

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS
SEMIDISTRIBUIDOS GR4J, SOCONT Y HBV APLICADOS AL PRONÓSTICO DE
CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE**

T E S I S

Para optar el título profesional de:

INGENIERO FORESTAL

Presentado por el Bachiller:

ELIX VIDELMO GARCÍA MEDINA

Asesor:

Dr. WILFREDO POMA ROJAS

Ing. DENNIS ALVARINO CIEZA TARRILLO

Cajamarca – Perú

2024



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:

ELIX VIDELMO GARCÍA MEDINA

DNI:76142435

Escuela Profesional/Unidad UNC:

INGENIERÍA FORESTAL

2. Asesor:

DR. WILFREDO POMA ROJAS

Facultad/Unidad UNC:

DE CIENCIAS AGRARIAS

3. Grado académico o título profesional

Bachiller

Título profesional

Segunda especialidad

Maestro

Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS SEMIDISTRIBUIDOS GR4J,
SOCONT Y HBV APLICADOS AL PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO
JEQUETEPEQUE**

Fecha de evaluación: 20/07/2024

6. Software antiplagio: **TURNITIN** **URKUND (ORIGINAL) (*)**

7. Porcentaje de Informe de Similitud: 21%

8. Código Documento: oid:3117:369224680

9. Resultado de la Evaluación de Similitud: 21%

APROBADO **PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO**

Fecha Emisión: 01/08/2024

Firma y/o Sello
Emisor Constancia

Dr. Wilfredo Poma Rojas
DNI: 26719942



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintiocho días del mes de junio del año dos mil veinticuatro, se reunieron en el ambiente **2C - 202** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 064-2024-FCA-UNC, de fecha 09 de febrero del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS SEMIDISTRIBUIDOS GR4J, SOCONT Y HBV APLICADOS AL PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE"**, realizada por el Bachiller **ELIX VIDELMO GARCÍA MEDINA** para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las nueve horas y treinta minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de catorce (14); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las diez horas y cuarenta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
PRESIDENTE

Ing. Nehemías Honorio Sangay Martos
SECRETARIO

Ing. M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
VOCAL

Dr. Wilfredo Poma Rojas
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, mis queridos padres Videlmo García Vásquez y Brisaida Medina Cercado; mis hermanos Esmeli García y Wilmer García; a mi tía Sarela García Vásquez. por su gran apoyo incondicional, perseverancia, sus consejos, sus valores y la motivación constante para poder cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Con gratitud hacia Dios por la salud que me ha concedido, a cada persona que, de diversas maneras, me han brindado inspiración y motivación al logro de una de mis metas.

A la Universidad Nacional del Cajamarca, la Facultad de Ciencias Agrarias y Escuela Profesional de Ingeniería Forestal por brindar un gran nivel educativo a nivel nacional.

A mi asesor, el Dr. Wilfredo Poma Rojas, por su orientación en la investigación de esta tesis. Su experiencia, conocimiento y motivación fueron esenciales para el desarrollo.

Expreso mi más sincero agradecimiento de manera especial al Ing. Dennis Alvarino Cieza Tarrillo, su amistad y por su valioso respaldo continuo durante mi trayectoria académica, la inquebrantable dedicación con la que ha abordado cada una de mis inquietudes desde los inicios en esta investigación.

A mi gran amigo el Ing. Elmer de la Cruz Rojas Bustamante, le agradezco por su apoyo constante en esta investigación y trayectoria universitaria. Su amistad y colaboración han sido muy valiosas para mi formación profesional

A la Ing. Cynthia Analy Herrera Delgado, por su amistad, amabilidad de ella y su familia.

A mis amigos y familiares, quienes me han brindado su apoyo de la mejor manera, gracias por su apoyo y motivación.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DEL CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRAC	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis.....	5
1.5.1. Hipótesis general	5

II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1.	Antecedentes.....	6
2.2.	Marco teórico.....	9
2.2.1.	Modelación hidrológica	9
2.2.2.	RS MINERVE	9
2.2.3.	Modelos hidrológicos semidistribuidos	10
2.2.4.	Clasificación de los modelos hidrológicos.....	13
2.2.5.	Coefficiente de Nash-Sutcliffe	15
2.2.6.	Coefficiente de determinación (R ²).....	15
2.2.7.	Raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE)	16
2.2.8.	Densidad de drenaje.....	16
2.2.9.	Tiempo de concentración	17
2.2.10.	Orden de la red hídrica.....	17
2.2.11.	Perfil longitudinal del río	18
2.2.12.	Pronóstico de caudales diarios	19
2.2.13.	Parámetros geomorfológicos.....	20
2.2.14.	Adecuación de modelos hidrológicos.....	20
2.2.15.	Calibración del modelo	20
2.2.16.	Validación de un modelo hidrológico	21
2.3.	Definición de términos básicos	21

2.3.1. Cuenca hidrográfica.....	21
2.3.2. Ciclo hidrológico	21
2.3.3. Presión atmosférica.....	22
2.3.4. Hidrología	22
2.3.5. Temperatura.....	22
2.3.6. Precipitación.....	22
2.3.7. Evapotranspiración	23
2.3.8. Evapotranspiración potencial	23
2.3.9. Humedad relativa.....	23
2.3.10. Escorrentía superficial	24
2.3.11. Evaporación.....	24
2.3.12. Sistemas de información geográfica en las modelizaciones hidrológicas	24
2.3.13. Producto Pisco.....	25
2.3.14. Caudal	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. Ubicación del área de estudio.....	26
3.2. Materiales	28
3.2.1. Información satelital	28
3.2.2. Información cartográfica.....	28
3.2.3. Software	28

3.3.	Metodología.....	28
3.3.1.	Análisis de datos.....	30
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1.	Determinación de la relación de la dimensión adecuación de modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque.....	38
4.1.1.	Modelo semidistribuido GR4J.....	38
4.1.2.	Modelo semidistribuido SOCONT.....	43
4.1.3.	Modelo semidistribuido HBV.....	49
4.2.	Determinación de la relación de la dimensión modelo hidrológico más representativo con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque.....	55
V.	CONCLUSIONES.....	58
VI.	RECOMENDACIONES.....	59
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores referenciales del Coeficiente de Nash-sutcliffe	15
Tabla 2 Valores de determinación del coeficiente de determinación	16
Tabla 3 Densidad de drenaje.....	17
Tabla 4 Prueba de normalidad	34
Tabla 5 Periodo de calibración y validación considerados en la adecuación de modelos	38
Tabla 6 Indicadores de eficiencia, modelo GR4J luego del proceso de calibración.....	40
Tabla 7 Indicadores de eficiencia, modelo GR4J luego del proceso de validación.....	42
Tabla 8 Indicadores de eficiencia, modelo SOCONT luego del proceso de calibración	45
Tabla 9 Indicadores de eficiencia, modelo SOCONT luego del proceso de validación	48
Tabla 10 Indicadores de eficiencia, modelo HBV luego del proceso de calibración.....	51
Tabla 11 Indicadores de eficiencia, modelo HBV luego del proceso de validación.....	53
Tabla 12 Análisis comparativo de parámetros estadísticos de calibración de los modelos simulados.....	55
Tabla 13 Análisis comparativo de parámetros estadísticos de validación de modelos los simulados.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo hidrológico GR4J	10
Figura 2 Modelo hidrológico HBV.....	11
Figura 3 Modelo hidrológico SOCONT.....	12
Figura 4 Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales	18
Figura 5 Perfil longitudinal de un río.....	19
Figura 6 Ubicación de la cuenca media y alta del río Jequetepeque	27
Figura 7 Procedimiento de la investigación	30
Figura 8 Código generado en el software RStudio para el análisis de datos.....	31
Figura 9 Código generado en el software RStudio para determinar los estadísticos descriptivos	32
Figura 10 Estadísticos descriptivos.....	33
Figura 11 Caudal de calibración (2001-2012).....	34
Figura 12 Caudal de calibración (2001-2012).....	35
Figura 13 Caudal de validación (2013-2017).....	36
Figura 14 Caudal de validación (2013-2017).....	37
Figura 15 Calibración del modelo GR4J (2001-2012).....	39
Figura 16 Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de calibración - modelo GR4J (01/01/2001 - 31/12/2012).....	40
Figura 17 Validación del modelo GR4J (2013-2017).....	41
Figura 18 Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de validación - modelo GR4J (01/01/2013 - 31/12/2017).....	43
Figura 19 Calibración del modelo SOCONT	44

Figura 20	Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de calibración - modelo SOCONT (01/01/2001 - 31/12/2012)	46
Figura 21	Validación del modelo SOCONT	47
Figura 22	Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de validación - modelo SOCONT (01/01/2013 - 31/12/2017)	49
Figura 23	Calibración del modelo HBV	50
Figura 24	Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de calibración - modelo HBV (01/01/2001 - 31/12/2012).....	51
Figura 25	Validación del modelo HBV	52
Figura 26	Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de validación - modelo HBV (01/01/2013 - 31/12/2017).....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

ANA	: Autoridad Nacional del Agua
DEM	: Modelo de Elevación Digital
GR4J	: Ingeniería Rural a paso diario
SOCONT	: Contribución del suelo
HBV	: División del balance hídrico
PISCO	: Datos peruanos de interpolación de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI
PISCO _{pd}	: PISCO Precipitación diaria
PISCO _t	: PISCO Temperatura
PISCO _{pet}	: PISCO Evapotranspiración potencial
RS MINERVE	: Sistema de rutas MINERVE
RMMSE	: Error medio cuadrático relativo
NASH - SUTCLIFFE	: Coeficiente de eficacia del modelo de Nash-Sutcliffe
R ²	: Coeficiente de determinación
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	: Sistema de Información Geográfica
Hm ³	: Hectómetro cúbico

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue realizar el análisis de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV aplicados al pronóstico de caudales diarios en la cuenca del río Jequetepeque. Los resultados indican que el área de la cuenca en estudio (media y alta) es de 3290.28 km² con un cauce principal de 162.682 km, con una altitud media de la cuenca de 2,320.37 msnm. Los parámetros de relieve revelan que la pendiente del cauce es suave (8.51%), mientras que la pendiente media de la cuenca (media y alta) es del 12.933% que lo denomina como fuertemente inclinada. Para el modelo semidistribuido GR4J se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.829 en la etapa de calibración y de 0.777 en la validación; para el modelo semidistribuido SOCONT se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.562 en la etapa de calibración y de 0.564 en la validación, mientras que para el modelo HBV se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.819 en la etapa de calibración y de 0.810 en la validación. El ajuste de los modelos en las etapas de calibración y validación es mayor a 0.8 que indica que más del 80% de los caudales diarios pueden ser predichos por los modelos hidrológicos a excepción del modelo SOCONT que obtuvo valores muy bajos con un ajuste no aceptable para la predicción de caudales. Las simulaciones mostraron que el modelo hidrológico HBV fue el más eficiente, lo que indica un buen ajuste entre los caudales observados y simulados. Este modelo obtuvo también un alto desempeño en las etapas de calibración y validación, con indicadores de eficiencia cercanos al valor óptimo. Por lo tanto, se concluye que el modelo HBV es el más eficiente para modelar el caudal del río Jequetepeque.

Palabras claves: RS MINERVE, GR4J, SOCONT, HBV, PISCO, Modelación semidistribuida, calibración, validación, simulación.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the GR4J, SOCONT and HBV semi-distributed hydrological models applied to daily flow forecasting in the Jequetepeque river basin. The results indicate that the area of the basin under study (middle and upper) is 3290.28 km² with a main channel of 162.682 km, with an average altitude of the basin of 2,320.37 meters above sea level. The relief parameters reveal that the channel slope is gentle (8.51%), while the average slope of the basin (medium and high) is 12.933% which denominates it as steeply sloping. For the semi-distributed model GR4J a Nash-Sutcliffe value of 0.829 was obtained in the calibration stage and 0.777 in the validation; for the semi-distributed model SOCONT a Nash-Sutcliffe value of 0.562 was obtained in the calibration stage and 0.564 in the validation, while for the HBV model a Nash-Sutcliffe value of 0.819 was obtained in the calibration stage and 0.810 in the validation. The fit of the models in the calibration and validation stages is greater than 0.8, which indicates that more than 80% of the daily flows can be predicted by the hydrological models, with the exception of the SOCONT model, which obtained very low values with an unacceptable fit for flow prediction. The simulations showed that the HBV hydrologic model was the most efficient, indicating a good fit between observed and simulated flows. This model also obtained a high performance in the calibration and validation stages, with efficiency indicators close to the optimum value. Therefore, it is concluded that the HBV model is the most efficient for modeling the flow of the Jequetepeque River.

Keywords: RS MINERVE, GR4J, SOCONT, HBV, PISCO, semi-distributed modeling, calibration, validation, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

Un aspecto fundamental en el estudio de la hidrología es la interacción entre los diferentes procesos y componentes físicos del ciclo hidrológico, con el fin de realizar pronósticos confiables que se basen en la gestión de los usos de los recursos hídricos y proponer soluciones de ingeniería que cumplan con requisitos específicos. Para este propósito, la metodología más utilizada es la modelación hidrológica que consiste en representar el ciclo y las variables externas dentro de una cuenca con expresiones matemáticas analíticas basadas en el balance hídrico. (Cruz y Romero, 2018)

El presente estudio denominado Análisis comparativo de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT Y HBV aplicados al pronóstico de caudales diarios en la cuenca del río Jequetepeque, evaluará cual es el modelo hidrológico más representativo que permita simular con mayor eficiencia los caudales diarios para la cuenca alta y media del río Jequetepeque.

El estudio consta de 7 capítulos que se detallan a continuación:

En el primer capítulo se describe y formula el problema de investigación, se propone los objetivos tanto generales y específicos, la justificación e importancia y la hipótesis.

En el segundo capítulo se desarrolló la revisión bibliográfica donde se mencionan los antecedentes de la investigación a nivel nacional e internacional, las bases teóricas y la definición de términos básicos referentes a la línea de investigación.

En el tercer capítulo se estableció el marco metodológico, donde se plantea el método y los materiales, el tipo de investigación es aplicada, puesto que los resultados se obtendrán a partir del procesamiento de los caudales referenciales y con el apoyo de datos satelitales para la simulación. El diseño es no experimental y el nivel de la investigación es correlacional. En este capítulo

también se detallan los procedimientos realizados y se lleva a cabo todo el análisis de los datos que facilitan la obtención de los resultados.

En el cuarto capítulo se detallan los resultados de acuerdo a cada uno de los objetivos formulados; se determinan los parámetros geomorfológicos de la cuenca (alta y media), se determina la relación de la dimensión adecuación de modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV con el pronóstico de caudales diarios y por último se determina también la relación de la dimensión modelo hidrológico más representativo con el pronóstico de caudales diarios. En este capítulo también se lleva a cabo la discusión de los resultados de forma comparativa con los antecedentes internacionales y nacionales considerados en la presente investigación.

En el quinto y sexto capítulo se dan las conclusiones y las recomendaciones, mientras que el séptimo capítulo se mencionan las referencias bibliográficas considerados en la presente investigación.

1.1. Descripción del problema

Según de la Torre (2017), en el mundo está creciendo la necesidad de agua, esto debido al crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y el aumento de la producción y del consumo han generado una demanda de agua dulce cada vez mayor, no obstante, hay agua suficiente como para satisfacer las necesidades crecientes del mundo, pero no si no cambiamos radicalmente el modo en que se usa, se maneja y se comparte el agua.

En la actualidad, la seguridad hídrica constituye un desafío importante, y a menudo creciente, para muchos países. Para alimentar a 10 000 millones de personas en 2050 será necesario aumentar un 50% la producción agrícola (que hoy consume el 70% del recurso) e incrementar la extracción de agua un 15%. Más allá de la demanda creciente, los recursos hídricos ya son escasos

en muchas partes del mundo. Las estimaciones indican que más del 40 % de la población mundial vive en zonas donde el agua escasea, y aproximadamente una cuarta parte del producto interno bruto mundial está expuesta a este problema. Se prevé que, para 2040, uno de cada cuatro niños vivirá en zonas con escasez de agua extrema. Banco mundial (BGM) (2022)

Los indicadores que muestra América Latina dan a entender que buena parte de la región sufre una escasez hídrica. Ese es el caso de países tales como: México, Chile y el Perú, que concentran un promedio del 40% de la población y con accesibilidad al 10% de los recursos hídricos disponibles. (Iagua 2024)

Para comprender mejor el comportamiento de los recursos hídricos es necesario contar con información hidrométrica y que en nuestro país es limitada. Ante esta situación, el uso de modelos semidistribuidos se presenta como una alternativa conveniente para el pronóstico de caudales diarios y/o mensuales. Así mismo, la modelación hidrológica tiene alcances variados, que comprenden métodos con diversas aplicaciones, unos más complejos que otros. (Cruz y Romero, 2018)

Según ANA (2015), en la cuenca del río Jequetepeque la demanda hídrica total promedio anual en el sector regulado asciende a 731.5 hm^3 , mientras que para la cuenca alta y media es de 61.4 hm^3 , el uso agrario representa la principal demanda.

Dado que la cuenca se divide en un sector regulado (cuenca baja), pues aquí se encuentra la represa gallito ciego y un sector no regulado (cuenca alta y media) el sistema se vuelve más complejo y por ende la simulación del comportamiento de la cuenca hidrográfica es diferente en la parte media y alta. El pronóstico de los caudales diarios es un problema que debe abordarse puesto que esta información es útil en la gestión del recurso hídrico, dando énfasis al sector no regulado, pues aquí el recurso es aprovechado para la agricultura y donde la población beneficiada

en su mayoría desconoce de la importancia de estos estudios y como podrían ayudarlos en el desarrollo y expansión agrícola, sin poner en riesgo la sustentabilidad ambiental de la cuenca.

1.2. Formulación del problema

¿En qué medida el análisis de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV se relacionan con el pronóstico de caudales diarios en la cuenca del río Jequetepeque?

1.3. Justificación

Este estudio está enfocado en el uso de tres modelos hidrológicos, la principal hipótesis del presente trabajo de investigación, radica en que es posible hacer estimaciones confiables del caudal mediante la adecuada selección y aplicación de modelos matemáticos de transformación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Jequetepeque.

Teniendo para ello análisis comparativos que permitan incorporar elementos de análisis de manera cuantitativa y comparativa de los modelos hidrológicos, de esta manera proporciona una base de datos más confiable para la elaboración de otros modelos integrados en la gestión de los recursos hídricos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar el análisis de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV aplicados al pronóstico de caudales diarios en la cuenca del río Jequetepeque.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la relación de la dimensión adecuación de modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque.
- Determinar la relación de la dimensión modelo hidrológico más representativo con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV se relacionan directamente con el pronóstico de caudales diarios en la cuenca del río Jequetepeque.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Ocampo y Vélez (2013), analizaron el comportamiento de los modelos lluvia-escorrentía en relación con la descarga media en Colombia. Estos modelos agregados a una escala mensual, presentan diferentes niveles de complejidad. Los periodos de estudio fueron para calibración 2001-2007 y para validación 1987-1993. La respuesta hidrológica se evaluó mediante gráficos estadísticos. Los indicadores estadísticos, hidrogramas y curvas de duración de caudales permitieron una mejor comprensión de la escorrentía en cuencas de alta montaña. Así mismo, los modelos conceptuales Tetis, abcd y el modelo auto-regresivo ARMA (1,1) de Salas y Smith capturaron de manera satisfactoria la descarga media y podrían aplicarse para estimar caudales en cuencas no aforadas en la zona de estudio.

Rodríguez y Rodríguez (2020), evaluaron la comparación de los modelos hidrológicos lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la obtención de caudales medios en la cuenca del río Subachoque, Colombia, estimaron la precisión de estos modelos en una cuenca caracterizada por su variabilidad territorial. Los análisis incluyeron la calibración, validación y ajustes de ambos modelos. El modelo GR2M, basado en datos mensuales, mostró un coeficiente de NASH de 0.51, representando buena simulación, pero en el caso de altas precipitaciones sobre simula los caudales. A la vez el modelo GR4J, con datos diarios, logró una calibración con coeficientes de NASH de 0.52, al simular altas precipitaciones su validación disminuyó a 0.16. finalizando de que ambos modelos logran una buena calibración y por lo tanto se puede llegar a representar las condiciones hidrológicas de la cuenca.

Guaman (2020), realizó la modelación hidrológica con HEC - HMS y RS MINERVE de la cuenca del río Casacay, Ecuador, cuyo objetivo fue la determinación de la correlación que existe entre los caudales máximos que serán calculados por HEC - HMS y RS MINERVE, para tener que verificar su grado de credibilidad de dichos modelos matemáticos. Para dicho estudio, se han empleado datos disponibles a nivel nacional como a nivel internacional. En tanto que, para la verificación de grado de credibilidad de los caudales máximos se eligió la prueba de T de student, siendo la más empleada para variables cuantitativas cuyas mediciones se hacen a una misma población en dos casos diferentes. El resultado obtenido, son los hietogramas de precipitación, la evapotranspiración potencial y los caudales máximos para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno en dichos softwares trabajados. Dicho estudio contribuye a una adecuada modelización hidrológica, en el caso de los caudales máximos, por lo que HEC-HMS y RS MINERVE cumplen el objetivo de confiabilidad para su posterior uso.

Astorayme et al. (2015), elaboró un estudio de modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú, cuyo objetivo fue evaluar y comparar la capacidad de respuesta de los modelos de lluvia-escorrentía bajo un enfoque espacial semidistribuido, y conocer qué modelos son los más adecuados para aplicarlos en la elaboración futura de un sistema de alerta temprana en la cuenca del río Chillón. Las series simuladas por los modelos HBV y SAC, presentan mejores resultados tanto en épocas de avenidas (Nash entre 0.91 a 0.80) como en estiaje (Nash - ln entre 0.92 a 0.78). Sin embargo, las variaciones en los indicadores estadísticos de bondad de los modelos GR4J y SOCONT no muestran una gran variación estadística respecto a los anteriores (Nash entre 0.88 a 0.73 y Nash - ln entre 0.87 a 0.62). Por otro lado, los modelos GR4J y SOCONT con menores parámetros tienden a representar con mayor detalle sus periodos de avenida respecto a los meses de estiaje.

Camones (2015), evaluó el estudio de la influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique. Junín - Perú. Las evaluaciones para tener la información se realizó in situ de diferentes estaciones pluviométricas, meteorológicas e hidrométricas; registrando los datos diarios en ambas cuencas durante el periodo de diciembre 2013 - marzo 2015, monitoreando la humedad en las mencionadas cuencas durante los periodos de lluvia y estiaje. Dando como resultado, que el SMH Hec - Hms no logra simular adecuadamente la humedad del suelo principalmente en el periodo seco (mayo - octubre), esto debido a limitaciones propias del modelo. Respecto al SMH RS MINERVE, se puede observar una mejora en su desempeño de la simulación de la humedad del suelo, en ambos periodos (seco - húmedo). RS MINERVE facilita el proceso para calibración y validación ya que proporciona un rango de valores a considerar para cada parámetro, de tal manera concluye que hay una menor incertidumbre al realizar la simulación de la humedad del suelo mediante el modelo RS MINERVE a comparación de SMH Hec - Hms.

Yana (2018), realizó la estimación de drenaje pluvial para la ciudad de Cajabamba-Cajamarca utilizando los modelos hidrológicos HEC-HMS, HEC-RAS y SWMM, cuyo objetivo es construir un modelo hidrológico e hidráulico detallado con el programa SWMM, y HEC-HMS. Los resultados mencionan que la cuenca en su área urbana tiene una superficie de 162 ha aproximadamente, con una topografía de pendiente pronunciada y altos índices de impermeabilidad del suelo, el lugar se ve aún más comprometida al riesgo por las edificaciones construidas sobre los cauces principales de las quebradas, que la convierte en un tipo de conducto cerrado en diversos tramos importantes de la ciudad. El análisis de diversas zonas fue de manera rápida y se diseñó de adecuadamente el sistema que permite el drenaje pluvial urbano, tomando en cuenta la formulación de costos y presupuestos.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica es la que se desarrolla con el objetivo de simular los procesos vinculados con el cálculo del balance hídrico de las cuencas hidrográficas en los que se utilizan variables de entradas como la precipitación, y variables de salidas como la evapotranspiración, estas son la base en la generación y representación de caudales. Hoy en día, el avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de muchos modelos en los que el conocimiento y entendimiento de los usuarios es clave en la generación de información y su contraste con la realidad. (Jorquera et al., 2011)

2.2.2. RS MINERVE

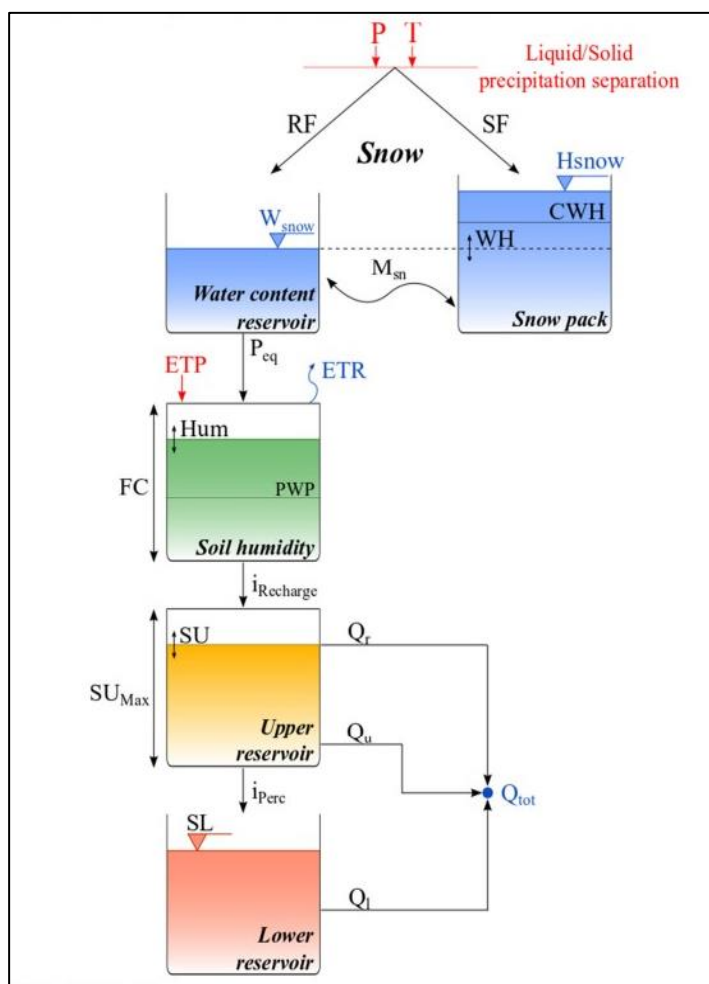
Es un software de modelamiento desarrollado por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) e HydroCosmos S.A. Que luego ha mejorado con la colaboración de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, la Universidad Politécnica de Valencia y la asociación Hydro10. Este software permite la simulación de procesos de lluvia - escorrentía y el flujo de los ríos. Dado que esta herramienta facilita el modelado de redes hidrológicas e hidráulicas complejas haciendo uso de un esquema conceptual semidistribuido, el modelo semidistribuido excluye las zonas de igual comportamiento hidrológico y las evalúa de forma independiente para después superponer sus efectos. A pesar de ser una simplificación, el software representa mejor la variación del suelo y pendiente. La simulación hidrológica contempla procesos como el deshielo o el flujo superficial y subterráneo, así como elementos hidráulicos, ya sean aliviaderos o turbinas. (Foehn et al., 2017)

- **Modelo HBV**

Es un modelo integrado lluvia-escorrentía HBV el cual se compone de una nueva función, un depósito de humedad y dos (superior e inferior) depósitos de almacenamiento de suelo. La estructura del modelo implementado se presenta en la figura. (García et al., 2020)

Figura 2

Modelo hidrológico HBV



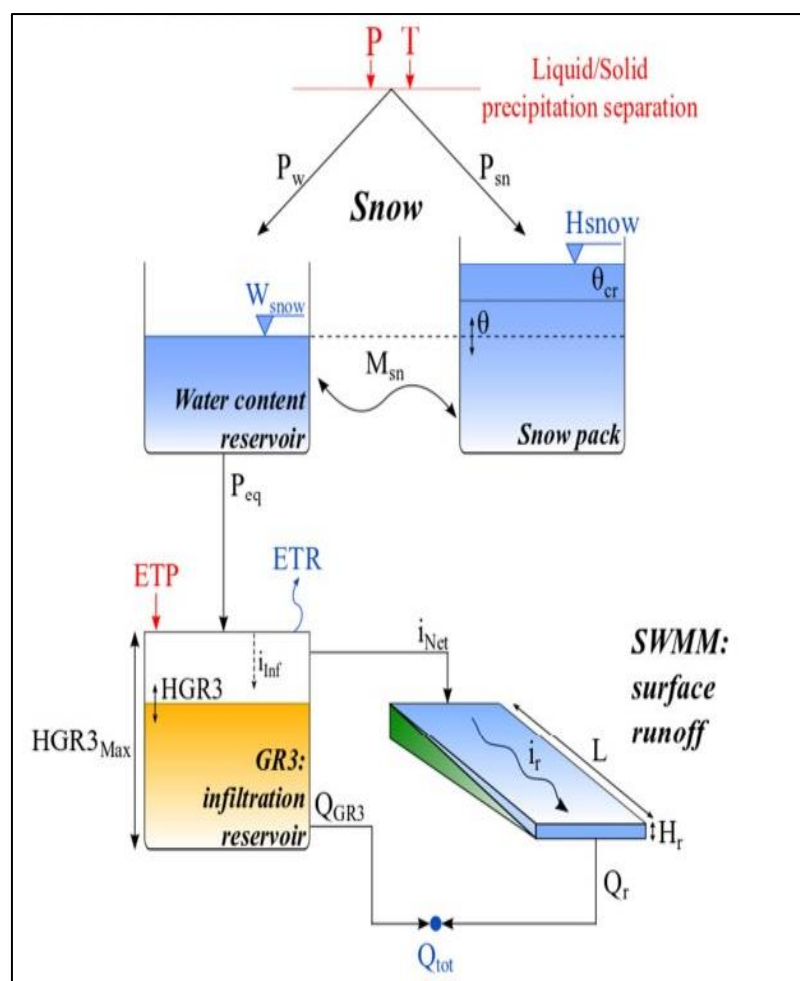
Fuente: García, et al. (2020)

- **Modelo SOCONT**

En el modelo SOCONT, el modelo Snow-SD simula la evolución transitoria del manto de nieve (derretimiento y acumulación) en función de la temperatura (T) y la precipitación (P), de esta manera proporcionando una precipitación equivalente (P_{eq}) que es utilizada como entrada por el modelo GR3. Este modelo GR3 también tiene en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y proporciona la intensidad neta al modelo SWMM. (García et al., 2020)

Figura 3

Modelo hidrológico SOCONT



Fuente: García, et al. (2020)

2.2.4. Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Cabrera (2017), los modelos hidrológicos se clasifican de diferentes formas, enfocándose en el análisis de tres características básicas útiles para la modelización hidrológica de cuencas:

- De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos: Este modelo funciona como una relación calibrada entre entradas y salidas, recibe el nombre de modelo "de caja negra", empírico o de regresión. Estos modelos se basan en relaciones entrada - salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales.
- De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos: Un modelo formal puede escribirse como una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original. Los cuales expresan el comportamiento del sistema por un conjunto de ecuaciones.
- De acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.: Para esto se tiene como principal limitación en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo.

2.2.4.1. Modelo lineal: Consiste en una función lineal sujeta a restricciones lineales; el cual está estructurado con un algoritmo matemático que proporciona una amplia gama de soluciones posibles hasta obtener la solución óptima. (Pérez, 2019)

2.2.4.2. Modelo lógico: En esta fase se describirá en detalle la estructura en la que se almacenarán todos los datos en base al modelo conceptual desarrollado anteriormente. Es una descripción detallada de las entidades, el proceso y el análisis a realizar, el producto esperado y un menú de consulta preparado para el usuario. (García, 2004)

2.2.4.3. Modelos estadísticos: En este caso, se utiliza la modelización estadística, donde los analistas buscan el mejor modelo que se ajuste a los datos disponibles y proporcione predicciones confiables. El objetivo de la modelización estadística es formular una expresión matemática que represente el comportamiento general de la población de estudio, dado el diseño experimental establecido. (Morales y Martínez, 2021)

2.2.4.4. Modelo hidrológico de series de tiempo: Hay muchos datos hidrológicos, climatológicos y otros. Siendo recopilados con fines de análisis para su posterior planificación y toma de decisiones. Este registro sistemático de mediciones u observaciones numéricas en intervalos de tiempo se denomina series de tiempo (TS). (Quichimbo, 2011)

2.2.4.5. Modelos distribuidos y semidistribuidos: El término modelo parámetro distribuido o modelo distribuido se utiliza para referirse a modelos que permiten que los parámetros varíen espacialmente dentro de una cuenca, es decir, se considera que los procesos hidrológicos ocurren en diferentes puntos del espacio. Por lo tanto, no solo se calcula la respuesta de toda la cuenca, sino también de las subcuencas individuales. La simulación de más detalles en un modelo distribuido es computacionalmente más eficiente que un modelo global ya que las subdivisiones aceleran el cálculo. (Cruz y Romero, 2018)

2.2.4.6. Modelos métricos: Se conocen como modelos métricos aquellos que, a partir de los datos observados, pueden estimarse u optimizarse utilizando estadísticas para caracterizar ampliamente la respuesta del sistema. Los modelos métricos a menudo se describen como un tipo de caja negra. (Quichimbo, 2011)

2.2.5. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es uno de los más empleados de su uso extendido para evaluar la predicción de las series simuladas en modelos hidrológicos. (Nash y Sutcliffe, 1970)

Tabla 1

Valores referenciales del Coeficiente de Nash-sutcliffe

AJUSTE	Insuficiente	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno	Excelente
Nash	< 0.2	0.2 – 0.4	0.4 – 0.6	0.6 – 0.8	> 0.8

Fuente: Astorayme. (2017)

La Tabla 1 muestra los rangos recomendados para calificar el modelo utilizando los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos. Esto indica que, si el coeficiente de Nash es mayor a 0,6, el modelo se considera muy eficiente, y si es mayor a 0,8, el modelo se considera altamente eficiente. El coeficiente de Nash varía de $-\infty$ a 1, con un valor óptimo de 1.

2.2.6. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) indica la cantidad proporcional de variación en la variable de respuesta. Cuanto mayor sea el R^2 , mayor será la variabilidad explicada por el modelo de regresión lineal. El coeficiente de determinación (R^2) representa así la proporción de la varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo. (Moriassi et al., 2007)

$$R^2 = \frac{(n - 1) \sum_{t=1}^n (X_i - \hat{x}_i)^2}{n \sum_{t=1}^n (X_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

N = Número de observaciones

x_i = Valor observado

\hat{x}_i = Valor estimado por el modelo

\bar{x} = Promedio de los datos observados

Tabla 2*Valores de determinación del coeficiente de determinación*

Coeficiente de determinación (R^2)	Ajuste
0,6 ≤ 0,70	Satisfactorio
0,70 ≤ 0,80	Bueno
> 0,80	Muy bueno

Fuente: Moriasi et al. (2007)

2.2.7. Raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE)

El RRMSE cuantifica el error relativo que existe entre una variable u otra, y así mismo puede tomar valores de 0 a más, siendo los valores más bajos los que indican menores errores.

(Feyen et al., 2000)

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{t=ti}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}}{n \cdot Q_{ref}}$$

Donde:

Q_{sim,t}: descarga simulada en un tiempo t (m³/s)Q_{ref,t}: descarga observada en un tiempo t (m³/s)Q̄_{ref}: promedio de descargas observadas en el periodo de tiempo considerado (m³/s)

n: número de descargas observadas

2.2.8. Densidad de drenaje

Este parámetro nos permite determinar la capacidad de drenaje de la cuenca que podría retrasar la esorrentía. Esto depende del tipo de suelo de la cuenca. La densidad de drenaje expresa la relación entre la longitud de la cuenca y el área, de esta manera cuanto menor sea la unidad, menor será la cantidad de drenaje, pero cuanto mayor sea la unidad, mayor será la capacidad de drenaje de la cuenca. (Camino et al., 2018)

$$D_a = \frac{L}{A}$$

Donde:

D_a = Tiempo de concentración (km/ km² D) d

L = Longitud de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km² A)

Tabla 3

Densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (km/km ²)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy alta

Fuente: Delgadillo et al. (2015)

2.2.9. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el lapso que se necesita para que el agua de escorrentía de todos los puntos de la cuenca llegue de forma simultánea a la desembocadura. Este tiempo depende de la distancia que recorre el agua desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Por lo tanto, calcular el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica es fundamental para gestionar los recursos de agua y suelo, tanto para optimizar su uso como para preservarlos. (Ospina y Mancipe, 2016)

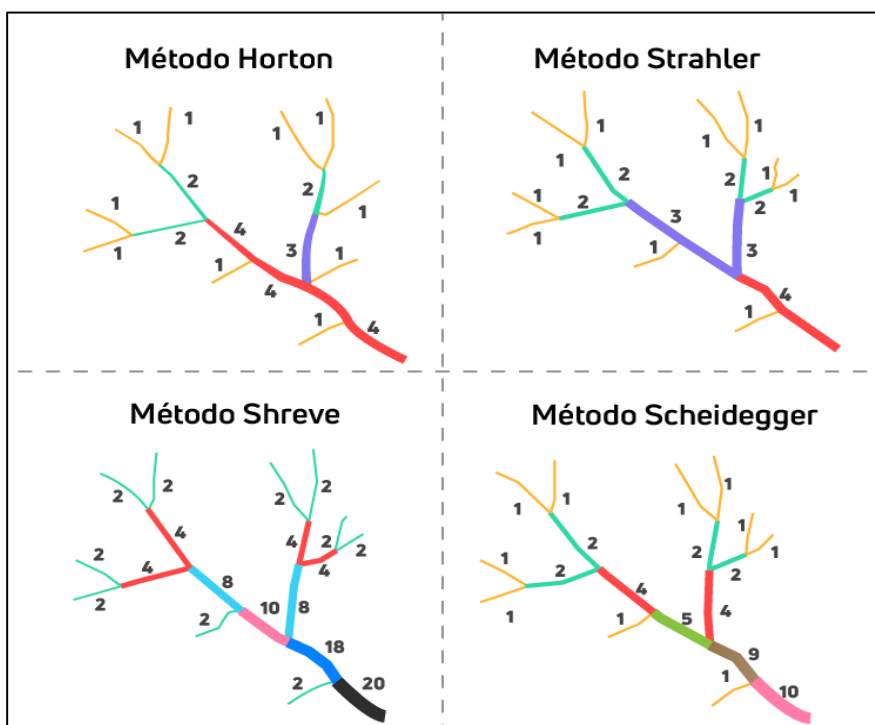
2.2.10. Orden de la red hídrica

El orden es el que divide en segmentos los cauces de diferente orden, según este orden es como se indica, lo que se entiende por un segmento de un primer orden cuando se lo encuentra establecido en uno de los extremos de la esta red hídrica, de esta manera discurren desde una fuente de nacimiento hasta la confluencia con otro. Como segundo orden se forman cuando confluyen

dos de un primer orden, seguido a ello los de tercer orden formados por la confluencia de dos del segundo orden, de esta manera sigue sucesivamente. Así mismo, si llegan a confluir dos ríos de ordenes distintos, el orden del cauce será el que resulte a presentar el mayor orden. (Raya et al., 2010)

Figura 4

Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales



Fuente: Trigo, (2013)

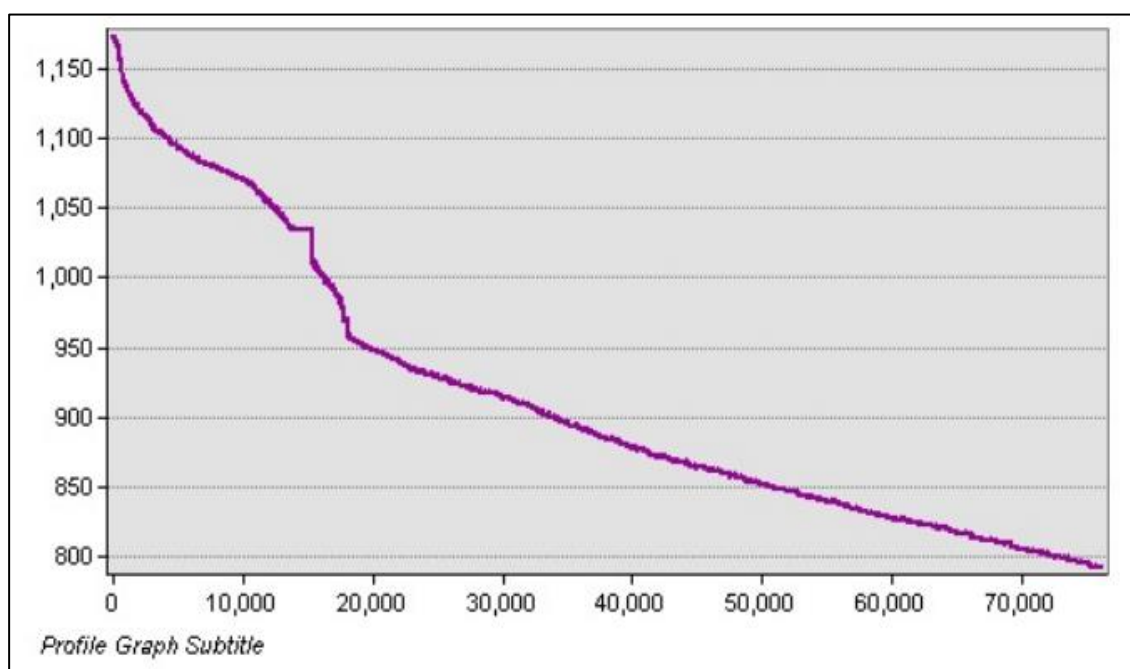
2.2.11. Perfil longitudinal del río

El perfil longitudinal de un río se representa gráficamente por la línea que traza un curso desde el nacimiento hasta su punto de salida, a lo largo del cual se pueden evaluar varias fuerzas de flujo. A mayor competencia posea el caudal mayor capacidad de erosión y transporte poseerá el escurrimiento de superficie. (Castro, 2005)

Este perfil se puede representar mediante una gráfica de la altura en un sistema de coordenadas, teniendo en el lado vertical la altura de las cotas que representa las curvas de nivel, así mismo en el lado horizontal se representa la distancia recorrida desde su nacimiento hasta su punto de desembocadura. (Ospina y Mancipe, 2016)

Figura 5

Perfil longitudinal de un río



Fuente: Sánchez (2016)

2.2.12. Pronóstico de caudales diarios

El pronóstico de caudales de ríos es útil para reducir esta incertidumbre del clima asociada a la gestión y conservación del recurso agua. Dichos pronósticos pueden ser de corto plazo, periodos de unas pocas horas o días, y de largo plazo, con tiempos de antelación de hasta nueve meses (Georgakakos y Krzysztofowicz, 2001)

2.2.13. Parámetros geomorfológicos

Estas características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica nos ayudan a comprender las características específicas de cada cuenca. Estas características o parámetros facilitan el uso de fórmulas hidrológicas, generalmente experimentales que ayudan a relacionar sus respuestas. (Loayza y Van den Berg, 2018)

2.2.14. Adecuación de modelos hidrológicos

A pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración y validación, lo que permite una mejor adecuación del modelo hidrológico. (Cabrera, 2012)

2.2.15. Calibración del modelo

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una “función objetivo”.

Este proceso puede realizarse de dos formas:

- Prueba y error: Es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basados en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje, pero es lento y subjetivo.
- Automática: Optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la

captura de valores mínimos locales. Algunos ejemplos son: técnicas de escalamiento (hill-climbing techniques), recocido simulado (simulated annealing), algoritmos genéticos, etc.

En la práctica, se sugiere aplicar el primer método para conseguir una primera aproximación y luego optimizarla utilizando una calibración automática. (Cabrera, 2012)

2.2.16. Validación de un modelo hidrológico

Es el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para periodos fuera del periodo de calibración. (Refsgaard y Knudsen, 1996)

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica tiene un sentido más amplio, la cual es una parte de la superficie terrestre donde sus aguas fluyen hacia un mismo río o lago. La sección del río a la cual se le hace referencia y que esta misma es delimitada por la línea llamada divisoria de aguas o parteaguas. Dando como resultado la suma de las cuencas hidrográficas y de todos los ríos que desembocan en un mismo mar constituye la vertiente de dicho mar. (Gámez, 2009)

2.3.2. Ciclo hidrológico

En cuanto al ciclo hidrológico se considera como el eje central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede

filtrar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa. (Chow et al., 1988)

2.3.3. Presión atmosférica

La presión atmosférica en cualquier punto está dada por la fuerza por unidad de área ejercida por la masa de la atmósfera debido a la atracción gravitacional de la tierra sobre la superficie de abajo. La presión atmosférica depende del tamaño de la columna de aire en la atmósfera, es así que a mayor altitud la presión atmosférica disminuye porque la columna de aire disminuye. (Wallace y Hobbs, 2006)

2.3.4. Hidrología

La hidrología es una ciencia natural cuyo objetivo principal es el estudio del agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, así como sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. (Gámez, 2009)

2.3.5. Temperatura

La temperatura es la cantidad de calor presente en una masa de aire en un lugar particular que se puede medir con un termómetro. Esto se debe a que la continentalidad y la latitud, por un lado, por su proximidad a grandes masas de agua y, por otro lado, en relación a la ubicación de zonas de interés con alto contenido de vapor atmosférico, tienen un efecto directo sobre la temperatura. Visto desde el eje de la tierra, el valor de la radiación solar varía notablemente mientras nos alejamos de la línea equinoccial. (López y Salgado, 2010)

2.3.6. Precipitación

Se indica que dentro del término precipitación se considera a todas las aguas meteóricas las cuales caen sobre la superficie de la tierra, tanto bajo la forma líquida como sólida (nieve,

granizo). Por ello estos tipos de precipitaciones son normalmente medidos de una forma sin efectuar su diferenciación por medio de su equivalente en agua. La precipitación es el origen de todas las corrientes superficiales y profundas, por lo cual su cuantificación y el conocimiento de su distribución, en el tiempo y en el espacio, se constituyen en problemas básicos para la hidrología. (Segerer y Villodas, 2006)

2.3.7. Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es el fenómeno combinado de pérdida de agua por transpiración y evaporación directa del agua del suelo. Esto corresponde al fenómeno físico de la transición del agua de un estado líquido a gaseoso en condiciones naturales, dependiendo de la cantidad de agua disponible para las plantas, y este proceso requiere un aporte de energía considerable. (Del Carmen, 2001)

2.3.8. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (PET) es la cantidad máxima de agua que se puede perder debido a la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas cuando el suelo tiene un contenido de humedad óptimo (capacidad de campo) y está completamente cubierto con una capa de pasto poco profunda (5 cm). Con su activo crecimiento y cuyo albedo es de alrededor del 25%. La evapotranspiración resulta ser el proceso inverso de las precipitaciones, puede determinar qué tan bien se satisfacen las necesidades de agua de un área determinada. Este fenómeno es de gran trascendencia e importancia en la planificación y desarrollo de las actividades agrícolas. (Bogarín, 2017)

2.3.9. Humedad relativa

Se define como la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de saturación a la temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa es una función de la temperatura y el

contenido de humedad. La presión parcial de vapor de agua está relacionada con la concentración de agua presente en la atmósfera por la ley de Dalton. La humedad relativa se expresa según la ecuación. Donde es el porcentaje de humedad relativa, es la presión parcial del vapor de agua, y es la presión de saturación a cierta temperatura dada. (Donald, 2009)

$$HR = \frac{p}{P_{sat}} \times 100 \%$$

2.3.10. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial es el flujo libre de agua sobre la superficie terrestre que exhibe una rápida contribución a los cursos de agua. La escorrentía del subsuelo tiene una respuesta moderada y está parcialmente saturada, mientras que la contribución del escurrimiento del subsuelo es lenta debido al flujo saturado. (Ramón, 2015)

2.3.11. Evaporación

Un fenómeno físico en el que un líquido se convierte en vapor de agua y se elimina de una superficie por evaporación. Ocurre principalmente en superficies como ríos, lagos, lagunas, suelos y vegetación húmeda. Principalmente debido al aporte de energía de la radiación solar y la temperatura del aire, se consideran, junto con la humedad relativa y la velocidad del viento, parámetros que influyen en el proceso de evaporación. (More, 2021)

2.3.12. Sistemas de información geográfica en las modelizaciones hidrológicas

Para ello, se consideran dos características que nos ayudan a comprender mejor el valor que capturan los SIG en la construcción de modelos hidrológicos. En primer lugar, son ampliamente aceptados como herramientas altamente productivas. El segundo argumento se relaciona con sus importantes contribuciones a la comprensión de los sistemas y modelos hidrológicos. Estas dos circunstancias justifican su uso en estudios hidrológicos. Tanto más cuanto

que los futuros avances en este campo dependerán de nuevas visiones y avances conceptuales. Mucho de esto se puede atribuir al uso de modelos hidrológicos en SIG. (Munir y Triviño, 2001)

2.3.13. *Producto Pisco*

SENAMHI generó esta base de Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (PISCO). Este producto cuenta con versiones diarias y mensuales, es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrestres con climatologías y productos climáticos satelitales que permiten las estimaciones de la lluvia para obtener una base de datos de alta resolución espacial ($\sim 5*5$ km) a nivel nacional los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 01/01/1981 hasta la actualidad, de esta manera facilita mayor disponibilidad de los datos de lluvia para su uso en diferentes actividades relacionadas al análisis hidrológico. En la actualidad como productos PISCO se cuenta con datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y dirección del flujo. (Aybar et al., 2017)

2.3.14. *Caudal*

Es el volumen de agua que atraviesa una superficie en un tiempo determinado.

Un caudal se calcula mediante la siguiente fórmula: $Q=V/t$, siendo Q (caudal), V (volumen) y t (tiempo). Normalmente se mide el volumen en litros y el tiempo en segundos. (Iagua, 2024)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

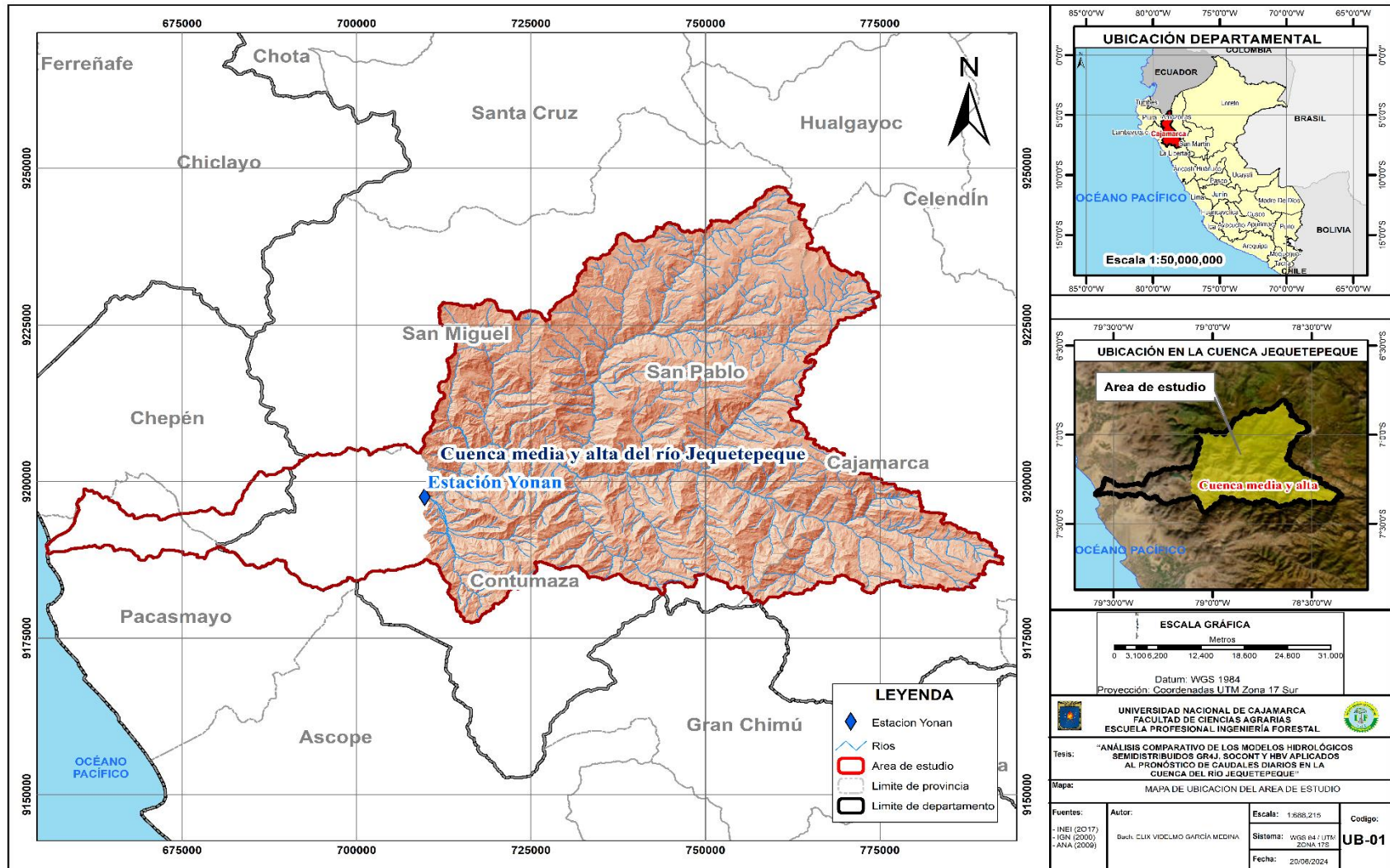
3.1. Ubicación del área de estudio

Comprende la cuenca media y alta del río Jequetepeque, aguas arriba del embalse Gallito ciego. El área de la cuenca en la cual se realizó la simulación fue delimitada utilizando el modelo digital de elevaciones (DEM) en el software Qgis y tomando como base la información de la estación hidrométrica Yonan. Esta cuenca se encuentra ubicada en el norte del Perú, hidrológicamente pertenece a la vertiente del Pacífico, abarcando parte de las provincias de Cajamarca, Contumazá, San Pablo y San Miguel. La cuenca presenta niveles altitudinales que varían desde los 437.50 msnm desde la parte media de la cuenca hacia la parte alta hasta 4203.24 msnm en el cerro Agopiti.

El río Jequetepeque realiza su recorrido en dirección de Este a Oeste en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, cuyas aguas desembocan en el Océano Pacífico. Este río hace su recorrido por los distritos de San Juan, Choropampa, Magdalena, Chilete y Tembladera.

Figura 6

Ubicación de la cuenca media y alta del río Jequetepeque



3.2. Materiales

3.2.1. Información satelital

- Precipitación (SENAMHI PISCOp v.2.1, 2001 - 2017)
- Temperatura (SENAMHI PISCOt v1.1, 2001 - 2017)
- Evapotranspiración potencial (SENAMHI PISCOEpet v1.1, 2001 - 2017)
- Caudal (SENAMHI, 2001 - 2017), obtenido de la estación hidrométrica Yonan
- Caudal (ANA, 2001 - 2017)
- DEM (Satélite Alos Palsar, con una resolución espacial de 12.5 m)

3.2.2. Información cartográfica

- Límite de cuencas hidrográficas a nivel nacional de referencia (ANA, 2009)

3.2.3. Software

- RS MINERVE
- Rstudio
- Microsoft office
- Qgis

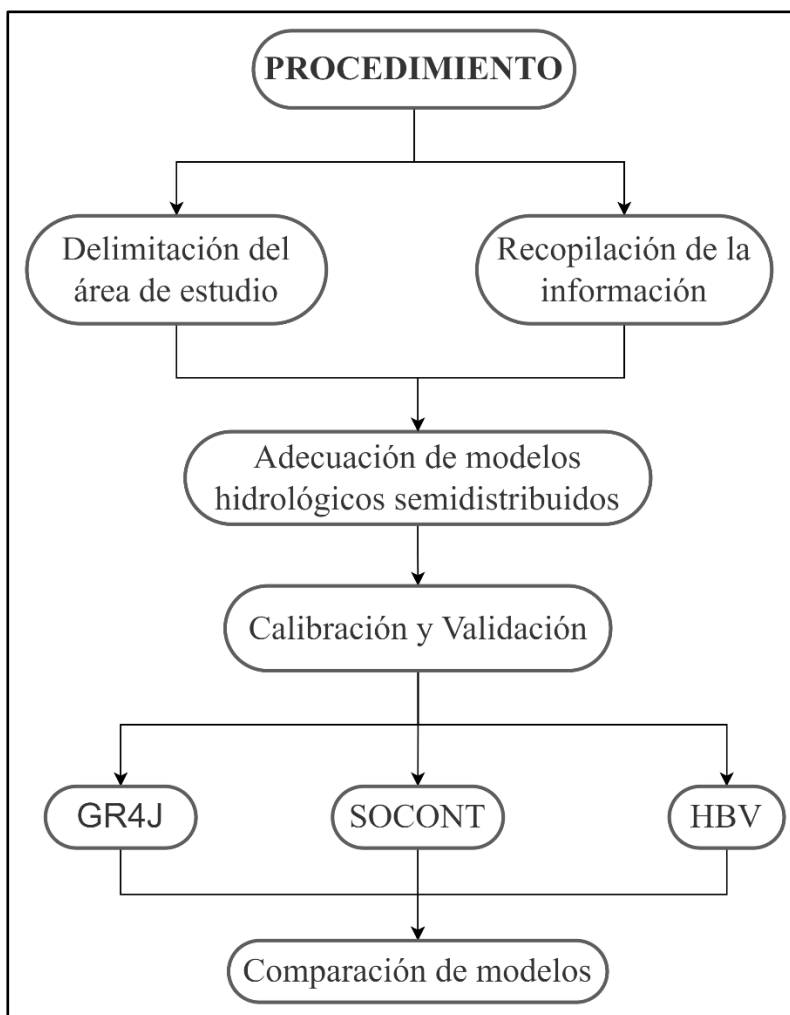
3.3. Metodología

Inicialmente se recopiló información base, el modelo digital de elevaciones (DEM), que fue obtenido del satélite Alos Palsar, con una resolución espacial de 12.5 m. El siguiente proceso fue delimitar el área de estudio, tomando como punto más bajo la ubicación de la estación hidrométrica de Yonan, ya que esta estación mide los caudales de ingreso de la cuenca media y alta del río Jequetepeque a la presa Gallito ciego. Con el área de estudio ya definida se procedió a realizar la adecuación de los modelos hidrológicos semidistribuidos, seguidamente se inicia la calibración y validación de los modelos hidrológicos GR4J, SOCONT y HBV, finalizando con la

comparación y el análisis de dichos resultados obtenidos del procesamiento de los modelos hidrológicos.

La calibración se llevó a cabo en el software RS Minerve con el algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), el algoritmo tiene como objetivo realizar la calibración automática. Los indicadores estadísticos utilizados para evaluación de cada modelo hidrológico fueron: coeficiente de Nash - Sutcliffe, coeficiente de determinación (R^2), error medio cuadrático relativo (RRMSE). Estos indicadores son utilizados como criterios para evaluar la eficiencia del modelo hidrológico. El coeficiente de Nash para evaluar la predicción de las series simuladas en modelos hidrológicos, el coeficiente de determinación (R^2) para cuantificar la intensidad de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación y el error relativo de la raíz cuadrática media (RRMSE) el cual permite evaluar el error en la aproximación de la serie simulada respecto a la observada.

La determinación de estos indicadores estadísticos es muy importante ya que son de los más usados en modelos hidrológicos porque expresa un criterio de ajuste de acuerdo al valor referencial obtenido y así mismo de acuerdo a su variabilidad se puede ir calibrando, de esta manera, se puede lograr que los resultados simulados correspondan estrechamente con los observados, optimizando el modelo para determinar cuál es el más adecuado.

Figura 7*Procedimiento de la investigación*

3.3.1. Análisis de datos

El análisis se realizó para dos grupos de datos tomando en cuenta las etapas de calibración y validación de los modelos hidrológicos GR4J, SOCONT y HBV. Para la calibración se usó el registro de los caudales del 01 de enero del 2001 al 31 de diciembre del 2012 y para la validación se consideró el registro de los caudales del 01 de enero del 2013 al 31 de diciembre del 2017; estos caudales corresponden a registros tomados en la estación hidrométrica de Yonan de la cuenca del

río Jequetepeque, punto en el cual se recepciona el caudal de la cuenca media y alta de la cuenca y que luego ingresa a la presa Gallito ciego, por ello se consideró el uso de los datos de esta estación pues se encuentra en un lugar estratégico y son imprescindibles en el presente estudio. Todos los datos de caudal obtenidos se encuentran a nivel diario.

Para el análisis de datos se utilizó el software Rstudio, donde se procesaron los estadísticos básicos, se realizó la prueba de normalidad y finalmente con la prueba de Mann Whitney se validó la hipótesis nula.

Figura 8

Código generado en el software RStudio para el análisis de datos

```

library("xlsx")
library("ggplot2")
library(readxl)
library(modeest)
library(tidyverse)
library(nortest)
setwd("C:/TESIS_ELIX")
rm(list = ls())

### Leer archivo de caudal
datos1<-read_excel('CALIBRACION.xlsx',sheet = 'Hoja1')
datos2<-read_excel('VALIDACION.xlsx',sheet = 'Hoja1')
ggplot(datos1) +
  geom_histogram(aes(x = caudal,y= 'after_stat(density)',binwidth = 1,fill = "grey"),

#Graficando histogramas
hist(datos1$Caudal),
hist(datos2$Caudal)

## Caudales para la calibracion de los modelos
#PRUEBA DE NORMALIDA - kolmorov smirnov
lillie.test(datos1$Caudal)
|
qqnorm(datos1$Caudal)
qqline(datos1$Caudal)

## Caudales para la validacion de los modelos
#PRUEBA DE NORMALIDA - kolmorov smirnov
lillie.test(datos2$Caudal)

qqnorm(datos2$Caudal)
qqline(datos2$Caudal)

## PRUEBA DE MANN WHITNEY
wilcox.test(x= (datos1$Caudal), y = (datos2$Caudal),
            alternative = "two.sided", paired = F)

```

Figura 9

Código generado en el software RStudio para determinar los estadísticos descriptivos

```
##Estadísticos descriptivos
###Caudales para calibración
media <- mean(datos1$Caudal)
print(media)

moda<- mfv(datos1$Caudal)
print(modas)

mediana <- median(datos1$Caudal)
print(mediana)

Minimo <- min(datos1$Caudal)
print(Minimo)

Maximo<- max(datos1$Caudal)
print(Maximo)

##Caudales para validación
media <- mean(datos2$Caudal)
print(media)

moda<- mfv(datos2$Caudal)
print(modas)

mediana <- median(datos2$Caudal)
print(mediana)

Minimo <- min(datos2$Caudal)
print(Minimo)

Maximo<- max(datos2$Caudal)
print(Maximo)
```

3.3.1.1. Análisis descriptivo. En este análisis se utilizaron los estadísticos básicos que nos permiten describir a la variable caudal. La media y mediana tienen valores similares para el conjunto de caudales usados en la calibración y validación, de igual manera sucede con los valores mínimos y máximos, tomando en cuenta que los caudales

máximos han disminuido para los años 2013 al 2017 pero esta diferencia no es muy notoria.

Respecto al valor de la moda también se obtuvo un ligero aumento de caudal de 0.14 m³/s a 0.33-0.34 m³/s que son los caudales más frecuentes para los periodos en estudio.

Figura 10

Estadísticos descriptivos

Estadístico	Caudales - periodo de calibración	Caudales - periodo de validación
	2001-2012	2013-2017
media	24.74	23.67
mediana	7.71	7.98
moda	0.14	0.33 - 0.34
Mínimo	0.09	0.17
Máximo	325.11	306.21

3.3.1.2. Análisis inferencial. En este análisis se ha considerado realizar las pruebas de normalidad y posteriormente las pruebas de correlación.

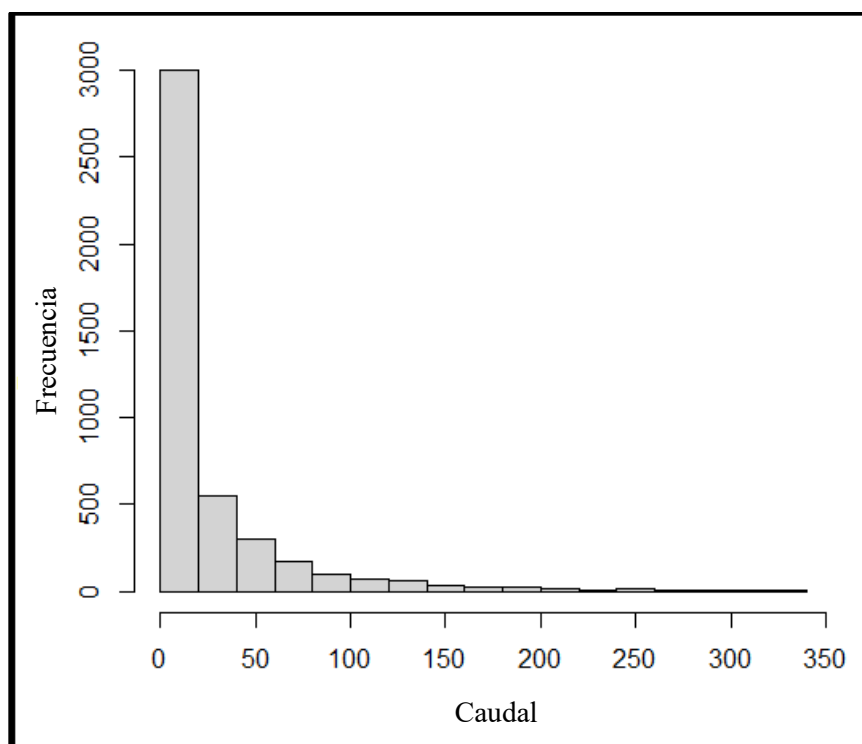
3.3.1.2.1. Prueba de normalidad - Kolmogorov Smirnov

Esta prueba se ejecutó para determinar si es que los valores de caudal tanto para el periodo de calibración (2001-2012) y validación (2013-2017) cuentan con una distribución normal. La prueba a usar corresponde a Kolmogorov Smirnov, pues la cantidad de muestras con la que se cuenta es mayor a 50 datos.

La significancia obtenida para los datos de caudal usados en la calibración y validación de los modelos es menor al 0.05, es por ello se deduce que los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 4*Prueba de normalidad*

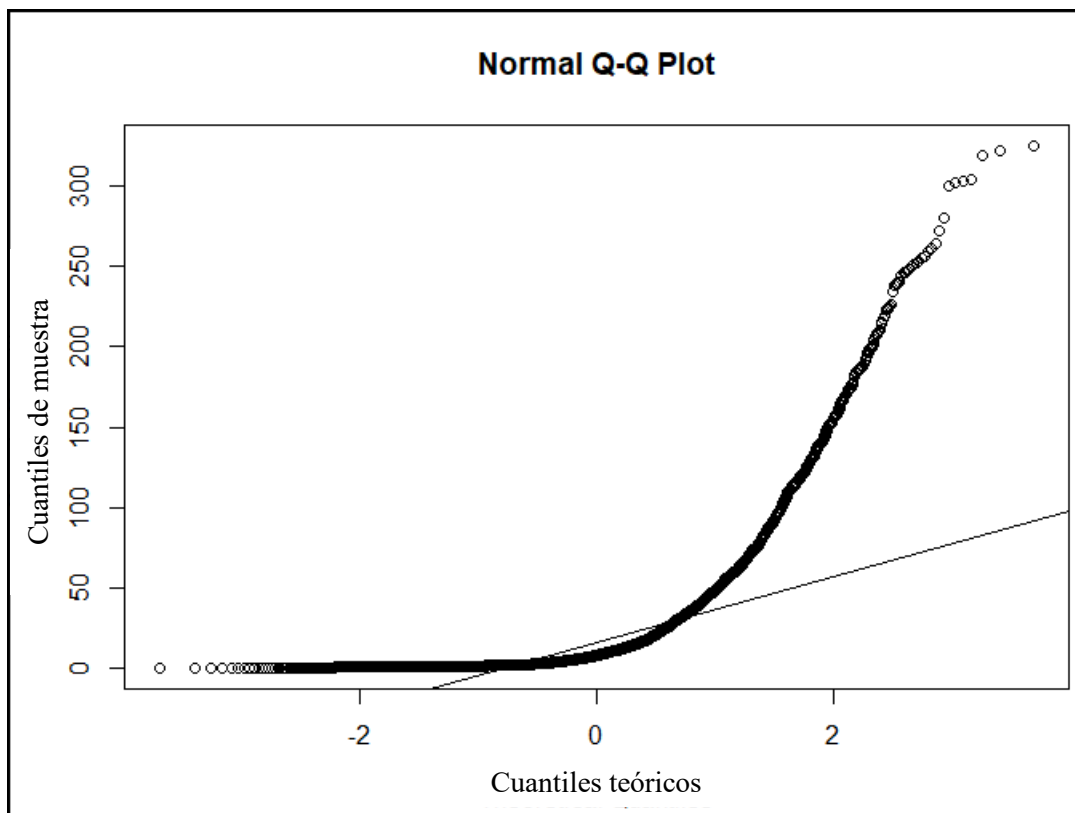
	Kolmogorov-Smirnov	
	Estadístico	Sig.
Caudales (2001-2012)	0.27408	2.2e-16
Caudales (2013-2017)	0.27662	2.2e-16

Figura 11*Caudal de calibración (2001-2012)*

El histograma muestra que la distribución de caudales para los años 2001-2012 no tiene una distribución normal y los caudales más frecuentes se encuentran entre los 0 y 35 m³/s

Figura 12

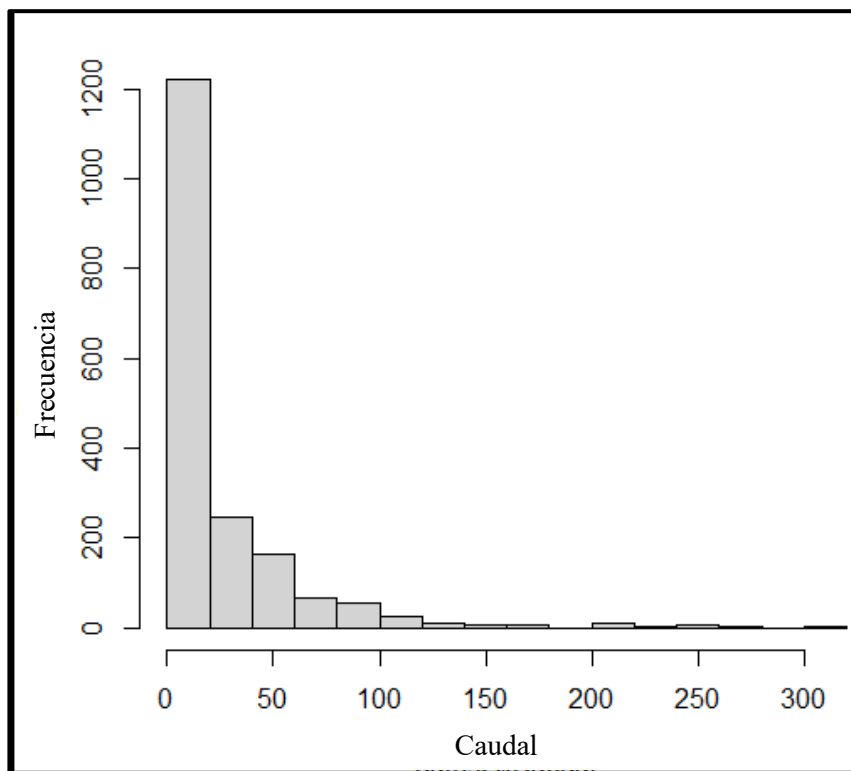
Caudal de calibración (2001-2012)



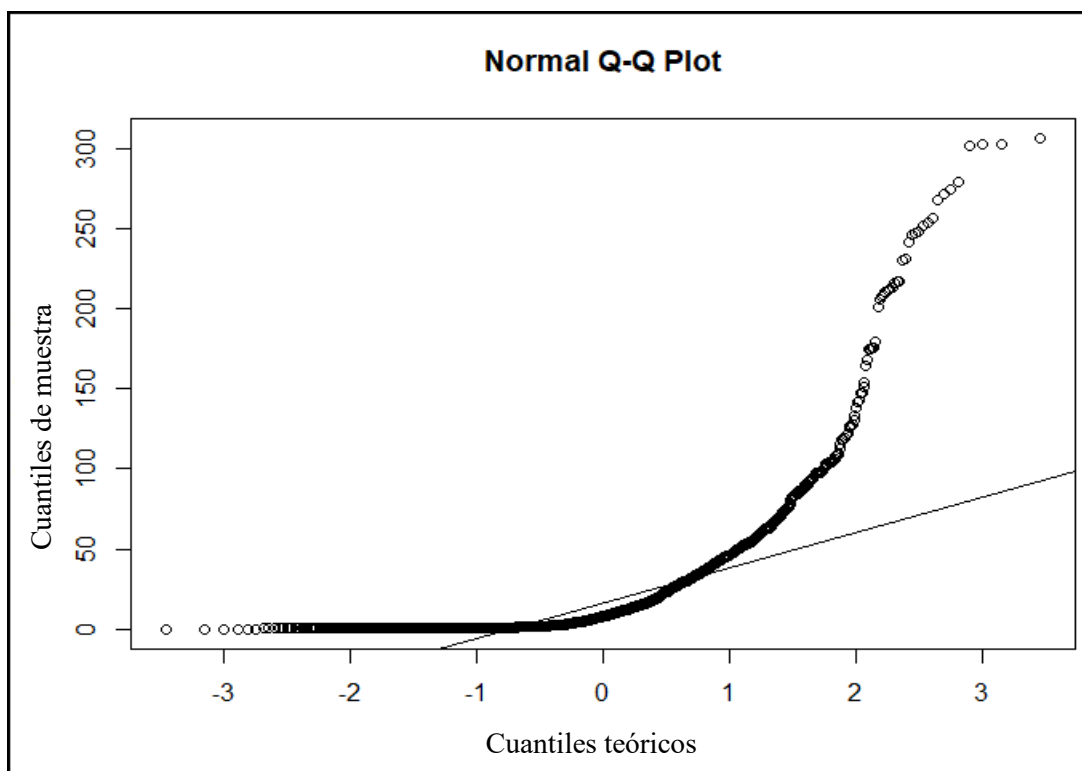
La distribución de los datos de caudal junto con el trazo de la línea de tendencia muestra que no se sigue una distribución normal.

Figura 13

Caudal de validación (2013-2017)



El histograma muestra que la distribución de caudales para los años 2013-2017 no tiene una distribución normal y los caudales más frecuentes se encuentran entre los 0 y 50 m³/s

Figura 14*Caudal de validación (2013-2017)*

La distribución de los datos de caudal junto con el trazo de la línea de tendencia muestra que no se sigue una distribución normal.

3.3.1.2.2. Prueba de Mann-Whitney

Es una prueba realizada para datos no paramétricos que no siguen una distribución normal en este estudio para caudales usados en la calibración y validación de los modelos con la finalidad de contrastar si los dos grupos de caudal son equivalentes en su posición.

Esta prueba obtuvo un valor de significancia de 0.05126, el cual es ligeramente mayor al 0.05 que es el valor mínimo. Con el valor de la significancia aceptable se puede decir que ambos grupos de datos son equivalentes y no existen diferencias entre los niveles de caudales, es así que pueden ser usados de manera confiable en la calibración y validación de los modelos de simulación hidrológica para el pronóstico de caudales diarios.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la relación de la dimensión adecuación de modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque

Se presenta la adecuación de los modelos para el enfoque de modelamiento hidrológico semidistribuido propuesto para el área de estudio, así como los criterios y consideraciones propuestos para el proceso de calibración y validación para la comparación de cada modelo.

El proceso de calibración y validación para los modelos hidrológicos semidistribuidos, se realizó con la finalidad de comparar el desempeño de cada uno de los modelos propuestos, empleando indicadores estadísticos de eficiencia, para determinar el modelo más óptimo que permita simular los caudales diarios. (Rodríguez y Rodríguez, 2020). Estos procesos de calibración y validación fueron realizados en software RS MINERVE que según Guaman (2020) y Camones (2015) cumplen el objetivo de confiabilidad y también esto es acorde en el presente estudio.

Tabla 5

Periodo de calibración y validación considerados en la adecuación de modelos

Estación hidrométrica	Calibración		Validación	
	Inicio	Final	Inicio	Final
Yonan	Ene – 2001	Dic - 2012	Ene - 2013	Dic - 2017

4.1.1. Modelo semidistribuido GR4J

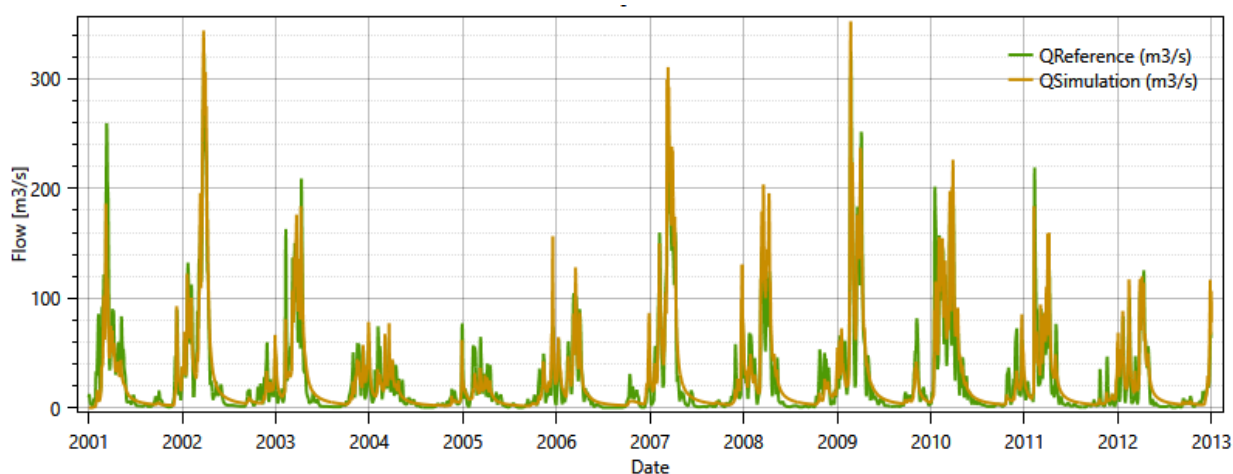
Las variables de entrada para el modelo GR4J es la precipitación y la evapotranspiración potencial a nivel diario, con lo cual se generó series de caudales.

4.1.1.1. Calibración

Se obtuvo el hidrograma de caudales en el periodo de calibración para los años 2001-2012. El modelo muestra un buen ajuste de los datos, teniendo picos elevados en los años 2002, 2007 y 2009 (en estos años se tiene una mayor disponibilidad hídrica en la cuenca) tanto para los caudales de referencia como para los simulados.

Figura 15

Calibración del modelo GR4J (2001-2012)



Los caudales de referencia de los años 2001-2012 tienen un comportamiento similar con los caudales simulados en el software RS Minerve. Se obtuvo también los indicadores estadísticos, el cual muestra un valor de Nash > 0.829 que es considerado como un valor excelente y la relación del error medio cuadrático relativo (RRMSE) tiene un valor de 0.685 considera un error adecuado, lo que sugiere que el modelo tiene un error relativo aceptable, esto guarda relación con lo mencionado por (Feyen et al., 2000), también concuerda con (Astorayme et al., 2015) pues muestran que el valor de Nash incluye en la eficiencia del modelo. Pues muestran que cuando el valor de Nash se incrementa cercano a 1 influye de manera positiva en la eficiencia del modelo;

ambos autores mostraron que los valores estadísticos son los que permiten decidir si es que debe ser usado o no en la etapa de calibración.

Tabla 6

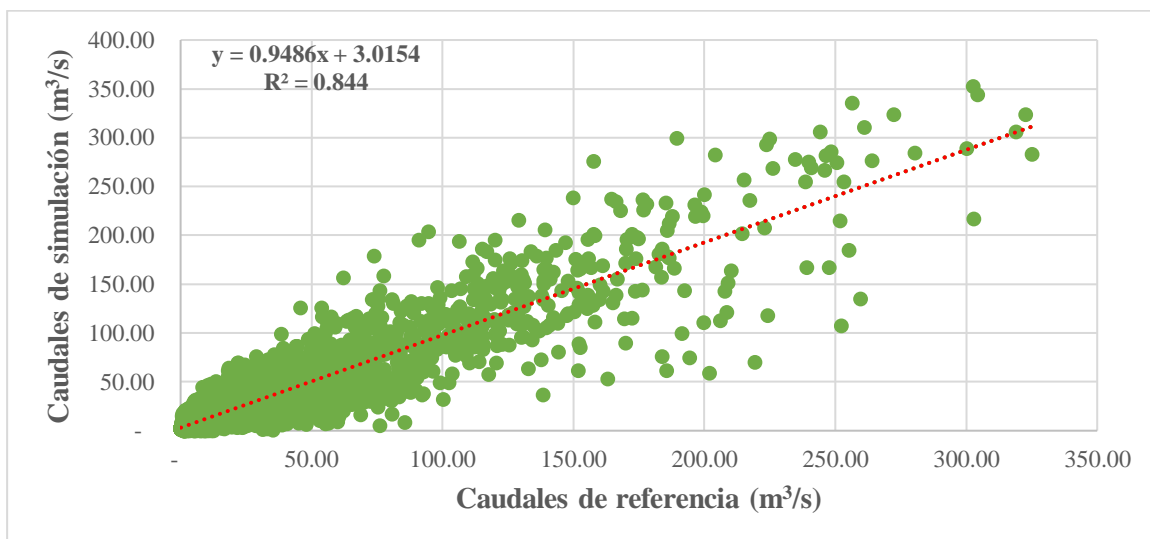
Indicadores de eficiencia, modelo GR4J luego del proceso de calibración

Modelo GR4J	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Calibración
	Enero 2001 – diciembre 2012
Nash-Sutcliffe	0.829
R ²	0.844
RRMSE	0.685

Para una mejor visualización del comportamiento de los caudales de referencia y los caudales simulados se obtuvo el diagrama de dispersión de los datos, donde se ratifica el valor de la correlación lineal para la etapa de calibración con un valor de 0.844 (confiabilidad superior al 80%), el cual es un valor de ajuste muy bueno y se considera que el modelo tiene buena precisión.

Figura 16

Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de calibración - modelo GR4J (01/01/2001 - 31/12/2012)



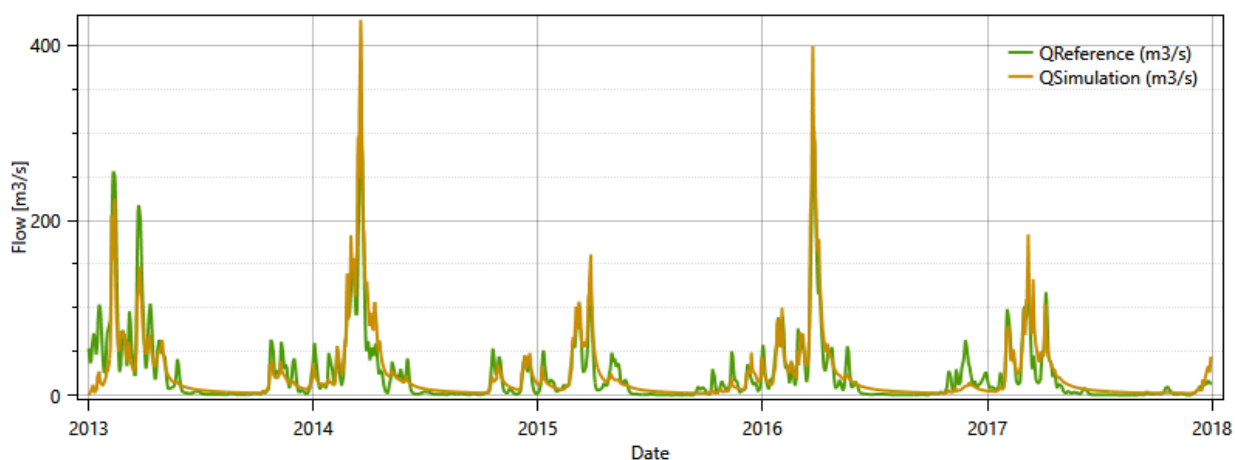
Se muestra la dispersión de los caudales de referencia en comparación a los simulados para la calibración del modelo GR4J. En la figura indica que mientras menor sea el caudal existe mayor correlación, por ende, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Los caudales entre 0 y 150 m³/s son los que más se ajustan a línea de tendencia y los más correlacionados y frecuentes, mientras que los caudales de mayor intensidad por ser ocasionales no se encuentran muy correlacionados; sin embargo, en su conjunto el valor del R² es muy bueno. (Rodríguez y Rodríguez, 2020)

4.1.1.2. Validación

Se obtuvo el hidrograma de caudales para el periodo de validación de los años 2013-2017. El modelo muestra un buen ajuste de los datos, teniendo picos elevados en los años 2014, y 2016 (en estos años se tiene una mayor disponibilidad hídrica en la cuenca) tanto para los caudales de referencia como para los simulados.

Figura 17

Validación del modelo GR4J (2013-2017)



Los caudales de referencia de los años 2013-2017 tienen un comportamiento similar con los caudales simulados en el software RS Minerve. En los periodos donde el caudal diario tiene un valor promedio se observan ligeras variaciones.

Los valores estadísticos de eficiencia para el periodo de validación son un valor de Nash > 0.777 lo cual es considerado un valor muy bueno, siendo que el valor óptimo es 1, el resultado obtenido para este modelo es muy eficiente, la relación del error cuadrático medio (RRMSE) tiene un valor de 0.790 considerado un error adecuado. (Feyen et al., 2000)

Este proceso muestra que el modelo presenta un menor ajuste, teniendo una menor eficiencia de Nash y un ligero aumento del error cuadrático medio. Sin embargo, estadísticamente el modelo responde aceptablemente y concuerda con lo mencionado por (Astorayme et al., 2015) pues el valor de Nash influye en la eficiencia del modelo, pero en esta ocasión la disminución de este valor es mínimo que no genera una diferencia marcada y por el contrario el modelo es aceptable.

Tabla 7

Indicadores de eficiencia, modelo GR4J luego del proceso de validación

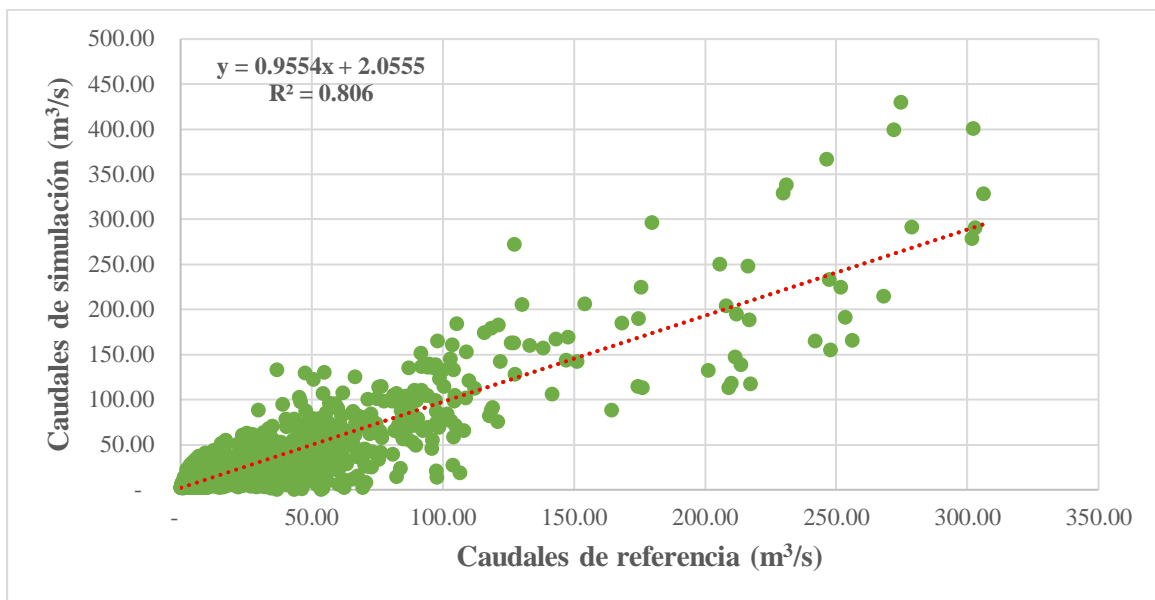
Modelo GR4J	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Validación
	Enero 2013 – diciembre 2017
Nash-Sutcliffe	0.777
R ²	0.806
RRMSE	0.790

El diagrama de dispersión de caudales de referencia y los simulados para el periodo de validación indica que el coeficiente de determinación R² tiene un valor 0.806 (confiabilidad al 80%) este valor es considerado muy bueno, siendo el valor óptimo 1, se deduce que, si existe correlación de los datos, sin embargo, tomando en cuenta el valor obtenido en la etapa de calibración ha tenido una ligera disminución.

Figura 18

Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de validación - modelo GR4J

(01/01/2013 - 31/12/2017)



Se muestra la dispersión de los caudales de referencia comparado con los simulados para la validación del modelo GR4J. La figura indica que mientras menor sea el caudal (valores más cercanos a 1) existe mayor correlación, por ende, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Los caudales entre 0 y 100 m³/s son los que más se ajustan a línea de tendencia y los más correlacionados y frecuentes, mientras que los caudales de mayor intensidad por ser ocasionales no se encuentran muy correlacionados; sin embargo, en su conjunto el valor del R² es muy bueno. (Rodríguez y Rodríguez, 2020)

4.1.2. Modelo semidistribuido SOCONT

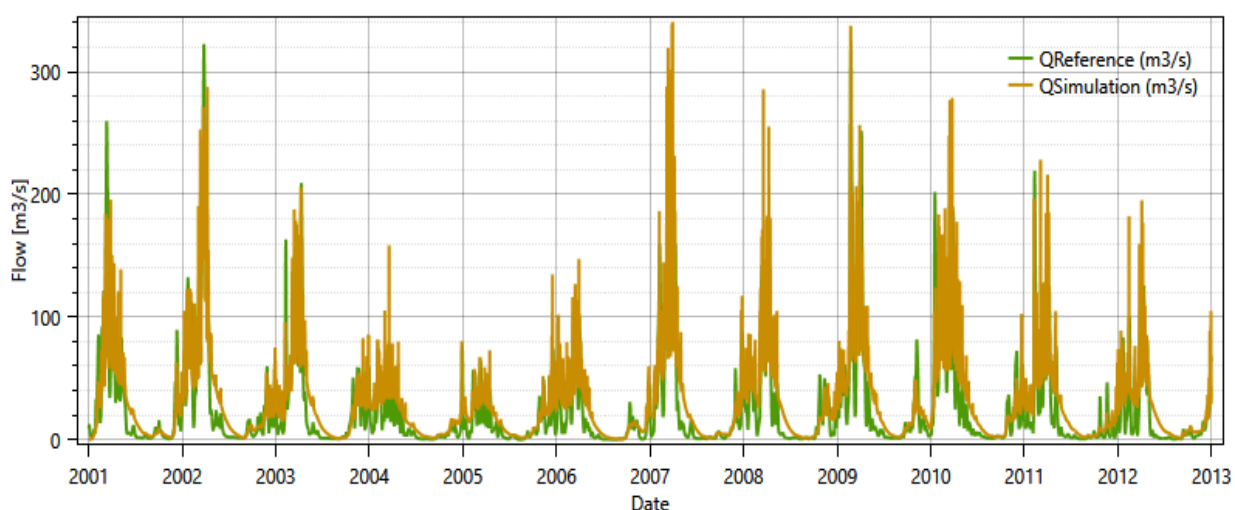
Para este modelo hidrológico se tiene como variables de entrada la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración a nivel diario para la generación de caudales.

4.1.2.1. Calibración

Se obtuvo el hidrograma de caudales en el periodo de calibración para los años 2001-2012. El modelo muestra una sobre estimación, siendo notorio para los años 2007, 2008 y 2010 (en estos años se tiene una mayor disponibilidad hídrica en la cuenca) con valores pico de caudal un tanto elevados, mostrando así que el modelo tiene una tendencia baja en el pronóstico de los caudales diarios.

Figura 19

Calibración del modelo SOCONT



Los caudales simulados para los años 2001-2012 tienen valores más elevados respecto a los de referencia, sin embargo, su comportamiento de crecidas y disminución de caudal es similar.

Los indicadores estadísticos obtenidos muestran una eficiencia en el valor Nash > 0.562 . por lo cual se considera un valor bueno (aceptable para este modelo) y la relación del error medio cuadrático relativo (RRMSE) tiene un valor de 1.097 considera un error alto pues sobrepasa el valor 1 (tope) según indica el autor. (Feyen et al., 2000). Con estos valores obtenidos, la eficiencia del modelo disminuye para el periodo de calibración. Según (Astorayme et al., 2015) este modelo SOCONT también obtuvo un bajo valor de Nash para su cuenca en estudio y esto concuerda con

lo encontrado para el presente estudio pues a pesar que el valor de Nash es aceptable, todavía se presenta un valor alto de error por el actual no es adecuado para la etapa de calibración.

Tabla 8

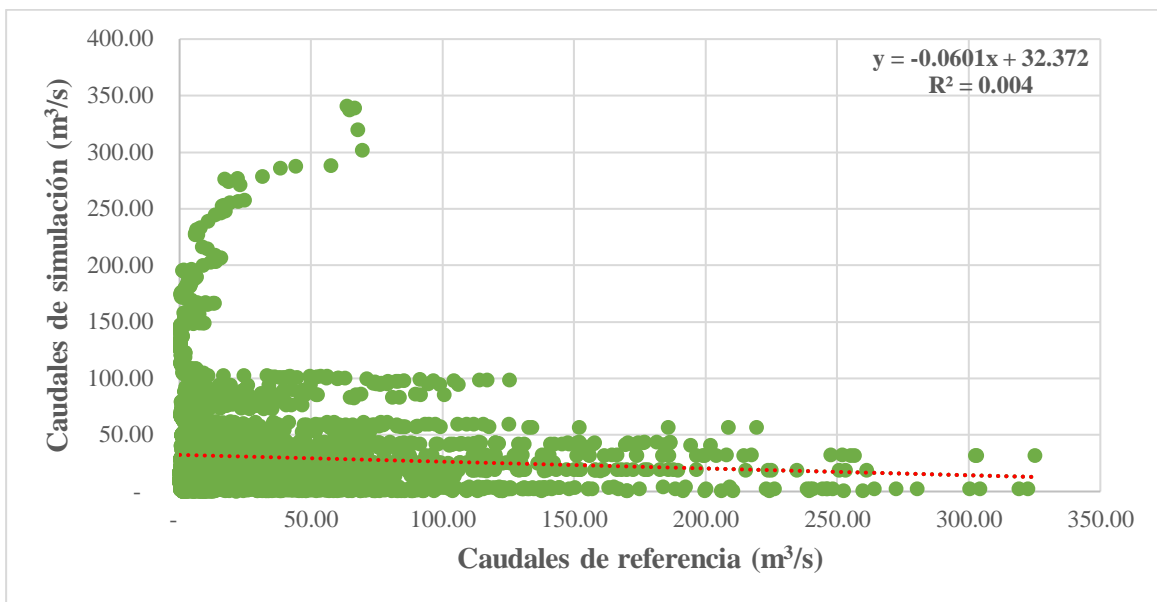
Indicadores de eficiencia, modelo SOCONT luego del proceso de calibración

Modelo SOCONT	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Calibración
	Enero 2001 – diciembre 2012
Nash-Sutcliffe	0.562
R ²	0.004
RRMSE	1.097

Para una mejor visualización del comportamiento de los caudales de referencia y los simulados se obtuvo el diagrama de dispersión de los datos, donde se ratifica el valor de la correlación lineal para la etapa de calibración con 0.004 (este valor también fue obtenido en el software RS Minerve), el cual es un valor de ajuste muy bajo (menor al 1% de confiabilidad) y se considera que el modelo no tiene buena precisión en el pronóstico de caudales diarios.

Figura 20

*Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de calibración - modelo SOCONT
(01/01/2001 - 31/12/2012)*



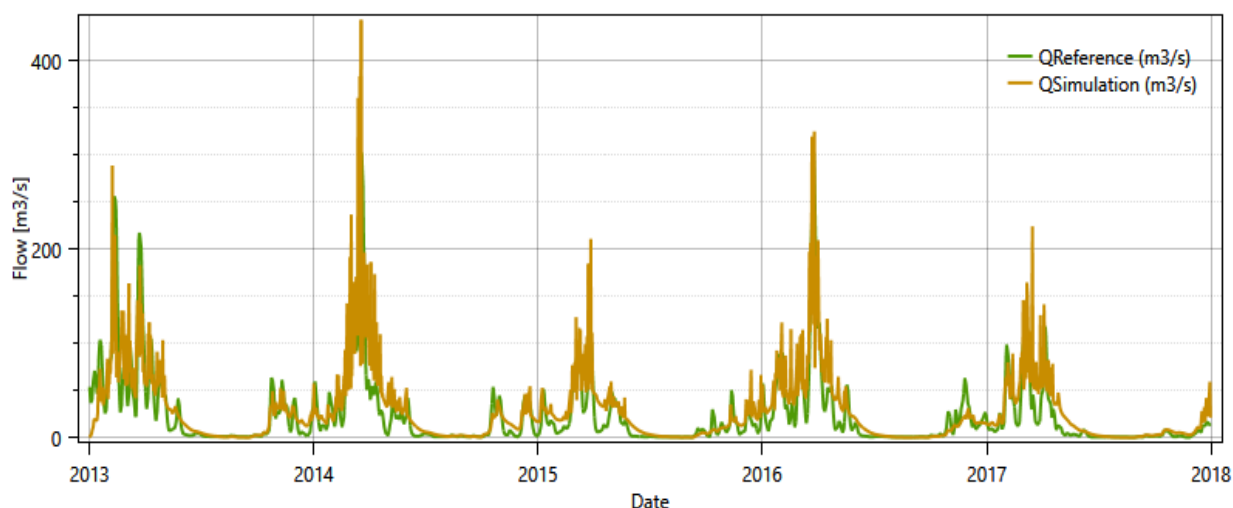
Se muestra la dispersión de los caudales de referencia comparado frente a los caudales simulados para la calibración del modelo SOCONT. La figura indica que mientras menor sea el caudal existe mayor correlación, por ende, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Sin embargo, para los caudales entre 0 y 100 m³/s que son los que más se ajustan a línea de tendencia y los más correlacionados, el modelo ha generado valores atípicos con valores de caudal diarios que superan los 200 m³/s, esto conlleva a que el valor del R² sea muy bajo y por ende el modelo no es confiable. Estos resultados obtenidos no concuerdan con Astorayme et al., (2015) ya que en su estudio menciona que este modelo es más confiable en épocas de avenida, a diferencia que en la presente investigación se hace el modelado para caudales diarios sin discriminar la estación de avenida o estiaje.

4.1.2.2. Validación

En una primera visualización del comportamiento de los datos se generó el histograma que muestra los caudales de referencia y los caudales de simulación. Al igual que en el periodo de calibración se observa que los datos validados tienen un desajuste y presenta un nivel bajo en la simulación con respecto a los caudales de referencia mostrando sobreestimación en los años 2014 y 2016.

Figura 21

Validación del modelo SOCONT



Los caudales simulados para los años 2014-2016 tienen valores más elevados respecto a los de referencia. El comportamiento de crecidas y disminución de caudal en general es un tanto superior en todo el periodo de análisis.

Los indicadores estadísticos de eficiencia, muestran que los valores de Nash son > 0.564 , lo cual lo considera un valor bueno y la relación del error medio cuadrático relativo (RRMSE) tiene un valor de 1.105, el cual supera a la unidad como valor máximo permitido (valor óptimo). (Feyen et al., 2000)

Estos valores indican que el modelo no está siendo ajustable para el pronóstico de caudales diarios, al presentar índices de errores altos en el error medio cuadrático y bajos valores en el coeficiente de Nash, lo obtenido del análisis concuerda con lo que menciona (Astorayme et al., 2015) pues se considera que el modelo presenta valores altos de error y lo obtenido para Nash no es suficiente para ser considerado como un modelo adecuado para la etapa de validación de caudales.

Tabla 9

Indicadores de eficiencia, modelo SOCONT luego del proceso de validación

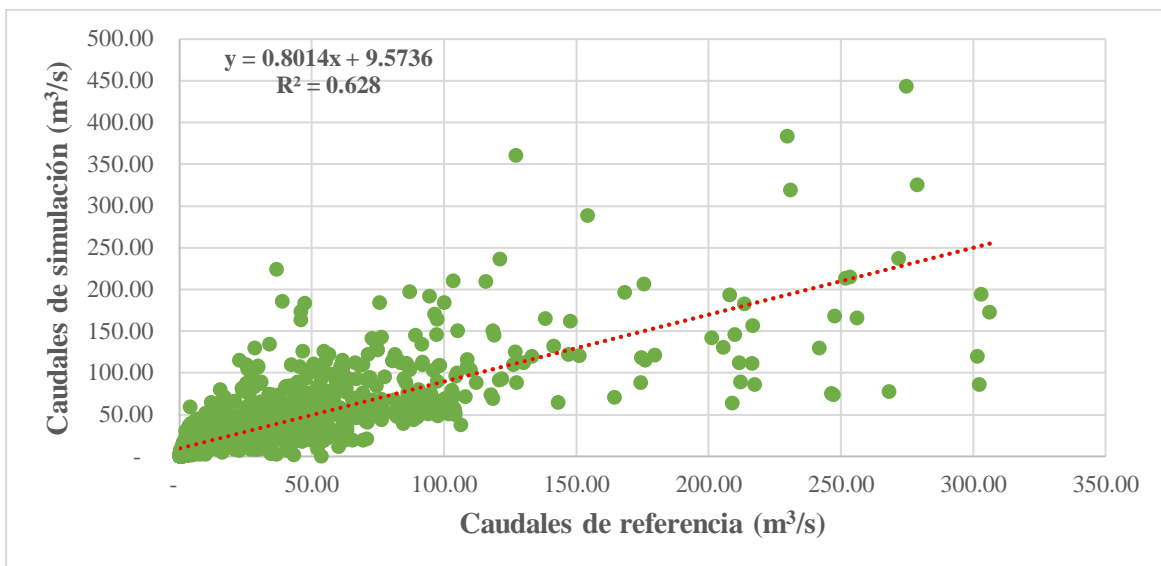
Modelo SOCONT	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Validación
	Enero 2013 – diciembre 2017
Nash-Sutcliffe	0.564
R^2	0.628
RRMSE	1.105

Para una mejor visualización del comportamiento de los caudales de referencia y los simulados se obtuvo el diagrama de dispersión de los datos, donde se ratifica el valor de la correlación lineal para la etapa de validación con 0.628 (este valor también fue obtenido en el software RS Minerve), el cual es un valor de ajuste bajo y se considera que el modelo tiene una confiabilidad del 60%, es decir no tiene buena precisión en el pronóstico de caudales diarios. (Guaman, 2020)

Figura 22

Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de validación - modelo SOCONT

(01/01/2013 - 31/12/2017)



En la figura 22 se muestra la dispersión de los caudales de referencia en comparación a los caudales simulados para la calibración del modelo SOCONT. La figura indica que mientras menor sea el caudal existe mayor correlación, por ende, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Para los caudales entre 0 y 100 m³/s que son los que más se ajustan a línea de tendencia y los más correlacionados, sin embargo, todavía se presentan algunos valores atípicos de caudales elevados por ello que el valor del R² termina siendo todavía bajo. (Astoraime et al., 2015)

4.1.3. Modelo semidistribuido HBV

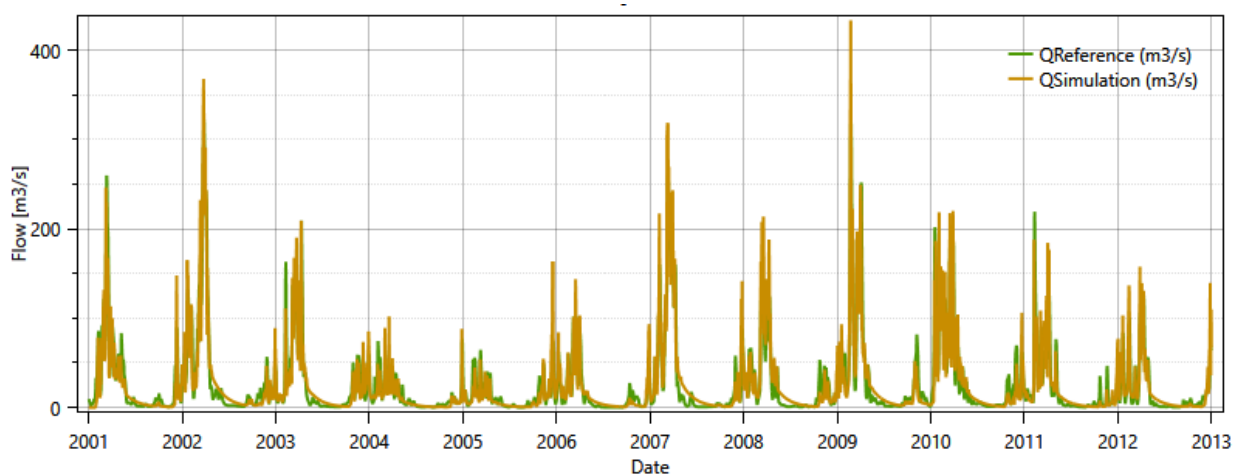
El modelo HBV se estimó a partir de las variables de entrada, los cuales son la precipitación, temperatura y evapotranspiración.

4.1.3.1. Calibración

Se obtuvo el hidrograma de caudales en el periodo de calibración para los años 2001-2012. El modelo presenta un ajuste muy aceptable, donde los caudales de referencia con los simulados tienen una buena similitud, se aprecia también que, en los años 2002, 2007 y 2009 hubo picos de caudal (años con mayor disponibilidad hídrica en la cuneca) y estos valores son similares para el caudal de referencia como para el simulado.

Figura 23

Calibración del modelo HBV



Los caudales de referencia y simulados tienen un comportamiento similar. Se obtuvieron los indicadores estadísticos de eficiencia, donde el valor de Nash es > 0.819 , lo cual es considerado como un valor excelente y la relación del error medio cuadrático relativo (RRMSE) tiene un valor de 0.704, considerándose un error permisible. (Feyen et al., 2000). Con estos datos estadísticos se puede decir el modelo semidistribuido HBV para la etapa de calibración puede realizar el pronóstico de caudales diarios de manera óptima, esto concuerda con (Astorayme et al., 2015) pues en su estudio también se utilizó este modelo en la etapa de validación obtenido valores muy buenos para Nash, el cual influye en la eficiencia del modelo.

Tabla 10

Indicadores de eficiencia, modelo HBV luego del proceso de calibración

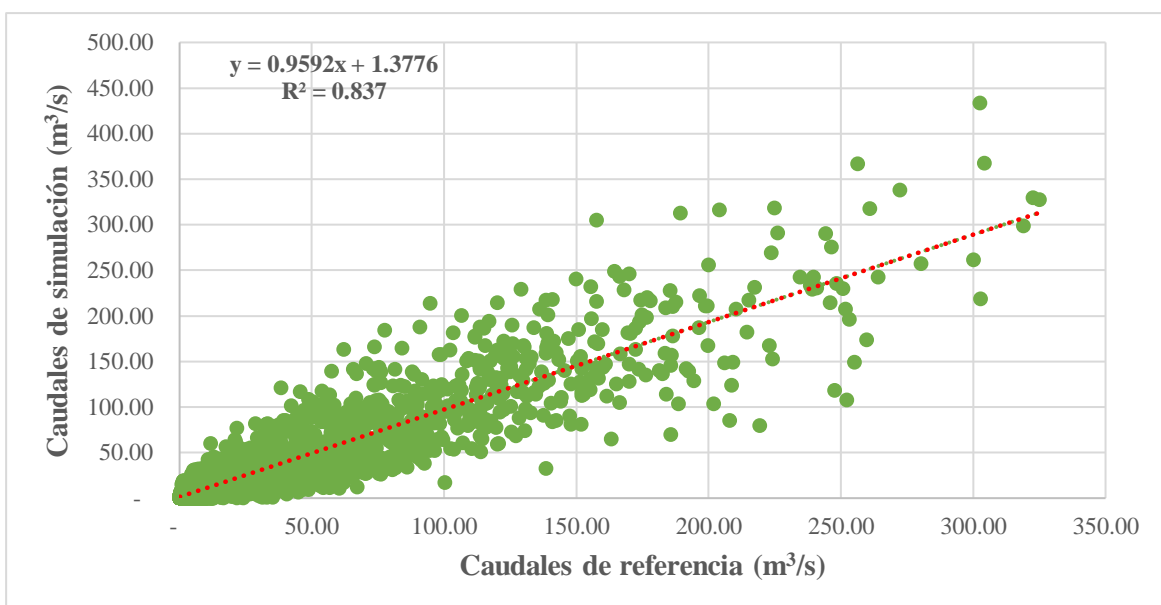
Modelo HBV	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Calibración
	Enero 2001 – diciembre 2012
Nash-Sutcliffe	0.819
R ²	0.837
RRMSE	0.704

La correlación lineal existente para el periodo de calibración del modelo, entre el caudal de referencia y el caudal de simulación, muestra que el coeficiente de determinación R² de 0.837 reafirmando el valor obtenido al realizar la calibración en el software RS Minerve, este un valor de ajuste muy bueno que indica una confiabilidad superior al 80% del modelo HBV para predecir los caudales diarios. (Guaman, 2020)

Figura 24

Dispersión de caudales observados y simulados en la etapa de calibración - modelo HBV

(01/01/2001 - 31/12/2012)



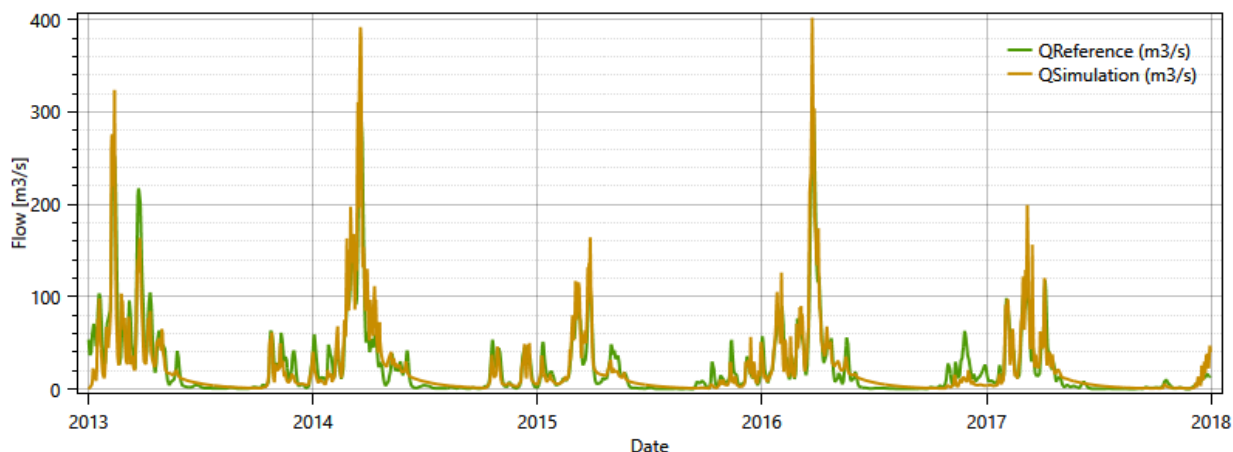
Se muestra la dispersión de los caudales de referencia en contraste con los simulados para la calibración del modelo HBV. La figura indica que mientras menor sea el caudal existe mayor correlación, por ende, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Los caudales que más se ajustan se encuentran entre los 0 y 150 m³/s y son los más correlacionados y frecuentes, mientras que los caudales de mayor intensidad por ser ocasionales no se encuentran muy correlacionados; sin embargo, en su conjunto el valor del R² es muy bueno. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por (Astorayme et al., 2015) quien considera al modelo HBV simulan mejor los caudales, esto podría deberse a que utilizan un mayor número de parámetros.

4.1.3.2. Validación

Se obtuvo el hidrograma de caudales en el periodo de validación para los años 2013-2017. El modelo presenta un ajuste muy aceptable, donde los caudales de referencia con los simulados tienen una buena similitud, se aprecia también que, en los años 2014 y 2016 hubo picos de caudal (años con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca) y estos valores son similares para el caudal de referencia como para el simulado.

Figura 25

Validación del modelo HBV



Los caudales de referencia y simulados tienen un comportamiento similar. Además, los indicadores estadísticos de eficiencia obtenidos son el valor de Nash > 0.810 lo cual lo considera un valor excelente y la relación del error medio cuadrático relativo (RRMSE) tiene un valor de 0.728 considera un error permisible. (Feyen et al., 2000). Con estos datos estadísticos se puede decir el modelo semidistribuido HBV para la etapa de validación, puede realizar el pronóstico de caudales diarios de manera óptima. Estos resultados concuerdan con (Astorayme et al., 2015) pues consideran al modelo HBV como aquel que tiene una mayor eficiencia en el pronóstico de caudales que debe ser tomado en cuenta tanto en las etapas de calibración y validación.

Tabla 11

Indicadores de eficiencia, modelo HBV luego del proceso de validación

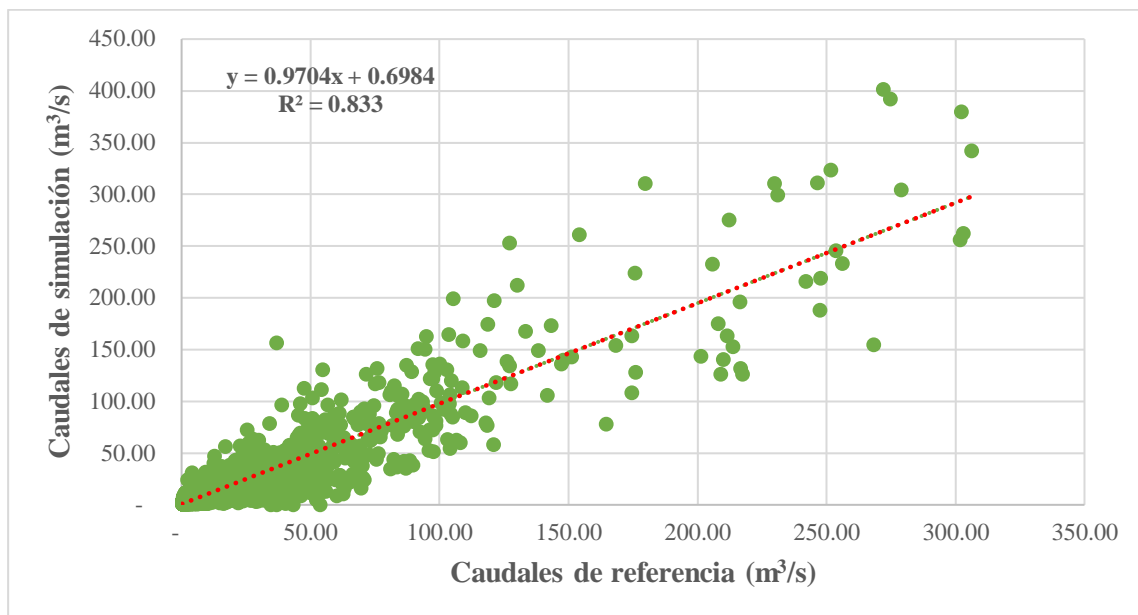
Modelo HBV	Modelo semidistribuido
Estadísticos	Validación
	Enero 2013 – diciembre 2017
Nash-Sutcliffe	0.810
R^2	0.833
RRMSE	0.728

La correlación lineal para el periodo de validación del modelo HBV, muestra que el coeficiente de determinación R^2 es de 0.833, el cual reafirma el valor obtenido al realizar la validación en el software RS Minerve, indica una confiabilidad superior al 80% del modelo HBV para predecir los caudales diarios. (Guaman, 2020)

Figura 26

Dispersión de caudales de referencia y simulados en la etapa de validación - modelo HBV

(01/01/2013 - 31/12/2017)



Se muestra la dispersión de los caudales de referencia comparado a los simulados para la calibración del modelo HBV. La figura indica que mientras menor sea el caudal existe mayor correlación, por consiguiente, los valores se ajustan mejor a la línea de tendencia. La ecuación que representa a esta línea de tendencia es de orden lineal. Los caudales que más se ajustan se encuentran entre los 0 y 100 m³/s., sin los más correlacionados y frecuentes, mientras que los caudales de mayor intensidad por ser ocasionales no se encuentran muy correlacionados; sin embargo, en su conjunto el valor del R^2 es muy bueno. (Astorayme et al., 2015)

4.2. Determinación de la relación de la dimensión modelo hidrológico más representativo con el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque

Para obtener el modelo hidrológico más representativo en el pronóstico de caudales diarios del río Jequetepeque en su cuenca media y alta se realizaron las comparaciones de los tres modelos hidrológicos semidistribuidos calibrados y validados de acuerdo a sus indicadores estadísticos y de eficiencia.

Los modelos hidrológicos simulados GR4J, SOCONT y HBV presentan un comportamiento aceptable siendo la salida de caudales similares a los empleados que se tiene como referencia. De los cual se deduce que, en la etapa de calibración, el modelo que más se ajusta para la simulación y el pronóstico de caudales diarios viene a ser el modelo hidrológico semidistribuido GR4J, presentando un valor de Nash 0.829 estando en un rango excelente, de acuerdo a este valor mientras más cercano sea a la unidad será de mejor excelencia. Por otro lado, presentando un error medio cuadrático relativo (RMMSE) de 0.685 es considerado como un valor aceptable, siendo el que se presenta con menor error en comparación a los demás.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente se deduce que el modelo hidrológico GR4J es el que presenta la mejor simulación de caudales diarios para el periodo de calibración (2001-2012).

Tabla 12

Análisis comparativo de parámetros estadísticos de calibración de los modelos simulados

Calibración 01/01/2001 – 31/12/2012	GR4J	SOCONT	HBV
Nash-Sutcliffe	0.829	0.562	0.819
R ²	0.844	0.004	0.837
RRMSE	0.685	1.09	0.704

El modelo hidrológico GR4J es el más representativo, pues presenta los mayores valores para Nash-Sutcliffe y R^2 que lo califican como excelente (confiabilidad mayor al 80%) y RRMSE con el menor valor que indica que tiene menos errores en la simulación de caudales diarios.

Respecto a la etapa de validación de los modelos hidrológicos, de acuerdo a los indicadores estadísticos de eficiencia de los modelos GR4J, SOCONT y HBV, se destaca el buen desempeño del modelo hidrológico semidistribuido HBV, con un valor de Nash 0.810 es considerado como un valor excelente. Respecto al valor RRMSE se observa que hubo un ligero aumento de 0.704 en la calibración a 0.728 en la validación, sin embargo, sigue siendo el más bajo respecto a los valores obtenidos para los demás modelos hidrológicos evaluados.

El modelo hidrológico GR4J, se presenta como una segunda opción pues según los indicadores de eficiencia obtenidos se califica como muy bueno, llegando a obtener un valor de Nash 0.777, muestra errores hasta de 0.790 en esta etapa de validación. Es importante mencionar que no existen grandes diferencias en los indicadores de eficiencia entre el modelo hidrológicos GR4J y HBV, a diferencia del modelo hidrológico SOCONT que presenta un valor de Nash 0.564 y un error medio cuadrático relativo (RMMSE) 1.105, lo cual sobre pasa el valor de la unidad, por lo tanto, se le considera un modelo con un grado de error alto.

Tabla 13

Análisis comparativo de parámetros estadísticos de validación de modelos los simulados

Validación 01/01/2013 - 31/12/2017	GR4J	SOCONT	HBV
Nash-Sutcliffe	0.777	0.564	0.810
R^2	0.806	0.628	0.833
RRMSE	0.790	1.105	0.728

El modelo hidrológico HBV es el más representativo, pues presenta los mayores valores para Nash-Sutcliffe y R^2 que lo califican como excelente (confiabilidad mayor al 80%) y RRMSE con el menor valor que indica que tiene menos errores en la simulación de caudales diarios.

Respecto a la elección del modelo hidrológico semidistribuido más representativo se puede decir que depende mucho de los indicadores estadísticos; y que según Rodríguez y Rodríguez (2020) en su estudio menciona que el modelo GR4J obtienen los mejores valores estadísticos y según Astorayme et al. (2015) el modelo HBV con un mayor número de parámetros presenta mejores resultados, mientras que los modelos GR4J y SOCONT con menores parámetros tienden a representar con mayor detalle solo en periodos de avenida. Estos resultados mencionados anteriormente van acordes con lo mencionado en la presente investigación pues la predicción de caudales diarios fue muy bueno, resaltando al modelo HBV como el más confiable, tomando en cuenta los indicadores estadísticos que permitieron realizar la elección de este modelo. Según (Astorayme. 2020), el modelo SOCONT presenta mayores errores respecto a los demás modelos, esto concuerda con lo encontrado en el presente estudio pues además el valor de Nash-Sutcliffe aumenta ligeramente, pero sin una diferencia marcada en los periodos de calibración y validación, siendo un valor insuficiente para ser considerado como aceptable en el pronóstico de caudales diarios.

V.CONCLUSIONES

En la adecuación de modelos hidrológicos semidistribuidos se tiene que para el modelo semidistribuido GR4J se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.829 en la etapa de calibración y de 0.777 en la validación; para el modelo semidistribuido SOCONT se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.562 en la etapa de calibración y de 0.564 en la validación y para el modelo HBV se obtuvo un valor de Nash-Sutcliffe de 0.819 en la etapa de calibración y de 0.810 en la validación. Con los valores de Nash-Sutcliffe que son mayores a 0.77 para las etapas de calibración y validación se concluye que más del 77% de los caudales diarios pueden ser predichos de manera óptima por los modelos hidrológicos GR4J y HBV, mientras que aquellos caudales diarios predichos por el modelo SOCONT que obtuvo valores muy bajos para Nash-Sutcliffe, se considera que las predicciones no son aceptables en la cuenca en estudio.

Las simulaciones mostraron que el modelo hidrológico HBV fue el más eficiente, con un coeficiente de Nash superior a 0.810, que es un nivel aceptable de desempeño. Lo que indica un buen ajuste entre los caudales observados y simulados. Este modelo obtuvo también un alto desempeño en las etapas de calibración y validación, con indicadores de eficiencia cercanos al valor óptimo. Por lo tanto, se concluye que el modelo HBV es el más eficiente para modelar el caudal del río Jequetepeque.

VI. RECOMENDACIONES

Respecto a los datos utilizados en la calibración y validación de modelos hidrológicos se recomienda usar más de una estación hidrológica de referencia, que permita obtener un dato de caudal diario más fiable para el río Jequetepeque.

En la actualidad existen diversos modelos hidrológicos semidistribuidos utilizados para el pronóstico de caudales diarios; es por ello que se recomienda que para estudios futuros se puedan evaluar también otros modelos hidrológicos para la cuenca en estudio.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del río Jequetepeque.
https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/erh-jequetepeque_2015_superficiales.pdf
- Astorayme, M. (2017). *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*.
<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/7406>
- Astorayme, M., García, J., Suarez, W., Felipe, O., Huggel, C., & Molina, W. (2015). Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)* (4), 109–124.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1066>
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. (2017). *Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. 1–22.
https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/260/Uso-producto-grillado-Pisco-precipitación-estudios-investigaciones-sistemas-operacionales-monitoreo-pronóstico-Hidrometeorológico_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Baldeon, L. (2016). *Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del río Achamayo* [Universidad del centro del Perú].
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4588/BaldeonJara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Banco mundial (2022), Gestión de los recursos hídricos.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement>

- Bogarin, A. (2017). *Guía de estudio N° 8 Evapotranspiración potencial*.
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/52760/mod_resource/content/1/08%20-%20Evapotranspiracion%20potencial.pdf
- Cabrera, J. (2017). *Modelos Hidrológicos*.
http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8.
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., Del Río, J., López, A., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27, 73–97.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652018000100005&lng=es&tlng=es.
- Camones, A. (2015). *Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación - escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique, Junin - Perú*.
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3013673>
- Cardona, B. (2012). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
<https://core.ac.uk/download/pdf/35294551.pdf>
- Castro, C. (2005). Geomorfología, Dinámica y climática. *Instituto de Geografía Universidad Católica*, 30–33. https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/3_1.html
- Cerignoni, F., & Rodrigues, V. (2015). Análisis morfométrico de la microcuenca “C” núcleo Cunha, São Paulo, Brasil. In *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For* (Vol. 41).

<https://1library.co/document/z127geey-analisis-morfometrico-microcuenca-nucleo-cunha-sao-paulo-brasil.html>

Céspedes, A. (2020). *Comparación de los modelos hidrológicos de Lutz Scholz y similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos, en las cuencas de los ríos Cajamarquino y Namora para el periodo: 1973-2015.*

<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4005/Alexander%20Cespedes%20Mendoza.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Chow, V. Te., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

<https://www.udocz.com/apuntes/53980/hidrologica-aplicada-ven-te-chow>

Córdova, M. (2015). *Estimación de caudales medios naturalizados en la cuenca del Río Mantaro mediante el método de regionalización estadística* [Pontificia Universidad católica del

Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6273>

Cruz, E., & Romero, A. (2018). *Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: gr2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas.*

<http://hdl.handle.net/10757/623192>

de la Torre, F. B. (2017). Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución. *Cuadernos de estrategia*, (186), 21-70.

Del Carmen, R. (2001). *Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua.*

<https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/262/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delgadillo, A., Ferrer, C., & Dugarte, M. (2015). Respuesta hidrogeomórfica de una cuenca altamente asimétrica. La tormenta del 11 de febrero del 2005 y su impacto en el río

- Mocoties. Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(1), 11–40.
<https://www.redalyc.org/pdf/3477/347738680002.pdf>
- Donald, C. (2009). *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 9. <http://skhmet.ir/Library/meteorologytoday-pdf.pdf>
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O., & Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 47–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-4-47-2000>, 2000.
- Foehn, A., García, J., Roquier, B., & Paredes, J. (2017). *RS MINERVE – Technical manual v2.8. RS MINERVE Group, Switzerland* (Vol. 8). <https://docplayer.net/64346586-Rs-minerve-rs-minerve-user-s-manual-v2-8-june-2017-for-software-version.html>
- Gámez, William. (2009). *Texto básico de hidrología*. <https://www.hidrosm.com/2021/01/libro-texto-basico-de-hidrologia.html>
- García, J. (2004). *Modelo de pérdidas para determinar precipitación efectiva usando sistemas de información geográfica*.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1188/ICI_118.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, J., Foehn, A., Fluixá-Sanmartín, J., Roquier, B., Brauchli, T., Paredes, J., & De Cesare, G. (2020). *RS MINERVE-Technical manual v2.25*. https://crealp.ch/wp-content/uploads/2021/09/rsminerve_technical_manual_v2.25.pdf
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143–158.
<https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476/505>

- Georgalpakos y Krzysztofowicz. (2001). Probabilistic & Ensemble Forecasting. *Journal of Hydrology*. 249.1
- Guaman, E. (2020). *Modelación hidrológica con HEC-HMS Y RS-MINERVE de la cuenca del río Casacay – EL ORO* [Universidad Técnica de Machala].
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/16103>
- Iagua (2024). Gestión del agua. Recursos hídricos: América Latina y El Caribe al 2050.
<https://www.iagua.es/blogs/juan-carlos-castro-vargas/recursos-hidricos-america-latina-y-caribe-al-2050-0>
- Ibáñez, Sara., Moreno, Héctor., & Gisbert, Juan. (2008). *Morfología de las cuencas hidrográficas*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología%20de%20una%20cuenca.pdf>
- Jorquera, Eliana., Weber, Juan., & Reyna, Santiago. (2011). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Weber/publication/266885248_Revision_del_estado_del_arte_en_la_modelacion_hidrologica_distribuida_e_integrada/links/544564e80cf2f14fb80efc89/Revision-del-estado-del-arte-en-la-modelacion-hidrologica-distribuida-e-integrada.pdf
- Loayza, J., & Van den Berg, B. (2018). *Delimitación y obtención de parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Jubones* [Escuela Superior Politécnica de Litoral].
<https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.2.15338.16324>
- López, J., & Salgado, A. (2010). *Atlas politécnica nacional*.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1720/1/CD-2755.pdf>

- Lujano, E., Sosa, J. D., Lujano, R., & Lujano, A. (2020). Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú. *Revista INGENIERÍA UC*, 27(2), 189-199.
- MIDAGRI. (2022). *Decreto supremo que aprueba el reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor*. www.gob.pe/midagri
- Morales, J., & Martínez, A. (2021). *Modelos Estadísticos*.
https://bookdown.org/j_morales/librostat/libroSTAT.pdf
- More, H. (2021). *Análisis comparativo entre métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región de Tumbes*.
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/2569>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification accuracy in watershed simulations. In *Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Issue 3).
<https://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeleval.pdf>
- Munir, M., & Triviño, A. (2001). *Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación*.
<https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/386/357>
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ocampo, L., & Vélez, J. (2013). *Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná*.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n24/v13n24a04.pdf>

- Ortiz, O. (2016). *Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica*.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/2239/P10-O78-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ospina, M., & Mancipe, J. (2016). *Estudio morfométrico y estimación de caudal por medio del método racional para la creciente de la quebrada Canauchita hasta la desembocadura en el río Chirche del municipio de Otanche en el departamento de Boyacá*. 52–54.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/2562/MancipeGironzaJuanSebastian2%20016.pdf?sequence=3>
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Pérez, R. (2019). *Introducción a los modelos de optimización*. Universidad Piloto de Colombia.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv2cw0t8k>
- Quichimbo, A. (2011). *Estudio comparativo de los modelos NAN y DBMM aplicado al pronóstico de caudales*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/756/1/ti883.pdf>
- Quispe, E. L. F., Delgado, C. A. S., & Condori, E. F. (2015). Predicción de caudales diarios de la estación hidrométrica tumilaca aplicando modelos estocásticos autoregresivos. *Ciencia & Desarrollo*, (19), 68-73.
- Racca, J. (2007). *Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de los modelos digitales el terreno*.
<http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia/publicaciones.htm>. Recibido:01/06/2007; aceptado:24/08/2007.

Ramón, M. (2015). *Estimación de la fracción de agua de evento y pre evento que aportan al caudal, mediante el uso de isótopos estables, en la cuenca del río zhurucay.*

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22781/1/tesis.pdf>

Raya, A., Delgado, F., & Nanía, L. (2010). *Determinación del cauce principal de un río mediante herramientas sig y análisis multicriterio.*

http://www.conocetusfuentes.com/documentos/doc_187.pdf

Refsgaard, J. and Knudsen, J. (1996). "Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models". *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, Pages 2189–2202, July 1996.

Rodríguez, A., & Rodríguez, F. (2020). *Comparación de los modelos hidrológicos lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la obtención de caudales medios en la cuenca del río Subachoque.* <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/db3e23ed-4ccb-41f9-9ddb-146fc599f6fe/content>

Sánchez, J. (2016). *Hidrología superficial y subterránea* (2da edición, Vol. 1).

https://hidrologia.usal.es/Complementos/SIG/TUT10-Perfil_longitudinal_rio.pdf

Segerer, C., & Villodas, R. (2006). *Hidrología I Unidad 5: Las precipitaciones.*

<https://silo.tips/download/unidad-5-las-precipitaciones>

Sellers, Ch., Bruján, S., Corbelle, E., & Miranda, D. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador.

Métodos y Análisis Con Tecnologías de La Información Geográfica, 7, 399–412.

<https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/87/81>

- SENAMHI. (2016). Caracterización hidrológica de los distritos de Pampas y Santiago de Tucuma. *Ministerio Del Ambiente*, 46–49.
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-37.pdf>
- Thorntwaite, C. W., Colman, E. A., Cummings, N. W., Croft, A. R., Gisborne, H. T., Harding, S. T., Hendrickson, A. H., Hoover, M. D., Houk, I. E., Kittredge, J., Lee, C. H., Rossby, C.-G., Saville, T., Taylor, C. A., & Wilm, H. G. (1944). Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943 – 44. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(5), 683.
<https://doi.org/10.1029/TR025i005p00683>
- Trigo, A. (2013). *Inteligência geográfica e gestão dos recursos hídricos*.
https://mundogeoconnect.com/2013/arquivos/palestras/19_jun-e-augustin-trigo.pdf
- Trucios, R., Martínez, J., Blando, J., & Sánchez, I. (2007). *Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río sextin en Durango, México*.
<https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545068010.pdf>
- Velásquez, L., Agustín, M., & León, V. (2022). Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del río Guadalquivir. *Ciencia Sur Revista Científica*, 7(8), 72–88.
<https://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ciencia-sur/article/view/1317>
- Viramontes, A., Escoboza-García, L., Pinedo, C., Pinedo, A., Reyes, V., Román, J., & Pérez, A. (2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable*, 1(3), 21–31. <https://biblat.unam.mx/es/revista/tecnociencia-chihuahua/articulo/morfometria-de-la-cuenca-san-pedro-conchos-chihuahua>

Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric science an introductory survey*.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780127329512/atmospheric-science#book-description>

Yana, L. (2018). *Estudio de drenaje pluvial para la ciudad de Cajabamba-Cajamarca utilizando los modelos hidrológicos HEC-HMS, HEC-RAS y SWMM*.

<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2355126>