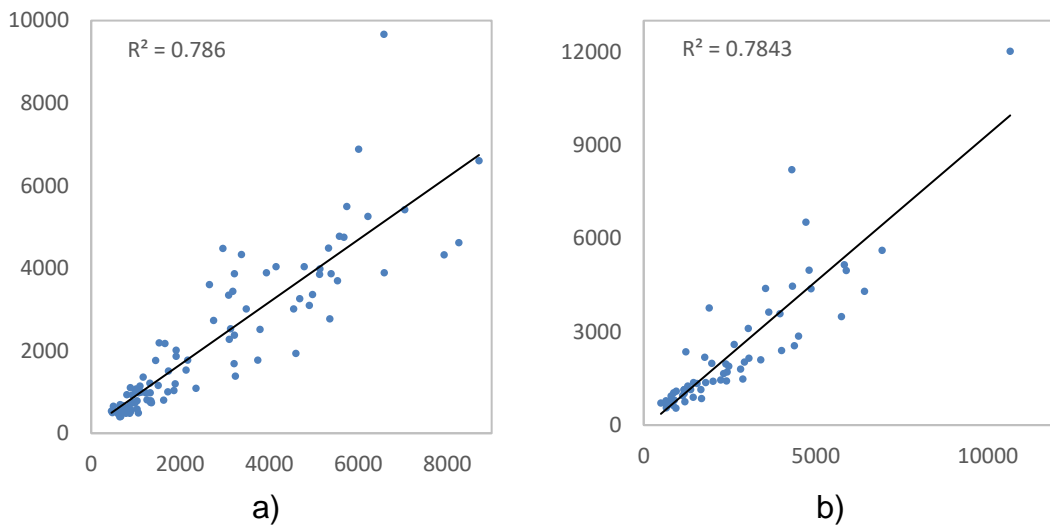


Figura 21. Eficiencias R2 de la implementación del modelo de función de transferencia: a) Periodo de calibración; y b) Periodo de validación.

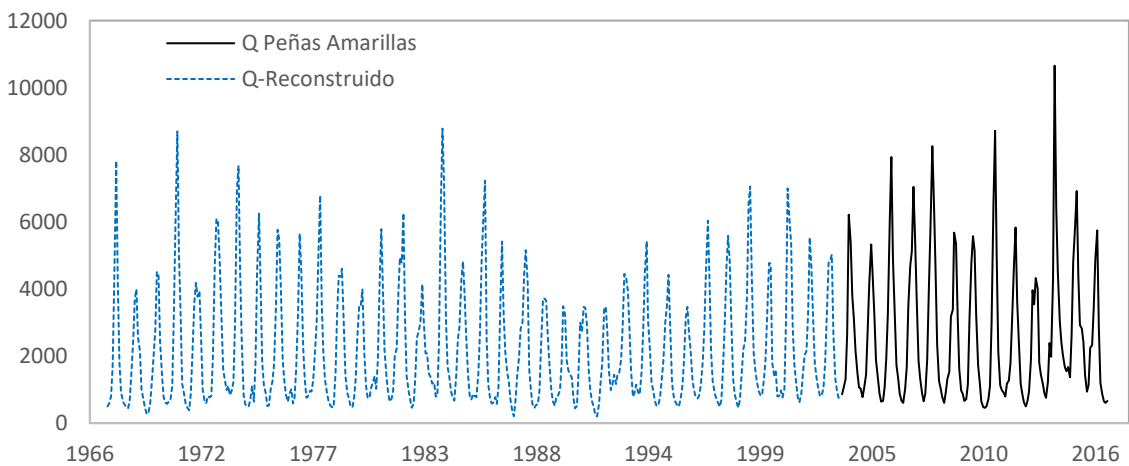


Figura 22. Estimación/reconstrucción de caudales para el periodo 09/1967 – 08/2003 a partir de la serie de caudal en la estación Rurrenabaque.

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio, se ha reconstruido la serie de caudal mensual para la cuenca del río Beni, en la estación de Rurrenabaque (pie de monte de Amazonía Boliviana) utilizando el modelo autorregresivo de función de transferencia DARX e incorporando como dato exógeno el Índice de Oscilación del Sur (IOS). La serie fue reconstruida para el periodo 09/1876-08/1967.

Los resultados de la aplicación del modelo DARX muestran un mejor ajuste cuando la serie mensual del IOS es perturbada con el factor del caudal medio mensual multianual de la estación Rurrenabaque. También se ha visto una mejora sustancial en la reconstrucción de la serie, incorporando un factor de ajuste a los caudales máximos simulados empleando el criterio de mayoración por cuartiles. El siguiente cuadro resume las estadísticas de eficiencia encontradas en la implementación del modelo:

| | $[a_n b_m \delta]$ | YIC | R2 | NSE |
|-------------------------------------|--------------------|-------|------|------|
| Estructura de modelo autorregresivo | [1 2 0] | -7.88 | 0.74 | |
| Calibración | | | 0.77 | 0.72 |
| Validación | | | 0.82 | 0.73 |

El periodo de calibración incluye el evento de crecida extraordinario del año 2014 donde se registró el caudal de 380% sobre la normal (Espinoza, et al., 2014). Este valor afecta al desempeño del proceso de calibración y explica el valor superior de eficiencia en el periodo de validación del modelo.

Respecto a la reconstrucción de la serie mensual de caudal en la estación Peñas Amarillas, utilizando el modelo DARX y como dato exógeno de entrada la serie de caudal de la estación Rurrenabaque (sin ser afectada por el IOS), los resultados muestran un buen ajuste entre las series, como se lo esperaba existe una correlación alta debido a que la estación en cuestión se halla localizada a 340 km aguas debajo de la estación Rurrenabaque. A continuación se detalla las eficiencias encontradas de la aplicación del modelo:

| | $[a_n b_m \delta]$ | YIC | R2 | NSE |
|-------------------------------------|--------------------|-------|-------|------|
| Estructura de modelo autorregresivo | [1 2 0] | -2.25 | 0.823 | |
| Calibración | | | 0.77 | 0.74 |
| Validación | | | 0.78 | 0.56 |

Los resultados del presente estudio muestran una estimación aceptable en la reconstrucción de caudales mensuales a través de la correlación entre las variables estudiadas. No obstante, es posible profundizar el análisis integrando otros factores y variables, como las precipitaciones e índices de precipitación (variabilidad espacial y temporal), que podrían jugar un rol importante en la búsqueda de factores dominantes de correlación con los índices que evalúan el fenómeno climático El Niño y La Niña.

Las mejoras en la metodología de reconstrucción pueden ayudar a los administradores del agua a desarrollar estrategias eficientes para la planificación hidrológica de la cuenca, y también preventivas (pronóstico estacional). Asimismo, la metodología puede ser transferida y aplicada a otras cuencas de la región.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Australian Government, B. o. (24 de 01 de 2022). *Southern Oscillation Index (SOI)*.
Obtenido de <http://www.bom.gov.au/climate/enso/soi/>
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *TIME SERIES ANALYSIS - Forecasting and Control*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Bryson, A. a. (1969). *Applied Optimal Control, Optimization, Estimation and Control*. Waltham: Blaisdell Publishing Company.
- Cai, W., McPhaden, M. J., & Grimm, A. M. (2020). Climate impacts of the El Niño Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews | Earth and Environment*.
- Erfanian, A., Wang, G., & Fomenko, L. (2017). Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under- predicted by tropical SST. *Sci. Rep.*, 7, 5811.
- Espinoza J.C. et al. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology.*, 29, 1574–1594.
- Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Ronchail, J., Carpio, J. M., Flores, L. N., & Guyot, J. L. (2014). The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, 9, 124007 (9pp).
- Espinoza, J. e. (2013). The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970–2012 period: a focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*, 1000-1008.
- Gómez, M. F. (2012). *Conceptual Model Developer Manual*. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven.
- Guevara Díaz, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, núm. 47, pp. 79-102.
- Guyot, J. L., Jouanneau, J. M., & Wasson, J. G. (1999). Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). *Journal of South American Earth Sciences*, 401-410.

- Harvey, A. (1989). *Forecasting Structural Time Series Models and the Kalman Filter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jiménez- Muñoz, J. C. (2016). Record- breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* , 6, 33130.
- Marengo, J. A. (1992). Interannual Variability of Surface Climate in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology.*, Vol. 12, 853-863.
- Marengo, J. A. (2009). Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes*.
- Marengo, J. A., & Hastenrath, S. (1993). Case Studies of Extreme Climatic Events in the Amazon Basin. *American Meteorological Society*, 617-627.
- McQuarrie, N. (2002). The kinematic history of the central Andean fold-thrust belt, Bolivia: Implications for building a high plateau. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 114, 950–963.
- Molina-Carpio, J., Espinoza, D., Coritza, E., Salcedo, F., Farfán, C., Mamani, L., & Mendoza, J. (2019). Clima y variabilidad espacial de la ceja de monte y andino húmedo. *Ecología en Bolivia*, 54(1) 40-56.
- Molina-Carpio, J., Espinoza, J., Vauchel, P., Ronchail, J., Caloir, B., Guyot, J.-L., & Noriega, L. (2017). Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: Spatio-temporal variability and trends. *Hydrol. Sci.*, 62, 2150–3435.
- Molion, L., & Moraes, J. (1987). Oscilação Sul e Descarga de Rios na América do Sul Tropical. *Revista Brasileira de Engenharia, Caderno Hydrologico*, 5, 53-63.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50(3): 885–900.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- Pabón-Caicedo, J. D., Ycaza, R. d., Friend, F., Espinoza, D., Fenzl, N., & Apostolova, M. (2018). Vulnerabilidad de la cuenca amazónica ante fenómenos hidroclimáticos extremos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27 (1): 27-49. doi: 10.15446/rcdg.v27n1.56027.
- Richey, J. E., Nobre, C., & Deser, C. (1989). Amazon River Discharge and Climate

- Variability: 1903 to 1985. *Science*, Vol. 246, No. 4926, 101-103.
- Rivera, I. A. (2019). On the Relationship between Suspended Sediment Concentration, Rainfall Variability and Groundwater: An Empirical and Probabilistic Analysis for the Andean Beni River, Bolivia (2003–2016). *Water, MDPI*.
- Roche, M. C. (1990). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia*. Ed. ORSTOM-UNESCO, ATLAS PHICAB. 29 p.
- Ronchail, J., & Gallaire, R. (2006). ENSO and rainfall along the Zongo Valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 26, 1223-1236.
- Ronchail, J., Bourrel, L., Maurice-Bourgoin, L., P.Vauchel, Cochonneau, G., Guyot, J. L., . . . Castro, A. (2003). HYDROLOGY AND CLIMATE IN THE SOUTHWESTERN AMAZON BASIN (BOLIVIA). *Geophysical Research*, Vol. 5, 10982.
- Taylor, C., Pedregal, D., Young, P., & W., T. (2007). Environmental Time Series Analysis and Forecasting with the Captain Toolbox. *Environmental Modelling and Software*, 22, pp. 797-814 (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.envsoft.2006.03.002>).
- Villazon, M. (2016). Using climate variability and trends for short and long-term prediction of the effects of El Niño cycles in Bolivia. *Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- Young, P. (1998). Data-based mechanistic modelling of environmental, ecological, economic and engineering systems. *Environmental Modelling and Software*, 13, 105-122.
- Young, P. C. (2011). *Recursive Estimation and Time-Serie Analysis*. United Kingdom: Springer.

Anexo 1. Serie de caudal mensual reconstruida para el periodo 04/1876 – 08/1967, Estación Rurrenabaque.

Serie de caudal mensual reconstruida (04/1876 – 08/1967) en relación a la serie de caudales observados (09/1967 – 09/2016) en la estación Rurrenabaque.

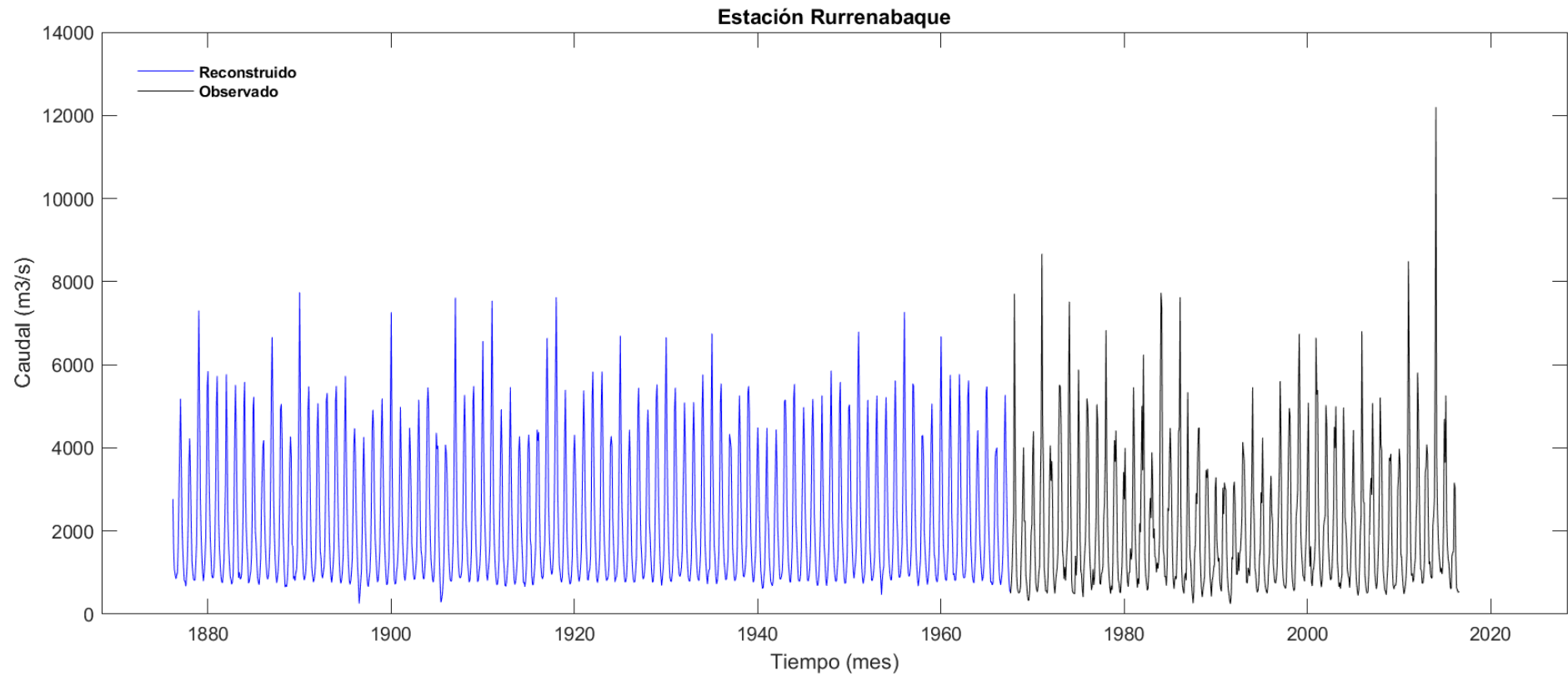


Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1876 – 1967, estación Rurrenabaque (m³/s).

| | 1876 | 1877 | 1878 | 1879 | 1880 | 1881 | 1882 | 1883 | 1884 | 1885 | 1886 | 1887 | 1888 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | | 4008.83 | 3559.20 | 5290.92 | 5475.61 | 4993.43 | 3136.67 | 4297.11 | 5005.06 | 4944.15 | 3424.50 | 5378.15 | 4932.63 |
| Febrero | | 5181.94 | 4227.42 | 7303.64 | 5847.09 | 5729.81 | 5769.00 | 5511.94 | 5586.42 | 5227.44 | 4078.19 | 6662.51 | 5055.11 |
| Marzo | | 3810.60 | 3399.63 | 5039.52 | 3748.37 | 3869.81 | 4330.24 | 4379.47 | 3235.32 | 3355.67 | 4182.86 | 4894.99 | 4159.32 |
| Abril | 2770.19 | 2181.42 | 2211.78 | 2784.34 | 2729.78 | 2248.39 | 2264.47 | 2622.70 | 2099.04 | 1995.43 | 2455.26 | 2759.81 | 2374.22 |
| Mayo | 1565.18 | 1549.48 | 1282.19 | 1938.32 | 1830.57 | 1574.03 | 1664.44 | 1800.69 | 1610.62 | 1708.35 | 1732.90 | 1874.12 | 1630.86 |
| Junio | 1068.53 | 1121.58 | 1030.01 | 1374.93 | 1364.33 | 1203.74 | 1269.24 | 877.47 | 1303.59 | 1236.93 | 1261.46 | 1323.60 | 1024.97 |
| Julio | 958.67 | 803.50 | 840.88 | 991.83 | 945.62 | 916.20 | 915.69 | 1010.57 | 747.89 | 871.78 | 944.67 | 950.69 | 651.93 |
| Agosto | 848.02 | 791.65 | 812.34 | 795.14 | 866.80 | 771.08 | 835.96 | 851.55 | 772.24 | 768.34 | 839.25 | 755.44 | 702.51 |
| Septiembre | 939.61 | 670.63 | 821.73 | 980.44 | 892.83 | 757.39 | 721.20 | 846.60 | 900.74 | 706.44 | 884.43 | 880.42 | 659.21 |
| Octubre | 997.09 | 934.60 | 1221.43 | 1289.03 | 1086.73 | 994.46 | 767.91 | 966.20 | 1032.19 | 977.13 | 1138.99 | 1091.10 | 848.68 |
| Noviembre | 1665.63 | 1317.70 | 1682.43 | 1779.92 | 1673.94 | 1301.39 | 984.20 | 1458.58 | 1370.50 | 1348.34 | 1674.42 | 1537.66 | 1337.15 |
| Diciembre | 2926.30 | 2134.22 | 3155.39 | 3203.32 | 2906.15 | 2175.87 | 2244.56 | 2462.06 | 2501.18 | 2535.95 | 3067.62 | 2839.44 | 2373.86 |

| | 1889 | 1890 | 1891 | 1892 | 1893 | 1894 | 1895 | 1896 | 1897 | 1898 | 1899 | 1900 | 1901 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 3632.80 | 5009.94 | 4919.48 | 4412.63 | 5132.05 | 5117.69 | 4507.50 | 4087.53 | 3389.64 | 4435.30 | 4356.03 | 5097.30 | 3508.81 |
| Febrero | 4275.42 | 7741.06 | 5480.10 | 5070.78 | 5321.49 | 5489.08 | 5730.35 | 4471.55 | 4261.80 | 4914.54 | 5186.92 | 7263.76 | 4985.01 |
| Marzo | 3809.71 | 5195.96 | 4018.78 | 3786.39 | 4142.63 | 4060.42 | 3976.38 | 3811.38 | 3293.77 | 4388.25 | 3970.69 | 3825.05 | 3729.60 |
| Abril | 1675.88 | 2946.20 | 2814.90 | 2511.28 | 2741.33 | 2873.30 | 2593.03 | 2475.41 | 2109.82 | 2633.53 | 2774.30 | 2255.99 | 2451.02 |
| Mayo | 1646.41 | 1884.30 | 1611.58 | 1525.63 | 1819.29 | 1854.57 | 1732.33 | 1738.98 | 1550.07 | 1806.42 | 1845.86 | 1532.37 | 1722.16 |
| Junio | 842.88 | 1367.75 | 1100.23 | 1339.78 | 1206.32 | 1276.54 | 1191.70 | 1113.81 | 990.22 | 1413.05 | 1373.63 | 829.57 | 1280.57 |
| Julio | 915.67 | 944.23 | 923.19 | 945.94 | 900.11 | 873.08 | 813.87 | 769.81 | 713.98 | 971.84 | 939.01 | 717.83 | 927.76 |
| Agosto | 805.88 | 818.64 | 773.67 | 867.17 | 761.88 | 741.08 | 715.09 | 255.89 | 659.20 | 771.94 | 705.15 | 739.48 | 803.99 |
| Septiembre | 991.56 | 888.91 | 829.92 | 1000.33 | 941.98 | 821.92 | 799.83 | 495.06 | 848.52 | 832.23 | 729.88 | 1019.76 | 985.08 |
| Octubre | 1077.70 | 1017.85 | 979.75 | 1130.89 | 1199.87 | 1031.45 | 1036.74 | 789.41 | 1019.66 | 1118.45 | 993.65 | 1177.50 | 1212.77 |
| Noviembre | 1526.30 | 1428.96 | 1310.20 | 1555.74 | 1576.14 | 1372.44 | 1361.75 | 1055.38 | 1491.98 | 1505.35 | 1290.27 | 1557.76 | 1591.15 |
| Diciembre | 2969.60 | 2949.87 | 2403.83 | 2891.79 | 2869.86 | 2644.33 | 2560.71 | 2041.87 | 2716.87 | 2782.06 | 2645.05 | 2130.32 | 2140.72 |

Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1876 – 1967, estación Rurrenabaque (m³/s).

| | 1902 | 1903 | 1904 | 1905 | 1906 | 1907 | 1908 | 1909 | 1910 | 1911 | 1912 | 1913 | 1914 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 3195.19 | 4038.37 | 4928.63 | 4362.18 | 4075.00 | 5246.10 | 4416.02 | 5129.85 | 4980.56 | 5270.78 | 3795.76 | 4035.26 | 3911.80 |
| Febrero | 4482.68 | 5156.51 | 5455.74 | 3974.66 | 3883.61 | 7613.74 | 5272.96 | 5485.07 | 6569.59 | 7539.30 | 4925.75 | 5462.02 | 4278.01 |
| Marzo | 3915.69 | 3829.01 | 4947.95 | 4047.90 | 3375.91 | 4163.85 | 4295.93 | 3729.05 | 4172.83 | 4928.76 | 3890.73 | 3606.17 | 3635.77 |
| Abril | 2838.70 | 2197.89 | 2806.76 | 2190.02 | 2371.56 | 2583.50 | 2186.62 | 2392.79 | 2617.29 | 2529.85 | 2167.60 | 2351.11 | 2306.97 |
| Mayo | 1642.50 | 1527.27 | 1939.27 | 1344.69 | 1571.06 | 1717.81 | 1823.88 | 1642.80 | 1949.88 | 1705.68 | 1352.61 | 1592.47 | 1719.33 |
| Junio | 1330.73 | 1408.07 | 1312.42 | 723.90 | 1159.08 | 1208.72 | 1229.25 | 1206.17 | 1366.59 | 1232.18 | 1081.99 | 1205.48 | 1284.85 |
| Julio | 959.88 | 1030.24 | 1089.70 | 284.78 | 842.58 | 930.19 | 1009.96 | 779.13 | 952.83 | 897.09 | 690.55 | 818.82 | 752.58 |
| Agosto | 830.86 | 855.90 | 845.70 | 363.87 | 791.39 | 867.81 | 768.61 | 812.11 | 805.57 | 717.45 | 668.39 | 713.01 | 770.59 |
| Septiembre | 852.97 | 845.27 | 772.33 | 504.38 | 794.67 | 894.74 | 819.85 | 1009.41 | 997.05 | 709.50 | 772.69 | 804.89 | 661.50 |
| Octubre | 1073.80 | 1106.30 | 920.99 | 782.25 | 1145.16 | 996.67 | 1079.44 | 1186.06 | 1255.33 | 887.03 | 1051.47 | 1028.38 | 819.45 |
| Noviembre | 1309.73 | 1492.02 | 1471.32 | 1339.20 | 1702.67 | 1358.46 | 1567.77 | 1607.96 | 1630.52 | 1274.68 | 1346.94 | 1340.27 | 1175.66 |
| Diciembre | 2132.05 | 2934.14 | 2707.46 | 2505.12 | 3153.83 | 2698.23 | 3154.44 | 2719.73 | 3083.62 | 2400.60 | 2544.86 | 2395.43 | 2299.51 |

| | 1915 | 1916 | 1917 | 1918 | 1919 | 1920 | 1921 | 1922 | 1923 | 1924 | 1925 | 1926 | 1927 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 3947.22 | 4438.39 | 5063.34 | 5489.84 | 4178.45 | 3857.26 | 4196.71 | 5218.53 | 5046.66 | 4059.38 | 5148.14 | 3735.05 | 4935.65 |
| Febrero | 4316.62 | 4171.84 | 6644.26 | 7623.26 | 5393.89 | 4310.09 | 5381.06 | 5831.99 | 5835.59 | 4280.35 | 6697.15 | 4436.44 | 5443.68 |
| Marzo | 3860.60 | 4378.79 | 4935.19 | 5195.17 | 3583.01 | 3574.34 | 4372.93 | 4308.09 | 4430.75 | 4042.89 | 4175.43 | 3657.29 | 4225.62 |
| Abril | 1827.51 | 2602.03 | 2612.89 | 2818.46 | 2024.78 | 2505.04 | 2721.35 | 2663.62 | 2586.16 | 2325.69 | 2600.63 | 2299.10 | 2577.73 |
| Mayo | 1640.17 | 1626.90 | 1883.10 | 1931.98 | 1467.00 | 1659.21 | 1819.23 | 1848.79 | 1756.28 | 1722.13 | 1904.97 | 1414.62 | 1719.50 |
| Junio | 930.42 | 1149.22 | 1426.66 | 1186.20 | 1034.06 | 1158.87 | 1318.03 | 1279.71 | 1301.42 | 1236.38 | 1352.20 | 1050.56 | 1393.71 |
| Julio | 702.92 | 912.28 | 1084.21 | 1024.19 | 849.13 | 896.61 | 838.91 | 854.04 | 945.81 | 775.41 | 986.43 | 834.05 | 939.61 |
| Agosto | 706.07 | 846.44 | 955.86 | 838.96 | 721.35 | 784.76 | 815.37 | 756.65 | 805.34 | 867.74 | 776.92 | 764.55 | 842.61 |
| Septiembre | 915.13 | 921.74 | 1000.48 | 767.59 | 745.88 | 895.73 | 1007.34 | 881.78 | 846.70 | 901.87 | 780.85 | 782.62 | 904.83 |
| Octubre | 1170.29 | 1315.89 | 1338.37 | 896.64 | 948.67 | 1149.22 | 1079.27 | 1073.10 | 901.46 | 1147.19 | 883.76 | 1032.72 | 1106.33 |
| Noviembre | 1592.46 | 1708.54 | 1948.28 | 1385.91 | 1357.76 | 1566.25 | 1368.95 | 1461.99 | 1145.73 | 1622.27 | 1298.18 | 1360.10 | 1416.85 |
| Diciembre | 2923.01 | 2828.91 | 3421.61 | 2433.59 | 2509.95 | 2812.74 | 2849.31 | 2835.91 | 2243.62 | 2912.59 | 2478.06 | 2745.02 | 2670.93 |

Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1876 – 1967, estación Rurrenabaque (m³/s).

| | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 | 1935 | 1936 | 1937 | 1938 | 1939 | 1940 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 4163.38 | 5163.29 | 5149.54 | 4916.18 | 3743.16 | 4184.69 | 4931.51 | 4990.65 | 5101.93 | 4331.27 | 4280.19 | 5311.59 | 3636.23 |
| Febrero | 4917.26 | 5525.54 | 6661.17 | 5448.28 | 5091.74 | 5099.02 | 5763.55 | 6749.80 | 5545.43 | 4180.31 | 5261.90 | 5486.56 | 4490.10 |
| Marzo | 4255.00 | 4458.16 | 4215.73 | 3927.66 | 4158.61 | 4074.49 | 4307.19 | 3881.42 | 3791.86 | 4010.79 | 4256.47 | 4878.35 | 3577.51 |
| Abril | 2204.38 | 2852.76 | 2768.00 | 2604.69 | 2494.53 | 2166.89 | 2603.34 | 2609.07 | 2403.30 | 2678.55 | 2653.62 | 2853.91 | 2433.67 |
| Mayo | 1875.30 | 1974.09 | 1812.08 | 1415.86 | 1617.38 | 1769.51 | 1691.05 | 1626.83 | 1698.25 | 1610.35 | 1751.80 | 1803.07 | 1582.53 |
| Junio | 1372.81 | 1286.25 | 1232.44 | 1255.07 | 1173.82 | 1196.85 | 1236.33 | 1350.78 | 1237.54 | 1273.70 | 1183.49 | 1316.02 | 1051.72 |
| Julio | 988.58 | 935.27 | 868.29 | 957.30 | 876.43 | 935.98 | 944.46 | 910.91 | 1033.79 | 909.88 | 929.39 | 954.37 | 789.26 |
| Agosto | 770.76 | 686.59 | 789.35 | 902.78 | 803.43 | 829.55 | 722.64 | 723.26 | 822.00 | 798.13 | 890.87 | 769.32 | 618.18 |
| Septiembre | 780.41 | 850.06 | 791.46 | 972.81 | 788.95 | 805.38 | 926.95 | 817.60 | 849.50 | 862.27 | 995.70 | 821.83 | 636.11 |
| Octubre | 1056.66 | 1079.62 | 1007.21 | 1136.36 | 996.97 | 1089.62 | 1072.17 | 1056.10 | 1067.08 | 994.06 | 1232.74 | 1135.74 | 881.49 |
| Noviembre | 1615.77 | 1458.63 | 1422.29 | 1499.38 | 1359.31 | 1465.88 | 1067.57 | 1503.22 | 1340.28 | 1525.18 | 1653.18 | 1444.16 | 1108.84 |
| Diciembre | 2932.50 | 2697.67 | 2516.38 | 2782.66 | 2427.08 | 2752.53 | 2517.48 | 2880.32 | 2787.41 | 2713.90 | 2930.64 | 2370.78 | 2021.11 |

| | 1941 | 1942 | 1943 | 1944 | 1945 | 1946 | 1947 | 1948 | 1949 | 1950 | 1951 | 1952 | 1953 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 3462.08 | 3328.25 | 5104.65 | 5188.87 | 3960.74 | 4484.23 | 3797.61 | 4345.88 | 5051.98 | 4968.19 | 5532.61 | 4010.41 | 4482.58 |
| Febrero | 4480.73 | 4440.95 | 5158.88 | 5535.10 | 4978.42 | 5175.57 | 5260.91 | 5857.01 | 5584.44 | 5038.89 | 6794.90 | 5154.61 | 5259.42 |
| Marzo | 2395.58 | 3562.01 | 4521.28 | 3566.00 | 4145.43 | 4224.08 | 3726.73 | 4172.49 | 3714.71 | 4289.56 | 5221.56 | 3819.25 | 3406.83 |
| Abril | 2166.67 | 2102.93 | 2701.30 | 2246.33 | 2593.36 | 2392.71 | 2324.89 | 2374.92 | 2267.64 | 2607.19 | 2850.77 | 2195.73 | 2489.24 |
| Mayo | 1382.08 | 1635.75 | 1861.24 | 1758.82 | 1810.24 | 1743.38 | 1635.60 | 1634.54 | 1731.55 | 1984.83 | 1833.72 | 1549.88 | 1572.20 |
| Junio | 1044.53 | 1144.11 | 1271.15 | 1251.12 | 1341.33 | 1167.23 | 1332.95 | 1174.99 | 1279.58 | 1425.59 | 1180.52 | 1207.13 | 1155.13 |
| Julio | 782.14 | 843.96 | 995.80 | 842.05 | 826.61 | 812.71 | 856.00 | 922.86 | 894.73 | 1036.34 | 876.07 | 812.76 | 862.21 |
| Agosto | 733.67 | 842.11 | 779.91 | 791.87 | 793.72 | 684.37 | 682.46 | 788.15 | 742.02 | 860.86 | 735.95 | 811.18 | 468.57 |
| Septiembre | 677.53 | 913.91 | 768.49 | 796.66 | 899.73 | 734.39 | 846.90 | 797.25 | 748.33 | 1049.42 | 857.12 | 901.90 | 831.14 |
| Octubre | 789.01 | 1033.06 | 1102.50 | 954.51 | 1089.63 | 954.12 | 1153.78 | 1075.49 | 1029.57 | 1258.88 | 967.00 | 1093.46 | 1031.62 |
| Noviembre | 1161.28 | 1544.69 | 1576.39 | 1537.97 | 1648.23 | 1382.95 | 1599.49 | 1380.27 | 1415.63 | 1639.83 | 1458.23 | 1390.50 | 1155.76 |
| Diciembre | 2385.73 | 2954.80 | 2861.97 | 2737.03 | 2921.60 | 2165.97 | 2971.70 | 2489.70 | 2776.21 | 2913.75 | 2465.51 | 2606.92 | 2322.16 |

Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1876 – 1967, estación Rurrenabaque (m³/s).

| | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 | 1960 | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 4394.03 | 4498.46 | 5485.00 | 5544.42 | 4290.21 | 4297.37 | 4976.81 | 4400.10 | 4189.52 | 5231.67 | 3743.20 | 5333.16 | 3779.86 |
| Febrero | 5219.01 | 5619.72 | 7268.16 | 5482.36 | 4303.63 | 5064.35 | 6681.61 | 5754.39 | 5773.91 | 5622.32 | 4424.00 | 5476.09 | 3933.79 |
| Marzo | 3814.17 | 4458.44 | 4357.80 | 4383.24 | 3783.82 | 3673.06 | 4299.54 | 4233.59 | 4880.91 | 4005.01 | 3443.78 | 3814.61 | 4006.42 |
| Abril | 2608.11 | 2345.82 | 2746.59 | 2581.77 | 1972.40 | 2204.61 | 2466.68 | 2411.66 | 2866.26 | 2683.62 | 2358.05 | 2347.54 | 2125.23 |
| Mayo | 1629.28 | 1944.95 | 1896.72 | 1640.22 | 1561.82 | 1442.62 | 1658.56 | 1768.04 | 1782.86 | 1731.77 | 1701.20 | 1706.20 | 1600.87 |
| Junio | 1206.58 | 1261.50 | 1334.54 | 1197.69 | 1189.35 | 1313.16 | 1275.99 | 942.13 | 1204.66 | 1271.98 | 1318.19 | 1207.55 | 1026.34 |
| Julio | 960.57 | 890.62 | 988.43 | 877.78 | 891.83 | 939.56 | 966.44 | 982.07 | 911.63 | 931.07 | 989.25 | 762.05 | 821.47 |
| Agosto | 826.49 | 884.41 | 905.42 | 674.74 | 710.80 | 804.73 | 826.94 | 812.02 | 867.40 | 795.02 | 796.43 | 783.99 | 704.13 |
| Septiembre | 819.31 | 975.39 | 948.86 | 819.52 | 832.84 | 773.21 | 809.01 | 810.39 | 882.48 | 751.37 | 897.42 | 704.47 | 838.51 |
| Octubre | 1111.73 | 1257.84 | 1179.68 | 1048.86 | 1085.09 | 1000.22 | 1110.63 | 1077.31 | 1055.87 | 1049.69 | 1132.31 | 751.75 | 1041.38 |
| Noviembre | 1635.26 | 1687.92 | 1606.10 | 1308.12 | 1577.22 | 1398.60 | 1576.23 | 1481.46 | 1530.52 | 1436.54 | 1672.75 | 1276.70 | 1494.11 |
| Diciembre | 2808.15 | 3085.68 | 2754.76 | 2391.14 | 2600.80 | 2702.12 | 2861.55 | 2693.97 | 2857.71 | 2514.17 | 3078.02 | 2248.05 | 2599.16 |

| | 1967 |
|------------|---------|
| Enero | 4254.47 |
| Febrero | 5270.77 |
| Marzo | 3759.41 |
| Abril | 2736.10 |
| Mayo | 1778.00 |
| Junio | 1140.47 |
| Julio | 771.11 |
| Agosto | 536.46 |
| Septiembre | |
| Octubre | |
| Noviembre | |
| Diciembre | |

Anexo 2. Serie de caudal mensual reconstruidos para el periodo 09/1967 – 08/2003, Estación Peñas Amarillas.

Serie de caudal mensual reconstruida (09/1967 – 08/2003) en relación a la serie de caudales observados (03/2003 – 09/2016) en la estación Peñas Amarillas.

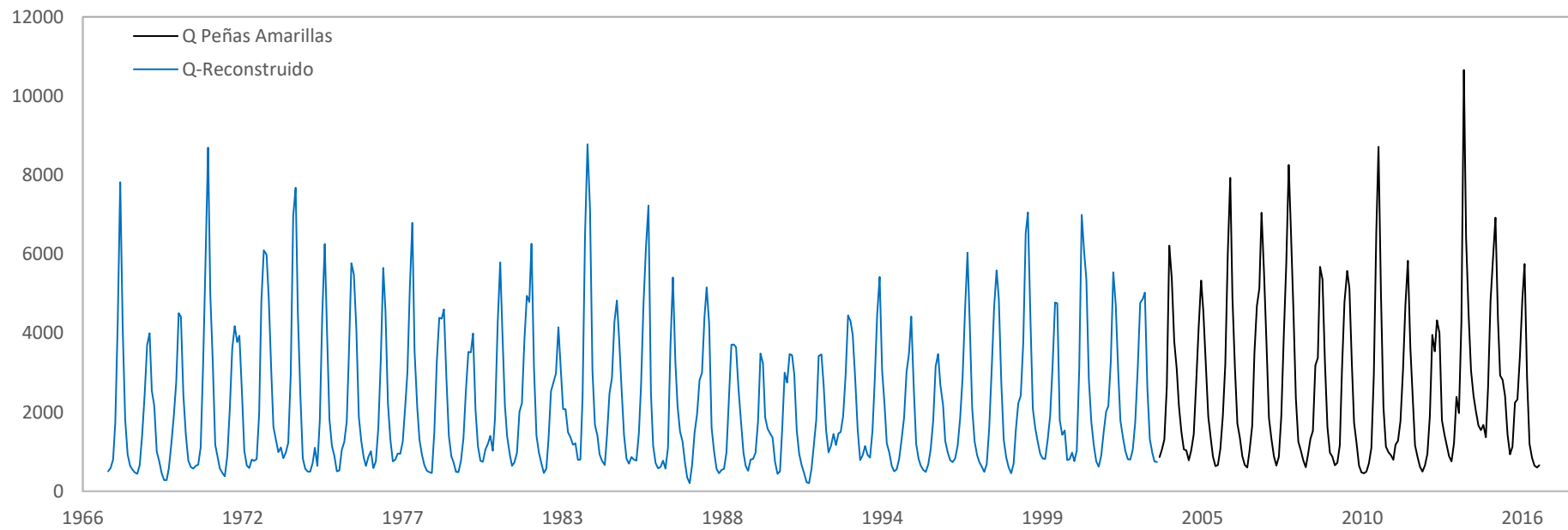


Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1967 – 2003, estación Peñas Amarillas (m³/s).

| | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | | 4309.11 | 3696.53 | 2761.33 | 5932.33 | 4178.47 | 6093.03 | 6966.28 | 4499.24 | 5767.63 | 3319.43 | 5176.26 | 4388.97 |
| Febrero | | 7818.08 | 3995.23 | 4507.29 | 8693.82 | 3774.53 | 5984.71 | 7678.09 | 6252.61 | 5483.58 | 5650.04 | 6790.67 | 4367.79 |
| Marzo | | 4133.57 | 2546.70 | 4416.42 | 4999.38 | 3932.22 | 4887.26 | 4501.95 | 4097.49 | 4112.43 | 4573.23 | 3544.69 | 4605.28 |
| Abril | | 1820.40 | 2159.98 | 2432.59 | 3290.90 | 2553.70 | 3061.18 | 2463.12 | 1822.51 | 1883.42 | 2233.11 | 2100.33 | 2869.81 |
| Mayo | | 925.85 | 1007.32 | 1430.28 | 1178.77 | 1021.44 | 1629.02 | 831.27 | 1147.09 | 1268.23 | 1300.75 | 1303.60 | 1396.81 |
| Junio | | 645.06 | 758.57 | 772.54 | 858.99 | 650.37 | 1303.62 | 566.46 | 894.42 | 850.06 | 752.72 | 919.63 | 888.55 |
| Julio | | 551.19 | 454.15 | 612.74 | 575.92 | 589.48 | 989.20 | 494.24 | 503.82 | 640.97 | 801.19 | 657.73 | 731.28 |
| Agosto | | 477.77 | 282.48 | 575.65 | 459.54 | 801.61 | 1105.65 | 496.89 | 523.22 | 874.58 | 955.36 | 518.84 | 491.72 |
| Septiembre | 501.57 | 442.33 | 283.26 | 641.75 | 380.64 | 767.92 | 834.70 | 722.62 | 1047.52 | 1009.24 | 951.24 | 481.60 | 482.55 |
| Octubre | 585.74 | 663.82 | 582.54 | 673.90 | 890.11 | 814.18 | 975.00 | 1102.87 | 1245.42 | 588.79 | 1255.87 | 465.41 | 770.29 |
| Noviembre | 805.64 | 1436.58 | 1184.64 | 1111.38 | 2066.68 | 1972.94 | 1227.71 | 644.01 | 1762.13 | 757.13 | 2144.35 | 1500.47 | 1329.53 |
| Diciembre | 1734.56 | 2450.58 | 1891.21 | 3225.30 | 3607.17 | 4795.54 | 2943.91 | 1799.68 | 3504.97 | 1601.80 | 3005.52 | 3269.59 | 2539.71 |

| | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 3522.29 | 4283.45 | 4939.54 | 2986.40 | 6507.42 | 4281.52 | 4752.79 | 5408.91 | 2997.69 | 3709.50 | 3485.35 | 3469.88 | 3418.98 |
| Febrero | 3514.13 | 5787.94 | 4787.61 | 4148.29 | 8779.71 | 4823.83 | 6184.43 | 3278.66 | 4411.10 | 3716.43 | 3230.89 | 3440.47 | 3462.94 |
| Marzo | 3989.93 | 4008.85 | 6260.20 | 3162.94 | 7148.02 | 3871.25 | 7226.89 | 2150.24 | 5155.96 | 3642.81 | 1874.42 | 2961.55 | 2690.12 |
| Abril | 2066.74 | 2182.47 | 3130.99 | 2077.90 | 3051.82 | 2594.90 | 2474.74 | 1514.22 | 4241.41 | 2583.00 | 1577.80 | 1543.44 | 1540.86 |
| Mayo | 1135.60 | 1400.89 | 1404.53 | 2075.97 | 1680.78 | 1423.63 | 1157.82 | 1260.34 | 1601.98 | 1764.98 | 1463.35 | 944.71 | 983.52 |
| Junio | 769.26 | 929.37 | 976.89 | 1493.24 | 1409.38 | 822.54 | 715.47 | 729.96 | 1007.40 | 979.28 | 1356.19 | 659.86 | 1155.46 |
| Julio | 744.75 | 642.23 | 704.25 | 1362.29 | 933.48 | 701.28 | 581.97 | 354.65 | 567.59 | 643.89 | 747.49 | 456.83 | 1445.78 |
| Agosto | 1054.47 | 731.38 | 459.15 | 1176.55 | 768.62 | 866.01 | 616.31 | 204.44 | 452.40 | 519.75 | 443.99 | 226.42 | 1168.87 |
| Septiembre | 1197.35 | 976.85 | 574.92 | 1210.11 | 667.30 | 806.34 | 773.36 | 672.75 | 537.58 | 805.30 | 505.06 | 206.65 | 1461.66 |
| Octubre | 1397.49 | 2006.69 | 1334.17 | 794.88 | 1421.13 | 778.56 | 576.82 | 1482.96 | 566.94 | 818.78 | 1552.36 | 572.56 | 1494.95 |
| Noviembre | 1025.19 | 2228.56 | 2533.90 | 802.58 | 2478.73 | 1462.06 | 1101.10 | 1951.47 | 977.87 | 979.23 | 2999.77 | 1220.96 | 1898.42 |
| Diciembre | 1843.08 | 3805.50 | 2757.08 | 2387.80 | 2867.91 | 2687.17 | 3667.51 | 2808.87 | 2339.18 | 1759.26 | 2748.78 | 1796.08 | 2928.30 |

Tabla de caudales mensuales reconstruidos para el periodo 1967 – 2003, estación Peñas Amarillas (m³/s).

| | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Enero | 4447.16 | 4472.92 | 3016.90 | 3156.15 | 4583.19 | 4662.24 | 3748.17 | 3188.79 | 6993.67 | 3287.64 | 4771.79 |
| Febrero | 4301.09 | 5421.58 | 3490.32 | 3467.37 | 6035.16 | 5588.71 | 6524.80 | 4777.90 | 6040.18 | 5537.66 | 4857.17 |
| Marzo | 3949.42 | 3062.76 | 4422.99 | 2697.53 | 4284.83 | 4871.42 | 7053.03 | 4753.25 | 5353.24 | 4707.06 | 5024.21 |
| Abril | 2846.99 | 2174.70 | 2671.15 | 2178.83 | 2106.24 | 2766.38 | 4414.07 | 1797.92 | 2826.70 | 3014.81 | 2627.87 |
| Mayo | 1559.06 | 1210.31 | 1199.34 | 1265.75 | 1251.00 | 1304.25 | 2089.30 | 1425.76 | 1753.77 | 1781.23 | 1323.22 |
| Junio | 786.58 | 985.58 | 815.68 | 980.43 | 911.66 | 861.39 | 1584.60 | 1542.07 | 1167.48 | 1375.57 | 978.15 |
| Julio | 906.38 | 640.45 | 642.06 | 779.63 | 739.09 | 600.05 | 1245.70 | 791.12 | 752.83 | 1018.10 | 756.81 |
| Agosto | 1146.02 | 507.42 | 535.76 | 739.66 | 625.38 | 457.00 | 942.78 | 812.14 | 620.13 | 812.47 | 738.54 |
| Septiembre | 922.83 | 551.76 | 490.09 | 828.65 | 487.99 | 698.09 | 828.24 | 975.91 | 898.86 | 806.29 | |
| Octubre | 848.70 | 816.13 | 681.23 | 1148.72 | 683.80 | 1547.57 | 820.07 | 761.56 | 1498.58 | 1051.81 | |
| Noviembre | 1537.08 | 1313.22 | 1069.43 | 1830.80 | 1591.17 | 2230.12 | 1303.80 | 1026.81 | 2016.82 | 1755.90 | |
| Diciembre | 2789.01 | 1864.27 | 1782.07 | 2861.69 | 3058.23 | 2417.99 | 1904.68 | 3106.78 | 2155.40 | 3103.69 | |