

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON GR4J PARA EL
PRONÓSTICO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS CON HORIZONTE
DE 72 HORAS EN LA CUENCA DEL ALTO HUALLAGA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRICOLA**

MAGNA KATHERINE CALIXTO CARRIÓN

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON GR4J PARA EL
PRONÓSTICO DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS CON HORIZONTE
DE 72 HORAS EN LA CUENCA DEL ALTO HUALLAGA”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. MAGNA KATHERINE CALIXTO CARRIÓN

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EUSEBIO MERCEDES INGOL BLANCO
Presidente

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Asesor

Ing. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIERREZ
Miembro

Mg. Sc. AUGUSTO FELIPE ZINGG ROSELL
Miembro

LIMA – PERU

DEDICATORIA

A Dios, por haberme enseñado que la única y la mejor manera de realmente ser feliz es cuando existe amor. Gracias por las personas que llegaron a mi vida y por aquellas personas que se quedarán para siempre.

A mi querida familia:

A ti hermosa mamá, eres una mujer extraordinaria.

*Me has enseñado con amor tantos valores,
me has acompañado en tantos momentos,
me has dicho que yo siempre puedo.*

Siempre estaré eternamente agradecida contigo.

Gracias por ser ejemplo, por ser inspiración, por ser mi Blanquita.

A ti papá, por haber sido siempre el sostén de nuestra familia,

*Gracias por tu arduo trabajo, por tu independencia, por tu cariño,
que son ejemplos de vida para mí.*

Todos mis reconocimientos serán siempre para ustedes.

A mi pequeña Kuky,

que tu ternura y tu luz jamás dejen de brillar.

A Scott que motivó mi lado maternal,

Margarita y Colorina, mis fieles compañeras nocturnas.

Gracias Dios, gracias Vida y gracias Universo.

ÍNDICE

I.	PRESENTACIÓN	1
1.1.	Descripción de las funciones desempeñadas (relacionadas con el TSP) y su vinculación con campos temáticos de la carrera profesional.	1
1.2.	Descripción de los aspectos propios de la puesta en práctica de lo aprendido durante los 5 años de estudios (la formación universitaria).	1
II.	INTRODUCCIÓN	3
III.	ANTECEDENTES	5
IV.	OBJETIVOS.....	6
4.1.	Objetivo General.....	6
4.2.	Objetivos Específicos	6
V.	MARCO TEÓRICO	7
5.2.	Generalidades	7
5.2.1.	Ciclo hidrológico.....	7
5.2.2.	Cuenca hidrográfica	8
5.2.3.	Características geomorfológicas de la cuenca.....	9
5.2.4.	Precipitación	13
5.2.5.	Datos grillados del estudio PISCO v2.1	14
5.2.6.	Temperatura PISCO v1.1	16
5.2.7.	Evapotranspiración.....	17
5.2.8.	Información del modelo ETA – SENAMHI para pronóstico de precipitación....	17
5.2.9.	Sistema de información geográfica	18
5.2.10.	Modelo hidrológico	18
5.2.11.	Plataforma RS MINERVE	20
VI.	METODOLOGÍA	33
6.1.	Zona de estudio.....	33
6.1.1.	Características generales de la cuenca del río Huallaga.....	33

6.1.2.	Caracterización de la zona de estudio de la cuenca del Alto Huallaga.....	33
6.1.3.	Información cartográfica.....	37
6.1.4.	Información climática.....	37
6.1.5.	Información hidrométrica.....	37
6.1.6.	Equipos y programas.....	38
6.2.	Secuencia metodológica.....	39
6.2.1.	Delimitación del área de estudio.....	39
6.2.2.	Parámetros geomorfológicos.....	40
6.2.3.	Estación virtual.....	42
6.2.4.	Evapotranspiración (Eto).....	43
6.2.5.	Obtención de la precipitación diaria PISCOp 2.1.....	43
6.2.6.	Obtención de la temperatura diaria PISCOt 1.1.....	43
6.2.7.	Previsiones de precipitaciones con el modelo ETA scal.....	43
6.2.8.	Análisis de información hidrométrica.....	43
6.2.9.	Aplicación del modelo GR4J en la plataforma RS MINERVE.....	44
VII.	RESULTADOS.....	48
VIII.	CONCLUSIONES.....	67
IX.	RECOMENDACIONES.....	68
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
XI.	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación del índice de compacidad.....	11
Tabla 2: Clasificación del factor de forma	11
Tabla 3: Parámetros para el modelo hidrológico GR4J	22
Tabla 4: Clasificación de valores según el criterio de Nash – Sutcliffe.....	27
Tabla 5: Indicadores estadísticos y valores referenciales.....	32
Tabla 6: Unidades hidrográfica de la cuenca del Huallaga	34
Tabla 7: Ubicación geográfica de la estación hidrológica Taruca	38
Tabla 8: Estaciones virtuales de las subcuencas	42
Tabla 9: Parámetros geomorfológicos de la Intercuenca del Alto Huallaga.....	49
Tabla 10: Parámetros geomorfológicos de las subcuencas	49
Tabla 11: Parámetros de optimización para calibración	51
Tabla 12: Indicadores estadísticos GR4J en la etapa de calibración.....	52
Tabla 13: Clasificación de rendimiento general para los indicadores estadísticos para un intervalo de tiempo mensual	52
Tabla 14: Valores referenciales del criterio Nash – Sutcliffe	53
Tabla 15: Indicadores estadísticos GR4J en la etapa de validación.....	55
Tabla 16: Indicadores estadísticos en las etapas de calibración y validación del modelo GR4J56	
Tabla 17: Caudales simulados vs caudales observados – 24 horas.....	59
Tabla 18: Caudales simulados vs caudales observados – 48 horas.....	61
Tabla 19: Caudales simulados vs caudales observados – 72 horas.....	63
Tabla 20: Indicadores de eficiencia del modelo GR4J con fines de pronóstico en la estación hidrológica Taruca.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico del agua Fuente: Mussardo (2019)	8
Figura 2: Componentes de una cuenca hidrográfica Fuente: Del et al. (2014).....	9
Figura 3: Esquema conceptual de proceso de modelación hidrológica Fuente: Cabrera (2016b)	20
Figura 4: Ejemplo de modelo simple Fuente: García Hernández et al. (2020).....	21
Figura 5: Esquema del modelo hidrológico GR4J Fuente: Perrin et al., 2003.....	23
Figura 6: Plano de las cuencas hidrográficas del Perú y ubicación de la Intercuenca del Alto Huallaga	35
Figura 7: Ubicación de la zona de estudio a nivel regional.....	36
Figura 8: Ubicación de la zona de estudio a nivel de cuenca y zonas altitudinales	35
Figura 9: Registro de caudales medios diarios en la estación hidrológica Taruca – SENAMHI	38
Figura 10: Delimitación de la intercuenca del Alto Huallaga usando las herramientas del ArchydroTools.....	41
Figura 11: Ubicación de centroides de cada subcuenca.....	40
Figura 12: Representación topológica del modelo GR4J en la Intercuenca del Alto Huallaga .	45
Figura 13: Ingreso de base de datos meteorológicos y caudales.....	46
Figura 14: Cálculo de la evapotranspiración.....	46
Figura 15: Calibración del modelo hidrológico GR4J para la estación hidrológica Taruca	50
Figura 16: Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados para la estación hidrométrica Taruca – Calibración.....	51
Figura 17: Validación del modelo hidrológico GR4J en la Intercuenca del Alto Huallaga en la estación hidrométrica Taruca	54
Figura 18: Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados la estación hidrológica Taruca – Validación	54
Figura 19: Comando a seleccionar para ejecutar el programa	57
Figura 20: Caudales observados vs caudales simulados durante el periodo 01/01/2019 al 31/12/2020.....	58
Figura 21: Hidrograma de caudales simulados y observados para un pronóstico de 24 horas ..	60
Figura 22: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 24 horas	60
Figura 23: Hidrograma de caudales simulados y observados para un pronóstico de 48 horas ..	62

Figura 24: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 48 horas	62
Figura 25: Hidrograma de caudales simulados y observados para un pronóstico de 72 horas ..	64
Figura 26: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 72 horas	64
Figura 27: Mapa de las zonas vulnerables cerca a la estación hidrológica Taruca	66

I. PRESENTACIÓN

1.1. Descripción de las funciones desempeñadas (relacionadas con el TSP) y su vinculación con campos temáticos de la carrera profesional.

Dentro de las funciones como Analista Básica en Predicción Hidrológica que está vinculada a la carrera de Ingeniería Agrícola, se resaltan los siguientes puntos:

- El monitoreo hidrológico de las cuencas a nivel nacional que permite conocer el caudal y nivel de los ríos, así como sus umbrales hidrológicos cuando se presentan las temporadas de avenidas y estiaje. Los conceptos de hidrología fueron proporcionados durante la carrera con la finalidad de tener conocimientos sobre los procesos del ciclo hidrológico, la evaporación, evapotranspiración, precipitación, infiltración, entre otros, que son propios de la cuenca hidrográfica.
- La aplicación de modelos hidrológicos como GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV en la plataforma de Minerve para realizar el pronóstico de caudales con un horizonte de tiempo de hasta 72 horas. Asimismo, se realiza la calibración y validación de los diferentes modelos hidrológicos con los caudales observados de las diversas estaciones hidrológicas que cuenta la institución del SENAMHI a nivel nacional.
- Elaboración de los avisos hidrológicos emitidos, principalmente, durante la temporada de avenidas, y la constante coordinación con diferentes instituciones como INDECI, COEN, municipalidades, entre otros, ante temas de prevención de inundaciones debido a las lluvias intensas.

1.2. Descripción de los aspectos propios de la puesta en práctica de lo aprendido durante los 5 años de estudios (la formación universitaria).

La formación universitaria ayudó a comprender mejor los conceptos y acciones que se han trabajado durante estos años en la institución laboral, tales como:

- En el curso de hidrología se aprendieron los conceptos relacionados a las cuencas

hidrográficas. Además, que el curso se complementó con algunos programas de *software* para realizar el modelamiento hidrológico de una cuenca, el cual ha sido bastante útil para realizar el pronóstico de caudales de los ríos.

- El curso de Sistema de Información Geográfica (SIG) ha sido muy importante pues permitió el aprendizaje de la delimitación de una cuenca hidrográfica, así como identificar zonas vulnerables a inundaciones, entre otros. Además, las prácticas constantes permitieron manejar con más facilidad las bondades que presenta el software ArcGIS.
- El curso de Gestión de Recursos Hídricos ha permitido conocer la situación del agua en el Perú, además de presentar aspectos normativos, técnicos, legales, institucionales en marco a la gestión del agua. Todo ello se complementa con algunas tomas de decisiones que se ha realizado en la institución laboral con las entidades competentes del sector.

II. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo de metodologías para predecir caudales se ha convertido en un desafío de creciente interés, principalmente, por ser una alternativa de solución preventiva ante temas de eventos extremos como inundaciones que, en el Perú, suelen presentarse durante los meses de avenidas caracterizados por la intensificación y magnitud de las lluvias ocurridos durante los meses de diciembre a abril, , que traen como consecuencias pérdidas humanas, daños materiales, paralización económica y contaminación (Vergara, 2020).

Los diferentes factores como las condiciones de drenaje de cuencas, el cambio climático, la deforestación, la mala gestión en el ordenamiento territorial, migración poblacional a zonas rurales, entre otros, traen como consecuencia las inundaciones y/o desbordes de los ríos. Asimismo, las actividades antropogénicas realizadas en el desarrollo de las cuencas hidrográficas pueden tener impactos muy graves al provocar las inundaciones y agravar sus consecuencias. La falta de datos sobre las inundaciones en zonas urbanas es un problema al analizar aquella urbanización que genere una frecuencia en las inundaciones (Urbanization & On, 1973). Es importante tener una mejor comprensión y evaluación de los procesos hidrológicos para la predicción y mitigación de riesgos, asimismo, la planificación, el desarrollo sostenible y el manejo de cuenca permitirán atenuar sus impactos en el ecosistema, medio ambiente y la economía (Chen et al., 2009).

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia en el estudio de avenidas, asimismo, junto con la implementación de los sistemas de pronósticos de caudales puede permitir la predicción y mitigación de riesgos hidrológicos, además de proponer hipótesis que ofrezcan cierto grado de confianza en la toma de decisiones relacionados con el ordenamiento territorial, criterios al diseñar obras de infraestructura y en el sistema de alerta temprana; obtener pronósticos de buena calidad y su uso adecuado otorga beneficios económicos y sociales considerables (Golian et al., 2021). La cuenca hidrográfica y sus variables hidrológicas pueden ser representadas a través de un modelo hidrológico, que se asemeja a un sistema real complejo que, para su funcionalidad, requiere de información de entrada (input) y salida (output).

El software RS MINERVE es una plataforma que permite simular la formación y propagación de flujos de escorrentía, asimismo modelar complejas redes hidrológicas e hidráulicas de acuerdo a un esquema conceptual semi distribuido que incorpora al modelo GR4J (Foehn et al.,

2020).

Siendo analista básica en predicción hidrológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), se realizó el presente trabajo que consistió en la elaboración del modelo hidrológico GR4J – Minerve para la cuenca del Alto Huallaga, aguas arriba de la estación hidrológica Taruca con la finalidad de realizar la simulación de caudales con un horizonte de tiempo de hasta 72 horas, tiempo asignado que se ajusta al protocolo de los “Pronósticos de caudales” emitidos por la Subdirección de Predicción Hidrológica. Esta información es útil para la toma de decisiones de las entidades competentes del sector ante temas preventivos de inundaciones por severas precipitaciones pudiendo afectar a poblaciones de los sectores de Colpa Alta, Colpa Baja y zonas del aeropuerto pertenecientes al distrito de Churubamba, así como terrenos agrícolas de las zonas aledañas. En el trabajo se utilizó el modelo hidrológico GR4J debido a que es un modelo más sencillo de aplicar, a su vez la cantidad de sus parámetros hace que éste sea de más fácil optimización y aumente significativamente su eficiencia (Aliaga Araujo, 2017)

III. ANTECEDENTES

Fuertes (2020) realizó el estudio de la evaluación de modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA mediante la plataforma RS-MINERVE para la generación de caudales medios diarios en la cuenca del río Huallaga obteniendo muy buenos resultados de calibración y validación para los puntos de control de las estaciones Tingo María y Tocache. Asimismo, se representó de manera satisfactoria los caudales medios y picos haciendo uso de la base de datos PISCO-SENAMHI a escala diaria. Para la investigación se trabajó con los parámetros geomorfológicos de la cuenca, así como información meteorológica e hidrológica de estaciones existentes en el área de estudio y de estaciones virtuales provenientes de la base de datos PISCO - SENAMHI. Los indicadores de eficiencia utilizados fueron el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico, la correlación de Pearson y el indicador Bias Score. Según los resultados obtenidos, los caudales simulados en los puntos de control Tingo María y Tocache presentaron una mayor proximidad a los caudales observados mediante el modelo SAC – SMA.

Aliaga (2017) realizó la modelación hidrológica en la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control San Lorenzo. En este estudio, la cuenca del río Huallaga fue dividida en 16 subcuencas o áreas de contribución y fueron divididas en bandas altitudinales para la delimitación de los ríos secundarios que desaguan en el río Huallaga. Se realizó la simulación con los modelos hidrológicos de precipitación – escorrentía tales como SAC – SMA, SOCONT, HBV y GR4J del sistema informático RS - MINERVE. Para ello, se trabajó con información pluviométrica de cuatro estaciones y para la calibración se hizo uso de los caudales observados de la estación hidrométrica Santa Lorenza. Para evaluar el ajuste real de los datos simulados por los modelos se usaron indicadores de eficiencia como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de correlación de Pearson, la eficiencia Kling-Gupta y el error medio normalizado obteniendo resultados satisfactorios para los modelos GR4J y HBV, así como obteniendo mayores índices estadísticos de bondad de ajuste para el coeficiente Nash (0.68) y el coeficiente de correlación de Pearson (0.88).

IV. OBJETIVOS

4.1.Objetivo General

Realizar el modelamiento hidrológico con el modelo GR4J para el pronóstico de caudales medios diarios con horizonte de 72 horas en la cuenca del Alto Huallaga, aguas arriba de la estación hidrológica Taruca.

4.2.Objetivos Específicos

- Utilizar la información climatológica del sistema PISCO correspondiente a la precipitación y temperatura y vincularlas a las subcuencas del río del Alto Huallaga.
- Realizar el análisis de la topografía de la cuenca para la determinación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del Alto Huallaga.
- Calibrar y validar los parámetros del modelo GR4J aplicados en la cuenca del Alto Huallaga.
- Predecir los caudales medios diarios aguas arriba de la estación hidrométrica Taruca para el periodo de diciembre del 2020.

V. MARCO TEÓRICO

5.2. Generalidades

Las actividades más arduas realizadas en el SENAMHI ocurren durante la temporada de avenidas que es desde noviembre a abril ya que se presenta un incremento en magnitud e intensidad de las precipitaciones y, por ende, el aumento de los niveles y caudales de los ríos. Por tal motivo, es importante mantener registros fidedignos y actualizados de estos parámetros ya que las entidades competentes como INDECI, COEN y municipalidades, en base a la información que la institución comparte, toman decisiones preventivas ante eventos severos de lluvias que pueden generar inundaciones afectando la vida y la salud humana, así como también traer pérdidas económicas en infraestructuras, agricultura, entre otros. Por ello, una de las labores de la Subdirección de Predicción Hidrológica es realizar diferentes modelamientos hidrológicos para la simulación de caudales.

Actualmente, la modelación hidrológica es una alternativa de solución de gran importancia en el estudio de avenidas (temporada de lluvias). El empleo del modelo permite realizar el análisis y la prevención de inundaciones; además, de proponer posibles hipótesis que ofrezcan cierto grado de confianza en la toma de decisiones relacionados con el ordenamiento territorial, criterios al diseñar obras de infraestructura y en el sistema de alerta temprana ofreciendo beneficios hacia las poblaciones vulnerables.

En este caso, se realizó el modelo G4RJ en la plataforma RS MINERVE para pronosticar los caudales medios diarios con un horizonte de tiempo de 72 horas en la cuenca del Alto Huallaga, aguas arriba de la estación hidrológica Taruca. Para realizar la modelación hidrológica fue importante conocer los siguientes conceptos:

5.2.1. Ciclo hidrológico

Es un proceso natural ocasionado por la evaporación del agua del mar, éste llega a la atmósfera y es arrastrada hacia el continente por el viento, generando la nubosidad y las precipitaciones, después el agua es devuelta al océano por canales de superficie y subterráneos. (Ledesma, 2011).

Chow et al. (1994) menciona que el ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico, estos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total para analizar el sistema total.

El ciclo hidrológico inicia a partir de la evaporación del agua en la superficie oceánica y también por los organismos, en el fenómeno de la transpiración de las plantas y sudoración en animales. Los seres vivos, especialmente las plantas, contribuyen con un 10 por ciento al agua que se reincorpora a la atmósfera. El agua en forma de vapor se eleva y debido a las temperaturas y presión, ésta se condensa formando las nubes constituidas por gotas minúsculas. Por determinadas condiciones, el vapor de agua precipita y cae sobre los cuerpos de agua (océanos, lagos, mares y ríos), a su vez el agua puede infiltrarse en el suelo y pasa a ser agua subterránea. El agua no infiltrada que circula por la superficie es la escorrentía. Parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por evaporación o más aun, por la transpiración y/o evapotranspiración de las plantas y vuelve a surgir el mismo proceso. El inicio del proceso se da gracias a la energía otorgada por el sol. El agua está en constante movimiento dentro de este ciclo, es una sucesión de cambios en el estado del agua. Los flujos no son constantes, es decir que lo que evapora no es lo mismo que lo que se infiltra (Zucarelli et al., 2020). En la Figura 1 se aprecia las etapas del ciclo hidrológico.

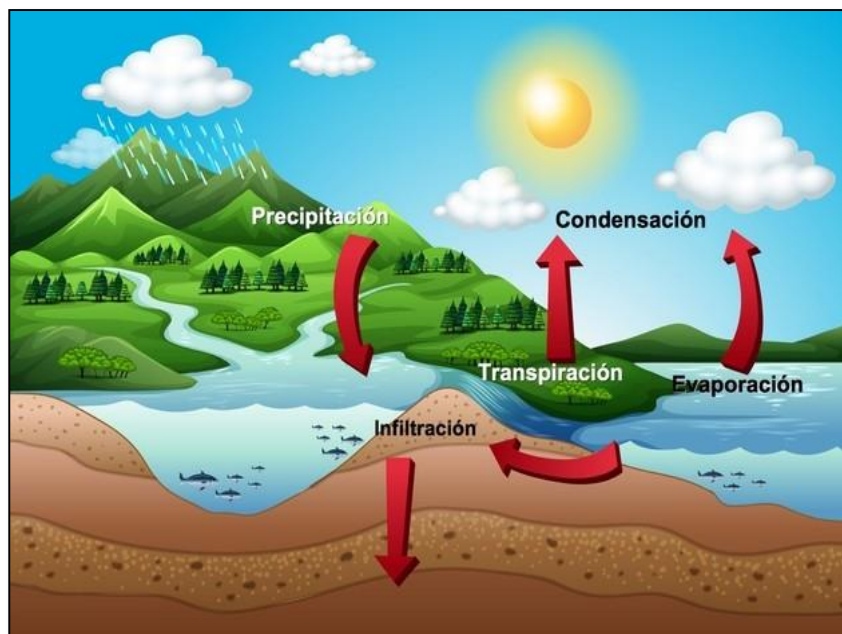


Figura 1: Ciclo hidrológico del agua

Fuente: Mussardo (2019)

5.2.2. Cuenca hidrográfica

Un área drenada por un surco de agua o por un sistema de cursos de agua, cuyas aguas concurren a un punto de salida, se le conoce como cuenca hidrográfica. La morfología, el tipo de suelo, la capa vegetal y la geología son características de una cuenca que proporcionan información útil

para conocer la variación en el espacio de los elementos del régimen hídrico (Viessman Warren & Garen, 2003).

La cuenca hidrográfica es un sistema, es una unidad geográfica e hidrológica, formada por un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del río y su desembocadura. Asimismo, una cuenca hidrográfica incluye las áreas y los ecosistemas como territorios, aguas subterráneas, zonas costeras y su influencia en el mar que interaccionan entre sí e inciden en la calidad y cantidad del recurso hídrico (Arias & Terneus, 2012).

Según Ordoñez (2011), una cuenca hidrográfica se divide en tres partes:

- Cuenca alta donde se ubica el origen del río principal en zonas laderas y montañosas.
- Cuenca media, corresponde al valle de un río que, generalmente, realiza un zigzag.
- Cuenca baja, situado en las partes más bajas de la cuenca. En esta zona los ríos pierden velocidad, fuerza y sedimentan todos los materiales recogidos formando llanuras aluviales o valles.

En la Figura 2 se aprecian los componentes de una cuenca hidrográfica.

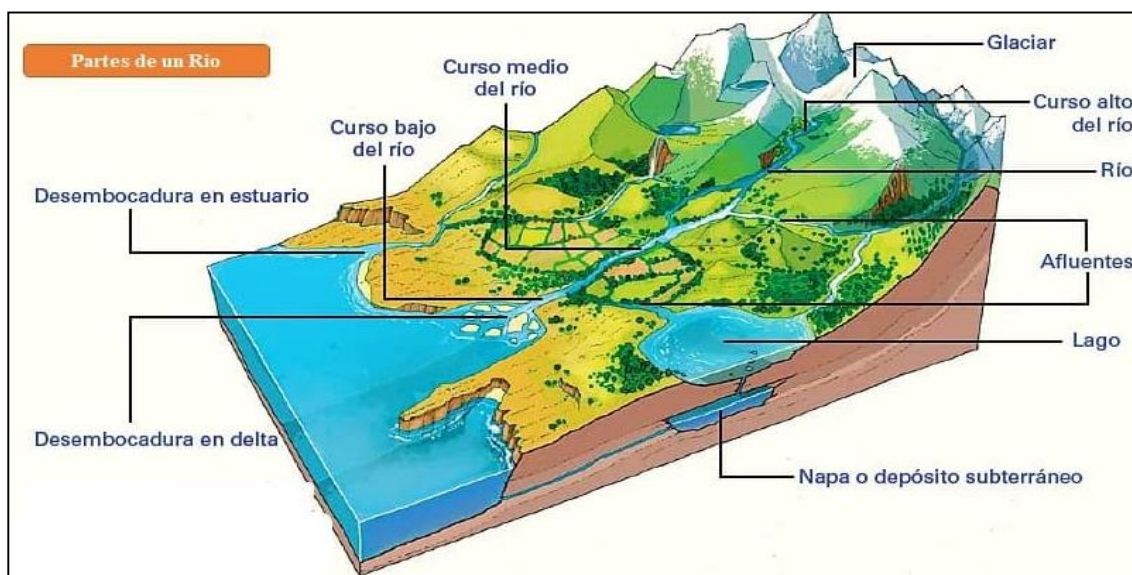


Figura 2: Componentes de una cuenca hidrográfica
Fuente: Del et al. (2014)

5.2.3. Características geomorfológicas de la cuenca

Según Villón (2002) y Enfermer et. al (2018) se tienen los siguientes conceptos:

- **Parámetros de forma de la cuenca**
 - Área de drenaje: Representa el área delimitada de la cuenca donde existirán varias

de ellas en caso se haya subdividido en subcuencas. Se emplea para demostrar cuánto de la capacidad de la lluvia puede proporcionar un volumen de agua.

- Perímetro de la cuenca: Es la longitud de la divisoria de agua, la cual es una línea imaginaria que divide la precipitación que cae en cuencas vecinas y que encamina la escorrentía superficial resultante para uno u otro sistema fluvial.
- Longitud del río principal: Es la mayor longitud de recorrido que realiza el río, ubicándose desde la cabecera de la cuenca siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades, hasta un punto fijo de interés ya sea una estación de aforo o una desembocadura.
- Ancho promedio de la cuenca: Definida como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L). Se le conoce por la letra w.

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

Donde:

W: Ancho promedio de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

L: Longitud del cauce principal (km)

- Coeficiente de compacidad (Kc): Es la relación del perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área. El valor es adimensional. Cuando el valor se acerca a la unidad indica que la cuenca tiene la tendencia a concentrar agua de escurrimiento, caso contrario cuando el valor de Kc disminuye ya que significa que la concentración de agua será mayor. Se representa de la siguiente manera:

$$Kc = \frac{0.28 * P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

En la Tabla 1 se indica la clasificación del índice de compacidad

Tabla 1: Clasificación del índice de compacidad

Clase de forma	Índice de compacidad (Kc)	Forma de la cuenca
Clase I	1 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval - redonda a oval - alargada
Clase III	1.51 a 1.75	Oval - alargada a rectangular alargada

Fuente: Villón (2002) y Enfermer et. al (2018)

- Factor de forma (F)

Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca (w) y la longitud (L). Si la forma (F) es mayor a la unidad entonces se dice que la cuenca es redondeada, en caso que sea (F) menor que la unidad, la cuenca es alargada. En la Tabla 2 se muestra la clasificación del factor de forma. Su ecuación se representa como:

$$F = \frac{W}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

F: Factor de forma

W: Ancho promedio de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

L: Longitud del cauce principal (km)

Tabla 2: Clasificación del factor de forma

Factor de forma	Forma de la cuenca
F > 1	Redondeada
F < 1	Alargada

Fuente: Villón (2002) y Enfermer et. al (2018)

- Rectángulo equivalente: Representa a la cuenca en rectángulo de igual área, igual coeficiente de compacidad y misma repartición hipsométrica.

El lado mayor se representa por la letra “L” y por siguiente ecuación:

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.128} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

El lado menor se representa por la letra “l” y por la siguiente ecuación:

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Donde:

Kc: coeficiente de compacidad (adimensional)

A: superficie de la cuenca (km²)

- Radio de circularidad:

Relaciona el área de la cuenca y la del círculo que posee una circunferencia de longitud igual al perímetro de la cuenca. Se representa con la siguiente ecuación:

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

- **Parámetro de relieve de la cuenca**

- Curva hipsométrica: Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Indica el porcentaje de área de la cuenca o superficie de la cuenca en Km² que existe por encima de una cota determinada.
- Altitud media de la cuenca: Altitud correspondiente al punto de abscisa media de la curva de frecuencia de altitudes. El 50% del área de la cuenca está por encima de esa altitud y el otro 50% por debajo de ella.
- Altitud más frecuente: Es la altitud que predomina en la cuenca, es decir la que presenta mayor área.

- Pendiente media de la cuenca (S_m): Es un parámetro importante pues tiene una relación compleja con la infiltración del suelo y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Control el tiempo de escurrimiento y la concentración de lluvia en los canales de drenaje. Tiene una importancia directa con las crecidas de los ríos. Se calcula de la siguiente manera:

$$S_m = \frac{H}{L_m}$$

Donde:

S_m : Pendiente de la cuenca

H : Desnivel total (cota en la parte más alta – cota en la parte más baja), en km

L_m : Lado mayor del rectángulo equivalente (km)

- Coeficiente de masividad:

El coeficiente de masividad se define como el cociente entre la pendiente media de la cuenca y su área y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_m = \frac{E}{A}$$

Donde:

C_m : Coeficiente de masividad

E : Extensión media del escurrimiento superficial (km)

A : Área de la cuenca (km^2)

5.2.4. Precipitación

Según Chow (1994), la lluvia, la nieve y otros procesos similares en la que el agua llega a la superficie terrestre (granizo) se relaciona con la precipitación. Para que la precipitación se forme, se requiere que una masa de agua ascienda a la atmósfera, luego se enfríe y parte de su humedad se condense. A continuación, se explican los mecanismos de dicho proceso:

- La elevación frontal indica que el aire caliente se eleva y queda superpuesto sobre el aire frío por un pasaje frontal.

- La elevación orográfica indica la elevación de una masa de aire por encima de una cadena montañosa.
- La elevación convectiva indica que el aire es arrastrado hacia arriba por una acción convectiva.

La precipitación es la fuente primaria de agua de la superficie terrestre y se considera que sus mediciones y análisis son importantes en temas relacionados al uso y control del agua (Villón, 2002).

La cantidad de precipitación que llega a la superficie terrestre es medida a través de una regla graduada en milímetros. Existe una gran variedad de instrumentos para obtener información de la precipitación. Dicha información puede considerar la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el tiempo de duración de la precipitación, y la cantidad e intensidad de la precipitación. Los aparatos de medición son los pluviógrafos y pluviómetros que son clasificados según el registro de precipitaciones (Tarazona Roldán, 2016).

La precipitación es una variable importante para entender distintos procesos hidrológicos, el monitoreo de sequías e inundaciones, recarga de acuíferos y para el modelamiento de cuencas. Al no contar con información de cantidad de la precipitación debido a una escasa distribución espacial de instrumentos que midan su registro, se pueden presentar inconvenientes por escasez de información y, por ende, menor confiabilidad en el modelamiento de la cuenca.

En muchos países se han hecho uso de productos satelitales de estimación de lluvias como el *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network* (PERSIANN), el *Global Precipitation Measurement* (GPM), entre otros, que han permitido mejorar los vacíos pluviométricos. Tal es el caso en el Perú ya que existe una limitada concentración de estaciones meteorológicas a nivel nacional, por ello el SENAMHI ha creado la base de datos PISCO.

5.2.5. Datos grillados del estudio PISCO v2.1

PISCO, en sus siglas en inglés, *Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observation* (Datos interpolados peruanos de la Observación Climatológica e Hidrológica del SENAMHI) fue desarrollada desde el 2013 a través de la Dirección de Hidrología (DHI) del SENAMHI que ha desarrollado diferentes investigaciones para evaluar la calidad de diversos productos satelitales a nivel global. Uno de los objetivos principales fue

mejorar la representación espacial de las lluvias en el Perú para su asimilación en los modelos hidrológicos y desarrollo de productos para monitoreo de inundaciones y sequías. A mediados del 2014, se obtuvo para el Perú, la primera base de datos espacial de precipitación a paso mensual con una resolución de grilla 0.05° para una serie de información que se inicia desde 1981 hasta la actualidad. Con el paso de los años, el proceso de generación de información ha evolucionado y ha presentado una mejora constante en PISCO y desde el 2016, se presentó el producto para precipitaciones diarias, que actualmente, es utilizado satisfactoriamente en la calibración de modelos hidrológicos de lluvia – escorrentía que, operacionalmente, utiliza la DHI para el pronóstico de caudales a corto plazo, a paso mensual y a paso horario, elaboración de productos del Sistema de Observación de Inundaciones del SENAMHI (SONICS), Monitoreo Decadario de Precipitaciones del SENAMHI (MIDAS), Vigilancia Nacional de Sequías, entre otros. Para la construcción del producto PISCOp se utilizó como covariable la base de datos global CHIRPS, *Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data* (Precipitación InfraRed del grupo de riesgo climático con datos de la estación), que es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. La precisión de la predicción espacio – temporal de las precipitaciones presenta mayor grado de confiabilidad en aquellos lugares donde se tenga mayor información de pluviómetros, lo que implicaría incrementar la cantidad de estaciones meteorológicas a nivel nacional con la finalidad de aprovechar el producto PISCO y aplicarlo a escalas regionales. La información grillada de PISCO sirve para el desarrollo de estudios de modelamiento hidrológico, análisis de sequía, balance hídrico, entre otros. Cabe resaltar que la data grillada de PISCO ya está calibrada y validada con estaciones meteorológicas de la jurisdicción del SENAMHI, sin embargo en puntos de descarga diferentes se debe hacer uso complementario de datos pluviométricos disponibles en el ámbitos de estudio para un adecuado control de calidad (César Aybar, 2016).

Según Lavado & Fernández (2014), PISCO – SENAMHI utiliza tres métodos de interpolación al momento de generar información de precipitación en grillas que tienen como resolución espacial de 5km. Los métodos son:

- Interpolación de ponderación inverso a la distancia (IDW): La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se va a interpolar debe ser una variable dependiente de la ubicación. Este método supone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de

muestra.

- Interpolación por Kriging Ordinario (KO): Es una técnica de interpolación basada en el análisis de la estructura geoestadística avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores altitudinales (Z). Este método se basa en que los valores medidos en lugares cercanos tienden a estar más relacionados que los valores medidos en otros lugares.
- Interpolación por Kriging con deriva externa (KED): Permite la predicción de la variable Z a través de otra variable Y , ambos tienen que formar parte de un pequeño conjunto de puntos de la zona de estudio. KED plantea un cálculo de ponderación basado en un método probabilístico para obtenerlo que está vinculado a indicadores estadísticos y correlaciones espaciales para generar aquellos puntos no estimados.

La metodología para la generación de PISCO precipitación diario (PISCOpd) y precipitación mensual (PISCOpm) se divide en tres subprocesos:

- Control de calidad de la información pluviométrica
- Análisis exploratorio de la información satelital
- Mezcla de datos basados en técnicas geoestadísticas (mensual) y determinísticas (diario)

La versión más reciente de PISCO es v2.1 que fue desarrollado para el periodo de 1981 hasta la actualidad y trabaja con datos grillados con una única resolución de 0.1° . El algoritmo de fusión se basa en estadísticas geoestadísticas y deterministas, métodos de interpolación que incluyen tres fuentes de lluvia diferentes: (i) el conjunto de datos pluviométricos rellenos y su control de calidad, (ii) climatologías combinadas con indicadores de radar y (iii) las estimaciones de precipitación infrarroja del Grupo de Riesgos Climáticos (CHIRP). Los resultados de la validación sugieren que las estimaciones de precipitación son aceptables y muestran el desempeño más alto para la costa del Pacífico y el flanco occidental de los Andes. Además, se ha realizado un meticuloso control de calidad y relleno de vacíos que permitió reducir la formación de información no homogénea. (Cesar Aybar et al., 2020).

5.2.6. Temperatura PISCO v1.1

Diferentes productos grillados a escala mensual han sido establecidos a nivel global y regional para la variable temperatura. El reto se presenta al querer establecer bases a escalas más finas a nivel espacial y temporal debido a que se deberían tener datos meteorológicos más

homogeneizados, es decir que presenten un mayor control de calidad y representatividad climática. De igual forma, es necesario el uso de imágenes satelitales para tener una menor incertidumbre de la estimación de temperatura en zonas de poca o nula información convencional. Ante ello, como propuesta de solución se presenta la versión de PISCO temperatura en su versión 1.1. PISCOt v1.1 tiene un área de influencia nacional y datos diarios desde enero de 1981 hasta diciembre del 2016 a una resolución de aproximadamente 10 km (0.1°) que se basa en la combinación “*merging*” de datos satelitales y datos observados. Para la generación de PISCOt v1.1 se utilizaron datos observados de temperatura del aire máxima (Tx) y mínima diaria (Tn), el producto de temperatura del suelo (LST) del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y predictores estadísticos espaciales como elevación (Z), longitud (X), latitud (Y) y el índice de disección topográfica (TDI). Los datos observados fueron tomados de 684 estaciones climatológicas de la jurisdicción del SENAMHI y fueron sometidos a tres principales procesos como control de calidad, imputación y homogenización. Debido a que las resoluciones de las covariables de la temperatura (LST, X, Y, Z y TDI) fueron diferentes, se optó por ser llevadas a una única resolución de 0.1° que es la misma grilla de PISCOp v2.1. Se cuenta con información de data grillada de temperatura a la misma resolución espacial pronosticada hasta el año 2030 elaborado por la Dirección de Modelamiento Numérico del SENAMHI (Huerta et al., 2018).

5.2.7. Evapotranspiración

Proceso combinado de evaporación desde superficies líquidas y de transpiración o vaporización del agua líquida de los tejidos de las plantas. El agua de la superficie de la tierra, del suelo y de la vegetación se convierte en estado de vapor y es devuelto a la atmósfera. Es un componente importante en el equilibrio del agua a largo plazo de una cuenca. La evapotranspiración varía según la radiación, temperatura, humedad atmosférica y la velocidad del viento (Legal, 2005).

5.2.8. Información del modelo ETA – SENAMHI para pronóstico de precipitación

Es un modelo atmosférico regional usado para investigaciones y operaciones. El SENAMHI utiliza este modelo en forma operacional en dos dominios distintos que abarcan Sudamérica y Perú. En Sudamérica se presenta una resolución horizontal de 32 km, mientras que, en el Perú, una resolución de 22 km. Las previsiones son realizadas con intervalos de 6 horas a las 00Z y 12Z extendiéndose hasta 120 horas para Sudamérica y 72 horas para Perú. El modelo ETA utiliza datos del modelo global de pronóstico GFS, *Global Forecast System* (Sistema de pronóstico

global), que es producido por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (De La Cruz Montalvo, 2016).

5.2.9. Sistema de información geográfica

Fattorelli & Fernandez (2011) indicó, tempranamente, que el SIG es algo manual o computarizado basado en un conjunto de procedimientos usados para almacenar y manipular datos referenciales geográficamente.

Meaden y Kapetsky (1992) se refirieron al SIG como un conjunto de hardware y software integrados que permiten introducir, almacenar, manipular y presentar datos geográficos para una enorme gama de aplicaciones.

Por su parte Rojas (1999) define de manera más global las capacidades del SIG mencionando que su diseño pretende soportar la captura, procesamiento y recuperación de datos referenciados espacialmente. Los SIG deben ser capaces de expresar localización, condición, tendencia, distribución y modelización.

Finalmente, Sosa-Pedroza & Martínez-Zúñiga (2009) expone una definición más actualizada e integral de los procesos que engloba el trabajo con SIG; así, los define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

5.2.10. Modelo hidrológico

Según Geraldi et al. (2010), los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico, por lo tanto, se describe a un modelo hidrológico como una representación de forma esquemática de un fenómeno hidrometeorológico ocurrido dentro de la cuenca hidrográfica. Comprender el ciclo hidrológico significa entender la respuesta de la cuenca de manera continua en el espacio y tiempo y, por tal motivo, es que la base de la modelación hidrológica es la modelación de la cuenca. Por lo tanto, el modelamiento de la cuenca implica integrar componentes del ciclo hidrológico

Cabrera (2016b) presenta los siguientes conceptos relacionados a la modelación hidrológica:

- El proceso de la modelación hidrológica inicia con un “modelo perceptual” donde se

indican los principales procesos y variables que intervengan en la generación de caudales. Los elementos como el suelo, subsuelo y el clima son importantes a considerar pues intervienen en los procesos de la escorrentía, evaporación, infiltración, humedad de suelo, etc. Seguidamente, al conocer los procesos y las variables, éstas deben relacionarse entre sí a través de ecuaciones por medio de un “modelo conceptual” donde se incluyen coeficientes y parámetros que, posteriormente, se les asignará un valor mediante el proceso de calibración.

- Las ecuaciones muy complejas deben ser simplificadas para que puedan ser comprendidas y procesadas por un sistema de cómputo. Este modelo simplificado es una aproximación al modelo conceptual y se le conoce como “modelo procedimental”. La simplificación del modelo conceptual implica la inclusión de nuevos coeficientes y parámetros que entrarán al proceso de calibración.
- El proceso de calibración es una etapa donde se asignan valores a todos los parámetros del modelo de tal forma que los resultados del modelo se ajusten lo mejor posible a los datos históricos registrados. Existen dos maneras de hallar los parámetros, la primera es mediante la calibración manual o también llamada prueba y error, este proceso suele ser lento y, en algunos casos, no muy efectivo; la segunda es mediante la calibración automática que busca optimizar el modelo a través de técnicas numérica de optimización, es un método más eficaz y conciso (Enfermer et al., 2018).
- Los resultados de la simulación son evaluados a través índices de eficiencias y una ecuación que es la “Función Objetivo (OF)”. Un mejor ajuste implica utilizar herramientas estadísticas que, finalmente, reduzcan la diferencia entre los valores simulados y los valores registrados. Algunos indicadores utilizados son el error medio cuadrático, el coeficiente de Nash – Sutcliffe, balance de masas, entre otros.
- Finalmente, el modelo debe pasar por una etapa de validación que consista en la comprobación del correcto funcionamiento del modelo a través de simulaciones, en la cual se evalúa su capacidad de predicción. Asimismo, debe ser utilizado sin dificultades tanto por la comprensión de su funcionamiento como por los requerimientos de su parametrización.

Las bondades del modelo hidrológico sirven como herramienta para la gestión y planeamiento, para una mayor comprensión del rol de las componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca, para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones

actuales y como una base para la modelación de otros procesos relacionados a la calidad de agua, erosión, entre otros. En la Figura 3 se presenta un mapa conceptual con el proceso de modelación (Cabrera, 2016b).

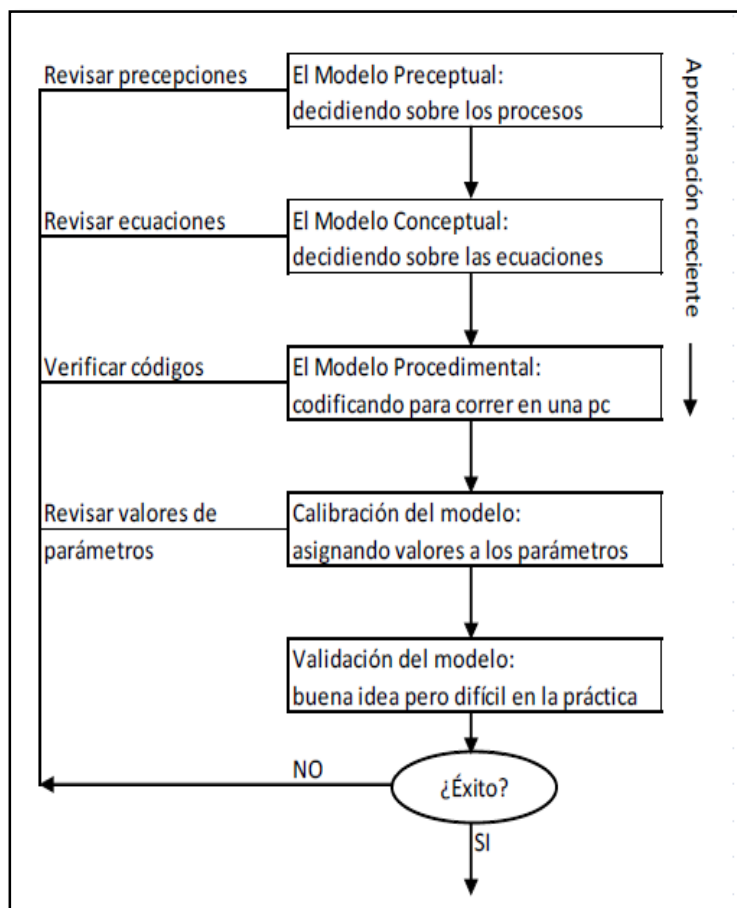


Figura 3: Esquema conceptual de proceso de modelación hidrológica

Fuente: Cabrera (2016b)

5.2.11. Plataforma RS MINERVE

Es un *software* que permite simular la formación y propagación de flujos de escorrentía, asimismo modelar redes hidrológicas e hidráulicas de acuerdo con un esquema semi-distribuido conceptual. También puede simular procesos hidrológicos como el deshielo de los glaciares, el flujo subterráneo, la fusión de la nieve, así como incluir elementos de control hidráulico como aliviaderos, turbinas, bombas, entre otros. RS MINERVE incluye diferentes modelos hidrológicos para el cálculo de la escorrentía tales como GR4J, HBV, GSM, SOCONT y SAC-SMA, además incorpora un módulo de GIS que permite crear automáticamente modelos hidrológicos completos a partir de capas vectoriales y dispone de un módulo para la calibración automática utilizando diferentes algoritmos. Una de sus bondades es que permite simular escenarios meteorológicos o e gestión hidráulica utilizando diferentes series de datos

introducidos en la base de datos que puede incorporar cada modelo (García Hernández et al., 2020). En la Figura 4 se presenta el ejemplo de un modelo simple en la plataforma RS-MINERVE.

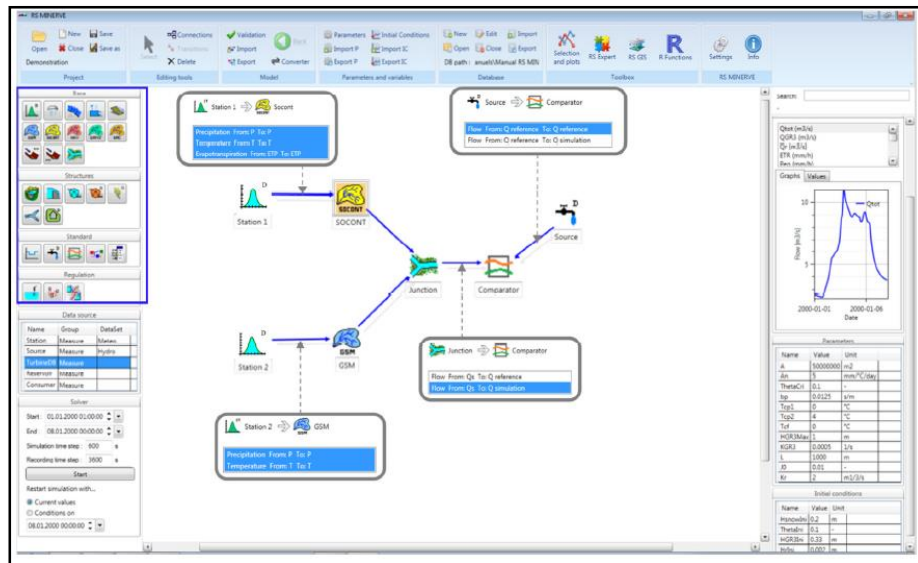


Figura 4: Ejemplo de modelo simple
Fuente: García Hernández et al. (2020)

5.2.11.1. Estación meteorológica virtual

Normalmente se ubica en el centro de gravedad de una subcuenca, para lo cual se expresa con referencia espacial en coordenadas métricas de X, Y, Z. La estación virtual permite distribuir espacialmente las variables meteorológicas como la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP) partir de mediciones o estimaciones disponibles de una base de datos observados (Foehn et al., 2020).

Para la distribución espacial de la precipitación la temperatura y la ETP, la plataforma RS MINERVE cuenta con dos métodos que son:

- *Thiessen* que busca la estación meteorológica más cercana para obtener la variable meteorológica en la estación virtual.
- *Shepard* que calcula la variable meteorológica en función de la ponderación de la distancia inversa y busca estaciones que se encuentren en un radio de búsqueda definido.

5.2.11.2. Características del modelo hidrológico GR4J

GR4J (*Génie Rural a 4 parametres Journalier*) es un modelo de lluvia – escorrentía agregado, de cuatro parámetros y resolución diaria que fue desarrollado inicialmente en Francia a principios de 1980. Puede representar descargas medias diarias con cuatro parámetros para lo cual requiere de información de precipitación y evapotranspiración media diaria con la finalidad de generar una serie de caudales. El concepto del modelo GR4J está basado en dos reservorios que se encargan de almacenar la precipitación neta y, además, donde se producen los fenómenos de percolación e infiltración (Perrin et al., 2003). En el modelo, la precipitación y la evapotranspiración se denotan como P y E, respectivamente. P es calculada según los registros de las estaciones más cercanas utilizando el método de interpolación espacial, mientras que E, puede ser un valor promedio diario de largo plazo (Carvajal & Roldan, 2007). Los parámetros (entradas, salidas, variables internas) están expresadas en mm por lo que los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario. En la Tabla 3 se presentan los parámetros del modelo, mientras que en la Figura 5 se muestra el esquema del modelo hidrológico GR4J (Perrin et al., 2003).

Tabla 3: Parámetros para el modelo hidrológico GR4J

Nombre	Descripción	Unidades
X1	Capacidad máxima del reservorio de producción	mm
X2	Coefficiente de intercambio de agua	mm
X3	Capacidad de depósito de laminación	mm
X4	Tiempo base del hidrograma unitario	día

Fuente: García Hernández et al., 2020

A continuación se describen los pasos del modelo de lluvia – escorrentía GR4J (Carvajal & Roldan, 2007).

- Determinación de la precipitación y evapotranspiración potencial neta: Consiste en restar la evapotranspiración potencial de la precipitación con la finalidad de conseguir la precipitación neta P_n o una capacidad de evapotranspiración E_n . Estos resultados son calculados al considerar la capacidad de interceptación igual a cero, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{Si } P \geq E, \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Si } P < E, \text{ entonces } P_n = 0 \text{ y } E_n = E - P \dots\dots\dots (2)$$

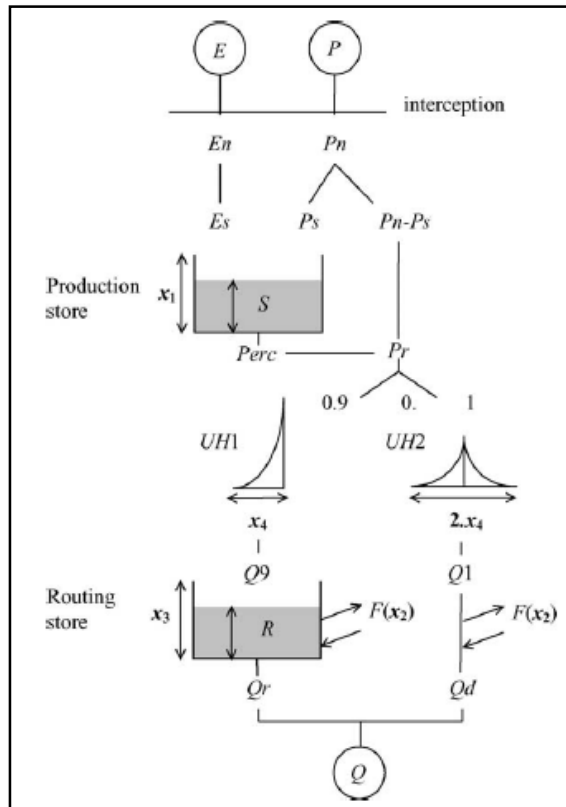


Figura 5: Esquema del modelo hidrológico GR4J
Fuente: Perrin et al., 2003

- Almacenamiento de producción: Cuando se considera que P_n no es cero, se considera que una parte P_s de P_n, entra al tanque de producción y se presenta la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \left(\frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \dots\dots\dots (3)$$

El valor de P_s es determinado como una función del nivel S en el tanque, donde X₁ (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción.

Al tener un valor de E_n igual a cero, se determina una tasa real de evaporación que está en función del nivel en el almacenamiento de producción con el objetivo de calcular la cantidad de E_s de agua que, finalmente, se evaporará del tanque. Su ecuación es representada por la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \dots\dots (4)$$

El contenido de agua en el tanque de producción se expresa mediante la ecuación (5). Además, se considera que una cantidad *Perc* se escapa como percolación del almacenamiento de producción, que es obtenida mediante la ecuación (6). Se debe considerar que el valor de *S* no debe ser superior a x_1 .

$$S = S - E_s + P_s \dots\dots\dots (5)$$

$$Perc = S \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1}\right)^4\right]^{\frac{-1}{4}}\right\} \dots\dots\dots(6)$$

La percolación no contribuye mucho al caudal y el valor de *Perc* es siempre menor que *S*, por lo tanto, el valor del nuevo nivel en el tanque queda expresado como:

$$S = S - Perc \dots\dots\dots (7)$$

- Distribución lineal con hidrógrafas unitarias: P_r es la cantidad total de agua que alcanza las funciones de distribución y se expresa como:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \dots\dots\dots (8)$$

P_r se divide en dos componentes de flujo en el que el 90 % de P_r se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria UH1 y después por un tanque de distribución no lineal. El 10 % de P_r es distribuido a través de una hidrógrafa unitaria UH2. A partir de las dos unidades hidrógrafas se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las hidrógrafas UH1 y UH2 dependen del parámetro x_4 que está expresado en días. Ambas hidrógrafas tienen ordenadas *n* y *m*, respectivamente, que son usadas en el modelo para la distribución de la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. Se indica que UH1 utiliza un tiempo de base de x_4 días, mientras que UH2 utiliza un tiempo de base de $2x_4$. Se considera que el parámetro x_4 puede tomar valores reales y que sean mayores a 0.5 días. Las ordenadas *n* y *m* son los enteros más pequeños que exceden x_4 y $2x_4$, respectivamente. Estas ordenadas son calculadas a través de la curva - *S* denotadas por SH1 y SH2.

SH1 se define a lo largo del intervalo de tiempo *t* y es expresada de la siguiente manera:

$$\text{Si } t \leq 0, SH1_{(t)} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Si } 0 < t < x_4, SH1_{(t)} = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{Si } t \geq x_4, SH1_{(t)} = 1 \dots\dots\dots (11)$$

Mientras que SH2 se expresa como:

$$\text{Si } t \geq x_4, SH2_{(t)} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{Si } 0 < t < x_4, SH2_{(t)} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{Si } x_4 < t < 2x_4, SH2_{(t)} = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{Si } t \geq 2x_4, SH2_{(t)} = 1 \dots\dots\dots (15)$$

Finalmente, las ordenadas son calculadas mediante la siguiente expresión:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \dots\dots\dots (16)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \dots\dots\dots (17)$$

Donde j es un número entero.

- Intercambio de agua en la cuenca: Se calcula el valor de F que indica el intercambio de agua subterránea y que actúa en ambas componentes de flujo.

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3}\right)^{\frac{7}{2}} \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

R representa el nivel en el tanque de distribución

x_3 es la capacidad de referencia

x_2 es el coeficiente de intercambio. Es positivo cuando se importa agua, negativo cuando hay pérdidas y cero cuando no se produce el intercambio de agua.

Cabe mencionar que, a mayor nivel en el tanque, se presenta un mayor intercambio de agua. El valor de F no puede ser mayor que x_2 debido a que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a (de) cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a x_3 .

- Almacenamiento de distribución no lineal: El valor de R se actualiza al integrar los valores de F y la salida de Q9 proveniente de UH1, teniendo la siguiente ecuación:

$$R = \max (0; R + Q9 + F) \dots\dots\dots(19)$$

Mediante la siguiente expresión se calcula el caudal de salida del tanque denominado Qr

$$Qr = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

El valor de R es mayor que Qr, por lo tanto, el nivel en el almacenamiento queda expresado como:

$$R = R - Qr \dots\dots\dots (21)$$

La capacidad x3 es considerada la capacidad máxima diaria debido a que el tanque nunca puede exceder a capacidad x3 al final del intervalo de tiempo. El tanque de distribución puede simular recesiones cuando sea necesario.

- Caudal total: Representado por Qd. Para su cálculo se considera la salida Q1 que proviene de UH2 y que, también, está vinculada al intercambio de agua F.

$$Qd = \max (0; Q1 + F) \dots\dots\dots (22)$$

Finalmente, el caudal total se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q = Qr + Qd \dots\dots\dots (23)$$

5.2.11.3. Indicadores estadísticos de bondad de ajuste

Los indicadores demuestran si los datos registrados presentan similitud con los datos simulados. A continuación, se presentan los indicadores con los que se trabajaron:

- Coeficiente Nash-Sutcliffe

La simulación es perfecta al presentarse un Nash igual a uno. Este coeficiente es una estadística normalizada que indica la variabilidad de los datos observados en relación con los datos

simulados. En la Tabla 4 se muestra la clasificación de valores según el criterio de Nash – Sutcliffe. Al presentarse un valor más elevado del Nash, se indica que se presenta menor variabilidad entre las descargas observadas y simuladas (Carmona Arteaga, 2017). El coeficiente de Coeficiente Nash-Sutcliffe se representa con la siguiente ecuación:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t (m³/s)

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t (m³/s)

\bar{Q}_{ref} : Promedio de descargas en el periodo de tiempo considerado (m³/s)

El criterio de Nash – Sutcliffe es muy importante ya que es uno de los más usados en modelos hidrológicos.

Tabla 4: Clasificación de valores según el criterio de Nash – Sutcliffe

Nash	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Cabrera (2016a)

- Coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico (Nash-ln)

Según Cabrera (2016) indica que al presentarse valores elevados de la variable simulada se aplica el coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico. Este coeficiente suele conseguir disminuir el problema de las cuencas con alto dinamismo de caudales, asimismo evalúa el desempeño de énfasis a la evaluación de los caudales en temporadas de estiaje.

Para su cálculo se emplean valores logarítmicos del caudal observado y el caudal simulado. Los valores que toma este coeficiente se encuentran en el rango de $-\infty$ a 1 siendo la unidad el valor óptimo. Su ecuación se representa de la siguiente manera:

$$Nash - ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref}))^2}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t en m³/s

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t en m³/s

\bar{Q}_{ref} : Promedio de descargas observadas en el periodo de tiempo en m³/s

- Coeficiente de correlación de Pearson

Es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables que son los datos simulados y los datos observados. Su coeficiente de correlación (r) está en el rango de -1 a 1. Si el valor obtenido es 0 significa que no existe una relación lineal, caso contrario si es el valor de r es igual a -1 o 1, significa que existe una perfecta relación lineal ya sea negativa o positiva, respectivamente (Aghakouchak & Habib, 2010). La ecuación del coeficiente de Pearson es la siguiente:

$$Pearson = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) * (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 * (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t (m³/s)

\bar{Q}_{sim} : Promedio de descargas simuladas en el periodo de tiempo (m³/s)

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t (m³/s)

\bar{Q}_{ref} : Promedio de descargas en el periodo de tiempo considerado (m³/s)

- Coeficiente Kling – Gupta Efficiency (KGE)

Según Gupta et al (2009) este coeficiente busca proporcionar un indicador para problemas de modelamiento hidrológico utilizando competentes de correlación y variabilidad que faciliten un análisis global. Su valor varía de 0 a 1, siendo óptimo la unidad. La ecuación que lo representa es la siguiente:

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación entre los caudales simulados y observados

β : Proporción entre la media de los caudales simulados y caudales observados

γ : Proporción de variabilidad, proporción entre el coeficiente de variación de los caudales simulados y el coeficiente de variación de los caudales observados.

- Bias Score

Indicador utilizado como una estimación simétrica entre la inversa de la descarga promedio simulado y la descarga promedio observada. El rango de valores está de 0 a 1 -; sin embargo. los valores que estén cercanos a la unidad indican una buena simulación (Zapana Arpasi, 2019). La ecuación que lo representa es la siguiente:

$$BS = 1 - \left[\max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right]^2$$

Donde:

\bar{Q}_{sim} : Promedio de descargas simuladas en el periodo de tiempo en m³/s

\bar{Q}_{ref} : Promedio de descargas observadas en el periodo de tiempo en m³/s

- Error relativo de la raíz cuadrática media (RRMSE)

Permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores de las caudales simulados en relación con los valores de las caudales observados. El rango de los valores para RRMSE están entre cero al infinito positivo. Aquellos valores que sean menores a 0.1, considera que la simulación es excelente, buenos cuando los valores estén en el rango de 0.1 a 0.2, válidos en el rango de 0.2 a 0.3 y pobres cuando los valores sean superiores a 0.3 (García Hernández et al., 2020). El RRMSE se representa con la siguiente ecuación:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{n}}}{\bar{Q}_{ref}}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t (m^3/s)

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t (m^3/s)

\bar{Q}_{ref} : Promedio de descargas en el periodo de tiempo considerado (m^3/s)

n : número de descargas observadas

- **Volumen relativo Bias (RVB)**

Corresponde al error relativo entre los caudales simulados y los caudales observados que se producen durante el periodo de estudio. Su rango de valores está entre el $-\infty$ y $+\infty$. Los valores cercanos a cero indican una buena simulación, mientras que los valores negativos indican que los caudales promedios simulados son menores que los caudales promedios observados, caso contrario cuando el valor es positivo ya que indica que los caudales promedios simulados son mayores que los caudales promedios observados (García Hernández et al., 2020). Su ecuación se representa de la siguiente manera:

$$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})}{\sum_{t=t_i}^{t_f} Q_{ref,t}}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t , en m^3/s

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t , en m^3/s

- **Error pico normalizado (NPE)**

Indica el error relativo entre los caudales simulados pico y los caudales observados pico. Su rango varía entre $-\infty$ y $+\infty$. Valores negativos indican que el caudal máximo simulado es menor que el caudal máximo observado, sucede lo contrario al presentarse valores positivos. Su valor óptimo son lo que están cerca a cero (Zapana Arpasi, 2019). La ecuación que lo representa es:

$$NPE = \frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}}$$

Donde:

S_{max} : Caudal máximo simulado en m^3/s

R_{max} : Caudal máximo observado en m^3/s .

5.2.11.4. Algoritmos de calibración

La herramienta “Calibrator” del software RS MINERVE tiene la función de calibrar los parámetros del modelo hidrológico para lo cual utiliza la función objetivo (OF) que se basa en una ecuación y un procedimiento automático de optimización con la finalidad de buscar valores de parámetros que optimicen el valor de la función objetivo (Enfermer et al., 2018).

La función objetivo (OF) es utilizada para evaluar los resultados de las simulaciones hidrológicas por medio de índices de eficiencia. Puede adaptarse a los requisitos de cada usuario, es decir, puede combinar índices de eficiencia utilizando una optimización multiobjetivo para calibrar el modelo hidrológico. La ecuación que representa la función objetivo es la siguiente:

$$OF = \max(Nash * w_1 + Nashln * w_2 + Pearson * w_3 + KG * w_4 + BS * w_5 - RRMSE * w_6 - |RVB * w_7| - |NPE * w_8|)$$

Los tres algoritmos de calibración que utiliza la plataforma RS MINERVE son:

- Shuffled Complex Evolution University of Arizona (SCE-UA)

Método de optimización global que está diseñado para resolver problemas en la calibración de modelos hidrológicos. Fue desarrollado en la Universidad de Arizona.

- Uniform Adaptative Monte Carlo (UAMC)

Está basado en los experimentos Montecarlo que realiza muestreos aleatorios para obtener resultados de simulación. El algoritmo lanza aleatoriamente una colección de simulaciones (bloque) y encuentra los mejores resultados en el espacio de solución. Seguidamente, el espacio de solución se ajusta y vuelve a darse un nuevo grupo de simulaciones, este proceso se sigue dando hasta que el optimizador encuentre el mejor conjunto de parámetros.

- Coupled Latin Hypercube and Rosenbrok (CLHR)

Este algoritmo combinado puede discretizar un amplio dominio de datos y luego especificar la búsqueda en un sector más pequeño.

En la Tabla 5 se presentan los indicadores de desempeño que utiliza la función objetivo OF (Gupta et al., 2009).

Tabla 5: Indicadores estadísticos y valores referenciales

Indicador	Peso	Mín	Máx	Valor óptimo
Nash	W1	$-\infty$	1	1
Nash-ln	W2	$-\infty$	1	1
Pearson Correlation Coeff	W3	-1	1	1
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	W4	$-\infty$	1	1
Bias Score (BS)	W5	0	1	1
RRMSE	W6	0	∞	0
Relative Volume Bias (RVB)	W7	$-\infty$	∞	0
Normalized Peak Error (NPE)	W8	$-\infty$	∞	0

Fuente: Zapana Arpasi (2019)

VI. METODOLOGÍA

6.1. Zona de estudio

6.1.1. Características generales de la cuenca del río Huallaga

La cuenca del río Huallaga, perteneciente a la Vertiente del Atlántico, nace en las alturas de Cerro de Pasco, al sur de la cordillera de Raura, en la laguna Huascacocha. Posee una extensión aproximada de 1389 kilómetros y una altura que oscila entre los 130 y 4500 msnm. Atraviesa los departamentos de Pasco, Huánuco, San Martín y Loreto (ANA, 2015).

Según ANA (2015) menciona que “El río Huallaga nace en el departamento de Pasco, fluye en dirección norte formando un importante valle interandino entre la provincia de Ambo y Santa María del Valle. Sigue descendiendo, pasando por Tomayquichua y Huánuco, ya a 1900 msnm. Tras un corto tramo vuelve a encaminarse hacia el norte y pasa por Japuar. Tras dejar atrás San Juan, el río conforma durante un tramo (unos 15 km) el borde occidental del Parque Nacional Tingo María. Sigue el río hacia el norte donde se interna en el departamento de San Martín y llega a la ciudad de Tocache. Continúa por Puerto Pizana, Balsayacu, Huacamayu, San Julián, Sion, Valle y Tambillo. Recibe por la izquierda al río Huayabamba (con su importante afluente, el río Abiseo) y llega enseguida a Juanjuí. Alcanza Bellavista, sigue por Picota, Machungo y Utcuarca, donde recibe por la margen derecha al río Mayo. Se adentra entonces en el departamento de Loreto. Continúa por Boca del Chipari y Yurimaguas, ubicada en la confluencia con el río Paranapura, antes de desembocar en el Marañón por su margen derecha, donde forma dos brazos que rodean la isla de Mito” (p.62).

La cuenca alta es angosta con limitado desarrollo agropecuario, mientras que la cuenca media y baja poseen tierras más fértiles y desde Tingo María es un río navegable en balsas y canoas (ANA, 2015).

La Autoridad Nacional del Agua delimitó en nueve unidades hidrográficas a la cuenca del río Huallaga debido a su gran extensión. En la Tabla 6 se muestran los detalles.

6.1.2. Caracterización de la zona de estudio de la cuenca del Alto Huallaga

La cuenca del Alto Huallaga posee un área de 30275.9 Km² y abarca, políticamente, los departamentos de San Martín, Huánuco y una parte de Pasco.

El río posee un recorrido inicial de Oeste a Este aumentando su cauce en la ciudad de Huánuco.

La máxima elevación del territorio es de 5500 msnm y la mínima de 750 msnm en las partes más bajas de la cuenca ingresando a la ceja de selva. Según la ANA (2015), esta zona tiene un relieve accidentado con zonas montañosas, glaciares y valles alcanzando una pendiente promedio del 12% en las partes más altas y de 0.2% en las partes más bajas de la cuenca.

Las máximas precipitaciones se presentan durante los meses de diciembre a marzo (temporada de avenidas) que, de acuerdo al registro histórico, puede llegar a caudales superiores a los 320 m³/s. En las zonas aledañas existen áreas que podrían verse afectadas ante inundaciones por severas precipitaciones que son Colpa Alta, Colpa Baja y zonas del aeropuerto pertenecientes al distrito de Churubamba, provincia de Huánuco. En la Figura 6 y Figura 7 se muestran la ubicación de la cuenca en estudio a nivel nacional y regional. En la Figura 8 se aprecia la cuenca en estudio, sus ríos y las zonas altitudinales.

Tabla 6: Unidades hidrográficas de la cuenca del Huallaga

Cuenca	Unidad Hidrográfica	Código	Superficie (Km ²)	Porcentaje (%)
	Alto Huallaga	49849	30275.9	33.9
	Medio Huallaga	49845	2133.3	2.4
	Medio Alto Huallaga	49847	5064.1	5.7
	Huayabamba	49848	13801	15.4
Huallaga	Medio Bajo Huallaga	49843	8926.2	10
	Paranapura	49842	3965.6	4.4
	Mayo	49844	9722.4	10.9
	Bajo Huallaga	49841	8416.7	9.4
	Biabo	49846	7111	8
	Total		89416.2	100

Fuente: ANA (2015)



Figura 6: Plano de las cuencas hidrográficas del Perú y ubicación de la Intercuenca del Alto Huallaga

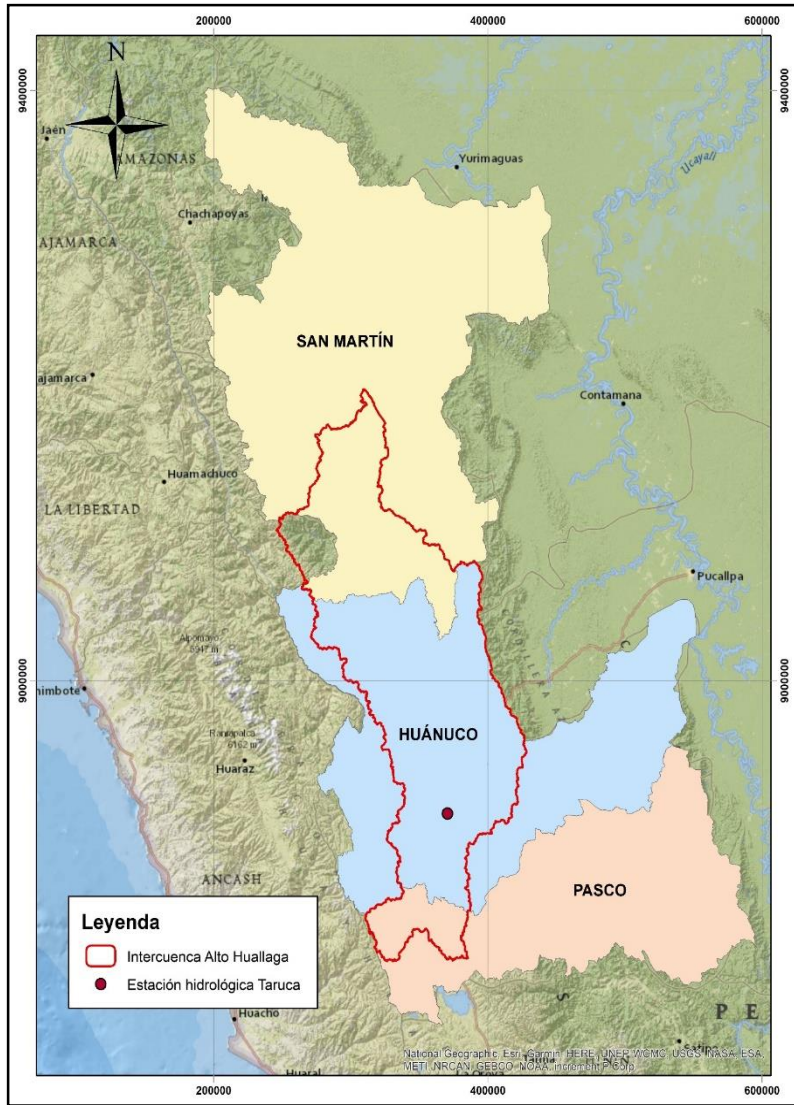


Figura 7: Ubicación de la zona de estudio a nivel regional

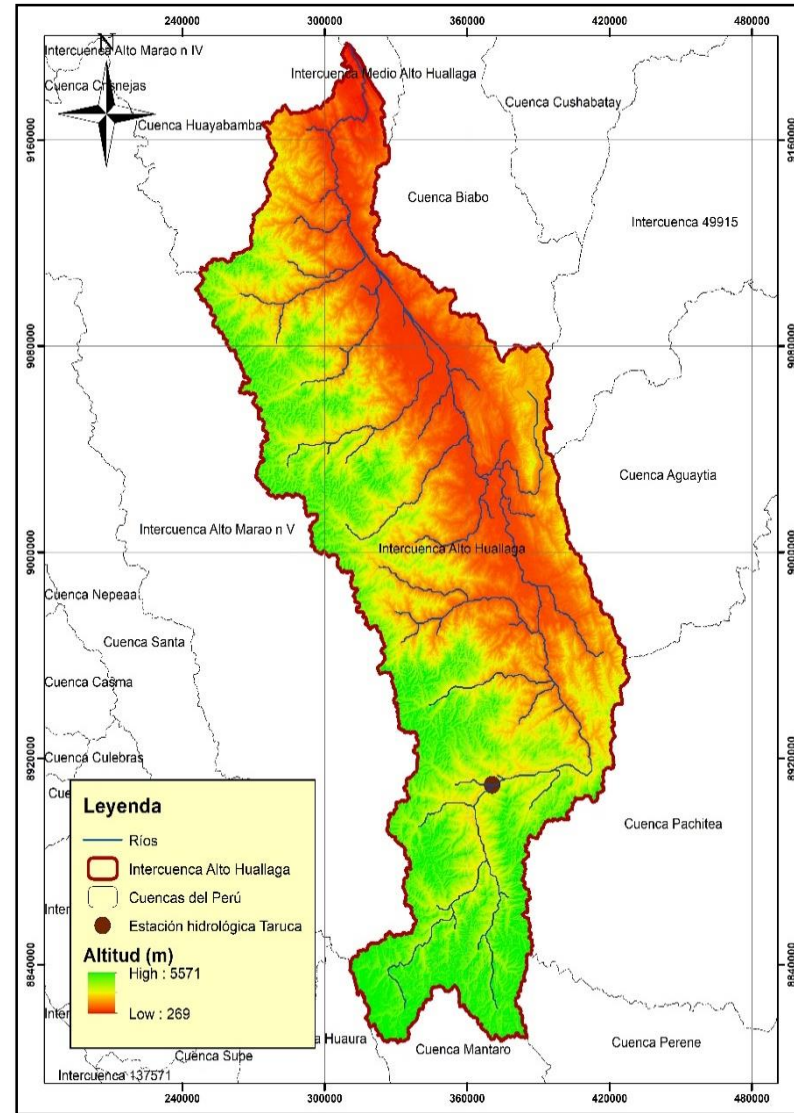


Figura 8: Ubicación de la zona de estudio a nivel de cuenca y zonas altitudinales

6.1.3. Información cartográfica

Para identificar y analizar el área de estudio es indispensable utilizar la información cartográfica con la finalidad de determinar características fisiográficas de la cuenca. Se utilizaron las cartas nacionales correspondientes a los departamentos de San Martín, Huánuco y Pasco las cuales fueron descargadas en formato *shapefile* desde el siguiente link <https://www.geogpsperu.com/2020/09/descargar-cuencas-hidrograficas-del.html> para obtener las cuencas hidrográficas y <https://www.geogpsperu.com/2020/10/rios-del-peru-red-hidrografica.html> para obtener la red hidrográfica.

6.1.4. Información climática

Hace referencia a la información de precipitación y temperatura necesaria para ejecutar el modelo hidrológico GR4J, para lo cual se utilizaron datos grillados de información meteorológica de registros históricos diarios de precipitación y promedios de temperatura provenientes del PISCO – SENAMHI de la versión 2.1 para precipitaciones y versión 1.1 para temperaturas. Los datos grillados presentan una resolución de 0.1° , aproximadamente, de 10 km. En la Tabla 3 se muestran las estaciones virtuales que fueron trabajadas usando el producto PISCO – SENAMHI. Cabe resaltar que toda la información obtenida pasó por un control de calidad lo que garantiza su autenticidad (Cesar Aybar et al., 2020).

6.1.5. Información hidrométrica

La información hidrométrica utilizada fue de la estación hidrológica automática Taruca ubicada en el departamento Huánuco y que es de la jurisdicción del SENAMHI. Cuenta con un registro de caudales desde el 2014 hasta la actualidad. La estación cuenta con una regla limnimétrica ubicada en la margen izquierda del río, tiene un sensor automático tipo piezométrico instalado para la lectura horaria de los niveles que reporta durante las 24 horas. Además, se cuenta con una curva de gasto calibrada para este punto de control que genera caudales de manera diaria. Asimismo, el área de estudio evaluado ha sido delimitado a partir de la estación hidrométrica Taruca donde sus coordenadas UTM se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Ubicación geográfica de la estación hidrológica Taruca

ESTACIÓN HIDROLÓGICA TARUCA			
COORDENADAS			
UTM	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
	370550.2	8909785.7	1854

En la Figura 9 se aprecia el registro de caudales para la estación hidrológica Taruca durante el periodo del 15 de enero del 2014 al 31 de agosto del 2020.

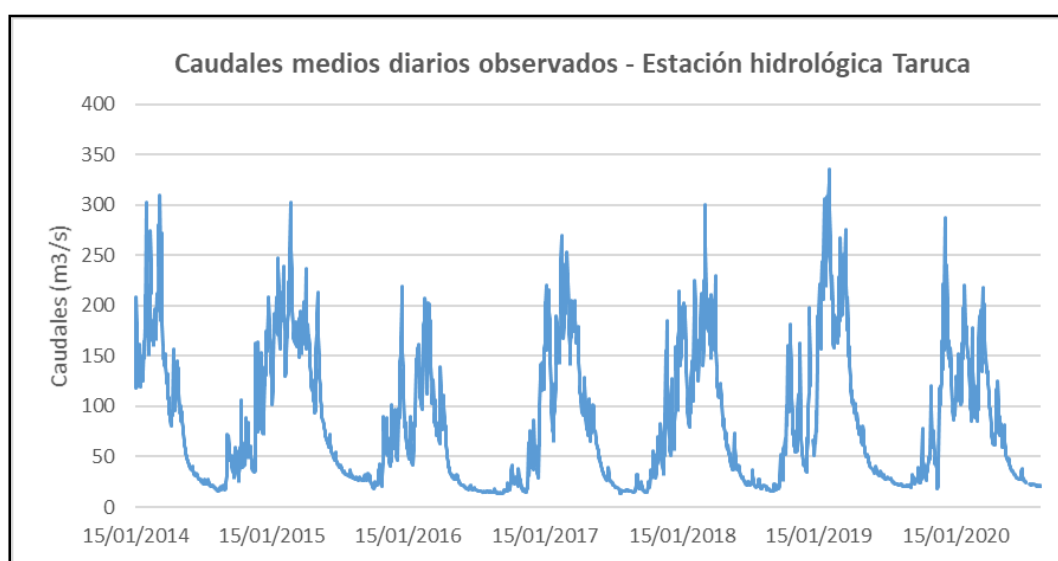


Figura 9: Registro de caudales medios diarios en la estación hidrológica Taruca – SENAMHI

6.1.6. Equipos y programas

- Equipos:
 - Laptop TOSHIBA
 - Impresora
 - Útiles de escritorio
- Software
 - Microsoft Word
 - Microsoft Excel
 - Adobe Acrobat

- ArcGIS 10.5
- Arc Hydro Tools
- Qgis 3.0
- RS – MINERVE 2.7

6.2. Secuencia metodológica

Para que la información sea procesada en la plataforma de RS-MINERVE, previamente se realizaron los siguientes pasos:

6.2.1. Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio se trabajó con el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la Intercuenca Alto Huallaga, posteriormente se procedió a activar las herramientas del *Arc Hydro Tools* para generar las subcuencas de estudio utilizando los siguientes comandos ubicados en la pestaña *Terrain Preprocessing*:

- *DEM Manipulation – Fill Sinks*: Conocido como llenado de sumideros, es decir que esta herramienta permite ajustar las celdas del DEM las cuales están rodeadas de grandes valores de elevación en donde el flujo de agua se detiene y no puede continuar su curso normal. Esta herramienta permite rellenar las imperfecciones que existen en el ámbito del modelo digital de elevaciones.
- *Flow Direction*: Esta opción permite identificar las direcciones que puede llevar la corriente de agua gracias a la creación de mapas de direcciones de flujo. Permite ayudar a saber a dónde viene el agua y hacia dónde se va a lo largo de la superficie del territorio.
- *Flow Accumulation*: La herramienta calcula sobre las celdas de *Flow Direction*, un flujo acumulado que represente el flujo en cada celda de pendiente descendiente en el *raster* de salida, es decir, un mapa que represente los lugares donde se acumula el agua en el territorio de mayor o menor medida. Los niveles digitales que toma el *raster* resultado, muestra las ubicaciones donde se pueden definir e identificar drenajes y arroyos, los cuales corresponden a los valores más altos del *raster* de salida. Los niveles digitales iguales a cero indican que sobre esas ubicaciones existen las máximas alturas relativas y se utilizan para definir fronteras sobre la dispersión del recurso hídrico.

- *Stream Definition*: En base al *raster Flow Accumulation*, esta herramienta permite definir las corrientes en la cuenca, considerando un umbral previamente asignado. El resultado fue un *raster* que presentó dos valores en sus niveles digitales: 1 indicando la mayor acumulación de flujo y NoData indica la no existencia de drenajes esas subcuencas,
- *Stream Segmentation*: Permite segmentar los tramos con la finalidad de identificarlos individualmente. Esto ayuda a asignar a cada tramo una cuenca que lo nutre hidrológicamente. Esta función crea una *grid* de segmentos de ríos que tienen una identificación púnica.
- *Catchment Grid Delineation*: Es la delimitación grillada en subcuencas. Este proceso crea un *grid* en la que cada celda tiene un código en el que indica a qué subcuenca pertenece.
- *Catchment Polygon Processing*: Corresponde al procesamiento polígonos de cuencas, por lo tanto, esta opción crea una capa vectorial a partir de la opción anterior “*Catchment Grid Delineation*” Convierte las subcuencas divididas en polígonos en formato shp.
- *Drainage Line Processing*: Este proceso corresponde al procesamiento de líneas de drenaje, su función es convertir el *grid* correspondiente del “*Stream Link*” en una clase de línea de drenaje.

En la Figura 10 se muestra el procesamiento del modelo de elevación digital de la cuenca del Alto Huallaga con la aplicación de las herramientas del *Archydro Tools*.

6.2.2. Parámetros geomorfológicos

Los parámetros geomorfológicos evaluados fueron el área, perímetro y la ubicación del centroide. Estos datos son importantes ya que es la base de datos de entrada para la plataforma del RS-MINERVE, asimismo la plataforma requiere de la ubicación y distribución espacial de las variables meteorológicas.

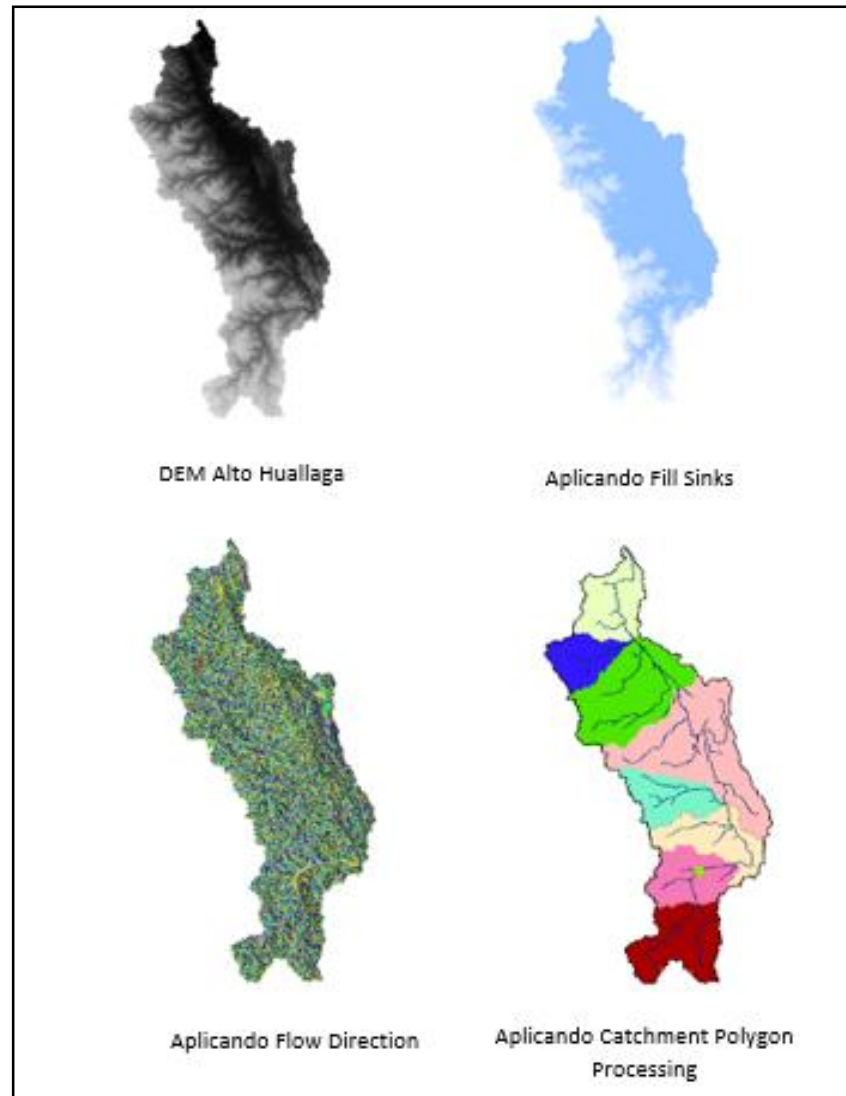


Figura 10: Delimitación de la intercuenca del Alto Huallaga usando las herramientas del Archydro Tools

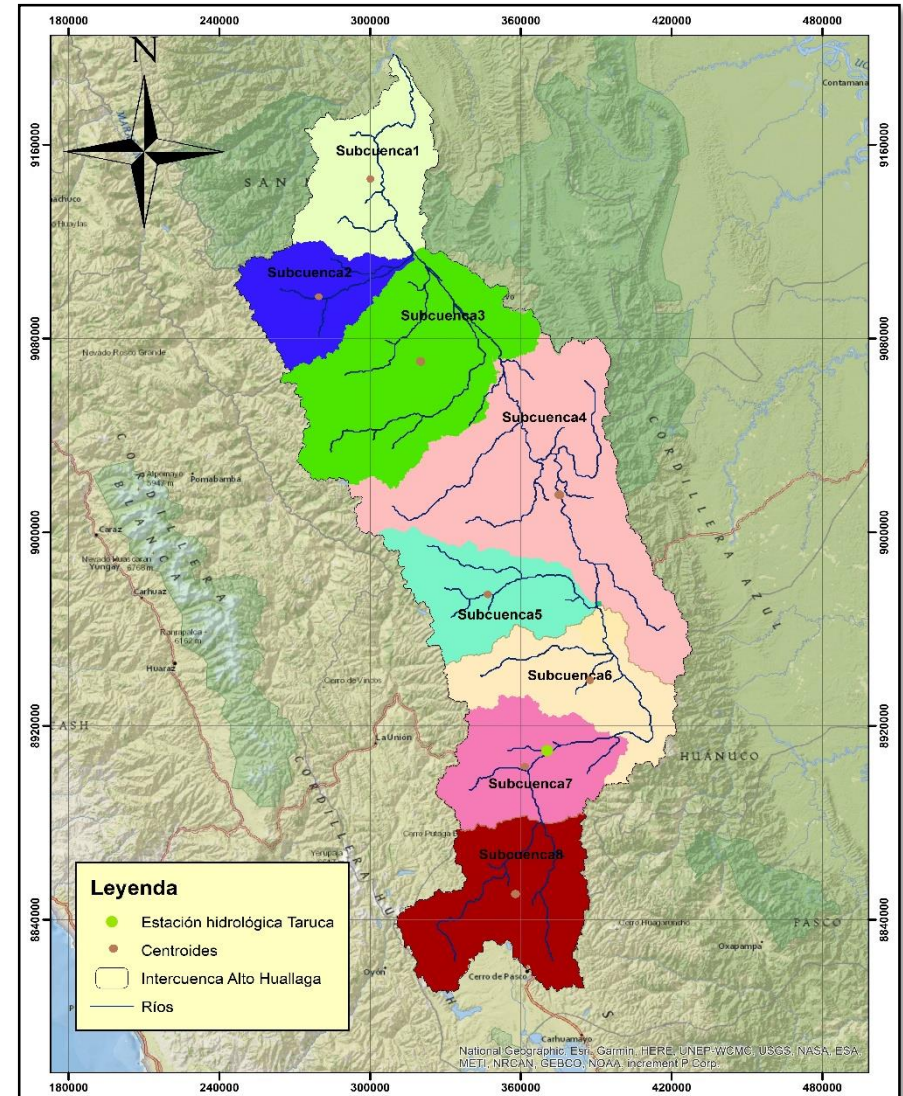


Figura 11: Ubicación de centroides de cada subcuenca

Para conocer los parámetros geomorfológicos de cada subcuenca se usó el *software* ArcMap 10.5. Luego de tener delimitadas las ocho subcuencas con las herramientas del *Archydro Tools* se procedió a abrir la Tabla de Atributos y crear dos columnas identificadas con el nombre de Área_km2 y Perímetro_km, seguidamente con la opción *Calculate Geometry* se halló las áreas y perímetros en km² y km, respectivamente.

6.2.3. Estación virtual

La estación virtual está asociada a las coordenadas de X, Y, Z y está relacionada con la distribución espacial de variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura. Las estaciones virtuales están asociadas a los centroides de las subcuencas que fueron delimitadas anteriormente. Los centroides fueron calculados con el *software* Qgis utilizando la opción de “Centroides” que se encuentra en las herramientas de Geometría Vectorial. Para conocer las coordenadas se agregaron en la “Tabla de Atributos”, tres columnas con nombres de Latitud, Longitud y Altitud y haciendo uso de los comandos de la herramienta “Calculadora de Campos” se obtuvieron los centroides. En la intercuenca del Alto Huallaga se trabajó con ocho subcuencas, por lo tanto, se obtuvieron ocho centroides y ocho estaciones virtuales.

Cabe mencionar que en la plataforma de RS MINERVE, el método que se utilizó para la distribución de precipitación y temperatura fue por el método Thiessen. Este método pretende buscar la estación meteorológica más cercana para cada variable meteorológica.

En este trabajo se consideraron ocho estaciones virtuales ubicadas a lo largo de la cuenca del Alto Huallaga. En la Tabla 8 se presentan las estaciones virtuales de cada subcuenca.

Tabla 8: Estaciones virtuales de las subcuencas

Estación virtual	X	Y	Z
Subcuenca1	300491.83	9146952.1	1098
Subcuenca2	277044.22	9097399.5	1740
Subcuenca3	307454.03	9081968.5	1965
Subcuenca4	353266.41	9028391.1	1424
Subcuenca5	345925.68	8974816.4	1088
Subcuenca6	381776.96	8930598.8	2168
Subcuenca7	352884.31	8900647.4	2574
Subcuenca8	354235.7	8846638.3	4093

6.2.4. Evapotranspiración (Eto)

La plataforma RS MINERVE realiza el cálculo de la evapotranspiración teniendo como base la precipitación y temperatura. La plataforma a través de diferentes métodos calcula el valor de la ETo directamente en la estación virtual.

6.2.5. Obtención de la precipitación diaria PISCOp 2.1

Para obtener la precipitación diaria por PISCO, fue necesario ubicar los centroides de cada subcuenca y conocer sus coordenadas. Cabe resaltar que se trabajó con la base de datos de PISCO v2.1 que cuenta con un registro de precipitaciones desde el 01 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2020, asimismo los datos grillados de precipitación presentan una resolución de 10 km. En el área de estudio se trabajó con ocho subcuencas, por lo que se obtuvo los centroides de cada una de ellas, considerándose que en cada punto se ubica la estación virtual. La información de PISCOp es proporcionada por la Dirección de Modelamiento Numérico del SENAMHI.

6.2.6. Obtención de la temperatura diaria PISCOt 1.1

Los datos grillados de temperatura presentan la misma resolución que los datos grillados de precipitación (0.1°). La información utilizada son datos grillados de temperaturas promedios diarios. Para la extracción de los valores se utilizó un código *Script* en el programa RStudio y, de esta manera, se obtuvieron las temperaturas promedias diarios para cada centroide.

6.2.7. Previsiones de precipitaciones con el modelo ETA scal

Los datos grillados que se utilizaron para el pronóstico de precipitación provienen del modelo operacional ETA scal con una resolución espacial de 22 km que es trabajada en la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera. Cabe resaltar que el resultado final es un archivo en formato .csv donde se muestra el registro histórico de precipitación de PISCO con una resolución espacial de 10 km y, también, el pronóstico de precipitaciones con un horizonte de tres días extraídas del modelo ETA 22 km. Para obtener este producto final, se realizan, previamente, interpolaciones a través de un código Script en el programa RStudio debido a las diferentes resoluciones de grilla que se tienen respecto a las precipitaciones.

6.2.8. Análisis de información hidrométrica

Las campañas de aforo realizadas en la DHI han permitido actualizar la curva de gasto en el

punto de control Taruca que tiene vigencia desde el año 2019 hasta la actualidad. Es importante mantener una serie de aforo de un largo periodo pues permite obtener valores de caudal que se ajusten más a la realidad y así conocer un comportamiento más preciso del cauce. Las campañas de aforo realizadas en este punto de control han sido desde el 2014 hasta la actualidad. El equipo que, principalmente, es utilizado en este tipo de río, debido a su magnitud, es el ADCP del modelo M9 Sontek ya que permite registrar la velocidad y el caudal del río.

6.2.9. Aplicación del modelo GR4J en la plataforma RS MINERVE

Para la elección de la aplicación del modelo hidrológico GR4J se tuvo como referencia a la tesis “Modelación hidrológica de la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza” (Aliaga Araujo, 2017) debido a que se obtuvieron buenos resultados en el desempeño del modelo. Asimismo, la cantidad de parámetros del modelo GR4J hace que éste sea de más fácil optimización y pueda aumentar significativamente su eficiencia (Rincón, 2019). A continuación, se detalla los procesos realizados en la plataforma.

6.2.9.1. Creación topológica del modelo GR4J

La creación topológica se realizó de acuerdo al esquema de la Intercuenca del Alto Huallaga, la cual está dividida en ocho subcuencas. Se aplicó las herramientas del GIS que presenta el RS-Minerve para georreferenciar las subcuencas, los ríos y punto de confluencia. Al contar con el shape de las subcuencas, se procede a utilizar los componentes de la plataforma RS MINERVE. En la Figura 12 se presenta la representación topológica del modelo GR4J en la Intercuenca del Alto Huallaga. Los elementos utilizados con la finalidad de sistematizar el modelo fueron:

- V-Station
- GR4J
- Junction
- Comparator
- Group Interface

El RS MINERVE tiene la pestaña de Data Base donde se agregan 2 base de datos:

- Información climática que contiene el registro histórico de la precipitación y temperatura, estos son guardados en un archivo de Excel en formato .csv con el nombre

de BD_Meteoro

- Información hidrométrica donde se tiene el registro de los caudales en el punto de control Taruca en un archivo de Excel en formato .csv.

En la Figura 13 se muestra la entrada de los datos meteorológicos que corresponden a la precipitación (PISCOp v2.1) y temperatura (PISCOt v1.1) que tienen registros de información desde el 01 de enero de 1981 hasta la actualidad. A partir de esta base de datos, la plataforma MINERVE puede calcular de manera automática los valores de la Evapotranspiración, en este caso se utilizó el método de Turc. (Ver Figura 14).

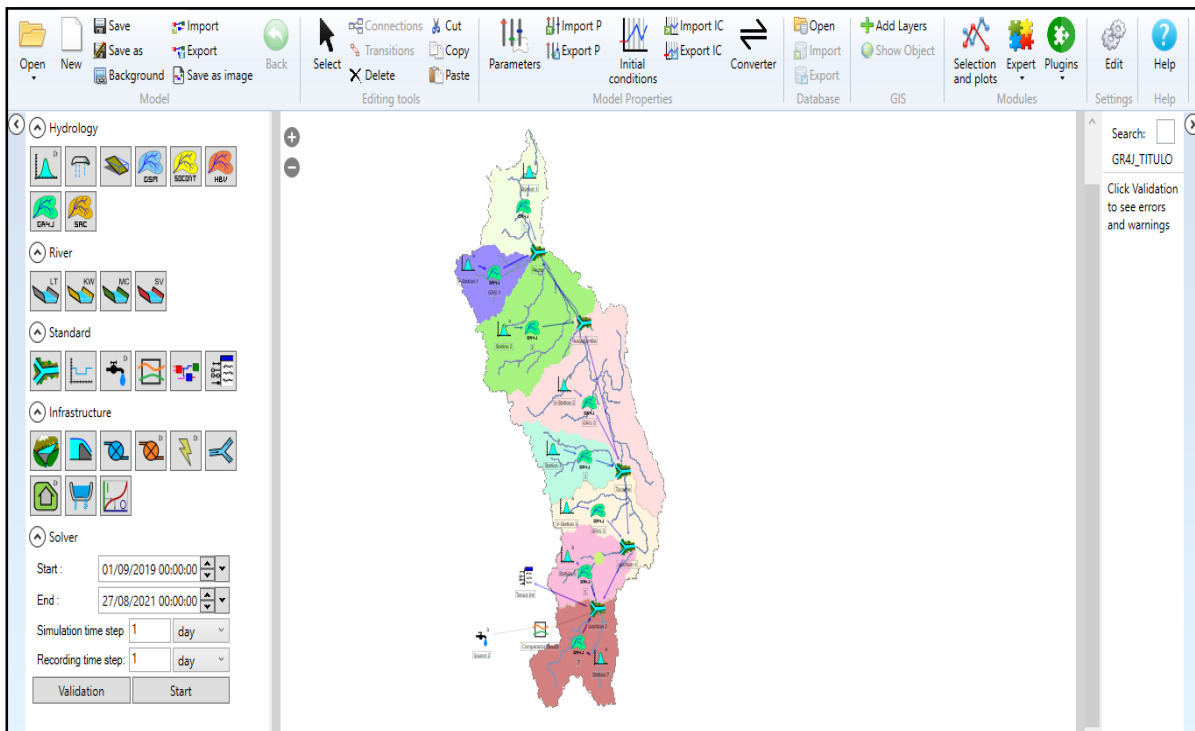


Figura 12: Representación topológica del modelo GR4J en la Interconuenca del Alto Huallaga

6.2.9.2. Calibración del modelo GR4J

La calibración se realizó en la plataforma RS MINERVE bajo el método *Sheud Complex Evolution* (SCE-UA) que permitió la calibración del modelo de manera automática multiobjetivo. Para la calibración se tuvo que definir pesos en la ventana de *Objective Function* donde se consideraron valores de 1 a los indicadores de Nash, Nash-In y Normalized Peak Error. En la calibración se utilizó el algoritmo SCE-UA

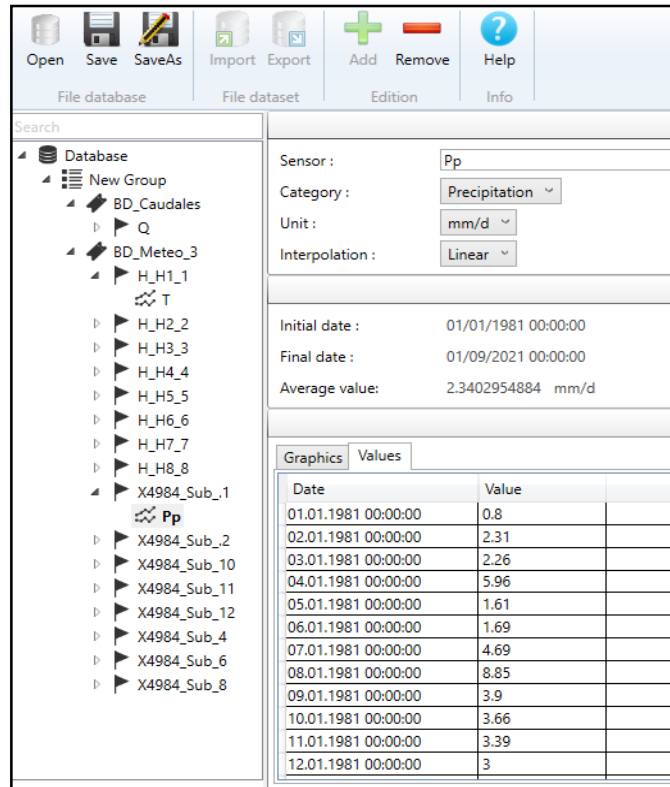


Figura 13: Ingreso de base de datos meteorológicos y caudales

Spatial interpolation method
 Thiessen

Evapotranspiration data
 Turc

Latitude (°) only necessary for Turc, McGuinness and Oudin methods
 Longitude (°) only necessary for Turc and McGuinness methods
 Uniform ETP= (mm/d) only necessary for Uniform ETP method

Result aggregation
 Average of the values over the recording time step Instantaneous value

Reset hydrological models
 Reset Snow and Glacier heights in hydrological models on:
 month day

Figura 14: Cálculo de la evapotranspiración

6.2.9.3. Validación de modelo GR4J

Luego que el modelo fue calibrado, se procede a la etapa de validación que se ejecuta utilizando las herramientas del RS MINERVE. Los pasos a seguir son los mismos realizados en la etapa de calibración, la diferencia son las fechas de inicio y final en que el modelo se ejecuta, asimismo se obtienen nuevos valores de los indicadores estadísticos.

VII. RESULTADOS

La Intercuenca del Alto Huallaga fue dividido en ocho subcuencas, obteniéndose ocho centroides que coinciden con la ubicación y distribución espacial de las estaciones virtuales. Asimismo, para la aplicación del modelo hidrológico GR4J se tuvo que realizar dos análisis que son la calibración y validación. El objetivo es buscar una mejor aproximación de los caudales observados con los caudales simulados, para ello se evaluaron los indicadores estadísticos de ajuste que son el coeficiente de Nash – Sutcliffe, el coeficiente de logaritmo de Nash – Sutcliffe, el coeficiente de correlación de Pearson, el Bias Score y el error medio normalizado (RMMSE).

7.1. Determinación de parámetros geomorfológicos

En la Tabla 9 se presentan los parámetros geomorfológicos de la Intercuenca del Alto Huallaga donde se indican las características de forma y relieve. Se determinó los siguientes resultados en relación a los parámetros de forma de la cuenca, el cual tiene un área de 30369 km² y un perímetro de 5208 km. De acuerdo al marco teórico, la Intercuenca del Alto Huallaga se caracteriza por tener un índice de compacidad (Kc) de 8.37 y por un factor de forma (F) de 0.066 lo que se caracteriza por ser una cuenca alargada.

7.2. Calibración del modelo GR4J

El método utilizado fue Sheud Complex Evolution (SCE). La función objetivo se ha centrado en tres indicadores estadísticos de bondad de ajuste que fueron:

- Coeficiente de Nash
- Coeficiente de Nash-ln
- Error pico normalizado

La siguiente ecuación muestra la función objetivo final con los pesos considerados para la calibración:

$$OF = 1*Nash + 1*Nash-ln-1*NPE$$

En la etapa de calibración, modelo hidrológico realizó varias simulaciones con la finalidad de que el modelo obtenga un mayor ajuste en base a los indicadores de eficiencia y la función objetivo.

Tabla 9: Parámetros geomorfológicos de la Intercuenca del Alto Huallaga

Parámetros	Características	Valor	Unidad	
Forma de la cuenca	Área de la cuenca	30426.11	km ²	
	Perímetro de la cuenca	5208.00	km ²	
	Longitud del río principal	677.00	km	
	Longitud total de ríos	1757.00	km	
	Ancho promedio de la cuenca	44.94	km	
	Coeficiente de compacidad (Kc)	8.36	-	
	Factor de forma (F)	0.066	-	
	Rectángulo equivalente	Lado mayor	2573.71	km
		Lado menor	11.82	km
	Radio de circularidad	0.014	km	
Relieve de la cuenca	Altitud media de la cuenca	2186.99	msnm	
	Altitud más frecuente de la cuenca	269 - 666	msnm	
	Pendiente media de la cuenca	Altitud máxima	5571	msnm
		Altitud mínima	269	msnm
	Pendiente media	2.06	m/m	
	Coeficiente de masividad	0.0006	-	
Coeficiente orográfico	0.0099	-		

En la Tabla 10 se muestran los parámetros de las subcuencas

Tabla 10: Parámetros geomorfológicos de las subcuencas

ID	Área (km²)	Perímetro (km)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Subcuenca1	3018	400	300491.83	9146952.1	1098
Subcuenca2	2056	321	277044.22	9097399.5	1740
Subcuenca3	5631	845	307454.03	9081968.5	1965
Subcuenca4	7535	1121	353266.41	9028391.1	1424
Subcuenca5	2641	382	345925.68	8974816.4	1088
Subcuenca6	3038	799	381776.96	8930598.8	2168
Subcuenca7	2781	693	352884.31	8900647.4	2574
Subcuenca8	3714	647	354235.7	8846638.3	4093

Para la etapa de calibración se usó la información de precipitación PISCO desde el 15 de enero del 2014 al 31 de diciembre del 2018. El registro histórico de caudales se obtuvo de la estación hidrométrica Taruca con descargas medias diarias observadas desde el 15 enero del 2014 hasta el 31 de diciembre del 2020.

En la Figura 15 se muestra la calibración para el modelo GR4J donde los caudales medios diarios simulados ($Q_{Simulation}$) son de color verde y los caudales diarios medios observados ($Q_{Reference}$) son de color mostaza.

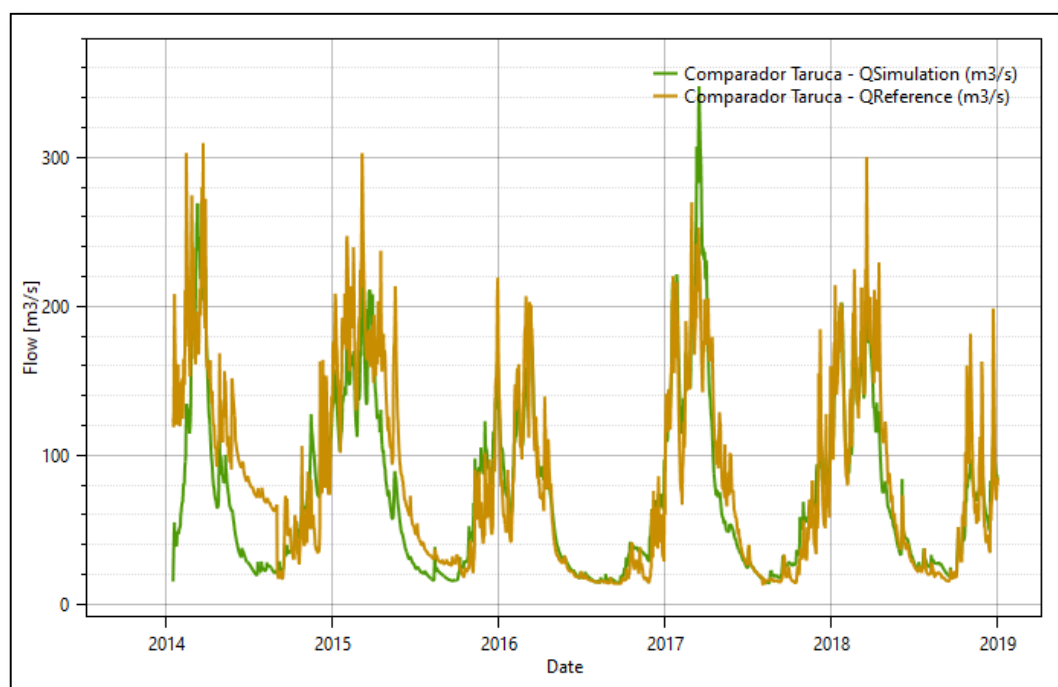


Figura 15: Calibración del modelo hidrológico GR4J para la estación hidrológica Taruca

De acuerdo a la Figura 15, se aprecia una curva en los caudales observados, aproximadamente, durante las fechas de 01 de septiembre al 04 de octubre del 2014 debido a que se presentó una descalibración en la estación automática de Taruca y el observador fue quien realizó las lecturas de los niveles del agua del río a través de la regla; sin embargo, se puede apreciar que las lecturas no fueron las más precisas ya que hay un salto notorio en los caudales observados, a pesar de ello, en la etapa de la calibración se obtuvieron buenos resultados. Luego de esta fecha, a partir del 05 de octubre del 2014, la estación automática volvió a estar operativa.

En la etapa de calibración debe existir una buena concordancia de los datos simulados con los datos observados lo cual se representa en la Figura 15 donde se aprecia un buen ajuste de los

datos observados y simulados. A partir de 2016, la calibración mejora notablemente. Se realizó una correlación de los caudales para evaluar su concordancia. En la Figura 16 se muestra la correlación lineal con el coeficiente de determinación.

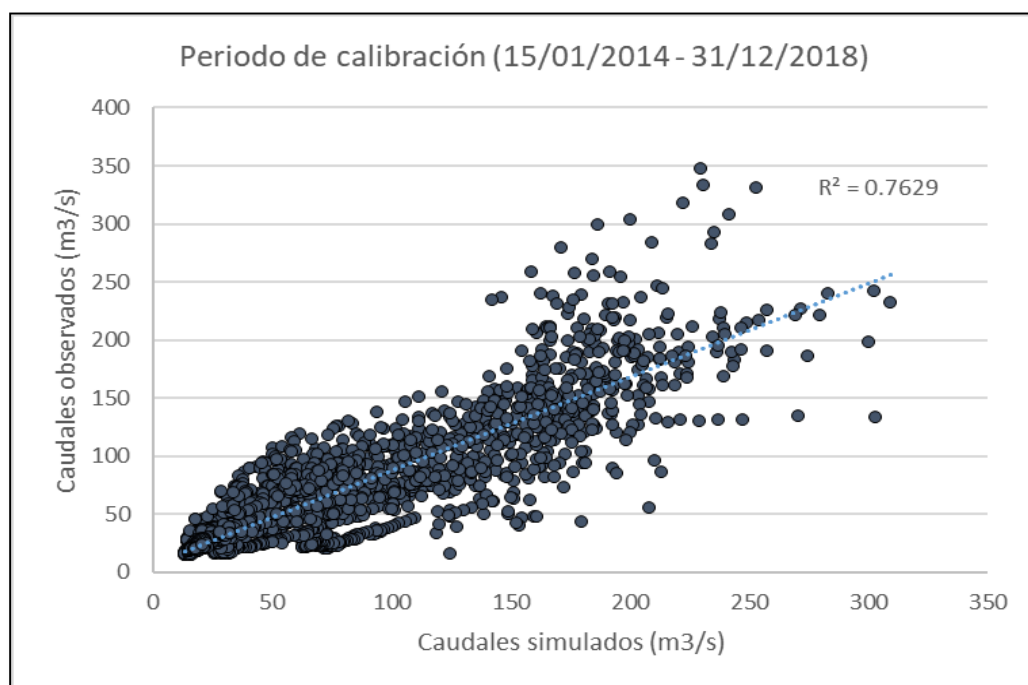


Figura 16: Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados para la estación hidrométrica Taruca – Calibración

De acuerdo a la Figura 16 se indica que el coeficiente de determinación entre los caudales observados y simulados es de 0.7629. Se aprecia que existe una mayor relación al presentarse caudales bajos y se aprecia una mayor incertidumbre en caudales superiores a los 200 m³/s.

En la Tabla 11 se muestran los valores de los parámetros calibrados del modelo hidrológico GR4J obtenidos bajo el método matemático SCE-UA que fueron utilizados para su optimización.

Tabla 11: Parámetros de optimización para calibración

Parámetro	Valor	Unidad
X1	0.0059229	m
X2	-0.004869	m
X3	0.2456277	m
X4	1.5056006	d

En la Tabla 12 se muestra los indicadores estadísticos respecto a la calibración del modelo GR4J

Tabla 12: Indicadores estadísticos GR4J en la etapa de calibración

Indicadores estadísticos GR4J	Calibración (15/01/2014 - 31/12/2018)
Nash	0.740687791
Nash - ln	0.781949894
Pearson Correlation Coeff	0.873449806
Kling-Gupta Efficiency	0.831302857
Bias Score (BS)	0.985433197
RRMSE	0.385781441
Relative Volume Bias	-0.106949797
Normalized Peak Error	0.123064184

De acuerdo a la Tabla 12 se deduce que los indicadores Pearson, Bias Score y Normalized Peak Error son lo que presentan mejor desempeño debido a que se encuentran más cercano al valor óptimo.

Moriasi et al. (2007) evaluó los modelos en función de tres estadísticos que son la eficiencia del Nash – Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (Bias) y la relación del error cuadrático medio (RRMSE) y afirmó que la simulación de un modelo es satisfactoria si $NSE > 0.5$ y $RRMSE \leq 0.70$. En la Tabla 13 se muestra la clasificación de rendimiento general para los indicadores estadísticos para un intervalo de tiempo mensual.

Tabla 13: Clasificación de rendimiento general para los indicadores estadísticos para un intervalo de tiempo mensual

Rendimiento	RSR	NSE	PBIAS
Muy bien	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bien	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq NSE < \pm 15$
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq NSE < \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$NSE \geq \pm 25$

Fuente: Moriasi et. al (2007)

Por otro lado, Molnar (2011) indicó que los modelos hidrológicos son considerados excelentes al presentar ciertos resultados en la eficiencia de Nash – Sutcliffe, tal como se muestra en la

Tabla 14. Esos indicadores pueden ser realizados para cualquier escala de tiempo.

Tabla 14: Valores referenciales del criterio Nash – Sutcliffe

Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Resultado
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011)

Respecto a la etapa de calibración, los indicadores estadísticos de eficiencia del modelo presentaron valores aceptables, siendo el valor del Nash 0.7406. El coeficiente del Bias Score obtuvo un valor más cercano al óptimo (0.9854). Asimismo, al aplicar el método de dispersión para el régimen de caudales observados y simulados se presenta un buen coeficiente de determinación con un valor de 0.7629 lo que indica que hay una correlación lineal aceptable. Se presentó una mayor dispersión en caudales que fueron, aproximadamente, mayores a 200 m³/s.

7.3. Validación del modelo GR4J

La etapa de validación en la estación hidrológica Taruca fue desde el 01 de enero del 2019 al 01 de diciembre del 2020. En la Figura 17 se aprecia la validación del modelo hidrológico GR4J para la intercuenca del Alto Huallaga en la estación hidrométrica Taruca donde los caudales medios diarios simulados (QSimulation) son de color verde y los caudales diarios medios observados (Qreference) son de color mostaza.

En esta etapa de validación, también, se realizó una correlación lineal de los caudales observados y caudales simulados que se muestra en la Figura 18, donde se observa un buen ajuste de los valores de ambos caudales manifestándose en un coeficiente de determinación de 0.9067, por lo tanto, existe una mejor relación de los caudales observados y simulados en la etapa de validación, en comparación con la etapa de calibración.

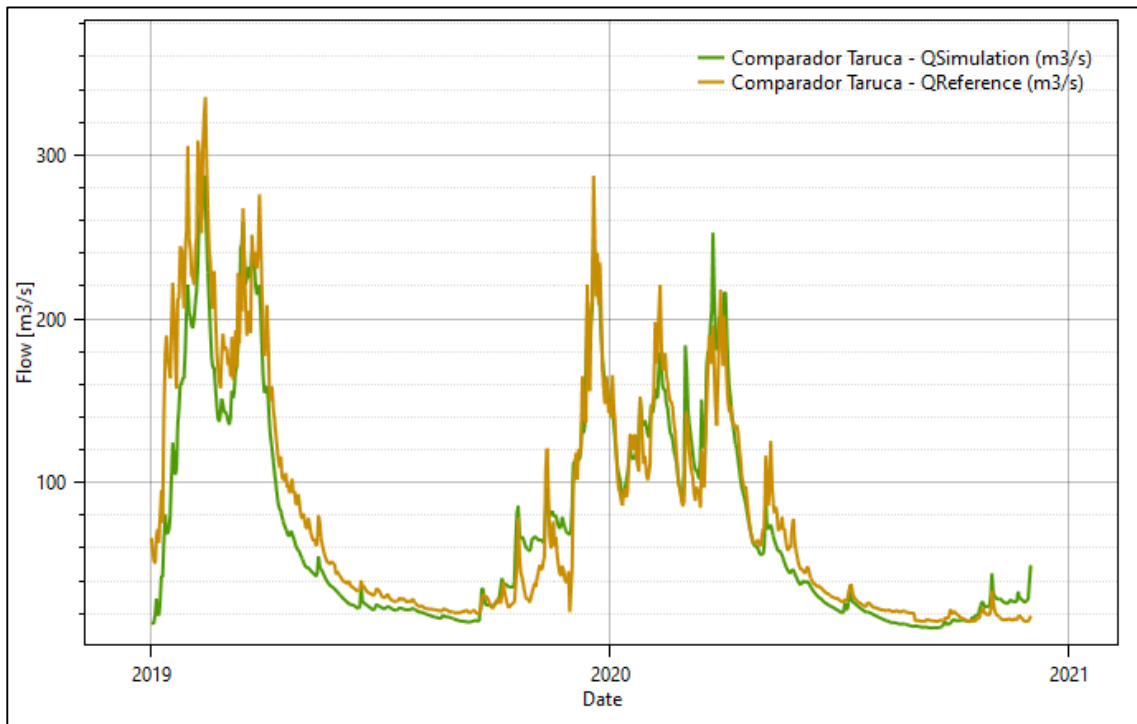


Figura 17: Validación del modelo hidrológico GR4J para la estación hidrológica Taruca

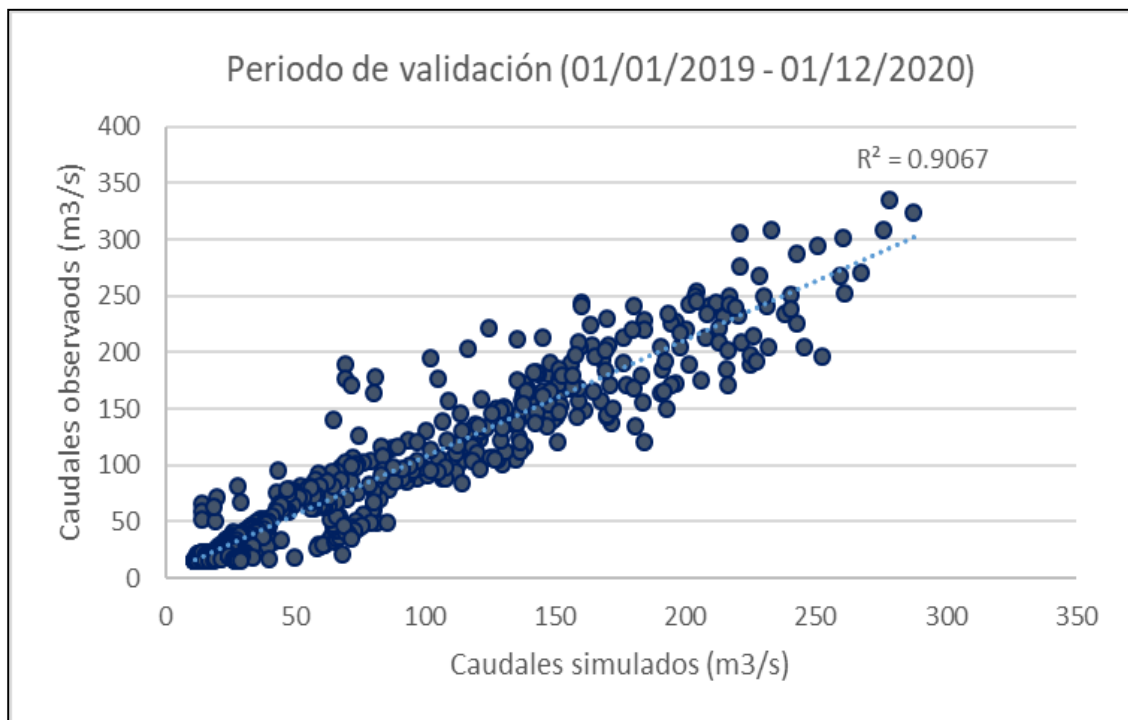


Figura 18: Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados la estación hidrológica Taruca – Validación

Los resultados de los parámetros estadísticos de validación para el modelo GR4J en la etapa de validación se aprecian en la Tabla 15.

Tabla 15: Indicadores estadísticos GR4J en la etapa de validación

Indicadores estadísticos GR4J	Validación (01/01/2019 - 01/12/2020)
Nash	0.928481934
Nash - ln	0.895014696
Pearson Correlation Coeff	0.964959058
Kling – Gupta Efficiency	0.912296392
Bias Score (BS)	0.999765899
RRMSE	0.229034851
Relative Volume Bias	-0.006268434
Normalized Peak Error	-0.142988486

Respecto a la etapa de validación, en general, se presentó una mejora en todos los indicadores que fueron evaluados como el Nash (0.928), Nash-ln (0.895), Pearson, Kling – Gupta (0.912), Bias Score (0.999), RRMSE (0.229), Relative Volume Bias (-0.006) y Normalized Peak Error (-0.142), presentándose un valor más cercano al óptimo para el indicador Bias Score. Asimismo, su coeficiente de determinación aumentó a 0.9067, lo que demuestra que existe una muy buena correlación lineal, por lo tanto, hay mejor ajuste entre los caudales observados y caudales simulados. Según el criterio del indicador estadístico Nash Sutcliffe (Molnar, 2011), al presentarse un indicador estadístico de Nash mayor a 0.8, se considera que el ajuste realizado entre los caudales observados y caudales simulados es excelente. En la Tabla 16 se muestran los resultados de calibración y validación en comparación con los valores óptimos para los indicadores estadísticos del modelo GR4J.

Según L. Feyen et al. (2000) para el coeficiente de error relativo de la raíz cuadrada media, se clasifica como excelente a aquellos valores que sean menores a 0.1, bueno a valores entre 0.1 a 0.2 y válidos entre 0.2 a 0.3; el resultado obtenido en el modelo es de 0.2290 considerándose un valor válido.

Tabla 16: Indicadores estadísticos en las etapas de calibración y validación del modelo GR4J

Indicadores estadísticos	Calibración	Validación	Valor óptimo
Nash	0.740687791	0.928481934	1
Nash - ln	0.781949894	0.895014696	1
Pearson Correlation Coeff	0.873449806	0.964959058	1
Kling – Gupta Efficiency	0.831302857	0.912296392	1
Bias Score (BS)	0.985433197	0.999765899	1
RRMSE	0.385781441	0.229034851	0
Relative Volume Bias	-0.106949798	-0.006268434	0
Normalized Peak Error	0.123064184	-0.142988486	0

Para el proceso de validación se tiene como resultado para el volumen relativo bias un valor de -0.00626 y, de acuerdo a la teoría, al presentarse un valor negativo indica que los caudales promedios simulados han sido menores que los caudales promedios observados, de igual manera ese valor está próximo a cero lo cual indica que se presenta una buena simulación. Caso similar se presenta para el indicador estadístico Normalized Peak Error que evalúa los caudales pico y, de acuerdo, a su valor de -0.14298 significa que el caudal máximo simulado es menor que el caudal máximo observado.

7.4. Obtención de los caudales pronosticados con un horizonte de tiempo de 72 horas

De acuerdo al marco teórico, el modelo pasó por un periodo de calibración bajo el método de Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) para el periodo de 15/01/2014 al 31/12/2018 asignado valores de peso igual a la unidad a los indicadores estadísticos de Nash, Nash-ln y Normalized Peak Error obteniendo resultados considerados buenos, seguidamente se procedió a realizar la validación considerando evaluar el pronóstico durante el mes de diciembre del 2020 obteniendo los siguientes resultados:

Debido a que la curva de gasto para la estación Taruca ha sido actualizada desde el año 2019, a partir de diciembre del 2020 se vienen registrando el pronóstico de caudales con un mejor ajuste en los resultados finales. Para la elaboración del pronóstico se requiere de dos bases de datos que son:

- Los caudales observados registrados diariamente por la estación hidrológica Taruca.
- La data meteorológica referente a las precipitaciones y temperaturas que están en

formato .csv donde se encuentra el registro histórico de PISCOp y PISCOt, así como sus previsiones provenientes del modelo numérico ETA –SENAMHI.

Seguidamente, en la pestaña “*Database*” de la plataforma RS - MINERVE se introducen los archivos de caudales observados, precipitaciones y temperatura en formato .csv.

Posteriormente, se seleccionan la fecha de inicio a interés y la fecha de salida, en ésta última teniendo un horizonte de tiempo de 72 horas considerándose desde la fecha actual. Luego, se procede a ejecutar el modelo seleccionando los comandos *Validation* y *Star*.

En este caso se va a considerar que la fecha actual es 31 de diciembre del 2020, por lo tanto, el pronóstico se proyecta para un horizonte de tiempo de 72 horas, es decir, hasta el 02 de enero del 2021. En la plataforma de RS-MINERVE se realiza el pronóstico considerando la etapa de validación, por lo que la fecha de inicio que se considera al ejecutar el programa es 01/01/2019 y la fecha de fin es 02/01/2021. Luego se procede a seleccionar la pestaña *Selection and plots* donde se puede apreciar una gráfica de la información de caudales observados y caudales simulados y, finalmente, son exportados a una hoja de Excel en formato .csv. En la Figura 19 se muestra los comandos a seleccionar para ejecutar el programa. En la Figura 20 se puede observar la gráfica de los caudales observados vs los caudales simulados desde el 01/01/2019 al 31/12/2020.

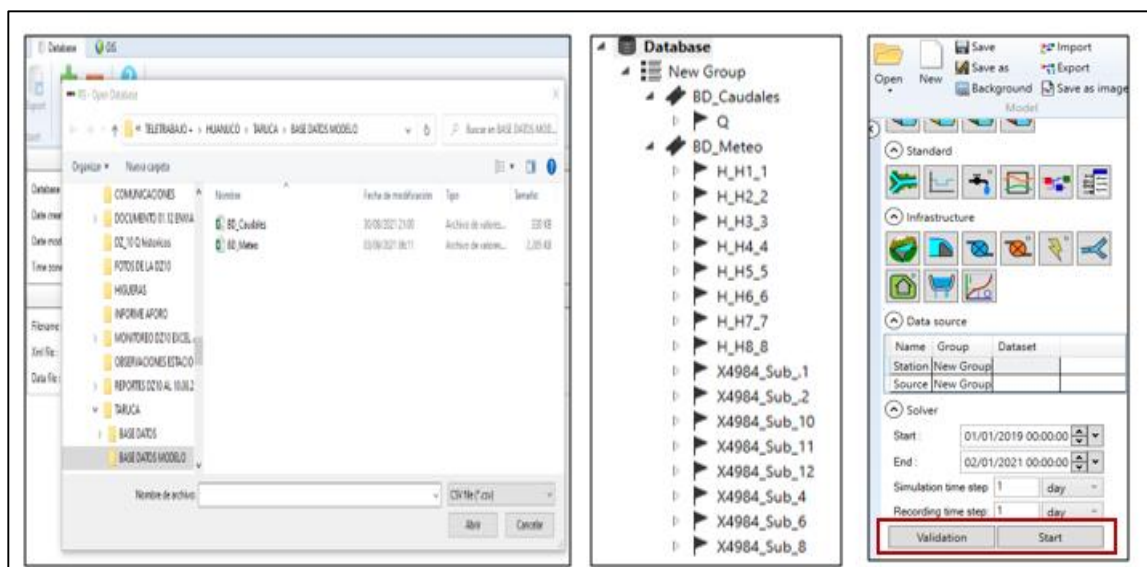


Figura 19: Comando a seleccionar para ejecutar el programa

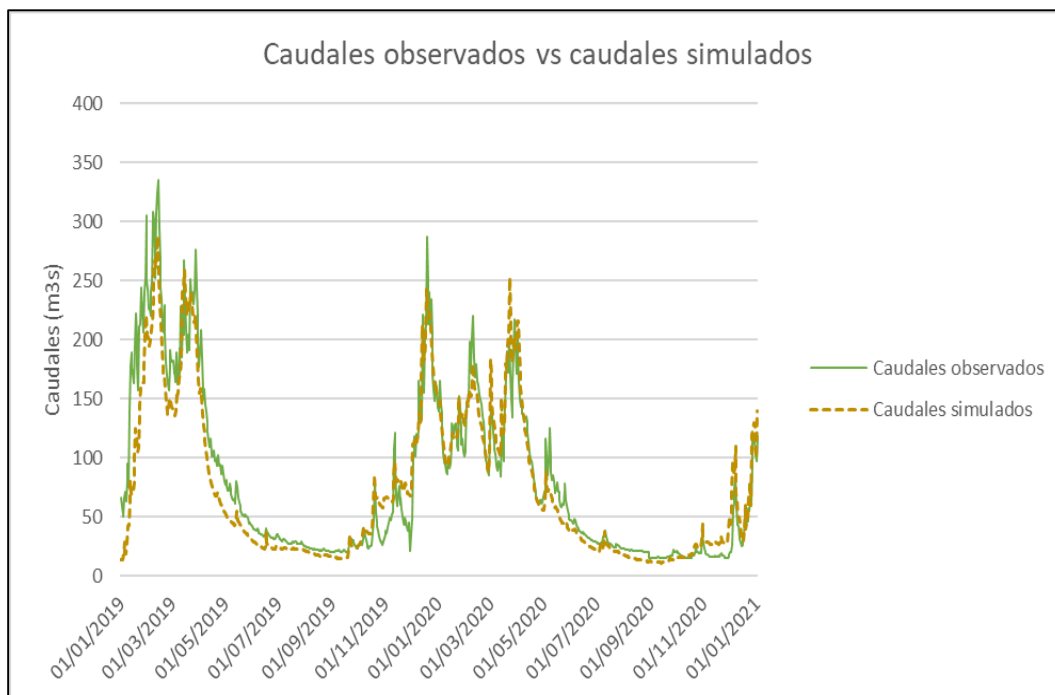


Figura 20: Caudales observados vs caudales simulados durante el periodo 01/01/2019 al 31/12/2020

A continuación, se presenta información más detallada de la eficiencia del modelo GR4J al momento de hacer la simulación de caudales para un horizonte de tiempo de 72 horas, para lo cual se hizo la evaluación del modelo durante diciembre del 2020.

7.4.1. Pronóstico de caudal a 24 horas

- La información observada y simulada es registrada diariamente en una hoja de Microsoft Excel.
- Para la calibración se utilizó el algoritmo SCE-UA dándole pesos de la unidad, para la función objetivo, a los indicadores estadísticos de Nash, Nash-ln y *Normalized Peak Error*.
- Se procedió a hacer la evaluación de los indicadores estadísticos de manera manual utilizando las herramientas del Excel. Los indicadores que se evaluaron fueron el coeficiente de Nash, el coeficiente de Nash Logarítmico, el error relativo de la raíz cuadrática media y el coeficiente de Pearson.

En la Tabla 17 se muestran los caudales observados y simulados para un horizonte de tiempo de 24 horas, mientras que en la Figura 21 se presenta el hidrograma de los caudales observados y caudales simulados donde se demuestra que existe un buen ajuste de ambos resultados ya que siguen la misma tendencia.

Tabla 17: Caudales simulados vs caudales observados – 24 horas

PRONÓSTICO A 24 HORAS		
Fecha	Qsimulados	Qobservados
01/12/2020	24.4	25.34
02/12/2020	27.8	27.18
03/12/2020	27.3	27.18
04/12/2020	31.1	35.64
07/12/2020	79.7	85.78
09/12/2020	79.7	69.84
10/12/2020	60.2	53.96
11/12/2020	55.4	52.84
14/12/2020	37	37.35
15/12/2020	36.4	34.49
16/12/2020	34.1	35.96
17/12/2020	39.5	40.90
18/12/2020	46	45.80
21/12/2020	56.6	55.46
22/12/2020	58.8	56.31
23/12/2020	61.8	66.99
24/12/2020	69.5	65.55
28/12/2020	119.2	117.57
29/12/2020	118.5	115.86
30/12/2020	115.1	112.02
31/12/2020	105	103.16

El régimen de caudales medios simulados y observados para un horizonte de tiempo de 24 horas para el mes de diciembre del 2020 se representan en la Figura 22 donde se observa que existe una buena correlación lineal entre ambos registros ya que el coeficiente de determinación tiene un valor de 0.9869.

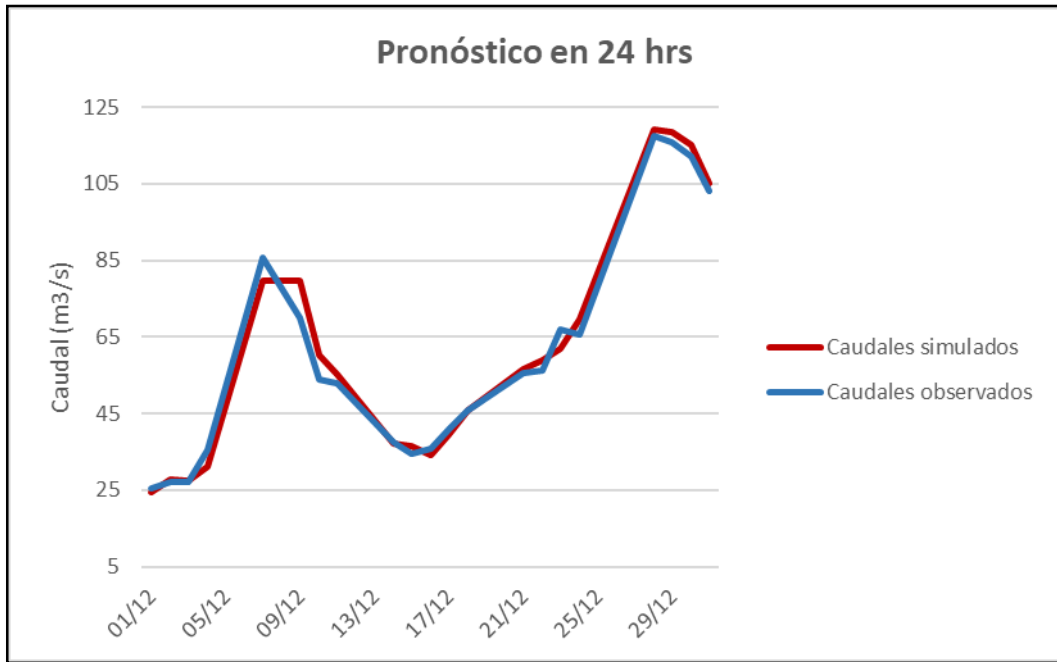


Figura 21: Hidrograma de caudales simulados y caudales observados para un pronóstico de 24 horas

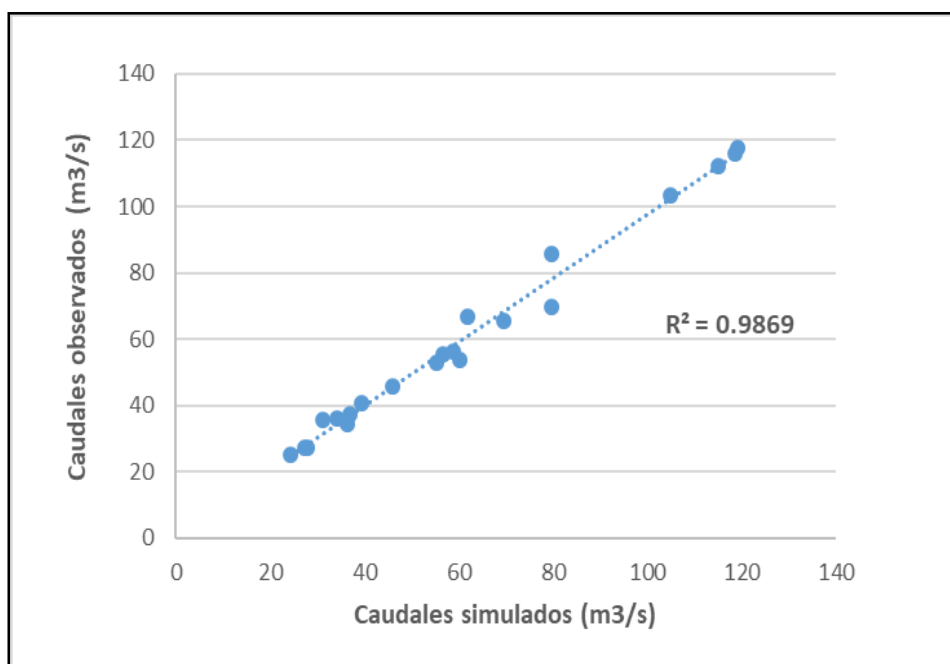


Figura 22: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 24 horas

7.4.2. Pronóstico de caudal a 48 horas

En la Tabla 18 se muestran los caudales observados y simulados para un horizonte de tiempo de

48 horas, mientras que en la Figura 23 se presenta el hidrograma de los caudales observados y caudales simulados.

El régimen de caudales medios simulados y observados para un horizonte de tiempo de 48 horas para el mes de diciembre del 2020 se representan en la Figura 24 donde se observa que existe una buena correlación lineal entre ambos registros ya que el coeficiente de determinación tiene un valor de 0.8965.

Tabla 18: Caudales simulados vs caudales observados – 48 horas

PRONÓSTICO A 48 HORAS		
Fecha	Qsimulados	Qobservados
02/12/2020	24.6	27.18
03/12/2020	27.9	27.18
04/12/2020	33.4	35.64
05/12/2020	52.1	66.06
08/12/2020	75.3	97.37
09/12/2020	75.3	69.84
10/12/2020	84.0	53.96
11/12/2020	75.3	52.84
12/12/2020	37.2	52.84
15/12/2020	33.5	34.49
16/12/2020	37.1	35.96
17/12/2020	36.2	40.90
18/12/2020	46.4	45.80
19/12/2020	58	60.87
22/12/2020	54.5	56.31
23/12/2020	63.5	66.99
24/12/2020	67.3	65.55
25/12/2020	66.3	76.41
26/12/2020	73.3	74.00
29/12/2020	112.8	115.86
30/12/2020	115.0	112.02
31/12/2020	105.0	103.16

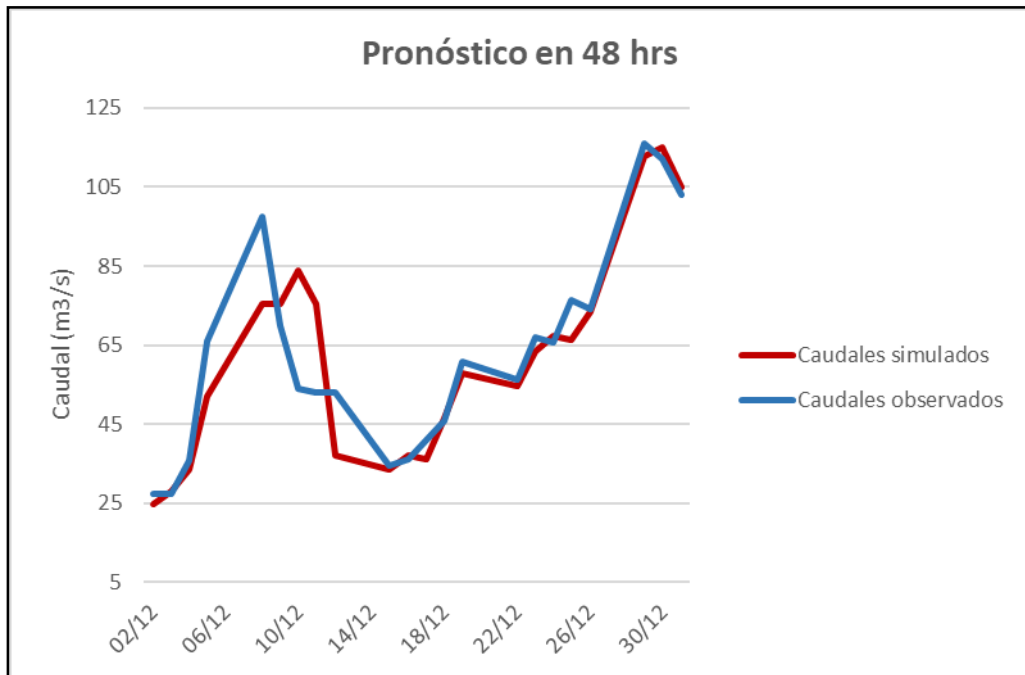


Figura 23: Hidrograma de caudales simulados y observados para un pronóstico de 48 horas

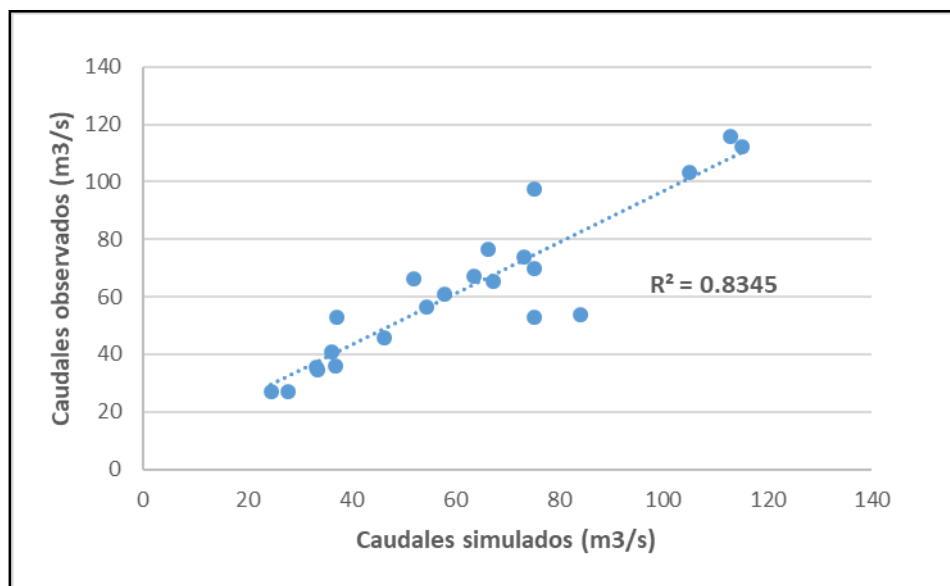


Figura 24: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 48 horas

7.4.3. Pronóstico de caudal a 72 horas

En la Tabla 19 se muestran los caudales observados y simulados para un horizonte de tiempo de 72 horas, mientras que en la Figura 25 se presenta el hidrograma de los caudales observados y caudales simulados donde se demuestra que existe un buen ajuste de ambos resultados ya que

siguen la misma tendencia.

El régimen de caudales medios simulados y observados para un horizonte de tiempo de 72 horas para el mes de diciembre del 2020 se representan en la Figura 26 donde se observa que existe una buena correlación lineal entre ambos registros ya que el coeficiente de determinación tiene un valor de 0.9242.

Tabla 19: Caudales simulados vs caudales observados – 72 horas

PRONÓSTICO A 72 HORAS		
Fecha	Qsimulados	Qobservados
03/12/2020	25.0	27.18
04/12/2020	28.2	35.64
05/12/2020	60.0	66.06
06/12/2020	73.5	72.60
09/12/2020	92.1	69.84
10/12/2020	62.8	53.96
11/12/2020	60.5	52.84
12/12/2020	36.9	52.84
13/12/2020	31.5	40.84
16/12/2020	34.9	35.96
17/12/2020	37.5	40.90
18/12/2020	36.8	45.80
19/12/2020	54.6	60.87
20/12/2020	75.1	52.31
23/12/2020	65.1	66.99
24/12/2020	67.6	65.55
25/12/2020	67.6	76.41
26/12/2020	70.0	74.00
30/12/2020	115.0	112.02
31/12/2020	100.3	103.16

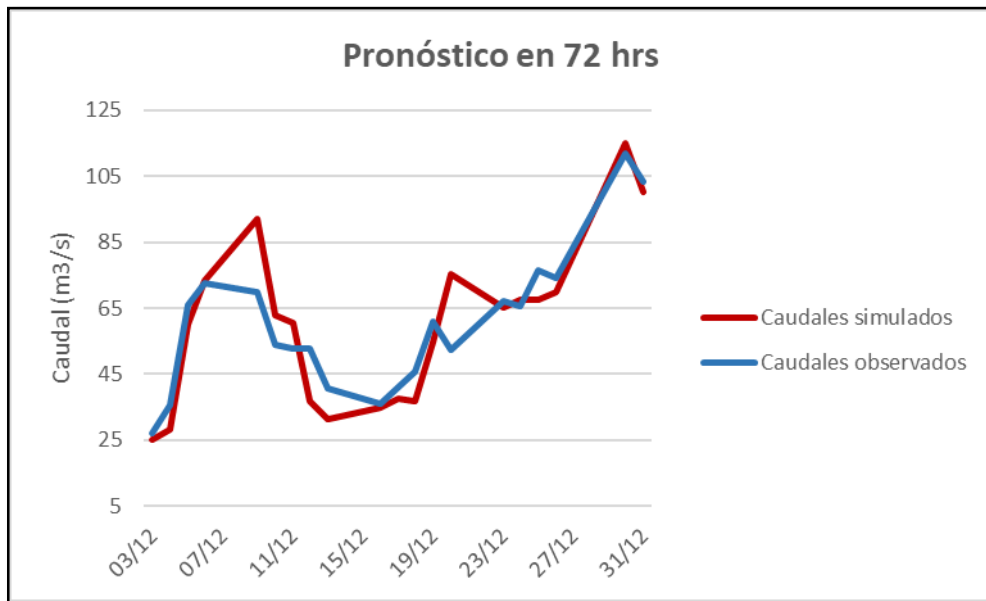


Figura 25: Hidrograma de caudales simulados y observados para un pronóstico de 72 horas

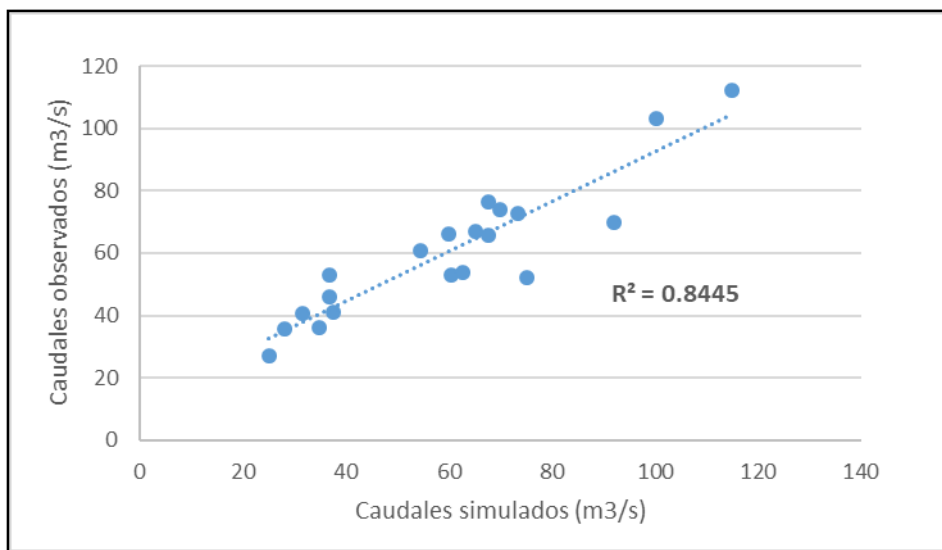


Figura 26: Correlación lineal de los caudales observados vs caudales simulados - Pronóstico 72 horas

Finalmente se presentan los indicadores de eficiencia del modelo GR4J y el coeficiente de determinación de la correlación en la estación hidrológica Taruca para los horizontes de tiempo de tiempo de 24, 48 y 72 horas (Ver Tabla 20).

Tabla 20: Indicadores de eficiencia del modelo GR4J con fines de pronóstico en la estación hidrológica Taruca

Indicadores	24 h	48 h	72 h	Valor óptimo
Nash	0.9845	0.8221	0.7904	1
Nash – ln	1.0	0.9997	0.9988	1
RRMSE	0.0582	0.1728	0.1553	0
Pearson	0.8624	0.8344	0.8537	1
R ²	0.9869	0.8345	0.8445	1

De acuerdo a los resultados obtenidos de los indicadores estadísticos del modelo GR4J se presentan valores más cercanos a los óptimos en los caudales simulados en un periodo de 24 horas.

Según C. Santhi et al. (2002), la eficiencia de predicción es el coeficiente de determinación (R²) calculado mediante la regresión del rango de los valores constituyentes observados frente a los simulados para un determinado tiempo. Indica qué tan bien las distribuciones de probabilidad de datos simulados y observados se ajustan entre sí; sin embargo, no se ha utilizado con la frecuencia suficiente para proporcionar amplia información sobre los rangos de valores.

Según los resultados para el pronóstico de caudales de la estación hidrológica Taruca, a un horizonte de tiempo de 72 horas, se presentaron valores de Nash mayores a 0.8 lo que representa que el ajuste de los caudales observados y caudales simulados es considerado “excelente” (Molnar, 2011).

La información del pronóstico de caudales con un horizonte de tiempo de 72 horas es publicada diariamente en la página web del SENAMHI, en el siguiente link <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-caudales>. A nivel nacional, los pronósticos son elaborados en cuencas donde se dispone de data hidrológica y se tienen modelos hidrológicos calibrados mediante la plataforma RS MINERVE, la cual es usada para la previsión de caudales a corto plazo considerando pronósticos de lluvias del ETA-SENAMHI y WRF.

El objetivo del pronóstico de corto plazo es proporcionar información preventiva antes fuertes incrementos en el nivel y caudal del río que puedan generar inundaciones perjudicando a la población, por tal motivo es que esta información se encuentra al alcance del público en general y a diferentes entidades como INDECI, COEN, municipalidades, entre otros que son los

encargados de tomar las decisiones correspondientes.

En la Figura 27 se muestran las zonas vulnerables como los distritos de Churubamba, Santa María, instituciones educativas y terrenos agrícolas que puedan verse afectadas ante eventos hidrológicos extremos.

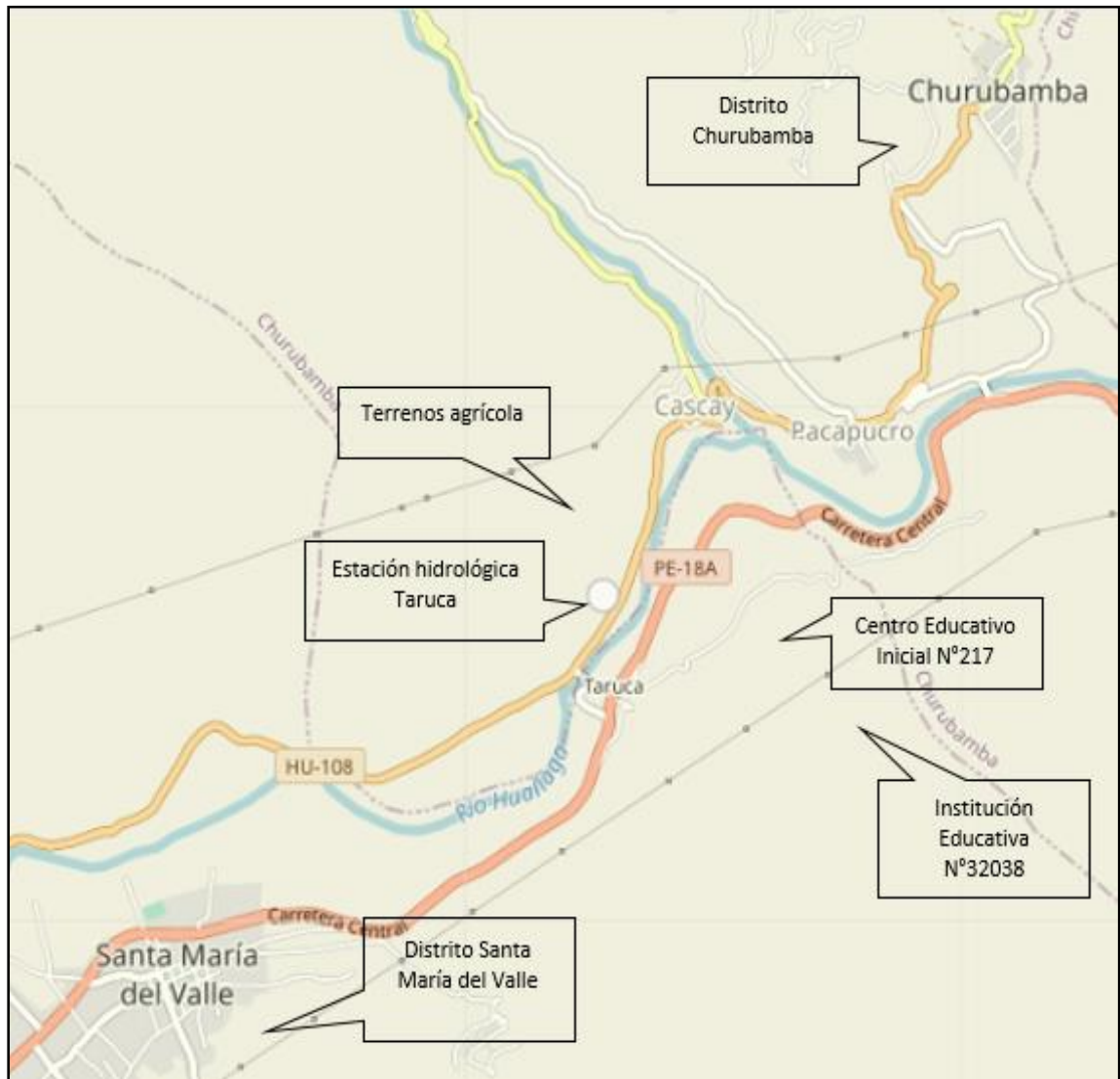


Figura 27: Mapa de las zonas vulnerables cerca a la estación hidrológica Taruca

VIII. CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación de la estimación de caudales mediante la aplicación del modelo hidrológico GR4J semidistribuido en la plataforma RS MINERVE para la Intercuenca del Alto Huallaga bajo la condición de procesos de calibración en el periodo de 05/01/2014 al 31/12/2018 y el proceso de validación en el periodo de 01/01/2019 al 31/12/2020 utilizando los caudales observados de la estación hidrológica Taruca dando las siguientes conclusiones:

- La Intercuenca del Alto Huallaga fue distribuida en ocho subcuencas bajo la sugerencia de la herramienta del ArcHydro Tools. Esta delimitación permitió satisfactoriamente determinar los centroides de cada subcuenca, vincularlas al sistema PISCO y considerarlas como estaciones virtuales. Asimismo, la base de datos de precipitación y temperatura de PISCO – SENAMHI permitió realizar un modelo hidrológico con indicadores estadísticos aceptables.
- La determinación de las características de los parámetros geomorfológicos en la Intercuenca del Alto Huallaga permitió identificar parámetros de forma de la cuenca que comprende un área de 30426.11 km², un perímetro de 5208 km, un coeficiente de compacidad de 8.36 y un factor de forma de 0.066, mientras que con referencia a
- Se determinó las etapas de calibración y validación para los parámetros del modelo hidrológico GR4J aplicado en la Intercuenca del Alto Huallaga obteniendo indicadores estadísticos con resultados muy buenos ya que están próximo a los valores óptimos recomendados.
- De acuerdo a los resultados obtenidos para el pronóstico hidrológico con horizonte de tiempo de 72 horas para la estación hidrológica Taruca, el valor obtenido de Nash considera que se presenta un ajuste “excelente” entre los caudales observados y caudales simulados, por lo que se puede concluir que el modelo GR4J describe con buena precisión las series observadas. Asimismo, para el pronóstico de 24, 48 y 72 horas se presentan correlaciones lineales muy buenas lo que significa que está representando de manera satisfactoria los caudales altos y medios.

IX. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar más campañas de aforo en la sección de control de Taruca para mantener una curva de gasto actualizada y poder representar caudales que estén más cercanos a la realidad.
- La estación hidrológica Taruca es de la jurisdicción del SENAMHI y ha presentado una lectura constante de los niveles de agua del río durante las 24 horas, sin embargo, se recomienda que se incluya en las campañas de aforo el mantenimiento constante de las estaciones, sobre todo las estaciones automáticas como la estación hidrológica Taruca ya que son más sensibles de sufrir daños ya sea en su sensor o estructura al presentarse las temporadas de avenidas.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *International Journal of Engineering Education*, 26(4), 963–973.
- Aliaga Araujo, I. J. (2017). *Modelación Hidrológica De La Cuenca Del Rio Huallaga, Aguas Arriba Del Punto De Control Santa Lorenza*. 107.
- ANA. (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Pativilca. *Autoridad Nacional Del Agua*, 1452. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/36>
- Arias, V., & Terneus, E. (2012). Análisis del marco legal e institucional para caudales ecológicos en el Ecuador. *Documento Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental*, 75.
- Aybar, César. (2016). [Www.Senamhi.Gob.Pe](http://www.senamhi.gob.pe) 1. *Senamhi*, 1–22.
- Aybar, Cesar, Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- C. Santhi, J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan, & Hauck, L. . (2002). *VALIDATION OF THE SWAT MODEL ON A LARGE RWER tributing point and nonpoint sources so that the River Watershed in North Central Texas , where cy (USEPA) reported nutrient enrichment as the TMDL development through simulating loads to ates on a daily time*. 37(5), 1169–1188.
- Cabrera, J. (2016a). *Calibración de Modelos Hidrológicos. 1*.
- Cabrera, J. (2016b). *Modelos Hidrológicos*.
- Carmona Arteaga, A. (2017). *Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada pisco para las cuencas del río Biabo*. 100.
- Carvajal, L. F., & Roldan, E. (2007). Agregado Gr4J Aplicación : Cuenca Del Río Aburrá Calibration of Gr4J Lumped Rainfall-Runoff Model Application: Rio Aburrá Cachtment. *Dyna*, 74, 73–87.
- Chen, Y., Xu, Y., & Yin, Y. (2009). Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoqi basin, China. *Quaternary International*, 208(1–2), 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.014>
- Chow, V. Te. (1994). Indice 9. *Potencia*, 1–14.
- De La Cruz Montalvo, G. (2016). *Corrección De Bias Para Pronósticos De*

Precipitación Del Modelo Eta/Senamhi.

- Decana, P. (2020). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos “ Aplicación y evaluación de modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA para generación de caudales medios diarios en la cuenca del río Huallaga ” Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos.*
- Del, A., Multi, R., & En, A. (2014). *Cuenca Hidrográfica.* <https://www.rojotse.com.co/2020/10/que-son-los-rios.html>
- Enfermer, E. P. D. E., Asociados, F., Automedicaci, L. A., & Enfermer, E. N. E. D. E. (2018). *Universidad nacional del altiplano de puno. 051, 363543.*
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). Diseño Hidrológico. *Información Tecnológica, 29(4), 143–156.*
- Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B., Fluixá-Sanmartín, J., Brauchli, T., Paredes Arquiola, J., & De Cesare, G. (2020). RS MINERVE - User Manual. V2.15. Ed. CREALP, April, 124.
- García Hernández, J., Foehn, A., Fluixá Sanmartín, J., Roquier, B., Brauchli, T., Paredes-Arquiola, J., & De Cesare, G. (2020). RS Minerve - Technical Manual. *Crealp, 2(April), 156.* <https://www.crealp.ch/fr/accueil/le-crealp/telechargement-doc/category/173-manuels-utilisateur.html?download=218:rs-minerve-user-manual>
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas, 52, 215.* <https://doi.org/10.14198/ingeo2010.52.08>
- Golian, S., Murphy, C., & Meresa, H. (2021). Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 36(January), 100859.* <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100859>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology, 377(1–2), 80–91.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). SENAMHI - PISCO temperatura v. 1.1. SENAMHI. *Senamhi - Dhi-2018, 1.1, 1–15.* http://iridl.ldeo.columbia.edu/documentation/.pisco/.PISCOt_report.pdf
- L. Feyen, R. Vásquez, . Christiaens, O. Sels, & J. Feyen. (2000). *Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment (p. 63).*

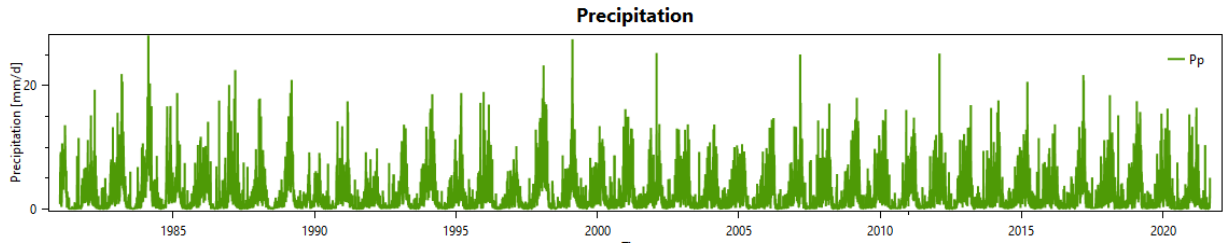
- Lavado, W., & Fernández, C. (2014). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS CLIMÁTICOS DE PRECIPITACIÓN*.
- Legal, M. (2005). *EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR) MEDIA ANUAL*.
- Meaden, G. J., & Kapetsky, J. M. (1992). *Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura* (p. 266).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *M e g s q a w s*. 50(3), 885–900.
- Mussardo, G. (2019). *Ciclo del agua*. Statistical Field Theor. <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/ciclo-del-agua/>
- Ordóñez, J. (2011). ¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ? *Sociedad Geológica de Lima, 1*, 1–44. http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Rincón, L. V. (2019). *Aplicación de los modelos lluvia - escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del río Guali para la gestión de los recursos hídricos*. Universidad de Santo Tomás.
- Rojas, O. (1999). *Sistemas de Información Geográfica*. 65–68. http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02_n2/sistemas.htm
- Sosa-Pedroza, J., & Martínez-Zúñiga, F. (2009). Los sistemas de información geográfica y su aplicación en enlaces de comunicaciones. *Científica*, 13, 27–34.
- Tarazona Roldán, H. G. (2016). Modelamiento Hidrológico de la Cuenca del Río Ica con fines de prevención de Inundaciones en la Ciudad de Ica. *Universidad Nacional Agraria La Molina, I(511)*, 119 pag.
- Urbanization, A., & On, I. (1973). Water Resources Bulletin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 9(6), 1289–1289. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1973.tb05876.x>
- Vergara, L. (2020). “*Simulación y pronóstico de caudales diarios del río Amazonas usando un enfoque híbrido wavelet y redes neuronales.*” *Para optar el Grado de Magister Scientiae en Recursos Hídricos*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Viessman Warren, & Garen, L. (2003). *Introduction to Hidrology* (Fifth).

- Villón, I. M. (2002). *HIDROLOGÍA*. 1-216 p.
- Zapana Arpasi, J. A. (2019). *Estimación de caudales mediante la aplicación de modelos hidrológicos semidistribuidos con la plataforma RS Minerve en la cuenca del río Ramis Puno*. 051, 363543.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/13780/Zapana_Arpasi_Jhon_Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zucarelli, V., Paris, M., & Paris, M. (2020). *Curso sobre GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA – Edición 2020*. 5–6.

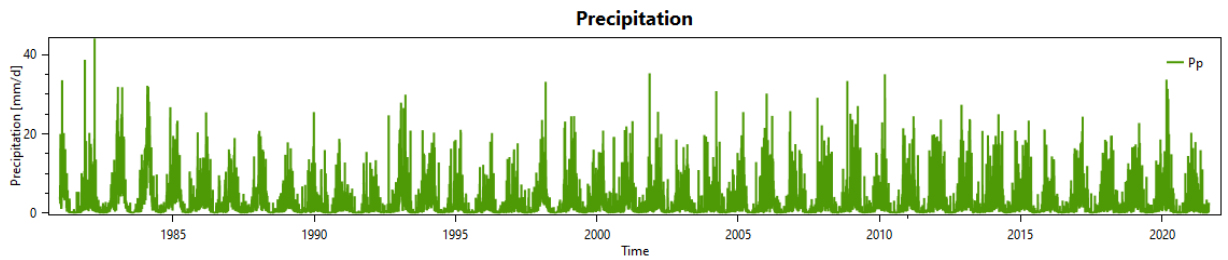
XI. ANEXOS

11.1. Precipitación diaria de las estaciones virtuales para la modelación – PISCOp SENAMHI V2.1

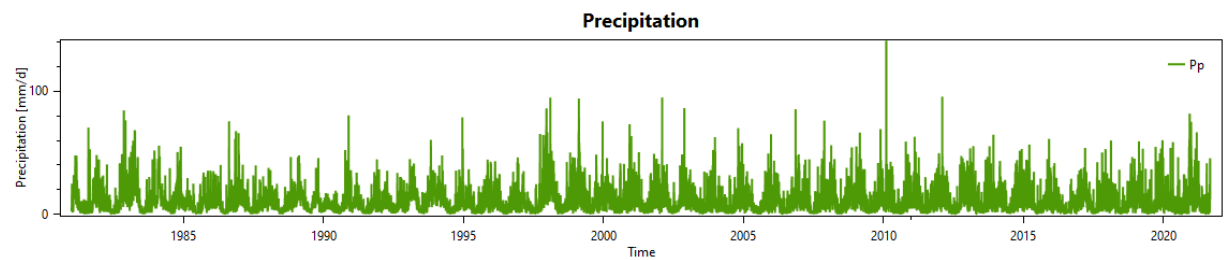
Estación Virtual 8



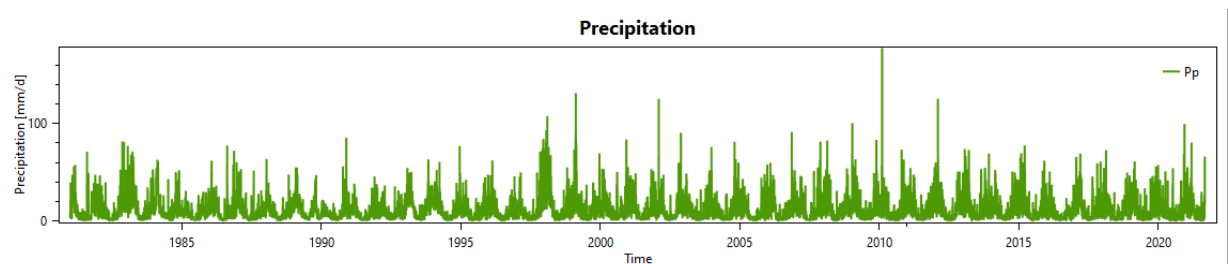
Estación Virtual 7



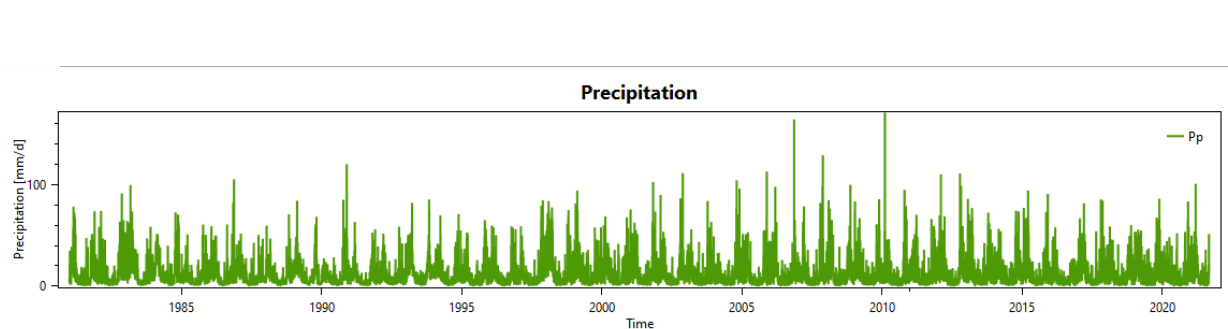
Estación Virtual 3



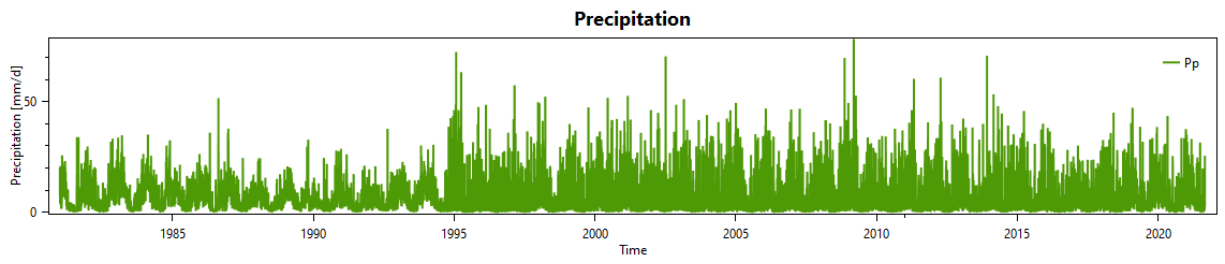
Estación Virtual 2



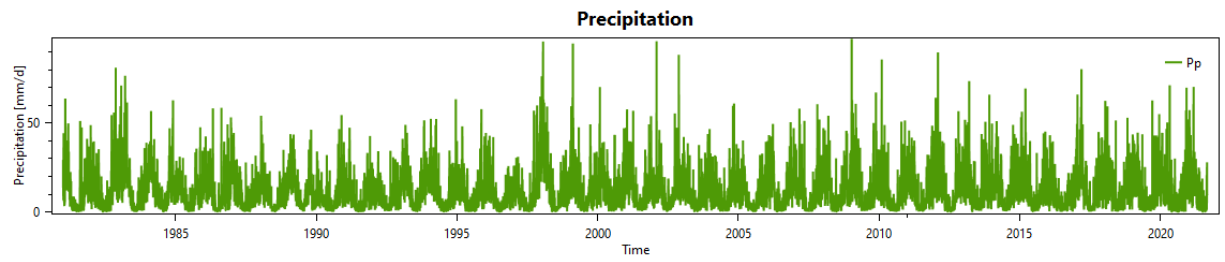
Estación Virtual 1



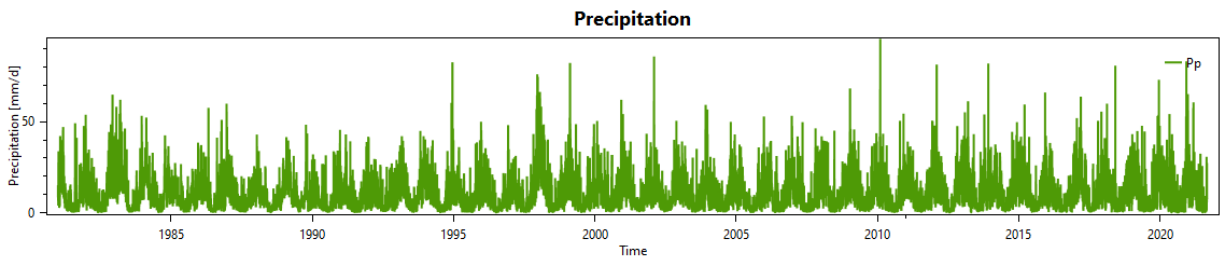
Estación Virtual 6



Estación Virtual 5

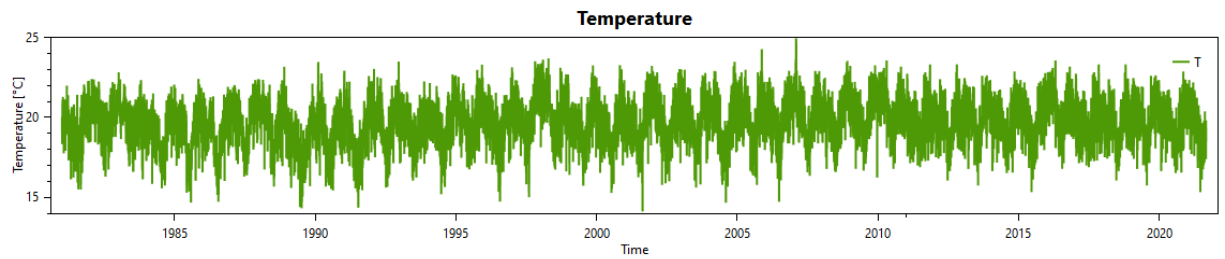


Estación Virtual 4

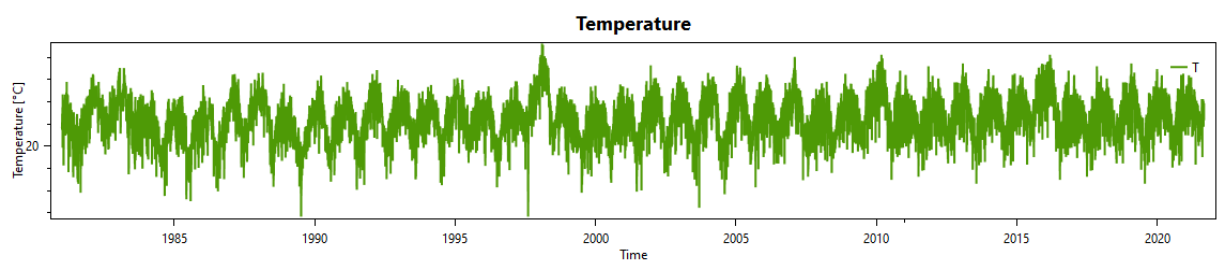


11.2. Precipitación diaria de las estaciones virtuales para la modelación – PISCOt SENAMHI V1.1

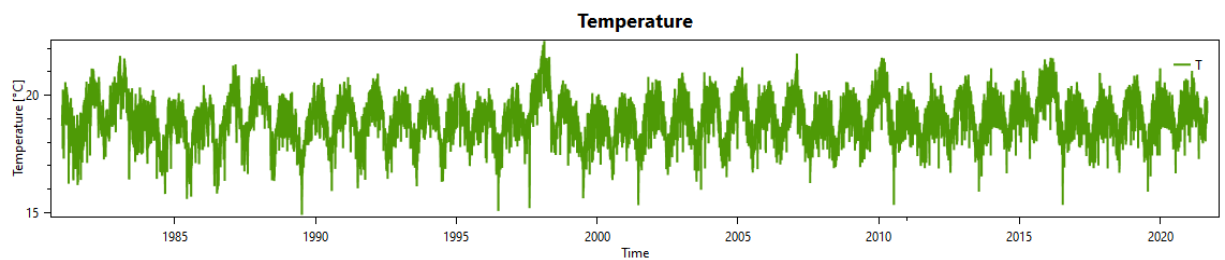
Estación Virtual 1



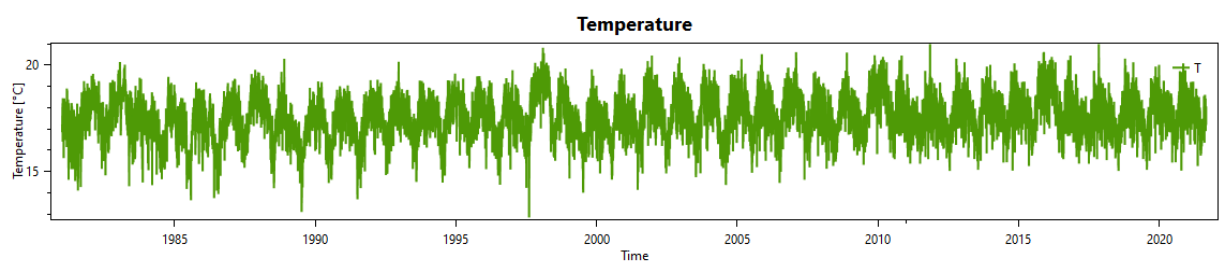
Estación Virtual 2



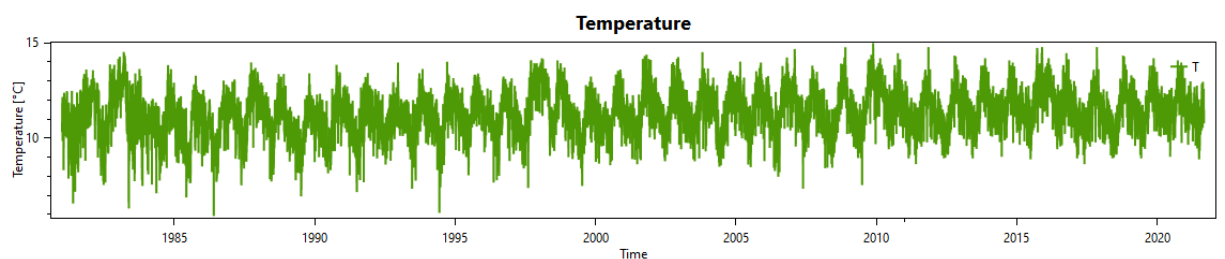
Estación Virtual 3



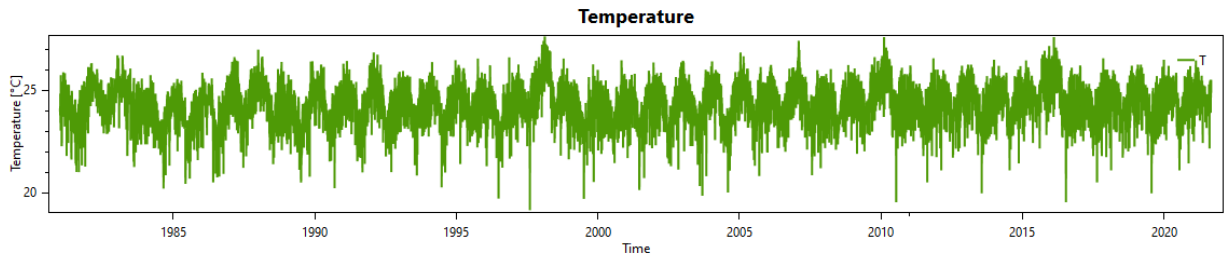
Estación Virtual 4



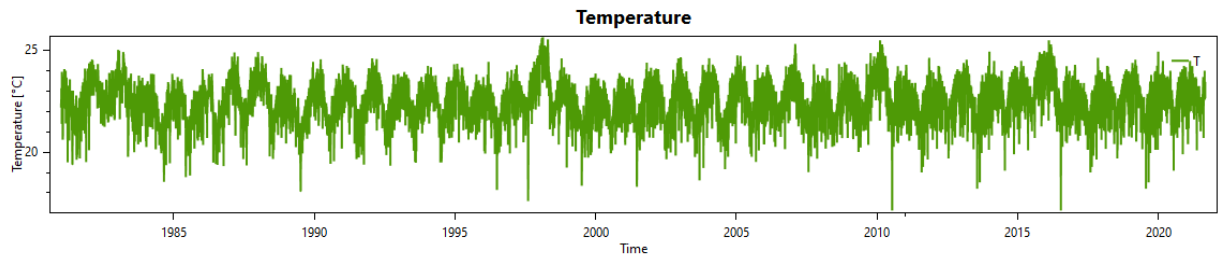
Estación Virtual 5



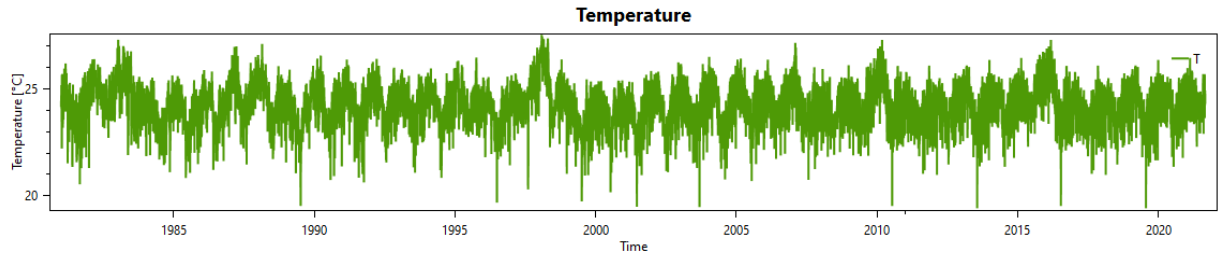
Estación Virtual 6



Estación Virtual 7



Estación Virtual 8



11.3. Registro promedio diario de caudales en la estación hidrométrica Taruca

Día	AÑO						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
01-Ene		174.33	139.44	128.92	156.97	66.29	143.51
02-Ene		176.17	136.36	141.27	119.47	58.39	139.47
03-Ene		154.41	107.39	125.76	100.70	52.11	158.31
04-Ene		165.93	87.8	123.64	97.05	50.69	145.70
05-Ene		193.16	79.02	116.1	168.87	66.80	137.59
06-Ene		208.51	79.92	116.1	175.99	71.63	120.41
07-Ene		203.47	83.58	143.28	157.91	63.25	104.53
08-Ene		185.21	77.22	144.29	214.11	81.23	95.86
09-Ene		174.33	69.3	126.82	182.94	95.51	94.14
10-Ene		168.75	63.35	125.76	157.91	75.18	88.72
11-Ene		156.36	58.39	117.19	140.73	139.87	86.09
12-Ene		145.5	60.03	141.27	145.59	178.39	92.77
13-Ene		150.48	57.58	158.02	149.43	189.71	96.46
14-Ene		133.26	53.56	162.79	158.83	176.23	90.98
15-Ene	124.85	126.97	51.98	203.79	189.76	170.60	94.90
16-Ene	118.41	114.04	48.09	200.42	175.99	163.76	110.54
17-Ene	154.41	101.74	48.86	220.16	168.87	195.16	129.66
18-Ene	208.51	115.14	51.98	187.46	199.72	222.02	126.76
19-Ene	179.81	141.47	51.98	155.12	194.78	203.66	119.99
20-Ene	154.41	147.5	90.17	185.69	202.16	176.99	128.47
21-Ene	152.45	186.1	72.79	166.56	198.08	157.28	129.20
22-Ene	126.97	192.28	62.52	165.62	199.72	211.27	115.73
23-Ene	120.57	191.41	53.56	166.56	195.61	213.04	111.36
24-Ene	149.49	178.9	47.33	166.56	187.22	244.33	106.69
25-Ene	160.22	182.52	44.3	216.14	164.35	241.73	152.51
26-Ene	161.18	174.33	42.06	193.57	148.47	224.54	142.78
27-Ene	124.85	208.51	42.06	185.69	138.76	206.29	124.30
28-Ene	138.42	204.31	42.8	162.79	132.79	241.77	111.36
29-Ene	149.49	177.99	56.77	141.27	117.37	253.57	116.20
30-Ene	119.49	170.62	65.88	121.5	108.19	305.57	105.72

31-Ene	124.85	242.64	84.5	106.16	93.46	250.01	101.47
01-Feb	142.48	247.14	80.83	93.79	86.48	242.57	105.56
02-Feb	137.39	236.54	84.5	82.15	85.34	226.48	111.50
03-Feb	140.46	219.19	99.46	77.24	83.08	225.21	162.55
04-Feb	151.47	192.28	136.36	76.04	79.75	220.63	146.93
05-Feb	124.85	172.48	146.5	73.67	81.96	241.43	154.27
06-Feb	135.33	156.36	147.5	66.82	104.41	249.91	198.04
07-Feb	164.99	169.69	130.13	91.13	97.05	308.79	172.60
08-Feb	157.32	185.21	133.26	95.91	94.65	301.03	179.51
09-Feb	147.5	187.88	141.47	122.57	128.75	270.48	202.32
10-Feb	180.72	213.48	158.29	111.72	138.76	252.18	220.49
11-Feb	211.0	206.84	145.50	105.03	144.62	307.70	184.14
12-Feb	173.4	185.21	141.47	118.27	117.37	324.05	168.60
13-Feb	302.78	198.35	161.18	141.27	105.66	335.51	169.95
14-Feb	270.91	188.77	133.26	190.09	129.77	294.37	178.95
15-Feb	247.14	239.6	129.08	182.13	143.65	267.02	165.34
16-Feb	221.61	221.61	108.51	143.28	195.61	244.00	161.00
17-Feb	215.94	192.28	105.14	153.18	182.08	234.11	153.50
18-Feb	201.77	174.33	112.94	157.06	179.48	213.51	149.75
19-Feb	180.72	162.13	101.74	157.06	224.88	206.06	148.89
20-Feb	163.09	140.46	97.16	157.06	205.39	229.23	145.79
21-Feb	152.45	130.13	120.57	148.27	193.95	204.10	135.52
22-Feb	166.87	133.26	109.62	144.29	158.83	180.92	130.62
23-Feb	177.99	136.36	142.48	166.56	161.60	169.09	117.53
24-Feb	244.15	153.43	141.47	180.34	139.75	162.01	107.03
25-Feb	274.37	176.17	164.99	191.83	135.79	157.55	98.02
26-Feb	243.39	169.69	181.62	247.03	137.77	177.07	94.90
27-Feb	212.66	184.32	185.21	269.85	131.79	190.98	88.77
28-Feb	237.31	193.16	187.88	237.3	124.66	180.90	85.57
29-Feb			206.84				103.69
01-Mar	239.6	192.28	199.21	202.11	144.62	182.60	178.07
02-Mar	185.21	224.01	169.69	189.21	147.52	181.97	158.69
03-Mar	164.99	224.01	159.26	198.72	166.17	171.78	134.49

04-Mar	177.99	212.66	135.33	183.02	163.44	175.75	120.98
05-Mar	161.18	257.43	128.03	167.5	162.52	164.68	112.47
06-Mar	174.33	302.78	111.84	179.43	188.91	188.97	107.18
07-Mar	175.25	283.21	164.04	186.57	212.54	162.76	103.45
08-Mar	196.63	254.52	202.62	213.71	186.37	167.69	93.28
09-Mar	177.08	235	173.4	191.83	167.97	192.90	88.88
10-Mar	184.32	220.8	183.42	241.83	168.87	170.89	97.42
11-Mar	185.21	203.47	200.92	235.78	154.17	228.13	93.17
12-Mar	167.81	194.03	170.62	234.25	140.73	185.08	95.76
13-Mar	179.81	181.62	185.21	209.61	141.71	226.26	84.63
14-Mar	211.83	173.4	163.09	252.89	155.11	204.55	119.85
15-Mar	197.49	167.81	160.22	229.62	198.08	267.46	104.85
16-Mar	194.03	164.99	139.44	231.17	224.88	233.77	96.97
17-Mar	215.94	164.04	124.85	222.55	223.36	208.90	122.15
18-Mar	238.84	165.93	111.84	200.42	300.19	189.50	143.99
19-Mar	279.84	182.52	102.88	186.57	257.94	204.81	168.47
20-Mar	240.36	163.09	110.73	171.22	218.00	197.28	190.10
21-Mar	212.66	184.32	125.91	158.98	207.79	191.33	172.68
22-Mar	309.69	177.99	124.85	146.28	186.37	251.28	174.74
23-Mar	249.37	164.99	105.14	142.28	176.86	237.71	196.18
24-Mar	226.39	159.26	93.68	162.79	198.08	240.87	171.17
25-Mar	194.9	183.42	84.5	176.72	197.26	232.88	149.41
26-Mar	185.21	176.17	106.27	169.36	206.19	230.72	134.85
27-Mar	272.3	159.26	86.62	204.63	187.22	241.97	163.30
28-Mar	208.51	166.87	79.92	190.96	175.99	276.01	189.86
29-Mar	179.81	187.88	83.58	181.23	174.22	245.78	217.75
30-Mar	159.26	158.29	77.22	190.09	173.34	219.46	191.48
31-Mar	159.26	148.5	71.04	192.7	167.07	196.49	171.21
01-Abr	147.5	194.03	71.91	192.7	161.60	177.35	201.79
02-Abr	148.5	185.21	71.91	173.98	159.76	190.17	185.19
03-Abr	146.5	161.18	71.04	177.63	148.47	208.38	164.76
04-Abr	140.46	155.38	70.17	205.46	210.97	184.92	149.62
05-Abr	147.5	153.43	70.17	184.8	201.35	157.59	143.02

06-Abr	152.45	176.17	75.44	174.89	184.66	149.80	146.88
07-Abr	138.42	170.62	66.73	162.79	164.35	158.82	137.64
08-Abr	130.13	162.13	62.52	168.43	156.97	145.31	139.78
09-Abr	122.72	161.18	99.46	174.89	204.59	139.11	137.05
10-Abr	125.91	203.47	139.44	173.06	193.11	130.07	133.08
11-Abr	132.22	185.21	119.49	174.89	171.56	122.57	135.03
12-Abr	116.23	178.9	116.23	175.81	156.04	114.87	130.44
13-Abr	109.62	175.25	93.68	179.43	167.07	109.23	121.26
14-Abr	107.39	165.93	80.83	160.89	229.39	115.96	114.20
15-Abr	108.51	174.33	77.22	143.28	200.54	103.69	104.14
16-Abr	100.6	237.31	86.62	132.05	175.99	101.61	99.72
17-Abr	92.51	194.9	110.73	120.43	154.17	101.47	96.31
18-Abr	91.34	166.87	109.62	112.82	139.75	105.91	97.62
19-Abr	92.51	156.36	99.46	110.61	128.75	97.12	91.08
20-Abr	85.43	165.93	88.99	109.5	119.47	98.37	82.49
21-Abr	80.83	164.04	83.58	103.91	116.32	93.53	75.88
22-Abr	91.34	181.62	78.12	93.79	110.75	99.17	70.22
23-Abr	92.51	164.99	75.44	106.16	109.46	102.31	66.80
24-Abr	91.34	170.62	80.83	103.91	108.19	93.58	63.78
25-Abr	96	168.75	70.2	101.64	113.13	94.44	62.83
26-Abr	97.16	162.13	60.34	91.13	115.26	86.81	63.02
27-Abr	157.32	148.5	55.22	109.5	110.75	87.12	64.51
28-Abr	105.14	139.44	53.25	117.19	122.59	92.97	64.78
29-Abr	125.91	133.26	48.5	128.92	118.42	86.40	61.51
30-Abr	122.72	125.91	44.89	122.57	110.75	80.63	61.88
01-May	115.14	119.49	42.3	120.43	100.70	77.82	66.91
02-May	101.74	116.23	39.79	103.91	100.70	81.02	73.35
03-May	96	125.91	38.98	95.14	88.77	76.36	73.19
04-May	118.41	117.32	35.83	85.94	80.85	72.68	116.44
05-May	114.04	112.94	35.06	79.67	84.20	71.90	107.38
06-May	112.94	108.51	33.57	77.24	87.62	78.43	90.73
07-May	119.49	105.14	32.84	82.15	87.62	73.62	103.74
08-May	145.5	105.14	32.12	77.24	83.08	68.92	125.42

09-May	133.26	105.14	32.84	74.85	78.65	66.17	105.17
10-May	138.42	99.46	32.12	71.35	74.33	64.37	92.10
11-May	123.79	93.68	30.03	107.28	70.13	65.50	85.36
12-May	111.84	96	30.03	79.67	68.07	61.35	90.01
13-May	100.6	100.6	29.35	72.5	73.27	63.02	84.63
14-May	93.68	158.29	29.35	69.06	65.04	80.12	71.63
15-May	93.68	172.48	29.35	65.71	60.12	75.39	74.00
16-May	100.6	176.17	28.02	77.24	57.26	66.68	74.32
17-May	85.43	193.16	28.02	79.67	58.21	62.18	82.80
18-May	93.68	213.48	30.71	88.51	61.09	58.86	72.44
19-May	83.58	194.9	28.02	73.67	56.32	55.52	73.35
20-May	83.58	168.75	27.38	73.67	53.54	53.36	64.82
21-May	94.84	151.47	28.02	82.15	51.72	51.41	59.45
22-May	83.58	137.39	28.02	101.64	53.54	51.38	58.79
23-May	79.02	126.97	30.03	99.36	49.93	50.07	61.35
24-May	73.67	121.64	32.84	100.5	47.30	51.84	60.31
25-May	72.79	112.94	30.71	87.22	44.73	51.21	75.71
26-May	66.73	105.14	30.03	77.24	43.06	50.76	81.18
27-May	64.19	100.6	28.02	74.85	41.41	49.39	64.47
28-May	60.86	94.84	26.11	76.04	40.60	43.99	59.20
29-May	57.58	92.51	25.5	76.04	38.99	45.79	55.10
30-May	55.16	88.99	24.3	69.06	38.20	44.19	50.93
31-May	52.77	86.62	23.71	63.53	37.41	43.03	48.48
01-Jun	51.2	86.62	23.14	62.46	36.64	41.96	47.05
02-Jun	49.64	85.43	22.58	60.34	38.20	40.42	46.98
03-Jun	48.09	82.66	22.58	58.26	49.93	39.54	46.00
04-Jun	46.56	81.74	22.02	58.26	73.27	39.59	44.63
05-Jun	45.05	78.12	22.02	57.24	69.10	38.97	45.96
06-Jun	44.3	75.44	22.02	54.23	58.21	38.19	48.69
07-Jun	42.8	70.17	22.02	51.32	49.93		47.55
08-Jun	41.32	70.17	21.48	48.5	44.73		43.73
09-Jun	40.59	69.3	22.02	46.68	41.41		41.52
10-Jun	39.13	67.59	22.02	50.37	40.60	36.25	39.94

11-Jun	39.13	66.73	21.48	45.78	38.99	35.55	38.30
12-Jun	37.69	65.04	20.95	43.15	37.41	35.24	38.21
13-Jun	38.41	65.04	20.43	44.02	36.64	34.23	37.29
14-Jun	36.97	63.35	19.92	40.62	41.41	33.83	36.28
15-Jun	38.41	62.52	18.93	38.17	39.79	34.19	37.05
16-Jun	39.13	61.68	18.93	37.38	38.99	34.37	36.25
17-Jun	40.59	60.86	18.45	35.83	40.60	40.31	35.67
18-Jun	39.13	59.21	18.45	34.31	37.41	36.70	35.03
19-Jun	36.26	65.04	18.45	33.57	35.10	36.70	34.00
20-Jun	34.85	72.79	18.45	32.12	32.85	35.24	33.54
21-Jun	34.15	63.35	17.98	31.41	31.39	34.29	32.54
22-Jun	32.76	59.21	18.45	31.41	30.67	33.07	32.37
23-Jun	32.07	56.77	17.98	30.03	29.95	32.82	31.93
24-Jun	31.38	55.16	17.52	29.35	28.55	32.29	31.35
25-Jun	30.7	53.56	17.98	28.68	28.55	31.98	30.61
26-Jun	30.7	52.77	18.45	28.02	29.95	31.40	30.21
27-Jun	32.76	52.77	18.93	26.74	29.25	31.29	29.91
28-Jun	33.45	51.98	20.95	26.74	27.86	32.23	29.32
29-Jun	32.07	50.42	22.02	26.74	26.49	34.86	29.35
30-Jun	31.38	48.86	20.43	26.74	25.82	35.41	29.32
01-Jul	30.02	47.33	18.93	27.38	25.82	33.92	28.79
02-Jul	30.02	47.33	18.45	39.79	25.16	32.87	27.88
03-Jul	29.34	46.56	17.52	38.98	23.85	31.29	27.59
04-Jul	28.67	47.33	17.52	33.57	23.85	30.07	27.41
05-Jul	28	54.36	17.07	28.68	23.20	29.97	27.39
06-Jul	27.33	50.42	17.52	28.02	23.20	29.64	28.37
07-Jul	28	46.56	18.45	26.74	22.57	30.94	28.56
08-Jul	27.33	45.05	19.42	26.11	21.94	31.82	28.01
09-Jul	27.33	43.55	19.42	25.5	21.94	30.45	33.04
10-Jul	26.67	42.8	19.42	24.89	21.94	29.19	35.76
11-Jul	25.36	42.06	18.45	24.3	25.16	28.35	38.03
12-Jul	24.71	42.8	17.52	24.3	25.16	27.93	33.07
13-Jul	24.71	41.32	17.07	23.71	25.16	27.62	30.61

14-Jul	24.06	39.86	16.63	23.14	24.50	27.36	28.98
15-Jul	24.06	39.86	16.63	22.02	23.20	27.54	28.45
16-Jul	23.42	39.86	16.63	22.02	22.57	27.78	27.49
17-Jul	22.78	41.32	16.63	22.02	21.32	28.78	26.85
18-Jul	22.78	41.32	16.2	21.48	22.57	29.64	26.42
19-Jul	23.42	40.59	16.2	21.48	23.85	28.22	25.89
20-Jul	26.01	39.13	15.79	20.95	23.85	29.08	25.46
21-Jul	27.33	37.69	15.79	20.43	24.50	28.98	24.82
22-Jul	25.36	36.97	15.79	19.92	34.34	28.19	24.52
23-Jul	24.06	36.26	15.79	19.92	37.41	27.13	
24-Jul	22.78	36.26	15.38	19.92	30.67	27.31	
25-Jul	22.78	35.55	15.38	19.42	27.17	27.80	
26-Jul	24.06	34.85	15.38	19.42	24.50	27.39	
27-Jul	23.42	35.55	15.38	19.42	23.20	27.39	
28-Jul	25.36	34.15	15.38	18.93	21.32	29.06	
29-Jul	27.33	33.45	15.38	18.45	20.70	27.57	
30-Jul	26.01	33.45	14.98	18.45	20.70	26.34	
31-Jul	24.06	32.76	14.98	18.45	20.09	25.51	
01-Ago	22.78	33.45	14.98	16.2	19.49	24.94	22.88
02-Ago	22.14	32.76	14.98	13.16	20.09	24.50	23.07
03-Ago	21.51	32.76	15.38	13.16	20.09	24.37	22.48
04-Ago	20.88	32.07	14.6	17.07	20.70	24.67	22.38
05-Ago	20.26	32.07	14.6	17.07	20.09	24.47	22.29
06-Ago	20.26	32.07	14.6	13.16	20.70	23.60	22.15
07-Ago	20.26	31.38	14.98	14.98	27.86	23.14	22.03
08-Ago	20.26	30.7	14.98	16.2	27.17	22.97	22.97
09-Ago	21.51	30.7	14.98	15.79	27.17	23.00	23.00
10-Ago	22.14	30.7	14.6	15.79	24.50	22.62	22.62
11-Ago	21.51	30.02	15.38	15.79	23.20	22.88	22.88
12-Ago	20.88	32.07	15.79	15.79	21.94		
13-Ago	20.26	36.97	15.38	15.79	20.09	22.59	22.59
14-Ago	20.26	35.55	15.79	15.79	18.90	22.55	22.55
15-Ago	19.64	32.76	15.79	16.2	18.31	22.45	21.47

16-Ago	19.64	32.76	15.38	15.38	18.31	22.17	21.80
17-Ago	19.02	32.76	14.98	15.79	20.09	21.80	21.61
18-Ago	18.41	31.38	14.6	17.07	20.70	21.96	21.22
19-Ago	17.79	30.7	14.6	17.52	21.32	21.68	20.94
20-Ago	17.79	29.34	15.38	16.63	20.70	21.68	21.31
21-Ago	17.19	29.34	15.38	17.52	20.09	22.38	21.52
22-Ago	16.58	28.67	15.38	17.07	21.32	23.00	21.77
23-Ago	16.58	28.67	15.38	16.63	21.32	22.33	21.33
24-Ago	15.99	28.67	14.6	15.79	21.32	22.33	20.83
25-Ago	15.99	28	14.22	15.79	20.70	21.70	20.55
26-Ago	15.99	28	14.22	15.38	20.09	21.45	21.45
27-Ago	17.19	28	14.22	15.38	20.09	21.01	21.01
28-Ago	17.79	28.67	14.22	15.38	20.09	21.24	21.24
29-Ago	17.79	30.02	14.22	16.2	19.49	20.83	20.83
30-Ago	18.41	28.67	14.22	16.2	18.31	20.62	20.62
31-Ago	19.02	28	14.6	15.79	17.16	20.56	20.56
01-Set	20.26	27.33	17.98	16.04	18.26	20.58	20.26
02-Set	19.64	26.67	17.07	15.49	17.91	20.67	20.28
03-Set	17.19	27.33	15.79	16.04	17.95	20.57	20.22
04-Set	17.79	27.33	15.38	15.49	17.68	20.76	19.92
05-Set	18.41	28	14.98	14.94	17.26	20.92	19.92
06-Set	20.88	27.33	14.6	14.94	16.84	21.24	19.70
07-Set	22.14	29.34	14.6	14.94	16.44	21.30	19.37
08-Set	20.88	30.02	14.22	14.94	16.07	21.79	19.63
09-Set	18.41	28	13.86	14.94	15.81	22.05	21.59
10-Set	17.79	27.33	13.86	14.94	15.93	21.26	21.45
11-Set	17.19	27.33	14.22	15.49	15.81	20.62	21.08
12-Set	17.19	26.67	13.86	16.6	15.71	20.65	20.35
13-Set	17.79	26.67	13.86	16.6	15.41	21.10	20.35
14-Set	23.42	27.33	13.86	18.31	15.43	21.84	20.17
15-Set	25.36	28	13.86	21.94	15.57	22.01	19.97
16-Set	30.7	27.33	14.22	29.25	16.38	21.17	19.92
17-Set	55.96	26.01	14.22	32.85	16.44	20.31	19.57

18-Set	68.44	26.01	13.86	32.85	22.71	19.86	19.48
19-Set	72.79	26.67	13.5	30.67	22.78	19.95	20.15
20-Set	51.98	30.7	13.86	25.16	20.01	22.17	20.87
21-Set	53.56	32.07	13.5	21.32	18.58	26.57	20.62
22-Set	71.04	29.34	13.86	18.9	17.72	31.79	20.85
23-Set	61.68	28.67	13.86	18.31	17.23	30.83	21.29
24-Set	46.56	28	13.86	17.73	17.36	30.45	23.09
25-Set	46.56	28	14.6	19.49	18.69	30.18	23.38
26-Set	51.2	28	15.38	21.94	18.62	28.82	22.38
27-Set	49.64	26.67	17.52	25.16	22.03	26.59	25.12
28-Set	46.56	28	17.52	24.5	21.59	25.59	30.88
29-Set	51.2	29.34	17.07	22.57	19.68	23.67	27.00
30-Set	45.05	33.45	16.2	20.7	18.17	23.40	27.83
01-Oct	39.13	32.07	15.38	18.9	18.15	24.82	29.24
02-Oct	34.85	30.02	16.2	17.73	20.71	26.42	27.83
03-Oct	37.69	31.38	17.52	16.6	28.37	26.04	26.80
04-Oct	36.97	31.38	16.63	16.6	32.23	29.32	25.94
05-Oct	32.76	28.67	15.79	16.04	51.86	28.47	25.01
06-Oct	30.02	24.71	19.42	15.49	42.24	26.16	23.38
07-Oct	31.38	24.06	24.3	15.49	41.64	31.54	22.59
08-Oct	30.02	23.42	19.92	16.04	36.99	39.42	22.55
09-Oct	59.21	23.42	17.52	14.94	32.57	33.75	22.08
10-Oct	59.21	22.14	17.07	14.94	28.87	30.13	21.13
11-Oct	51.2	20.26	17.52	14.41	28.43	26.64	20.53
12-Oct	55.96	20.26	20.95	14.41	31.84	24.18	19.88
13-Oct	51.2	19.64	19.92	14.41	28.11	23.60	19.79
14-Oct	44.3	19.02	25.5	14.41	57.84	25.34	19.63
15-Oct	37.69	18.41	33.57	15.49	60.12	25.76	19.63
16-Oct	34.15	18.41	35.83	20.7	54.81	26.47	20.33
17-Oct	33.45	20.26	36.6	23.85	60.64	27.44	20.13
18-Oct	29.34	24.71	41.45	25.82	68.70	37.47	19.92
19-Oct	26.67	23.42	40.62	21.94	66.09	49.50	22.71
20-Oct	34.15	21.51	35.06	19.49	52.14	78.64	22.50

21-Oct	39.13	22.78	28.68	20.7	101.66	54.57	23.33
22-Oct	50.42	22.14	26.11	29.95	101.61	45.13	26.70
23-Oct	59.21	22.14	24.3	31.39	80.60	42.27	30.23
24-Oct	52.77	23.42	23.14	37.41	160.25	38.72	31.60
25-Oct	106.27	23.42	24.3	31.39	128.07	33.60	28.27
26-Oct	71.04	24.06	25.5	33.6	148.76	29.97	27.23
27-Oct	58.39	28	24.89	29.95	133.72	28.61	26.09
28-Oct	45.05	36.97	30.03	32.85	134.03	29.56	27.31
29-Oct	40.59	38.41	27.38	35.1	113.72	26.77	25.71
30-Oct	39.13	42.8	25.5	56.32	94.24	29.56	29.19
31-Oct	40.59	39.86	27.38	55.38	138.00	32.96	44.31
01-Nov	48.09	33.45	24.89	38.99	181.57	35.44	37.44
02-Nov	55.96	28	22.02	38.99	161.26	38.57	31.08
03-Nov	64.19	24.71	20.43	32.12	144.87	36.37	27.65
04-Nov	48.09	22.78	26.11	31.39	126.02	41.58	25.99
05-Nov	41.32	20.88	38.17	31.39	107.52	44.86	25.24
06-Nov	69.3	28.67	30.03	29.25	95.56	49.67	24.15
07-Nov	88.99	31.38	24.3	33.6	77.90	47.38	22.71
08-Nov	68.44	43.55	23.14	51.72	72.12	47.05	21.73
09-Nov	55.16	90.17	27.38	42.23	75.88	51.93	21.36
10-Nov	50.42	76.33	24.89	43.89	64.39	54.35	20.78
11-Nov	61.68	58.39	23.71	51.72	60.72	108.11	21.96
12-Nov	55.16	58.39	20.43	70.13	64.78	120.89	21.29
13-Nov	50.42	59.21	17.98	66.04	66.06	95.46	22.00
14-Nov	83.58	56.77	17.98	50.82	54.24	67.82	22.35
15-Nov	61.68	65.04	17.07	60.12	54.81	59.75	21.66
16-Nov	58.39	82.66	16.2	53.54	67.70	70.39	20.97
17-Nov	59.21	86.62	17.52	52.63	64.12	76.36	20.90
18-Nov	54.36	88.99	17.52	74.33	60.12	60.83	22.59
19-Nov	60.03	65.04	18.45	83.08	55.70	66.76	21.73
20-Nov	50.42	52.77	16.63	73.27	91.95	55.99	21.42
21-Nov	51.2	51.2	15.79	57.26	97.67	49.90	24.35
22-Nov	46.56	68.44	15.38	46.44	112.42	44.70	25.66

23-Nov	40.59	67.59	14.98	39.79	91.80	43.03	23.48
24-Nov	38.41	53.56	14.6	39.79	77.90	49.19	22.95
25-Nov	36.26	47.33	14.6	38.99	72.76	46.72	20.83
26-Nov	37.69	43.55	15.79	35.87	162.89	41.64	19.77
27-Nov	37.69	40.59	17.98	33.6	151.78	38.75	19.52
28-Nov	34.15	45.05	17.98	65.04	100.37	40.22	19.48
29-Nov	35.55	47.33	23.14	68.07	82.12	18.48	20.10
30-Nov	34.85	45.8	25.5	50.82	66.56	20.99	22.29
01-Dic	35.55	101.74	63.53	59.16	57.58	43.38	25.34
02-Dic	37.69	71.91	35.83	93.46	51.51	48.62	27.18
03-Dic	47.33	57.58	31.41	155.11	52.45	100.07	27.18
04-Dic	163.09	58.39	46.68	95.84	46.19	107.52	35.64
05-Dic	130.13	67.59	76.04	108.19	42.18	118.20	66.06
06-Dic	99.46	80.83	49.43	184.66	41.24	101.61	72.60
07-Dic	78.12	79.02	38.98	160.68	45.12	120.51	85.78
08-Dic	74.55	58.39	65.71	121.55	46.56	116.83	97.37
09-Dic	133.26	67.59	61.39	110.75	43.54	122.96	69.84
10-Dic	164.04	90.17	64.62	103.17	41.08	164.92	53.96
11-Dic	117.32	97.16	53.25	77.56	39.82	151.44	52.84
12-Dic	90.17	71.04	47.59	67.06	36.81	137.82	52.84
13-Dic	79.92	60.03	46.68	60.12	35.85	136.68	40.84
14-Dic	85.43	52.77	37.38	55.38	34.49	220.92	37.35
15-Dic	78.12	49.64	65.71	52.63	68.48	178.71	34.49
16-Dic	111.84	46.56	85.94	58.21	56.13	155.72	35.96
17-Dic	153.43	50.42	57.24	50.82	65.40	204.94	40.90
18-Dic	148.5	51.98	44.02	72.22	70.55	212.39	45.80
19-Dic	120.57	86.62	41.45	127.73	100.82	287.32	60.87
20-Dic	91.34	96	45.78	86.48	113.52	248.93	52.31
21-Dic	78.12	98.31	41.45	75.4	198.53	213.77	55.46
22-Dic	74.55	88.99	60.34	74.33	179.98	240.26	56.31
23-Dic	73.67	97.16	50.37	69.1	150.92	208.46	66.99
24-Dic	74.55	145.5	38.98	65.04	120.54	234.45	65.55
25-Dic	73.67	151.47	33.57	67.06		204.77	76.41

26-Dic	96	152.45	31.41	58.21	170.52	74.00
27-Dic	129.08	169.69	31.41	85.34	157.00	94.11
28-Dic	120.57	206	28.68	94.65	147.93	117.57
29-Dic	139.44	219.19	73.67	159.76	164.80	115.86
30-Dic	131.18	178.9	60.34	135.79	156.74	112.02
31-Dic	139.44	153.43	102.77	132.79	142.84	103.16
