



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Predicción hidrológica estacional en la amazonía mediante  
integración de datos satelitales y de reanálisis. Cuenca del  
río Negro, Brasil

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Ccoscco Pacheco, Honorio

Tutor/a: Pérez Martín, Miguel Ángel

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

**Trabajo Fin de Máster**

*PREDICCIÓN HIDROLÓGICA  
ESTACIONAL EN LA AMAZONÍA  
MEDIANTE INTEGRACIÓN DE DATOS  
SATELITALES Y DE REANÁLISIS.  
CUENCA DEL RIO NEGRO, BRASIL.*

**Intensificación:**

*SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

**Autor:**

*HONORIO, CCOSCCO PACHECO*

**Tutor:**

*DR. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN*

**JUNIO, 2025**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Predicción hidrológica estacional en la Amazonía mediante integración de datos satelitales y de reanálisis. Cuenca del río Negro, Brasil.

**Título del TFM en Inglés:** Seasonal hydrological prediction in Amazonia by integration of satellite and reanalysis data. Negro river basin, Brazil.

**Título del TFM en Valenciano:** Predicció hidrològica estacional en la Amazonía mitjançant integració de dades satel·litàries i de reanàlisis. Cuenca del riu Negro, el Brasil.

**Alumno:** Honorio Ccoscco Pacheco

**Tutor:** DR. Miguel Ángel Pérez Martín

**Cotutor/es:**

**Director experimental:**

**Fecha de Lectura:** Junio, 2025

### Resumen

#### En español:

En los últimos años, la Amazonía ha experimentado una intensificación de las sequías, impulsada por una combinación de factores climáticos naturales y actividades humanas. Estas condiciones extremas han generado impactos hidrológicos y socioeconómicos significativos, especialmente en la cuenca del río Negro, en Brasil. La sequía de 2023 y 2024 registró los niveles más bajos del río en 122 años, lo que provocó una crisis en la navegabilidad y afectó directamente el abastecimiento industrial del puerto, así como el normal desarrollo de las actividades de las comunidades ribereñas en la zona de la franja de Manaus. Estas condiciones generaron pérdidas de más de 216 millones de euros solo durante la sequía de 2023.

Con la finalidad de anticiparse a este tipo de eventos extremos y reducir sus impactos, en este estudio se presenta una metodología aplicable a cualquier cuenca o río del mundo. Esta permite, por un lado, integrar datos satelitales y de reanálisis climático en la modelación hidrológica para la gestión de recursos hídricos, especialmente en cuencas con limitada cobertura observacional, y por otro, desarrollar una metodología de predicción hidrológica basada en el estado inicial de la cuenca y la integración de anomalías climáticas derivadas de datos del ECMWF. Esto permite estimar caudales y niveles futuros del río.

Para ello, en primer lugar, se validaron distintas fuentes climáticas, tanto satelitales como de reanálisis, seleccionando aquellas que mostraron un alto desempeño frente a los datos observacionales. Posteriormente, se implementó el modelo hidrológico Témez bajo un esquema semi-agregado, generando caudales medios mensuales simulados con resultados

buenos y excelentes según los indicadores de ajuste. Finalmente, se desarrolló la predicción hidrológica mediante la integración de anomalías climáticas derivadas de los pronósticos del ECMWF, lo que permitió estimar los niveles futuros del río en el puerto de Manaus.

Se concluye que los datos de precipitación provenientes de CHIRPS y los de temperatura del NOAA CPC presentan el mejor desempeño en la región de estudio. En este contexto, la integración de datos satelitales y de reanálisis se consolida como una fuente de información valiosa para los procesos de modelación y predicción hidrológica, permitiendo obtener resultados satisfactorios.

Para la sequía de 2024, los resultados evidenciaron una capacidad predictiva aceptable tanto para el clima como para los caudales en los dos casos analizados, lo que indica que la fuente de predicción climática (ECMWF) estima adecuadamente las condiciones en esta región de la Amazonía. En contraste, los niveles no se lograron representar de manera precisa durante los periodos de sequía extrema (octubre–noviembre), debido al comportamiento hidráulico entre el río Negro y río Amazonas, pues este último influye hidráulicamente en Manaus.

Por otra parte, el modelo Témez puede ser empleado en la modelación de grandes cuencas, siempre que se consideren ciertos criterios, como el tratamiento del routing. La predicción climática e hidrológica ha mostrado un buen desempeño en ambos casos analizados, independientemente de la ventana temporal utilizada, es necesario evaluar distintas fuentes de pronóstico climático, analizar su sensibilidad frente a diferentes condiciones iniciales del modelo y realizar predicciones basadas en condiciones iniciales históricas.

Asimismo, se recomienda realizar estudios hidráulicos para comprender mejor el fenómeno y con desarrollar una metodología de predicción más robusta y fiable.

### **En valenciano:**

En els últims anys, la \*Amazonía ha experimentat una intensificació de les sequeres, impulsada per una combinació de factors climàtics naturals i activitats humanes. Estes condicions extremes han generat impactes hidrològics i socioeconòmics significatius, especialment en la conca del riu Negre, al Brasil. La sequera de 2023 i 2024 va registrar els nivells més baixos del riu en 122 anys, la qual cosa va provocar una crisi en la navegabilitat i va afectar directament el proveïment industrial del port, així com el normal desenrotllament de les activitats de les comunitats riberenques en la zona de la franja de \*Manaus. Estes condicions van generar pèrdues de més de 216 milions d'euros sol durant la sequera de 2023.

Amb la finalitat d'anticipar-se a esta mena d'esdeveniments extrems i reduir els seus impactes, en este estudi es presenta una metodologia aplicable a qualsevol conca o riu del món. Esta permet, d'una banda, integrar dades satel·litàries i de reanàlisi climàtica en el modelatge hidrològic per a la gestió de recursos hídrics, especialment en conques amb limitada cobertura observacional, i per un altre, desenrotllar una metodologia de predicció hidrològica basada en l'estat inicial de la conca i la integració d'anomalies climàtiques derivades de dades del \*ECMWF. Això permet estimar cabals i nivells futurs del riu.

Per a això, en primer lloc, es van validar diferents fonts climàtiques, tant satel·litàries com de reanàlisis, seleccionant aquelles que van mostrar un alt acompliment enfront de les dades observacionals. Posteriorment, es va implementar el model hidrològic \*Témez sota un esquema \*semi-agregat, generant cabals mitjans mensuals simulats amb resultats bons i

excel·lents segons els indicadors d'ajust. Finalment, es va desenrotllar la predicció hidrològica mitjançant la integració d'anomalies climàtiques derivades dels pronòstics del \*ECMWF, la qual cosa va permetre estimar els nivells futurs del riu en el port de \*Manaus.

Es conclou que les dades de precipitació provinents de \*CHIRPS i els de temperatura del \*NOAA \*CPC presenten el millor acompliment a la regió d'estudi. En este context, la integració de dades satel·litàries i de reanàlisis es consolida com una font d'informació valuosa per als processos de modelatge i predicció hidrològica, permetent obtindre resultats satisfactoris.

Per a la sequera de 2024, els resultats van evidenciar una capacitat predictiva acceptable tant per al clima com per als cabals en els dos casos analitzats, la qual cosa indica que la font de predicció climàtica (\*ECMWF) estima adequadament les condicions en esta regió de la \*Amazonia. En contrast, els nivells no es van aconseguir representar de manera precisa durant els períodes de sequera extrema (octubre–novembre), a causa del comportament hidràulic entre el riu Negre i riu Amazonas, perquè este últim influïx hidràulicament en \*Manaus.

D'altra banda, el model \*Témez pot ser emprat en el modelatge de grans conques, sempre que es consideren uns certs criteris, com el tractament del \*routing. La predicció climàtica i hidrològica ha mostrat un bon acompliment en els dos casos analitzats, independentment de la finestra temporal utilitzada, és necessari avaluar diferents fonts de pronòstic climàtic, analitzar la seua sensibilitat enfront de diferents condicions inicials del model i realitzar prediccions basades en condicions inicials històriques.

Així mateix, es recomana realitzar estudis hidràulics per a comprendre millor el fenomen i amb desenrotllar una metodologia de predicció més robusta i fiable.

### **En inglés:**

In recent years, the Amazon has experienced an intensification of droughts, driven by a combination of natural climatic factors and human activities. These extreme conditions have generated significant hydrological and socioeconomic impacts, especially in the Negro River basin in Brazil. The drought of 2023 and 2024 recorded the lowest river levels in 122 years, which caused a crisis in navigability and directly affected the industrial supply of the port, as well as the normal development of the activities of the riparian communities in the area of the Manaus strip. These conditions generated losses of more than 216 million euros during the 2023 drought alone.

In order to anticipate this type of extreme events and reduce their impacts, this study presents a methodology applicable to any basin or river in the world. This allows, on the one hand, to integrate satellite and climate reanalysis data in hydrological modeling for water resources management, especially in basins with limited observational coverage, and on the other hand, to develop a hydrological prediction methodology based on the initial state of the basin and the integration of climate anomalies derived from ECMWF data. This allows estimating future river flows and levels.

First, different climate sources, both satellite and reanalysis, were validated, selecting those that showed a high performance compared to observational data. Subsequently, the Témez hydrological model was implemented under a semi-aggregated scheme, generating simulated monthly mean flows with good and excellent results according to the adjustment indicators. Finally, the hydrological prediction was developed by integrating climatic anomalies derived from ECMWF forecasts, which allowed estimating future river levels in the port of Manaus.

It is concluded that precipitation data from CHIRPS and temperature data from NOAA CPC present the best performance in the study region. In this context, the integration of satellite and reanalysis data is consolidated as a valuable source of information for hydrological modeling and prediction processes, allowing satisfactory results to be obtained.

For the 2024 drought, the results showed an acceptable predictive capacity for both climate and flows in the two cases analyzed, indicating that the climate prediction source (ECMWF) adequately estimates the conditions in this region of the Amazon. In contrast, the levels were not accurately represented during periods of extreme drought (October-November), due to the hydraulic behavior between the Negro River and the Amazon River, since the latter hydraulically influences Manaus.

On the other hand, the Témez model can be used in the modeling of large basins, provided that certain criteria are considered, such as the treatment of routing. The climatic and hydrological prediction has shown good performance in both cases analyzed, regardless of the time window used, it is necessary to evaluate different sources of climate forecasts, analyze their sensitivity to different initial conditions of the model and make predictions based on historical initial conditions.

It is also recommended that hydraulic studies be carried out to better understand the phenomenon and develop a more robust and reliable prediction methodology.

**Palabras clave español:** Modelación Hidrológica, Predicción Hidrológica, Sequías, Cuenca Amazonas, Reanálisis.

**Palabras clave valenciano:** Modelatge Hidrològic, Predicció Hidrològica, Sequeres, Conca Amazones, Reanàlisis.

**Palabras clave inglés:** Hydrological Modeling, Hydrological Forecasting, Droughts, Amazon basin, Reanalysis.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## ÍNDICE RESUMIDO

|     |                                                              |    |
|-----|--------------------------------------------------------------|----|
| 1   | INTRODUCCIÓN.....                                            | 1  |
| 2   | ÁMBITO DE ESTUDIO .....                                      | 3  |
| 2.1 | Características de la cuenca del Amazonas .....              | 3  |
| 2.2 | Características de la cuenca del río Negro .....             | 4  |
| 3   | ANTECEDENTES.....                                            | 7  |
| 3.1 | Sequías en el Amazonas .....                                 | 7  |
| 3.2 | Datos meteorológicos observados .....                        | 13 |
| 3.3 | Datos satelitales .....                                      | 18 |
| 3.4 | Información de reanálisis .....                              | 21 |
| 3.5 | Modelos hidrológicos .....                                   | 27 |
| 3.6 | Predicción hidrológica estacional .....                      | 29 |
| 4   | METODOLOGÍA.....                                             | 33 |
| 4.1 | Búsqueda de la mejor información satelital y reanálisis..... | 34 |
| 4.2 | Modelación hidrológica.....                                  | 35 |
| 4.3 | Metodología de predicción hidrológica .....                  | 36 |
| 5   | APLICACIÓN Y RESULTADOS .....                                | 39 |
| 5.1 | Búsqueda del mejor dato satelital y reanálisis.....          | 39 |
| 5.2 | Modelación hidrológica.....                                  | 57 |
| 5.3 | Predicción hidrológica estacional .....                      | 82 |
| 6   | CONCLUSIONES.....                                            | 91 |
| 7   | LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....                         | 94 |



|   |                  |    |
|---|------------------|----|
| 8 | REFERENCIAS..... | 97 |
|---|------------------|----|

## ÍNDICE DETALLADO

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN.....                                | 1  |
| 2     | ÁMBITO DE ESTUDIO .....                          | 3  |
| 2.1   | Características de la cuenca del Amazonas .....  | 3  |
| 2.2   | Características de la cuenca del río Negro ..... | 4  |
| 3     | ANTECEDENTES.....                                | 7  |
| 3.1   | Sequías en el Amazonas .....                     | 7  |
| 3.1.1 | Sequías en la cuenca del Amazonas.....           | 7  |
| 3.1.2 | Sequías en la cuenca del río Negro .....         | 9  |
| 3.2   | Datos meteorológicos observados .....            | 13 |
| 3.2.1 | Bolivia .....                                    | 15 |
| 3.2.2 | Brasil.....                                      | 15 |
| 3.2.3 | Colombia.....                                    | 16 |
| 3.2.4 | Ecuador .....                                    | 16 |
| 3.2.5 | Perú .....                                       | 17 |
| 3.3   | Datos satelitales .....                          | 18 |
| 3.3.1 | Chirps.....                                      | 20 |
| 3.4   | Información de reanálisis .....                  | 21 |
| 3.4.1 | CPC NOAA .....                                   | 22 |
| 3.4.2 | ERA5 .....                                       | 23 |
| 3.4.3 | ERA5-Land .....                                  | 23 |
| 3.4.4 | MERRA-2.....                                     | 24 |
| 3.4.5 | PERSIANN-CDR.....                                | 25 |
| 3.4.6 | TERRACLIMATE .....                               | 25 |



|       |                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 3.4.7 | HYBAM.....                                              | 26 |
| 3.5   | Modelos hidrológicos .....                              | 27 |
| 3.6   | Predicción hidrológica estacional .....                 | 29 |
| 4     | METODOLOGÍA.....                                        | 33 |
| 4.1   | Búsqueda de la mejor información satelital y reanálisis | 34 |
| 4.2   | Modelación hidrológica.....                             | 35 |
| 4.3   | Metodología de predicción hidrológica .....             | 36 |
| 5     | APLICACIÓN Y RESULTADOS .....                           | 39 |
| 5.1   | Búsqueda del mejor dato satelital y reanálisis.....     | 39 |
| 5.1.1 | Procesamiento de datos observados .....                 | 39 |
| 5.1.2 | Procesamiento de datos satelitales y reanálisis         | 47 |
| 5.1.3 | Validación de información satelitales y reanálisis      | 50 |
| 5.1.4 | Selección de la información satelital y reanálisis      | 51 |
| 5.2   | Modelación hidrológica.....                             | 57 |
| 5.2.1 | Cálculo de evapotranspiración potencial .....           | 58 |
| 5.2.2 | Construcción del modelo hidrológico .....               | 60 |
| 5.2.3 | Calibración del modelo .....                            | 62 |
| 5.2.4 | Balance hidrológico .....                               | 77 |
| 5.2.5 | Transformación de hidrología – hidráulica.....          | 79 |
| 5.3   | Predicción hidrológica estacional .....                 | 82 |
| 5.3.1 | Metodología aplicada .....                              | 82 |
| 5.3.2 | Predicción climática estacional .....                   | 83 |
| 5.3.3 | Predicción estacional de aportaciones .....             | 85 |
| 5.3.4 | Predicción de niveles .....                             | 86 |



|       |                                       |    |
|-------|---------------------------------------|----|
| 5.3.5 | Discusión de resultados.....          | 88 |
| 6     | CONCLUSIONES.....                     | 91 |
| 7     | LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN ..... | 94 |
| 8     | REFERENCIAS.....                      | 97 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1: Características de la cuenca del Amazonas.....                                                                                                                                                                                   | 4  |
| Figura 2-2: Características de la cuenca del Río Negro .....                                                                                                                                                                                 | 5  |
| Figura 3-1: Resumen gráfico sobre las sequías en el Amazonas.....                                                                                                                                                                            | 8  |
| Figura 3-2: Anomalías del TSM del Atlántico Tropical norte y sur (a y b), Anomalía de lluvia en norte y sur del Amazonas (c y d) y Anomalía en los niveles del río Negro y Amazonas (e y f). ...                                             | 8  |
| Figura 3-3: Niveles históricos del inundación y sequía (a) y niveles mensuales (b) en la estación de Manaus (puerto de Manaus).....                                                                                                          | 10 |
| Figura 3-4: Importaciones en el puerto de Manaus en Miles de Toneladas durante 2022-2024...                                                                                                                                                  | 11 |
| Figura 3-5: Balanza comercial e índice de quantum de importaciones en el estado de Amazonas. ....                                                                                                                                            | 12 |
| Figura 3-6: Accesos principales al puerto de Manaus .....                                                                                                                                                                                    | 13 |
| Figura 3-7: Instituciones que administran datos en cada País de cuenca del Amazonas .....                                                                                                                                                    | 14 |
| Figura 3-8: Diagrama de la constelación de satélites GPM a principios de 2019 .....                                                                                                                                                          | 18 |
| Figura 3-9: Geometría de sensores del GPM-CORE .....                                                                                                                                                                                         | 19 |
| Figura 3-10: Metodología de generación de datos de PERSIANN .....                                                                                                                                                                            | 22 |
| Figura 3-11: Modelación hidrológica de la cuenca del río Amazonas. Fuente: Adaptado de (Guimberteau, y otros, 2012).....                                                                                                                     | 27 |
| Figura 3-12: Caudales estimados y observados para tres estaciones de la cuenca amazónica peruana a) TRMM, b) CMORPH, c) PERSIANN.....                                                                                                        | 28 |
| Figura 3-13: Previsión de los niveles realizadas para la estación Manaus.....                                                                                                                                                                | 29 |
| Figura 3-14: Hidrograma de caudales observados y pronosticados por el modelo RNA4 para 21 días de anticipación, en la fase de calibración y validación (superior), detalle y gráfico de dispersión de la fase de validación (inferior).....  | 30 |
| Figura 3-15: Hidrograma de caudales observados y pronosticados por el modelo WRN12 para 30 días de anticipación, en la fase de calibración y validación (superior), detalle y gráfico de dispersión de la fase de validación (inferior)..... | 31 |
| Figura 4-1: Metodología general aplicada.....                                                                                                                                                                                                | 33 |
| Figura 4-2: Esquema representativo de búsqueda de información satelital y/o reanálisis.....                                                                                                                                                  | 34 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-3: Representación de la aplicación del modelo Témez semi-agregado .....                           | 35 |
| Figura 4-4: Metodología aplicada para la predicción hidrológica .....                                      | 37 |
| Figura 5-1: Resumen del procesado de datos observados .....                                                | 40 |
| Figura 5-2: Depuración y consolidación de estaciones meteorológicas .....                                  | 41 |
| Figura 5-3: Ejemplo de serie de datos diarios de precipitación con control de calidad.....                 | 42 |
| Figura 5-4: Series mensuales de precipitación de algunas estaciones analizadas .....                       | 44 |
| Figura 5-5: Dispersión y correlación de precipitación mensual de algunas estaciones analizadas .....       | 45 |
| Figura 5-6: Cantidad de datos de precipitación utilizados para la validación, por estación .....           | 46 |
| Figura 5-7: Cantidad de datos de temperatura utilizados para la validación, por estación .....             | 46 |
| Figura 5-8: Resumen del procesamiento de datos satelitales y reanálisis .....                              | 47 |
| Figura 5-9: Plataforma de procesamiento de datos Google Earth Engine (GEE) .....                           | 48 |
| Figura 5-10: Precipitación media anual en la cuenca del río Amazonas .....                                 | 49 |
| Figura 5-11: Serie temporal de precipitación para cada fuente de información.....                          | 50 |
| Figura 5-12: Cantidad de datos de precipitación utilizados para la validación, por estación y fuente ..... | 51 |
| Figura 5-13: Índice de NSE de precipitación para las estaciones validadas .....                            | 54 |
| Figura 5-14: Estadísticos de precipitación para las estaciones validadas .....                             | 55 |
| Figura 5-15: Estadístico RMSE de temperatura para las estaciones validadas .....                           | 56 |
| Figura 5-16: Estadísticos de temperatura para las estaciones validadas .....                               | 56 |
| Figura 5-17: Resumen del proceso de la modelación hidrológica.....                                         | 57 |
| Figura 5-18: Subcuencas del modelo hidrológico construido .....                                            | 60 |
| Figura 5-19: Esquema de flujos de almacenamiento y formulación matemática del modelo Témez .....           | 61 |
| Figura 5-20: Datos de entrada para el modelo hidrológico .....                                             | 62 |
| Figura 5-21: Ubicación de estaciones de aforo consideradas para el estudio .....                           | 63 |
| Figura 5-22: Caudales mensuales restituidos en Manaus.....                                                 | 64 |
| Figura 5-23: Caudales mensuales observados en la estación Serrinha .....                                   | 64 |
| Figura 5-24: Caudales mensuales observados en la estación Caracaraí .....                                  | 65 |
| Figura 5-25: Cobertura vegetal de las subcuencas del río Negro .....                                       | 65 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5-26: Características geológicas de las subcuencas del estudio .....                                                        | 66 |
| Figura 5-27: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Serrinha con Kc constante .....                               | 68 |
| Figura 5-28: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Serrinha con Kc constante .....            | 69 |
| Figura 5-29: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Caracaraí con Kc constante .....                              | 70 |
| Figura 5-30: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Caracaraí con Kc constante .....           | 71 |
| Figura 5-31: Valores de Kc obtenidos en la calibración .....                                                                       | 71 |
| Figura 5-32: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Serrinha con Kc variable                                      | 72 |
| Figura 5-33: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Serrinha con Kc variable .....             | 73 |
| Figura 5-34: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Caracaraí con Kc variable .....                               | 74 |
| Figura 5-35: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Caracaraí con Kc variable .....            | 74 |
| Figura 5-36: Aportaciones mensuales modelados en la Intercuenca río Negro con Kc constante                                         | 76 |
| Figura 5-37: Contraste de aportaciones mensuales restituidos vs modelados en la estación Manaus .....                              | 76 |
| Figura 5-38: Balance hidrológico .....                                                                                             | 78 |
| Figura 5-39: Aportaciones anuales simuladas por subcuenca .....                                                                    | 79 |
| Figura 5-40: Curva de descarga del río Negro, estación Manaus .....                                                                | 80 |
| Figura 5-41: Niveles simulados y observados en la estación Manaus .....                                                            | 81 |
| Figura 5-42: Metodología aplicada para la predicción hidrológica .....                                                             | 83 |
| Figura 5-43: Predicción climática estacional de precipitación, periodo junio – noviembre 2024 y agosto 2024 – enero 2025 .....     | 84 |
| Figura 5-44: Predicción climática estacional de temperatura media, periodo junio – noviembre 2024 y agosto 2024 – enero 2025 ..... | 84 |
| Figura 5-45: Predicción de aportaciones junio-noviembre 2024.....                                                                  | 85 |



|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5-46: Predicción de aportaciones agosto 2024-enero 2025.....                                                                                   | 86 |
| Figura 5-47: Predicción de niveles en Manaus periodo junio-noviembre del 2024 .....                                                                   | 87 |
| Figura 5-48: Predicción de niveles en Manaus periodo agosto 2024 – enero 2025 .....                                                                   | 88 |
| Figura 5-49: Correlación de los niveles en entre estaciones hidrométricas empleadas para la<br>restitución .....                                      | 90 |
| Figura 5-50: a) Vista en planta de la confluencia del río Negro con el río Amazonas. b) niveles<br>históricos en Jatuarana y Manaus (1981-2024) ..... | 90 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1: Productos satelitales y de reanálisis empleados en el estudio .....                                       | 21 |
| Tabla 5-1: Resultados de validación precipitación por estación, estadísticos RMSE y BIAS relativo .....              | 52 |
| Tabla 5-2: Resultados de validación temperatura por estación, estadísticos RMSE y BIAS relativo .....                | 52 |
| Tabla 5-3: Valores de Kc para algunos cultivos .....                                                                 | 59 |
| Tabla 5-4: Resumen de las características de las subcuencas para la calibración .....                                | 66 |
| Tabla 5-5: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con Kc constante .....       | 68 |
| Tabla 5-6: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Caracaraí con Kc constante .....      | 69 |
| Tabla 5-7: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con Kc variable .....        | 71 |
| Tabla 5-8: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con Kc variable .....        | 73 |
| Tabla 5-9: Principales características, parámetros y estadísticos de la Intercuenca río Negro con Kc constante ..... | 75 |
| Tabla 5-10: Resumen de los parámetros de cada subcuenca.....                                                         | 76 |

# 1 INTRODUCCIÓN

La cuenca del Amazonas representa el sistema hidrográfico más extenso y caudaloso del planeta, caracterizado por su complejidad climática e hidrológica, especialmente en su sector andino, que abarca partes de Bolivia, Perú y Ecuador. Esta cuenca recibe una precipitación media anual de aproximadamente 2,190 mm ( $\pm 7\%$ ) y una evapotranspiración cercana a los 1,220 mm ( $\pm 15\%$ ), lo que da lugar a un flujo de escorrentía estimado en 6,938 km<sup>3</sup> por año (Costa MH, y otros, 2021). Estos valores reflejan un ciclo hidrológico altamente activo y complejo, influenciado por la dinámica atmosférica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el transporte de humedad desde el océano Atlántico y la topografía de los Andes, que actúa como una barrera orográfica clave en la redistribución del vapor de agua (RAM, 2002; Yang & Domínguez, 2019).

La cuenca del río Negro, ubicada en el noroeste de la cuenca del río Amazonas, es uno de sus principales afluentes y posee características hidrológicas de gran relevancia. Con una superficie aproximada de 711,342 km<sup>2</sup> y una producción hídrica anual estimada en 1,000 km<sup>3</sup>. Esta cuenca supera ampliamente los valores de referencia de otros países como España que posee una aportación media anual 111 km<sup>3</sup> de (MITECO, 2025). A pesar de que la superficie de la cuenca es solo 1.5 veces que el territorio español. Dentro de esta cuenca se localiza el puerto de Manaus, un punto logístico esencial para la actividad económica regional, cuya operatividad depende estrechamente del nivel del río.

En los últimos años, la región amazónica ha experimentado eventos de sequía severa, vinculados principalmente a la influencia del fenómeno El Niño y al calentamiento del Atlántico Norte, exacerbados por factores antrópicos como la deforestación y el cambio de uso de suelo (Satyamurty et al., 2013b; Marengo & Espinoza, 2016; Costa et al., 2024). Durante las sequías de 2023 y 2024, se registraron niveles históricamente bajos del río Negro en Manaus, alcanzando los 12.1 m en noviembre de 2024, el nivel más bajo en 122 años (SGB, 2024a). Estas condiciones provocaron una crisis en la navegación, el aislamiento de comunidades, daños ecológicos, un aumento en los precios de los productos, la interrupción de actividades comerciales locales e industriales (Santos Alves et al., 2024; IHU, 2023a; IHU, 2023b). Según el Centro de Industrias del Estado de Amazonas (CIEAM) las pérdidas industriales se estimaron en más de 216,5 millones de euros solo en el 2023. Estas pérdidas se deben principalmente a la imposibilidad de acceso de

grandes embarcaciones con calados iguales o superiores a 7 metros, ya que no pueden ingresar al puerto cuando el nivel del río se encuentra por debajo de los 13.5 metros (Cullell, 2023).

En este contexto de creciente vulnerabilidad climática, la disponibilidad limitada de datos hidrometeorológicos observacionales representa un obstáculo significativo para la gestión hídrica y la predicción de eventos extremos. Frente a este desafío, los productos satelitales y los conjuntos de reanálisis ofrecen una alternativa viable para obtener información en zonas remotas (Climate Hazards Center, 2025; ECMWF, 2020), facilitando así el desarrollo de modelos hidrológicos y de predicción.

El presente estudio tiene como objetivo realizar la predicción hidrológica estacional utilizando datos satelitales y de reanálisis en la cuenca del río Negro, mediante la implementación del modelo conceptual Témez. La metodología se estructuró en tres fases: i) búsqueda de información satelital y/o de reanálisis; ii) modelación hidrológica en esquema semi agregado; y iii) predicción de caudales y niveles fluviales para horizontes de tres y seis meses, integrando anomalías climáticas a partir de las predicciones del ECMWF. Este enfoque busca realizar la predicción hidrológica estacional a partir de datos satelitales y/o de reanálisis, así como de pronósticos climáticos estacionales, y puede ser aplicado en cualquier parte del mundo.

## 2 ÁMBITO DE ESTUDIO

### 2.1 Características de la cuenca del Amazonas

La cuenca del Amazonas es un sistema hidrológico y climático de enorme complejidad y relevancia continental. Recibe una precipitación media anual de aproximadamente  $2,190 \pm 7\%$  mm, mientras que la evapotranspiración alcanza los  $1,220 \pm 15\%$  mm por año, lo que refleja un intenso ciclo de intercambio de agua entre la superficie y la atmósfera; este balance hídrico da lugar a un flujo anual de escorrentía que alcanza los  $6,938 \text{ km}^3$ , lo cual convierte al Amazonas en uno de los ríos más caudalosos del mundo (Costa MH, y otros, 2021). El vapor de agua es generado por la vegetación y los cuerpos de agua principalmente en zona de humedales y bosques de extensa cobertura, asciende y es transportado por los vientos hacia el oeste y sur de la cuenca, donde vuelve a precipitarse. Este proceso está fuertemente influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que tradicionalmente es un cinturón global de convergencia de vientos alisios del sur y de norte así generando gran actividad nubosa y convectiva (RAM, 2002). Este mismo fenómeno también hace que el vapor de agua del Atlántico se desplace hacia a la Amazonía. Tal como muestran (Costa MH, y otros, 2021) el vapor de agua del Atlántico ingresa al Amazonas y esta a su vez se mezcla con la evaporación de la cuenca, estos se desplazan hasta la cordillera de los Andes, cuya topografía actúa como una barrera física natural, desplazando los chorros de vapor hacia al sur.

De esta manera la humedad amazónica es exportada hacia otras regiones de Sudamérica por ejemplo hacia cuencas del territorio argentino, el sur de Brasil y otras zonas del Sur de la cuenca, impactando directamente en los patrones de lluvia en esos territorios (Yang & Dominguez, 2019).

En términos comparativos, la cuenca del Amazonas tiene una superficie más de 15 veces superior a la de España. Su aporte hídrico anual alcanza los  $6,938 \text{ km}^3/\text{año}$  (Costa MH, y otros, 2021). Mientras que en España la cifra es de tan solo  $111 \text{ km}^3/\text{año}$  (MITECO, 2025). Esto significa que el Amazonas no solo posee una mayor extensión territorial, sino que también es aproximadamente 63 veces más productiva en términos de generación de agua, a nivel de unidad de superficie esto se traduce en  $938 \text{ l/m}^2$  (Amazonas) y  $219 \text{ l/m}^2$  (España), es decir Amazonas tiene 4.3 veces de producción de agua por unidad de superficie, lo que subraya su importante capacidad de sostener

el ciclo hidrológico regional. En la Figura 2-1 se muestra las principales características hidrológicas y algunos factores que influyen en su clima, además datos comparativos calculados con respecto al territorio español.

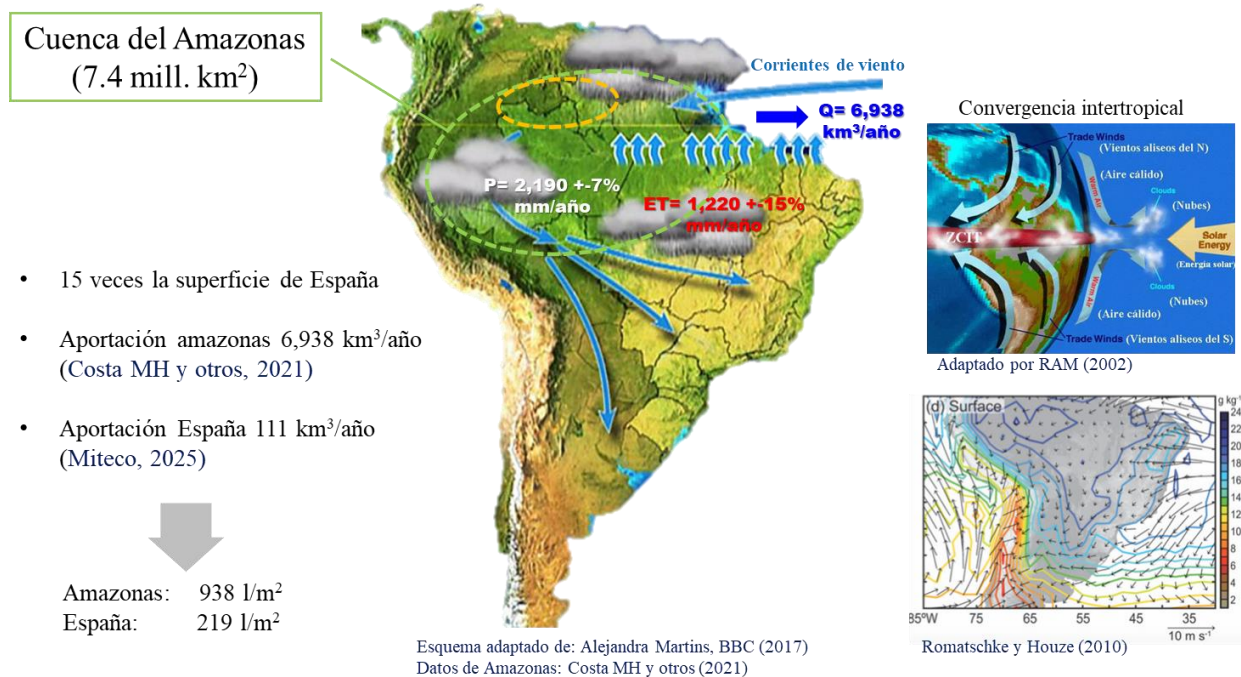


Figura 2-1: Características de la cuenca del Amazonas

## 2.2 Características de la cuenca del río Negro

La cuenca del río Negro, uno de los principales afluentes del sistema amazónico, presenta características hidrológicas y territoriales de gran relevancia dentro del contexto sudamericano. Su extensión territorial alcanza los 711,342 km<sup>2</sup>, lo que equivale aproximadamente a 1.5 veces la superficie de España, lo que la posiciona como una de las cuencas de mayor dimensión dentro del Amazonas. Esta amplitud territorial se refleja también en su extraordinaria capacidad hídrica, con una aportación media anual estimada en 1,000 km<sup>3</sup>. Cifra que supera ampliamente a la aportación hídrica de España, la cual se estima en 111 km<sup>3</sup>/año (Miteco, 2025).

En términos de generación de agua por unidad de superficie, la cuenca del río Negro alcanza un rendimiento anual de 1,470 litros por metro cuadrado (l/m<sup>2</sup>/año), frente a los 219 l/m<sup>2</sup>/año de España.

Desde una perspectiva geográfica y estratégica, la cuenca incluye en su territorio al puerto de Manaus, infraestructura fluvial clave para el transporte y la economía regional, cuya imagen se incorpora en la figura como ejemplo de la articulación entre los recursos naturales y la actividad humana. En cuanto a la población, se estima que habitan en la cuenca cerca de 3 millones de personas, de las cuales aproximadamente 2.1 millones se encuentran en territorio brasileño, de acuerdo con datos del Servicio Geológico de Brasil (SGB, 2025). En la Figura 2-2 se presenta la ubicación de la cuenca del río Negro dentro del sistema amazónico, así como sus principales características hidrológicas y una comparación de su producción de agua por unidad de superficie en relación con el territorio español.



Figura 2-2: Características de la cuenca del Río Negro

## 3 ANTECEDENTES

### 3.1 Sequías en el Amazonas

#### 3.1.1 Sequías en la cuenca del Amazonas

Como dice (Marengo, y otros, 2024) según Satyamurty y otros (2013b); Marengo y Espinoza (2016); Towner y otros (2021); Marengo y otros (2021) las sequías en el Amazonas están principalmente impulsadas por el fenómeno de El Niño y las temperaturas altas del océano Atlántico Norte. Esto se puede evidenciar en

Figura 3-2 donde se tiene las anomalías de las temperaturas del Atlántico Norte y Sur, la anomalía de las precipitaciones en la zona norte y sur de la Amazonía, así como la anomalía de los niveles del río Negro (Estación Manaus) y Río Amazonas (Estación Obidos), cuando las temperaturas del Atlántico Tropical Sur y Norte son altas se evidencian un descenso de los niveles de los ríos.

La Figura 3-1 elaborado por (Costa, y otros, 2024) ilustra de manera resumida el fenómeno de las sequías en el Amazonas, abordando tanto sus causas como sus múltiples consecuencias. En primer lugar, se identifican causas naturales, estos están representadas por anomalías climáticas, las cuales alteran los patrones de precipitación y contribuyen a la reducción de la disponibilidad hídrica. Asimismo, se destaca el peso de las causas antropogénicas, entre las que se incluyen el calentamiento global, los cambios de uso de suelo, la degradación forestal y la deforestación, procesos que intensifican la frecuencia y severidad de las sequías. El impacto de estos factores se manifiesta en una amplia gama de consecuencias ambientales, entre ellas los incendios forestales, las olas de calor, la disminución de los niveles de los ríos y la pérdida de cultivos. Estos efectos visibles son acompañados por graves repercusiones ecológicas, tales como la pérdida de carbono, la mortalidad de árboles y animales, y una reducción significativa de la biodiversidad. A nivel socioeconómico, se señala crisis hídrica, alimentaria y crisis en la navegación que es crítico en esta región, afectaciones a la salud pública y un deterioro general en las condiciones de vida de las poblaciones locales.

Durante la sequía del 2023 solo en la Amazonía de Brasil 62 municipios amazónicas fueron declarados en emergencia (alrededor de 600 mil personas) y muchas comunidades indígenas

fueron aislados (IHU, 2023a). Esta situación se agravó durante la sequía del 2024 que fue más severo que el año anterior.



Figura 3-1: Resumen gráfico sobre las sequías en el Amazonas

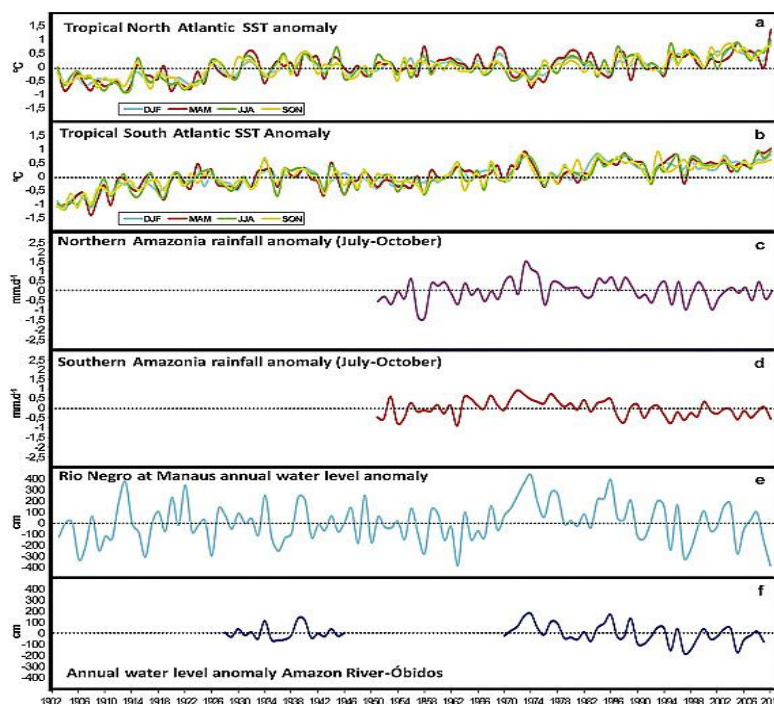


Figura 3-2: Anomalías del TSM del Atlántico Tropical norte y sur (a y b), Anomalía de lluvia en norte y sur del Amazonas (c y d) y Anomalía en los niveles del río Negro y Amazonas (e y f).

Fuente: Marengo & Espinoza (2015)

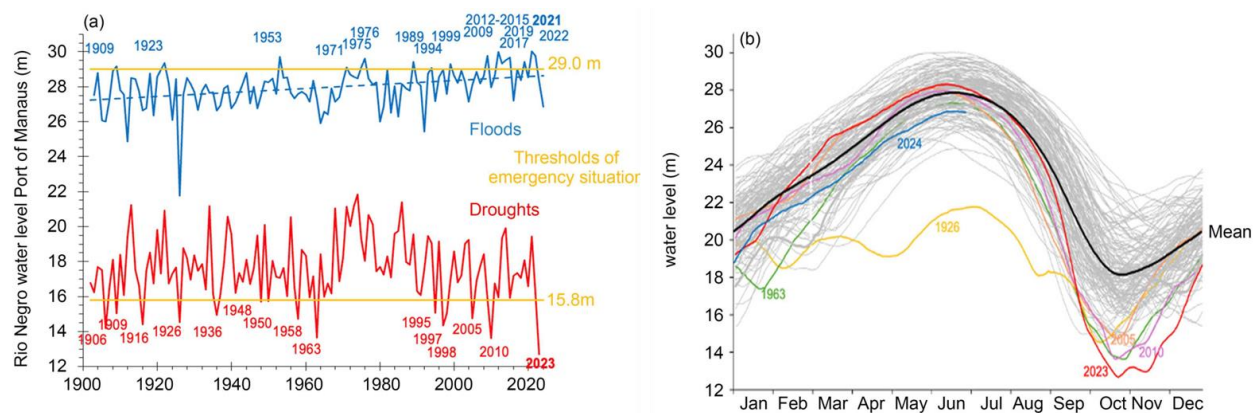
### ***3.1.2 Sequías en la cuenca del río Negro***

#### ***3.1.2.1 Impacto en el nivel de los ríos***

Históricamente, han ocurrido diversas sequías severas en esta zona de la Amazonía. Esto se puede ver reflejado en la Figura 3-3 b donde se muestra los niveles históricos del río Negro en el Puerto de Manaus, específicamente durante la sequía del 2023 los niveles del río fueron más bajos que los otros años (Marengo, y otros, 2024). Esta situación se agravó más durante la sequía de 2024, llegando a registrarse hasta 12.1 m el mes de noviembre (SGB, 2024a) que es el nivel más bajo registrado en 122 años.

La importancia de monitorear el nivel del río, especialmente en el puerto de Manaus, radica en su impacto directo sobre la navegación fluvial. Las grandes embarcaciones mercantes no pueden ingresar al puerto cuando el nivel es bajo. Tal como se reporta en (Cullell, 2023), las embarcaciones con un calado igual o superior a 7 metros ya no pueden acceder cuando el nivel del río es 13.5 m, lo cual genera consecuencias económicas significativas; habitualmente, Manaus mantiene una conexión fluvial activa con otros puertos del país, recibiendo entre 20 y 25 embarcaciones de gran tamaño al mes, esta frecuencia de tráfico es esencial para asegurar las actividades socioeconómicas en toda la cuenca, especialmente en Manaus donde la población supera los dos millones de habitantes y cuya logística comercial depende, en gran medida, del transporte por vía fluvial a través del río Amazonas.

En la Figura 3-3 se presentan los niveles del río Negro en la estación de Manaus durante eventos históricos de sequía e inundación, así como los umbrales de emergencia establecidos para ambos fenómenos. Además, se muestran los niveles mensuales históricos con una comparación específica para el año 2023.



*Figura 3-3: Niveles históricos del inundación y sequía (a) y niveles mensuales (b) en la estación de Manaus (puerto de Manaus)*

*Fuente: (Marengo, y otros, 2024)*

### 3.1.2.2 Impacto económico en Manaus

“La Zona Franca de Manaus es particularmente susceptible a eventos que perjudican su producción industrial debido a la precariedad del acceso vial y su fuerte dependencia de la navegación a través de la cuenca amazónica” (Santos Alves, Gomes de Carvalho, & Sganserla Torres, 2024).

Por ello durante la sequía severa del 2023 sufrió interrupciones en la recepción de insumos importados, especialmente electrónicos; el valor importado por el estado se redujo drásticamente debido a problemas en la navegación fluvial, que impidió la llegada de buques a los puertos amazónicos. Datos satelitales de PortWatch mostraron que entre el 10 de agosto y finales de septiembre solo se registró un buque en el puerto de Manaos, frente a 18 en el mismo período de 2022, esto elevó los costos logísticos y redujo la producción industrial debido a la escasez de materias primas (Santos Alves, Gomes de Carvalho, & Sganserla Torres, 2024). En la Figura 3-4 se puede observar cómo durante el periodo de sequía del 2023 las importaciones en miles de toneladas han bajado drásticamente.

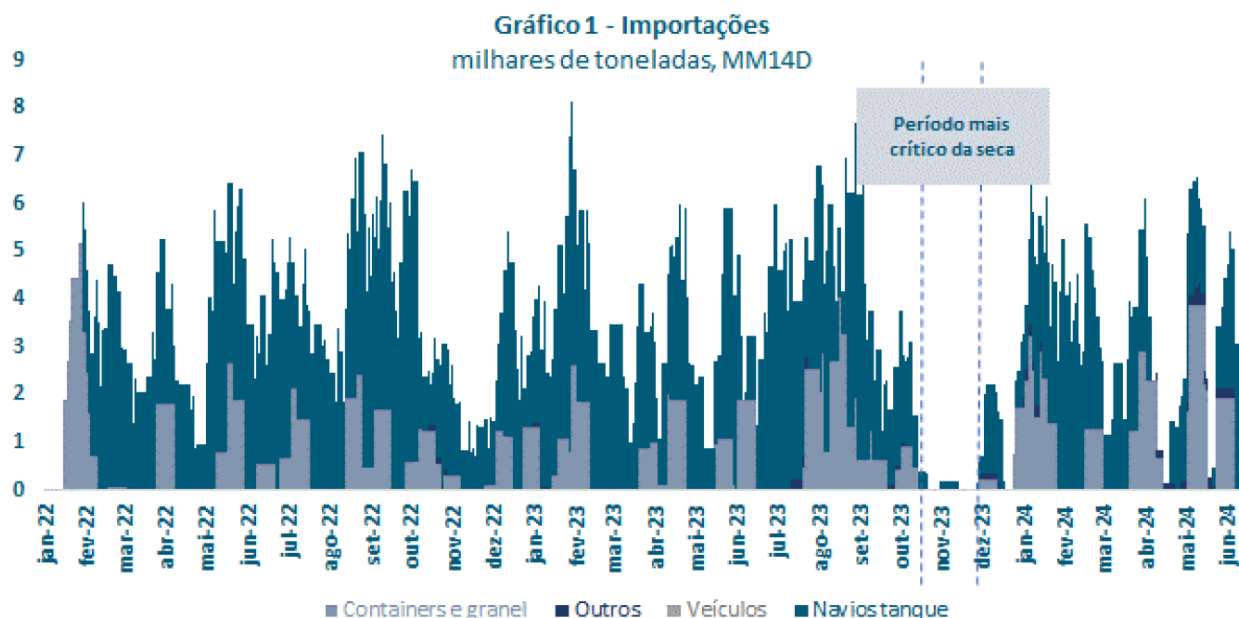


Figura 3-4: Importaciones en el puerto de Manaus en Miles de Toneladas durante 2022-2024.

Fuente: (Santos Alves, Gomes de Carvalho, & Sganserla Torres, 2024)

Por otra parte, el Centro de Industrias del Estado de Amazonas (CIEAM) estimó una pérdida aproximada de 216.5 Millones de euros debido a gastos logísticos extraordinarios ocasionados por la interrupción prolongada de la navegación fluvial, que afectó el abastecimiento de insumos en Manaus; además, registrándose una caída del 7,3% en el último trimestre de 2023, afectando principalmente sectores clave como productos electrónicos, maquinaria y vehículos. Esto solo durante la sequía del 2023, la sequía del 2024 fue aún más drástico. En la Figura 3-5 se muestra como durante la sequía del 2023 se vieron afectados las importaciones por vía marítimo, siendo esto la principal vía para actividades comerciales.

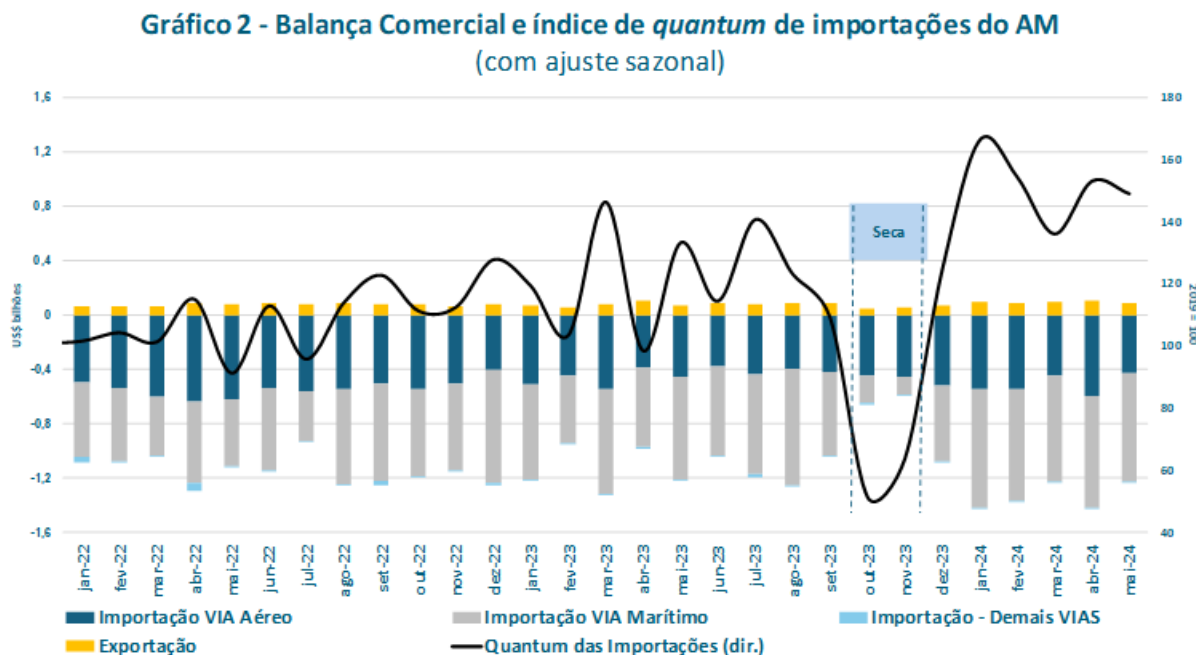


Figura 3-5: Balança comercial e índice de quantum de importaciones en el estado de Amazonas.

Fuente: (Santos Alves, Gomes de Carvalho, & Sganserla Torres, 2024)

Según reportes, en una terminal de carga del puerto, un buque carguero permaneció cerca de 30 días sin poder realizar el desembarque de mercancías, lo que evidencia el impacto directo de la sequía sobre las cadenas de suministro en la región (IHU, 2023a). El sindicato Sindmetal-AM, señaló que al menos 35 empresas electrónicas tenían previsto suspender sus actividades y otorgar vacaciones colectivas a 17 mil trabajadores por falta de insumos importados, además, se reveló fallas estructurales como la falta de señalización en los ríos. Asimismo, los representantes de la industria denunciaron la falta de señalización y dragado en las vías fluviales, lo cual agravó los problemas logísticos en el puerto. Los buques no pudieron operar con normalidad, y las barcazas, con menor capacidad y velocidad generaron mayores costos logísticos; la Comisión de Logística del CIEAM estimó un aumento del 25 % al 50 % en los costos de flete debido a estos obstáculos (IHU, 2023b).

También se vieron afectados las actividades cotidianas de pescadores y agricultores quienes enfrentaron mayores dificultades logísticas, teniendo que usar embarcaciones menores y transportar menos productos (Fatim, 2023).

La Figura 3-6 muestra como el esquema de las principales vías de acceso al Puerto de Manaus, dos son mediante vía fluvial y la carretera BR-319, además de la vía aérea.

#### Rutas de transporte a Manaus

- río Madeira
- río Amazonas
- Carretera BR-319

& vía aérea



*Figura 3-6: Accesos principales al puerto de Manaus*

## 3.2 Datos meteorológicos observados

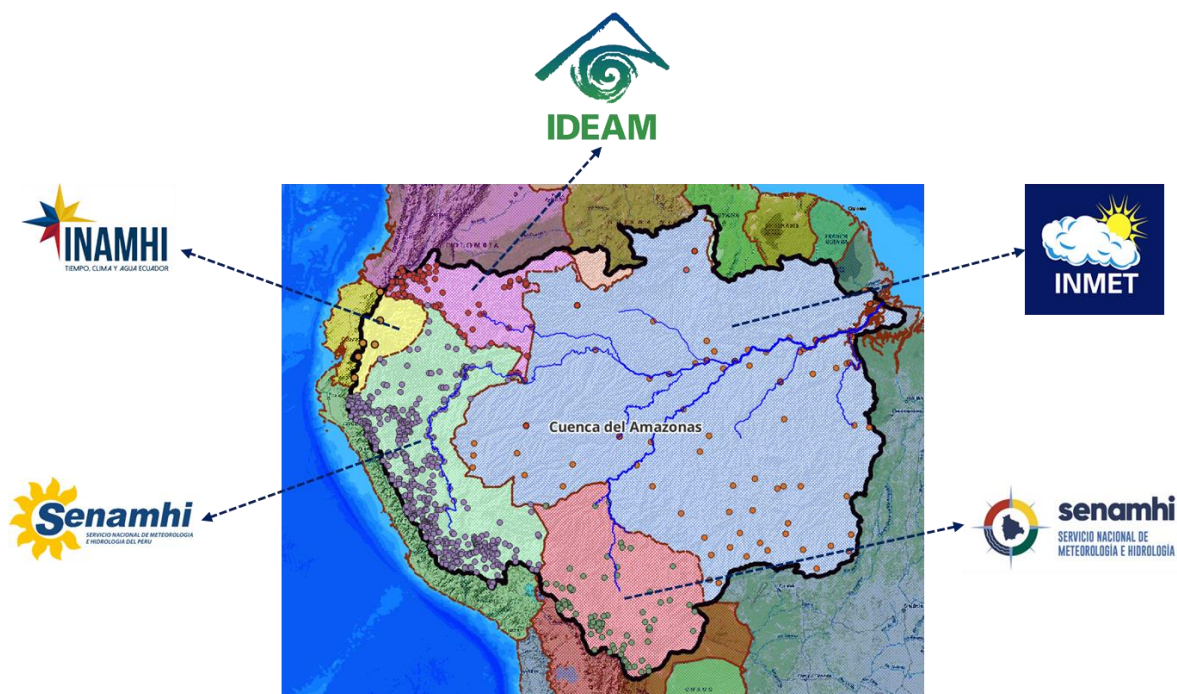
En toda la cuenca del río Amazonas existe una amplia variedad de fuentes de datos climáticos, las cuales son gestionadas y administradas por diferentes entidades nacionales, según el área correspondiente a cada país. Esta fragmentación refleja la complejidad geopolítica de la cuenca, que abarca territorios de siete países sudamericanos: Brasil, Perú, Colombia, Bolivia, Ecuador, Venezuela y Guyana. Esto exclusivamente para la cuenca del río Amazonas, no para toda la Amazonía.

Sin embargo, a pesar de la vasta extensión geográfica de la cuenca y la importancia estratégica de su monitoreo climático, la disponibilidad de información no es uniforme en todos los países. En el presente estudio, se logró compilar información meteorológica proveniente únicamente de cinco de los siete países mencionados. Lamentablemente, para las porciones de la cuenca ubicadas dentro del territorio de Venezuela y Guyana, no se logró acceder a ninguna fuente oficial de datos climáticos, ya sea por falta de estaciones meteorológicas registradas, limitaciones en el acceso público a los datos o ausencia de plataformas institucionales actualizadas, pero esto no es limitante debido a que la proporción de cuenca que pertenece a los dos países es mínima.

En contraste, en los cinco países restantes se logró identificar un total de 821 estaciones meteorológicas distribuidas en diferentes sectores de la cuenca amazónica. Estas estaciones representan una valiosa fuente de datos para la caracterización espacial y temporal del clima, siendo fundamentales para los procesos de validación de información satelital y de reanálisis.

La Figura 3-7 presenta la distribución espacial de estas estaciones y especifica las entidades administrativas responsables de su gestión en cada país, las cuales incluyen organismos meteorológicos nacionales, institutos de investigación y, en algunos casos, plataformas internacionales de datos abiertos. La concentración de estaciones no es homogénea: se observa una mayor densidad en áreas más accesibles o con mayor desarrollo institucional, mientras que en zonas remotas especialmente en el interior de la selva amazónica la cobertura es significativamente más baja.

A continuación, se describen los alcances, características y limitaciones de los datos proporcionados por cada una de estas entidades administrativas. Esta descripción incluye aspectos como el tipo de variables registradas (precipitación, temperatura, humedad, entre otros), la resolución temporal de los datos (diaria, mensual), la extensión de los registros históricos disponibles, así como los protocolos de control de calidad y acceso público a la información.



*Figura 3-7: Instituciones que administran datos en cada País de cuenca del Amazonas*

### **3.2.1 Bolivia**

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) es una entidad técnica descentralizada bajo la tutela del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, cuya misión principal es el monitoreo, recolección, procesamiento y análisis de información meteorológica e hidrológica a nivel nacional. Desde su creación en 1968, ha sido responsable de organizar y mantener la red de estaciones meteorológicas e hidrológicas del país, además de emitir pronósticos del tiempo, alertas tempranas por fenómenos extremos como tormentas, sequías o heladas, y apoyar en la gestión integral de los recursos hídricos (SENAMHI, 2025).

A través de su sitio web oficial, [Senamhi](http://Senamhi) ofrece múltiples plataformas de consulta pública como el Observatorio Nacional de Servicios Climáticos, el Monitor de Sequías, el Sistema de Pronósticos Climáticos Estacionales y la plataforma INADHI, donde se accede a datos hidrometeorológicos actualizados. Sin embargo, aunque parte de su información está disponible públicamente, en algunos casos el acceso completo a series de datos históricos requiere solicitudes formales a la misma institución.

Desde la página <https://geo.gob.bo/#/> se obtuvo el archivo de 90 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Amazonas, las características principales de cada estación. Según (GeoBolivia, 2025) esta información presenta la ubicación de estaciones meteorológicas en territorio nacional el mismo que fue elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) con datos actualizados a mayo de 2014.

Cada estación meteorológica registra diversas variables climáticas, aunque en la mayoría de los casos los periodos de registro son relativamente cortos. A pesar de estas limitaciones temporales, las estaciones identificadas constituyen una base de datos fundamental para la evaluación tanto de la cantidad como de la calidad de la información climática disponible en la cuenca.

### **3.2.2 Brasil**

El Instituto Nacional de Meteorología (INMET) es la entidad oficial de Brasil que se encarga de la observación, análisis y previsión del tiempo y el clima en todo el territorio brasileiro. Administra una gran cantidad de red de estaciones meteorológicas automáticas y convencionales distribuidas por todo el país (INMET, 2025), incluyendo la región amazónica que es el área de interés para el presente estudio.

A través de su portal oficial, [Instituto Nacional de Meteorología - INMET](#), INMET ofrece una amplia gama de servicios y productos, como pronósticos del tiempo por ciudad, alertas meteorológicas, mapas de precipitación, monitoreo de temperaturas extremas, análisis sinóticos y datos satelitales. También proporciona información especializada para el sector agrícola mediante el sistema Sisdagro.

Además, INMET es una plataforma que permite el acceso a series históricas de datos meteorológicos registrados por sus estaciones. Para este estudio se recopiló en total 83 estaciones meteorológicas entre convencionales y automáticas, esto exclusivamente para la cuenca del río Amazonas, esto forma parte de base de datos para el análisis de cantidad y calidad de las series históricas de las diferentes variables climáticas.

### **3.2.3 Colombia**

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es una entidad pública colombiana que tiene como misión generar y proporcionar información científica y técnica sobre los recursos naturales y el medio ambiente de Colombia (IDEAM, 2025).

A través de su sitio web oficial, [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales](#), ofrece acceso a una amplia gama de servicios y productos, incluyendo datos históricos, de variables climáticos, y series hidrológicas. Para este estudio se recopiló 117 estaciones meteorológicas que tienen registro de diferentes variables climáticas como precipitación y temperatura. Todas estas estaciones están ubicadas en la cuenca del río Amazonas, por lo cual forman la base de datos observados para su análisis cuantitativo y cualitativo de sus series históricas.

### **3.2.4 Ecuador**

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es la institución responsable de administrar la información hidrometeorológica en Ecuador. Entre sus funciones principales se encuentra la supervisión de actividades meteorológicas e hidrológicas en coordinación con otras instituciones (INAMHI, 2025).

El INAMHI opera y mantiene la infraestructura nacional de estaciones meteorológicas e hidrológicas, recopila y procesa datos, y publica información relevante sobre las condiciones meteorológicas, climáticas e hidrológicas del país. Sin embargo, sus series históricas para periodos

de tiempo largos no están disponibles directamente en su página web [Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI](#). Para acceder a esta información, es necesario realizar una solicitud formal ante la entidad. Cabe resaltar que, cuando el propósito de la solicitud es académico, el acceso a estos datos no tiene costo, lo que representa una valiosa oportunidad para la investigación científica. Esta gestión fue indispensable para superar las limitaciones asociadas a la disponibilidad de estaciones dentro del ámbito de la cuenca del río Amazonas en territorio ecuatoriano.

Dada la escasa cobertura espacial de estaciones en esta región, se establecieron criterios rigurosos para la selección de estas. Se priorizaron únicamente aquellas estaciones que registran las variables de interés principalmente precipitación y temperatura y que contaran con series históricas continuas o al menos representativas dentro del periodo 1981–2024. Tras aplicar estos filtros, se identificaron seis estaciones que cumplían con los requisitos establecidos. La información obtenida de estas estaciones constituye una parte fundamental de la base de datos observada utilizada para el análisis cuantitativo y cualitativo de sus series históricas.

### **3.2.5 Perú**

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) es una institución de Perú cuya misión principal es generar y proporcionar información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático de todo el país, para ello, opera, controla y mantiene la red nacional de estaciones meteorológicas e hidrológicas (SENAMHI, 2025).

A través de su sitio web oficial, [SENAMHI - Descarga de datos](#), el SENAMHI ofrece acceso a una amplia gama de datos históricos, informes técnicos y herramientas de consulta. Como fuente adicional también se tiene el [SNIRH](#) que es el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. En esta plataforma también se encuentra parte de la información meteorológica de muchas estaciones (SNIRH, 2025).

Para este estudio se recopiló información de 525 estaciones meteorológicas que están ubicados dentro del territorio peruano y en la cuenca del río Amazonas, las estaciones tienen información de variables climáticas no necesariamente en el mismo periodo, además otras tienen poca información y muchas otras no funcionan actualmente. Esta información forma parte de la base de datos de datos observados para su análisis cuantitativo y cualitativo.

### 3.3 Datos satelitales

Los datos satelitales de precipitación y temperatura son registros climáticos obtenidos desde satélites que orbitan la Tierra. Estos datos permiten medir la cantidad de lluvia, nieve o humedad (precipitación), así como las temperaturas del aire, del suelo o del mar, sin necesidad de instrumentos en tierra. Gracias a sensores especializados, los satélites pueden captar información precisa y continua a gran escala, cubriendo incluso zonas remotas o de difícil acceso, pero la precisión en la estimación de la precipitación es aún un desafío en áreas remotas y en orografía compleja. Este tipo de datos es esencial para el monitoreo climático, la gestión de recursos hídricos, la agricultura, la prevención de desastres naturales y el estudio del cambio climático. En la Figura 3-8 se presenta las principales misiones de GPM al principio del 2019.

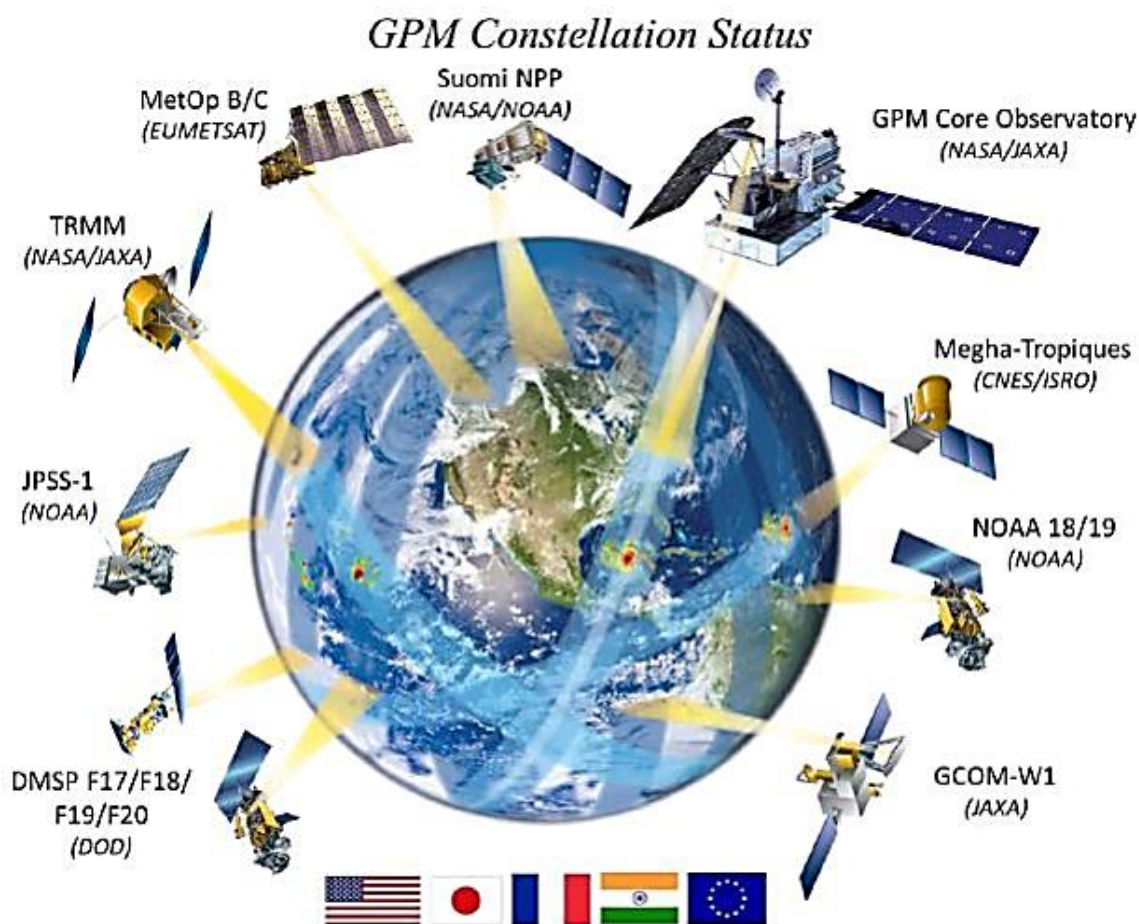
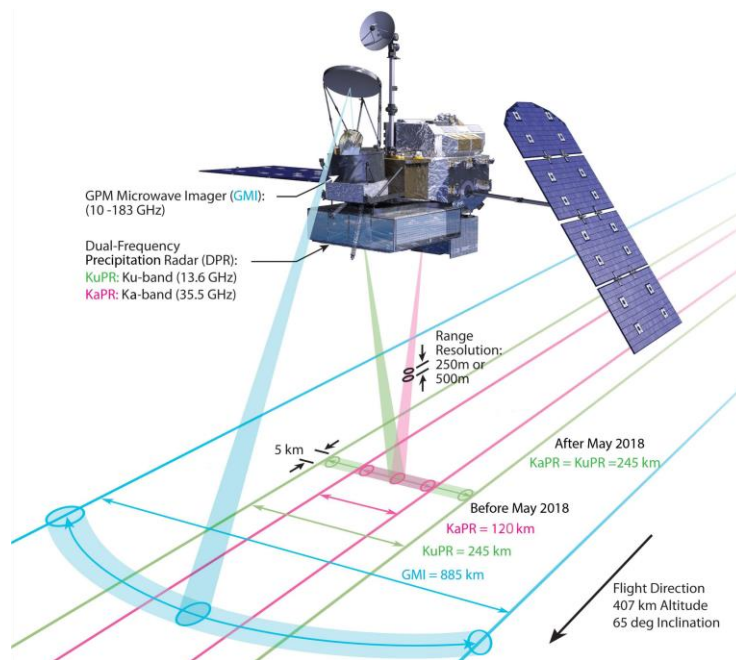


Figura 3-8: Diagrama de la constelación de satélites GPM a principios de 2019

*Fuente: (Global Precipitation Measurement, 2019).*

En la Figura 3-9 se muestra del GPM-CORE donde se muestra los sensores:

- DPR (Dual Precipitation Radar) este sensor es la nueva generación del sensor PR, tiene mayor sensibilidad y precisión de las lluvias ligeras y nieve, mejor identificación de las fases (liquida, sólida y mixta) de los hidrometeoros. Además, posee de tres modos de medición, NS (Normal scan), MS (Matched scan) y HS (High scan) (Pontificia Universidad Católica del Perú y Instituto Geofísico del Perú, 2020).
- GMI (GPM Microwave Imager) que es el captador de imágenes microondas. Tiene radiómetro de microondas pasivo, con frecuencias entre 166 – 183 GHz, permite la medición de lluvias ligeras, es estándar de calibración para otros satélites de la constelación GPM (Pontificia Universidad Católica del Perú y Instituto Geofísico del Perú, 2020).



*Figura 3-9: Geometría de sensores del GPM-CORE*

*Fuente: NASA*

En la actualidad existen diversas misiones satelitales para la observación del clima de la tierra, la mayoría de las misiones son recientes (a partir del año 1998). Los principales productos satelitales y las más reconocidas son:

- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Misión conjunta de la NASA y la JAXA (Agencia Espacial Japonesa), lanzada en 1997 y finalizada en 2015. Proporcionó datos detallados de precipitación en regiones tropicales y subtropicales ( $\pm 35^\circ$  latitud) (NASA, 2019a).
- Global Precipitation Measurement (GPM). Sucesor de TRMM, lanzado en 2014 por NASA y JAXA. Proporciona estimaciones globales de precipitación con alta resolución temporal y espacial. Incluye sensores más avanzados y cobertura extendida ( $\pm 65^\circ$  latitud) (NASA, 2019b)
- Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP). Desarrollado por JAXA (Japón). Usa múltiples satélites y sensores para generar mapas de precipitación globales, con especial énfasis en Asia y el Pacífico. Tiene productos con corrección por estación Terrestre (JAXA, 2023).
- Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Producto principal del GPM, combina múltiples fuentes satelitales y estaciones terrestres para mejorar la estimación de precipitación en tiempo cuasi real. Muy utilizado para análisis globales (NASA, 2020).
- Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS). Desarrollado por el *Climate Hazards Center* (UC Santa Barbara). Combina datos satelitales con datos de estaciones terrestres, útil especialmente para estudios en África, América Latina y Asia (Climate Hazards Center, 2025).

### 3.3.1 Chirps

El conjunto de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) constituye un registro cuasi global de precipitaciones que se extiende por más de 40 años, abarcando latitudes entre  $50^\circ\text{S}$  y  $50^\circ\text{N}$ , con cobertura longitudinal completa. Desde 1981 hasta el presente, este producto combina la climatología base CHPclim, observaciones satelitales a una resolución espacial de  $0,05^\circ$ , y datos de estaciones meteorológicas in situ. Esta integración permite generar series temporales en forma de rejilla que son útiles para el análisis climáticas; además, al 2025 ya se dispone de la nueva versión CHIRPS v3, que es la versión mejorada de CHIRPS v2 (Climate Hazards Center, 2025). En este estudio se usará CHIRPS v2.

### 3.4 Información de reanálisis

La información de reanálisis son los que se obtienen al combinar observaciones reales (como las de estaciones meteorológicas, satélites, globos sonda, radares, etc.) con modelos numéricos del clima, estas informaciones pueden tener un retraso de disponibilidad mayor que los satelitales.

Hay que diferenciar bien esta información con las observaciones meteorológicas que son registros de mediciones de diversos aspectos del clima que provienen de todo tipo de plataformas e instrumentos, como globos meteorológicos, aeronaves, barcos, satélites y estaciones in situ. Mientras que el reanálisis, combina observaciones meteorológicas con un modelo informático avanzado para reconstruir las condiciones meteorológicas pasadas en todo el planeta; esto puede hacerse incluso cuando faltan observaciones meteorológicas (ECMWF, 2020).

En la Tabla 3-1 se muestra los datos de satelitales y de reanálisis empleados para este estudio, donde Pr es precipitación, Tm es temperatura media, Tmax y Tmin son temperatura máxima y mínima, respectivamente. Y en la Figura 3-10 se muestra un ejemplo de cómo se generan los datos de reanálisis, en este caso del producto de precipitación PERSIANN.

*Tabla 3-1: Productos satelitales y de reanálisis empleados en el estudio*

| Nº | Producto     | Periodo disponible | Resolución temporal | Resolución espacial     | Variables empleadas |
|----|--------------|--------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 1  | ERA5         | 1979 - 2020        | Diario              | 11.1 km <sup>2</sup>    | Pr, Tm              |
| 2  | ERA5-Land    | 1950 – actual      | Diario              | 9 km <sup>2</sup>       | Pr, Tm              |
| 3  | TerraClimate | 1958 - 2023        | Mensual             | 4 km <sup>2</sup>       | Pr, Tm              |
| 4  | PERSIANN-CDR | 1983 - actual      | Diario              | 24 km <sup>2</sup>      | Pr                  |
| 5  | MERRA-2      | 1980-actual        | Horario             | 55 x 69 km <sup>2</sup> | Tm                  |
| 6  | NOAA CPC     | 1979-actual        | Diario              | 55 km <sup>2</sup>      | Tmax, Tmin          |
| 7  | HYBAM        | 1980-2009          | Diario              | 111 km <sup>2</sup>     | Pr                  |

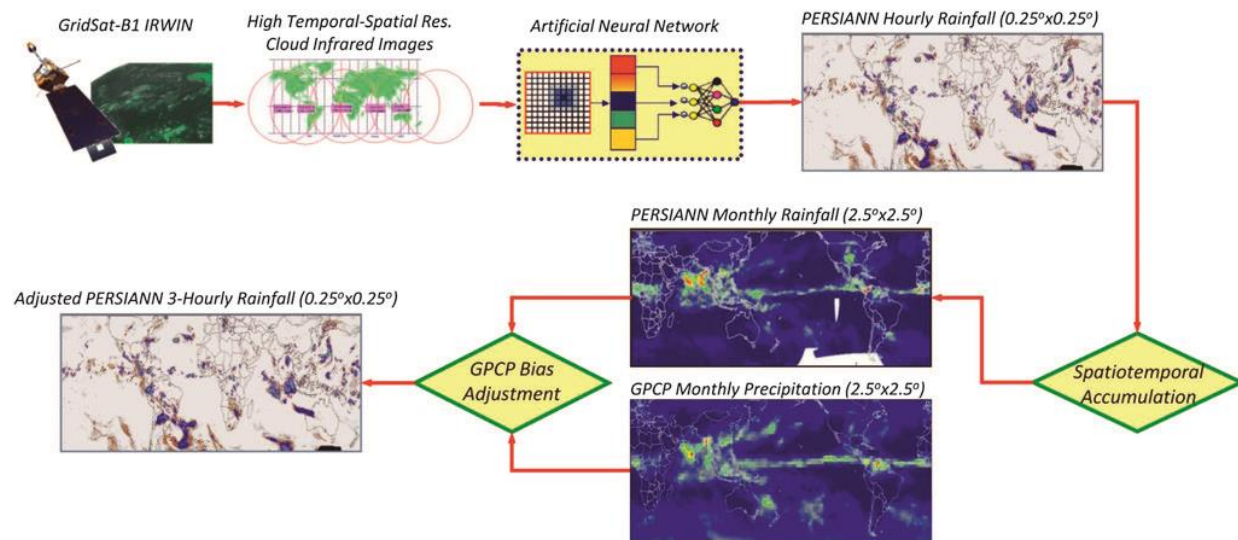


Figura 3-10: Metodología de generación de datos de PERSIANN

### 3.4.1 CPC NOAA

Este conjunto de datos proporciona información diaria sobre la temperatura del aire en la superficie terrestre a nivel global, incluyendo tanto las temperaturas máximas como mínimas. Está organizado en una malla de 0.5 grados de latitud y longitud, lo que permite una alta resolución espacial y se ajusta a los análisis globales diarios de precipitación del CPC. La elaboración del conjunto considera las variaciones orográficas para mejorar su precisión. Su finalidad principal es apoyar el monitoreo del clima y la evaluación de pronósticos meteorológicos, utilizando como fuente principal los reportes diarios del Sistema Global de Telecomunicaciones (GTS), que recopilan datos de entre 6,000 y 7,000 estaciones meteorológicas alrededor del mundo (CPC, s.f.).

Esta base de datos está disponible en [Index of /precip/PEOPLE/wd52ws/global temp](https://www.cgd.noaa.gov/precip/PEOPLE/wd52ws/global_temp), asimismo la manera más fácil de explorar y procesar es mediante Google Earth Engine, el mismo que se puede acceder mediante [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA\\_CPC\\_Temperature?hl=es-419#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_CPC_Temperature?hl=es-419#description).

Para este estudio se usó las variables de temperatura máxima y mínima. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el algoritmo de cómo se estima los datos a nivel global.

### 3.4.2 ERA5

ERA5 es la quinta generación de reanálisis climático global desarrollado por el ECMWF, que integra observaciones de todo el mundo con simulaciones de modelos atmosféricos para generar un conjunto de datos globales coherentes y detallados; esta fuente de reanálisis sustituye al anterior ERA-Interim, ofreciendo mejoras en resolución temporal y espacial., además, el producto ERA5 MONTHLY entrega datos mensuales consolidados de diferentes variables climáticas, entre ellos precipitación y temperatura. También incluye las temperaturas mínimas y máximas mensuales del aire a 2 metros, derivadas de registros horarios (Hersbach, y otros).

En este conjunto, la precipitación se reporta como acumulados mensuales, mientras que las demás variables se presentan como promedios mensuales, lo que permite un análisis climático más general y comparativo entre distintas regiones y periodos, su acceso es libre y está disponible en <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>. Sin embargo, la forma más rápida de acceder y procesar los datos es mediante Google Earth Engine, y que se puede acceder mediante este enlace <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF ERA5 MONTHLY# citations>. Para este estudio se empleó los datos de precipitación y temperatura mensual.

### 3.4.3 ERA5-Land

ERA5-Land es un conjunto de datos de reanálisis diseñado para proporcionar una representación coherente y detallada de la evolución de variables terrestres a lo largo del tiempo, con una resolución mejorada respecto a ERA5.

Este producto se genera a partir del componente terrestre del reanálisis climático ERA5, desarrollado por el ECMWF, y combina modelos numéricos con observaciones globales dentro de un marco físico riguroso, ofreciendo una reconstrucción precisa del clima pasado; este conjunto de datos ERA5-Land permite analizar de manera consistente los ciclos de agua y energía en la superficie terrestre, abarcando un periodo desde 1950 hasta la actualidad, su resolución temporal es horaria y su resolución espacial original es de aproximadamente 9 km, usando una malla gaussiana reducida. Para facilitar su uso, los datos han sido interpolados a una cuadrícula regular de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  en latitud y longitud (Muñoz Sabater).

La información está disponible a nivel horario, diario y mensual, este último corresponde a un subconjunto procesado del conjunto completo de ERA5-Land. En este caso, se presentan promedios mensuales ya calculados, lo que permite un acceso más eficiente a los datos para diversas aplicaciones que no requieren información a escala submensual (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2022).

Para este estudio se empleó los datos de mensuales de precipitación y temperatura, a estos datos se pueden acceder mediante su fuente principal <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview> y Google Earth Engine <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF ERA5 LAND MONTHLY BY HOUR#description>.

#### **3.4.4 MERRA-2**

Los datos del reanálisis MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, versión 2) contiene al producto M2T1NXSLV, también conocido como tavg1\_2d\_slv\_Nx, es un conjunto de datos bidimensionales promediados por hora. Este conjunto incluye una variedad de diagnósticos meteorológicos en distintos niveles atmosféricos estandarizados, tales como la temperatura del aire a 2 metros, así como a 10 metros, 850 hPa, 500 hPa y 250 hPa. También incorpora información sobre los componentes del viento en diferentes altitudes, la presión al nivel del mar, la presión en superficie y el contenido total de vapor de agua precipitable, además de su forma líquida o congelada (NASA, s.f.).

MERRA-2 es el más reciente sistema de reanálisis atmosférico global desarrollado por la Oficina de Modelado y Asimilación Global (GMAO) de la NASA. Utiliza la versión 5.12.4 del modelo GEOS (Goddard Earth Observing System) y cubre el periodo desde 1980 hasta el presente, con una latencia de alrededor de tres semanas al concluir cada mes, lo que permite un balance entre precisión y disponibilidad oportuna de los datos (Google Earth Engine, s.f.).

Para el presente estudio se usó datos de temperatura media, el cual está disponible en el catálogo de datos de Google Earth Engine ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA\\_GSFC\\_MERRA\\_slv\\_2#bands](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GSFC_MERRA_slv_2#bands)) también se puede acceder mediante [NASA/MERRA](#).

### 3.4.5 *PERSIANN-CDR*

PERSIANN-CDR es un conjunto de datos diario que proporciona información sobre precipitación a nivel cuasi-global, cubriendo el período desde el 1 de enero de 1983 hasta la fecha actual, con una resolución espacial de 24 km<sup>2</sup>, su actualización se realiza cada tres meses, lo que implica un retraso típico de aproximadamente 90 días entre la fecha de observación y la disponibilidad de los datos; este producto ha sido desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Detección Remota (CHRS) de la Universidad de California en Irvine, para su elaboración, se utilizan datos infrarrojos satelitales del conjunto GridSat-B1, los cuales se originan a partir de la integración de los datos IR del proyecto ISCCP B1, complementados con información de precipitación de la versión 2.2 del producto GPCP; esta combinación permite generar un registro confiable y consistente de precipitación diaria útil para estudios climáticos a largo plazo (Ashouri, y otros, 2015).

Los datos son de libre acceso y están disponibles en <https://www.ncei.noaa.gov/data/precipitation-persiann/access/> o en Google Earth Engine [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA\\_PERSIANN-CDR#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_PERSIANN-CDR#description). Para este estudio se usó datos de precipitación diaria.

### 3.4.6 *TERRACLIMATE*

TerraClimate es un conjunto de datos mensuales que proporciona información sobre el clima y el balance hídrico en superficies terrestres a nivel global, su construcción se basa en una interpolación asistida climáticamente, en la que se combinan las normales climatológicas de alta resolución espacial del conjunto WorldClim con datos que presentan variabilidad temporal, aunque con menor resolución espacial, provenientes de CRU Ts4.0 y del Reanálisis Japonés JRA55; el enfoque consiste en aplicar anomalías temporales interpoladas de CRU Ts4.0/JRA55 a la climatología de WorldClim para generar una base de datos de alta resolución espacial con una amplia cobertura temporal (Abatzoglou, Dobrowski, Parks, & Hegewisch, 2018).

Además, TerraClimate genera mensualmente datos sobre balance hídrico superficial mediante un modelo que incorpora variables como la evapotranspiración de referencia, la precipitación, la temperatura y la capacidad del suelo para almacenar agua utilizable por la vegetación (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>).

Para este estudio se usó datos de precipitación mensual disponible en la plataforma de Google Earth Engine ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/IDAHO\\_EPSCOR\\_TERRACLIMATE#citations](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/IDAHO_EPSCOR_TERRACLIMATE#citations)).

### **3.4.7 HYBAM**

El producto de precipitación diario HYBAM es un conjunto de datos meteorológicos que proporciona estimaciones diarias de precipitación sobre la cuenca del Amazonas, generado en el marco del Observatorio HYBAM (Hidrología y Geodinámica de la Cuenca Amazónica), un programa de monitoreo científico binacional liderado por instituciones de Francia (como el IRD) y países amazónicos; combina mediciones in situ de estaciones meteorológicas nacionales con interpolaciones espaciales, utilizando métodos estadísticos o geoespaciales (IRD, 2025).

### 3.5 Modelos hidrológicos

Existe información limitada sobre la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río Negro, caso similar ocurre para toda la cuenca del Amazonas. Uno de los pocos estudios relevantes fue publicado por (Guimberteau, y otros, 2012), donde se evaluó el desempeño del modelo hidrológico ORCHIDEE para simular caudales en subcuencas del Amazonas. Inicialmente, el modelo subestimó el caudal anual en un 15% (estación Obidos), esto con datos de reanálisis. En un segundo caso con datos in situ interpolados el modelo mejoró significativamente.

En la Figura 3-11 se observa los caudales mensuales del modelo antes mencionado. Para la cuenca del río Negro, se muestra dos subcuencas (Serriñha y Caracarái) los caudales simulados no representan bien la variabilidad mensual y se sobreestima los caudales. Otro estudio es aplicó el modelo MGB-IPH, mostrando buena capacidad para representar caudales máximos y mínimos en varias subcuencas; sin embargo, la subcuenca Caracarái se sobreestima en todos los casos y para Serriñha la situación es similar, excepto usando datos de MSWEP que subestima para meses de avenida (Wongchuig Correa, Cauduro Dias de Paiva, Espinoza, & Collischonn, 2017).

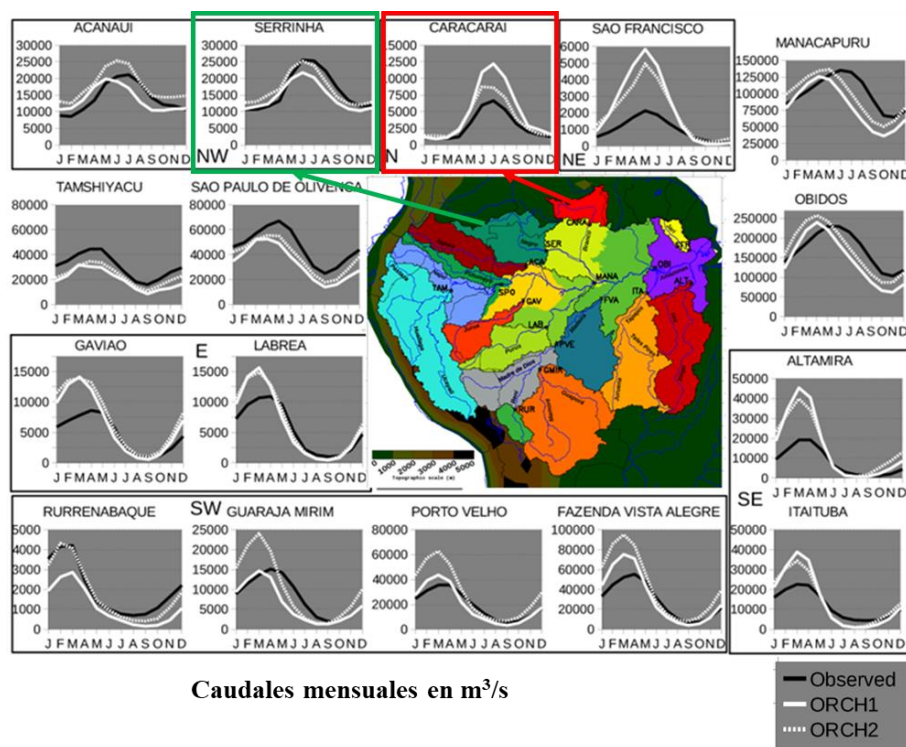


Figura 3-11: Modelación hidrológica de la cuenca del río Amazonas. Fuente: Adaptado de (Guimberteau, y otros, 2012)

(Zubieta Barragán, 2013) evaluó el desempeño de un modelo lluvia-escorrentía alimentado con precipitaciones obtenidas a partir de información remota. En dicho estudio se utilizaron tres productos de precipitación (TMPA V7, CMORPH y PERSIANN) como forzantes en la simulación de caudales diarios mediante el modelo hidrológico de gran escala MGB-IPH, abarcando el periodo 2003-2009. Para la validación empleó datos de caudales diarios de 13 estaciones hidrométricas proporcionados por el observatorio ORE-HYBAM. Los resultados indicaron que el producto TMPA V7 presentó un mejor desempeño en comparación con los otros productos, demostrando su idoneidad como insumo para la modelación hidrológica lluvia-escorrentía en la cuenca amazónica peruana. Sin embargo, se observaron limitaciones en las subcuencas situadas entre las regiones norte y sur de la cuenca, cerca de la zona ecuatorial no se obtuvo buenos resultados, especialmente en la representación de la fase y magnitud de eventos extremos. En la Figura 3-12 se muestra los caudales simulados y observados por (Zubieta Barragán, 2013).

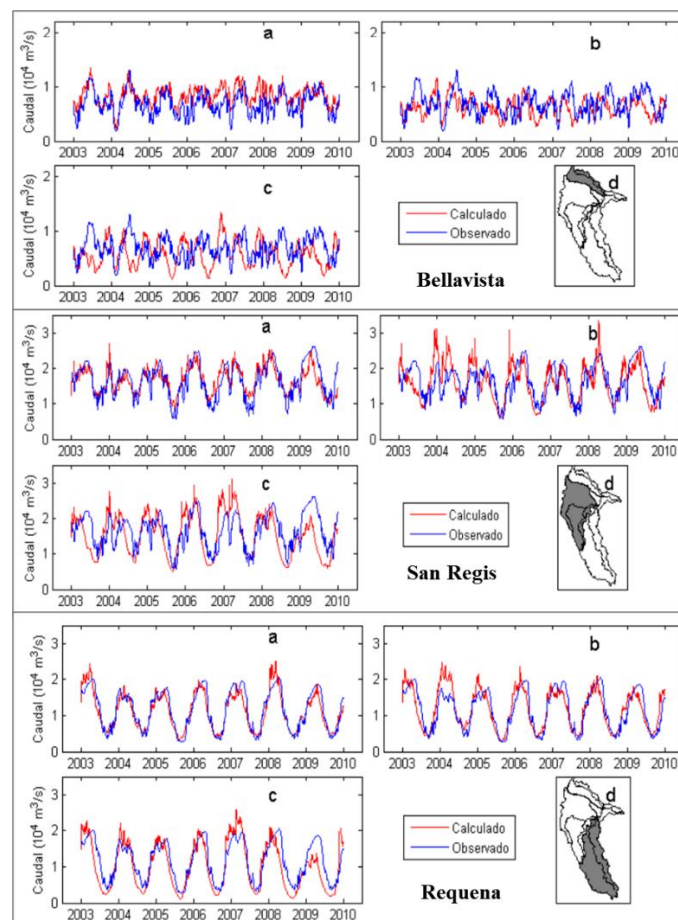


Figura 3-12: Caudales estimados y observados para tres estaciones de la cuenca amazónica peruana a) TRMM, b) CMORPH, c) PERSIANN.

### 3.6 Predicción hidrológica estacional

No se dispone de información suficiente ni de literatura especializada sobre estudios de predicción hidrológica en esta cuenca. La única fuente identificada proviene del Servicio Geológico de Brasil (SGB), que realiza previsiones mediante el modelo Cota-Cota, el cual establece una relación entre los niveles del río en distintos puntos de la cuenca. Para ello, emplean pronósticos de precipitación generados por el modelo GEFS (Global Ensemble Forecast System) (SGB, 2023).

Las proyecciones se realizan para horizontes de 15, 45 y 75 días. Como ejemplo, en la Figura 3-13 se presentan las previsiones de niveles en la estación hidrológica de Manaus durante la sequía del año 2024, junto con eventos históricos de sequía con características similares (SGB, 2024b).

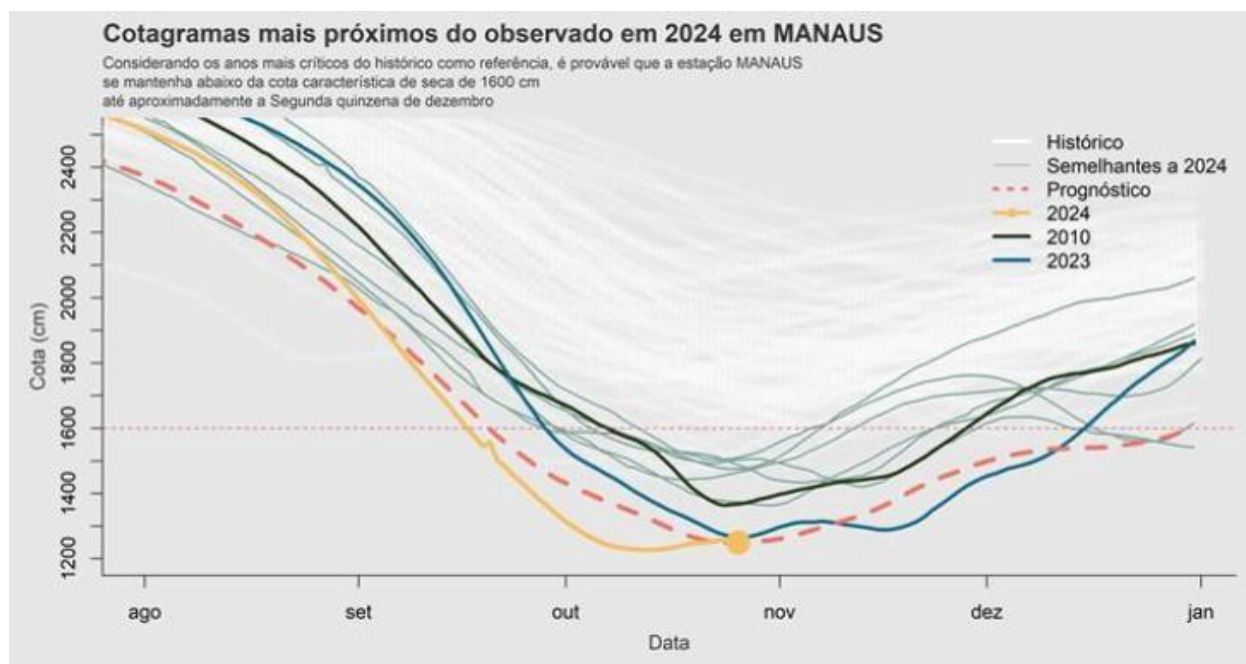


Figura 3-13: Previsión de los niveles realizadas para la estación Manaus

Fuente: (SGB, 2024b)

Por otra parte, (Vergara Saturno, 2020) diseñó diferentes estructuras de modelos univariados tanto de RNA como de WRN, para varios horizontes de pronóstico, reconociendo que la precisión tiende a disminuir con un mayor tiempo de anticipación. Para el desarrollo de los modelos se utilizaron series de caudales diarios observados en la estación de Tamshiyacu (río Amazonas, Perú) correspondientes al período 1985-2012. El desempeño de los modelos se evaluó mediante métricas

estadísticas como el error cuadrático medio (RMSE) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los resultados mostraron que para horizontes de pronóstico más largos (30 días), el modelo híbrido WRN (RMSE = 4820 m<sup>3</sup>/s y NSE = 0,83) ofreció una mejor precisión que el modelo RNA convencional (RMSE = 6092 m<sup>3</sup>/s y NSE = 0,72). Es preciso señalar que (Vergara Saturno, 2020) realizó este estudio para la cuenca amazónica del Perú, y no forma parte de la cuenca del río Negro. En la Figura 3-14 y Figura 3-15 se muestran los resultados obtenidos por (Vergara Saturno, 2020)

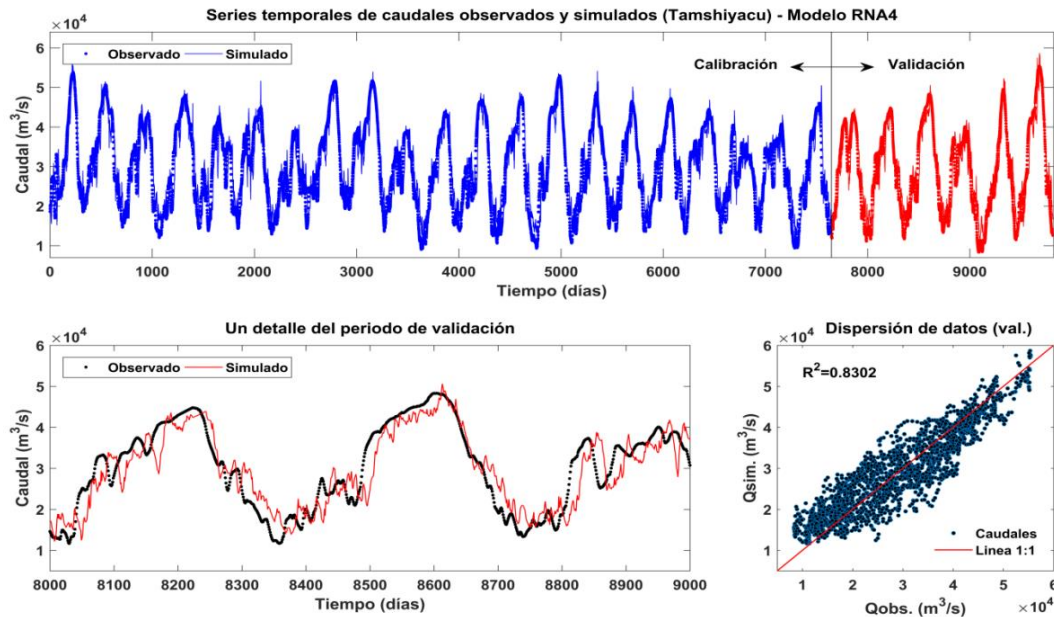


Figura 3-14: Hidrograma de caudales observados y pronosticados por el modelo RNA4 para 21 días de anticipación, en la fase de calibración y validación (superior), detalle y gráfico de dispersión de la fase de validación (inferior)

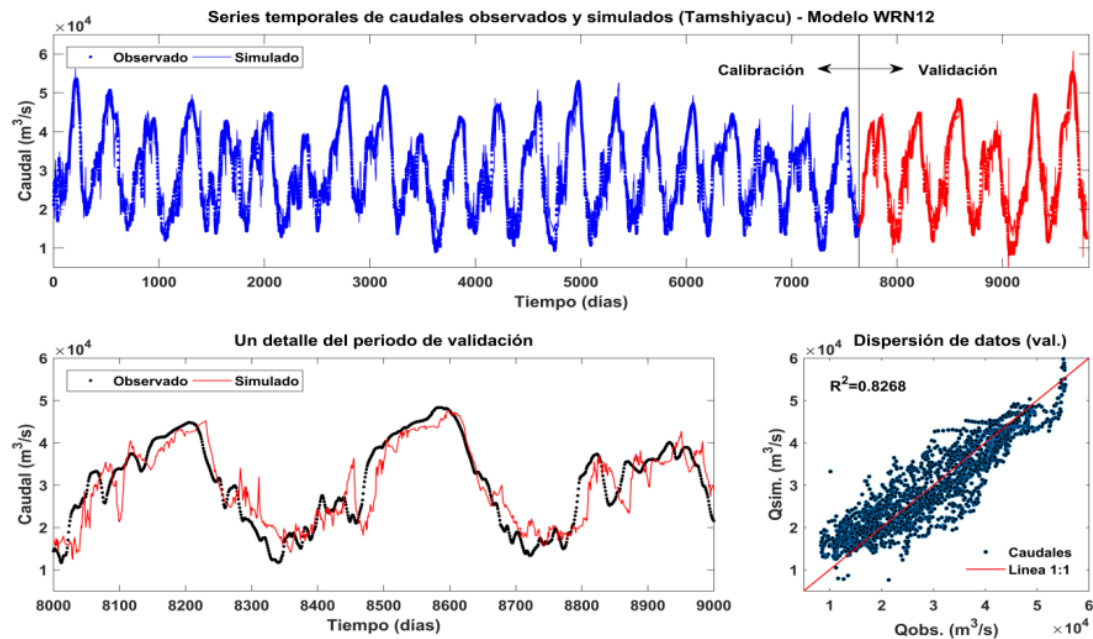
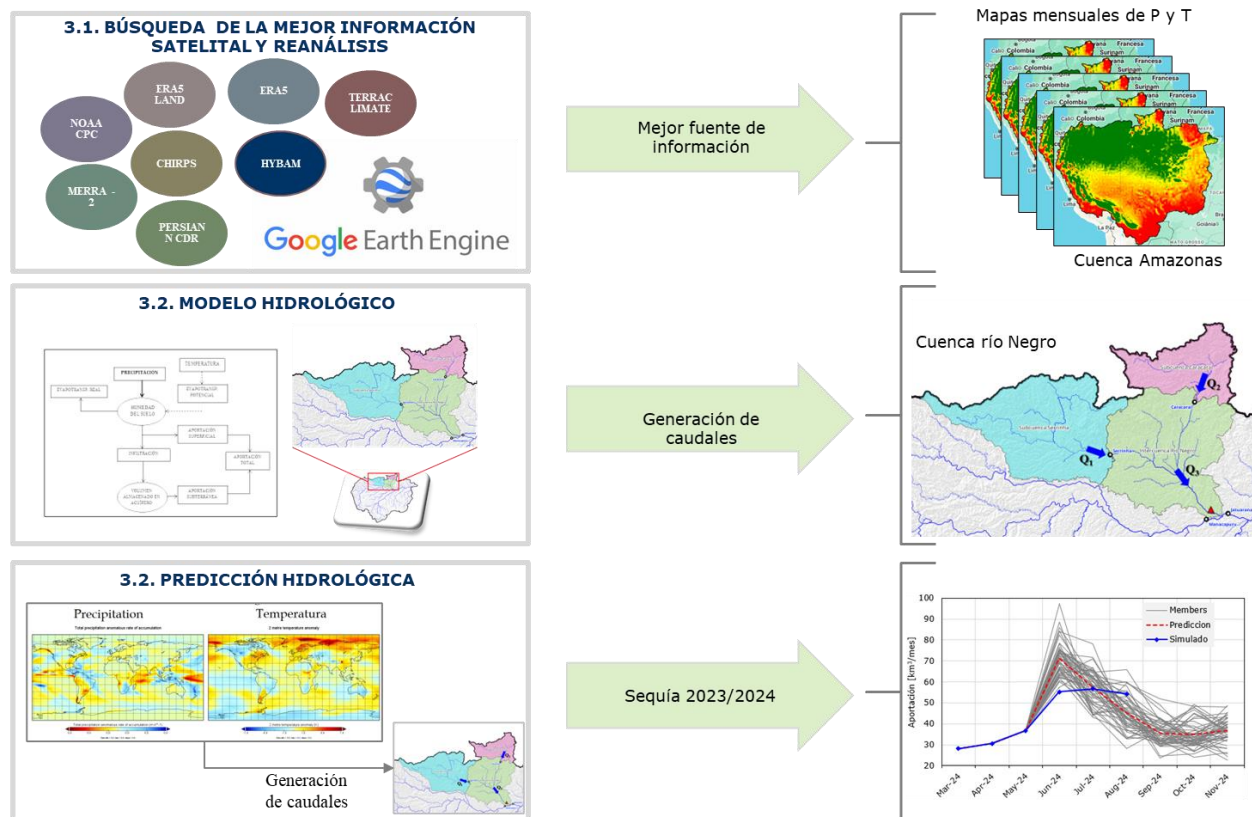


Figura 3-15: Hidrograma de caudales observados y pronosticados por el modelo WRN12 para 30 días de anticipación, en la fase de calibración y validación (superior), detalle y gráfico de dispersión de la fase de validación (inferior)

## 4 METODOLOGÍA

La presente metodología se orienta a la integración, evaluación y aplicación de datos satelitales y productos de reanálisis en procesos de modelación y predicción hidrológica, con énfasis en el fortalecimiento del conocimiento del uso de datos grillados en la Amazonía. En un contexto de cambio climático con creciente variabilidad climática y limitaciones en la cobertura de estaciones hidrometeorológicas, el aprovechamiento de fuentes de datos alternativas, como los satélites y las reanálisis atmosféricas, se vuelve fundamental para el monitoreo, la simulación y la gestión de los recursos hídricos, además de la disponibilidad de datos casi en tiempo real.

El objetivo principal fue establecer una metodología de evaluación de datos satelitales y reanálisis, modelación y predicción hidrológica para que sea aplicable en cualquier parte del mundo, en este caso se aplicó en la cuenca del río Negro Brasil. En la Figura 4-1 se muestra la metodología general aplicada para el presente estudio.



*Figura 4-1: Metodología general aplicada*

A continuación, se detalla cada una de las partes.

## 4.1 Búsqueda de la mejor información satelital y reanálisis

El objetivo principal de esta fase fue identificar y seleccionar la fuente de información satelital o de reanálisis que presentara el mejor desempeño en términos de ajuste y representatividad frente a los datos observados en estaciones meteorológicas locales. Esta selección resulta fundamental, ya que la calidad de los datos climáticos de entrada tiene un impacto directo en la precisión y confiabilidad de las simulaciones hidrológicas posteriores.

Para cumplir con este objetivo, se realizó un proceso riguroso de comparación entre distintas bases de datos climáticas disponibles tanto de precipitación como de temperatura y los registros históricos obtenidos en estaciones meteorológicas distribuidas estratégicamente en la región de estudio. La evaluación se llevó a cabo mediante el uso de diversos estadísticos descriptivos y de desempeño, tales como la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación de Pearson, el sesgo relativo (BIAS), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), entre otros.

A través de este análisis comparativo, se logró determinar cuál fuente de datos presentaba la mejor correlación y menor desviación con respecto a las observaciones reales. Como resultado, se seleccionó una fuente específica para representar la precipitación y otra para la temperatura. Estas bases de datos fueron consideradas como las más representativas de las condiciones climáticas reales del área de estudio y, por lo tanto, fueron adoptadas como insumos climáticos principales para alimentar el modelo hidrológico.

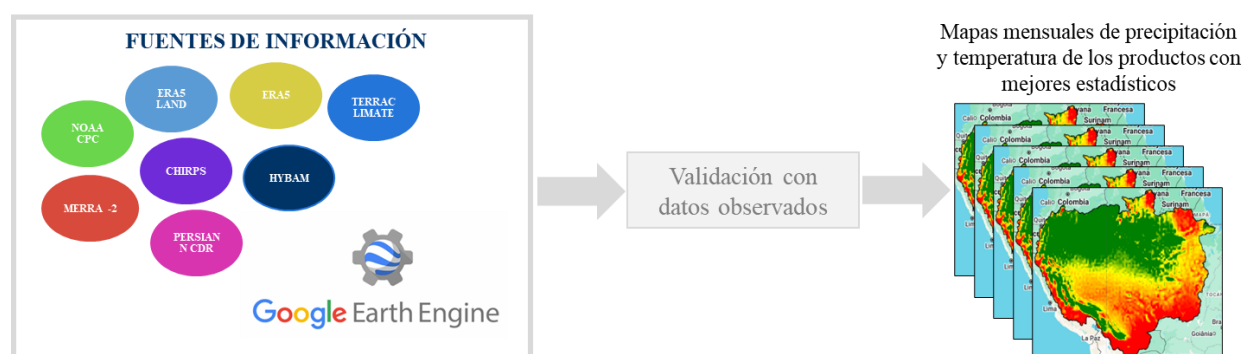


Figura 4-2: Esquema representativo de búsqueda de información satelital y/o reanálisis

## 4.2 Modelación hidrológica

En esta fase, se procedió a la discretización de la cuenca del río Negro en tres subcuencas diferenciadas. Esta división estratégica tuvo como propósito principal la generación de caudales mensuales representativos a lo largo de toda la extensión de la cuenca, permitiendo una caracterización hidrológica más precisa y localizada. La segmentación de la cuenca respondió a criterios técnicos basados en la topografía, precipitación media anual, cobertura vegetal lo que aseguró una partición coherente con el comportamiento más real del sistema hidrológico.

Una vez establecidas las subcuencas, se llevó a cabo la implementación del modelo hidrológico Témez (1977), un modelo conceptual de tipo agregado que ha demostrado su eficacia en el estudio de cuencas de dimensiones pequeñas y medias. En este caso, se desarrolló un modelo independiente para cada una de las tres subcuencas, con el fin de captar con mayor fidelidad las particularidades físicas y ambientales de cada unidad. En la Figura 4-3 se muestra el esquema de la aplicación del modelo Témez semi-agregado en la cuenca del río Negro

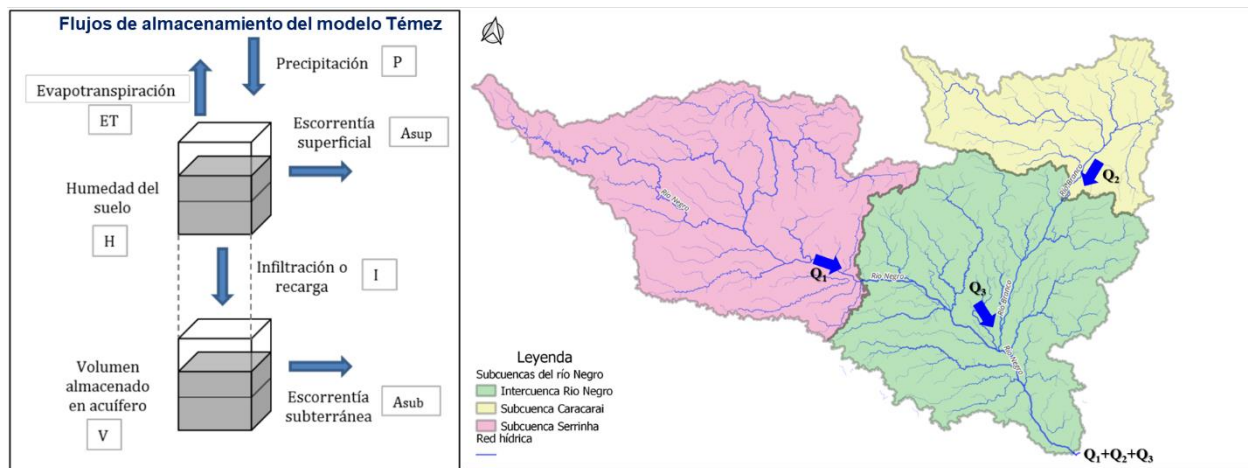


Figura 4-3: Representación de la aplicación del modelo Témez semi-agregado

La calibración y validación del modelo se efectuaron de manera individual para cada subcuenca, utilizando registros históricos de caudales observados, y siguiendo una metodología rigurosa orientada a minimizar los errores entre los caudales simulados y los observados. Este proceso consideró las características fisiográficas particulares de cada subcuenca, tales como la cobertura vegetal, la litología predominante, los tipos de suelo presentes y las variaciones de pendiente. Estos

factores juegan un rol determinante en los procesos de infiltración, escorrentía y almacenamiento, por lo que su adecuada representación en el modelo fue esencial para lograr resultados confiables.

Durante la etapa de calibración, se ajustaron los parámetros del modelo hasta alcanzar una adecuada correspondencia entre los caudales simulados y los medidos, utilizando indicadores de desempeño como el Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el sesgo de BIAS relativo, etc. Posteriormente, en la fase de validación, se aplicó el modelo sobre un conjunto de datos independientes para verificar su robustez y capacidad de predicción en condiciones distintas a las utilizadas en la calibración.

La implementación de modelos separados para cada subcuenca permitió no solo mejorar la precisión de las simulaciones, sino también entender de forma diferenciada el comportamiento hidrológico en cada sector de la cuenca del río Negro.

### 4.3 Metodología de predicción hidrológica

Esta metodología, se diseñó y aplicó más detallada, dada la complejidad del análisis requerido y la necesidad de integrar múltiples fuentes de información climática e hidrológica. A diferencia de las etapas anteriores, esta fase no solo requería datos históricos, sino también condiciones iniciales actualizadas y proyecciones futuras del clima para la simulación de caudales futuros.

Se partió de los resultados obtenidos en la fase de modelación hidrológica (Sección 4.2), los cuales proporcionaron información clave sobre el comportamiento hidrológico de cada subcuenca. Estos datos permitieron establecer las condiciones iniciales para cada una de las tres subcuencas definidas previamente, utilizando el modelo hidrológico Témez ya calibrado y validado. Este paso fue esencial para asegurar la coherencia temporal y espacial de las simulaciones futuras.

Paralelamente, se empleó una base de datos climática de reanálisis histórico que abarca desde 1981 hasta el final del año hidrológico 2022/2023. A partir de esta extensa serie temporal, se calculó la media multimensual histórica tanto para la precipitación como para la temperatura. Estos valores promediados representan el comportamiento climático normal o de referencia y constituyen la línea base sobre la cual se aplican las anomalías futuras.

Para incorporar una visión prospectiva del comportamiento climático, se utilizaron los datos de predicción estacional del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF),

que proporcionan pronósticos climáticos para los siguientes seis meses. Además, se integraron los datos de hindcast (simulaciones retrospectivas del modelo climático del ECMWF).

A partir de estas dos fuentes (predicción y hindcast), se calcularon las anomalías mensuales de temperatura y precipitación, es decir, las diferencias entre los valores pronosticados y la media multimensual histórica. Estas anomalías climáticas fueron luego aplicadas sobre la media multimensual histórica para obtener escenarios de clima para cada subcuenca, representando así las condiciones futuras esperadas para el periodo de pronóstico de seis meses.

Con estos datos climáticos proyectados, se procedió a alimentar nuevamente el modelo hidrológico de cada subcuenca. Esto permitió simular los caudales futuros esperados, considerando tanto las condiciones iniciales del sistema (2023/2024) como los cambios esperados en las variables climáticas. Una vez generados los caudales mensuales simulados para cada subcuenca, se realizó una etapa de integración y transformación para estimar los niveles del río esperados en la estación de Manaus, situada estratégicamente en el puerto del mismo nombre, en Brasil. Para esta conversión de caudales a niveles se construyó una curva de gasto del río Negro en la estación Manaus. En la Figura 4-4 se muestra la metodología aplicada para la predicción hidrológica

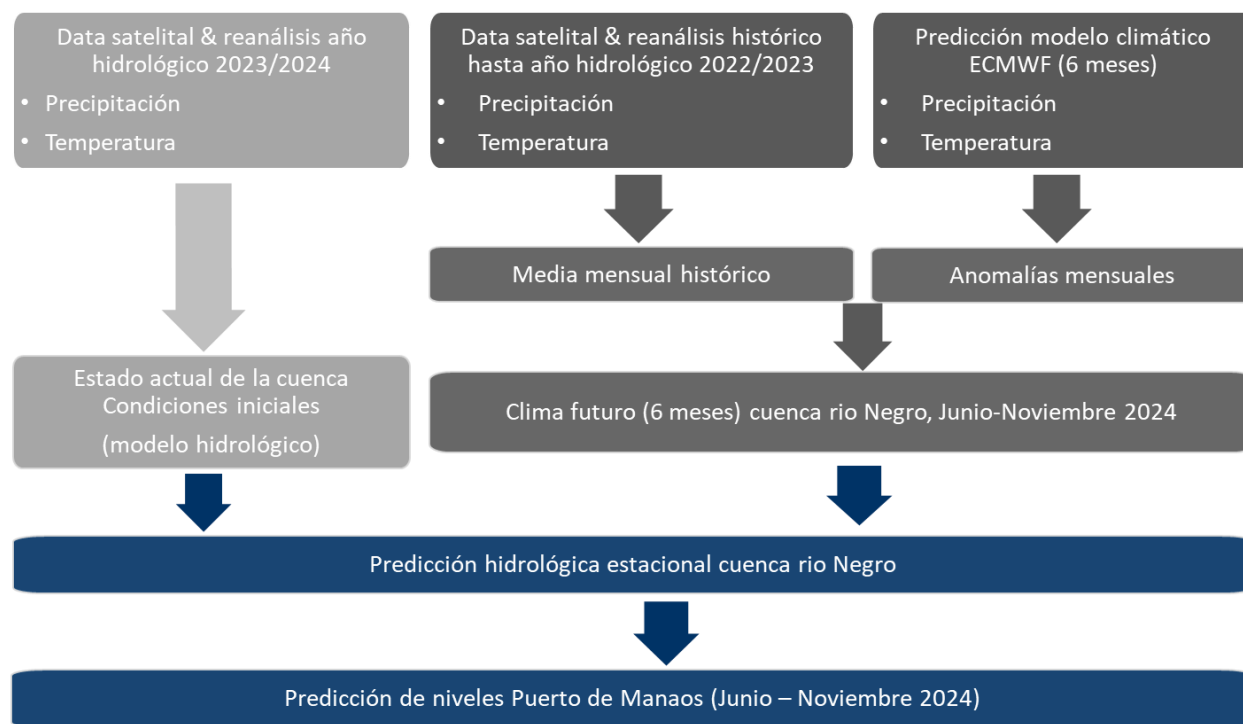


Figura 4-4: Metodología aplicada para la predicción hidrológica

## 5 APLICACIÓN Y RESULTADOS

### 5.1 Búsqueda del mejor dato satelital y reanálisis

En el contexto de la modelación y predicción hidrológica, la elección de datos de entrada confiables es un paso fundamental para garantizar resultados coherentes y útiles. Ante la escasez o discontinuidad de observaciones in situ, especialmente en regiones remotas o con infraestructura limitada como la Amazonía, los datos satelitales y los productos de reanálisis son una fuente de datos potencialmente valiosas y complementarias para la estimación de variables hidrometeorológicas esenciales, tales como la precipitación, temperatura, humedad del suelo y evapotranspiración.

La búsqueda del mejor dato satelital o de reanálisis implica un proceso sistemático de evaluación y comparación entre múltiples productos disponibles. Cada fuente de datos posee características particulares en cuanto a resolución espacial y temporal, cobertura geográfica, frecuencia de actualización, tipo de sensores utilizados, y método de generación (observación directa, simulación numérica, o combinación de ambas). Los detalles de cada fuente de datos satelitales y reanálisis de detallan en el capítulo 3.4.

En general, no existe un único producto universalmente mejor; la elección del mejor dato depende del contexto local, el objetivo del estudio y la variable de interés, además de la metodología de estimación. Por tanto, es importante realizar un análisis comparativo para tomar la decisión del uso de la fuente de datos, lo que contribuye a reducir incertidumbres y mejorar la calidad de las simulaciones y predicciones hidrológicas. Para ello se realizaron los siguientes procedimientos.

#### 5.1.1 Procesamiento de datos observados

El procesamiento de datos observados constituyó una etapa importante para obtener los datos climáticos ya que estos datos representan la base para la validación de datos satelitales y de reanálisis. Su calidad y representatividad inciden directamente en la precisión de los resultados y en la capacidad de interpretación de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca.

Los datos observados provienen estaciones meteorológicas de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Perú, donde se miden variables clave como precipitación, temperatura del aire, humedad relativa,

velocidad de viento y otras variables climáticas. Estos datos constituyen la referencia primaria contra la cual se validarán los productos satelitales o de reanálisis (solo variables de precipitación y temperatura).

La calidad de los datos observados presenta a menudo desafíos significativos, especialmente en esta región de la Amazonía, por mantenimiento limitado, densidad de estaciones o registros discontinuos. Por ello, se realizó el procesamiento siguiendo una serie de etapas esenciales. El resumen del procesado de datos observados se muestra en la Figura 5-1.

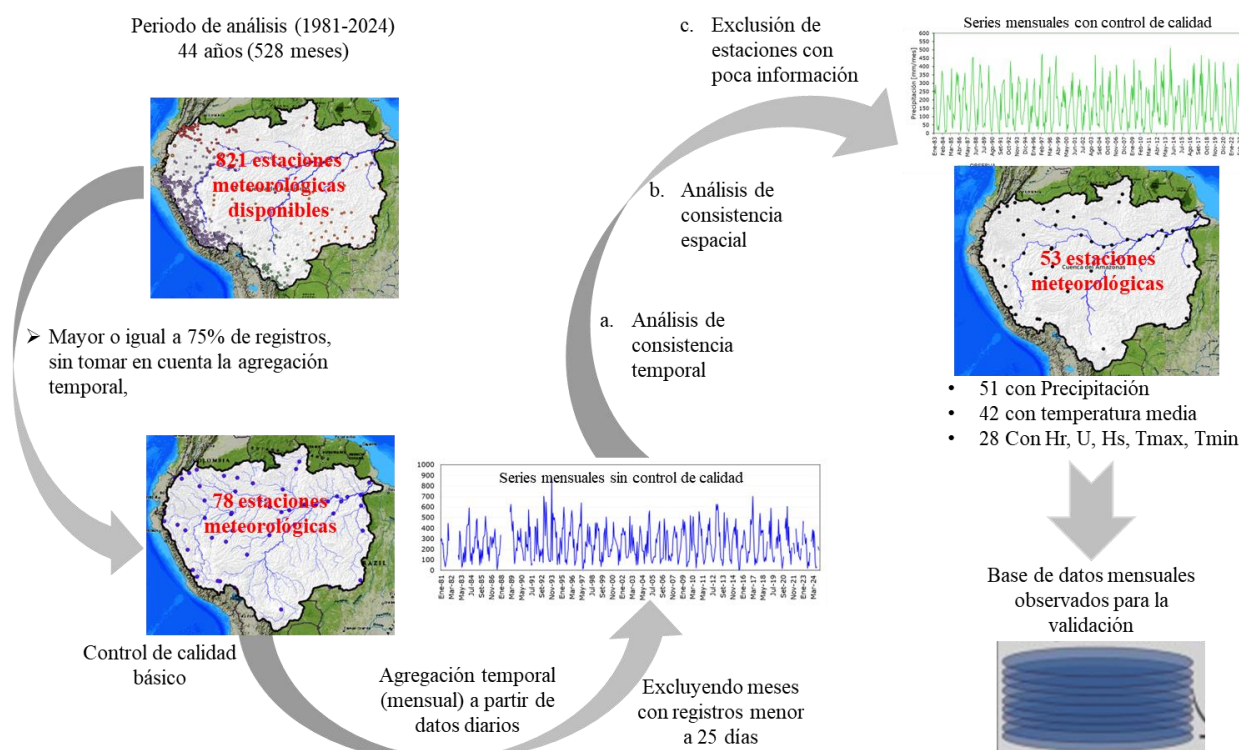


Figura 5-1: Resumen del procesado de datos observados

### 5.1.1.1 Recopilación y consolidación

El primer paso consistió en la recopilación de datos históricos desde distintas fuentes (institutos meteorológicos, agencias hidrológicas, bases de datos globales) de libre acceso y solicitud. Esta información se consolidó en un formato común, compatible con las herramientas de análisis de datos. En esta etapa se consideró aspectos como la frecuencia de registro (diaria, horaria, mensual), la unidad de medida y la localización geográfica precisa de cada estación.

En toda la cuenca del Amazonas se dispone de gran cantidad de estaciones; como se detalla en el 3.2 esta información proviene de diversos países y cada una tiene su particularidad en cuanto a la resolución temporal, variables registradas y las condiciones de accesibilidad.

Se recopilaban un total de 821 estaciones meteorológicas, entre convencionales y automáticas. De estas, solo se seleccionaron aquellas que cuentan con un 75% o más de registros históricos para el periodo comprendido entre enero de 1981 y agosto de 2024, independientemente de su agregación temporal. Como resultado, se eligieron 78 estaciones distribuidas en toda la cuenca. Como se evidencia en la Figura 5-2 (derecha) existe una carencia de estaciones en la zona sur de la cuenca. Esto se debe a que, en esta área de Brasil, la mayoría de las estaciones son automáticas y cuentan con registros a partir del año 2000. En el caso de Bolivia, las estaciones disponibles presentan registros escasos y desfasados.

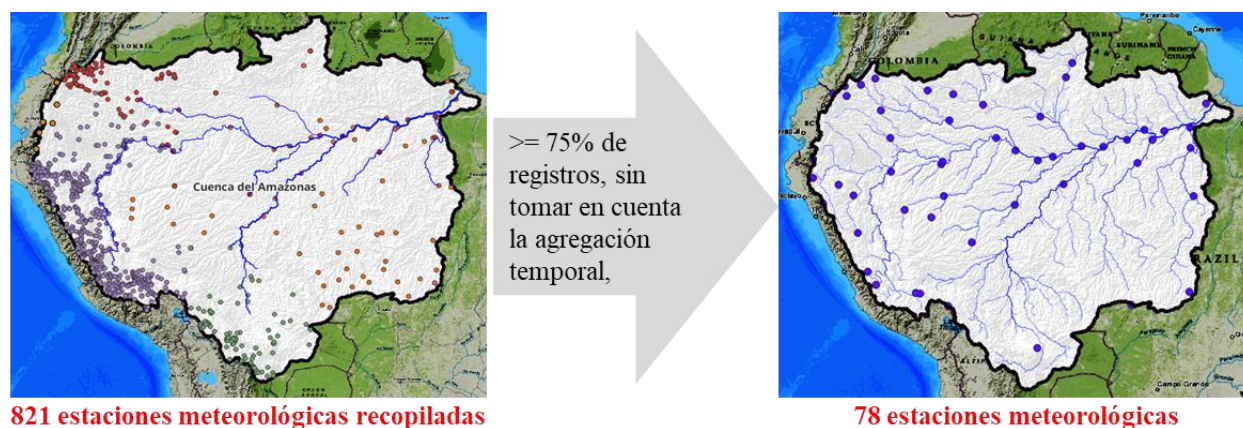


Figura 5-2: Depuración y consolidación de estaciones meteorológicas

#### 5.1.1.2 Control de calidad de datos diarios

El control de calidad se realizó con el objetivo de preparar las series para una posterior agregación temporal a datos mensuales. De las 78 estaciones consolidadas en la fase anterior, se aplicó un control de calidad a aquellas que cuentan con datos diarios. Este proceso incluyó la evaluación de ceros improbables, máximos extremos, repeticiones inusuales, saltos en la serie y verificación del rango físico posible. Si bien algunos de estos errores también pueden detectarse en datos agregados mensualmente, otros solo son identificables a nivel diario. En la Figura 5-3 se muestra una serie de datos diarios con control de calidad que corresponde a la estación Porto de Moz.

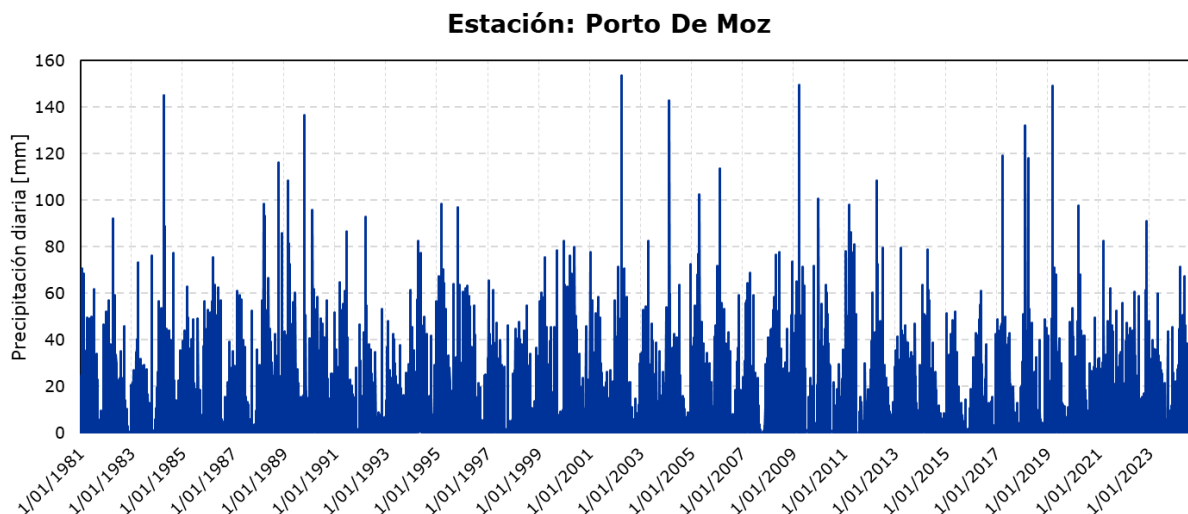


Figura 5-3: Ejemplo de serie de datos diarios de precipitación con control de calidad

### 5.1.1.3 Agregación temporal

Luego del control de calidad de las series diarias, se realizó la agregación temporal a datos mensuales.

En el caso de la precipitación, se obtuvieron valores mensuales mediante la acumulación de los datos diarios. Para ello, se estableció como criterio incluir únicamente aquellos meses que contaran con al menos 25 días con registros válidos. Esto se debe a que, al tratarse de una variable acumulativa, no es comparable por ejemplo un mes con solo 10 días registrados frente a otro con 30 días. Además, dado que estos datos se utilizaron para validar productos satelitales y de reanálisis, se consideró apropiado asegurar un umbral mínimo de registro temporal. La mayoría de las estaciones presentan entre 28 y 31 días con datos por mes, aunque en algunas zonas principalmente aquellas con baja densidad de estaciones se detectó una mayor cantidad de datos faltantes. Aplicando este criterio, se obtuvo una serie mensual de precipitación para 51 estaciones.

En el caso de la temperatura, al tratarse de una variable promediada y no acumulativa, se consideró suficiente contar con al menos 15 días de registros válidos por mes. La mayoría de las estaciones cumplen con este requisito y presentan registros casi completos. Bajo este criterio, se generó la serie de temperatura media mensual para 42 estaciones.

Finalmente, para otras variables como velocidad del viento, humedad relativa e insolación, se aplicó un criterio similar al utilizado para la temperatura. De esta manera, se obtuvieron datos mensuales para estas variables en 28 estaciones.

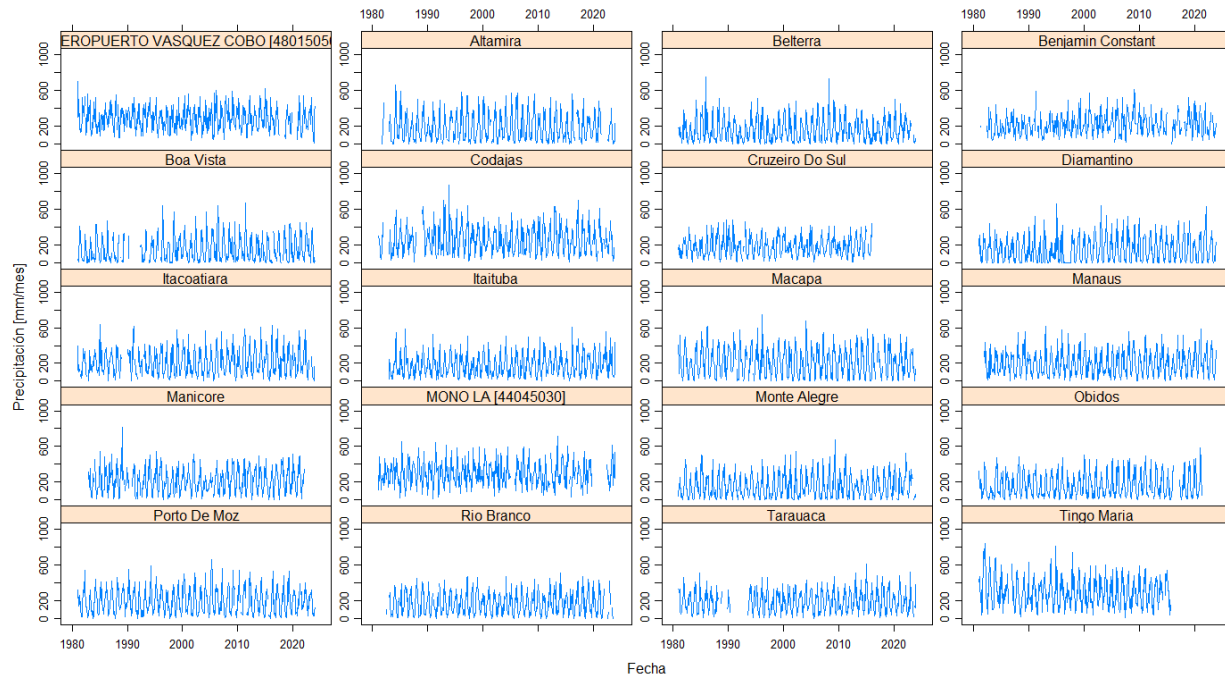
#### **5.1.1.4 Análisis de consistencia de datos mensuales**

Antes de utilizar los datos mensuales observados, se aplicaron rigurosas técnicas de control de calidad para detectar, evaluar y, en la medida de lo posible, corregir errores o inconsistencias que pudieran afectar la interpretación de los resultados y la confiabilidad de los datos de entrada, ya sea para la validación de datos satelitales y de reanálisis, o para su uso en el cálculo de la ETP. Si bien se realizó un control de calidad sobre los datos diarios, algunos errores no pueden ser detectados a ese nivel de desagregación, pero sí se evidencian al realizar la agregación mensual.

El control de calidad se basó en una combinación de procedimientos estadísticos, visuales y empíricos, organizados en diferentes niveles de análisis. Entre las cuales se incluyeron el análisis temporal y espacial.

##### **a) Análisis de consistencia temporal**

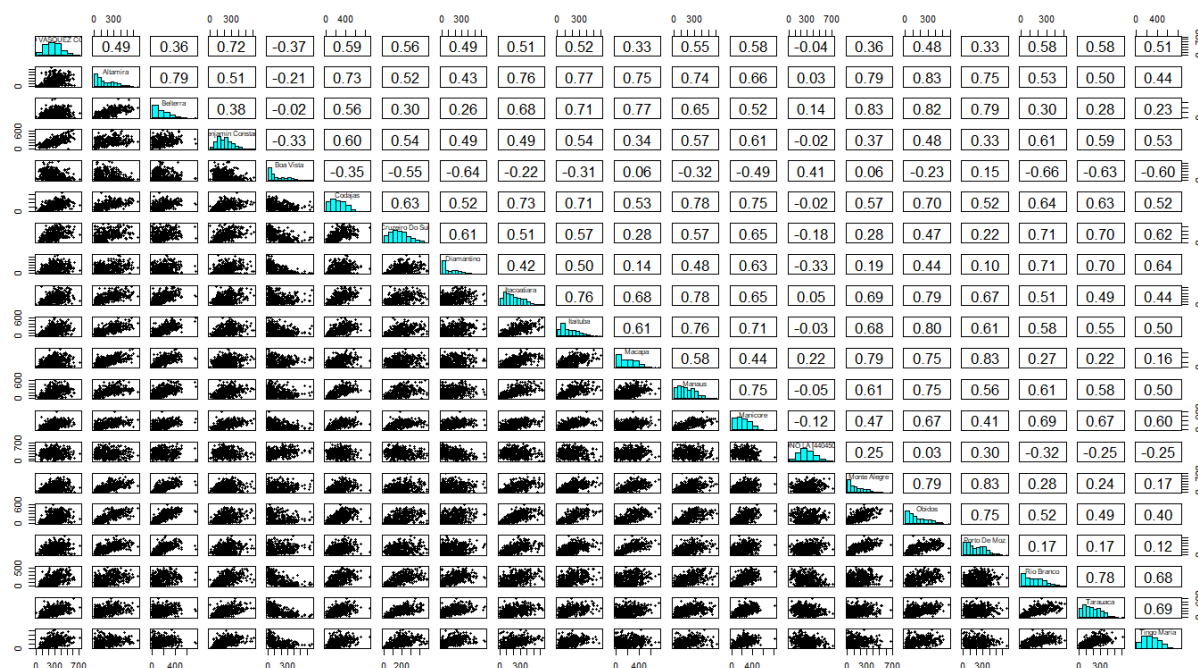
Se realizó la detección de saltos bruscos o cambios sistemáticos, identificando discontinuidades en las series temporales que podrían indicar errores de digitación o cambios en los instrumentos. Además, se verificaron tendencias improbables, como aumentos lineales excesivos de temperatura en periodos cortos. En la Figura 5-4 se muestra la serie mensual de precipitación de algunas estaciones analizadas. Por ejemplo, en la estación Tingo María se observa un desfase en el periodo 1981–1985 con respecto a los registros posteriores; un caso similar se presenta en Manicoré, donde se registra una media más alta en el periodo 1988/89. Otras estaciones presentan lagunas temporales. Los datos inconsistentes y/o dudosos, como los mencionados anteriormente, fueron analizados de forma puntual y, en muchos casos, excluidos de la base de datos. De manera similar se realizó para la temperatura media.



*Figura 5-4: Series mensuales de precipitación de algunas estaciones analizadas*

#### b) Análisis de consistencia espacial

Una manera de evaluar las inconsistencias espaciales fue realizando la comparación cruzada entre estaciones que se encuentran próximas entre sí o que comparten condiciones climáticas similares. A través de análisis de correlación, gráficos de dispersión y evaluación de medias, fue posible identificar comportamientos anómalos que podrían estar relacionados con fallas específicas de una estación. Por ejemplo, si una estación registra sistemáticamente valores más bajos de precipitación en comparación con otras cercanas, podría haber problemas de calibración del pluviómetro, obstrucciones físicas o deterioro del sensor. En la Figura 5-5 se muestra la correlación y dispersión entre algunas de las estaciones analizadas. Se encontraron buenas correlaciones entre estaciones vecinas y entre aquellas ubicadas en zonas con características climáticas similares. Sin embargo, en la zona andina de Perú, Ecuador y Bolivia, no se observó una buena correlación entre estaciones cercanas, lo cual se atribuye a la compleja variabilidad climática que caracteriza a esta región. Este mismo análisis se realizó para todas las estaciones de precipitación y temperatura. En el caso de las estaciones que presentaron inconsistencias espaciales en determinados periodos, se excluyeron los datos correspondientes a esos intervalos de tiempo.



*Figura 5-5: Dispersión y correlación de precipitación mensual de algunas estaciones analizadas*

Finalmente, una vez realizado el análisis de consistencia de los datos mensuales, algunas estaciones quedaron con poca información consistente y fiable, por lo cual fueron excluidas para su posterior uso en la validación y el cálculo de la ETP. El conjunto final quedó conformado por 53 estaciones, de las cuales 51 cuentan con datos de precipitación, 42 con temperatura media y 28 con otras variables climáticas, como temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación.

#### 5.1.1.5 Base de datos para la validación

La base de datos para la validación de los datos satelitales y de reanálisis se consolidó con 51 estaciones con registros de precipitación y 42 estaciones con registros de temperatura media. Los datos de todas las estaciones se organizaron en series temporales mensuales para el mismo periodo (01/1983–12/2023), lo que teóricamente corresponde a 492 valores mensuales por estación y por variable. Sin embargo, algunas estaciones no cuentan con registros en ciertos meses o, en su defecto, fueron excluidas durante el control de calidad aplicado en el periodo definido. La cantidad de datos evaluados por estación para las variables de precipitación y temperatura se muestra en la Figura 5-6 y Figura 5-7, respectivamente.

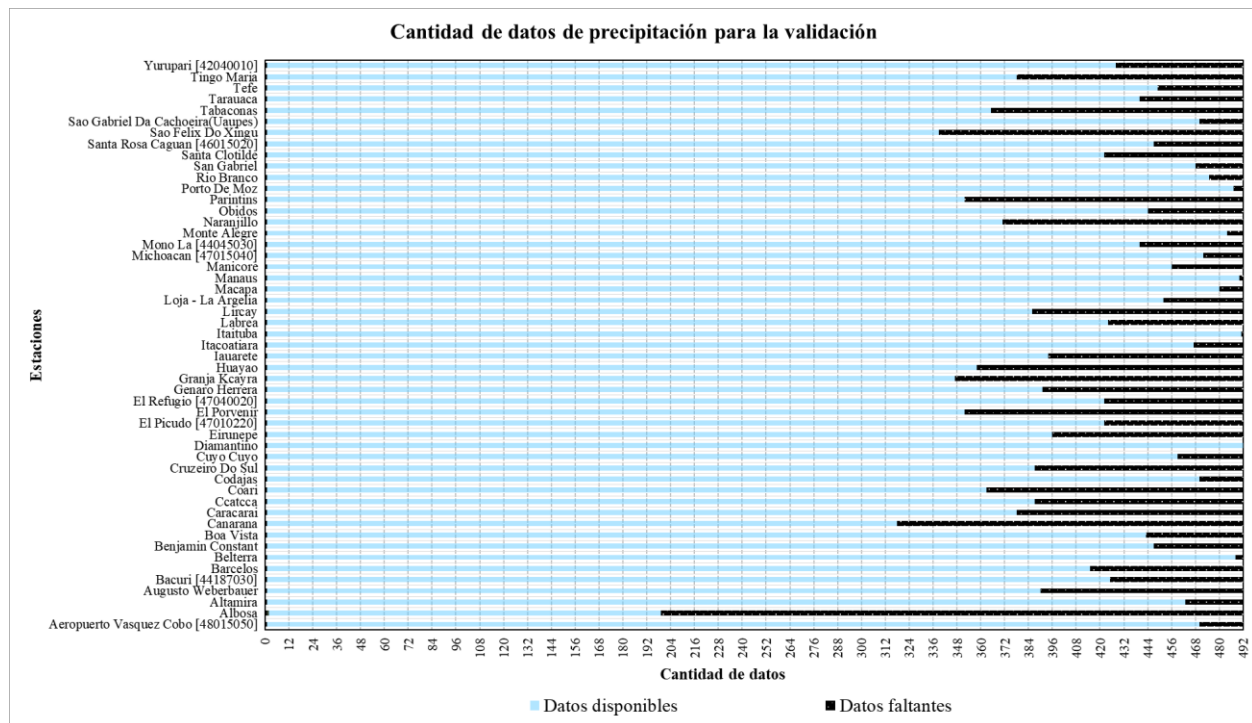


Figura 5-6: Cantidad de datos de precipitación utilizados para la validación, por estación

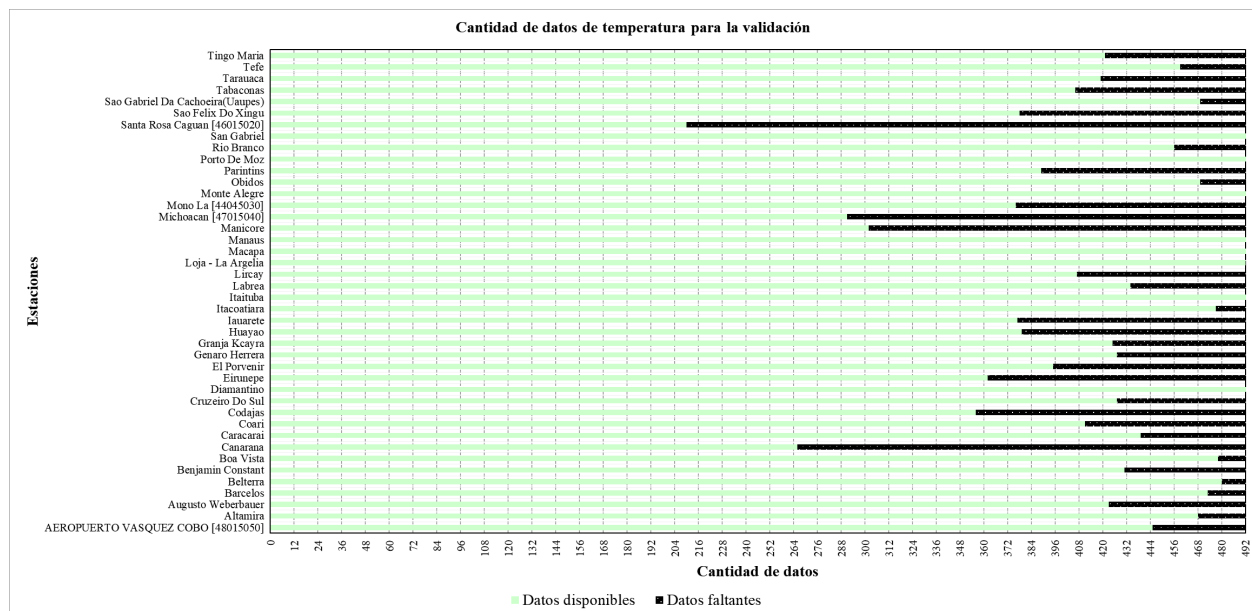


Figura 5-7: Cantidad de datos de temperatura utilizados para la validación, por estación

## 5.1.2 Procesamiento de datos satelitales y reanálisis

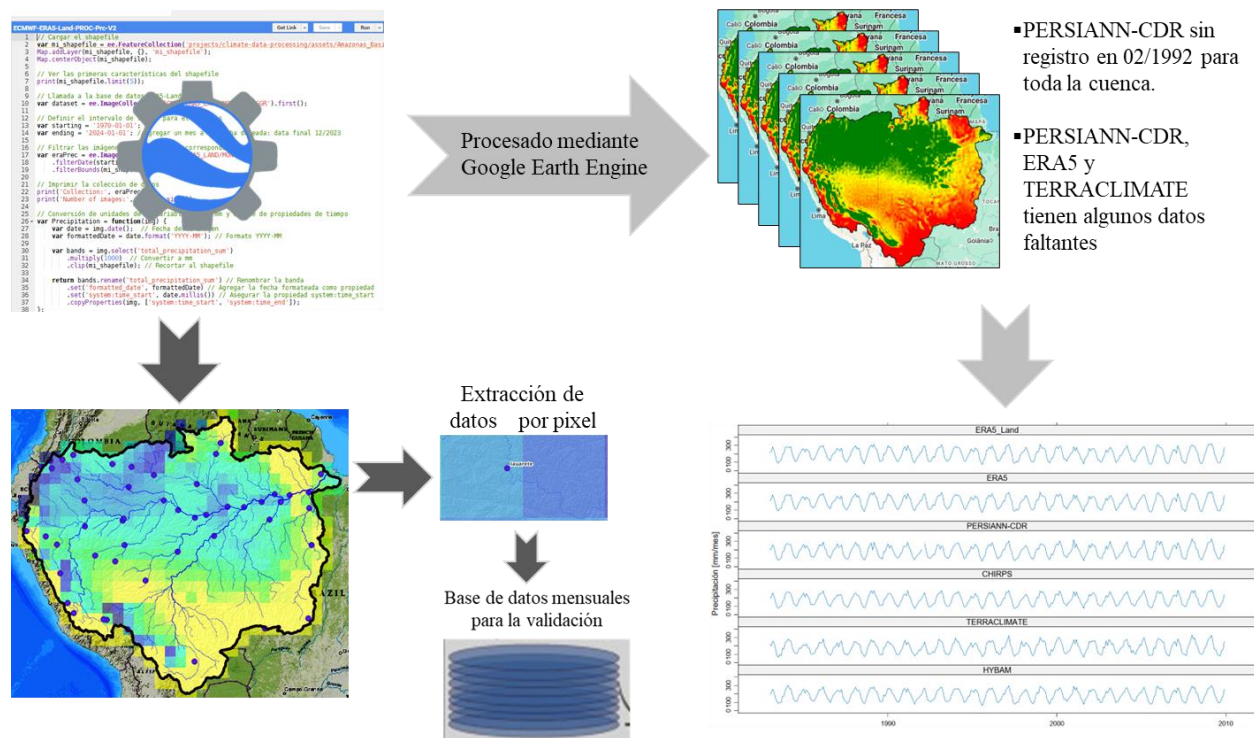


Figura 5-8: Resumen del procesamiento de datos satelitales y reanálisis

### 5.1.2.1 Descarga y procesamiento

El procesamiento de datos se realizó mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE) para siete fuentes de datos: ERA5, ERA5-Land, TERRACLIMATE, PERSIANN-CDR, MERRA-2, NOAA CPC y CHIRPS. Para el producto HYBAM, el procesamiento se llevó a cabo utilizando el programa R.

La descarga y el procesamiento de datos se efectuaron de dos maneras: la primera para realizar un análisis espacial (capas ráster), y la segunda para un análisis temporal, considerando la media areal de toda la cuenca (series temporales).

También se realizó el procesamiento y la descarga de datos de manera puntual, es decir, para cada estación. Cada fuente de datos presenta particularidades en cuanto a su resolución temporal (diaria o mensual), unidades, formatos de fecha y otras características. Se exploraron todas estas especificidades y se elaboró un código en JavaScript para cada fuente dentro de GEE.

De esta forma, se obtuvieron datos mensuales tanto para toda la cuenca del río Amazonas como para cada estación, con sus variables correspondientes (precipitación y/o temperatura). En la Figura 5-9 se muestra la plataforma de GEE utilizada para el procesamiento de los datos.

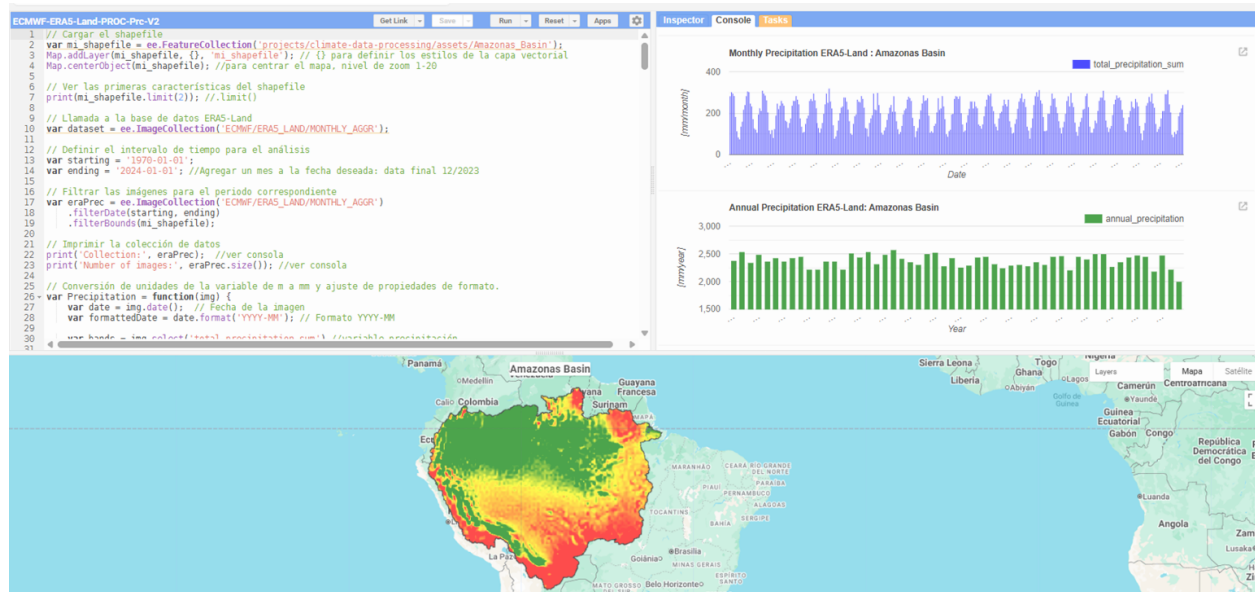


Figura 5-9: Plataforma de procesamiento de datos Google Earth Engine (GEE)

### 5.1.2.2 Análisis espacial

Como parte del análisis espacial, se evaluaron los datos ráster provenientes de distintas fuentes satelitales y de reanálisis. Este proceso tuvo como objetivo identificar la presencia de píxeles faltantes o nulos (valores NaN, NoData o equivalentes), los cuales podrían afectar la integridad de los análisis posteriores.

Para ello, se generaron máscaras de datos válidos e inválidos en cada imagen, lo que permitió visualizar y cuantificar espacialmente las zonas con pérdida de información. Adicionalmente, se construyeron mapas de precipitación y temperatura anual para toda la cuenca, lo cual facilitó la detección de posibles errores. Por ejemplo, se observó que el producto ERA5 presenta ausencia de datos en áreas con cuerpos de agua de gran tamaño. En la Figura 5-10 se muestra la distribución espacial de la precipitación anual para las seis fuentes de datos analizadas. HYBAM corresponde al periodo 1983-2009 y ERA5 1983-2019. Mientras que ERA5-Land, TERRACLIMATE, PERSIANN-CDR y CHIRPS corresponden al periodo 1983-2023.

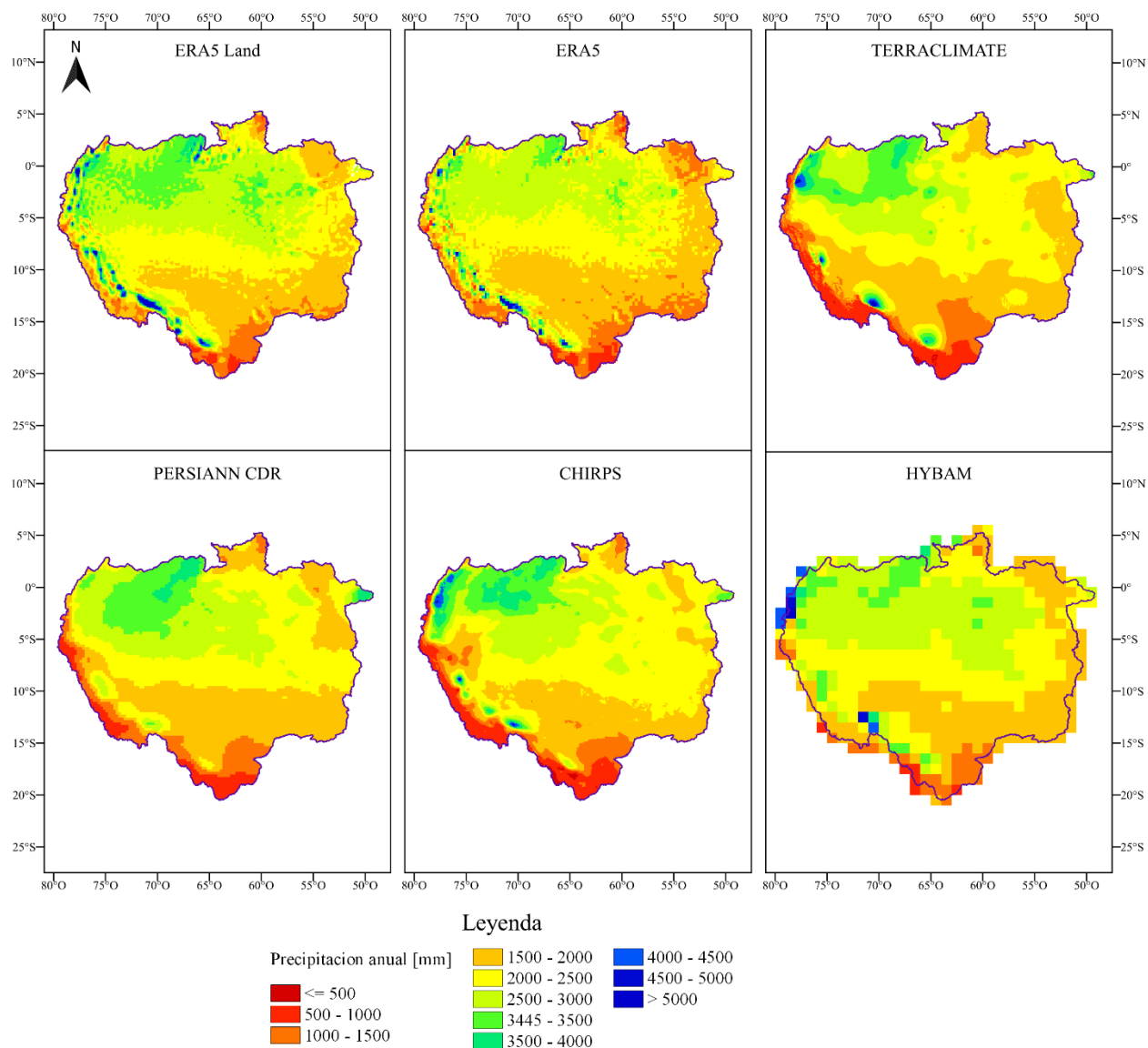


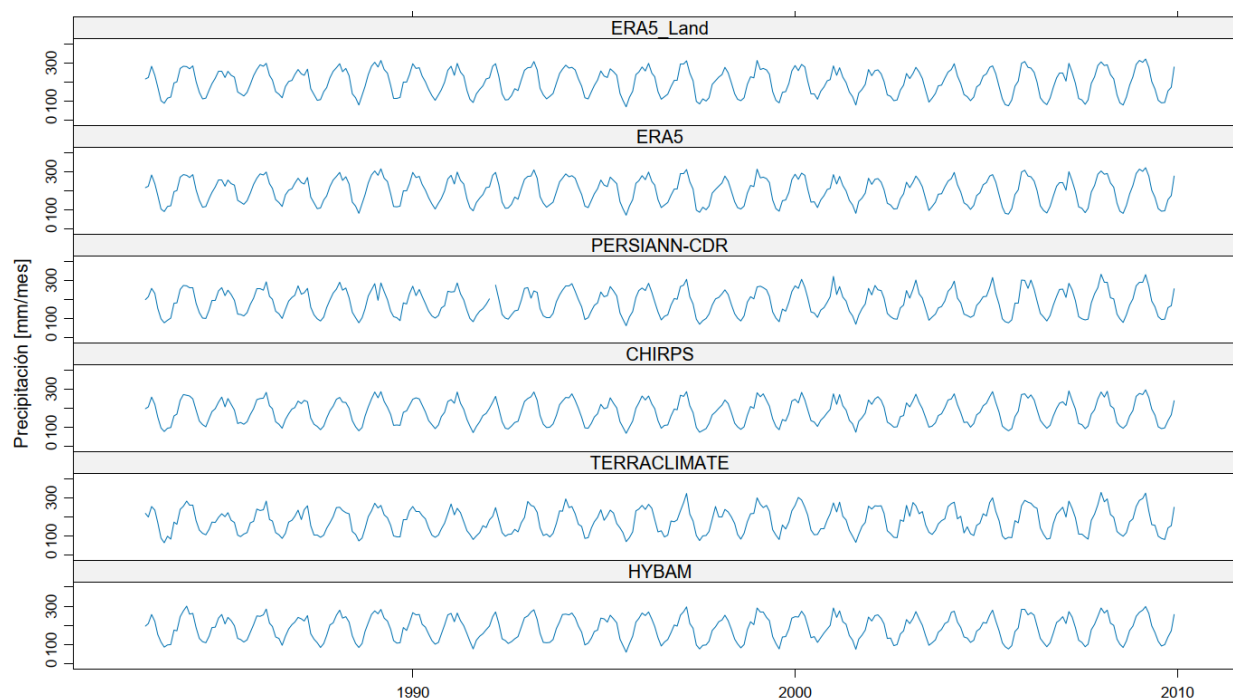
Figura 5-10: Precipitación media anual en la cuenca del río Amazonas

### 5.1.2.3 Análisis temporal

El análisis temporal de los datos ráster permitió evaluar la disponibilidad de datos, así como la evolución mensual y anual de las variables climáticas (precipitación y temperatura) durante el periodo 1981–2024. Este análisis fue fundamental para identificar la presencia de vacíos en algunas fuentes, la presencia de ciclos estacionales y la detección de valores anómalos.

Asimismo, se comparó el comportamiento temporal de las distintas fuentes de datos, evidenciando que los productos ERA5, TERRACLIMATE y PERSIANN-CDR presentan datos faltantes en determinados meses del periodo analizado.

En la Figura 5-11 se muestra la serie mensual de precipitación para la cuenca del río Amazonas para el periodo 1983-2009 (periodo común entre todas las fuentes de datos).



*Figura 5-11: Serie temporal de precipitación para cada fuente de información*

### **5.1.3 Validación de información satelitales y reanálisis**

La validación de los productos satelitales y de reanálisis se llevó a cabo mediante la comparación de sus valores con datos observados de precipitación y temperatura mensual en estaciones meteorológicas seleccionadas, las cuales habían pasado previamente un análisis de consistencia y control de calidad.

La validación se realizó utilizando indicadores estadísticos como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error cuadrático medio (RMSE), el sesgo (BIAS), la eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) y el error medio absoluto (MAE), lo que permitió evaluar el grado de ajuste entre los datos satelitales o de reanálisis y los datos observados.

Adicionalmente, se emplearon gráficos de dispersión y de series temporales para facilitar la interpretación visual de las diferencias y coincidencias entre ambos conjuntos de datos. En la Figura 5-12 se presenta la cantidad de datos de precipitación empleados para cada estación y por cada fuente. De manera similar se realizó para el caso de temperatura.

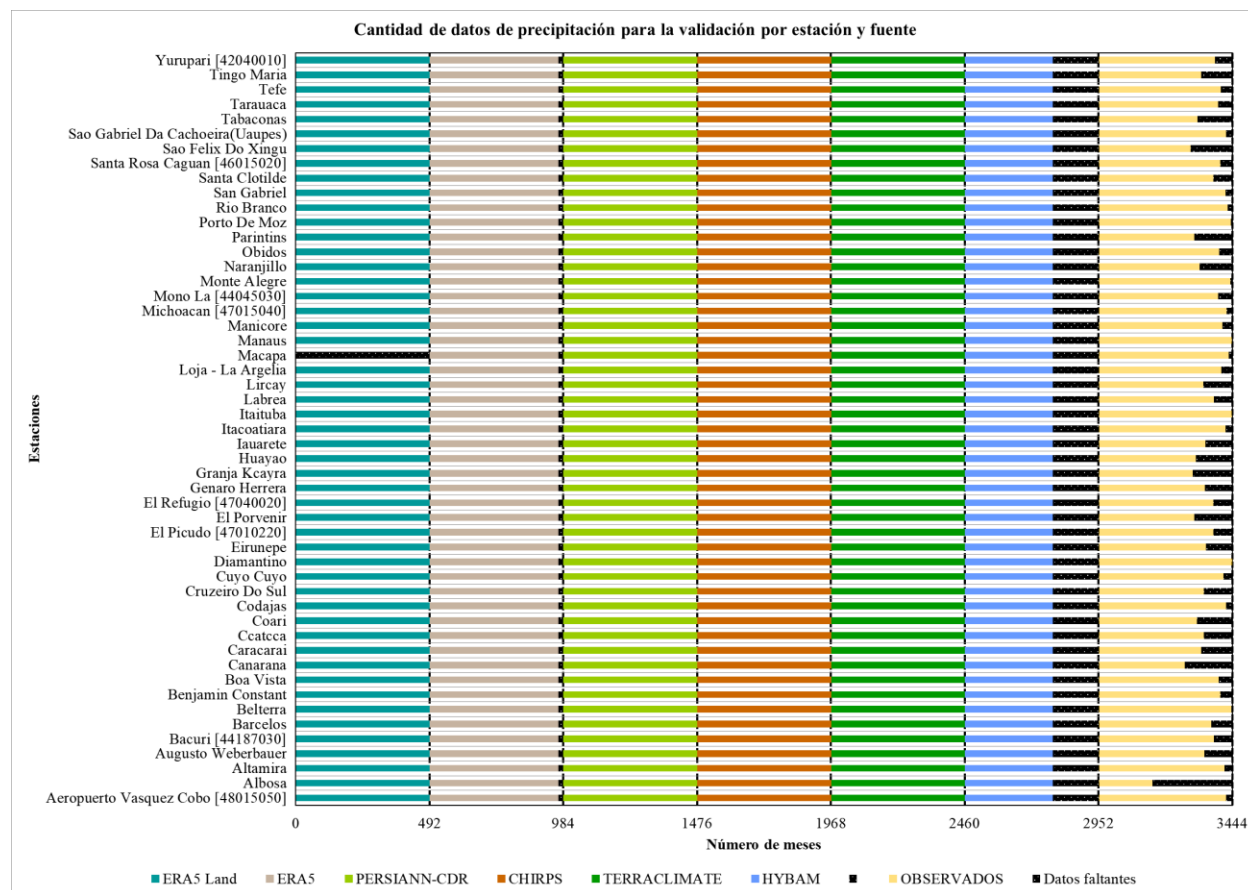


Figura 5-12: Cantidad de datos de precipitación utilizados para la validación, por estación y fuente

#### 5.1.4 Selección de la información satelital y reanálisis

Con base en los resultados obtenidos en el ítem 5.1, se llevó a cabo la selección de la mejor fuente de información satelital o de reanálisis. Este proceso se basó en una validación comparativa frente a los datos observados (provenientes de estaciones meteorológicas), utilizando criterios estadísticos con el objetivo de identificar el producto que ofrece mayor precisión respecto a las observaciones. Los valores de los indicadores estadísticos RMSE y BIAS relativo obtenidos para la precipitación se presentan en la Tabla 5-1, mientras que los correspondientes a la temperatura media se detallan en la

Tabla 5-2.

Tabla 5-1: Resultados de validación precipitación por estación, estadísticos RMSE y BIAS relativo

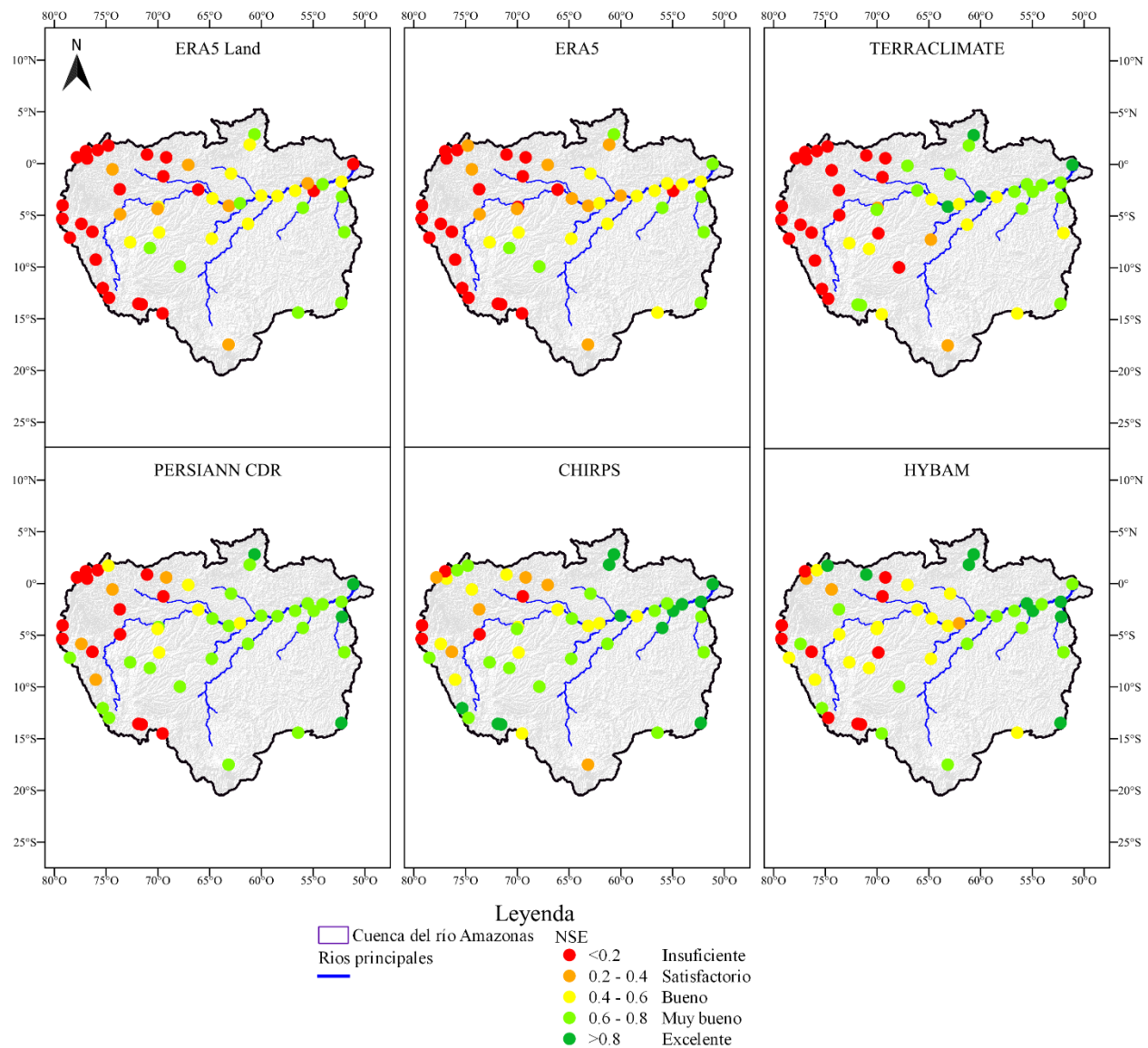
| Estación                           | RMSE      |       |               |        |               |       | BIAS      |        |               |        |               |        |
|------------------------------------|-----------|-------|---------------|--------|---------------|-------|-----------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|                                    | ERA5 Land | ERA5  | PERSIAN N-CDR | CHIRPS | TERRAC LIMITE | HYBAM | ERA5 Land | ERA5   | PERSIAN N-CDR | CHIRPS | TERRAC LIMITE | HYBAM  |
| Aeropuerto Vazquez Cobo [48015050] | 93.1      | 120.2 | 75.1          | 79.2   | 108.7         | 86.5  | -10.5%    | -9.5%  | -7.6%         | -14.7% | -11.5%        | -17.4% |
| Albosa                             | 76.0      | 76.9  | 55.1          | 71.1   | 72.1          | 46.4  | 3.9%      | 16.4%  | -8.0%         | -16.0% | -14.5%        | 14.7%  |
| Altamira                           | 82.0      | 82.7  | 60.0          | 82.7   | 75.0          | 55.9  | -9.6%     | -6.1%  | -8.9%         | -3.5%  | -11.2%        | -9.5%  |
| Augusto Weberbauer                 | 234.6     | 208.0 | 28.9          | 23.9   | 79.4          | 37.2  | 350.2%    | 324.8% | 22.9%         | 5.2%   | 34.8%         | 43.8%  |
| Bacuri [44187030]                  | 120.0     | 124.3 | 108.3         | 106.7  | 136.6         | 127.4 | -16.7%    | -18.4% | -8.8%         | -10.3% | -18.8%        | -2.3%  |
| Barcelos                           | 86.1      | 85.7  | 62.2          | 64.6   | 64.6          | 73.0  | 17.4%     | 16.6%  | 1.8%          | 2.2%   | -2.0%         | 8.3%   |
| Belterra                           | 141.4     | 193.1 | 58.5          | 52.3   | 75.1          | 56.7  | 61.2%     | 93.4%  | 7.1%          | 4.7%   | 0.5%          | 6.6%   |
| Benjamin Constant                  | 89.9      | 94.7  | 73.2          | 66.5   | 60.2          | 77.3  | 8.6%      | 14.0%  | 14.9%         | -4.3%  | 0.5%          | 6.9%   |
| Boa Vista                          | 68.4      | 65.8  | 55.6          | 53.9   | 52.1          | 58.7  | 3.9%      | -0.9%  | 4.1%          | -11.8% | 1.2%          | 8.5%   |
| Canarana                           | 87.1      | 79.6  | 64.6          | 60.3   | 91.0          | 65.1  | -26.9%    | -20.9% | -7.6%         | -7.1%  | -16.4%        | -11.2% |
| Caracará                           | 100.6     | 107.5 | 59.4          | 50.7   | 80.5          | 52.9  | 29.2%     | 36.0%  | 3.3%          | 0.3%   | -8.7%         | 6.2%   |
| Catoca                             | 90.2      | 96.0  | 106.7         | 24.3   | 27.6          | 66.9  | 133.1%    | 142.7% | 147.8%        | 4.7%   | 10.0%         | 100.7% |
| Coari                              | 89.0      | 86.2  | 58.9          | 72.9   | 40.3          | 76.7  | 24.5%     | 19.0%  | 8.8%          | -13.7% | -1.2%         | 3.8%   |
| Codajás                            | 94.5      | 97.1  | 99.7          | 112.0  | 108.5         | 122.8 | 0.0%      | -4.0%  | -16.5%        | -22.7% | -12.2%        | -24.6% |
| Cruzeiro Do Sul                    | 71.4      | 72.7  | 65.6          | 58.9   | 79.4          | 74.5  | 3.7%      | 3.5%   | 7.2%          | 4.4%   | -5.8%         | -3.7%  |
| Cuyo Cuyo                          | 93.0      | 125.9 | 63.3          | 42.2   | 42.0          | 32.8  | 117.1%    | 163.3% | 60.0%         | 5.1%   | -2.2%         | 19.2%  |
| Diamantino                         | 87.1      | 87.7  | 73.9          | 74.8   | 90.2          | 95.8  | -8.5%     | -11.5% | -1.1%         | -2.8%  | -5.0%         | -4.1%  |
| Eirunepe                           | 94.2      | 95.7  | 88.6          | 85.1   | 120.4         | 116.9 | -3.1%     | 2.3%   | 0.3%          | -0.2%  | -1.0%         | 19.0%  |
| El Picudo [47010220]               | 153.6     | 160.3 | 157.7         | 107.2  | 185.1         | 98.9  | -13.6%    | -25.8% | -21.9%        | -2.8%  | -18.1%        | 4.0%   |
| El Porvenir                        | 110.5     | 163.7 | 74.4          | 40.5   | 48.1          | 55.2  | 103.4%    | 160.3% | 59.0%         | -11.0% | 24.0%         | 48.8%  |
| El Refugio [47040020]              | 111.1     | 111.3 | 116.7         | 96.0   | 141.8         | 97.0  | -2.5%     | -3.8%  | -0.6%         | -0.5%  | -8.9%         | 8.2%   |
| Genaro Herrera                     | 79.9      | 81.2  | 95.5          | 92.6   | 112.4         | 65.3  | 8.6%      | 11.2%  | 15.6%         | -23.0% | 4.5%          | 3.9%   |
| Granja Kcayra                      | 70.5      | 71.8  | 84.5          | 23.2   | 25.6          | 63.4  | 91.7%     | 91.5%  | 108.8%        | -15.2% | -6.4%         | 82.6%  |
| Huayao                             | 97.7      | 94.8  | 29.2          | 18.8   | 98.2          | 28.7  | 137.2%    | 134.7% | 19.3%         | 0.6%   | -10.3%        | 14.7%  |
| Iauarete                           | 95.4      | 95.7  | 85.2          | 86.3   | 108.8         | 100.8 | -1.5%     | -2.7%  | 9.9%          | 9.8%   | 6.9%          | -5.4%  |
| Itacoatiara                        | 90.1      | 87.6  | 72.6          | 91.5   | 95.9          | 62.9  | 7.9%      | 1.4%   | -8.0%         | -23.4% | -16.3%        | -7.1%  |
| Itaituba                           | 76.1      | 73.1  | 63.3          | 52.1   | 74.1          | 55.0  | 4.1%      | 6.9%   | 10.8%         | -6.3%  | -6.0%         | 6.1%   |
| Labrea                             | 88.5      | 90.3  | 76.5          | 69.7   | 108.5         | 91.2  | 6.9%      | 3.5%   | 6.9%          | 2.7%   | 15.0%         | -5.0%  |
| Lircay                             | 93.8      | 95.1  | 34.6          | 26.5   | 96.2          | 62.1  | 126.7%    | 131.6% | 22.9%         | -2.5%  | -4.3%         | 67.2%  |
| Loja - La Argelia                  | 66.4      | 69.8  | 48.3          | 46.4   | 58.0          | 53.2  | 55.7%     | 49.9%  | 13.3%         | -19.6% | 10.9%         | 14.0%  |
| Macapá                             |           | 94.6  | 62.3          | 51.5   | 47.8          | 72.2  |           | -15.3% | 0.4%          | -2.1%  | -5.6%         | -2.6%  |
| Manaus                             | 87.0      | 104.8 | 75.9          | 43.5   | 41.3          | 73.0  | 20.3%     | 33.6%  | 4.7%          | -2.5%  | -3.2%         | -0.6%  |
| Manicoré                           | 89.3      | 83.4  | 62.0          | 72.2   | 85.1          | 80.6  | 16.6%     | 10.5%  | 0.9%          | -3.1%  | -2.7%         | -1.3%  |
| Michoacán [47015040]               | 149.2     | 139.1 | 124.1         | 52.4   | 86.7          | 105.7 | 93.0%     | 83.3%  | 54.8%         | 18.1%  | 20.5%         | 67.7%  |
| Mono La [44045030]                 | 153.1     | 116.4 | 123.2         | 70.5   | 158.6         | 93.2  | -38.4%    | -7.2%  | -18.1%        | 2.8%   | -1.2%         | 5.2%   |
| Monte Alegre                       | 80.5      | 82.9  | 61.7          | 56.4   | 78.1          | 70.6  | 4.4%      | 6.7%   | 1.6%          | -7.8%  | -12.8%        | 13.7%  |
| Naranjillo                         | 67.4      | 79.7  | 54.8          | 49.7   | 63.4          | 32.7  | 5.2%      | 34.6%  | -1.1%         | -4.0%  | -6.3%         | 15.0%  |
| Obidos                             | 108.5     | 95.6  | 72.4          | 61.7   | 72.2          | 55.5  | 44.3%     | 34.8%  | 24.4%         | 9.0%   | 2.5%          | 19.6%  |
| Parintins                          | 99.0      | 96.9  | 70.7          | 69.3   | 92.5          | 68.8  | 18.4%     | 13.3%  | -1.4%         | -7.6%  | -2.4%         | -7.8%  |
| Porto De Moz                       | 87.2      | 87.2  | 62.1          | 53.6   | 68.4          | 59.8  | -11.1%    | -19.3% | -3.7%         | -3.5%  | -1.1%         | -9.3%  |
| Rio Branco                         | 69.1      | 65.8  | 57.8          | 54.0   | 109.4         | 58.2  | -11.0%    | -1.2%  | -3.8%         | -4.7%  | -15.6%        | 1.7%   |
| San Gabriel                        | 111.6     | 244.2 | 107.2         | 46.3   | 62.5          | 247.7 | 114.1%    | 264.2% | 106.5%        | -19.7% | 17.0%         | 275.4% |
| Santa Clotilde                     | 96.1      | 98.9  | 98.6          | 88.3   | 167.6         | 45.2  | 13.5%     | 18.8%  | 19.5%         | 1.6%   | 33.2%         | 7.9%   |
| Santa Rosa Caguan [46015020]       | 182.7     | 99.9  | 95.9          | 77.7   | 125.1         | 47.9  | 61.0%     | -10.9% | -6.2%         | 4.9%   | -1.8%         | 11.9%  |
| Sao Felix Do Xingu                 | 76.2      | 75.6  | 63.6          | 62.9   | 81.4          | 63.5  | 1.9%      | 0.6%   | 10.7%         | -0.4%  | 0.7%          | -1.8%  |
| Sao Gabriel Da Cachoeira(Uaupes)   | 82.1      | 82.1  | 69.1          | 80.9   | 56.4          | 64.4  | 2.1%      | 0.8%   | 4.2%          | -0.5%  | -4.5%         | 4.6%   |
| Tabaconas                          | 111.1     | 113.3 | 58.2          | 46.5   | 74.4          | 46.4  | 90.3%     | 91.3%  | -36.3%        | -29.1% | 3.5%          | -2.9%  |
| Tarauaca                           | 73.9      | 73.8  | 60.4          | 63.4   | 90.6          | 84.8  | -6.4%     | -4.2%  | -1.2%         | -3.4%  | 3.9%          | -15.2% |
| Tefe                               | 81.9      | 88.1  | 62.9          | 62.1   | 82.1          | 69.1  | 8.9%      | 17.5%  | 8.1%          | 5.5%   | 5.4%          | 4.8%   |
| Tingo Maria                        | 164.9     | 169.3 | 129.4         | 117.9  | 145.0         | 101.4 | -39.2%    | -41.5% | -34.3%        | -24.6% | -15.8%        | -15.7% |
| Yurupari [42040010]                | 139.5     | 149.7 | 133.7         | 105.3  | 152.0         | 49.6  | -27.1%    | -31.5% | -21.4%        | -10.8% | -25.4%        | -1.0%  |

Tabla 5-2: Resultados de validación temperatura por estación, estadísticos RMSE y BIAS relativo

| Estación                | RMSE      |      |         |          |               | BIAS      |       |         |          |               |
|-------------------------|-----------|------|---------|----------|---------------|-----------|-------|---------|----------|---------------|
|                         | ERA5 Land | ERA5 | MERRA-2 | NOAA CPC | TERRACLIM ATE | ERA5 Land | ERA5  | MERRA-2 | NOAA CPC | TERRACLIM ATE |
| Aeropuerto Vazquez Cobo | 1.2       | 1.0  | 1.1     | 0.5      | 0.4           | -4.1%     | -3.5% | -3.6%   | -0.5%    | 0.3%          |

| Estación                 | RMSE      |      |         |          |               | BIAS      |        |         |          |               |
|--------------------------|-----------|------|---------|----------|---------------|-----------|--------|---------|----------|---------------|
|                          | ERA5 Land | ERA5 | MERRA-2 | NOAA CPC | TERRACLIM ATE | ERA5 Land | ERA5   | MERRA-2 | NOAA CPC | TERRACLIM ATE |
| Altamira                 | 1.1       | 7.2  | 1.1     | 0.6      | 0.8           | -3.0%     | -8.7%  | -1.6%   | 1.7%     | -1.8%         |
| Augusto Weberbauer       | 2.3       | 2.6  | 1.0     | 1.4      | 0.7           | -13.6%    | -16.2% | -4.0%   | -8.1%    | -2.3%         |
| Barcelos                 | 0.8       | 6.9  | 0.9     | 1.0      | 0.6           | -2.4%     | -6.2%  | -1.6%   | 3.3%     | -0.2%         |
| Belterra                 | 1.2       | 2.9  | 2.2     | 0.9      | 0.7           | 3.7%      | 6.7%   | 7.1%    | 3.0%     | 1.4%          |
| Benjamin Constant        | 0.7       | 0.5  | 0.7     | 0.8      | 0.8           | -1.8%     | -0.8%  | -1.4%   | 2.2%     | 2.3%          |
| Boa Vista                | 1.4       | 0.7  | 1.4     | 0.7      | 0.6           | -4.2%     | -1.1%  | -0.3%   | 0.8%     | 0.9%          |
| Canarana                 | 1.0       | 0.6  | 2.0     | 1.2      | 0.9           | 2.8%      | 1.4%   | 5.4%    | 4.1%     | -0.7%         |
| Caracarai                | 1.1       | 0.8  | 1.3     | 1.0      | 0.9           | -3.7%     | -2.2%  | -0.8%   | 2.9%     | 2.7%          |
| Coari                    | 1.0       | 0.6  | 0.9     | 0.7      | 0.6           | -2.8%     | 0.4%   | -1.0%   | 1.4%     | 0.5%          |
| Codajás                  | 0.7       | 0.5  | 0.9     | 1.5      | 1.0           | -1.4%     | 0.7%   | -0.3%   | 4.8%     | 3.1%          |
| Cruzeiro Do Sul          | 0.8       | 0.5  | 1.0     | 0.9      | 0.6           | -2.1%     | -0.1%  | -1.2%   | 1.8%     | -1.3%         |
| Diamantino               | 0.8       | 0.8  | 1.3     | 1.1      | 1.4           | -0.5%     | -0.5%  | -1.6%   | 3.0%     | -1.8%         |
| Eirunepe                 | 0.8       | 0.6  | 1.0     | 1.2      | 0.5           | -2.3%     | -1.8%  | -2.6%   | 3.3%     | 0.4%          |
| El Porvenir              | 2.8       | 3.7  | 2.1     | 0.8      | 0.5           | -10.2%    | -13.7% | -6.3%   | 2.5%     | 0.1%          |
| Genaro Herrera           | 1.5       | 0.9  | 1.5     | 0.4      | 0.5           | -5.5%     | -3.1%  | -4.9%   | -0.3%    | -1.3%         |
| Granja Kcayra            | 4.3       | 3.8  | 4.2     | 0.7      | 1.4           | -34.0%    | -29.7% | -32.8%  | -1.6%    | -10.4%        |
| Huayao                   | 2.4       | 5.8  | 3.5     | 4.3      | 1.0           | -18.5%    | -47.5% | -28.4%  | -34.9%   | -6.3%         |
| Iauarete                 | 1.0       | 0.9  | 0.9     | 1.3      | 0.5           | -3.4%     | -3.0%  | -3.0%   | 4.0%     | -0.7%         |
| Itacoatiara              | 0.6       | 8.2  | 1.1     | 0.8      | 0.7           | -1.0%     | -8.8%  | 1.4%    | 2.2%     | 1.7%          |
| Itaituba                 | 1.2       | 1.6  | 1.2     | 0.6      | 0.4           | -3.8%     | -2.9%  | -3.0%   | 1.6%     | 0.3%          |
| Labrea                   | 0.7       | 0.6  | 0.9     | 1.0      | 0.8           | -0.9%     | 0.2%   | -0.2%   | 2.8%     | 1.9%          |
| Lircay                   | 6.0       | 5.4  | 1.1     | 3.6      | 2.0           | -49.0%    | -43.7% | 6.4%    | -28.3%   | -15.2%        |
| Loja - La Argelia        | 1.2       | 1.0  | 2.9     | 3.0      | 0.7           | -6.8%     | 4.8%   | 16.8%   | 15.3%    | -1.9%         |
| Macapa                   |           | 1.3  | 1.1     | 0.7      | 0.6           |           | -1.0%  | -2.9%   | 2.2%     | -0.5%         |
| Manaus                   | 0.9       | 8.0  | 0.9     | 0.6      | 0.5           | -2.8%     | -8.8%  | -1.3%   | 1.5%     | 1.0%          |
| Manicore                 | 0.8       | 0.4  | 0.9     | 1.1      | 1.3           | -2.2%     | -0.8%  | -2.1%   | 3.7%     | 4.3%          |
| Michoacan                | 2.4       | 3.1  | 0.8     | 1.8      | 0.9           | -15.0%    | -19.3% | 0.7%    | 9.8%     | -3.3%         |
| Mono La                  | 1.9       | 5.5  | 3.3     | 1.2      | 0.7           | -6.9%     | -21.4% | -12.4%  | -3.7%    | -1.0%         |
| Monte Alegre             | 0.7       | 1.0  | 1.3     | 0.3      | 0.5           | 0.9%      | 3.1%   | -1.6%   | 0.3%     | 0.5%          |
| Obidos                   | 0.6       | 0.5  | 1.2     | 0.5      | 0.4           | -0.3%     | 1.1%   | -1.2%   | 1.4%     | 0.4%          |
| Parintins                | 1.2       | 0.4  | 1.3     | 0.4      | 0.5           | -4.0%     | -1.2%  | -3.7%   | 1.3%     | -0.5%         |
| Porto De Moz             | 0.9       | 1.3  | 1.1     | 0.8      | 0.8           | -1.8%     | 0.3%   | -0.9%   | 2.2%     | -2.4%         |
| Rio Branco               | 0.9       | 1.4  | 1.1     | 1.1      | 0.6           | 0.8%      | 1.1%   | 1.0%    | 2.8%     | 0.7%          |
| San Gabriel              | 1.5       | 0.7  | 0.9     | 2.0      | 0.7           | -11.9%    | 2.0%   | 6.1%    | -15.8%   | -1.5%         |
| Santa Rosa Caguan        | 1.6       | 1.1  | 1.7     | 1.3      | 1.6           | -5.5%     | -3.4%  | -4.8%   | -3.0%    | -5.2%         |
| Sao Felix Do Xingu       | 1.0       | 0.8  | 1.3     | 0.8      | 0.9           | -0.6%     | -1.0%  | -0.5%   | 1.1%     | -1.5%         |
| Sao Gabriel Da Cachoeira | 0.8       | 0.5  | 0.8     | 0.9      | 0.4           | -2.4%     | -1.3%  | -2.3%   | 2.4%     | 0.6%          |
| Tabaconas                | 1.0       | 3.2  | 2.9     | 1.2      | 0.8           | -5.3%     | -18.1% | 15.7%   | 3.0%     | 0.2%          |
| Tarauaca                 | 0.8       | 0.6  | 1.1     | 1.0      | 0.9           | -2.2%     | -1.4%  | -1.7%   | 3.0%     | -2.4%         |
| Tefe                     | 1.0       | 0.4  | 1.0     | 0.9      | 0.7           | -3.3%     | -0.6%  | -3.3%   | 2.9%     | 1.4%          |
| Tingo Maria              | 4.3       | 4.4  | 1.7     | 1.2      | 0.6           | -17.1%    | -17.7% | -4.3%   | 3.1%     | 0.2%          |

La distribución espacial de NSE precipitación por cada estación se muestra en la Figura 5-13. A partir de este análisis, se concluye que la mayoría de las fuentes de datos evaluadas presentan bajo desempeño en zonas con topografía compleja, como las áreas de mayor altitud en la cordillera de los Andes, mientras que tienden a tener mejor comportamiento en regiones de topografía suave. Específicamente para la zona de la cuenca del río Negro los resultados muestran un desempeño de bueno a excelente.



*Figura 5-13: Índice de NSE de precipitación para las estaciones validadas*

Además, se realizó un análisis gráfico agregado de los indicadores estadísticos para todas las estaciones, con la finalidad de facilitar una evaluación integral. Estos resultados para la precipitación se presentan en la Figura 5-14. El BIAS relativo muestra sobreestimaciones para la mayoría de las fuentes, CHIRPS y HYBAM y PERSIANN-CDR tienen ligeras sobreestimaciones y subestimaciones, además poseen buena correspondencia en la mayoría de las estaciones.

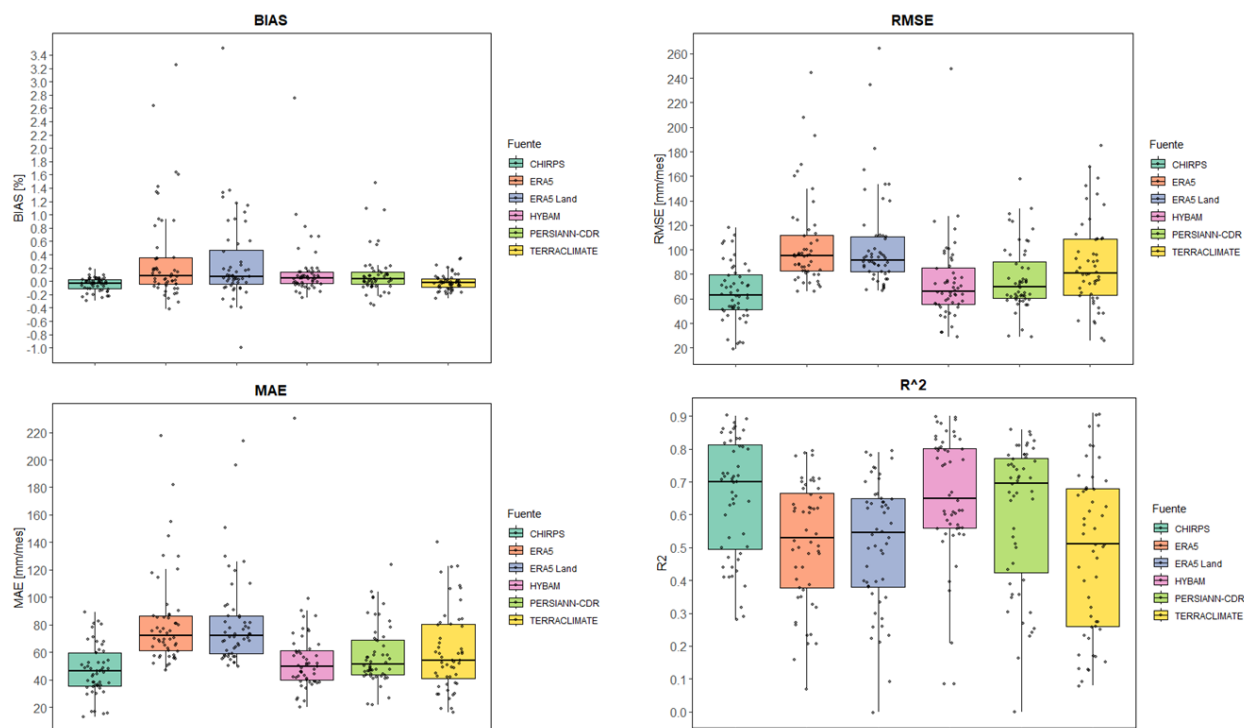


Figura 5-14: Estadísticos de precipitación para las estaciones validadas

Los resultados de validación para la temperatura son similares a los de la precipitación, con buenas estimaciones en zonas de topografía plana y una tendencia en este caso la subestimación en las zonas de cordillera. En general, NOAA CPC y TERRACLIMATE presentan buen desempeño, aunque con algunas deficiencias en regiones de topografía compleja (ligero sobreestimación). Por otro lado, ERA5 Land y ERA5 tienden a subestimar hasta en un 49 % y no logran representar adecuadamente la correspondencia en esas zonas. Los estadísticos utilizados para este análisis fueron RMSE (raíz del error cuadrático medio), MAE (error absoluto medio), BIAS (sesgo) y  $R^2$  (coeficiente de determinación). En la Figura 5-15 se muestra el estadístico RMSE de temperatura para las estaciones validadas (distribuidas espacialmente por estación) y en la Figura 5-16 se muestran los otros estadísticos evaluados.

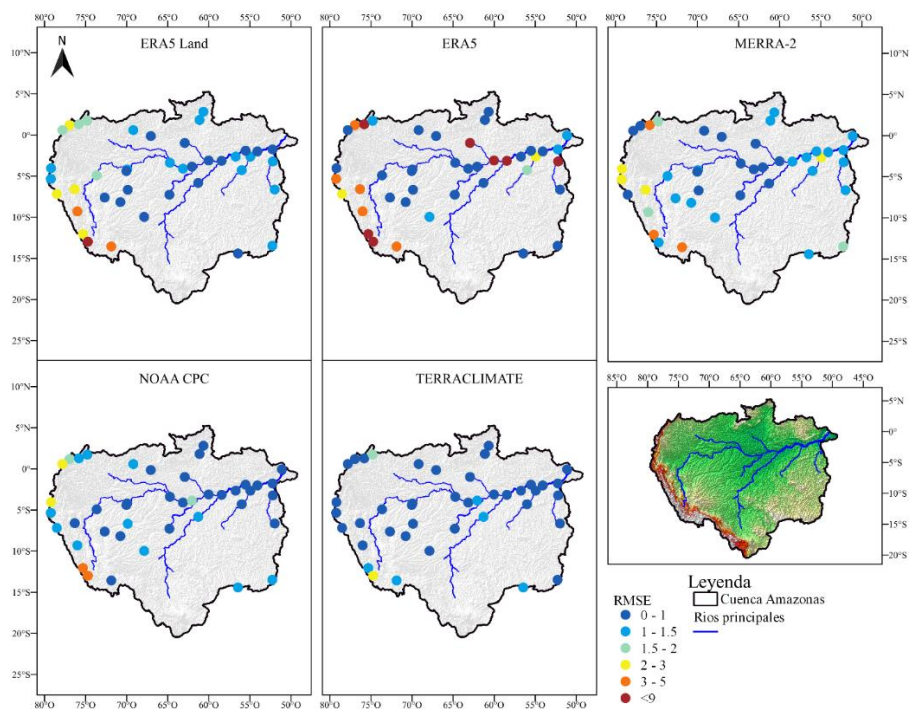


Figura 5-15: Estadístico RMSE de temperatura para las estaciones validadas

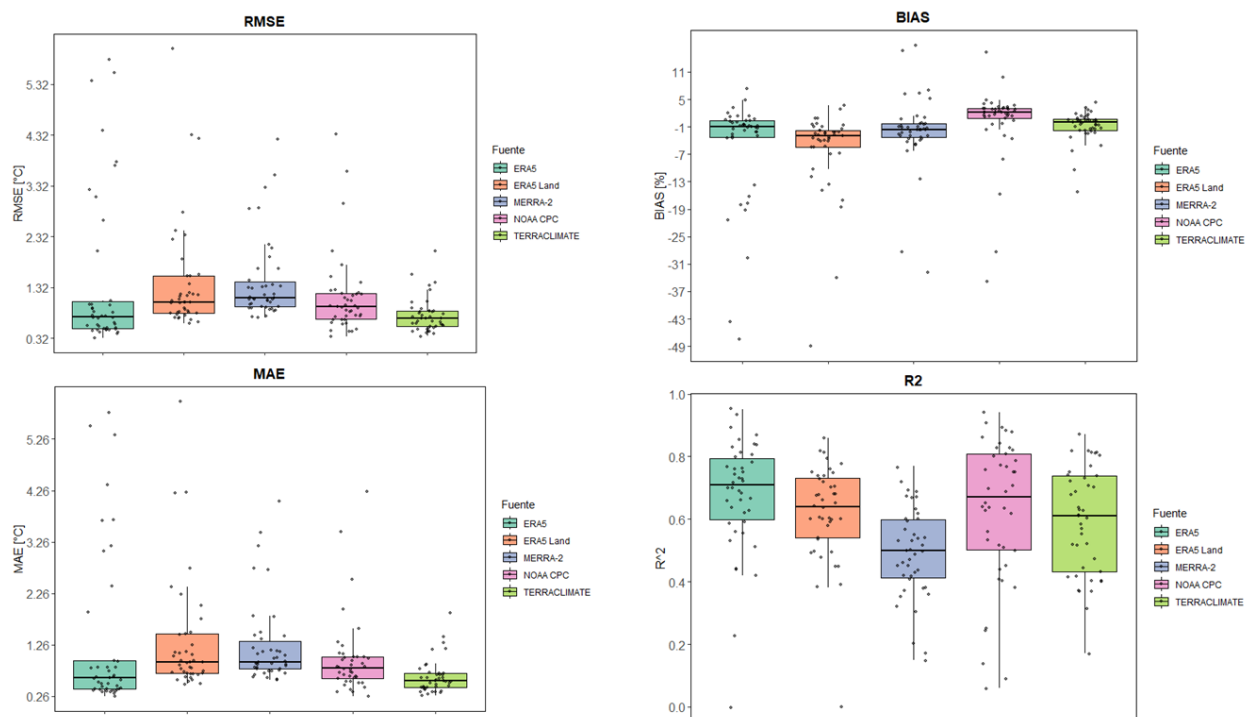


Figura 5-16: Estadísticos de temperatura para las estaciones validadas

Finalmente, si bien los productos HYBAM y CHIRPS mostraron un buen desempeño general en precipitación, se seleccionó CHIRPS como la fuente más adecuada, debido a su buen desempeño,

buena resolución espacial y temporal (diaria y mensual), así como su disponibilidad casi en tiempo real, lo cual lo hace especialmente útil como insumo para la modelación hidrológica, además para el 2025 ya tiene un producto sucesor mejorado que es CHIRPS v3.

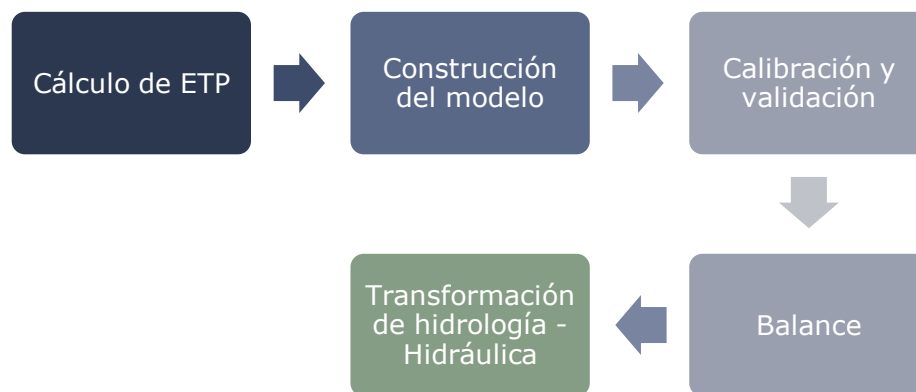
En el caso de la temperatura, aunque tanto TERRACLIMATE como NOAA CPC mostraron resultados satisfactorios, se seleccionó NOAA CPC por contar con mejor resolución temporal (diaria), incluir variables de temperatura máxima y mínima, y disponer de datos actualizados casi en tiempo real.

## 5.2 Modelación hidrológica

El proceso de modelación hidrológica se dividió principalmente en cuatro fases: (1) cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), (2) construcción del modelo hidrológico, (3) calibración y validación del modelo, y (4) análisis del balance hídrico.

Como etapa complementaria, se incorporó la transformación de resultados hidrológicos a información hidráulica, debido a que se realizó la predicción de niveles del río, la cual requiere como insumo la curva de descarga.

En la Figura 5-17 se muestra un esquema resumen del proceso de modelación hidrológica implementado.



*Figura 5-17: Resumen del proceso de la modelación hidrológica*

### 5.2.1 Cálculo de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (ETP) es un insumo fundamental para el modelo hidrológico, ya que representa la demanda atmosférica de agua desde una superficie completamente cubierta por vegetación, bajo condiciones óptimas de disponibilidad hídrica.

Para su cálculo, se utilizó la metodología propuesta por la FAO 56 (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) basada en la ecuación de Penman-Monteith, la cual es considerada el estándar de referencia a nivel mundial para estimar la ETP.

La ecuación de Penman-Monteith, ajustada por la FAO se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

- $ET_o$  = Evapotranspiración de referencia (mm/día)
- $R_n$  = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>/día)
- $G$  = Flujo de calor en el suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día)
- $T$  = Temperatura media diaria del aire (°C)
- $u_2$  = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- $e_s$  = Presión de vapor de saturación (kPa)
- $e_a$  = Presión de vapor actual (kPa)
- $\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
- $\gamma$  = Constante psicrométrica (kPa/°C)

Para el cálculo diario de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), se utilizaron variables climáticas provenientes de estaciones meteorológicas, tales como humedad relativa, velocidad del viento e insolación. En el caso de la temperatura máxima y mínima, se emplearon datos de reanálisis del producto NOAA CPC.

Posteriormente, los valores diarios de  $ET_o$  se agregaron a escala mensual, generando series temporales que fueron utilizadas como insumo para el cálculo de ETP. El cálculo se realizó aplicando la siguiente ecuación:

$$ETP = ET_o * K_c$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración Potencial (mm/mes)

$ET_o$ : Evapotranspiración de Referencia (mm/mes)

$K_c$ : Coeficiente de cultivo

Para la estimación del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), se recopiló información proveniente de la FAO, donde se presentan valores de  $K_c$  para distintos tipos de cultivos y coberturas vegetales. Considerando la cobertura predominante en las cuencas del estudio, se tomó como referencia la información contenida en la Tabla 5-1.

Dado que existe incertidumbre en los valores específicos de  $K_c$  para cada subcuenca, se optó por utilizar los valores en dicha tabla como rangos de referencia. Además, considerando que la cobertura vegetal en la región amazónica puede superar los 10 metros de altura con estructuras superiores incluso a las de coníferas y árboles de caucho, se asumió razonable trabajar con valores de  $K_c$  dentro del rango 0.9 a 1.3.

A partir de este rango, se determinaron los valores de  $K_c$  específicos para cada subcuenca mediante un algoritmo que ajustó estos valores en función del proceso de calibración del modelo hidrológico, el cual se realizó de manera simultánea.

*Tabla 5-3: Valores de  $K_c$  para algunos cultivos*

| Cultivo          | $K_c$ inicial | $K_c$ final | $K_c$ media | Altura máxima (m) |
|------------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|
| Banana           | 1.00          | 1.20        | 1.10        | 4.0               |
| Café con malezas | 1.05          | 1.10        | 1.10        | 2-3               |
| Palmas           | 0.95          | 1.00        | 1.00        | 8                 |
| Árbol de caucho  | 0.95          | 1.00        | 1.00        | 10                |
| Coníferas        | 1.00          | 1.00        | 1.00        | 10                |

*Adaptado de (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)*

### 5.2.2 Construcción del modelo hidrológico

Con el objetivo de representar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Negro en diferentes sectores, se discretizó toda la cuenca en tres subcuencas principales: Subcuenca Serrinha, Subcuenca Caracarai e Intercuenca río Negro. Estas subcuencas fueron discretizadas debido a su representatividad espacial y disponibilidad de datos hidrológicos.

La modelación se desarrolló bajo un enfoque semi agregado, pero usando un modelo agregado. Cada subcuenca fue considerada como una unidad homogénea, sin descomposición espacial interna, pero manteniendo una estructura diferenciada para cada una en términos de parámetros hidrológicos y condiciones de entrada; además considerando el routing (tiempo de viaje).

La construcción de este modelo semi agregado se realizó con el fin de simplificar la representación espacial, pero sin perder la capacidad de simular adecuadamente las principales dinámicas hidrológicas de la cuenca en estudio. En la Figura 5-18 se muestra las subcuencas discretizadas para el modelo hidrológico y las estaciones de aforo disponibles.

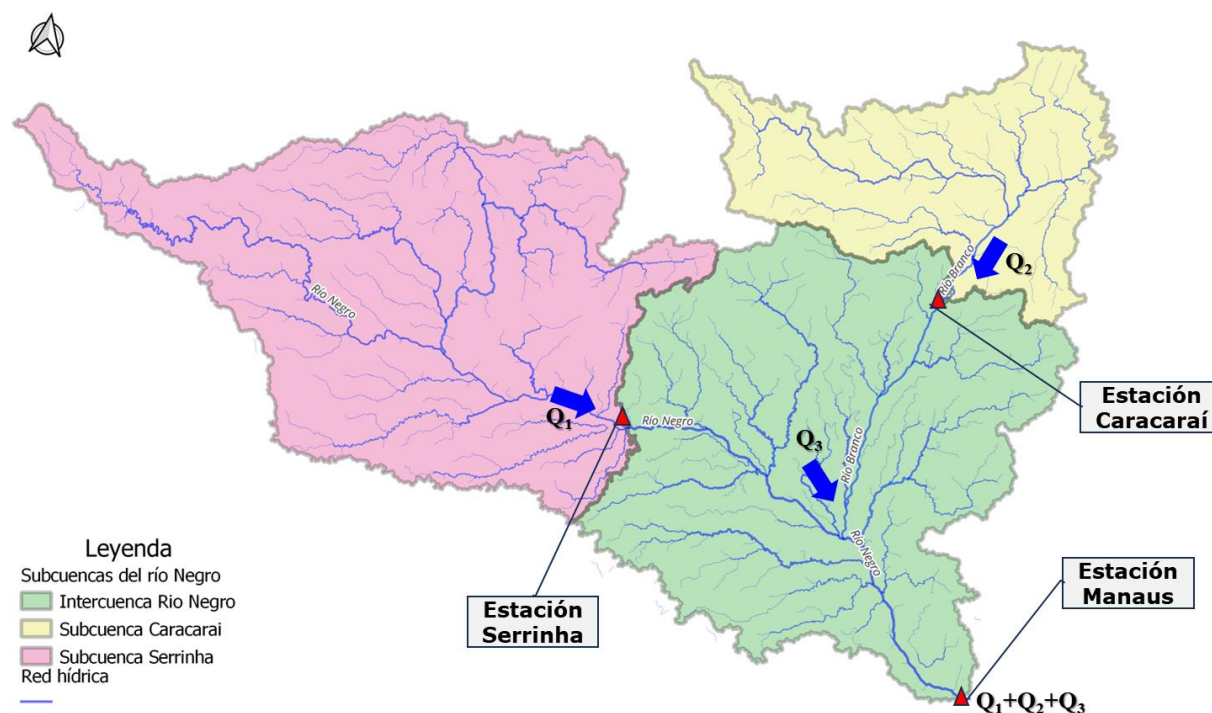


Figura 5-18: Subcuencas del modelo hidrológico construido

El modelo hidrológico implementado fue Témez. Este es un modelo que se basa en balances hídricos entre los procesos que ocurren en el ciclo hidrológico, aplicando el principio de conservación de la masa; las transferencias entre componentes se rigen por leyes específicas de reparto (Paredes Arquiola, Solera Solera, Andreu Álvarez, & Lerma Elvira, 2017). El modelo divide el terreno en dos zonas: una superior no saturada, donde coexisten agua y aire (su contenido de agua es equivalente a la humedad del suelo), y una inferior saturada o acuífero, que actúa como almacenamiento subterráneo y descarga hacia la red superficial. El balance de humedad se basa en la precipitación entrante ( $P_i$ ), que se distribuye entre flujos de salida, flujos intermedios y almacenamientos, como se muestra en la Figura 5-19. Témez ajusta cuatro parámetros principales:  $H_{max}$  y  $C$ , que controlan el almacenamiento de agua en el suelo;  $I_{max}$ , que separa la escorrentía superficial de la subterránea; y  $\alpha$ , que regula el drenaje subterráneo. Además, se deben definir las condiciones iniciales de simulación, es decir, la humedad inicial del suelo ( $H_0$ ) y el almacenamiento inicial en el acuífero, estimado como  $V_0 = Q_0/\alpha$ . Estos valores iniciales tienen poca influencia conforme avanza la simulación, pero es necesario definir.

El esquema del flujo de almacenamiento y formulación matemática del modelo hidrológico implementado (Témez) se muestra en la Figura 5-19.

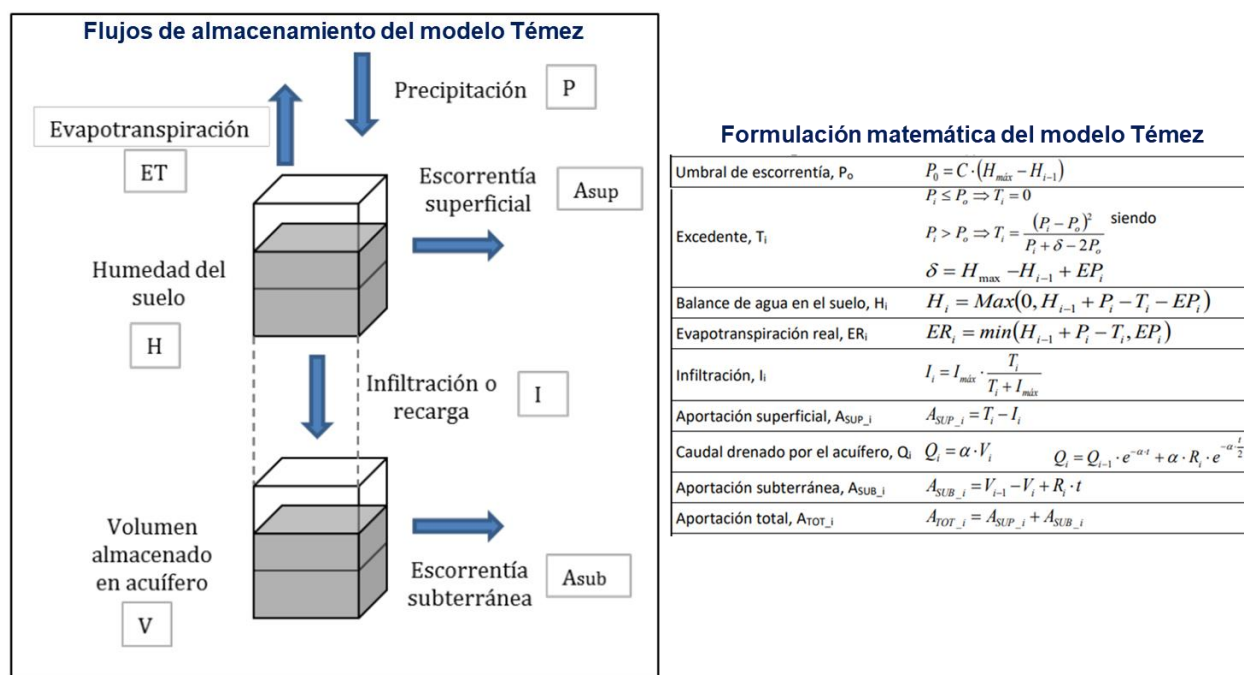


Figura 5-19: Esquema de flujos de almacenamiento y formulación matemática del modelo Témez

Para cada subcuenca, se definieron entradas climáticas de precipitación de CHIRPS y Evapotranspiración Potencial (considerando inicialmente  $K_c = 1$ ) y se integraron al modelo utilizando series temporales mensuales. La Figura 5-20 muestra la serie de precipitación y evapotranspiración potencial para cada subcuenca esto fue el insumo para la modelación hidrológica.

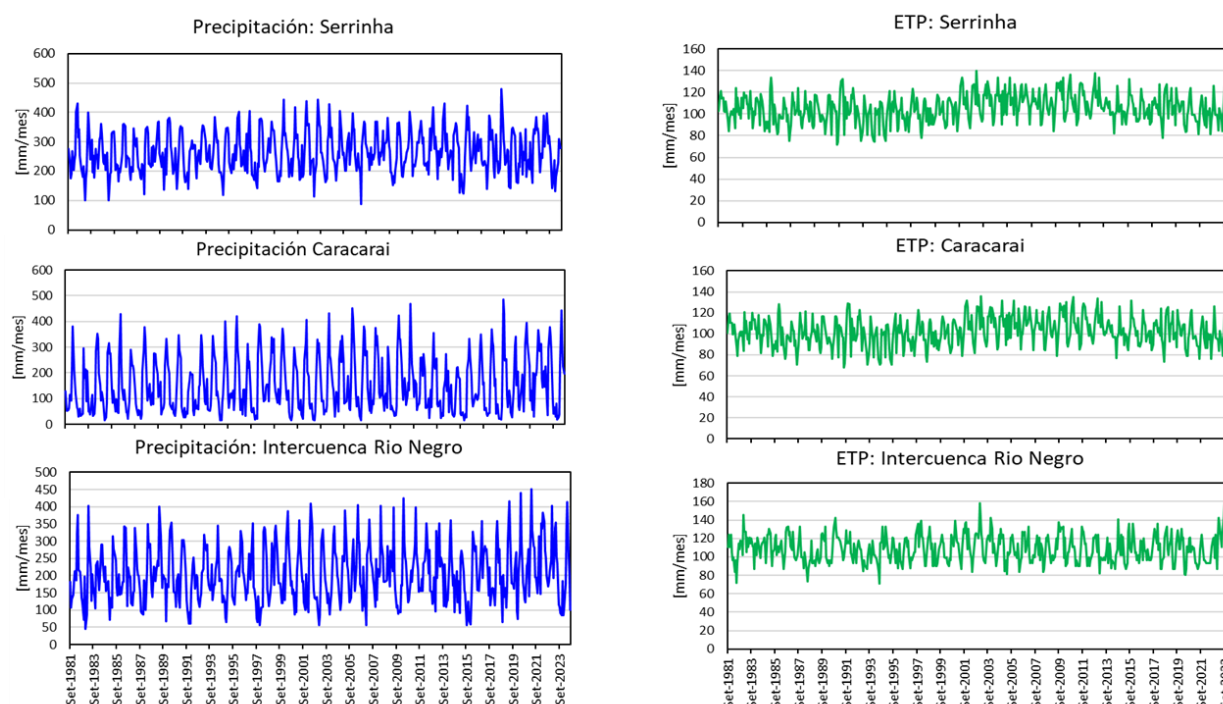


Figura 5-20: Datos de entrada para el modelo hidrológico

## 5.2.3 Calibración del modelo

### 5.2.3.1 Datos hidrológicos observados

Antes de realizar la calibración, se recopiló información de caudales observados en diferentes puntos de la cuenca del río Negro. Sin embargo, esta información no fue suficiente, ya que en la estación Manaus (principal punto de interés) no se dispone de registros de caudales observados, sino únicamente de niveles del río.

Por esta razón, se recurrió a recopilar información de estaciones cercanas a Manaus, específicamente las estaciones Jatuarana, Careiro y Manacapuru, las cuales se ubican en el río

Amazonas. Cabe señalar que las dos primeras se encuentran aguas abajo de Manaus, mientras que la tercera está aguas arriba (de las otras dos).

Con esta información, fue posible estimar los caudales observados en la estación Manaus mediante un proceso de restitución. Es importante precisar que el caudal restituído en Manaus incluye el aporte adicional de una subcuenca de 4,475 km<sup>2</sup>, lo que representa aproximadamente el 0.63% del área total que drena hacia dicha estación.

En la Figura 5-21 se muestra la ubicación de estaciones de aforo consideradas para el estudio.

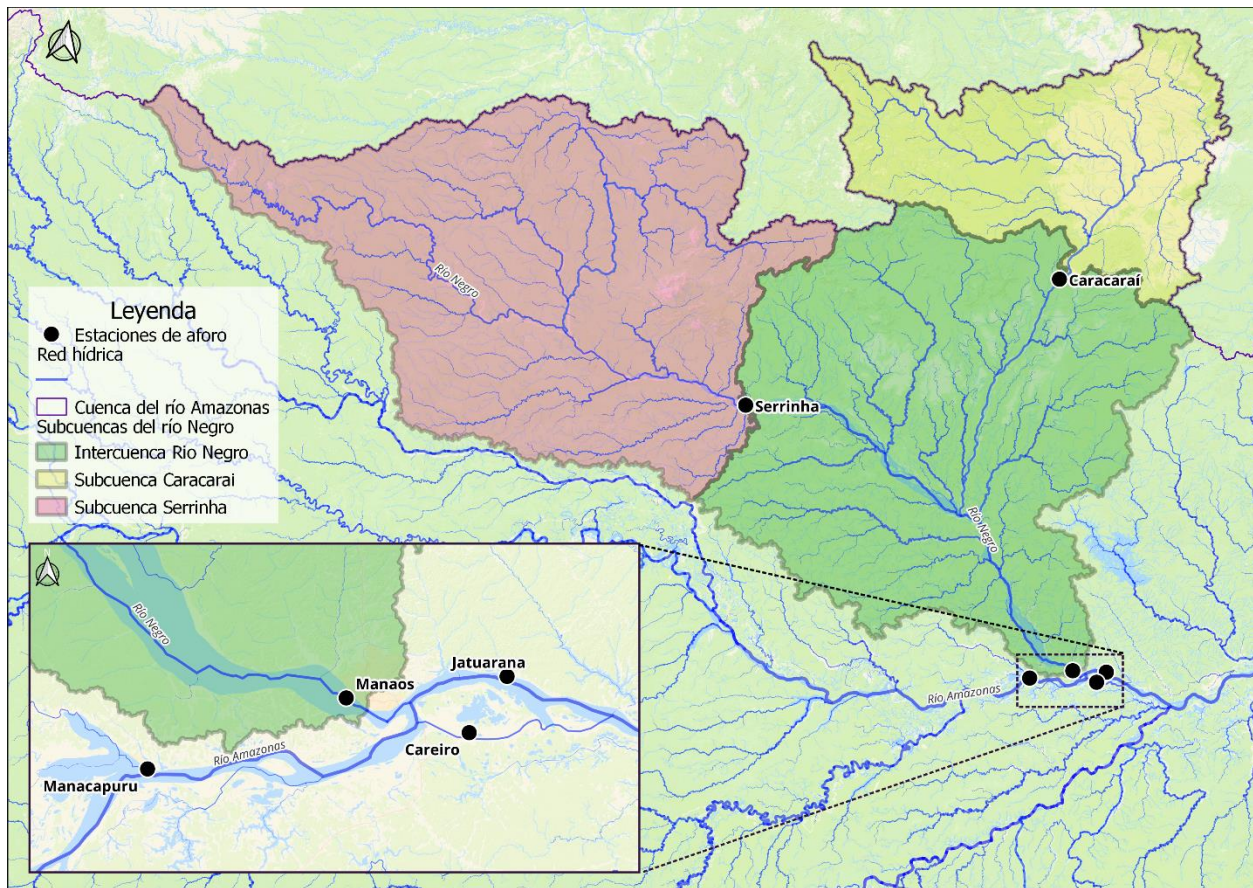


Figura 5-21: Ubicación de estaciones de aforo consideradas para el estudio

Las ecuaciones de restitución se detallan a continuación.

Mediante restitución:

$$Q_{\text{Manaos}} = Q_{\text{Jatuarana}} + Q_{\text{Careiro}} - Q_{\text{Manacapuru}}$$

Mediante modelo hidrológico

$$Q_{Manaos} = Q_{Serrinha} + Q_{Caracaraí} + Q_{Intercuenca}$$

Las series de caudales mensuales que se usaron para la calibración se muestran en Figura 5-22, Figura 5-23 y Figura 5-24.

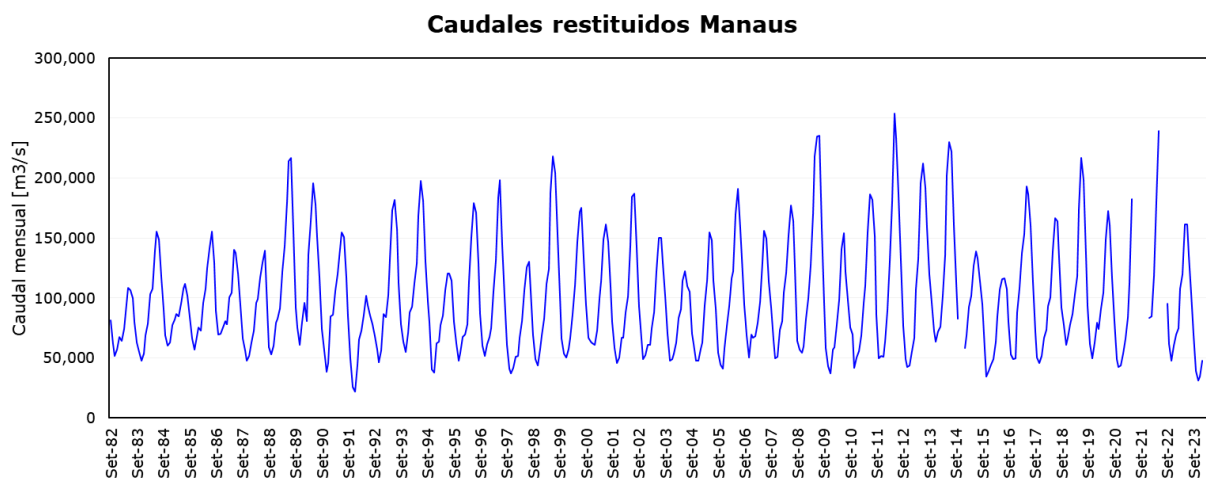


Figura 5-22: Caudales mensuales restituidos en Manaus

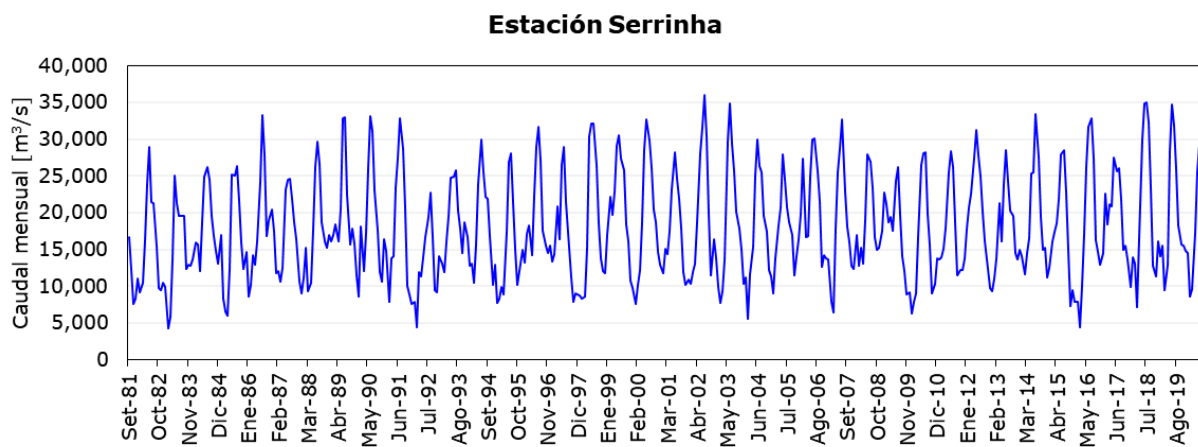


Figura 5-23: Caudales mensuales observados en la estación Serrinha

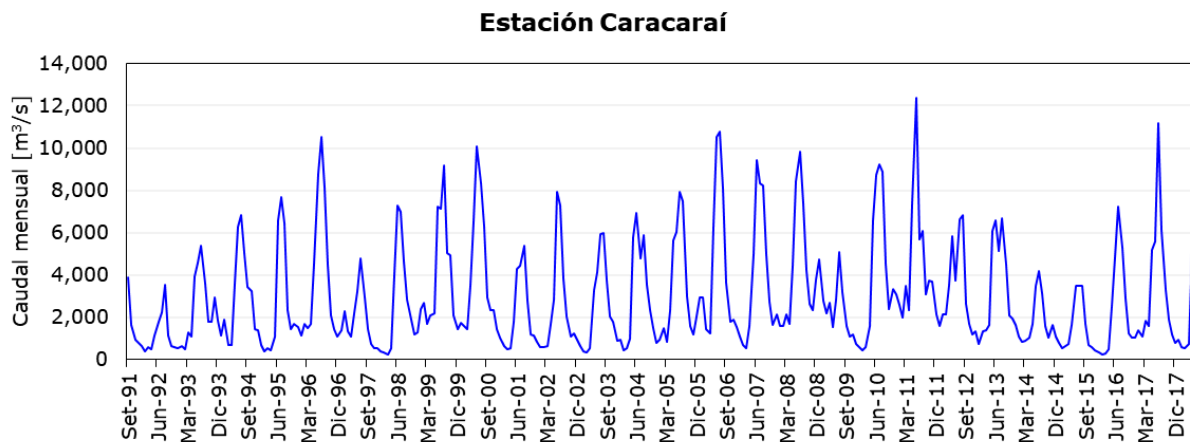


Figura 5-24: Caudales mensuales observados en la estación Caracará

### 5.2.3.2 Características hidrológicas de las subcuencas

Además, para este proceso fue necesario considerar información adicional como la cobertura vegetal (FAO, 2021), el mapa geológico de la cuenca, las características del suelo (FAO) y la pendiente media de cada subcuenca. Esta información fue clave para interpretar correctamente las características físicas de cada unidad de modelación y ajustar los parámetros del modelo de forma que conserven un significado físico coherente. En las Figura 5-25 y Figura 5-26 se muestran la cobertura vegetal y las características geológicas, respectivamente, para cada subcuenca.

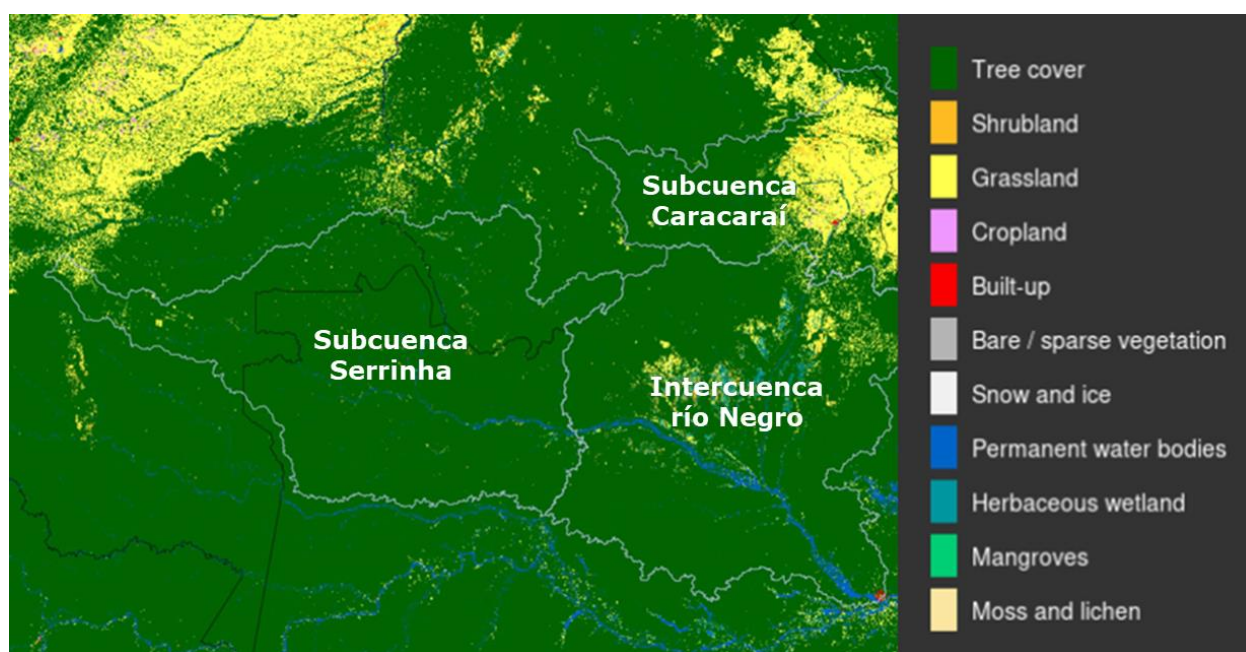


Figura 5-25: Cobertura vegetal de las subcuencas del río Negro

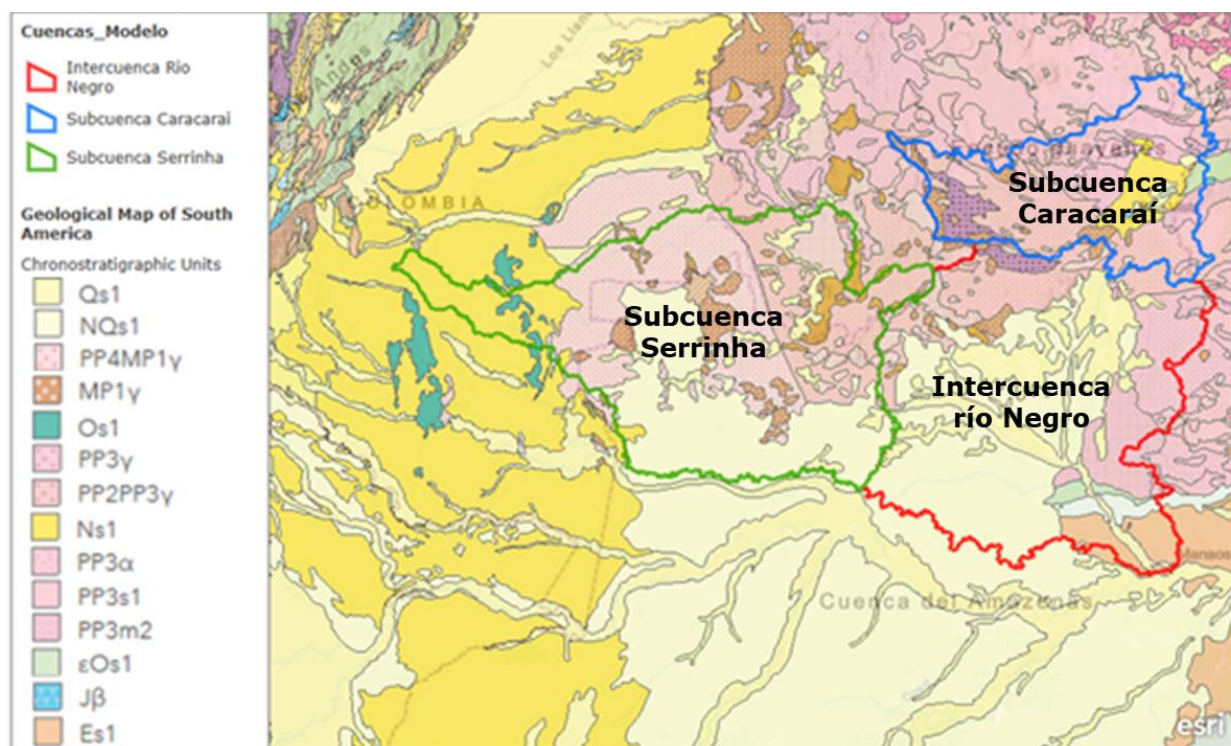


Figura 5-26: Características geológicas de las subcuencas del estudio

A partir de la información sobre geología, cobertura vegetal, características del suelo y pendiente media de la cuenca, se obtuvieron las características físicas de cada subcuenca, las cuales se presentan en la Tabla 5-4. Esta información fue fundamental para el ajuste de los parámetros del modelo.

Tabla 5-4: Resumen de las características de las subcuencas para la calibración

| Características | Subcuenca Serrinha                    | Subcuenca Caracarai                                           | Intercuenca río Negro                                 |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Geología        | Porosidad y permeabilidad media-alta. | Alta porosidad y permeabilidad                                | Alta permeabilidad                                    |
| Suelo (FAO)     | Alta porosidad y buena infiltración   | Alta porosidad y buena infiltración, buena retención de agua. | Alta porosidad y buena infiltración. Saturado de agua |
| Cobertura       | ~90% árboles                          | ~60% árboles, ~40% pastizal                                   | ~80% árboles<br>~10% pastizal<br>~10% agua            |
| Pendiente       | 8%                                    | 14%                                                           | 7%                                                    |

### 5.2.3.3 Calibración del modelo hidrológico

La calibración se realizó mediante un enfoque automático y/o manual, empleando indicadores estadísticos de desempeño, tales como el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el sesgo (Bias) y el error cuadrático medio (RMSE). Se utilizó un periodo representativo de datos observados, lo cual permitió evaluar la capacidad predictiva del modelo en condiciones distintas a las utilizadas para su ajuste.

Durante la calibración, se ajustaron parámetros clave del modelo como la capacidad de almacenamiento del suelo, el coeficiente de escorrentía directa, la capacidad de infiltración y los parámetros de drenaje subterráneo. Estos fueron evaluados para cada subcuenca de forma separada, dado que el modelo fue planteado bajo un esquema agregado para cada subcuenca, pero semi agregado para toda la cuenca del río Negro.

La calibración del modelo se realizó en dos casos distintos:

- a) En el primero caso se evaluó considerando  $K_c = 1$ , por lo que la ETP fue igual a la ETo.

Para la cuenca Serrinha se estableció el período de calibración entre septiembre de 1981 y agosto de 2020. Considerando el proceso de routing, la longitud del río principal es de aproximadamente 1,337 km. En una primera calibración, sin tomar en cuenta el tiempo de viaje del agua, se obtuvieron resultados estadísticos bajos y desfases temporales que no coincidían con los caudales observados.

Ante esta situación, se optó por incluir el tiempo de viaje, realizando calibraciones con desfases temporales de uno y dos meses. Al considerar un mes de desfase, se obtuvieron excelentes resultados estadísticos y una adecuada representación de la variabilidad temporal. En cambio, con un desfase de dos meses, los resultados fueron similares a los de la calibración inicial, es decir, poco satisfactorios.

En consecuencia, se concluyó que los caudales observados en la estación Serrinha reflejan las condiciones hidrológicas de la cuenca con un mes de desfase.

Las condiciones iniciales, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha se muestran en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con  $K_c$  constante

| Área de cuenca, longitud y velocidad del río |         |
|----------------------------------------------|---------|
| Superficie de la cuenca [km <sup>2</sup> ]   | 293,127 |
| Longitud del río principal [km]              | 1,337   |
| Velocidad media estimada [m/s]               | 0.52    |
| <b>Condiciones iniciales</b>                 |         |
| Ho [mm]                                      | 5.0     |
| Vo [Hm3]                                     | 30,000  |
| <b>Parámetros</b>                            |         |
| Hmax [mm]                                    | 245.0   |
| C [%]                                        | 10.0    |
| Imax [mm]                                    | 145.0   |
| Alfa [mes-1]                                 | 0.54    |
| <b>Estadísticos</b>                          |         |
| NSE                                          | 0.84    |
| Bias                                         | -2.0%   |
| KGE                                          | 0.86    |
| KGE'                                         | 0.88    |
| Correlación R                                | 0.92    |

El contraste entre las aportaciones observadas y simuladas se presenta en la Figura 5-27 y la Figura 5-28. La primera muestra las aportaciones multimensuales durante el período de calibración, mientras que la segunda presenta las series mensuales. En ambos casos, se observa un buen ajuste temporal.

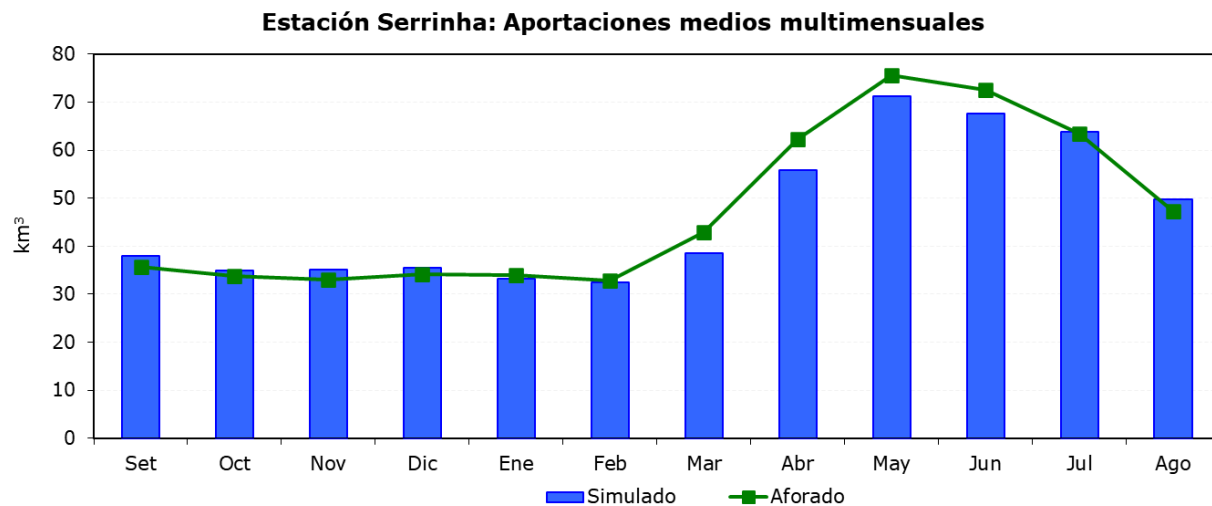
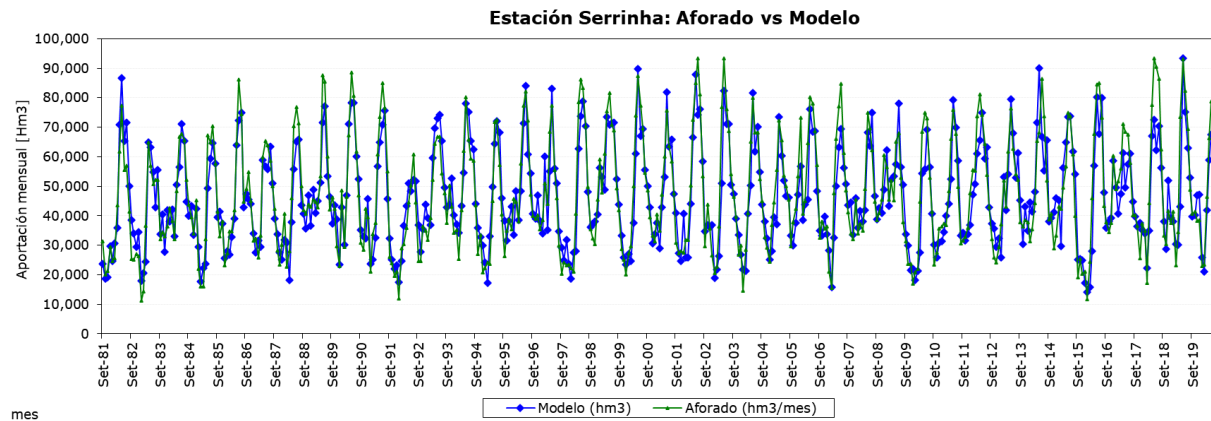


Figura 5-27: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Serrinha con  $K_c$  constante



*Figura 5-28: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Serrinha con  $K_c$  constante*

De manera similar para la cuenca del Caracará se estableció el período de calibración entre septiembre de 1991 y agosto de 2018. Considerando el proceso de routing, la longitud del río principal es de aproximadamente 551 km.

Las calibraciones se realizaron con desfases temporales de uno y dos meses. En ambos casos se obtuvieron malos resultados estadísticos y desfases en la representación de la variabilidad temporal. En cambio, sin desfase, los resultados fueron excelentes con buena representación temporal.

En consecuencia, a diferencia de Serrinha, para Caracará se concluyó que los caudales observados reflejan las condiciones hidrológicas de la cuenca sin desfase.

Las condiciones iniciales, parámetros y estadísticos de la cuenca Caracará se muestran en la Tabla 5-6.

*Tabla 5-6: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Caracará con  $K_c$  constante*

| Área de cuenca, longitud del río           |         |
|--------------------------------------------|---------|
| Superficie de la cuenca [km <sup>2</sup> ] | 125,045 |
| Longitud del río principal [km]            | 551     |
| Condiciones iniciales                      |         |
| Ho [mm]                                    | 5.0     |
| Vo [Hm3]                                   | 18,000  |
| Parámetros                                 |         |
| Hmax [mm]                                  | 200.0   |
| C [%]                                      | 10.0    |
| Imax [mm]                                  | 200.0   |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Alfa [mes-1]        | 0.49  |
| <b>Estadísticos</b> |       |
| NSE                 | 0.84  |
| Bias                | -0.2% |
| KGE                 | 0.92  |
| KGE'                | 0.92  |
| Correlación R       | 0.92  |

El contraste entre las aportaciones observadas y simuladas para la cuenca Caracará se presenta en la Figura 5-29 y la Figura 5-30. La primera muestra las aportaciones multimensuales durante el período de calibración, mientras que la segunda presenta las series mensuales. En ambos casos, se observa un buen ajuste temporal.

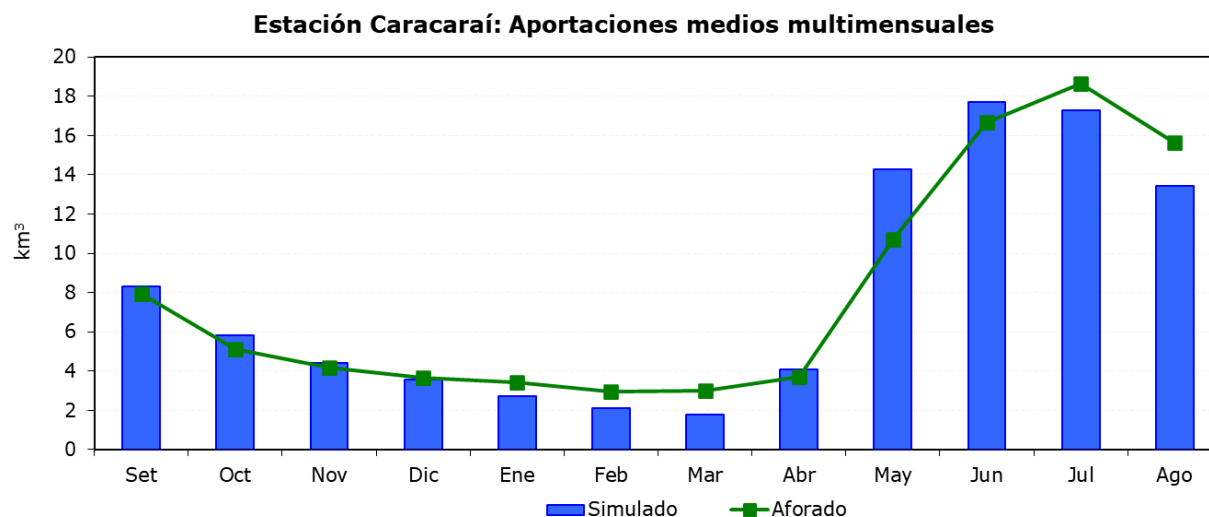


Figura 5-29: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Caracará con  $K_c$  constante

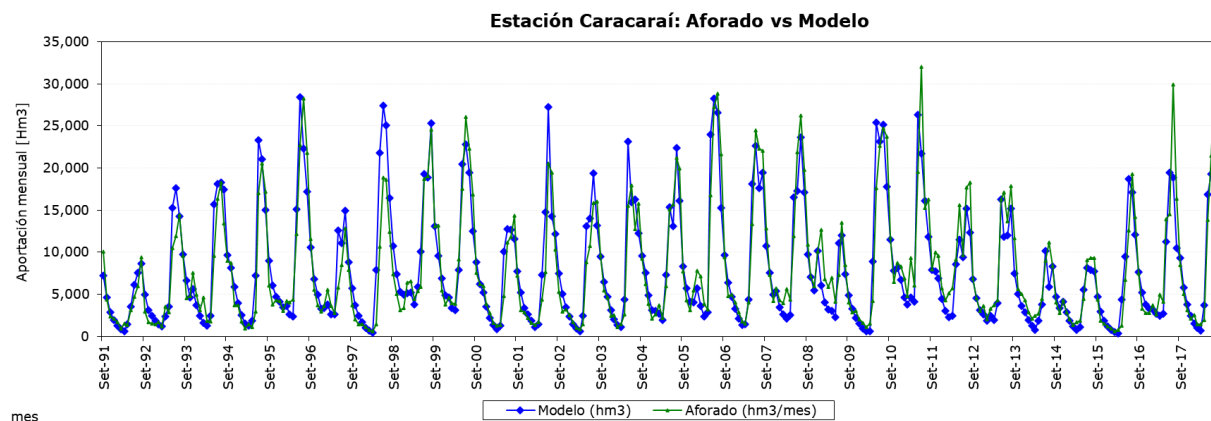


Figura 5-30: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Caracará con  $K_c$  constante

- b) En el segundo caso, se buscaron los valores óptimos de  $K_c$  mediante un algoritmo, con el objetivo de que el modelo pudiera representar adecuadamente la variabilidad mensual.

Los resultados de  $K_c$  obtenidos para la cuenca Serrinha y Caracará se muestra en la Figura 5-31. Con estos valores la ETP es diferente a la ETo.

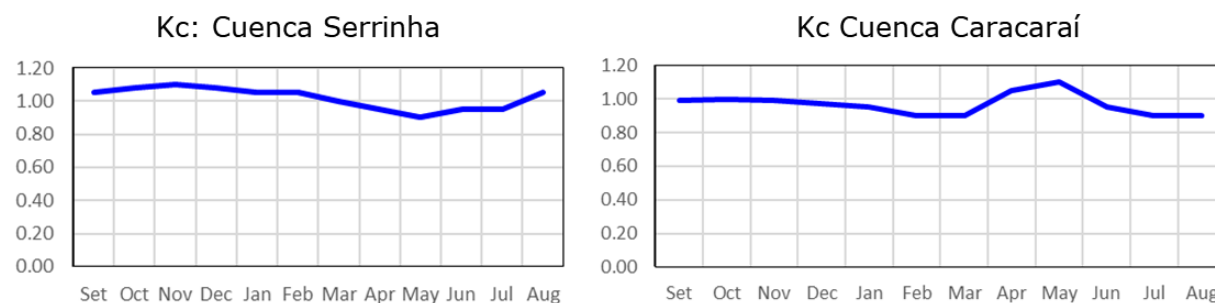


Figura 5-31: Valores de  $K_c$  obtenidos en la calibración

Los resultados de la calibración para cada subcuenca obtenidos considerando los valores de  $K_c$  diferentes a 1, se discuten a continuación.

En la Tabla 5-7 se muestra las condiciones iniciales, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha.

Tabla 5-7: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con  $K_c$  variable

| Área de cuenca, longitud y velocidad del río |         |
|----------------------------------------------|---------|
| Superficie de la cuenca [km <sup>2</sup> ]   | 293,127 |

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Longitud del río principal [km] | 1,337  |
| Velocidad media estimada [m/s]  | 0.55   |
| <b>Condiciones iniciales</b>    |        |
| Ho [mm]                         | 5.0    |
| Vo [Hm3]                        | 30,000 |
| <b>Parámetros</b>               |        |
| Hmax [mm]                       | 250.0  |
| C [%]                           | 10.0   |
| Imax [mm]                       | 140.0  |
| Alfa [mes-1]                    | 0.55   |
| <b>Estadísticos</b>             |        |
| NSE                             | 0.84   |
| Bias                            | -2.0%  |
| KGE                             | 0.87   |
| KGE'                            | 0.88   |
| Correlación R                   | 0.92   |

Los estadísticos considerando un Kc variable son similares a los obtenidos con un Kc constante, en cuanto a la variabilidad temporal también son similares. Por consiguiente, la diferencia entre ambos no es sustancial. Esto se puede observar en la Figura 5-32 que muestra la variabilidad multimensual, y en la Figura 5-33, que presenta la serie mensual para el periodo calibrado.

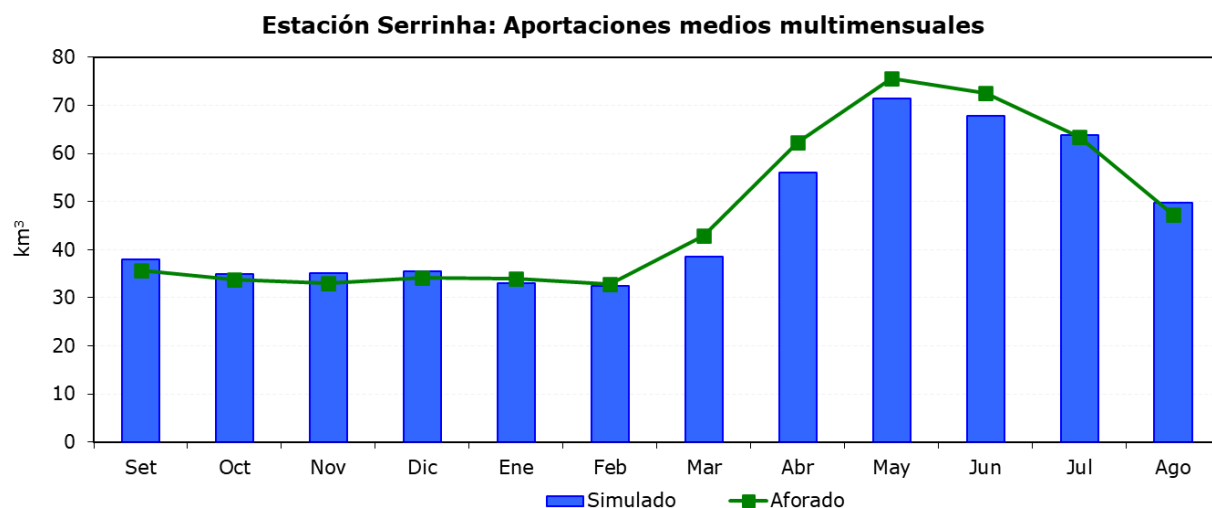
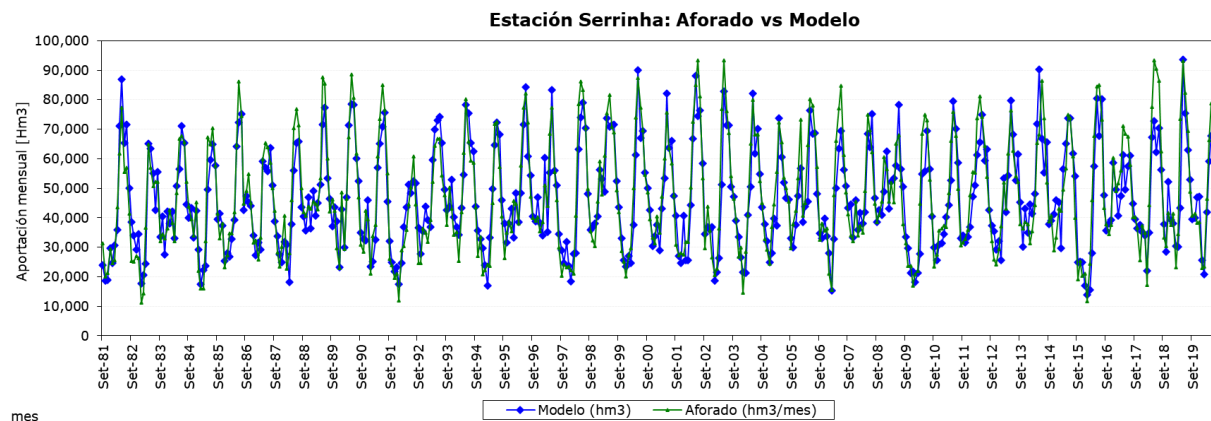


Figura 5-32: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Serrinha con Kc variable



*Figura 5-33: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Serrinha con Kc variable*

De manera similar que en Serrinha en Caracaraí tampoco se observa diferencias significativas usando un Kc constante y un Kc variable. Los resultados con Kc variable se muestran en la Tabla 5-8, Figura 5-34 y Figura 5-35.

En la Tabla 5-8 se muestra las condiciones iniciales, parámetros y estadísticos de la cuenca Caracaraí.

*Tabla 5-8: Principales características, parámetros y estadísticos de la cuenca Serrinha con Kc variable*

| <b>Área de cuenca, longitud del río</b>    |         |
|--------------------------------------------|---------|
| Superficie de la cuenca [km <sup>2</sup> ] | 125,045 |
| Longitud del río principal [km]            | 551     |
| <b>Condiciones iniciales</b>               |         |
| Ho [mm]                                    | 5.0     |
| Vo [Hm3]                                   | 18,000  |
| <b>Parámetros</b>                          |         |
| Hmax [mm]                                  | 205.0   |
| C [%]                                      | 10.0    |
| Imax [mm]                                  | 190.0   |
| Alfa [mes-1]                               | 0.49    |
| <b>Estadísticos</b>                        |         |
| NSE                                        | 0.84    |
| Bias                                       | -1.0%   |
| KGE                                        | 0.92    |
| KGE'                                       | 0.92    |
| Correlación R                              | 0.92    |

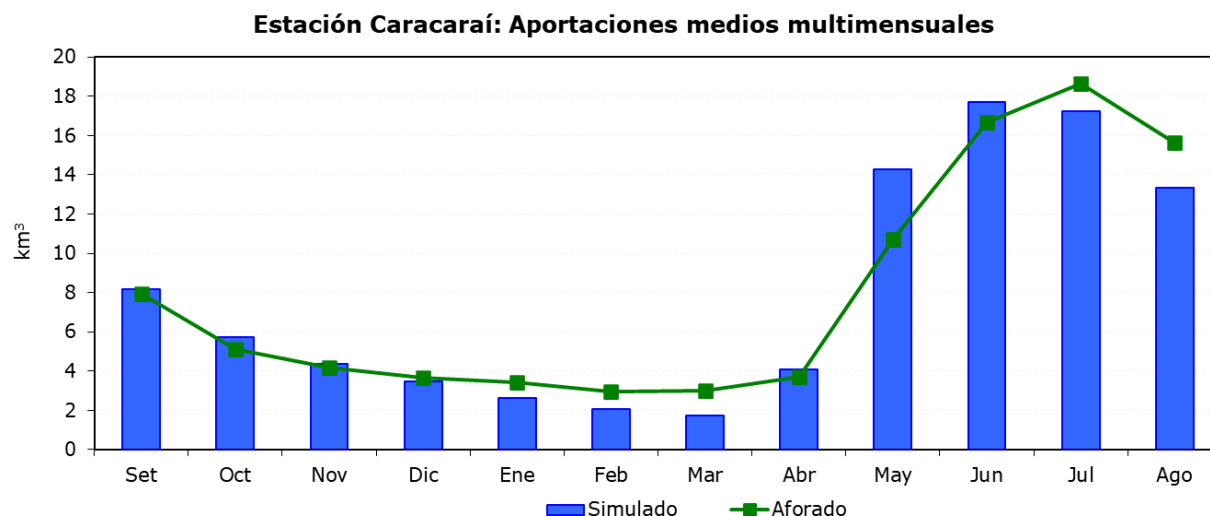


Figura 5-34: Contraste de aportaciones multimensuales en la estación Caracará con  $K_c$  variable

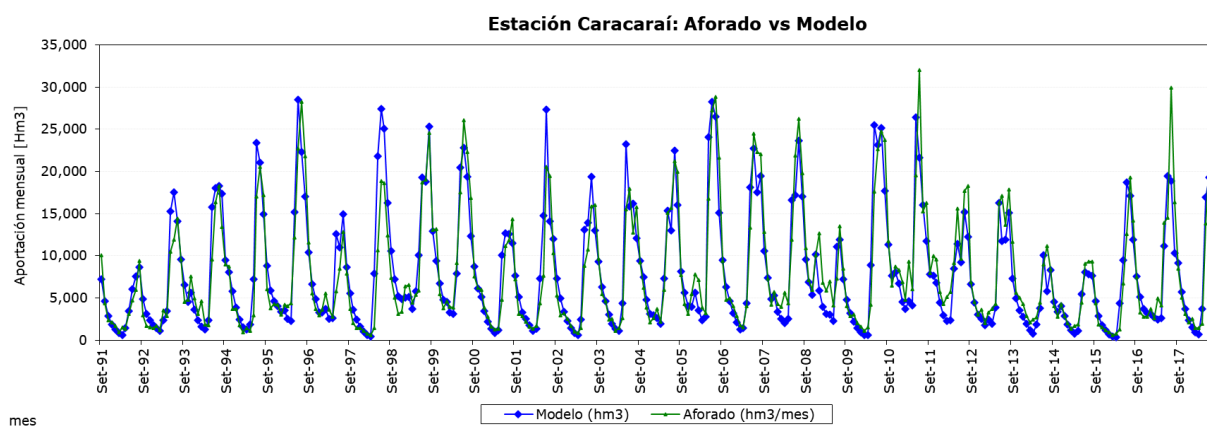


Figura 5-35: Contraste de aportaciones mensuales observados vs modelados en la estación Caracará con  $K_c$  variable

Ante los mostrados para los casos con  $K_c$  variables para cada subcuenca y los  $K_c$  constantes. Comparando ambos resultados se tomó la decisión de usar un  $K_c$  constante que es igual a 1 para todos los meses. Con ello queda calibrado los modelos en las dos subcuencas.

Después de calibrar las subcuencas, se procedió a calibrar la Intercuenca del río Negro, utilizando un  $K_c$  constante para todos los meses, de manera similar al procedimiento aplicado en las subcuencas. En este caso, también se consideró el routing, tomando en cuenta que el río tiene una longitud de 719 km.

La calibración se realizó evaluando desfases temporales de uno y dos meses, pero en ambos casos los resultados fueron insatisfactorios. Por el contrario, al realizar la calibración sin desfase, se obtuvieron mejores resultados, con una adecuada representación de la variabilidad temporal.

Los estadísticos obtenidos para la Intercuenca fueron menores que los de las subcuencas. Esto se atribuye principalmente a tres factores: primero, la disponibilidad limitada de datos observados, ya que se trabajó con caudales restituidos; segundo, porque el área considerada incluye 4,473 km<sup>2</sup> adicionales (equivale a 0.63% de la cuenca total, por lo que los caudales reales son 99.4% aproximadamente), lo que hace que el modelo tienda a subestimar el caudal real y tercero los picos altos no se están estimando bien, esto podría deberse a que al llegar al nivel máximo de inundación, el agua desborda del cauce y estos no están representados en los niveles observados.

Los resultados para la Intercuenca del río Negro se presentan en la Tabla 5-9, así como en la Figura 5-36.

*Tabla 5-9: Principales características, parámetros y estadísticos de la Intercuenca río Negro con Kc constante*

| <b>Área de cuenca, longitud del río</b>    |  |         |
|--------------------------------------------|--|---------|
| Superficie de la cuenca [km <sup>2</sup> ] |  | 293,171 |
| Longitud del río principal [km]            |  | 719     |
| <b>Condiciones iniciales</b>               |  |         |
| Ho [mm]                                    |  | 5.0     |
| Vo [Hm3]                                   |  | 30,000  |
| <b>Parámetros</b>                          |  |         |
| Hmax [mm]                                  |  | 200.0   |
| C [%]                                      |  | 10.0    |
| Imax [mm]                                  |  | 140.0   |
| Alfa [mes-1]                               |  | 0.70    |
| <b>Estadísticos</b>                        |  |         |
| NSE                                        |  | 0.58    |
| Bias                                       |  | -13.5%  |
| Correlación R                              |  | 0.83    |

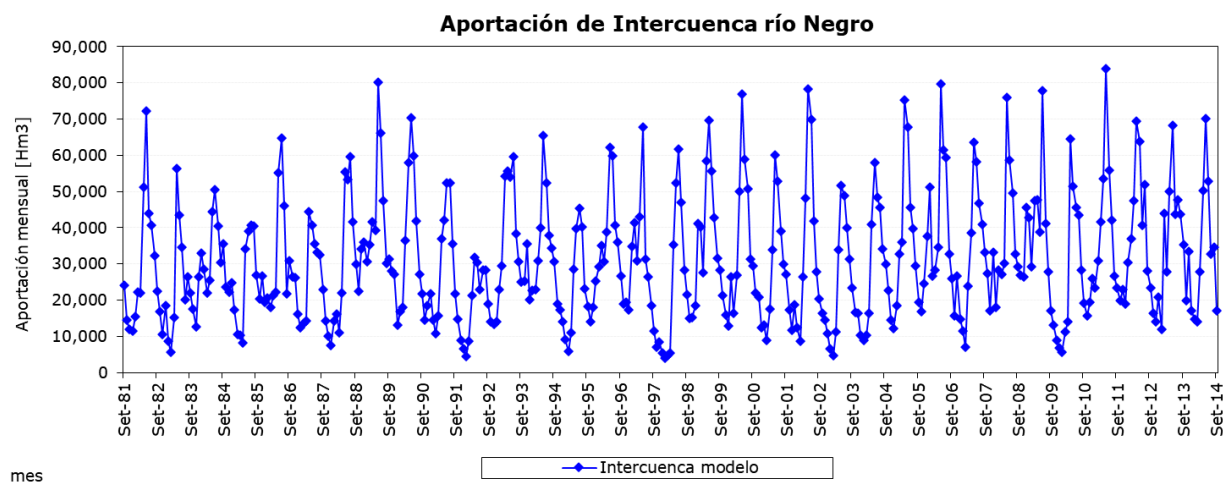


Figura 5-36: Aportaciones mensuales modelados en la Intercuenca río Negro con  $K_c$  constante

El contraste de las aportaciones restituidas con las aportaciones simuladas en la estación Manaus. Ver Figura 5-37.

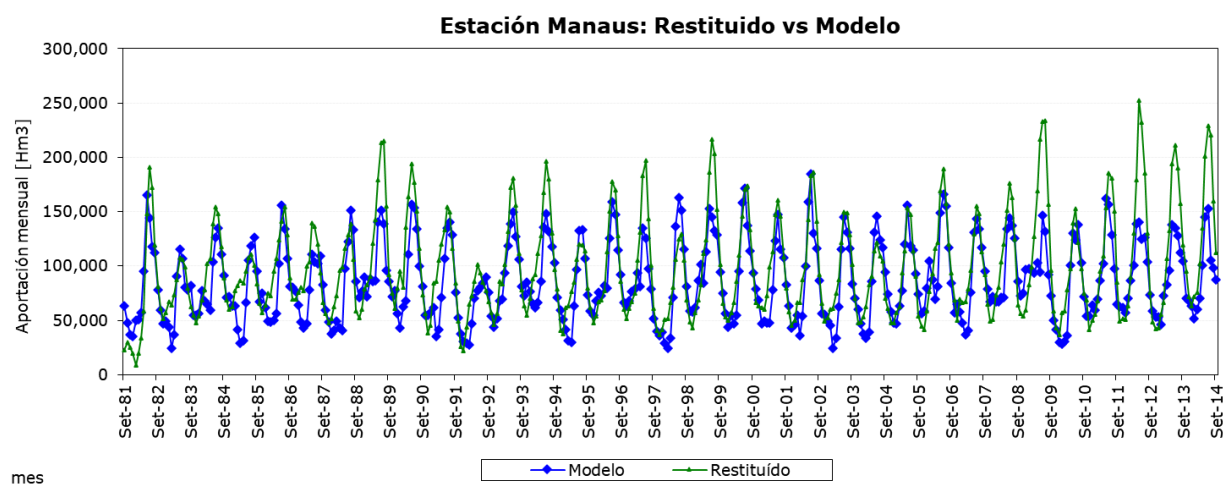


Figura 5-37: Contraste de aportaciones mensuales restituidos vs modelados en la estación Manaus

Finalmente, en la Tabla 5-10 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos para el modelo hidrológico en las subcuencas. Los resultados obtenidos representan adecuadamente la realidad física de las subcuencas. Además, según Estrela (1999), estos valores están dentro del rango esperado para las características de cada subcuenca.

Tabla 5-10: Resumen de los parámetros de cada subcuenca

| Parámetro                 | Subcuenca Serrinha | Subcuenca Caracarai | Intercuenca rio Negro |
|---------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Hmax [mm]                 | 245                | 200                 | 200                   |
| C [%]                     | 10                 | 10                  | 10                    |
| Imax [mm]                 | 145                | 200                 | 140                   |
| Alfa [mes <sup>-1</sup> ] | 0.54               | 0.49                | 0.70                  |

#### 5.2.4 Balance hidrológico

El balance hidrológico se llevó a cabo para las tres subcuencas principales del río Negro, con el objetivo de evaluar la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico en el periodo comprendido entre 1981 y 2024. Para ello, se utilizaron series simuladas completas de caudales, generadas mediante el modelo hidrológico calibrado previamente. Estas series permiten representar de manera continua y coherente el comportamiento hidrológico de cada subcuenca, incluso en aquellos periodos en los que no se dispone de datos observados. Este balance no considera los posibles usos y demandas pequeñas que puedan haber dentro de la cuenca, principalmente porque las aportaciones hídricas son elevadas y no se identificaron demandas significativas que pudieran influir de manera considerable en el resultado del balance. Por lo tanto, no se consideró necesario incluirlas en el análisis.

En cuanto a la contribución relativa al total de la cuenca del río Negro, la subcuenca Serrinha representa aproximadamente el 54% de las aportaciones anuales, la subcuenca Caracaraí el 9%, y la Intercuenca del río Negro el 37% restante. En términos absolutos, la aportación media anual es de 556 km<sup>3</sup>/año en Serrinha, 95.4 km<sup>3</sup>/año en Caracaraí y 384 km<sup>3</sup>/año en la Intercuenca, lo que suma un total de 1035.4 km<sup>3</sup>/año para toda la cuenca del río Negro. Este volumen representa aproximadamente el 14.9% del total de aportaciones de la cuenca del río Amazonas, subrayando la relevancia hidrológica del río Negro dentro del sistema amazónico. La Figura 5-38 muestra el balance de las aportaciones de las subcuencas proporcionando una visión integrada del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Negro.

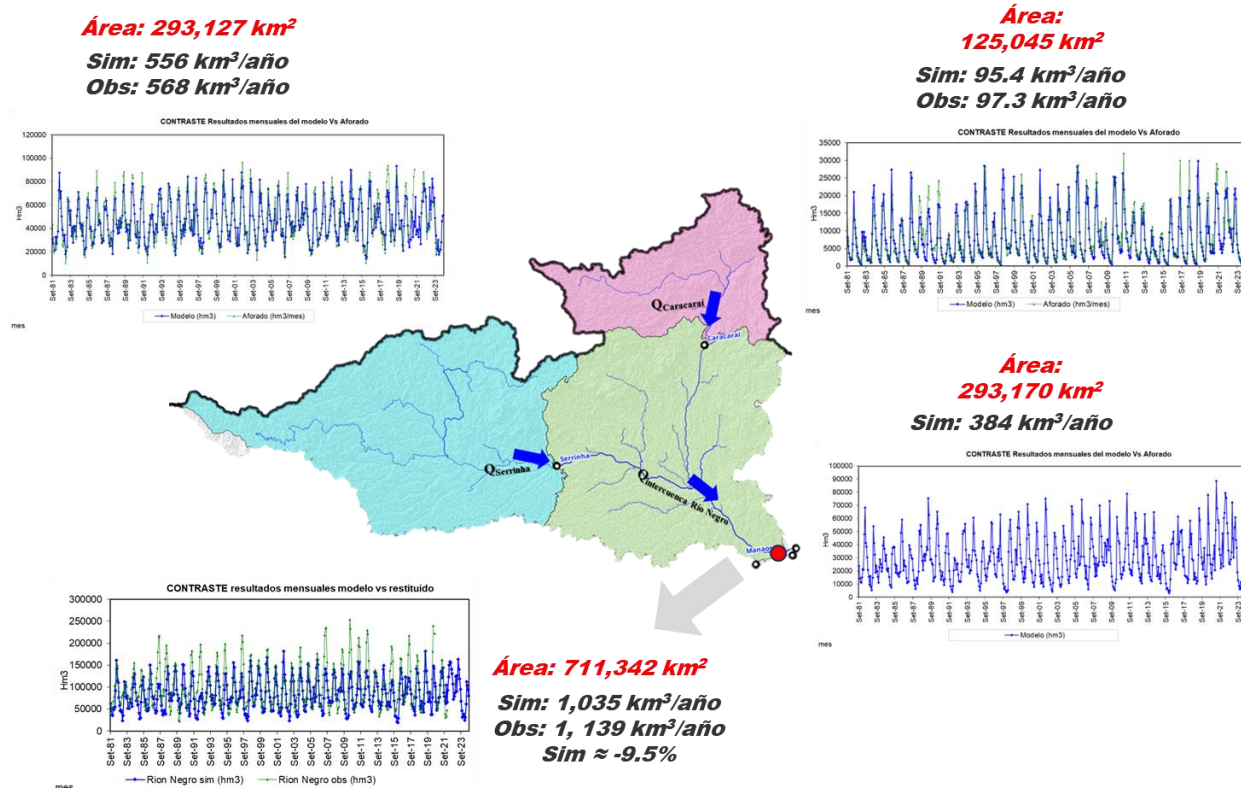


Figura 5-38: Balance hidrológico

Cabe señalar que, en el análisis realizado, se identificó una subestimación global de aproximadamente 9.5% en la cuenca del río Negro, atribuida principalmente a las simulaciones obtenidas en la Intercuenca (-13.5%). Aunque el modelo hidrológico utilizado fue aplicado en una región de gran extensión espacial, su desempeño general fue bueno y representó bien el comportamiento hidrológico de las subcuencas. No obstante, para reducir las subestimaciones identificadas, sería fundamental contar con registros observados de caudal en la estación Manaus, los cuales no estuvieron disponibles para este estudio. En su lugar, se trabajó con caudales restituidos, lo cual puede haber influido en la precisión de los resultados.

La Figura 5-39 presenta la evolución de las series anuales de aportaciones para cada subcuenca, evidenciando la variabilidad interanual de los caudales simulados.

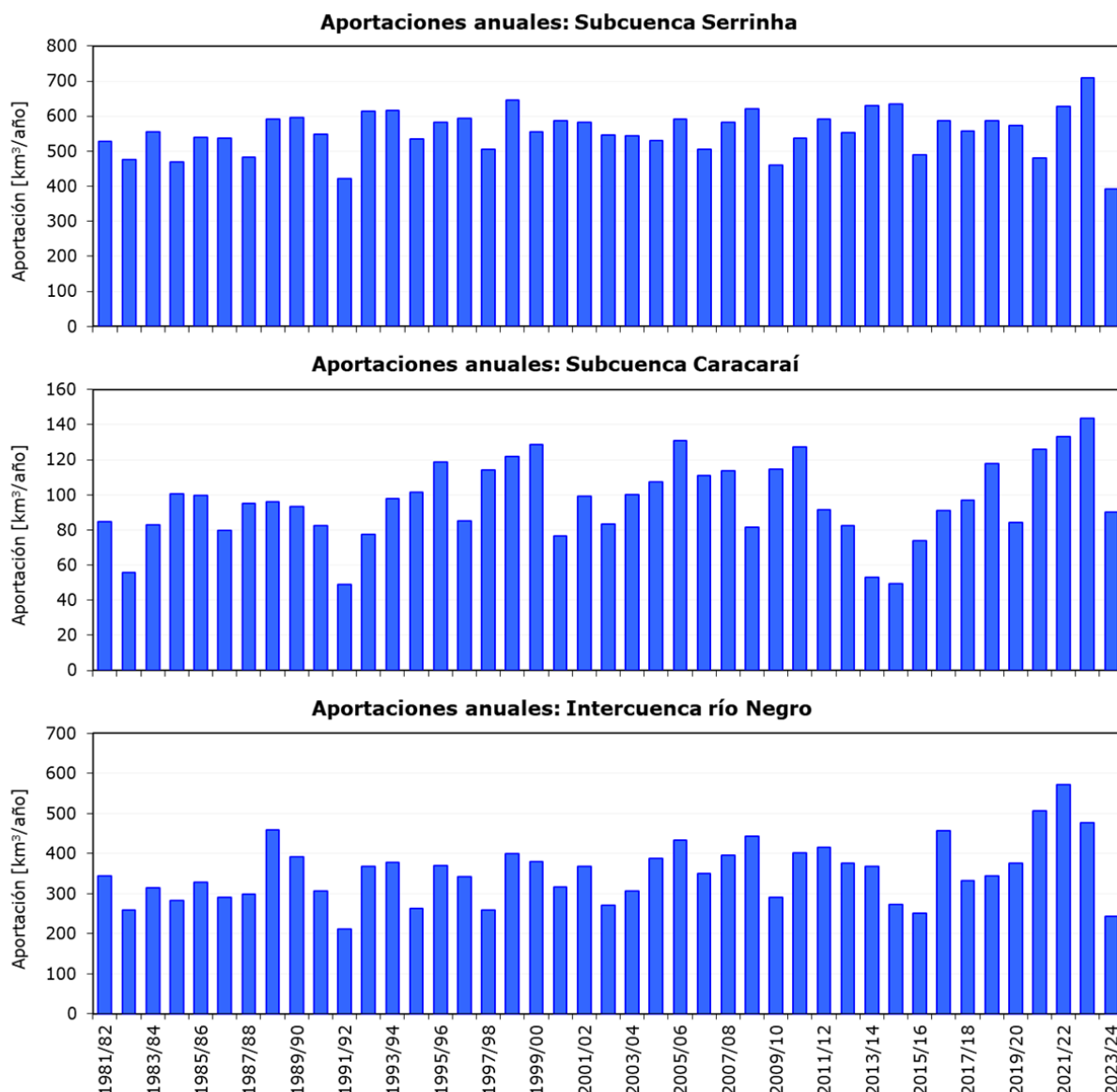


Figura 5-39: Aportaciones anuales simuladas por subcuenca

### 5.2.5 Transformación de hidrología – hidráulica

En esta fase del estudio, el objetivo principal fue construir la curva de descarga para la estación hidrométrica de Manaus, con el fin de obtener una ecuación de descarga que permitiera transformar los caudales simulados en niveles del río, lo cual es esencial para la predicción de niveles en esta sección del río Negro.

Para ello, se emplearon los datos históricos de niveles observados en la estación de Manaus, junto con los caudales restituidos correspondientes al mismo periodo. Debido a la complejidad del comportamiento hidráulico en esta zona, se identificó que la curva de descarga debía ser tratada como una curva compuesta, por lo que se construyeron dos tramos diferenciados que reflejan adecuadamente los distintos regímenes de flujo presentes.

A partir de estas curvas, se llevó a cabo la transformación de los caudales simulados en niveles del río, permitiendo así una representación más precisa del comportamiento hidrodinámico en esta sección. En la Figura 5-40 se presenta la curva de descarga compuesta desarrollada para la estación Manaus, la cual constituye un insumo clave para la interpretación hidráulica de los resultados del modelo.

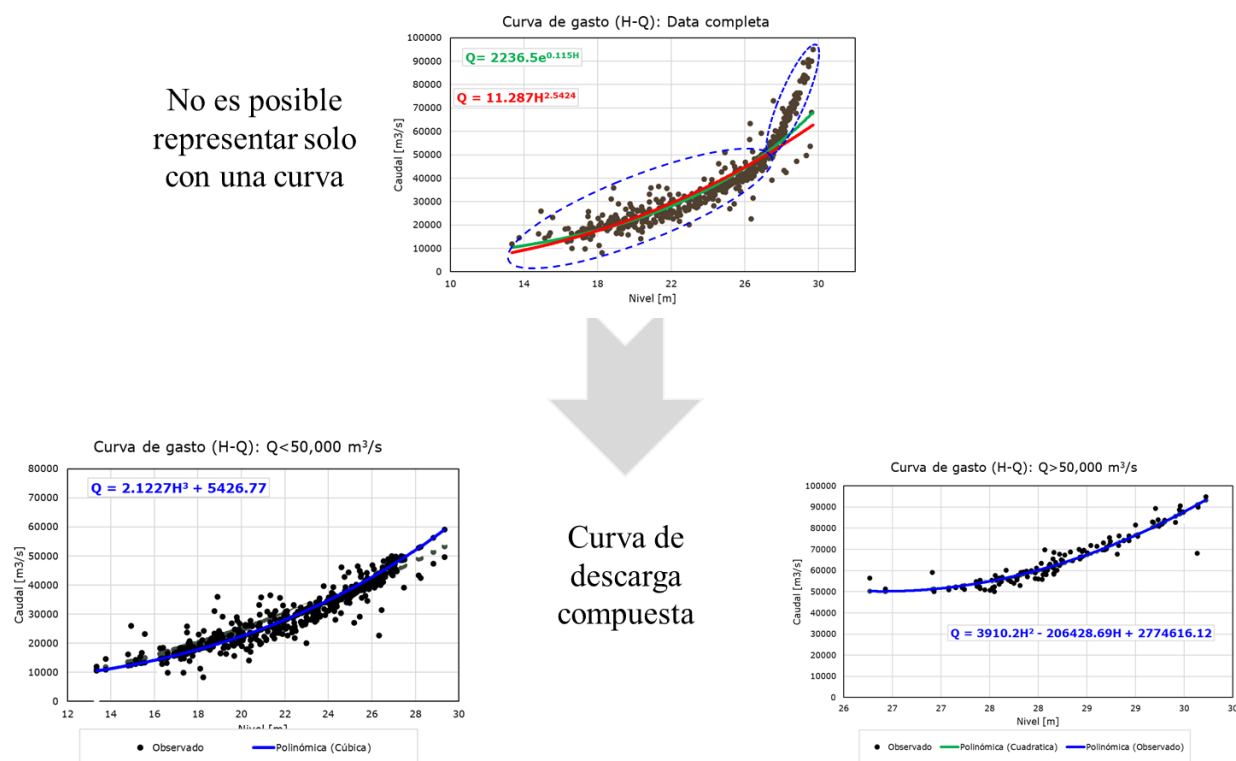
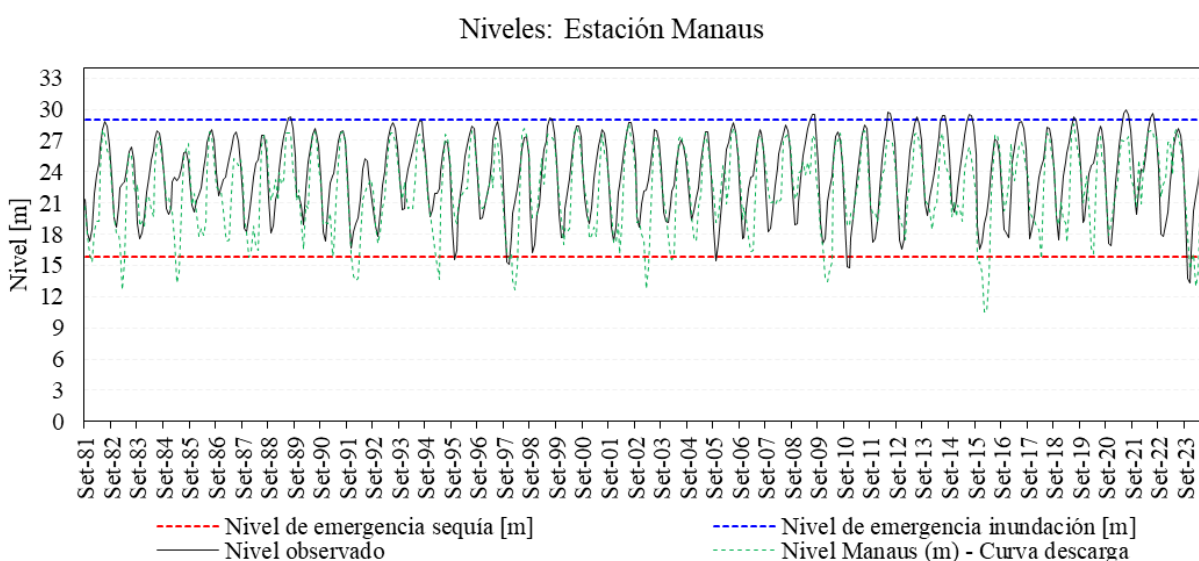


Figura 5-40: Curva de descarga del río Negro, estación Manaus

Con las curvas de descarga previamente construidas y los resultados obtenidos del modelo hidrológico, se transformaron los caudales simulados en niveles del río, obteniéndose así los niveles medios mensuales para el periodo simulado. Estos niveles fueron comparados con los niveles observados en la estación de Manaus para el mismo periodo.

En general, en la gran mayoría de los casos se obtuvo una buena correspondencia entre ambas series, aunque en algunos periodos no se lograron representar adecuadamente los picos altos y bajos, y en otros casos se observaron leves desfases temporales. Estos se atribuyen a los errores propios de la curva de descarga, principalmente debido a que esta representa la descarga en la estación Manaus con caudales restituidos, y en menor medida, al modelo hidrológico.

La comparación entre los niveles simulados y observados se presenta en la Figura 5-41, donde se evidencia la capacidad del modelo para reproducir la dinámica hidrológica del río Negro en la estación Manaus.



*Figura 5-41: Niveles simulados y observados en la estación Manaus*

## 5.3 Predicción hidrológica estacional

### 5.3.1 Metodología aplicada

La predicción hidrológica estacional en este estudio se centró en la cuenca del río Negro, con énfasis en la estación hidrométrica de Manaus. El objetivo fue anticipar el comportamiento de los niveles del río con varios meses de antelación, lo cual es crucial para la prevención ante eventos extremos, en este caso enfocados en sequías, así como para la planificación operativa del puerto de Manaus.

Para ello, se utilizaron datos climáticos provenientes del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF), específicamente sus productos de pronóstico estacional de variables como precipitación y temperatura.

La metodología consistió en acoplar los datos climáticos con el modelo hidrológico previamente calibrado, mediante un enfoque de ensamble, en el cual se utilizaron múltiples miembros del pronóstico para representar la incertidumbre inherente a las condiciones futuras. Estos miembros fueron expresados en valores relativos respecto a su media histórica (anomalías).

Las anomalías pronosticadas se aplicaron a las series climáticas históricas multimensuales, generando así escenarios climáticos probables para los meses siguientes. Con estas condiciones climáticas futuras, y considerando el estado inicial del sistema hidrológico correspondiente al mes anterior al inicio del pronóstico, se simularon los caudales futuros mediante el modelo hidrológico.

Posteriormente, los caudales simulados fueron transformados en niveles del río en Manaus, utilizando la ecuación de descarga derivada previamente a partir de la curva de descarga compuesta. Los niveles resultantes constituyen la salida final de la predicción hidrológica estacional.

Esta integración entre pronóstico climático y modelación hidrológica permitió desarrollar una herramienta de predicción estacional adaptada a las condiciones hidrológicas específicas del río Negro, con gran potencial para apoyar la toma de decisiones anticipadas ante la variabilidad climática regional. Además, la metodología es lo suficientemente flexible para ser aplicada en otras cuencas del mundo, siempre que se cuente con la información necesaria y condiciones de modelación similares.

En la Figura 5-42 se presenta un resumen de la metodología aplicada para la predicción hidrológica estacional en la estación hidrométrica de Manaus.

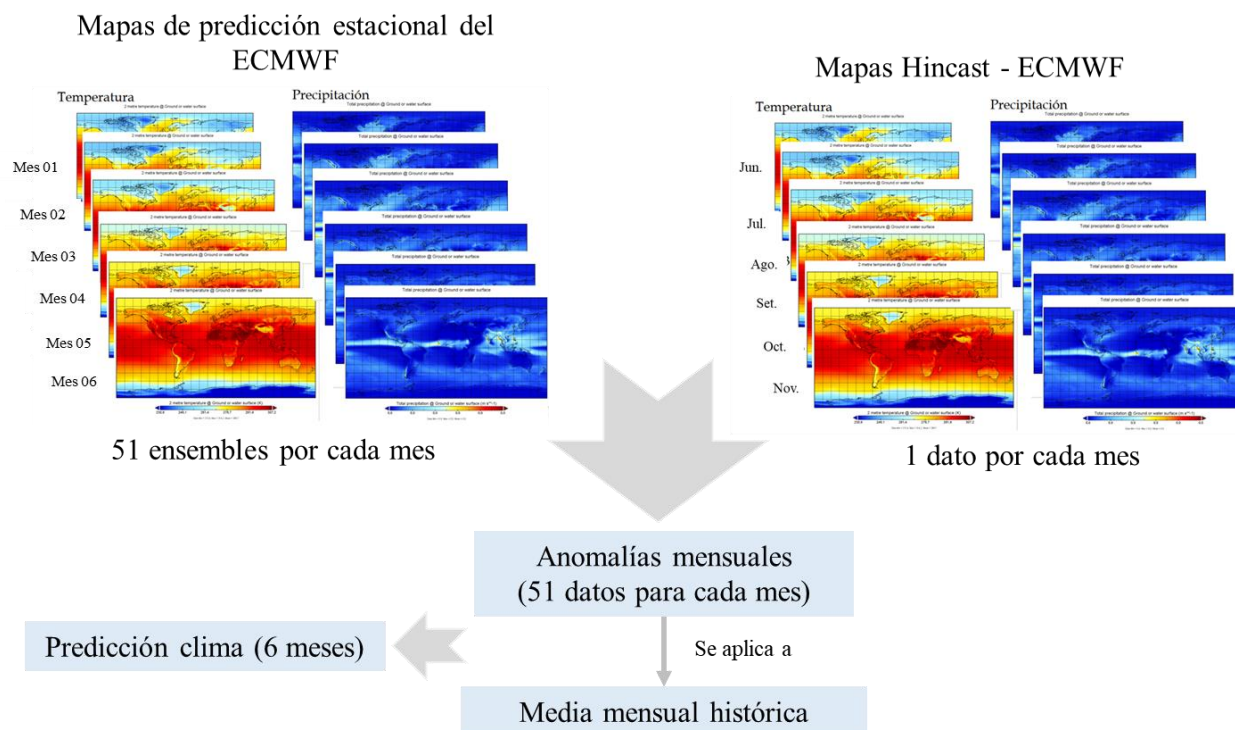


Figura 5-42: Metodología aplicada para la predicción hidrológica

### 5.3.2 Predicción climática estacional

La predicción climática para las subcuencas se realizó aplicando las anomalías mensuales de las 51 realizaciones a la media mensual histórica. En general, los resultados obtenidos para la precipitación muestran una buena correspondencia en ambos periodos analizados: junio - noviembre de 2024 y agosto de 2024 - enero de 2025. Para la temperatura media, se observa un comportamiento similar, excepto en la subcuenca Serrinha, donde las predicciones tienden a sobreestimar ligeramente los valores durante los tres primeros meses. Estos resultados confirman que las predicciones generadas por el modelo ECMWF estiman adecuadamente el clima en esta región del Amazonas. En la Figura 5-43 y Figura 5-44 se muestran las predicciones climáticas de precipitación y temperatura media, respectivamente.

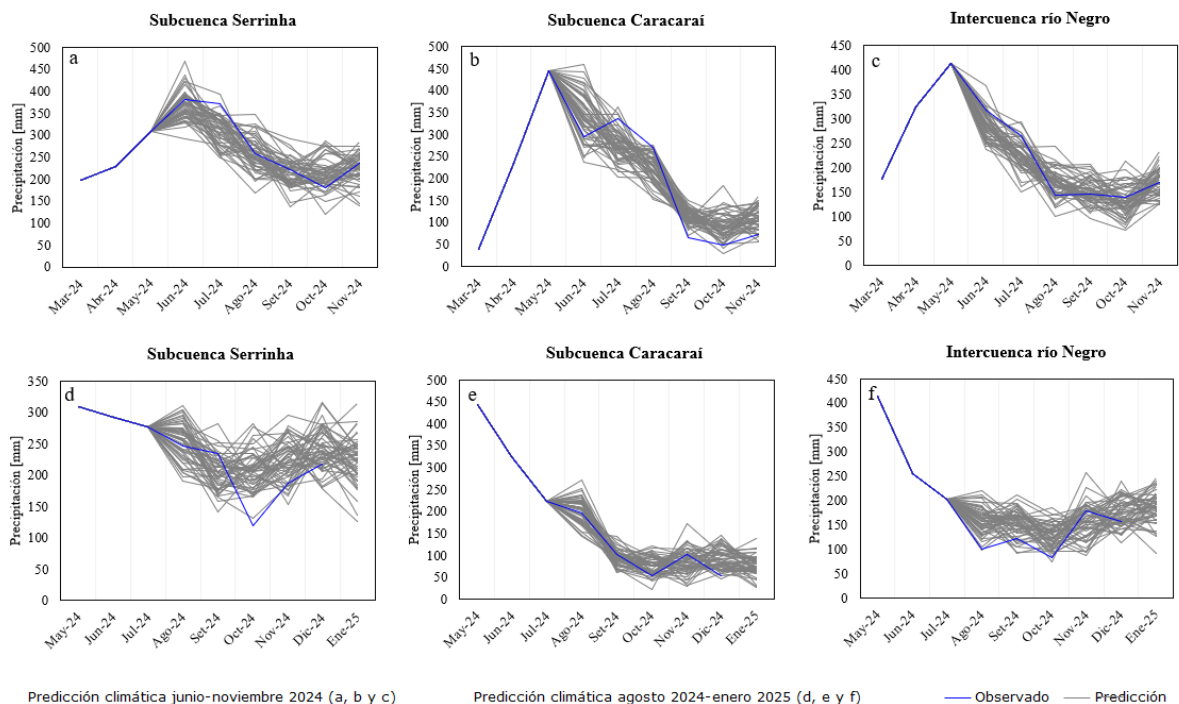


Figura 5-43: Predicción climática estacional de precipitación, periodo junio – noviembre 2024 y agosto 2024 – enero 2025

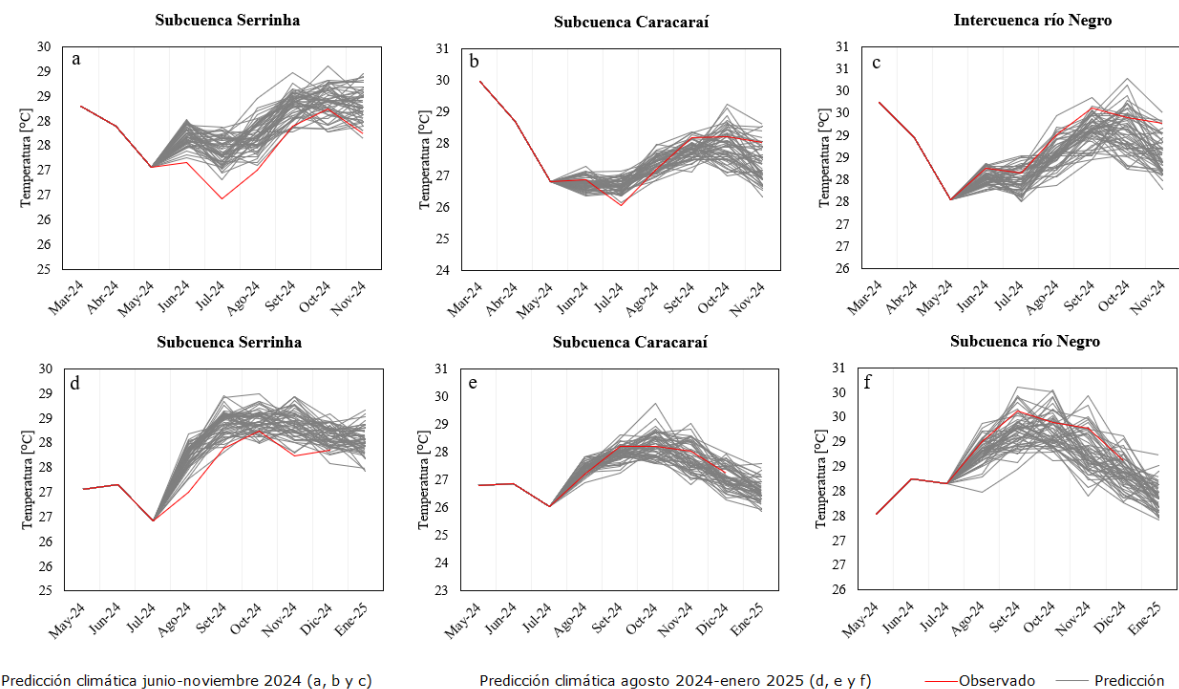


Figura 5-44: Predicción climática estacional de temperatura media, periodo junio – noviembre 2024 y agosto 2024 – enero 2025

### 5.3.3 Predicción estacional de aportaciones

Antes de proceder con la predicción de los niveles, se realizó la predicción de las aportaciones para cada subcuenca, considerando dos casos distintos.

En el primer caso, se llevó a cabo una predicción desde junio hasta noviembre de 2024, utilizando como condiciones iniciales los datos correspondientes al mes de mayo. El objetivo principal de este análisis fue anticipar el comportamiento hidrológico durante el periodo de estiaje de 2024, con especial atención a los meses de septiembre y octubre. Los resultados obtenidos indican que las predicciones estiman adecuadamente dicho comportamiento, aunque se observa una ligera subestimación en la subcuenca Serrinha para el mes de julio de 2024. En general, para la cuenca del río Negro, los resultados se encuentran dentro de los valores esperados, con una leve subestimación en agosto de 2024. En la Figura 5-45 se presenta una ilustración de este primer caso de predicción.

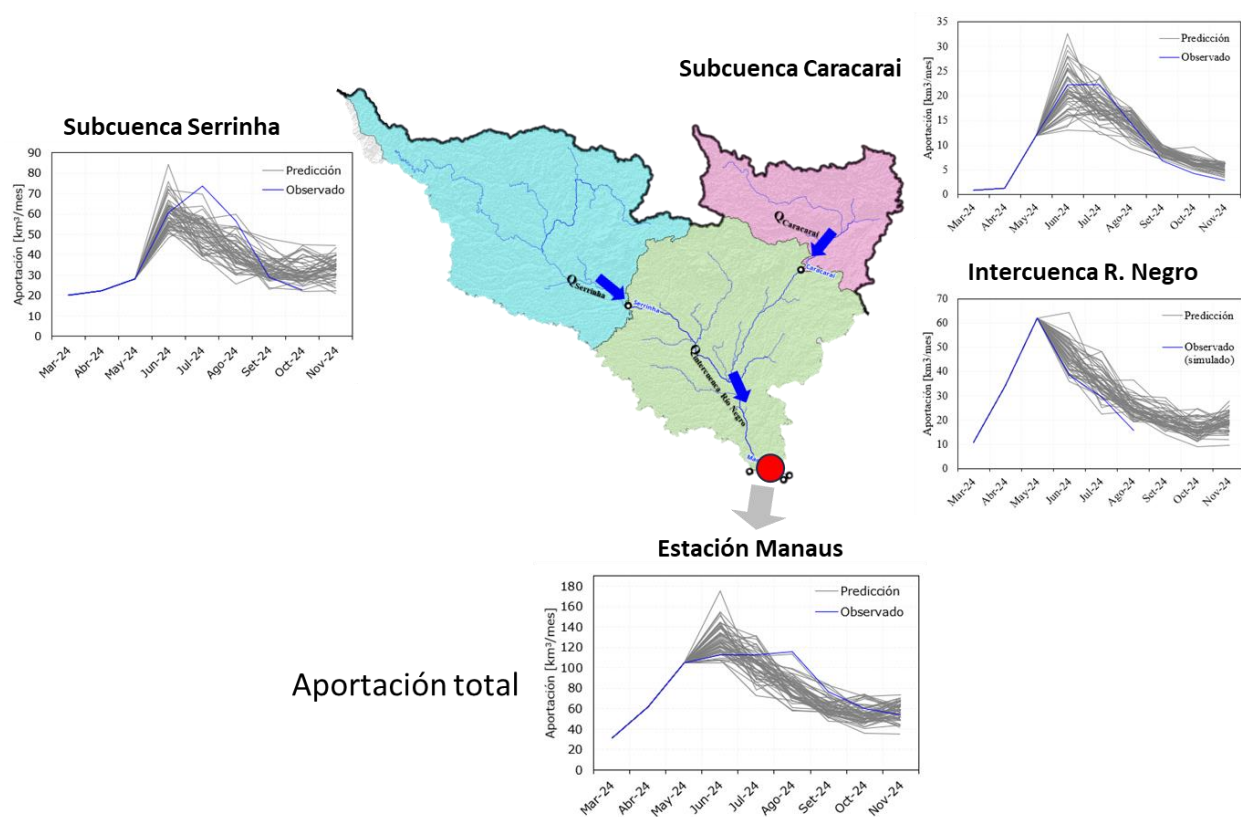


Figura 5-45: Predicción de aportaciones junio-noviembre 2024

En el segundo caso, se efectuó la predicción para el periodo comprendido entre agosto 2024 y enero 2025, tomando como condiciones iniciales los datos del mes de julio. Este enfoque fue similar al anterior, pero centrada al análisis de resultados en los tres meses subsiguientes. Los resultados se encuentran dentro de los límites esperados para las tres subcuencas, mientras que para toda la cuenca en conjunto existe ligera subestimación para agosto del 2024. Los resultados obtenidos para este segundo caso se muestran en la Figura 5-46.

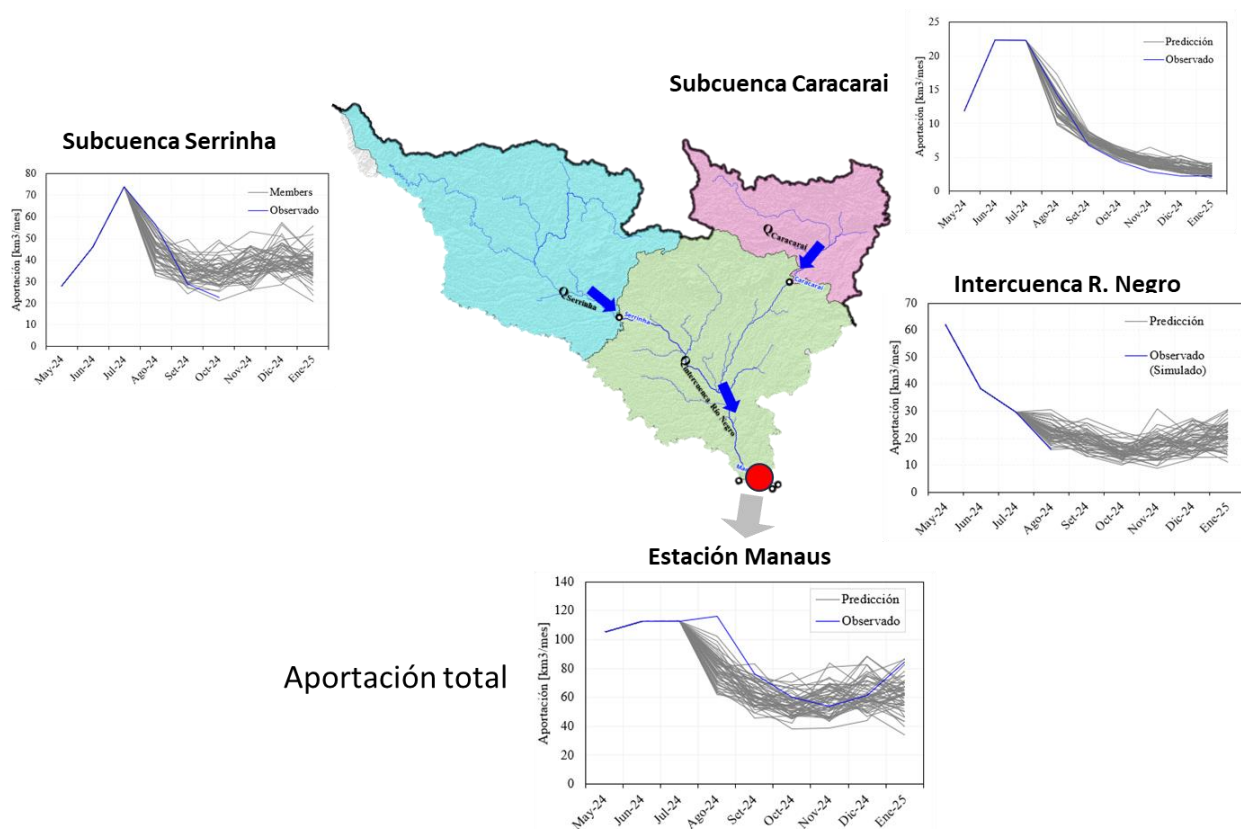


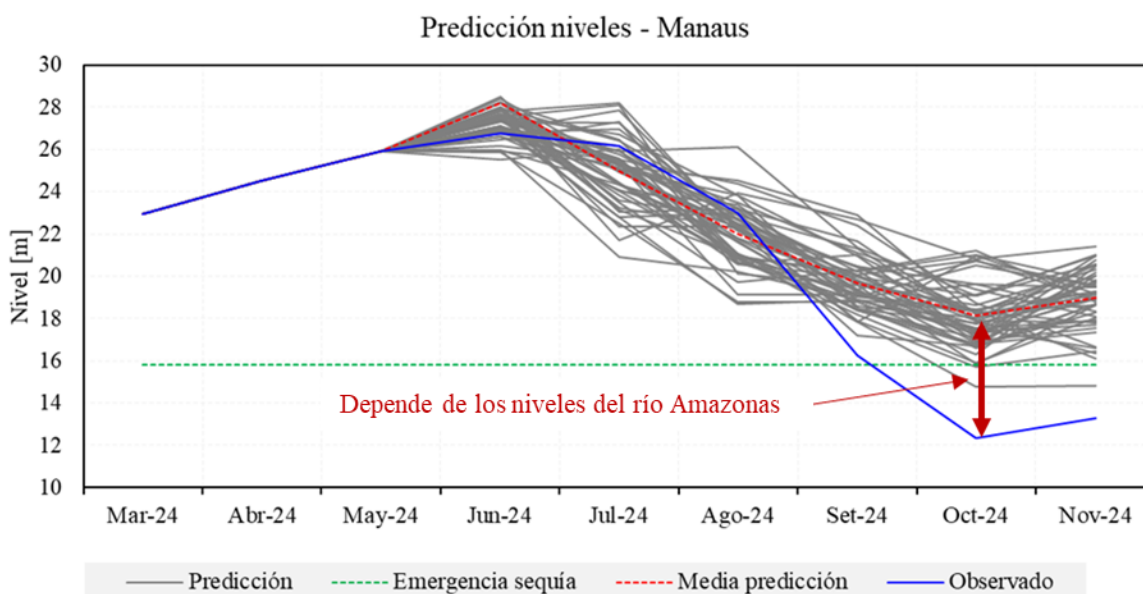
Figura 5-46: Predicción de aportaciones agosto 2024-enero 2025

### 5.3.4 Predicción de niveles

Una vez obtenidos los caudales predichos para cada subcuenca y para toda la cuenca del río Negro, se procedió a estimar los niveles del río en la estación hidrológica de Manaus. Para este proceso, se utilizó la curva de descarga de la estación, la cual permite transformar directamente los valores de caudal en niveles. Se consideraron los mismos dos casos previamente definidos para la

predicción de aportaciones: Preciso que antes de transformar los caudales a niveles, primero se transformó las aportaciones a caudales (caudales predichos).

En el primer caso, se utilizaron los caudales predichos para el periodo comprendido entre junio y noviembre de 2024. Los resultados mostraron una buena concordancia con los valores observados durante los tres primeros meses (junio, julio y agosto), mientras que en los meses finales (septiembre, octubre y noviembre) se evidenció una menor precisión, especialmente durante el pico del estiaje. En la Figura 5-47 se muestra los niveles estimados para este primer escenario.



*Figura 5-47: Predicción de niveles en Manaus periodo junio-noviembre del 2024*

En el segundo caso, se utilizaron los caudales predichos para el periodo de agosto 2024 a enero de 2025. Al igual que en el caso anterior, los niveles se obtuvieron directamente aplicando la curva de descarga. A pesar de tratarse de un periodo más acotado, los niveles predichos para los dos últimos meses no mostraron un mejor ajuste con respecto a los datos observados, particularmente durante los meses críticos de bajo caudal. Los resultados correspondientes se presentan en la Figura 5-48.

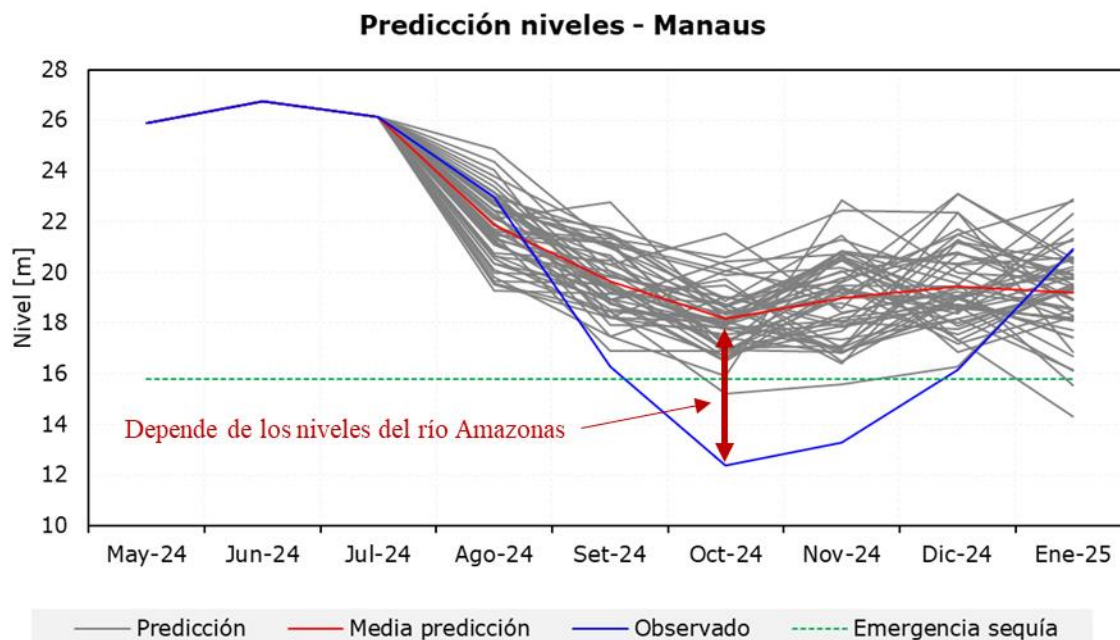


Figura 5-48: Predicción de niveles en Manaus periodo agosto 2024 – enero 2025

### 5.3.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir de los dos casos de predicción climática, caudales y niveles muestran diferencias importantes. En el caso del clima y los caudales, los resultados se encuentran dentro de los límites esperados, independientemente de las diferencias en las condiciones iniciales. En cambio, los niveles no se logran representar adecuadamente, especialmente durante el periodo de estiaje.

En el primer caso, correspondiente a la predicción de caudales entre junio y noviembre de 2024, se observó una buena concordancia entre los caudales predichos y los valores observados durante todo el periodo, excepto para el mes de agosto donde se muestra una subestimación. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en la predicción climática, en la que los valores se encuentran dentro de los límites esperados para los seis meses analizados.

En el segundo caso, que abarca el periodo entre agosto de 2024 y enero de 2025, se obtuvo una buena concordancia entre los caudales predichos y observados en todos los meses, excepto en agosto de 2024 (para el mismo mes que el anterior caso) para toda la cuenca del río Negro. A pesar de tratarse de un periodo más corto, se observa una ligera subestimación. Por el contrario, la predicción climática, en general, se mantiene dentro de los límites esperados.

Por el contrario, en el caso de los niveles, no se logra una buena estimación de los valores bajos, esto queda explicado hidráulicamente: Los niveles en Manaus no dependen únicamente de los caudales del río Negro, sino también de los del río Amazonas. Por ello, en períodos de estiaje, cuando bajan los niveles del río Amazonas, también descienden los niveles en el puerto de Manaus. Incluso si el río Negro mantiene sus caudales, una disminución considerable en el río Amazonas provocará igualmente una caída en los niveles en Manaus. En resumen, los niveles bajos del río Amazonas afectan directamente a Manaus. Para su mejor interpretación, en la Figura 5-49 se presentan las correlaciones de los niveles con otras estaciones (utilizadas para la restitución), donde se observa una correlación casi perfecta entre los niveles en diferentes puntos del río Amazonas cercanos a Manaus. También se muestran los niveles históricos de Jatuarana y Manaus (Figura 5-50), donde se aprecia una variabilidad temporal prácticamente idéntica, lo que indica que los niveles en Manaus están fuertemente influenciados por los niveles en Jatuarana.

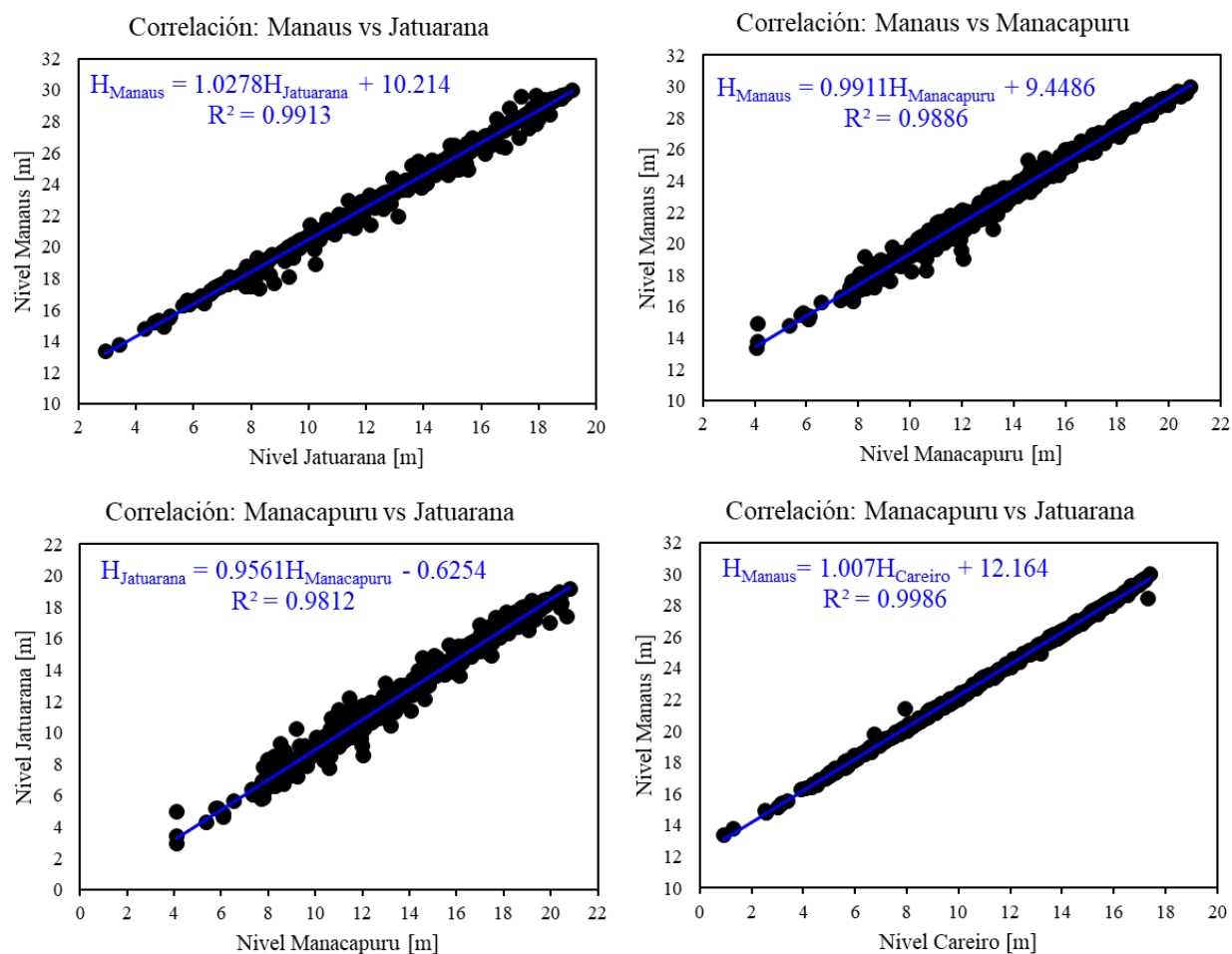


Figura 5-49: Correlación de los niveles en entre estaciones hidrométricas empleadas para la restitución

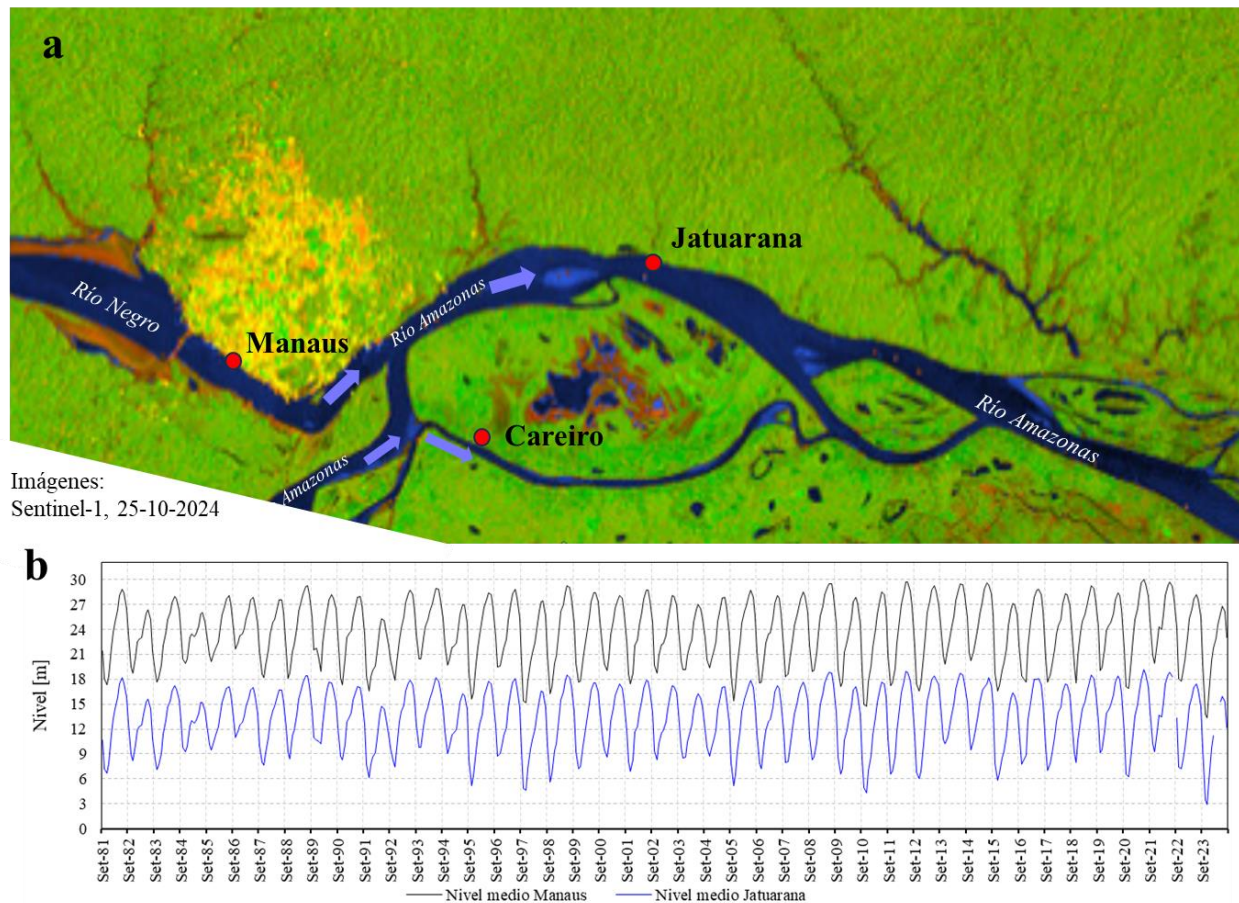


Figura 5-50: a) Vista en planta de la confluencia del río Negro con el río Amazonas. b) niveles históricos en Jatuarana y Manaus (1981-2024)

En conjunto, los resultados muestran que, a pesar de las diferencias en las condiciones iniciales y en el horizonte de pronóstico, la fiabilidad de las proyecciones se mantiene. Los resultados de la predicción climática y de caudales son satisfactorios y se encuentran dentro de los límites esperados. Sin embargo, para mejorar la estimación de los niveles, es necesario incorporar el factor de la cota. Además, se requiere un estudio hidráulico que permita comprender mejor los procesos que ocurren en esta región. Asimismo, es recomendable evaluar otras fuentes de información climática, con el objetivo de optimizar su uso en la predicción de niveles en el puerto de Manaus y anticipar posibles impactos durante periodos de sequías extremas o inundaciones.

## 6 CONCLUSIONES

Se recopiló información sobre las sequías históricas ocurridas en el Amazonas, y en particular sobre las últimas sequías del periodo 2023-2024 en la cuenca del río Negro, así como los impactos socioeconómicos causados en el puerto de Manaus durante el desarrollo de estas sequías. Esta situación generó una crisis en la navegabilidad del puerto, con pérdidas aproximadas de 216,5 millones de euros durante la sequía de 2023. Asimismo, se recopiló información sobre los modelos y estudios de predicción hidrológica implementados en esta cuenca, concluyéndose que existen pocos trabajos desarrollados en esta temática.

Se procesó información climática observada de los diferentes países que integran la cuenca del Amazonas, junto con información remota proveniente de productos satelitales y de reanálisis climático. Estos datos fueron procesados en la plataforma Google Earth Engine (GEE), mediante un algoritmo aplicado a cada fuente de información.

En este estudio se desarrolló e implementó una metodología de modelación y predicción hidrológica aplicada a una cuenca amazónica, integrando productos de temperatura y precipitación provenientes de información satelital y de reanálisis.

La metodología consistió en validar diferentes productos de datos climáticos, en particular de precipitación y temperatura, utilizando como referencia datos observados en estaciones distribuidas en toda la cuenca del río Amazonas. Luego de evaluar diversos estadísticos entre los datos observados y los productos remotos, se seleccionaron los productos CHIRPS (precipitación) y NOAA CPC (temperatura), al demostrarse que son los más adecuados para estimar el clima en esta región. Estos fueron seleccionados como fuentes principales para alimentar el modelo hidrológico.

Se implementó el modelo hidrológico Témez (semi-agregado) en la cuenca del río Negro, considerando el proceso de routing, e integrando los datos climáticos validados. Los resultados obtenidos fueron excelentes en dos subcuencas y buenos en la Intercuenca, lo que demuestra que el modelo Témez es capaz de replicar satisfactoriamente la dinámica hidrológica de la región bajo diferentes condiciones geográficas y climáticas, a pesar de la gran extensión de las subcuencas. Es

decir, la calidad de los resultados depende más de la calidad de los datos de entrada que del tamaño de la cuenca.

La curva de descarga para la estación de Manaus, fue obtenido a partir de los caudales restituidos de las estaciones de Jatuarana, Careiro y Manacapuru. Mediante un algoritmo se establecieron dos curvas de descarga (curva de descarga compuesta), es decir, dos ecuaciones para estimar los niveles.

Se procesaron datos de predicción climática provenientes del ECMWF, y a partir de estos se generaron las anomalías climáticas, que posteriormente fueron aplicadas al clima mensual histórico para obtener la predicción climática en la cuenca del río Negro.

Se desarrolló un algoritmo de predicción hidrológica, mediante el cual se realizó primero la predicción de los caudales del río Negro, y posteriormente se combinaron los caudales predichos con la ecuación de la curva de descarga para estimar los niveles de agua en el puerto de Manaus.

La predicción se evaluó para dos casos con condiciones iniciales diferentes: el primero fue de junio a noviembre del 2024 y el segundo de agosto 2024 – enero 2025.

Los resultados obtenidos a partir de los dos casos de predicción climática, caudales y niveles muestran diferencias importantes. En el caso del clima y los caudales, los resultados se encuentran dentro de los límites esperados, independientemente de las diferencias en las condiciones iniciales. En cambio, los niveles no se logran representar adecuadamente, especialmente durante el periodo de estiaje.

En el primer caso, correspondiente a la predicción de caudales entre junio y noviembre de 2024, se observó una buena concordancia entre los caudales predichos y los valores observados durante todo el periodo, excepto para el mes de agosto donde se muestra una subestimación. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en la predicción climática, en la que los valores se encuentran dentro de los límites esperados para los seis meses analizados.

En el segundo caso, que abarca el periodo entre agosto de 2024 y enero de 2025, se obtuvo una buena concordancia entre los caudales predichos y observados en todos los meses, excepto en agosto de 2024 (para el mismo mes que el anterior caso) para toda la cuenca del río Negro. A pesar de tratarse de un periodo más corto, se observa una ligera subestimación.

Por el contrario, en el caso de los niveles, no se logra una buena estimación de los valores bajos, esto queda explicado hidráulicamente: Los niveles en Manaus no dependen únicamente de los caudales del río Negro, sino también de los del río Amazonas. Por ello, en períodos de estiaje, cuando bajan los niveles del río Amazonas, también descienden los niveles en el puerto de Manaus. Incluso si el río Negro mantiene sus caudales, una disminución considerable en el río Amazonas provocará igualmente una caída en los niveles en Manaus. Es decir, los niveles bajos del río Amazonas afectan directamente a Manaus.

En conjunto, los resultados muestran que, a pesar de las diferencias en las condiciones iniciales y en el horizonte de pronóstico, la fiabilidad de las proyecciones se mantiene. Los resultados de la predicción climática y de caudales son satisfactorios y se encuentran dentro de los límites esperados. Sin embargo, para mejorar la estimación de los niveles, es necesario incorporar el factor de la cota. Además, se requiere un estudio hidráulico que permita comprender mejor los procesos que ocurren en esta región.

Asimismo, para mejorar la precisión y la confiabilidad de las predicciones, se recomienda ampliar el análisis a diferentes casos y escenarios, explorar otras fuentes de predicción climática estacional, y evaluar diversas configuraciones de condiciones iniciales de la cuenca. Además, la aplicación de enfoques combinados (ensembles) y la integración de nuevas fuentes climáticas pueden contribuir a reducir la incertidumbre asociada a las predicciones.

En términos generales, se concluye que la metodología desarrollada es adaptable para su uso en cualquier parte del mundo y permite generar información climática e hidrológica útil para la gestión de los recursos hídricos y la predicción de eventos hidrológicos, especialmente en regiones de difícil acceso o con una red de observación limitada. Asimismo, es aplicable en sistemas de monitoreo casi en tiempo real, dado que los productos climáticos utilizados están disponibles con escaso retraso temporal.

## 7 LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se plantean las siguientes recomendaciones con el objetivo de ampliar y fortalecer futuras investigaciones en modelación y predicción hidrológica:

- **Evaluación comparativa de diversas fuentes de predicción climática estacional:** Es recomendable incorporar múltiples productos de predicción climática estacional (por ejemplo, modelos globales, regionales, entre otros), evaluando su desempeño de forma sistemática bajo distintas condiciones climáticas y temporales. La comparación entre estas fuentes permitirá identificar cuáles ofrecen mejores resultados para ciertas regiones o estaciones del año, y también abre la posibilidad de utilizar métodos de combinación para reducir la incertidumbre inherente a una única fuente. Es decir, se debe seleccionar la fuente que tiene mejor desempeño.
- **Profundización en el análisis de condiciones iniciales hidrológicas:** Se sugiere realizar estudios más complejos que contemplen distintas configuraciones de estado inicial de la cuenca, realizando la predicción para periodos históricos anteriores (hindcasting). Esto es especialmente relevante para entender cómo las condiciones antecedentes (almacenamientos en el suelo, humedad relativa, caudales base, etc.) influyen en la capacidad predictiva del modelo. Al analizar distintos estados iniciales, se podría desarrollar una estrategia más robusta de predicción, adaptada a diferentes contextos hidrológicos (periodos secos y húmedos). Esto podría aplicarse a otros puntos de la cuenca del Amazonas donde se tenga mayor disponibilidad de datos observados (caudales).
- **Estudio hidráulico:** Se requiere realizar un estudio hidráulico que permita comprender mejor los procesos que ocurren en esta zona, especialmente en el tramo comprendido entre las estaciones Manaus - Jatuarana y Manacapuru – Jatuarana..
- **Estudiar soluciones ante eventos de sequía:** Se recomienda realizar estudios orientados a la identificación y evaluación de soluciones frente a eventos de sequía extrema, en los cuales la navegabilidad fluvial entra en crisis, generando importantes impactos socioeconómicos. Estas soluciones podrían incluir, entre otras medidas, intervenciones



como trabajos de dragado, optimización del flujo de transporte fluvial y otras acciones destinadas a reducir los efectos negativos asociados a estas situaciones.

## 8 REFERENCIAS

- Abatzoglou, J., Dobrowski, S., Parks, S., & Hegewisch, K. (9 de January de 2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*. doi:10.1038/sdata.2017.191
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food and Agriculture Organization (FAO). Obtenido de <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Kenneth R., K., L. Dewayne, C., . . . Olivier P., P. (01 de January de 2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *American Meteorological Society*, 69-83. Obtenido de <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Climate Hazards Center. (2025). *University of California, Santa Barbara*. Obtenido de CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2022). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:<https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- Costa MH, Borma LS, Espinoza JC, Macedo M, Marengo JA, Marra DM, . . . Gatti LV. (2021). *Capítulo 5: El Sistema Físico Hidroclimático de la Amazonía*. Science Panel for the Amzon. doi:10.55161/FAAQ6494
- Costa, F., Marengo, J., Albernaz, A. L., Cunha, A. P., Cuvi, N., Espinoza, J.-C., . . . Schöngart, J. (2024). *SCIENCE PANEL FOR the AMAZON*. SCIENCE PANEL FOR the AMAZON. doi:10.55161/LVYB6857
- CPC. (s.f.). *Climate Predicción Center*. Recuperado el 25 de 05 de 2025, de CPC NOAA: <https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/>
- Cullell, J. M. (18 de 10 de 2023). *The Swiss voice in the world since 1935*. Obtenido de La sequía en el Amazonas amenaza con paralizar el comercio fluvial en el norte de Brasil:

<https://www.swissinfo.ch/spa/la-sequ%C3%ADa-en-el-amazonas-amenaza-con-paralizar-el-comercio-fluvial-en-el-norte-de-brasil/48902252>

ECMWF. (23 de 10 de 2020). *Implemented by ECMWF as part of The Copernicus Programme*.  
Obtenido de Reanalysis Q&As: <https://climate.copernicus.eu/reanalysis-qas>

Fatim, B. (05 de 10 de 2023). *Grave sequía aleja a Río Negro de Manaos y altera rutinas de trabajadores: “Es la peor que he visto”*. Obtenido de g1: <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2023/10/05/seca-severa-afasta-rio-negro-de-manaus-e-muda-rotina-de-trabalhadores-e-a-pior-que-ja-vi.ghml>

GeoBolivia. (25 de 05 de 2025). *GeoBolivia*. Obtenido de <https://geo.gob.bo/catalogue/#/dataset/28>

Global Precipitation Measurement. (2019). *The GPM Constellation*. Recuperado el 26 de 05 de 2025, de <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>

Google Earth Engine. (s.f.). *Catálogo de datos de Earth Engine*. Recuperado el 25 de 05 de 2025, de MERRA-2 M2T1NXSLV: Diagnóstico de un solo nivel V5.12.4: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA\\_GSFC\\_MERRA\\_slv\\_2#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GSFC_MERRA_slv_2#description)

Guimberteau, M., Drapeau, G., Ronchail, J., Sultan, B., Polcher, J., Martinez, J.-M., . . . Vauchel, P. (03 de 2012). Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3), 911-935. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-16-911-2012>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., . . . Thépaut, J.-N. (s.f.). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:<https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>

IDEAM. (25 de 05 de 2025). *IDEMA Colombia*. Obtenido de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales: <https://www.ideam.gov.co/>

IHU. (07 de 11 de 2023a). *Instituto Humanitas Unisinos - IHU*. Obtenido de Todas as cidades do Amazonas entram em emergência pela seca extrema:

<https://www.ihu.unisinos.br/categorias/633948-todas-as-cidades-do-amazonas-entram-em-emergencia-pela-seca-extrema>

IHU. (18 de 10 de 2023b). *Instituto Humanitas Unisinos - IHU*. Obtenido de Seca em Manaus provoca férias coletivas na indústria: <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/633325-seca-em-manaus-provoca-ferias-coletivas-na-industria>

INAMHI. (25 de 05 de 2025). *INAMHI Ecuador*. Obtenido de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología: <https://www.inamhi.gob.ec/>

INMET. (25 de 05 de 2025). *Instituto Nacional de Meteorología de Brasil*. Obtenido de Instituto Nacional de Meteorología: <https://portal.inmet.gov.br/>

IRD. (2025). Obtenido de Amazon basin water resources observation service: <https://hybam.obs-mip.fr/>

JAXA. (10 de 07 de 2023). *JAXA Global Rainfall Watch*. Obtenido de Users Guide GSMaP: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/guide.html>

Marengo, J., Cunha, A., Espinoza, J., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J., . . . Zhao, S. (2024). The Drought of Amazonia in 2023-2024. *American Journal of Climate Change*, 13(3). doi:<https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026>

MITECO. (2025). *Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado el 30 de 05 de 2025, de Evaluación de los recursos hídricos: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos.html#:~:text=Habitualmente%20se%20admite%20que%20los,recursos%20h%C3%ADricos\)%2C%20como%20internacional.&text=Existen%20otras%20herramientas%20de%20gesti%C3%B3n,en%20las%20cuenca](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos.html#:~:text=Habitualmente%20se%20admite%20que%20los,recursos%20h%C3%ADricos)%2C%20como%20internacional.&text=Existen%20otras%20herramientas%20de%20gesti%C3%B3n,en%20las%20cuenca)

Muñoz Sabater, J. (s.f.). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:<https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>

NASA. (07 de 2019a). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM): <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>

- NASA. (07 de 2019b). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de The Global Precipitation Measurement Mission (GPM): <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>
- NASA. (02 de 2020). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>
- NASA. (s.f.). *National Aeronautics and Space Administration*. Recuperado el 25 de 05 de 2025, de Global Modeling and Assimilation Office: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/merra-2/>
- Paredes Arquiola, J., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J., & Lerma Elvira, N. (10 de 2017). *Herramienta EvalHid Para la Evaluación de Recursos Hídricos*. Obtenido de [https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual\\_Tecnico\\_EvalHid.pdf](https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf)
- Pontificia Universidad Católica del Perú y Instituto Geofísico del Perú. (2020). Satélites de precipitación GPM/TRMM Parte I. *Curso Internacional de Capacitación en Estimación y Monitoreo de Precipitación por Radar*, (págs. 26-28). Lima.
- RAM. (2002). *La zona de convergencia intertropical, ZCIT, presenta una estructura más compleja y duradera*. Revista de Aficionado a la Meteorología. Revista de Aficionado a la Meteorología. Recuperado el 30 de 05 de 2025, de <https://www.tiempo.com/ram/numero6/pdf/itczdoble.pdf>
- Santos Alves, I. B., Gomes de Carvalho, J. W., & Sganserla Torres, M. (24 de 07 de 2024). *Banco Central do Brasil*. Obtenido de Sequía en el Estado de Amazonas: Impactos en el Comercio Exterior y la Producción Industrial: <https://www.bcb.gov.br/noticiablogbc/16/noticia>
- SENAMHI. (25 de 05 de 2025). *SENAMHI Perú*. Obtenido de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología: <https://www.gob.pe/senamhi>
- SENAMHI. (25 de 05 de 2025). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia*. Obtenido de <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
- SGB. (2024a). *54º Boletim de Alerta Hidrológica da Bacia do Amazonas*. Servicio Geologico do Brasil - SGB. Obtenido de [https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20241230\\_15-20241230%20-%20155156.pdf](https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20241230_15-20241230%20-%20155156.pdf)

SGB. (2024b). *Operação do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas: Relatório Anual 2024*. Serviço Geológico do Brasil - SGB.

SNIRH. (25 de 05 de 2025). *SNIRH ANA*. Obtenido de Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos: <https://snirh.ana.gob.pe/SNIRHPortal/>

Vergara Saturno, L. E. (2020). *Simulación y pronóstico de caudales diarios del río Amazonas mediante un enfoque híbrido basado en wavelet y redes neuronales*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4453>

Wongchuig Correa, S., Cauduro Dias de Paiva, R., Espinoza, J., & Collischonn, W. (06 de 2017). Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology*, 549, 667-684. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>

Yang, Z., & Dominguez, F. (10 de 2019). Investigating Land Surface Effects on the Moisture Transport over South America with a Moisture Tagging Model. *Journal of Climate*, 6627–6644. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0700.1>

Zubieta Barragán, R. (2013). *Modelado Hidrológico Distribuido de la Cuenca Amazónica Peruana utilizando Precipitación obtenida por Satélite*. Obtenido de [http://met.igp.gob.pe/publicaciones/2013/Tesis\\_RZubieta.pdf](http://met.igp.gob.pe/publicaciones/2013/Tesis_RZubieta.pdf)