



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**Evaluación del caudal generado mediante precipitación de  
sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo  
GR2m, en la cuenca Viconga-Lima-2023**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Civil

**AUTOR:**

Cordero Mescco, Yazid Pedro Nilton (orcid.org/0000-0002-3761-6605)

**ASESORA:**

Dra. Arriola Moscoso, Cecilia (orcid.org/ 0000-0003-2497-294X)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño de Obras Hidráulicas y Saneamiento

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**LIMA – PERÚ**

**2023**

## **Dedicatoria**

Dedico esta investigación en primer lugar a Dios y a mis padres, ya que son ellos la imagen de esfuerzo y voluntad de seguir luchando por los que aman, dedicando, cada uno a su manera, especial cuidado para mí y mis hermanas, asimismo, agradezco a todos aquellos que me sigue alentando y brindando oportunidades para seguir creciendo.

## **Agradecimiento**

Un especial agradecimiento a toda mi familia y amigos, ya que son parte ellos de cada esfuerzo que sigo realizando, asimismo, de la ferviente voluntad de seguir mejorando de parte mía.

## Declaratoria de autenticidad del asesor



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, ARRIOLA MOSCOSO CECILIA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, asesor de Tesis titulada: "Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Lima-2023", cuyo autor es CORDERO MESCCO YAZID PEDRO NILTON, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 15.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 30 de Noviembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
ARRIOLA MOSCOSO CECILIA DNI: 43851809 ORCID: 0000-0003-2497-294X	Firmado electrónicamente por: CARRIOLAM el 30- 11-2023 21:26:06

Código documento Trilce: TRI - 0675123



## Declaratoria de originalidad del autor



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### Declaratoria de Originalidad del Autor

Yo, CORDERO MESCCO YAZID PEDRO NILTON estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Lima-2023", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
CORDERO MESCCO YAZID PEDRO NILTON DNI: 72813497 ORCID: 0000-0002-3761-6605	Firmado electrónicamente por: PCORDEROME el 30- 11-2023 21:26:51

Código documento Trilce: INV - 1512936



## Índice de contenidos

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Declaratoria de autenticidad del asesor .....	iv
Declaratoria de originalidad del autor .....	v
Índice de tablas .....	vii
Índice de figuras .....	viii
Resumen .....	x
Abstract .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. METODOLOGÍA .....	19
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	19
3.2. Variables y operacionalización: .....	20
3.3. Población, muestra y muestreo .....	20
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos: .....	22
3.5. Procedimientos: .....	24
3.6. Método de análisis de datos: .....	28
3.7. Aspectos éticos: .....	28
IV. RESULTADOS .....	29
V. DISCUSIÓN .....	58
VI. CONCLUSIONES .....	63
VII. RECOMENDACIONES .....	65
REFERENCIAS .....	67
ANEXOS .....	

## Índice de tablas

Tabla 1: Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	23
Tabla 2: Escala del coeficiente de Kappa. ....	24
Tabla 3: Consideración de los resultados para la contrastación de hipótesis. ....	27
Tabla 4: Ubicación geográfica de la cuenca de estudio en función de la estación hidrométrica.....	31
Tabla 5: Precipitación media anual presente en las estaciones consideradas en la investigación.....	31
Tabla 6: Disponibilidad de registros de temperatura media en el ámbito de estudio. ....	32
Tabla 7: Resultados del análisis estadístico para la independencia de los datos. ....	35
Tabla 8: Resultados del análisis estadístico para para tendencia de los datos....	36
Tabla 9: Resultados del análisis estadístico para la evaluación de saltos. ....	36
Tabla 10: Resultados de la validación estadística cruzada de la precipitación satelital. ....	37
Tabla 11: Precipitación promedio anual de los 6 píxeles de CHIRPS considerados. ....	42
Tabla 12: Precipitación histórica anual en las estaciones consideradas. ....	44
Tabla 13: Diferencias porcentuales de los caudales generados. ....	47
Tabla 14: Diferencias porcentuales de los caudales generados. ....	49
Tabla 15: Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración con registros históricos. ....	50
Tabla 16: Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración con registros satelitales.....	51
Tabla 17: Estadísticos de eficiencia obtenidos con el modelo GR2m .....	53
Tabla 18: Estadísticos de eficiencia obtenidos con el modelo GR2m .....	54
Tabla 19: Variaciones medias de los caudales generados con el modelo GR2m	55
Tabla 20: Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración. ...	56
Tabla 21: Estadísticos de eficiencia del modelo GR2m obtenidos en la calibración. ....	57

## Índice de figuras

Figura 1: Precipitación como variable climática y modos de cuantificación .....	10
Figura 2: Ciclo hidrológico y transformación de la precipitación.....	11
Figura 3: Instrumentos de caracterización de tormentas: Pluviómetro (Izq.) y Banda registral de Pluviógrafo (Der.).....	12
Figura 4: Base metodológica de producto grillado CHIRPS.....	15
Figura 5: Parámetros geomorfológicos de una cuenca .....	15
Figura 6: Esquema de Balance Hídrico Simple para estimación de caudales generados. ....	17
Figura 7: Estructura determinística y consideraciones matemáticas del modelo hidrológico GR2m.....	18
Figura 8: Población de cuencas en el río Pativilca .....	21
Figura 9: Cuencas de orden menor y ubicación de la cuenca Viconga.....	21
Figura 10: Cuenca Viconga como unidad de análisis.....	22
Figura 11: Ubicación política de la cuenca de estudio. ....	29
Figura 12: Ubicación hidrográfica del área de estudio. ....	30
Figura 13: Registros de caudales mensuales naturales en el embalse Viconga..	33
Figura 14: Gráfico de cajas de la precipitación mensual para las estaciones Cajatambo y Chiquián.....	33
Figura 15: Gráfico de cajas de la precipitación mensual para las estaciones Gorgor y Laguna Surasaca. ....	34
Figura 16: Registros de precipitación mensual completada (rojo).....	35
Figura 17: Curva de doble masa de las estaciones consideradas en el estudio. .	37
Figura 18: Resultados de la validación gráfica de la precipitación satelital CHIRPS. .....	38
Figura 19: Precipitación media areal en la cuenca de estudio para las dos fuentes consideradas.....	39
Figura 20: Temperatura máxima, media y mínima areal para la zona de estudio.	39
Figura 21: Evapotranspiración potencial en la subcuenca Viconga. ....	40
Figura 22: Ubicación de los píxeles de CHIRPS. ....	41
Figura 23: Precipitación media anual de los píxeles de precipitación CHIRPS. ...	42



Figura 24: Estaciones con registros de precipitación consideradas en la investigación.....	43
Figura 25: Precipitación media anual en las estaciones con registros históricos.	44
Figura 26: Mapa de altitudes de la cuenca de estudio. ....	45
Figura 27: Mapa de pendientes en la cuenca de estudio. ....	46
Figura 28: Caudales naturales generados en el embalse Viconga .....	47
Figura 29: Caudales promedios multianuales en el embalse Viconga. ....	47
Figura 30: Métricas de variación porcentual de los caudales generados. ....	48
Figura 31: Caudales naturales generados en el embalse Viconga .....	49
Figura 32: Caudales promedios multianuales en el embalse Viconga. ....	49
Figura 33: Métricas de variación porcentual de los caudales generados. ....	50
Figura 34: Caudales generados durante la calibración. ....	51
Figura 35: Caudales generados durante la calibración. ....	52
Figura 36: Formulación de la métrica de eficiencia de Nash Sutcliffe. ....	52
Figura 37: Magnitudes referenciales del estadístico de Nash Sutcliffe. ....	53
Figura 38: Formulación de la métrica de eficiencia de Nash Sutcliffe. ....	53
Figura 39: Magnitudes referenciales del estadístico de Nash Sutcliffe. ....	54

## Resumen

El desarrollo de múltiples proyectos hidráulicos requiere cuantificar el recurso hídrico siendo la principal limitante la ausencia de registros de caudales y precipitaciones en el punto de aprovechamiento. El objetivo fue evaluar los caudales generados empleando los registros históricos y los obtenidos por sensoramiento remoto CHIRPS. La metodología parte desde la construcción de la base de datos, delimitación de la cuenca y obtención de parámetros morfométricos y la construcción del modelo hidrológico pasando con su calibración y validación de los caudales generados. En este estudio se emplearon los registros de cuatro (04) estaciones pluviométricas y seis (06) píxeles de CHIRPS los cuales sirvieron para determinar la precipitación media areal y posterior generación de caudales empleando el modelo GR2m. Los caudales generados reproducen la respuesta hidrológica de la cuenca cuando se evaluó con los registros históricos como con los registros de CHIRPS. Los valores de X1 y X2 pertenecientes al modelo GR2m fueron estimados en la calibración de los modelos. Los resultados arrojaron coeficientes de Nash iguales a 0.45 y 0.49 en la calibración con registros históricos y satelitales. Estos resultados fueron útiles para evaluar la variación de los caudales generados empleando las dos fuentes de precipitación, siendo notorias las diferencias.

**Palabras clave:** Precipitación, sensoramiento remoto, caudal generado, GR2m, modelo hidrológico.

## **Abstract**

The development of multiple hydraulic projects requires the quantification of water resources, the main limitation being the absence of flow and precipitation records at the point of use. The objective was to evaluate the flows generated by historical records and those obtained by CHIRPS remote sensing. The methodology starts with the construction of the database, delimitation of the basin and obtaining morphometric parameters and the construction of the hydrological model, including its calibration and validation of the flows generated. In this study, the records of four (04) pluviometric stations and six (06) CHIRPS pixels were used to determine the mean areal precipitation and the subsequent generation of flow rates using the GR2m model. The generated flows reproduce the hydrological response of the basin when evaluated with the historical records as well as with the CHIRPS records. In the calibration of the models, the values of X1 and X2 belonging to the GR2m model were estimated. The results yielded Nash coefficients equal to 0.45 and 0.49 in the calibration with historical and satellite records. These results were used to evaluate the variation of the flows generated using the two precipitation sources, and the differences were notorious.

**Keywords:** Precipitation, Remote sensing and historic, flow generated, GR2m, hydrological model.

## I. INTRODUCCIÓN

La ausencia de registros hidrométricos en ubicaciones clave, puentes, desembocaduras, potenciales emplazamientos de embalses es un problema de relevante importancia para el desarrollo adecuado del diseño de infraestructura hidráulica en Perú y en el mundo, estos inconvenientes generados por la ausencia de información hidrológica no son ajenos a otras naciones, dado que los ríos son los cuerpos de agua principales que propician el desarrollo del ser humano y es el ser humano el que propicia el cambio en los regímenes y la variabilidad de los sistemas hidrológicos, en específico, de la reducción de caudales (Acreman y Dumbar, 2004).

La aplicación de los modelos hidrológicos, en el Perú, permite poder simular la respuesta hidrológica de una cuenca, a través de una serie de simplificaciones del ciclo hidrológico, hasta obtener escorrentía superficial sintética en el punto de evaluación, con ello, se logra obtener registros de caudales en zonas específicas que no cuenten con registros hidrológicos que puedan ser empleados para la gestión e implementación de infraestructura hidráulica, básicamente la aplicación de estos modelos emplea información hidrometeorológica y geomorfológica de la cuenca a evaluar, logrando de esta manera responder a interrogantes relacionadas a la disponibilidad hídrica y gestión del recurso (Gichamo et al, 2020).

La cuenca Viconga, como cuenca aportante al embalse Viconga, es de relevante importancia en las actividades socioeconómicas de los pobladores ubicados en el valle de la cuenca alta y en el valle de la cuenca baja del río Pativilca por lo cual es importante contar con los registros hidrológicos de caudal que permitan su adecuada gestión en el horizonte actual como futuro, por ello, la generación de caudales medios, en la escala temporal que se desee y para lugares en los que no se cuente con información hidrométrica, empleando modelos hidrológicos es un proceso aplicado en múltiples cuencas del Perú que no cuentan con un extenso registro de datos que permitan su adecuada gestión.

Es por ello que en la actual investigación se ha planteado el siguiente problema general: ¿Cuál es la variación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando del modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Lima-2023? Así mismo, los Problemas específicos: ¿En cuánto varía el caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica?, ¿Cuáles son los parámetros óptimos del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, obtenidos en la calibración?, ¿Cuál es la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica?

La investigación se justifica teóricamente por el motivo que actualmente el empleo de información de registros climáticos e hidrometeorológicos obtenidos por sensoramiento remoto para la generación de información hidrológica, en cuenca en las que la presencia de estaciones climáticas e hidrológicas que miden estas variables es nula, es aún una realidad que viene siendo poco a poco explorada. Asimismo, mediante el empleo de un modelo hidrológico que permita generar caudales a partir de esta información se logra suplir esta ausencia, de manera que se generan parámetros específicos para el modelo que permitan la óptima representación de la respuesta hidrológica de un sistema. Se justifica de forma práctica por la razón que la investigación va a permitir generar un antecedente en el empleo de información de sensoramiento remoto, con una validación previa, para generar caudales naturales en una cuenca y que se pueda disponer de una serie que permita gestionar de una manera óptima las descargas del embalse a la cuenca.

La investigación se justifica socialmente por la significativa importancia de la cuenca Viconga en la zona del valle del río Pativilca, es debido a que el embalse Viconga es el principal embalse que descarga caudales de hasta  $7\text{m}^3/\text{s}$  al sistema del río Pativilca en los meses en los que se presente déficit hídrico, por lo que disponer de los registros diarios o mensuales de los caudales de ingreso al reservorio permitirán una mejor gestión del recurso hídrico, lo que desencadena en una adecuada distribución de las Junta de usuarios del agua en la zona hacia los distintos canales

matrices que alimentan los fondos existentes en el valle. Asimismo, se justifica metodológicamente debido a que se emplea un modelo hidrológico (GR2m) para generar caudales a través del empleo de una serie de ecuaciones determinísticas que componen al modelo, siendo el proceso de calibración una evaluación mediante indicadores de eficiencia estadística, de igual forma se realiza una validación estadística cruzada de los datos de precipitación satelital con los correspondientes registros históricos.

Se formula el siguiente objetivo general: Evaluar el caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Lima-2023. Asimismo, los Objetivos específicos: Generar caudal usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica; determinar los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, obtenidos en la calibración; conocer la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica.

La hipótesis general planteada es: La variación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, es notable en la cuenca Viconga-Lima-2023; Asimismo, las Hipótesis específicas: El caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica varía significativamente; los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica obtenidos en la calibración varían significativamente; la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es significativamente alta frente a la precipitación Histórica.

## II. MARCO TEÓRICO

Como antecedentes nacionales en esta investigación se pueden mencionar a los trabajos realizados por Cordero (2023), tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del modelo hidrológico GR4j, empleando datos grillados, mediante dos enfoques de modelización hidrológica, por bandas altitudinales y por subcuencas para generar caudales en la cuenca del río Pativilca. El estudio emplea la plataforma de simulación RS Minerve y los datos de precipitación y temperatura PISCO. Los resultados obtenidos indican que los caudales generados por el modelo GR4j mediante el enfoque de bandas altitudinales presentan estadísticos de desempeño ligeramente superiores al enfoque por subcuencas, siendo que los valores obtenidos de Nash son iguales a 0.79 y 0.76 respectivamente.

Fuertes (2020), tuvo como objetivo evaluar los caudales generados por los modelos hidrológicos GR4J y Sacramento Soil Moisture Accounting en la cuenca del río Huallaga, es un estudio del tipo aplicado experimental. El estudio emplea la plataforma de simulación RS Minerve, considerando información de estaciones hidrológicas como Tocache y Puente Tingo María e información del producto de precipitación grillada PISCO, el cual es un producto de precipitación que emplea registros CHIRPS en su construcción. Se obtuvieron resultados excelentes mediante el empleo de los dos modelos, en la calibración se obtuvo un estadístico de Nash igual a 0.77 para el modelo GR4j y de 0.80 para el modelo SAC-SMA. Se concluye que el modelo hidrológico SAC-SMA es el que mejor desempeño presenta en representar la respuesta hidrológica de la cuenca con indicadores de eficiencia resultantes superiores a los obtenidos por el modelo GR4J.

Cruz y Romero (2018), tuvieron como objetivo principal en su estudio el evaluar cuál de los modelos hidrológicos GR2m, Témez y Lutz Scholz representa mejor la respuesta hidrológica de la cuenca Callazas. El estudio es del tipo aplicado experimental. Esta investigación fue realizada en la cuenca de los andes denominada Callazas, cuya área es de 980 km<sup>2</sup>, empleando tres modelos hidrológicos de paso de tiempo mensual de los cuales dos son del tipo determinístico (GR2m y Témez) y uno del tipo Estocástico, se empleó registros históricos de las estaciones pluviométricas Pasto Grande, Tacalaya, Suches y

Vilacota, asimismo se utilizaron los caudales de la estación hidrométrica Coranchay, de propiedad de SPCC. Los resultados de la evaluación de los tres modelos hidrológicos arrojan eficiencias de NASH iguales a 0.85, 0.78 y 0.52 para los modelos GR2m, Lutz Scholz y Témez. Las principales conclusiones de la investigación arrojan que el modelo GR2m es el que mejor representa la respuesta hidrológica de la cuenca Callazas, siendo mucho mejores los ajustes de los caudales en el estiaje.

Seguidamente entre los antecedentes internacionales tenemos a Rincon (2019), tuvo como objetivo evaluar la aplicabilidad de los modelos hidrológicos GR2m y GR4j en generar caudales para la cuenca del río Guali. La investigación estableció tres fases de estudio en la que en la primera se evalúan los datos hidroclimatológicos, siendo que en la segunda y tercera fase se generan los caudales bajo los modelos hidrológicos empleados y se analiza y evalúa la eficiencia de cada uno de los modelos al generar caudales. Los principales resultados del estudio muestran que el modelo GR2m evidencia una eficiencia de Nash igual a 67% y 79% para la calibración y validación respectiva, mientras que el modelo hidrológico GR4j presenta valores de eficiencia de Nash iguales a 76% y 80% respectivamente para la calibración y validación. Se concluye que ambos modelos hidrológicos son de significativa importancia debido a que logran obtener caudales aproximados a los registrados, en función de datos de precipitación y evapotranspiración, con lo que se puede emplear para la generación de registros hidrológicos en otras cuencas que no presenten registros hidrológicos.

Sanabria (2019), tiene como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en la cuenca del río Coella mediante el empleo de 4 modelos hidrológicos de paso de tiempo mensual. La investigación tomó en cuenta dos escenarios de cambio climático RCP 8.5 y RCP 4.5 para el periodo 2020 a 2100, considerando su evaluación mediante los modelos hidrológicos de escala mensual GR2m, Témez, WEAP y WAPABA, siendo que con los modelos GR2M y WAPABA se obtuvieron los mejores estadísticos de desempeño, con valores de Nash iguales a 0.28 y 0.26 respectivamente. Los principales resultados de la investigación indican que son los



modelos de pocos parámetros los que mejor desempeño presentan frente a otros como WEAP o Témez.

Rodríguez Villalba y Rodríguez Cárdenas (2020), tuvo como objetivo el realizar el proceso de calibración, para la cuenca alta del río Subachoque, de los modelos hidrológicos GR4j y GR2m, de tal manera que se identifique la representatividad de cada uno. Este estudio tiene un enfoque cuantitativo descriptivo del tipo aplicado. Se emplearon finalmente, luego de un proceso de selección a partir de polígonos de Voronoi, 6 estaciones con registros de precipitación, dos estaciones con registros de temperatura y una estación con registros de caudales observados. La metodología propuesta por esta investigación está constituida de tres (03) fases, las cuales son recolección de información, delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca y el procesamiento de los datos. Los principales resultados obtenidos muestran que tanto el modelo hidrológico GR2m y GR4j sobredimensionan los caudales máximos del sistema, asimismo, se presentan, para la calibración, coeficientes de Nash iguales a 0.51 y 0.52 para los modelos GR2m y GR4j respectivamente, los valores obtenidos en la validación disminuyen considerablemente, siendo de 0.19 y 0.16 para los modelos GR2m y GR4j. Se concluye finalmente que ambos modelos logran representar las condiciones hidrológicas de la cuenca de estudio, al tener, ambos, valores aceptables en la calibración, siendo necesario, asimismo, que se puedan evaluar una mayor cantidad de modelos en la cuenca de estudio, cuenca Subachoque.

Seguidamente se revisaron los siguientes artículos internacionales como el de Coy (2017), tiene como objetivo evaluar la eficiencia del modelo GR2m para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca Nevado. La investigación del tipo exploratoria con un enfoque cuantitativo. La investigación toma el desarrollo del tipo experimental en la que se emplea un modelo matemático de transformación de precipitación a escorrentía superficial, manipula los parámetros que construyen el mismo de tal manera que se evalúa de manera cuantitativa y cualitativa, toma en cuenta 5 estaciones climatológicas con sus respectivas series de tiempo registradas y logra calibrar el modelo empleando la optimización Solver en Excel. Los principales resultados del modelo muestran un coeficiente de Nash igual a

78.81% en el periodo 1996 – 2010 en la cuenca evaluada. El estudio concluye que la eficiencia del modelo al aplicar a cuencas de alta montaña es alta, por lo que se recomienda su uso.

Muñoz-Castro y Mendoza (2021), tuvo como objetivo en su investigación el realizar un proceso de identificación de los principales parámetros del modelo hidrológico GR4j en 104 cuencas en régimen natural de cuencas en Chile, la investigación emplea los registros de precipitación y evapotranspiración procedente del producto grillado CR2MET a escala diaria, asimismo, los registros hidrométricos nacionales rescatados de la DGA, los cuales se ingresan al modelo acoplado CemaNeige con el modelo GR4j, el cual finalmente será calibrado empleando el algoritmo de calibración SCE-UA. Los resultados de la investigación muestran correlaciones en torno al 50% entre algunos parámetros hidroclimáticos y morfométricos respecto de los índices de identificabilidad de parámetros del modelo. Se concluye de la investigación que las zonas Centro, Sur y Austral de Chile son las que presentan mejores indicadores de consistencia hidrológica respecto de los indicadores obtenidos en la Zona Norte, la cual tiene como particularidad que presenta mayor aridez, por lo que el principal problema se presenta en la representación adecuada de los caudales en estiaje.

Mohammadi, Safari y Vazifehkhah (2022), tal como hace Mohammadi et al. en 2021, tienen como objetivo principal el evaluar 3 modelos hidrológicos de transformación de precipitación a escorrentía mediante algoritmos de Machine Learning de tal manera que determine cuál de estos modelos era el más confiable y sólido en representar la hidrología de la cuenca evaluada. El estudio tomo como unidad de análisis hidrológico a la cuenca del río Emme, ubicada en Suiza central, con un área aproximada de 924 km<sup>2</sup> y con una altitud media de 860 msnm, empleó información hidrometeorológica como precipitación, evapotranspiración, humedad relativa, cobertura de nieve y temperatura, la información de caudal es de 47 años, siendo 30 años empleados en la calibración y 10 años empleados para la validación. Los principales resultados obtenidos durante la aplicación de los modelos, sin la implementación de las técnicas de Machine learning y la optimización de Whale indican que hay un desempeño aceptable con estadísticos

de Nash que varían entre 0.41 a 0.51. Las conclusiones del estudio demuestran que las técnicas de Machine Learning acopladas con el algoritmo de optimización de Whals logran mejorar el desempeño de los modelos hidrológicos al representar la respuesta de la cuenca, logrando incrementar los valores de Nash hasta rangos dados desde 0.61 a 0.71. Aplicación similar empleando técnicas de Machine learning es la que desarrolla Yaseen et al. (2016) en la región árida de Irak.

Los artículos en otros idiomas como González-Rojí, Messmer, Raible y Stocker (2022), tiene como objetivo evaluar la respuesta del modelo WRF v3.8.1 en el sur peruano empleando diversas fuentes de precipitación satelital o productos de precipitación. La investigación se aplica de forma específica en la zona transfronteriza Perú - Brasil - Bolivia, al ser una zona de bajo impacto de los fenómenos ENSO considerando precipitación de CHIRPS, PISCO, GPM y ERA5. Los resultados de esta investigación indican que son los datos del producto PISCO los que presentan mejor desempeño respecto de las otras fuentes de precipitación. Se logra concluir que el modelo WRF, empleado para la predicción de lluvias en determinados lugares, no tiene un buen desempeño cuando se evalúa durante la época de estiaje en la vertiente del pacífico.

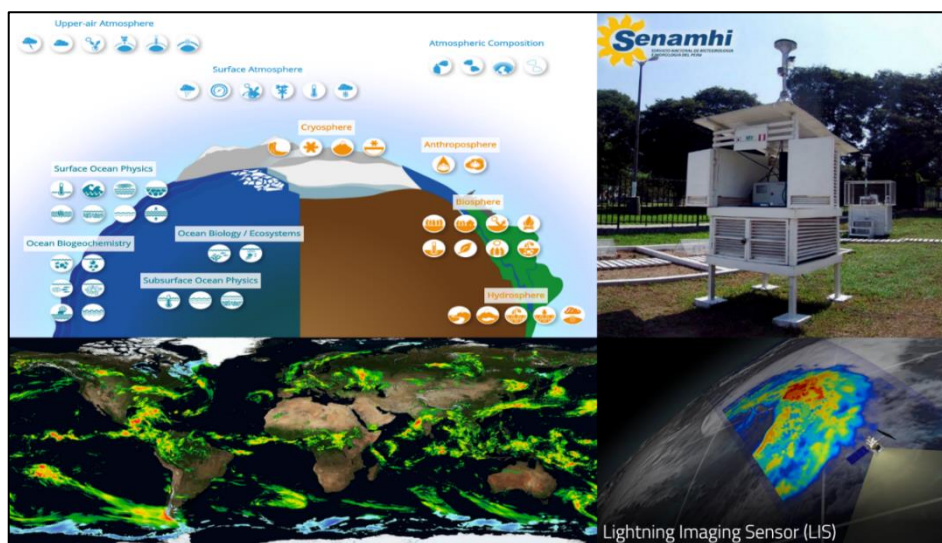
Traore, Sambou, Tamba, Fall, Diaw y Cisse (2014), tiene como objetivo evaluar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Koulontou. Es una investigación del tipo aplicada experimental. El estudio emplea los modelos hidrológicos empíricos de escala diaria y mensual GR4j y GR2m, los cuales son usados para evaluar el comportamiento de la cuenca, considera la precipitación y evapotranspiración potencial existen en el área de estudio y brinda los registros mensuales y diarios a partir de la modelación de precipitación - escorrentía de cada modelo. Los resultados obtenidos para cada modelo presentan un buen ajuste. Las conclusiones de la investigación indican que tanto los dos modelos presentan una eficiencia excelente, con Nash superiores a 0.8.

Ditthakit et. al. (2021), tuvo como objetivo en su investigación la de evaluar métodos de regionalización para determinar los parámetros regionales de modelos hidrológicos de transformación de precipitación a escorrentía, en este caso GR2m. La investigación empleó dos tipos de métodos de regionalización (basados en

regresión lineal y basados en distancias), de estos métodos se emplearon 3 del tipo regresión lineal y dos métodos basados en distancias, asimismo, se analizaron 37 subcuencas con sus respectivas subcuencas aportantes en la cuenca sur de Tailandia. Los resultados obtenidos presentan que el método de regionalización del modelo GR2m por Random Forrest (árboles de decisión) es el que presenta resultados con el más bajo error, asimismo, es el método de regionalización por parámetros del mismo modelo hidrológico el que mejor desempeño presenta frente a una regionalización por parámetros físicos de cuenca. El estudio concluye que que es viable la aplicabilidad de técnicas de Machine Learning para estimar caudales mensuales en cuencas no aforadas, asimismo, recomienda el método de aproximación espacial para la estimación de caudales en cuencas donde falte información de atributos físicos y de información hidrológica.

La teoría de precipitación parte desde la conceptualización de esta variable como una parte de las componentes meteorológicas o climáticas que caracterizan el comportamiento de un determinado ecosistema, siendo que la meteorología es aquella ciencia que estudia la interrelación entre las distintas componentes que conforman el ciclo hidrológico, el cual según Linsley Kohler (1997) es “desde el cual comienza el estudio de la hidrología” (p.1), y son parte de la atmósfera, siendo que también evalúan la dinámica que ocurre en determinada localidad por efectos de la variabilidad geográfica (Tarazona, 2005, p.3). Chereque en 1991 menciona que:” La principal fuente de humedad para la precipitación es [...] la evaporación desde [...] los océanos]”. Actualmente las variables climáticas son las variables que tienen significativa importancia cuando se quiere evaluar el comportamiento hidrológico de una cuenca, por ello, es necesario considerar medios para poder cuantificar la presencia de estas variables climáticas, instrumentos que permitan evaluar la ocurrencia, magnitud, frecuencia de estas variables, son las estaciones climáticas, en particular para la precipitación se cuenta con pluviómetros y pluviógrafos que cuantifican magnitud, duración, frecuencia e intensidad de esta variable meteorológica. En los últimos años se han venido implementando proyectos que, a través de sensores radares instalados en satélites, puedan cuantificar las magnitudes de estas variables, empleando para ello frecuencias de onda que

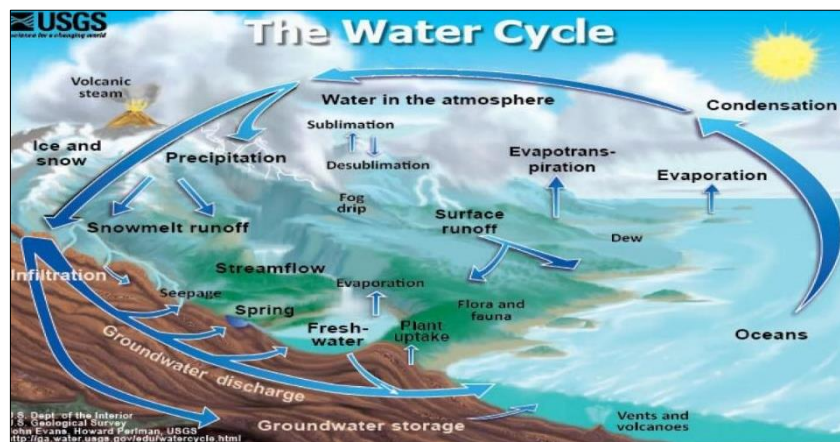
estiman la ocurrencia y magnitud de estos eventos de manera continua, considerando escalas temporales de días u horas. Ver *Figura 1*.



*Figura 1:* Precipitación como variable climática y modos de cuantificación  
Fuente: EARTHDATA, SENAMHI, NASA.

La teoría del caudal se puede considerar al caudal como el agua en el ciclo hidrológico, es partir del ciclo hidrológico, el cual es un proceso de equilibrio de la materia, siendo la materia el agua en sus distintas fases, en el cual el agua sufre transformaciones durante todos los procesos de transporte en la biosfera, considerándose a la biosfera como un sistema cerrado, se puede observar que el proceso principal que da origen a la precipitación, parte desde el proceso de evaporación de las moléculas de agua en el mar, trasladándose por efecto del viento hasta la zona continental en la que por ganancia energética y acción de la gravedad se deposita en un área de terreno, ocurriendo en ese momento un proceso de escorrentía superficial e infiltración, siendo los principales medios de transporte y acumulación el suelo y como cuerpos de agua tales como lagos, ríos y lagunas. En base a las consideraciones dadas por El concilio Federal para la ciencia y la tecnología en la hidrología científica (1959), se puede definir a la Hidrología como aquella “ciencia que estudia el agua en la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas y químicas, así como su relación con el medio ambiente y los seres vivos”. Ante ello, la presencia de agua en cantidad dada como volumen en determinado momento o flujo volumétrico, es denominada caudal, el cual asimismo, debe de salvaguardarse en base a las

consideraciones dadas por las autoridades en gestión del agua, las cuales definen, tal como mencionan Acreman y Dumbar en 2004, que el caudal medioambiental, o ecológico del río es el que mantenga el ecosistema deseado y cuantifique el impacto de los cambios del régimen del río provocado por causas artificiales o antropogénicas (p. 14). Según Aparicio (1992), se define al escurrimiento como a aquella masa de agua que proviene de la precipitación y que se traslada o tiene movimiento de manera subterránea o superficial hasta un colector común que devuelve toda esa masa hacia una salida Ver *Figura 2*.

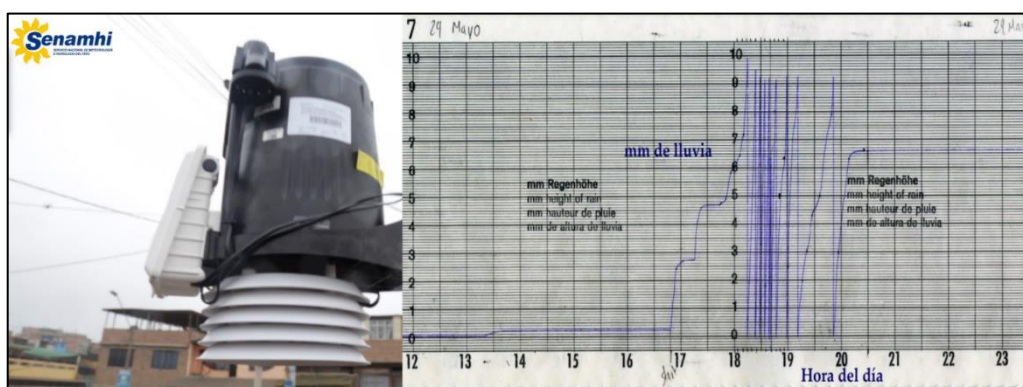


*Figura 2:* Ciclo hidrológico y transformación de la precipitación.

Fuente: USGS

Los conceptos de precipitación, según Villón (2004), refiere que toda aquella masa de agua o humedad que se condensa en la nubes y llega hasta la superficie del suelo, es denominada precipitación, de acuerdo con ello se podría identificar distintas formas de precipitación, sólida como granizo o nieve y líquida como las garúas. Según Vásquez et al (2016) y PNUD (1992), se considera a la precipitación líquida como aquella masa de agua que más se conoce por sus efectos debido a fenómenos climatológicos, aplicaciones de mayor interés en la ingeniería presenta (p.178). Ponce (1994) considera a la precipitación como aquella variable hidrometeorológica más importante, aun considerando el caudal, debido a que es el insumo principal para generar información de caudal si es que no se cuentan con estos registros. Reichl y Jochen (2017) le dan la mayor prioridad a los datos de precipitación como un medio para evaluar el potencial energético, de ahí la criticidad en contar con este tipo de registros.

Los conceptos de la dimensión precipitación histórica es aquella precipitación que se ha cuantificado a través de un instrumento físico en un determinado lugar, estos valores son representativos y reales para una superficie geográfica, en el caso de cuencas o zonas de montaña, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se podría considerar que un instrumento de medición puede caracterizar hasta 250 km<sup>2</sup> de superficie terrestre. Fattorelli y Fernández en 2011 hacen mención que “la mayor parte de las variables hidrológicas son continuas y por lo tanto su tratamiento debe ser de esa manera o discretizado en funciones de determinadas clases que permitan obtener histogramas” (p. 112). Estos instrumentos encargados de la medición y caracterización de la precipitación caída en un terreno, o también denominadas “Tormentas”, se denominan pluviómetros y pluviógrafos, siendo que cada uno de ellos tienen una finalidad específica en la caracterización de las “Tormentas”. En el Perú los instrumentos para caracterizar precipitación más instalados son los pluviómetros, aun así, la cantidad instalada es insuficiente ya que, si bien los pluviómetros logran brindar información correcta en magnitud y frecuencia, no permiten representar la distribución espacial de las lluvias (Almazroui, 2011; Chapell et al., 2013). Ver *Figura 3* Como parte de la instrumentalización, para el caso de caudales, Fuertes en 2020, menciona que en determinados casos en los que el caudal de una simulación no se ajusta a los datos observados puede ser debido a una falla en las curvas de aforo del instrumento, por lo tanto, es necesario el análisis de la historia de este para obtener conclusiones de la respuesta de la cuenca.



*Figura 3:* Instrumentos de caracterización de tormentas: Pluviómetro (Izq.) y Banda registral de Pluviógrafo (Der.)

Fuente: SENAMHI, Gonzales, Lugo y Ayala (2016).

Para la dimensión precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es aquella precipitación que se ha cuantificado a través de un instrumento digital, el cual puede emplear desde ondas de frecuencias, haces de luces, microondas u otro sensor que puede ser óptico, por ello que estos sensores se encuentran frecuentemente instalados en satélites y estos van registrando de manera continua los eventos de tormenta en el espacio geográfico que registra su sensor (Ibrahim et al., 2017). Funk et al. (2015) hace mención que CHIRPS es una base de datos construida en base a enfoques previos de técnicas de interpolación “inteligente” y de alta resolución, así como de extensos periodos de registros de precipitación estimada por observaciones de infrarrojo “Cold Cloud Duration (CCD)” o de duración de la nube fría estimada por sensores infrarrojos Aybar et al., 2017 menciona que CHIRPS finalmente es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas cuya información está disponible desde el año 1981 hasta la actualidad, con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  y a una resolución temporal de un (01) día (p. 6). Es de esta manera que los registros obtenidos por sensoramiento remoto o producto de precipitación grillada, logran estimar la variabilidad espacial de los eventos de tormenta en todo su área de barrido por el sensor. Xu en 2017 menciona lo siguiente:” Las acumulaciones de lluvia de los pluviómetros y los dos productos de lluvia satelital están negativamente correlacionados con la elevación media de los dominios locales en nuestra región de estudio, de manera similar para RMSE. El sesgo (CC) se correlaciona positivamente (negativamente) con la elevación media, pero ninguna de las correlaciones es estadísticamente significativa” (p. 03).

Cabe mencionar que los registros de precipitación obtenidos por sensoramiento remoto no siempre captan la totalidad de la presencia de tormentas en la superficie terrestre, esto debido a que es un equipo digital que sufre interferencias que pueden ser desde mecánicas hasta ambientales, estos efectos atmosféricos/ambientales son precisamente los que impiden que se logre una representación adecuada en magnitud, duración y frecuencia de los eventos de tormenta, alterando los campos de radiación o longitudes de onda emitidas por el sensor (Attogouinon et al., 2017). (Ver Figura 4). Parte de las aplicaciones de los datos de sensoramiento remoto se emplean en diversas áreas, como menciona



Zubieta et al. (2021), en la que emplea el producto grillado de precipitación PISCO para realizar la asociación estadística con las condiciones que pueden contribuir a incrementar la ocurrencia de incendios forestales (p. 1).

Blacutt, Luis et al. (2015) realizó la evaluación de distintos productos satelitales (CSFR, MERRA, TRMM3B42 y un esquema combinado) en la superficie de Bolivia, estos productos satelitales lograron representar adecuadamente la distribución espacial de las lluvias, siendo que CSFR y MERRA sobreestiman la precipitación a lo largo de los Andes (p.1). Lo mencionado previamente muestra que la información de sensoramiento remoto no es 100% confiable, por la instalación de equipos de medición convencionales, estos equipos de medición in situ incluso pueden ser contruidos, tal como realizan Gonzales, Lugo y Ayala en 2016 con su pluviógrafo.

De acuerdo con el estudio realizado por Strauch et al. (2016), los registros de precipitación grillada u obtenida por satélite son importantes como variables de ingreso para modelos hidrológicos que permitan simular la escorrentía en cuencas extensas, sin embargo en determinados casos se debe de tener cuidado en el empleo debido a la ausencia de registros medidos que permitan corroborar que los registros representan adecuadamente la variabilidad del clima provocado por la orografía de la zona a evaluar, en especial de los Andes. Sin embargo, tal como menciona UR et al. (2020), estos datos de acceso libre, tales como precipitación y temperatura, son fuentes alternativas en regiones con escasez de datos, sin embargo, los conjuntos de datos de precipitación satelital (SPD) individualmente presentan aún incertidumbres significativas. (p. 1). Esto último, es corroborado en el estudio realizado por Velázquez y Dávila (2017), en el cual los resultados de su investigación muestran una subestimación de los datos en casi 40%, para cuantiles altos y variaciones en píxel-estación de temperatura de casi 2°C. Villazón e Inturias (2015) realizan un proceso similar con datos de precipitación grillada de TRMM, obteniendo una mejor representación de la variabilidad espacial de la precipitación en su cuenca evaluada, verificando su aplicación en cuencas de mediano a gran tamaño (p. 11).

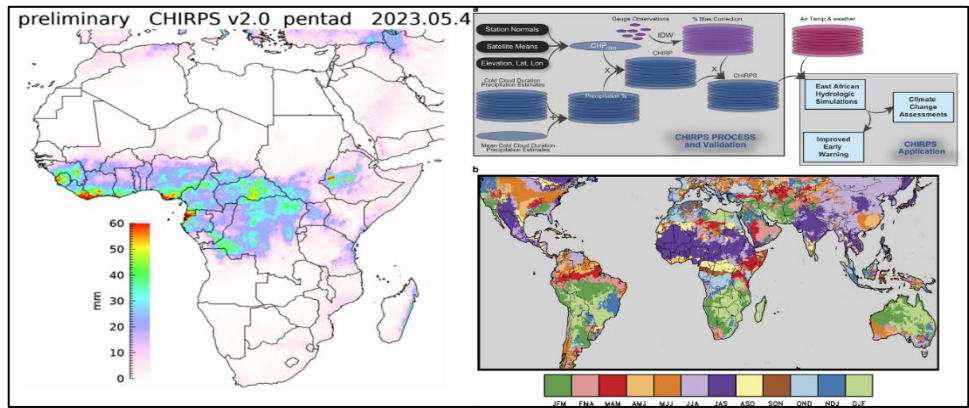


Figura 4: Base metodológica de producto grillado CHIRPS

Los conceptos de la dimensión Parámetros Geomorfológicos de cuenca modelo hidrológico GR2m, mencionan que parte de los insumos principales para la construcción del modelo hidrológico, parte de estos insumos son parámetros geomorfológicos de la cuenca tales como el área, Cahuana (2009) menciona que la cuenca es aquella área plana obtenida de la proyección horizontal de una superficie de terreno, tiene una forma irregular y puede ser cuantificada en unidades de km<sup>2</sup> para cuencas y subcuencas o en hectárea (ha) si son por lo general quebradas. Asimismo, otra variable característica de la geomorfología de la cuenca vendría a ser el perímetro, Villón en 2004 menciona que el perímetro es aquel contorno de forma irregular que es obtenido posterior a la delimitación de una cuenca, asimismo puede ser calculada por medios computacionales. Finalmente, Cahuana (2009) menciona que los parámetros geomorfológicos de la cuenca son representados por el relieve, drenaje y forma de la cuenca, estos son determinados a partir de una serie de ecuaciones matemáticas y son empleados para una clasificación y comparación del sistema cuenca. (p. 19). Ver *Figura 5*.

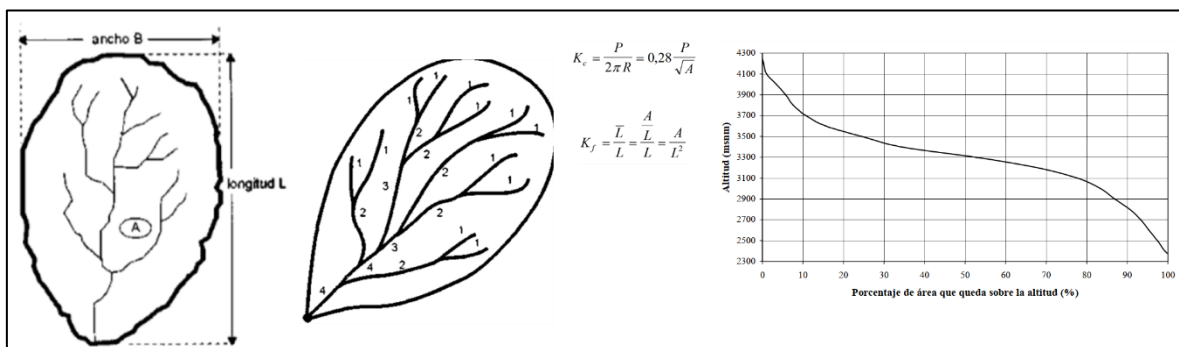


Figura 5: Parámetros geomorfológicos de una cuenca

Fuente: Villón (2004), Mejía (2001).

Los conceptos de la variable caudal generado pueden ser definidos de diversas maneras, pero, todas parten del concepto común de caudal, según Poff et al (1997) se define como caudal a aquellas variaciones de flujo en el tiempo en determinada ubicación de una red hidrográfica cuya importancia es de gran relevancia para la conservación y mantenimiento del ecosistema hidrológico.

Chow (1994) menciona que el agua como caudal, ha sido objeto de cálculo en la cantidad total inmerso en la Tierra, así como en los procesos hidrológicos, siendo temas de exploración científica desde el siglo XIX (p. 02).

Se puede considerar asimismo que el caudal generado es el resultado, tal como se menciona, de la generación sintética a partir de la aplicación de una metodología que transforme el fenómeno de precipitación en escorrentía, generalmente estas metodologías se basan en el balance hídrico de un sistema, tal como menciona Mejía (2001), el balance hídrico en una cuenca no es algo tan simple como presenta el modelo empleado, estos modelos presentarán una serie de pérdidas durante el proceso, dichas pérdidas ocurrirán en las capas de suelo consideradas (infiltración) y en la superficie por efectos de evapotranspiración. (p. 12). Ver *Figura 6*. Es crítico tener cuantificado la cantidad de agua que escurre por determinado lugar, la ausencia de ello genera una innumerable cantidad de problemáticas, Collet et al. en 2013 menciona que para la red de interesados es crucial evaluar la capacidad de abastecimiento de agua, en especial en zonas mediterráneas. Cordero en 2013 menciona la necesidad de la instalación de estaciones hidrométricas que permitan determinar la disponibilidad hídrica y su empleo en futuros proyectos de aprovechamiento hídrico.

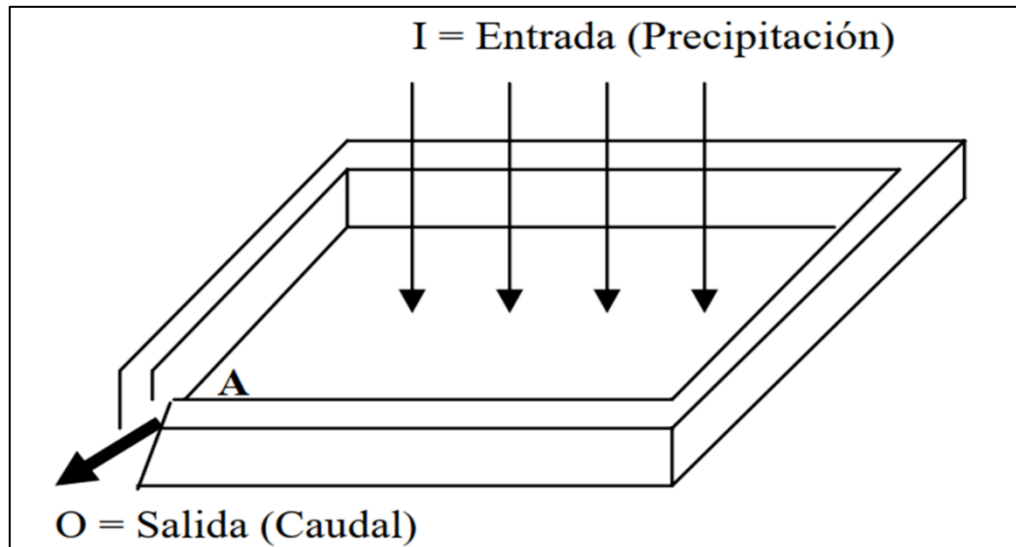


Figura 6: Esquema de Balance Hídrico Simple para estimación de caudales generados.

Fuente: Mejía (p. 11)

Los conceptos de la dimensión caudal generado para el indicador modelo hidrológico GR2m, mencionan que es un modelo matemático que permite la transformación de la precipitación en escorrentía, este modelo es parte de la familia de modelo “GR” desarrollada por el CEMAGREF para el empleo de forma rápida y simple, de variables climatológicas como precipitación y evapotranspiración, para generar caudales en zonas donde no se cuentan con registros. Dicho modelo cuenta con dos (02) parámetros que gobiernan su estructura y generan resultados a escala mensual, siendo parte de una clasificación de modelos hidrológicos denominados “agregados” siendo que Eldho (2017) los caracteriza, como menciona Srinivasa y Nagesh (2018), como aquellos modelos que consideran a la cuenca como una unidad de comportamiento homogéneo, una mejor disponibilidad de los datos, tal como menciona Abbaspour et al. en 2015, puede ayudar a realizar una serie de predicciones de caudales mucho más precisa y con un menor grado de incertidumbre (p. 19). El modelo hidrológico GR2m presenta una estructura de 2 tanques de almacenamiento, que hacen de modelo a dos capas de suelo, los cuales se encargarán de mantener un nivel de almacenamiento y generar el intercambio de flujo para la generación de caudales naturales basados en un modelo matemático, finalmente cumpliendo los preceptos de un modelo del tipo determinístico. Ver *Figura 7*. Este modelo es ampliamente usado en múltiples

investigaciones, tales como la que realiza Hadiani et al. (2019) en la cuenca de Bah Bolon, obteniendo excelentes resultados, pese a que no es usualmente empleado en Indonesia.

Se puede mencionar que estos modelos de las familias GR, como el modelo GR3 desarrollado por Edijatno y Michel en 1989, son modelos que son muy empleados, tal como menciona Arsenault et al. en 2019, por la practicidad y la robustez frente a otros modelos por su estructura simple (p. 1). Asimismo, Asurza-Véliz y Lavado-Casimiro en 2020, mencionan que el “modelo hidrológico” no siempre va a cuantificar correctamente los caudales pico que se presentan en los periodos de avenida. Estos métodos de generación de caudales, muchas veces se aplican para la predicción y prevención de desastres, Wang et al. (2019) menciona que la predicción de caudales tiene una importancia significativa para la gestión del recurso hídrico, particularmente en la gestión de la operación de embalses. (p. 1).

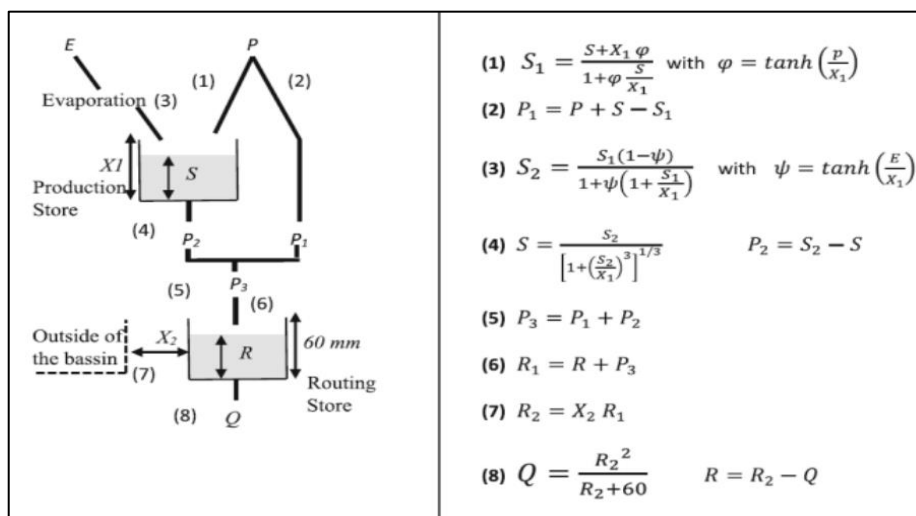


Figura 7: Estructura determinística y consideraciones matemáticas del modelo hidrológico GR2m.

Fuente: Adaptado de Mouelhi et al. (2006) y Edijatno y Michel (1989)

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

La investigación científica aplicada propone transformar el conocimiento 'puro' en conocimiento útil. Tiene por finalidad la búsqueda y consolidación del saber y la aplicación de los conocimientos para el enriquecimiento del acervo cultural y científico, así como la producción de tecnología al servicio del desarrollo integral de las naciones (UNAD, 2014). La investigación desarrollada es una investigación del tipo aplicada ya que se empleó el conocimiento teórico para emplear un modelo matemático de transformación de precipitación a escorrentía y solucionar la problemática de la ausencia de registros hidrométricos en el punto de evaluación.

##### **Enfoque de investigación**

La investigación bajo el enfoque cuantitativo se denomina así porque trata con fenómenos que se pueden medir a través de la utilización de técnicas estadísticas para el análisis de los datos recogidos, su propósito radica en la descripción, explicación, predicción y control objetivo de sus causas y la predicción de su ocurrencia, tanto de la recolección de sus resultados como de su procesamiento, análisis e interpretación, a través del método hipotético-deductivo (Sanchez, 2019). En base al enfoque planteado para esta investigación, se ha considerado el empleo de datos absolutos y se ha obtenido resultados absolutos, en este caso, datos numéricos referidos a caudales generados, los cuales fueron evaluados posteriormente considerando los objetivos de la investigación, por lo que el enfoque es cuantitativo

##### **3.1.2 diseño de investigación**

Se puede considerar en función de la revisión de la bibliografía que “Investigación cuasi-experimental es aquella que tiene como objetivo poner a prueba una hipótesis causal manipulando, al menos, una variable independiente donde por razones logísticas o éticas no se puede asignar las unidades de investigación aleatoriamente a los grupos” (Fernández García; Vallejo Seco; Livacic Rojas; Tuero Herrero, 2014). En base a lo planteado en el párrafo previo, el diseño planteado en

esta investigación es del tipo cuasi-experimental, debido a que se ha manipulado la variable independiente con el fin de evaluar dos escenarios de modelación hidrológica, considerando que la muestra escogida se tomó por conveniencia en función de una población fija.

### **El nivel de la investigación:**

Considerando que la investigación correlacional es un tipo de método de investigación no experimental en el cual un investigador mide dos variables, entiende y evalúa la relación estadística entre ellas sin influencia de ninguna variable extraña. (Question Pro). El nivel de la investigación planteado es del tipo explicativa.

### **3.2. Variables y operacionalización:**

La naturaleza de las variables que componen el problema de investigación, pues si se pretende estudiar los fenómenos naturales o conductuales de manera objetiva y sin pretender sumergirse mucho en la naturaleza profunda y subjetiva del problema (Sánchez, 2019). Las variables consideradas en esta investigación son dos.

Variable independiente : Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica (cuantitativa)

Variable dependiente : Caudal generado (cuantitativa)

El procedimiento de operacionalización de variables permite transformar las variables abstractas y generales, en variables concretas y específicas, esto es observables y medibles (Bauce, Cordova & Avila, 2018). Se busca que exista relación entre cada una de las variables a emplear durante la investigación, por lo que su construcción es de vital importancia para cada investigación.

La matriz de Operacionalización se presenta en el Anexo 1.

### **3.3. Población, muestra y muestreo**

#### **3.3.1 Población:**

"El universo o población puede estar constituido por personas, animales, registros médicos, los nacimientos, las muestras de laboratorio, los accidentes viales entre

otros” (Pineda et al,1994). De acuerdo con el desarrollo de esta investigación, la población considerada fueron todas las cuencas o unidades hidrográficas menores (UH) ubicadas en la cuenca de orden mayor del río Pativilca. (ver *Figura 8*).



*Figura 8:* Población de cuencas en el río Pativilca  
Fuente: *Elaboración Propia*

### 3.3.2 Muestra:

Es un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación. Hay procedimientos para obtener la cantidad de los componentes de la muestra como fórmulas, lógica y otros que se verá más adelante. La muestra es una parte representativa de la población (López, 2004). Para el desarrollo de esta investigación se consideró como muestra a la cuenca Viconga, ubicada en la cuenca de orden mayor Rapay, la cual a su vez se encuentra ubicada en la cuenca del río Pativilca, de nivel superior. (Ver *Figura 9*)



*Figura 9:* Cuencas de orden menor y ubicación de la cuenca Viconga.  
Fuente: *Elaboración propia*

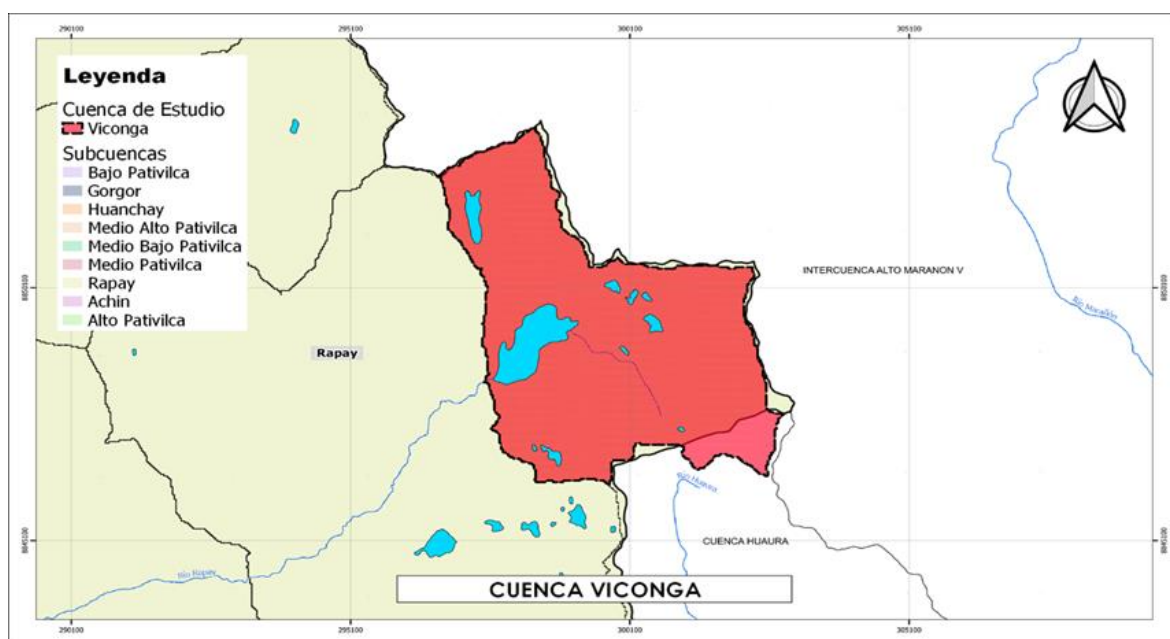


### 3.3.3 Muestreo:

“Consiste en un conjunto de reglas, procedimientos y criterios mediante los cuales se selecciona un conjunto de elementos de una población que representan lo que sucede en toda esa población” (Mata et al, 1997). Para el caso particular de esta investigación, se tiene como regla o criterio de muestre el muestro no probabilístico realizado por conveniencia.

### 3.3.4 Unidad de análisis:

La unidad de análisis pasó de una enunciación filosófica: "analizar la moral de los analistas", a una de tipo más psicoanalítica, "explorar los ideales en su forma y contenido" (Sánchez, 2009). En el desarrollo de esta investigación se considerará como unidad de análisis a la cuenca hidrográfica de Viconga. (Ver *Figura 10*)



*Figura 10: Cuenca Viconga como unidad de análisis*  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

#### Técnicas

Las técnicas de investigación son los sistemas o herramientas que se usan de manera sistemática y racional con la finalidad de determinar información de una temática de estudio en particular (Zita, 2021). Asimismo, son herramientas

establecidas que han sido estructuradas y permiten realizar procedimientos de recolección de datos (Marrou et al., 2005). La investigación desarrollada aplicó las técnicas de observación directa y observación experimental como las técnicas de recolección de datos, todo ello conforme con los indicadores de estudio. (ver Tabla 1)

### **Instrumentos de recolección de datos**

Son recursos para analizar y recopilar información sobre un objeto de interés, por lo que la misma debe ser fiable y válida (Tamayo y Silva, 2019). En la presente investigación se empleó fichas de recolección de datos la cual se aplicó para la descarga de datos abiertos climáticos del Senamhi y la obtención de datos de sensoramiento remoto CHIRPS, de esta manera se obtuvo toda la información requerida para la investigación. (ver Tabla 1).

**Tabla 1:** *Técnicas e instrumentos de recolección de datos.*

<b>Descripción</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>
Precipitación de Sensoramiento Remoto CHIRPS	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Duración del Evento	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Frecuencia de ocurrencia	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Precipitación medida	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Duración del Evento	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Frecuencia de ocurrencia	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Parámetros geomorfológicos de la cuenca	Observación Directa	Ficha de registro de Datos
Caudal generado por modelo GR2m	Observación Experimental	Ficha de registro de Datos
Parámetros del modelo hidrológico	Observación Experimental	Ficha de registro de Datos
Eficiencia del modelo hidrológico	Observación Experimental	Ficha de registro de Datos

Fuente: Elaboración propia (2023)

### **Validez**

La validez explora en qué grado un instrumento mide lo que debería medir, es decir aquello para lo que ha sido diseñado (Fortin y Nadeau, 1999). La validez de la investigación está fundamentada por la revisión de tres expertos, a través de los resultados de la evaluación de los expertos, se obtiene el índice Kappa igual a 0.87,

el cual de acuerdo con Landis & Koch se encuentra dentro del rango de acetación conforme al criterio de fuerza considerado por los autores (Ver Tabla 2)

**Tabla 2:** *Escala del coeficiente de Kappa.*

Coeficiente de Kappa	Fuerza de acuerdo
<0.00	Pobre
0.00-0.20	Leve
0.21-0.40	Justa
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial
0.81-1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis & Koch (2010)

### **Confiabilidad de los instrumentos.**

Indica el grado en el que la aplicación repetida del instrumento al mismo sujeto produzca los mismos resultados (Santos, 2017). Para la investigación desarrollada, la confiabilidad está supeditada al empleo de un modelo matemático que simule el proceso de transformación de precipitación a escorrentía, y que ha sido desarrollado por una institución de renombre mundial (Universidad de París) en una tesis de “Doctorado” y empleado en investigaciones publicadas en las más importantes revistas de investigación científica en el mundo (Elsevier, MDPI, AWWA, NATURE, Journal of Hydrology, etc.). Asimismo, la Autoridad Nacional de Agua (ANA), la viene empleando en una serie de investigaciones científica que realiza en las cuencas del Perú, así como para generar registros de caudales sintéticos en un ráster multibandas denominado Pisco (PISCO\_-. HyM\_GR2M). Finalmente, se ha generado un informe técnico que permita presentar la secuencia de paso a seguir para para la obtención de la información de sensoramiento remoto y los registros históricos, los cuales han sido validados por los expertos revisores.

### **3.5. Procedimientos:**

Los procedimientos son el conjunto de actividades contenidas en los procesos de una determinada acción, proyecto o investigación a realizarse (Lehrer, 2022). Como

procedimientos realizados en la investigación, se tiene una serie de procesos los cuales se detallan a continuación.

- Revisión bibliográfica: Durante este proceso se realizó la compilación de investigaciones afines, así como trabajos de investigación que empleen modelos matemáticos para estimar caudales, asimismo, se analizó reportes científicos publicados en revistas del mayor nivel. (ELSEVIER, NATURE, MDPI, etc.).
- Análisis de confiabilidad de la información hidrometeorológica: El análisis de consistencia de la información hidrometeorológica empleado es importante de realizar, con el fin de evitar errores resultantes en los cálculos efectuados, los cuales son producto de inconsistencias en los registros debido a que la información a utilizar no presenta un comportamiento homogéneo en sus registros históricos.
  - Para la evaluación de la homogeneidad de la información se ha empleado el análisis exploratorio de datos, mediante un análisis gráfico utilizando herramientas gráficas como los diagramas de cajas (Boxplot), histogramas, entre otros.
  - Para evaluar la homogeneidad de la información se ha hecho uso del análisis estadístico, este análisis empleado hace uso de pruebas estadísticas de inferencia (Paramétricas o No Paramétricas) en base a un nivel de confiabilidad, de tal manera que permita identificar aquellas estaciones que presentan un comportamiento no homogéneo e inconsistencias en sus registros, a un nivel de significancia estadística del 5%, producto de la presencia de saltos y tendencias en estos datos registrados. Este análisis ha permitido evaluar las estaciones existentes de tal manera que se reduzca la incertidumbre al realizar el proceso de validación de la información del producto grillado CHIRPS en base a registros medidos que permiten excluir estaciones cuyo comportamiento sea no homogéneo.
- Validación de la información CHIRPS: Una vez definida la cantidad de estaciones instaladas cuya información tenga un comportamiento

homogéneo y sea consistente en sus registros, se procedió a validar la información de los datos procedentes del producto de precipitación grillado CHIRPS, este proceso de validación consistió en realizar correlaciones lineales entre los registros de las estaciones instaladas con los registros del producto de precipitación grillado, se evalúa el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), si este coeficiente resulta mayor a 0.5, entonces se procede a validar la información procedente del producto grillado, también se evalúa el error cuadrático medio (RMSE), si este estadístico es cercano a cero (0) entonces significa que la información del producto grillado CHIRPS presenta poca dispersión en los errores estimados con respecto de los registros históricos de las estaciones instaladas.

- Caracterización Geomorfológica del área de estudio: Utilizando un software GIS se realizó la caracterización geomorfológica de la cuenca Viconga, desde la zona alta hasta el punto de evaluación de los caudales naturales registrados. Se consideró que esta caracterización permite estimar los parámetros de forma, relieve y drenaje de la cuenca que permitieron el análisis hídrico del área de estudio bajo un enfoque de modelos hidrológicos determinístico agregado.
- Construcción de modelo hidrológico de transformación de precipitación a escorrentía: Se realizó la construcción del modelo hidrológico de transformación de precipitación a escorrentía GR2M, preparando la base de datos de ingreso al modelo y la información previa que se ha de cambiar para la evaluación del desempeño.
- Calibración del modelo. La calibración del modelo implicó realizar una evaluación tanto cualitativa como cuantitativa de la respuesta hidrológica del modelo matemático implementado en la cuenca de estudio. La finalidad del proceso de calibración es encontrar de manera sistemática los valores de los parámetros que brinden un mejor ajuste entre los hidrogramas simulados y los observados, la complejidad y costo computacional de este proceso se incrementa de manera significativa con el número de parámetros a evaluar. Este proceso se llevó cabo definiendo una función objetivo (OF) en la que se consideran los estadísticos de calibración que se estimen más

significativos, esta función objetivo (OF) será evaluada en el algoritmo de calibración elegido.

- Validación del modelo: La validación de los caudales generados por el modelo hidrológico, luego de haber realizado la calibración en un determinado periodo de tiempo, se efectúa en otro periodo (diferente al empleado para calibrar), en este periodo escogido se evaluaron los estadísticos de eficiencia del modelo, de esta manera se verifica que los caudales generados, en la de validación, tengan un ajuste estadístico con rendimientos adecuados, en sus indicadores, que posibilitan autenticar el mejor ajuste posible entre los hidrogramas observados y los simulados.
- Contrastación de hipótesis: Se establece el criterio mostrado en la Tabla 3, en la que se va a considerar que existirá variaciones significativas entre los resultados obtenidos, cuando la variación porcentual entre estos sea mayor al 5% y no se considerarán significativos los resultados si la variación es menor o igual al 5%.

**Tabla 3:** Consideración de los resultados para la contrastación de hipótesis.

Porcentaje	Criterio
<= 5%	No Significativo
> 5%	Significativo

Fuente: Elaboración propia.

- Discusión de resultados: en esta actividad se procedió a analizar e interpretar los resultados respectivos de caudales naturales obtenidos mediante el empleo de la información de sensoramiento remoto CHIRPS y la precipitación histórica convencional.
- Redacción de conclusiones: una vez analizada la información de los resultados obtenidos y de la evaluación de las métricas de eficiencia consideradas, se detallaron las conclusiones obtenidas de la investigación.
- Redacción de recomendaciones: en base a los resultados obtenidos y de las limitaciones encontradas durante la realización de la investigación, se procedió a redactar las recomendaciones, inquiriendo en puntos clave para el desarrollo de futuras investigaciones afines.

### **3.6. Método de análisis de datos:**

La estadística inferencial se enfoca en hacer deducciones, es decir, inferir propiedades, conclusiones y tendencias de la muestra representativa en base una serie de pruebas o test estadísticos (Porrás, 2017). La estadística descriptiva es el descripción gráfica y análisis de los resultados en relación con un conjunto de datos obtenidos de una muestra (Ortega, 2021). Basado en los conceptos previos mostrados, esta investigación hizo empleo de test estadísticos a fin de evaluar la calidad y la homogeneidad de los datos de precipitación empleados para la construcción del modelo hidrológico.

### **3.7. Aspectos éticos:**

Considerando aspectos éticos en una investigación se puede hacer referencia al tipo de praxis o aplicación de la metodología de investigación, considerando que la investigación no solamente trató de resolver los problemas generales de determinado fenómeno, sino que también aquellos problemas específicos que puedan surgir durante el desarrollo (Penlar, 1995). La investigación ética es muy importante para los científicos ya que realiza su estudio al no ser considerado como una externalidad negativa que afecta a la sociedad. La ética debe estar necesariamente presente en los investigadores y debe ser respetada a través de los estilos normativos de citación y referenciación (Salazar, Icaza y Alejo, 2018). Ante ello, la presente investigación cumplió con los lineamientos éticos que establece la universidad Cesar Vallejo, respetando la autoría y propiedad intelectual de los autores que se citan, así como garantizando la confiabilidad y veracidad de los instrumentos y pruebas consideradas.

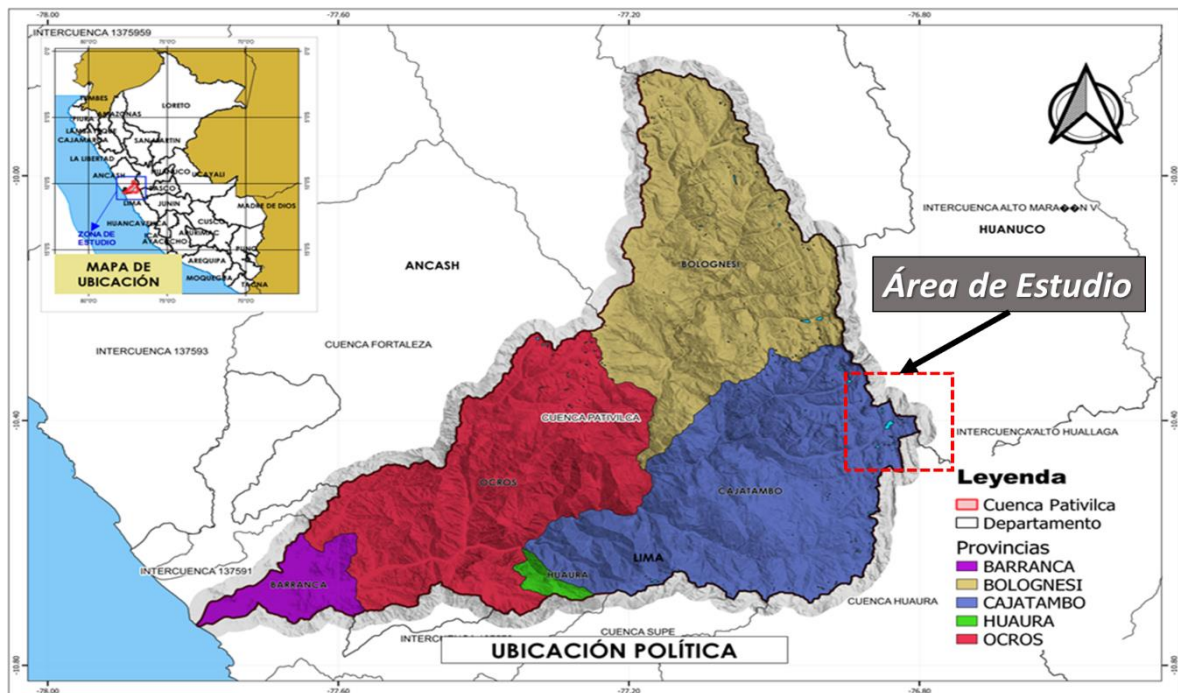
## IV. RESULTADOS

### 4.1. Descripción de la zona de estudio

El sistema Viconga se encuentra ubicado en la cuenca alta de la unidad hidrográfica de mayor orden (U.H. 6) Cuenca Pativilca, el sistema de estudio considerado en esta investigación corresponde a la cuenca de aporte al embalse Viconga, la cual se encuentra ubicada al interior de la zona reservada Cordillera Huayhuash (Ver *Figura 11*). La ubicación política e hidrográfica del área de estudio se puede clasificar de la siguiente forma:

#### Ubicación Política

- Distrito: Cajatambo.
- Provincia: Cajatambo
- Región: Lima



*Figura 11: Ubicación política de la cuenca de estudio.*

*Fuente: Adaptado de Cordero (2023)*

#### Límites distritales.

- Norte: Jesús (Lauricocha, Cerro de Pasco)



- Este: San Miguel de Cauri (Lauricocha, Cerro de Pasco)
- Oeste: Cajatambo, Huancapón (Cajatambo, Lima)
- Sur: Oyón (Oyón, Lima)

### Ubicación hidrográfica

- Subcuenca: Rapay
- Unidad de orden Mayor: Pativilca
- ALA: Barranca
- AAA: Cañete Fortaleza
- Vertiente: Océano Pacífico

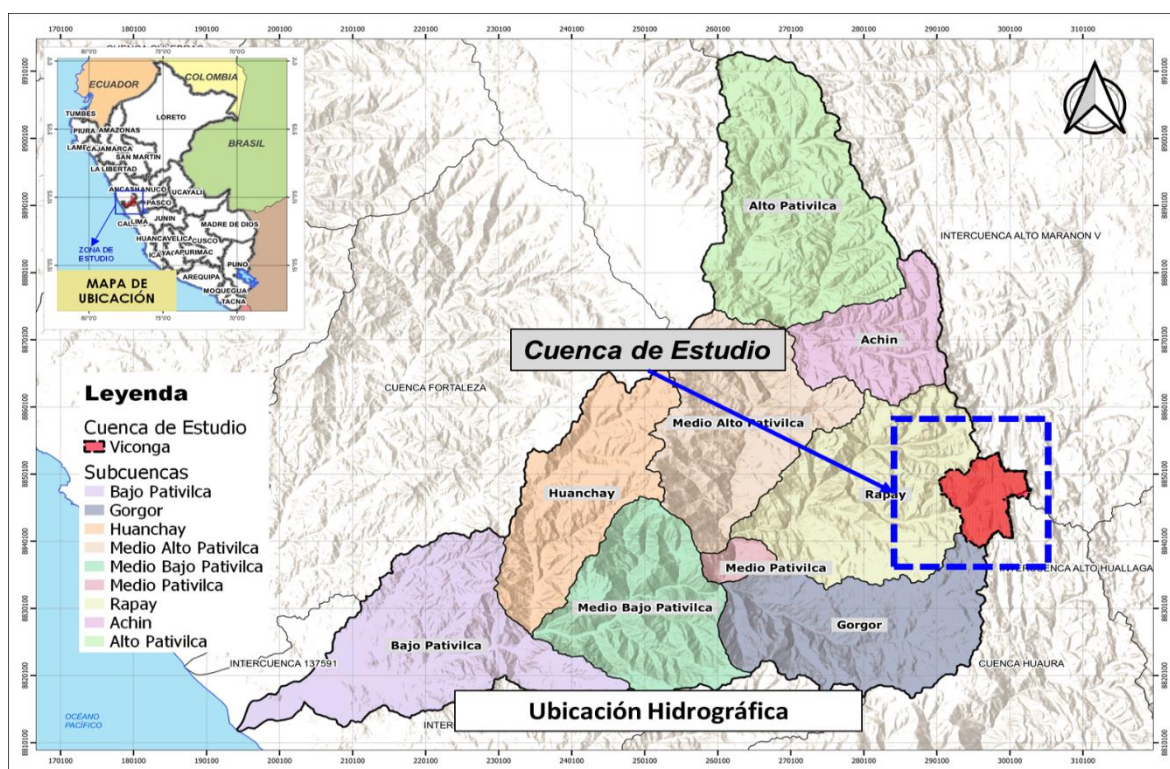


Figura 12: Ubicación hidrográfica del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia

### Ubicación geográfica

El área correspondiente a la zona de estudio, cuenca aportante al embalse Viconga, presenta la ubicación de la estación de registros se ubica en las coordenadas geográficas  $-76.849^\circ$  (Longitud) y  $-10.414$  (Latitud), presenta un área de  $23.63 \text{ km}^2$  y se encuentra a una altitud media de  $4462 \text{ msnm}$ . (Ver Tabla 4)

**Tabla 4:** Ubicación geográfica de la cuenca de estudio en función de la estación hidrométrica.

Estación	Tipo	Periodo de Registro	Ubicación Geográfica			
			Cuenca	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [msnm]
Embalse Viconga	Hidrométrica	2004 - 2016	Pativilca	-76.849	-10.414	4462

Fuente: Elaboración propia (2023).

## Clima

La zona correspondiente al área de estudio no presenta estaciones climatológicas al interior, por lo que se consideraron aquellas estaciones cercanas que puedan ayudar a describir las principales variables climatológicas a emplear en la modelización hidrológica de la cuenca Viconga. Asimismo, en base a la clasificación desarrollada por el Senamhi (2020), la zona presenta un clima tipo Lluvioso con otoño e invierno secos-Frío, del tipo B (o, i) C', con temperaturas máximas que varían entre los 9°C a 19°C y temperaturas mínimas que varían entre los – 3 °C a 3 °C, con precipitaciones anuales que varían entre los 500 mm a los 1200 mm, dichas características son comunes en ecosistemas que se ubican cercanos o por encima a los 4200 m.s.n.m. en el flanco occidental y oriental de los andes peruanos.

## 4.2. Trabajos preliminares

### 4.2.1. Información hidrometeorológica.

#### *Precipitación*

Se ubicaron cuatro estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca de estudio, de estas cuatro estaciones, tres se encuentran al interior de la cuenca Pativilca, mientras que la estación Laguna Surasaca se encuentra ubicada en la cuenca del río Huaura, pero, se ha considerado en esta evaluación debido a la semejanza que presenta dicha estación con las condiciones existentes en el embalse Viconga. Ver Tabla 5.

**Tabla 5:** Precipitación media anual presente en las estaciones consideradas en la investigación.

Estación	Elev.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Gorgor	3000	98.0	121.0	137.0	45.0	6.0	2.0	0.0	0.0	3.0	25.0	37.0	66.0	540.0
Cajatambo	3405	102.0	128.0	144.0	51.0	9.0	2.0	0.0	1.0	8.0	35.0	47.0	97.0	624.0

Estación	Elev.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Chiquián	3382	137.0	139.0	132.0	66.0	11.0	2.0	0.0	4.0	11.0	44.0	62.0	91.0	699.0
Lag. Surasaca	4546	134.0	131.0	167.0	75.0	29.0	8.0	6.0	9.0	35.0	78.0	76.0	131.0	879.0

Fuente: Elaboración propia (2023).

### Temperatura

En la zona de estudio no se cuenta con estaciones climáticas que registren variables de temperatura, ante ello, se emplearán los registros de temperatura media de aquellas estaciones que se ubiquen alrededor de la zona de estudio, priorizando aquellas que se encuentren más cercanas.

Se ubicaron siete estaciones con registros de temperatura, ver Tabla 6, de las cuales solo se consideran a la estación Cajatambo y estación Chiquián, de las cuales, es la estación Cajatambo la que se encuentra más cercana al área de estudio, por lo que se emplearán sus registros para la construcción del modelo hidrológico.

**Tabla 6:** Disponibilidad de registros de temperatura media en el ámbito de estudio.

Estación	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018		
<b>Al interior de la cuenca</b>																																								
Cajatambo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Chiquian	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Huayto																																								
<b>Externas a la cuenca</b>																																								
Camay																																								
Chamana																																								
Paramonga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Surasaca	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fuente: Elaboración propia (2023).

### Caudal

Se cuentan con los registros de caudales mensuales naturales en el embalse Viconga, dichos datos han sido recopilados luego de la revisión documentaria de documentos proporcionados en línea por la Autoridad Nacional del Agua – ANA, los cuales son de la empresa STATKRAFT S.A., estos registros mensuales han sido digitalizados y ordenados en una tabla, de tal manera que permitieron su empleo para la calibración del modelo hidrológico GR2m. (Ver Figura 13)

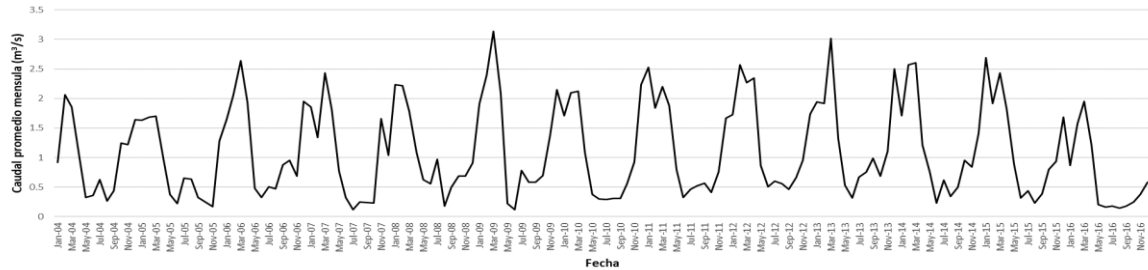


Figura 13: Registros de caudales mensuales naturales en el embalse Viconga.  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Análisis de confiabilidad de información pluviométrica

##### Análisis Gráfico.

Para el análisis gráfico se emplearon los registros históricos de las cuatro estaciones pluviométricas consideradas en el estudio, Cajatambo, Chiquian, Gorgor y Laguna Surasaca, de las cuales, es la estación Laguna Surasaca la que se encuentra fuera de la cuenca de mayor orden, cuenca Pativilca, ubicándose en la cuenca del río Huaura.

Los resultados de la evaluación gráfica mediante gráficos de cajas (boxplot) en las estaciones Cajatambo y Chiquián, ver *Figura 14*, muestran que la ocurrencia de lluvias es mayor durante los meses de diciembre hasta marzo, posterior a ello se presenta un periodo de transición descendente hasta agosto, donde nuevamente vuelve a una etapa de transición ascendente, este periodo de mayores precipitaciones se denomina temporada de avenidas, mientras que el periodo en donde las lluvias son mínimas, se denomina temporada de estiajes.

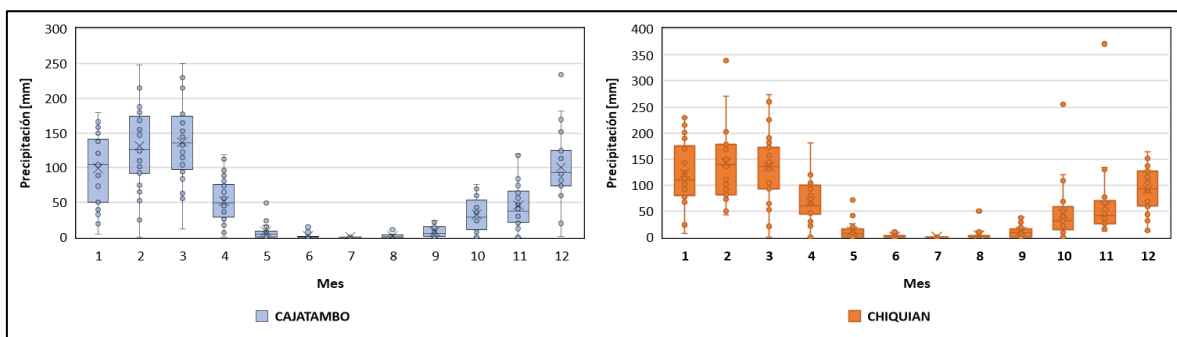
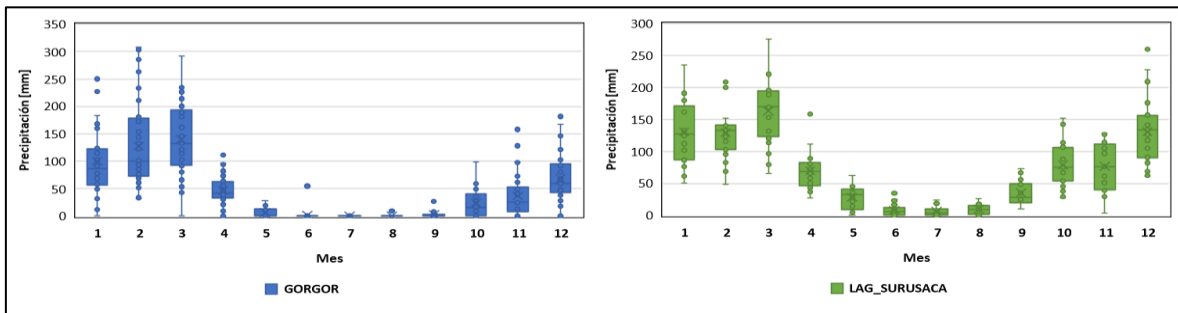


Figura 14: Gráfico de cajas de la precipitación mensual para las estaciones Cajatambo y Chiquián.  
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evaluación gráfica mediante gráficos de cajas (boxplot) en las estaciones Gorgor y Laguna Surasaca, ver *Figura 15*, muestran que la ocurrencia de lluvias es mayor durante los meses de diciembre hasta marzo, posterior a ello se presenta un periodo de transición descendente hasta agosto, donde nuevamente vuelve a una etapa de transición ascendente, este periodo de mayores precipitaciones se denomina temporada de avenidas, mientras que el periodo en dónde las lluvias son mínimas, se denomina temporada de estiajes.



*Figura 15:* Gráfico de cajas de la precipitación mensual para las estaciones Gorgor y Laguna Surasaca.  
Fuente: Elaboración Propia

En ambos casos se presentan outliers, los cuales, por su magnitud, para una evaluación de caudales medios no son muy significativos, ya que su alteración de los valores promedios es mínima.

#### *Completación de datos*

Para el proceso de completación de los registros pluviométricos se empleó una metodología de completación mucho más actual, el método Cutoff, cuya robustez ha sido validada en múltiples investigaciones, tal como la de Feng et al, en 2014. El método considera un proceso de completación de datos a partir de registros que cuenten con un coeficiente de correlación lineal umbral, a partir del cual inicia un proceso de clasificación. Para el empleo de este proceso de completación de datos se usó el soporte del lenguaje de programación R. Ver *Figura 16*.

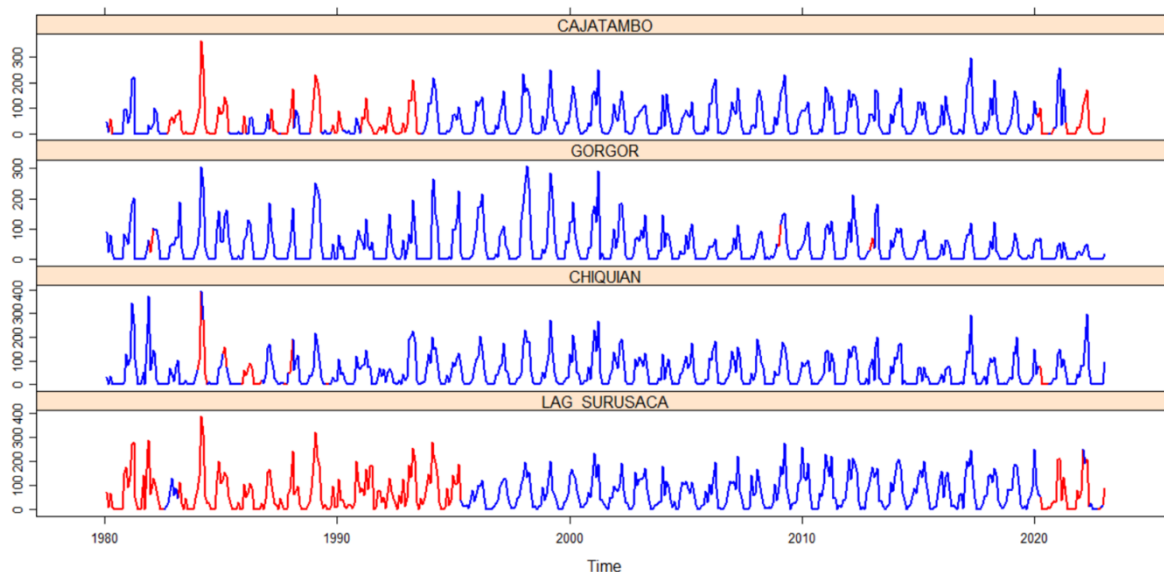


Figura 16: Registros de precipitación mensual completada (rojo).  
Fuente: Elaboración propia.

### *Análisis Estadístico.*

Se empleó el análisis estadístico de las series de precipitaciones históricas para la evaluación de la homogeneidad de los datos, esta evaluación se realizó mediante la aplicación de estadística inferencial con pruebas estadísticas del tipo No Paramétricas, las cuales son las pruebas estadísticas más robustas para la evaluación de datos que no se ajustan a una distribución normal, distribución que no representa adecuadamente a las variables climáticas.

Los resultados de la evaluación de la independencia de los datos de precipitación arrojan, según lo mostrado en la Tabla 7, que los registros de las 4 estaciones consideradas presentan independencia estadística al 5% de significancia, para esta evaluación se empleó la prueba estadística no paramétrica de Turning Points.

**Tabla 7:** Resultados del análisis estadístico para la independencia de los datos.

Estación	Independencia - Turning Point (alfa = 0.05)		
	Z estadístico	Z tabular	Significancia
Gorgor	-1.812	1.96	NS
Cajatambo	-0.839	1.96	NS
Chiquián	-0.704	1.96	NS
Laguna Surasaca	-0.704	1.96	NS

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la evaluación las tendencias de los datos de precipitación arrojan, según los mostrado en la Tabla 8, que los registros de 3 estaciones consideradas no presentan tendencias estadísticas significativas al 5% de significancia, los registros de la estación Laguna Surasaca muestran que para esta estación la tendencia mostrada al 5% es significativa. Para esta evaluación se empleó la prueba estadística no paramétrica de Mann Kendall.

**Tabla 8:** Resultados del análisis estadístico para para tendencia de los datos.

Estación	Estacionariedad - Mann Kendall (alfa = 0.05)		
	Z estadístico	Z tabular	Significancia
Gorgor	-1.72	1.96	NS
Cajatambo	0.124	1.96	NS
Chiquián	-0.508	1.96	NS
Laguna Surasaca	2.087	1.96	S (0.05)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la evaluación las tendencias de los datos de precipitación arrojan, según los mostrado en la Tabla 9, que los registros de 3 estaciones consideradas no presentan saltos en la media/mediana estadísticas significativos al 5% de significancia, los registros de la estación Laguna Surasaca muestran que para esta estación se presenta un salto en la media/mediana al 5% de significancia. Para esta evaluación se empleó la prueba estadística no paramétrica de CUSUM.

**Tabla 9:** Resultados del análisis estadístico para la evaluación de saltos.

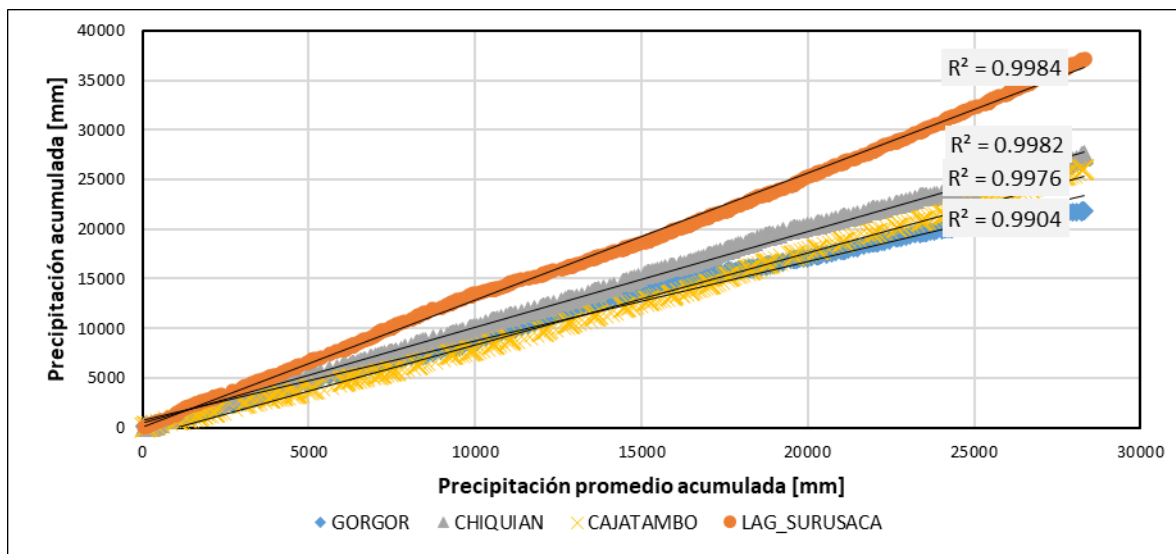
Estación	Cambio en la media - CUSUM (alfa = 0.05)		
	Z estadístico	Z tabular	Significancia
Gorgor	6	7.93	NS
Cajatambo	4	6.663	NS
Chiquián	5	6.379	NS
Laguna Surasaca	7	6.379	S (0.05)

Fuente: Elaboración propia.

### *Curva de Doble Masa*

El análisis de consistencia de los registros pluviométricos completados se evalúa gráficamente mediante el empleo de la técnica de la curva de doble masa, la cual considera la acumulación de las láminas de lluvia de cada mes y cada año en cada estación, las cuales serán comparadas con los registros acumulados de una estación virtual, cuyos registros son los valores promedio de las estaciones a evaluar.

Tal como se ve en la *Figura 17*, los registros de precipitación acumulada presentan linealidad en los registros de precipitación, ha de tenerse en cuenta que los registros de precipitación y la respuesta de cada estación no cumplen estrictamente con los preceptos de linealidad al ser los registros del tipo “no estacionarios”, por lo que son afectados por fenómenos climáticos externos asimismo, es común que se presenten variaciones en las medias y tendencias crecientes y decrecientes, esta variabilidad es la naturaleza de los registros climáticos de precipitación.



*Figura 17:* Curva de doble masa de las estaciones consideradas en el estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3. Validación de registros de sensoramiento remoto CHIRPS

El proceso de validación de los registros satelitales obtenidos por sensoramiento remoto muestra altos grados de asociatividad lineal entre la precipitación satelital y la precipitación histórica, el estadístico empleado para validar estos registros es el coeficiente de determinación. Ver Tabla 10 y *Figura 18*.

**Tabla 10:** Resultados de la validación estadística cruzada de la precipitación satelital.

Estación	Periodo	R <sup>2</sup>
Estación Cajatambo	1981 - 2017	<b>0.85</b>
Estación Gorgor	2002 - 2017	<b>0.75</b>
Estación Chiquián	1987 - 2012	<b>0.86</b>
Estación Laguna Surasaca	2008 - 2017	<b>0.72</b>

Fuente: Elaboración propia.



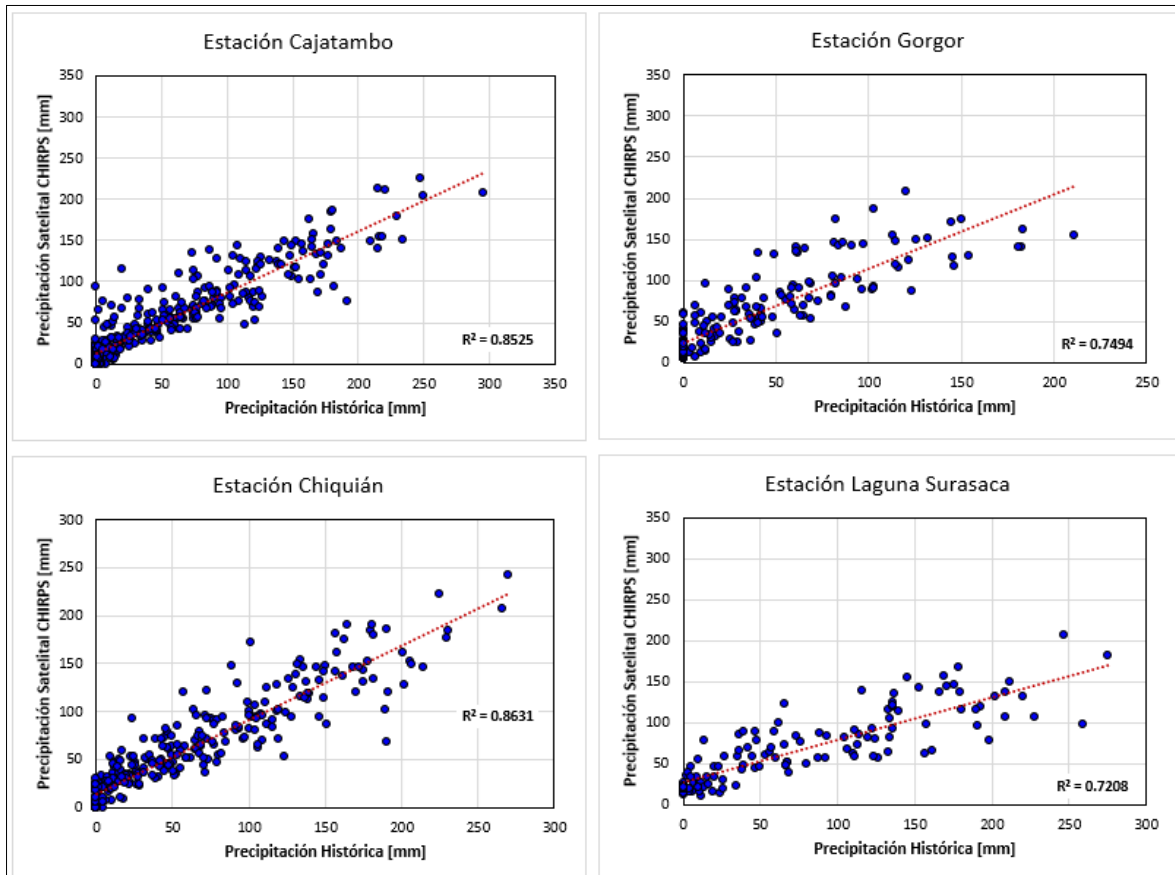


Figura 18: Resultados de la validación gráfica de la precipitación satelital CHIRPS.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4. Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración media areal.

##### *Precipitación*

El método de interpolación empleado para la determinación de la precipitación y temperatura media areal en la cuenca de estudio ha sido el método de Shepard, el cual es un método que considera la inversa de la distancia al cuadrado a partir de un radio de búsqueda y considerando un gradiente de precipitación obtenido a partir de los registros históricos.

Se ha estimado la precipitación media areal a partir de los registros históricos observados que han sido completados, mediante el algoritmo Cutoff, y a partir de los registros de precipitación obtenida por sensoramiento remoto, previa corrección del sesgo en dichos registros. Ver Figura 19.

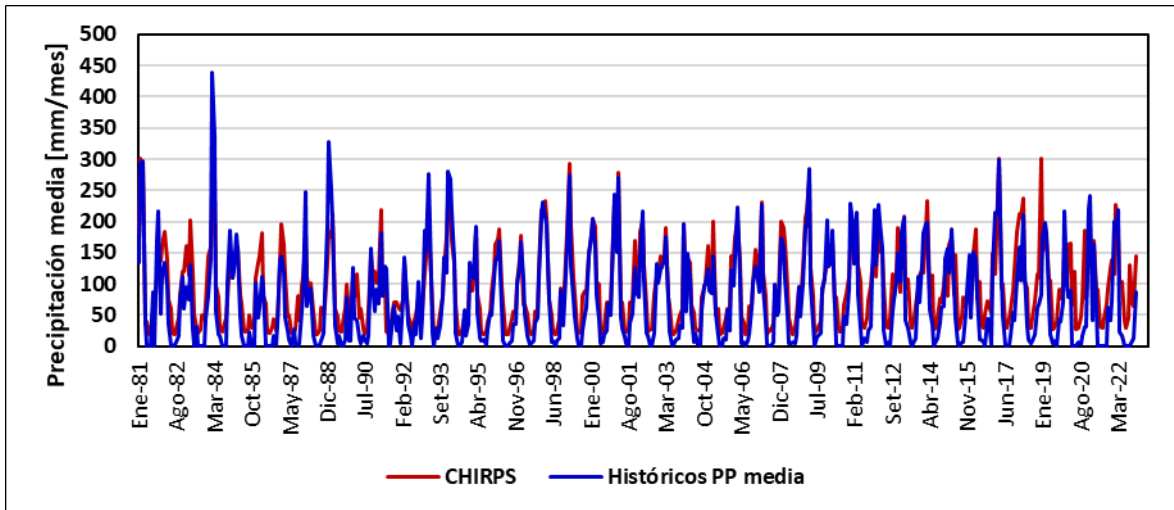


Figura 19: Precipitación media areal en la cuenca de estudio para las dos fuentes consideradas.

Fuente: Elaboración propia.

### Temperatura

Se hizo empleo de los registros de temperatura del producto satelital Terraclimate, debido a que los registros históricos existentes en la cuenca del río Pativilca son insuficientes, no presentan una adecuada consistencia, así como sus ubicaciones se encuentran muy alejadas de la zona de estudio, por lo que no van a representar adecuadamente a la temperatura del área a evaluar. (Ver Figura 20).

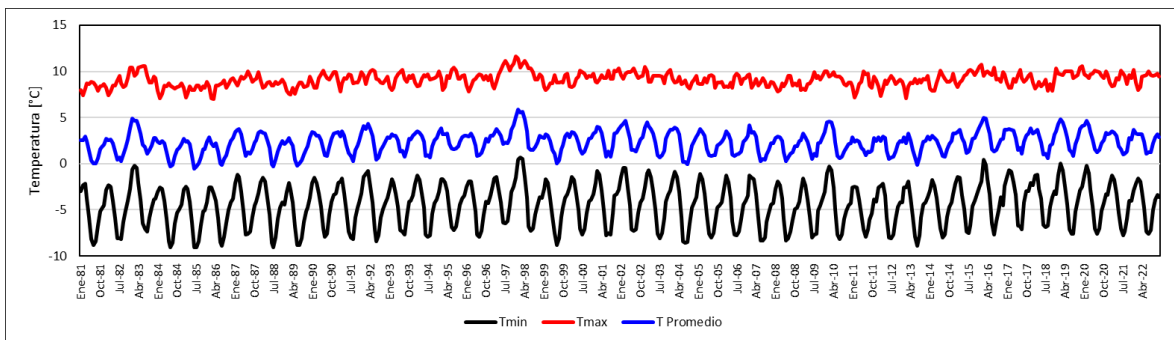


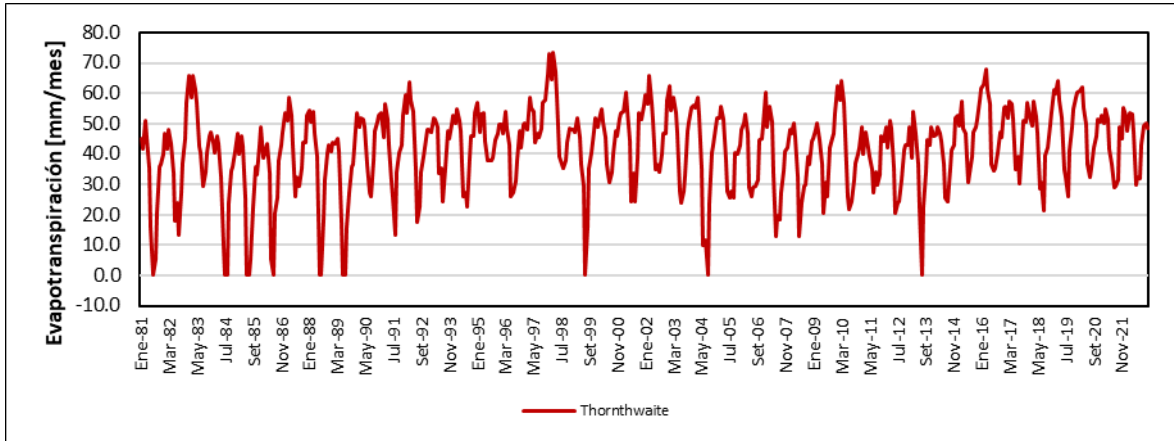
Figura 20: Temperatura máxima, media y mínima areal para la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia

### Evapotranspiración

La determinación de la evapotranspiración se hace aplicando la metodología de Thornthwaite, la cual es una metodología ampliamente aceptada por la Autoridad Nacional Del Agua y el SENAMHI para estimar las tasas de evapotranspiración en múltiples cuencas del Perú.

El método considera a la variable climática Temperatura media areal y a la latitud para estimar las pérdidas de lámina de agua potencial por efectos de la evaporación y la transpiración. (Ver *Figura 21*)



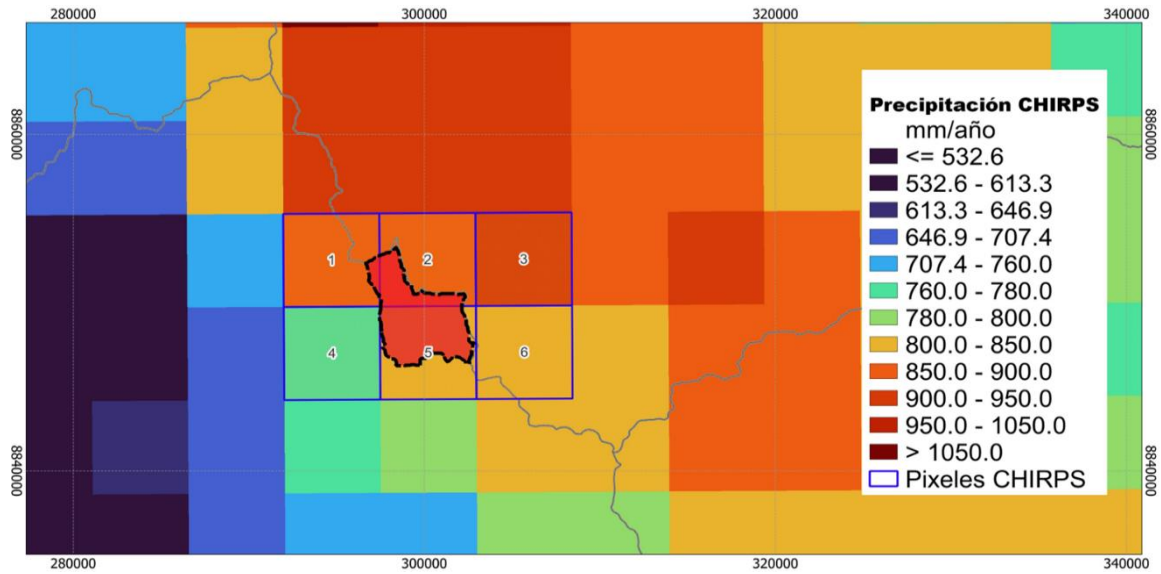
*Figura 21:* Evapotranspiración potencial en la subcuenca Viconga.  
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica

#### 4.3.1. Precipitación de Sensoramiento remoto CHIRPS

##### *Precipitación de sensoramiento remoto*

Los registros de precipitación CHIRPS son registros diarios obtenidos mediante sensores instalados en satélites, los cuales pasan por un posterior proceso de calibración con registros observados. La *Figura 22* presenta a las ubicaciones de los píxeles empleados para extraer los registros de precipitación diaria, los cuales posteriormente se han convertido en registros mensuales, series que finalmente dieron origen a la serie de precipitación media areal en la cuenca de estudio.



*Figura 22:* Ubicación de los píxeles de CHIRPS.  
Fuente: Elaboración Propia

### *Duración del evento*

La duración o amplitud temporal de los eventos de precipitación, considerados en esta investigación, se encuentran basados en la temporalidad disponible en los registros de la precipitación obtenida por sensoramiento remoto, para los datos CHIRPS, la duración de los registros de precipitación es a escala diaria.

### *Frecuencia de ocurrencia*

La frecuencia de ocurrencia de las tormentas, en su estado natural, es muy aleatorio de cuantificar, ante ello, para facilitar la caracterización de los eventos de tormentas, se realiza una caracterización de las magnitudes de tormentas acumuladas mes a mes, de tal forma se logra distinguir la estacionalidad y frecuencia de las lluvias mes a mes, tal como se muestra en la *Figura 23*.

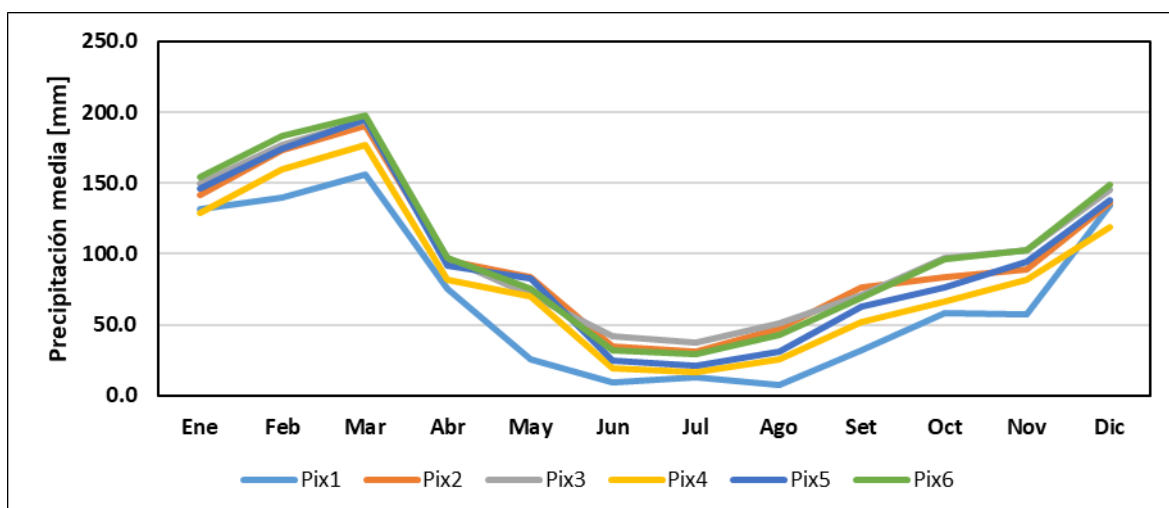


Figura 23: Precipitación media anual de los píxeles de precipitación CHIRPS.  
Fuente: Elaboración Propia

Los principales estadísticos de los registros de precipitación se presentan en la Tabla 11, en donde se observa que los valores de los registros de precipitación varían desde los 840 mm/año hasta los 1237 mm/año, siendo que los mayores volúmenes de lluvias acumuladas son durante el mes de marzo.

Tabla 11: Precipitación promedio anual de los 6 píxeles de CHIRPS considerados.

Píxel CHIRPS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Pix1	131.3	139.9	156.4	75.3	25.4	9.4	12.7	7.9	31.9	58.7	57.5	134.1
Pix2	141.6	173.2	190.9	95.2	83.2	35.0	30.8	47.1	76.1	84.0	89.5	136.1
Pix3	149.8	176.6	194.5	97.0	71.2	41.6	37.4	51.4	71.2	97.6	103.1	145.5
Pix4	128.6	159.7	177.0	82.0	70.0	19.7	16.5	26.1	51.6	66.5	81.4	119.0
Pix5	145.9	174.5	194.9	91.7	82.6	24.4	20.8	31.5	62.8	76.5	94.8	137.6
Pix6	154.0	183.7	197.9	97.0	75.7	32.1	29.3	43.3	69.4	95.9	103.1	149.0

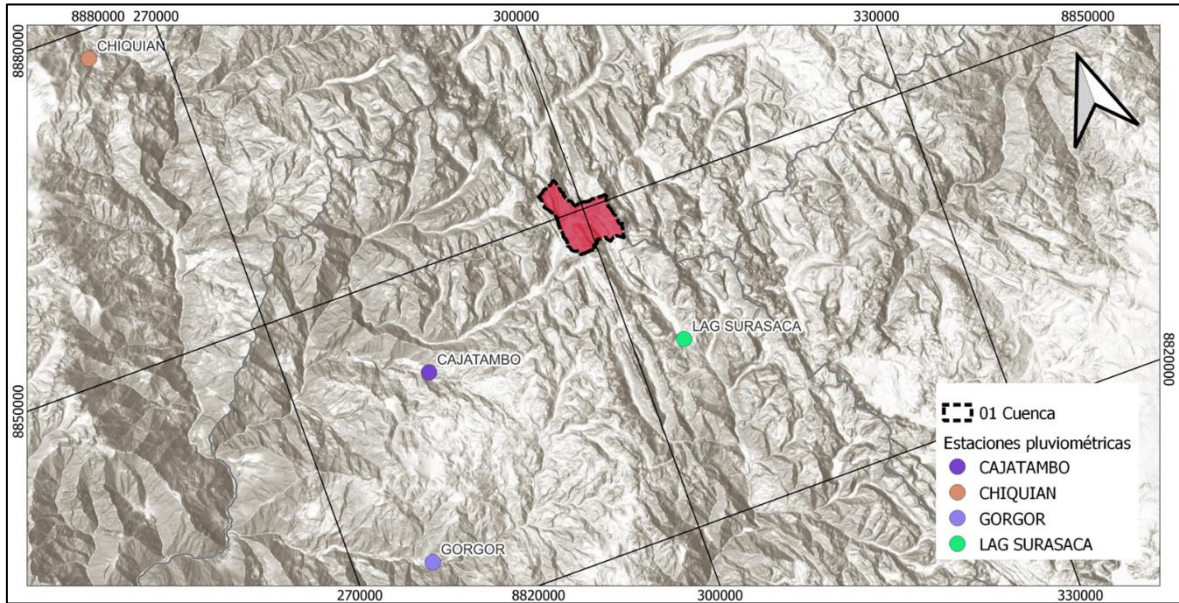
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2. Precipitación Histórica

##### *Precipitación de sensoramiento remoto*

Los registros de precipitación histórica son registros diarios obtenidos mediante observación directa en las estaciones convencionales instaladas por el SENAMHI, los cuales pasan por un proceso previo en el que se determina la precipitación diaria acumulada en las 24 horas, para los dos registros que han sido estimados a las 7:00 horas y 19:00 horas en la estación por el operador. La Figura 24 presenta las ubicaciones de las estaciones consideradas para extraer los registros de

precipitación diaria, los cuales posteriormente se han convertido en registros mensuales, y luego completados. Estas series que finalmente dieron origen a la serie de precipitación media areal en la cuenca de estudio.



*Figura 24:* Estaciones con registros de precipitación consideradas en la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

### *Duración del evento*

La duración o amplitud temporal de los eventos de precipitación, considerados en esta investigación, se encuentran basados en la temporalidad disponible en los registros de la precipitación descargados desde la fuente oficial de datos, la duración de los registros de precipitación es a escala diaria, la cual posteriormente se transformará a una duración mensual

### *Frecuencia de ocurrencia*

La frecuencia de ocurrencia de las tormentas, en su estado natural, es muy aleatorio de cuantificar, ante ello, para facilitar la caracterización de los eventos de tormentas, se realiza una caracterización de las magnitudes de tormentas acumuladas mes a mes, de tal forma se logra distinguir la estacionalidad y frecuencia de las lluvias mes a mes, tal como se muestra en la *Figura 25*.

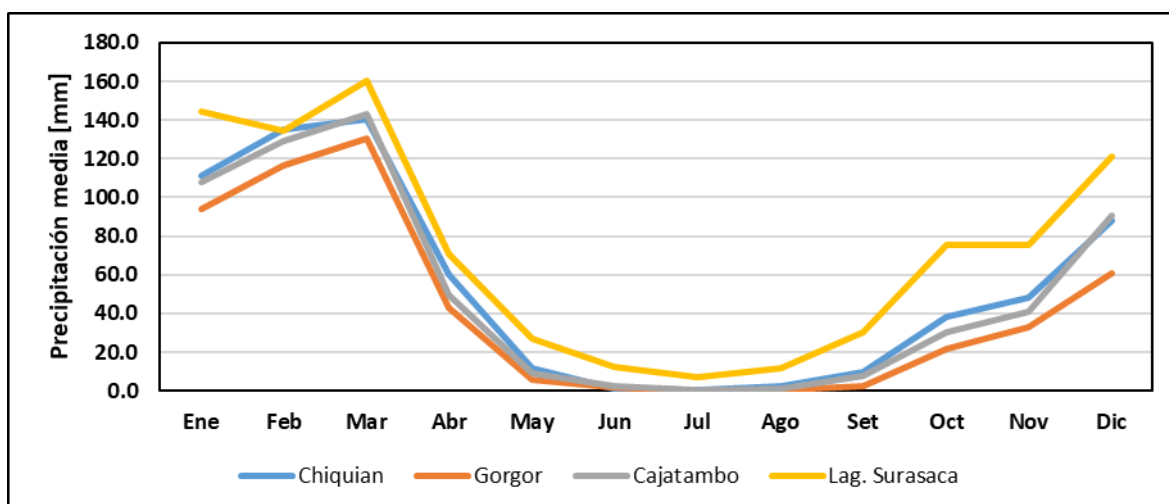


Figura 25: Precipitación media anual en las estaciones con registros históricos.  
Fuente: Elaboración propia.

Los principales estadísticos de los registros de precipitación histórica se presentan en la Tabla 12, en donde se observa que los valores de los registros de precipitación varían desde los 509 mm/año hasta los 870 mm/año, siendo que los mayores volúmenes de lluvias acumuladas son durante el mes de marzo.

Tabla 12: Precipitación histórica anual en las estaciones consideradas.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Chiquian	111.4	134.9	140.4	60.4	11.6	1.3	0.4	2.8	9.5	38.5	48.2	88.0
Gorgor	93.7	116.9	130.5	42.7	5.8	1.6	0.0	0.3	2.8	21.5	32.7	60.8
Cajatambo	108.1	128.9	142.9	49.9	8.8	2.4	0.3	1.1	7.5	30.6	41.2	90.6
Lag. Surasaca	144.2	134.2	160.6	70.8	27.0	12.5	7.0	11.9	30.5	75.5	75.6	121.0

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.3 Modelo hidrológico.

#### Caracterización geomorfológica

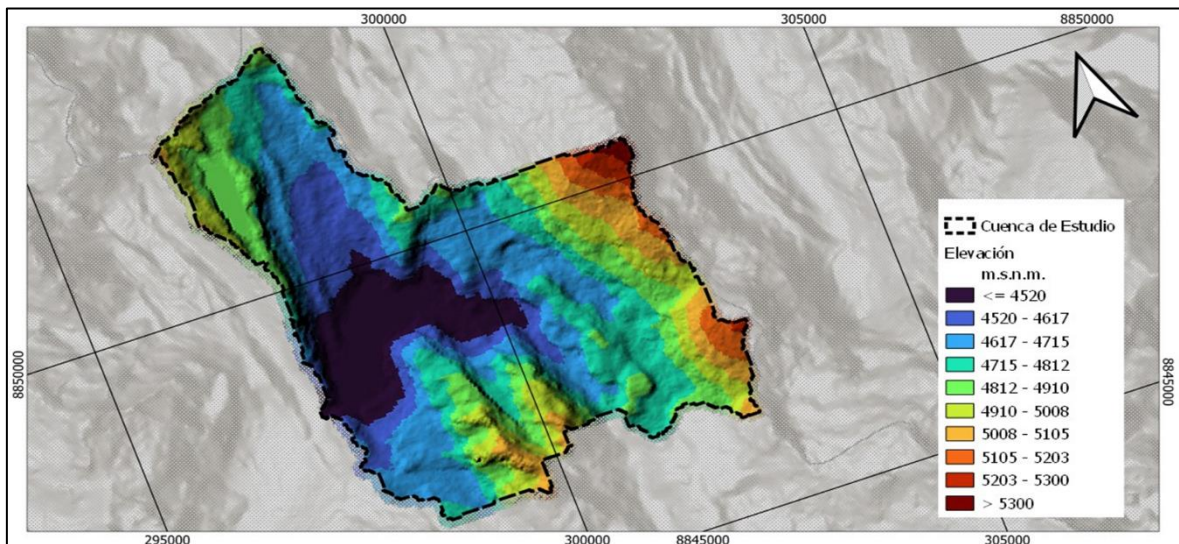
La caracterización geomorfológica realizada al área de estudio, subcuenca Viconga, se realizó apoyándose del software de Sistemas de información geográfica QGIS, el cual es un software de libre uso y que no requiere de una licencia, mediante este software se realizó la caracterización de los parámetros hidrológicos de la cuenca. Los principales parámetros que caracterizan hidrológicamente la geomorfología de la cuenca se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10:** *Parámetros geomorfológicos principales cuenca Viconga.*

Tipo de Parámetro	Parámetro	Valor	Unidad
De Forma	Área	23.63	Km <sup>2</sup>
	Perímetro	32.66	Km <sup>2</sup>
	Coeficiente de Compacidad	1.85	[-]
	Ancho Promedio	2.53	[-]
	Factor de Forma	0.26	[-]
	Lado Mayor de Rectángulo Equivalente	15.55	Km
De Relieve	Lado Menor de Rectángulo Equivalente	0.78	Km
	Pendiente media	37%	[m/m]
	Altitud Media	4747.7	msnm
	Altitud Máxima	5398	msnm
	Altitud Mínima	4422	msnm
De Drenaje	Long. Cauce Principal	9.62	Km
	Cota máxima	4998	msnm
	Cota mínima	4422	msnm
	Pendiente media del cauce	8.80%	[-]
	Densidad de drenaje	0.00063	Km/Km <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

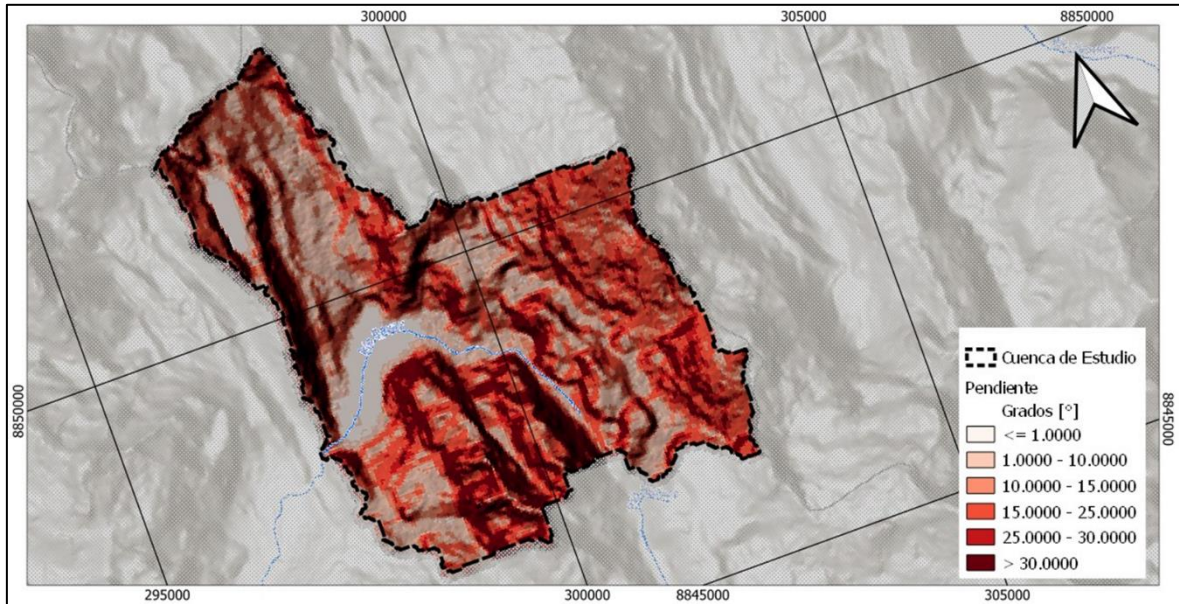
Asimismo, se ha generado los mapas de altitudes y pendientes para la cuenca de estudio, de esta forma se logra visualizar la distribución espacial de la altitud y pendiente. Ver *Figura 26* y *Figura 27*.



**Figura 26:** Mapa de altitudes de la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia.





*Figura 27:* Mapa de pendientes en la cuenca de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4. Desarrollo por Objetivos

**Objetivo 1:** Generar caudal usando el modelo GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica.

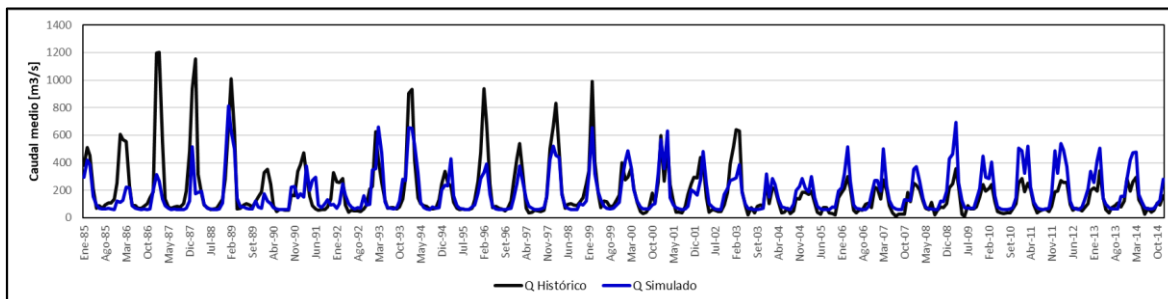
*Caudal generado empleando registros históricos.*

A partir del modelo hidrológico construido para la cuenca de estudio, se han generado los caudales naturales en la cuenca de aporte al embalse Viconga, dichos caudales tienen en promedio una magnitud igual a 1.61 m<sup>3</sup>/s siendo que los registros históricos en el embalse son de 1.68 m<sup>3</sup>/s, lo cual indica que los caudales generados en promedio son 0.07 m<sup>3</sup>/s menores que los caudales promedio.

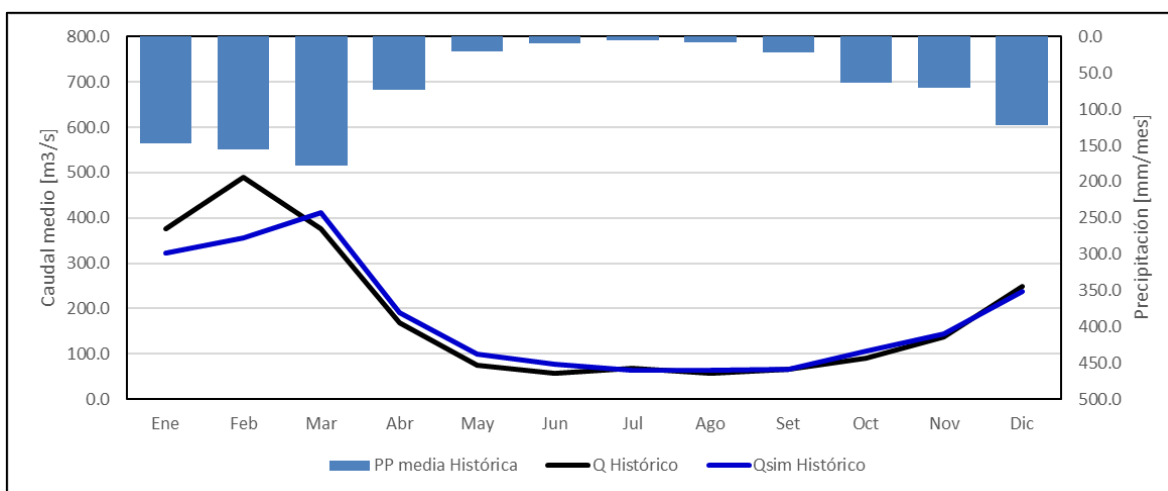
En la **Figura 28** se presentan a los caudales generados en el embalse Viconga empleando los registros históricos de precipitación media areal estimados en la cuenca, se observa la superposición entre los registros generados y los registros históricos en el embalse, siendo que se logra observar que el modelo subestima los caudales durante los meses de estiaje.

Se logra observar, además, en la **Figura 29**, que los caudales medios anuales generados siguen la estacionalidad de los registros pluviométricos, siendo que los

mayores valores se presentan en el mes de mayor aporte de lluvias, observándose nuevamente a partir de la curva de duración de caudales, la subestimación de los registros generados.



**Figura 28:** Caudales naturales generados en el embalse Viconga  
Fuente: Elaboración propia.



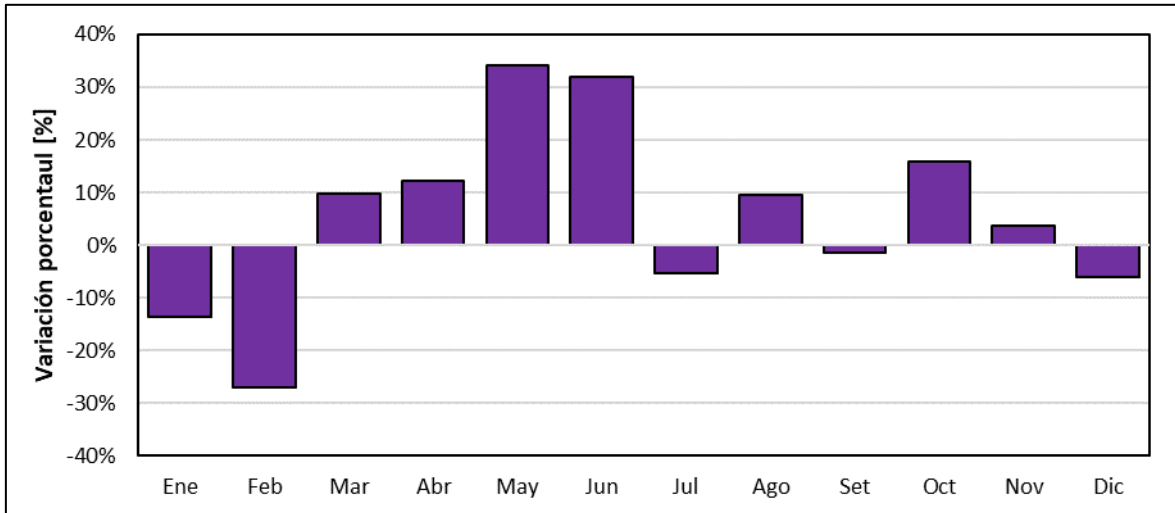
**Figura 29:** Caudales promedios multianuales en el embalse Viconga.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se presentan los resultados de las variaciones porcentuales determinadas entre los caudales generados por el modelo hidrológico GR2m respecto de los registros de caudales mensuales históricos en el sistema, se observan variaciones mes a mes, las cuales varían desde -27% hasta 34% en los meses de febrero y mayo respectivamente. (Ver **Figura 30**)

**Tabla 13:** Diferencias porcentuales de los caudales generados.

Dpi	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Variación	-14%	-27%	10%	12%	34%	32%	-5%	9%	-1%	16%	4%	-6%

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 30: Métricas de variación porcentual de los caudales generados.*  
Fuente: Elaboración propia.

#### *Caudal generado empleando registros de sensoramiento remoto*

A partir del modelo hidrológico construido para la cuenca de estudio, se han generado los caudales naturales en la cuenca de aporte al embalse Viconga a partir de los registros de precipitación por sensoramiento remoto, dichos caudales tienen en promedio una magnitud igual a 1.81 m<sup>3</sup>/s siendo que los registros históricos en el embalse son de 1.68 m<sup>3</sup>/s, lo cual indica que los caudales generados en promedio son 0.13 m<sup>3</sup>/s menores que los caudales promedio.

En la *Figura 31* se presentan a los caudales generados en el embalse Viconga empleando los registros históricos de precipitación media areal estimados en la cuenca, se observa la superposición entre los registros generados y los registros históricos en el embalse, siendo que se logra observar que el modelo subestima los caudales durante los meses de estiaje.

Se logra observar, además, en la *Figura 32*, que los caudales medios anuales generados siguen la estacionalidad de los registros pluviométricos, siendo que los mayores valores se presentan en el mes de mayor aporte de lluvias, observándose nuevamente a partir de la curva de duración de caudales, la subestimación de los registros generados. (Ver *Figura 32*).

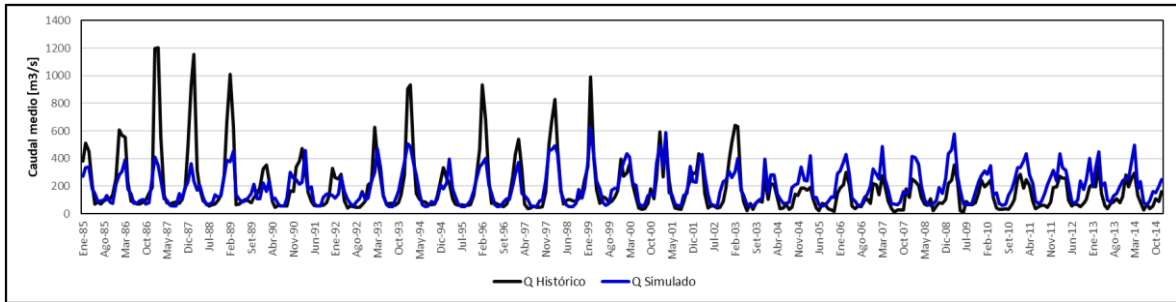


Figura 31: Caudales naturales generados en el embalse Viconga  
Fuente: Elaboración propia.

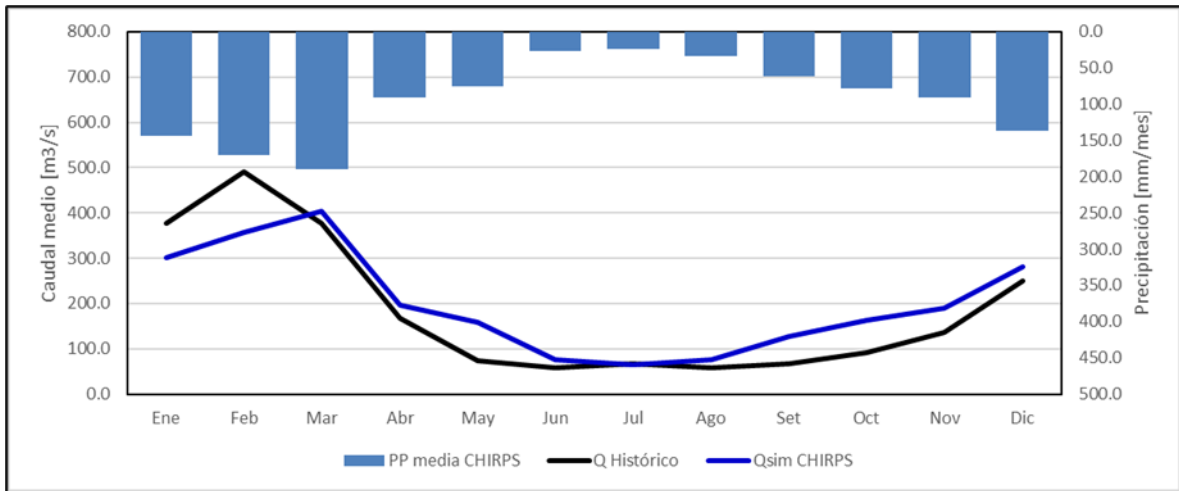


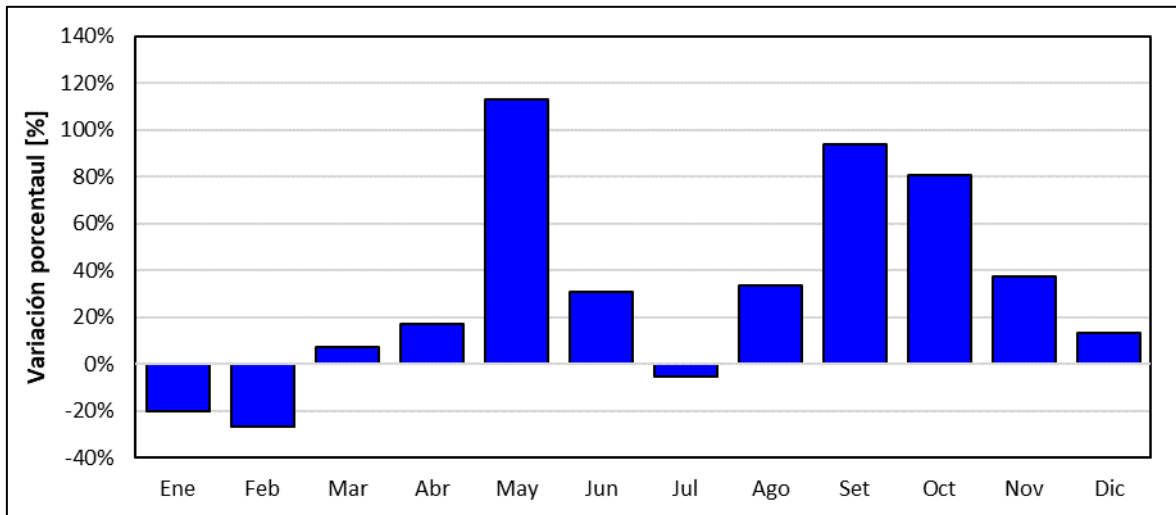
Figura 32: Caudales promedios multianuales en el embalse Viconga.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se presentan los resultados de las variaciones porcentuales determinadas entre los caudales generados por el modelo hidrológico GR2m respecto de los registros de caudales mensuales históricos en el sistema, se observan variaciones mes a mes, las cuales varían desde -27% hasta 113% en los meses de febrero y mayo respectivamente. (Ver Figura 33).

Tabla 14: Diferencias porcentuales de los caudales generados.

Dpi	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Variación	-20%	-27%	7%	17%	113%	31%	-6%	33%	94%	80%	38%	13%

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 33: Métricas de variación porcentual de los caudales generados.*  
Fuente: Elaboración propia.

**Objetivo 2:** Determinar los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto e histórica, en la calibración.

*Parámetros óptimos obtenidos mediante registros históricos.*

El modelo hidrológico GR2m es un modelo del tipo determinístico, en esta investigación la aplicación del modelo es bajo un enfoque del tipo agregado, tal como se ha descrito en el Capítulo II, este modelo presenta dos parámetros de suma importancia que describen parte del proceso de transformación de la precipitación a escorrentía cuando se modela el transporte de la humedad en el suelo. Los parámetros considerados a variar, en la calibración, son el parámetro X1 (Capacidad máxima de almacenamiento del primer reservorio) y X2 (Coeficiente de intercambio de volúmenes a escala subsuperficial).

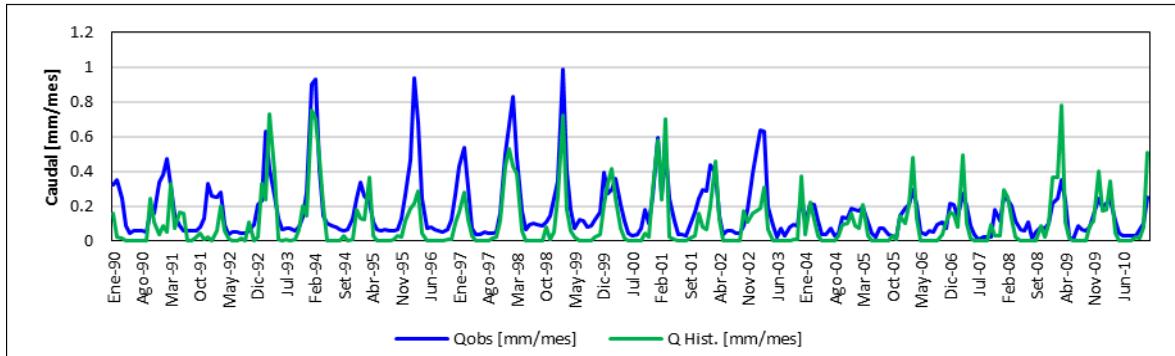
Los parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración del modelo, empleando los registros de precipitación histórica, para el periodo 1985 – 2014, se pueden ver en la Tabla 15.

**Tabla 15:** *Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración con registros históricos.*

Parámetro	Valor	Unidad
X1	129.24	mm
X2	2.57	mm

Fuente: Elaboración propia.

Durante la calibración, se realiza la variación automática de los parámetros X1 y X2 de tal manera que se determina aquel juego de parámetros que permiten obtener el mayor valor del estadístico de eficiencia, de esta forma se busca que los caudales generados se parezcan lo más posible a los caudales observados. Ver *Figura 34*.



*Figura 34: Caudales generados durante la calibración.*  
Fuente: Elaboración propia.

*Parámetros óptimos obtenidos mediante registros de sensoramiento remoto.*

El modelo hidrológico GR2m es un modelo del tipo determinístico, en esta investigación la aplicación del modelo es bajo un enfoque del tipo agregado, tal como se ha descrito en el Capítulo II, este modelo presenta dos parámetros de suma importancia que describen parte del proceso de transformación de la precipitación a escorrentía cuando se modela el transporte de la humedad en el suelo. Los parámetros considerados a variar, en la calibración, son el parámetro X1 (Capacidad máxima de almacenamiento del primer reservorio) y X2 (Coeficiente de intercambio de volúmenes a escala subsuperficial).

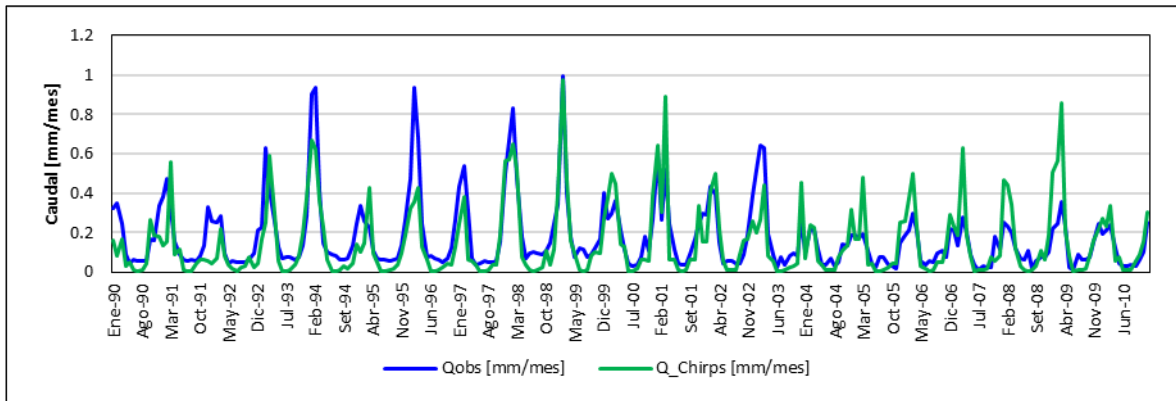
Los parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración del modelo, empleando los registros de precipitación obtenidos de sensoramiento remoto CHIRPS, para el periodo 1985 – 2014, se pueden ver en la Tabla 16.

**Tabla 16:** *Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración con registros satelitales.*

Parámetro	Valor	Unidad
X1	32.46	mm
X2	2.14	mm

Fuente: Elaboración propia.

Durante la calibración, se realiza la variación automática de los parámetros X1 y X2 de tal manera que se determina aquel juego de parámetros que permiten obtener el mayor valor del estadístico de eficiencia, de esta forma se busca que los caudales generados se parezcan lo más posible a los caudales observados. Ver *Figura 35*.



*Figura 35:* Caudales generados durante la calibración.  
Fuente: Elaboración propia.

**Objetivo 3:** Conocer la eficiencia del modelo hidrológico GR2m.

*Estadísticos de eficiencia obtenidos mediante registros históricos.*

A partir de la calibración del modelo hidrológico, se han obtenido los estadísticos de eficiencia o bondad respectivos para los registros de caudales medios mensuales, en función de los caudales observados, para la determinación del estadístico de eficiencia de Nash se considera la fórmula presentada en la *Figura 36*, se busca de esta forma obtener el máximo valor de dicha métrica.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

*Figura 36:* Formulación de la métrica de eficiencia de Nash Sutcliffe.  
Fuente: Nash (1970).

Los estadísticos resultantes de la calibración del modelo hidrológico, empleando los registros históricos, se presentan en la Tabla 17, esta tabla resumen evidencia que el valor de Nash Sutcliffe, obtenido durante la calibración, es igual a 0.38, el cual es un valor relativamente aceptable de acuerdo al criterio establecido por Molnar (2011), asimismo, se presenta se ha obtenido un coeficiente de correlación

de Pearson igual a 0.755, lo que evidencia que los caudales generados por el modelo tienen un alto grado de asociatividad lineal con los registros de caudales observados, los estadísticos de eficiencia son relativamente aceptables en la validación, no presentándose una situación de respuesta trivial del modelo hidrológico.

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

*Figura 37: Magnitudes referenciales del estadístico de Nash Sutcliffe.*  
Fuente: Molnar (2011)

**Tabla 17: Estadísticos de eficiencia obtenidos con el modelo GR2m**

<b>Estadístico</b>	<b>Calibración</b>	<b>Validación</b>	<b>Valor Óptimo</b>
Nash Sutcliffe	0.384	0.110	<b>1</b>
Coef. Pearson.	0.755	0.863	<b>1</b>
Sesgo Volumétrico	0.398	0.104	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia.

*Estadísticos de eficiencia obtenidos mediante registros de sensoramiento remoto.*

A partir de la calibración del modelo hidrológico, se han obtenido los estadísticos de eficiencia o bondad respectivos para los registros de caudales medios mensuales, en función de los caudales observados, para la determinación del estadístico de eficiencia de Nash se considera la fórmula presentada en la *Figura 38*, se busca de esta forma obtener el máximo valor de dicha métrica.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

*Figura 38: Formulación de la métrica de eficiencia de Nash Sutcliffe.*  
Fuente: Nash (1970)

Los estadísticos resultantes de la calibración del modelo hidrológico, empleando los registros históricos, se presentan en la Tabla 18, esta tabla resumen evidencia que el valor de Nash Sutcliffe, obtenido durante la calibración, es igual a 0.52, el cual es un valor relativamente aceptable de acuerdo al criterio establecido por



Molnar (2011), ver *Figura 39*, asimismo, se presenta se ha obtenido un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.78, lo que evidencia que los caudales generados por el modelo tienen un alto grado de asociatividad lineal con los registros de caudales observados.

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

*Figura 39:* Magnitudes referenciales del estadístico de Nash Sutcliffe.  
Fuente: Molnar (2011).

**Tabla 18:** Estadísticos de eficiencia obtenidos con el modelo GR2m

<b>Estadístico</b>	<b>Calibración</b>	<b>Validación</b>	<b>Valor Óptimo</b>
Nash-Sutcliffe	0.523	-0.298	<b>1</b>
Coef. Pearson.	0.784	0.784	<b>1</b>
Sesgo Volumétrico	0.155	0.155	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.5. Contratación de Hipótesis**

**Contraste de hipótesis 1:** Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS, precipitación histórica y caudal generado.

Para la contrastación se plantearon las siguientes hipótesis:

H<sub>0</sub>: El caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica no varía significativamente.

H<sub>a</sub>: El caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica varía significativamente

#### **Caudal Generado**

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 13 y Tabla 14, se observa que los resultados de los caudales generados aplicando el modelo GR2m, empleando las series de precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS y empleando las series históricas, si presentan variaciones entre ellas, siendo que estas variaciones de los

caudales generados empleando los registros de sensoramiento remoto varían en alrededor del 21%, a escala anual, respecto de los valores de caudales generados obtenidos empleando registros históricos.

La Tabla 19 presenta el resumen de las variaciones estimadas para los caudales generados aplicando el modelo GR2m, considerando la magnitud de los caudales obtenidos empleando los registros de sensoramiento remoto respecto de la magnitud de los caudales generados empleando los registros históricos.

**Tabla 19:** Variaciones medias de los caudales generados con el modelo GR2m

Dpi	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
<b>GR2M</b>	-8%	0%	-2%	4%	59%	-1%	0%	22%	96%	56%	33%	20%

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, a partir de lo descrito en los párrafos previos, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_a$ ) demostrando que el caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica si varía significativamente, siendo esta variación mayor al 5%, la cual considera el criterio establecido en la Tabla 3.

**Contraste de hipótesis 2:** Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS, precipitación histórica y parámetros óptimos del modelo hidrológico.

Para la contrastación se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0$ : Los parámetros óptimos del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica no varía significativamente.

$H_a$ : Los parámetros óptimos del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica varía significativamente.

### **Parámetros Óptimos del modelo GR2m**

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 15 y Tabla 16, se observa que los resultados de los parámetros óptimos del modelo GR2m, obtenidos empleando las series de precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS y empleando las series históricas, si presentan variaciones entre ellas, siendo que estas variaciones de los

parámetros óptimos empleando los registros de sensoramiento remoto varían en alrededor del 46%, respecto de los valores de caudales generados obtenidos empleando registros históricos.

La Tabla 20 presenta el resumen de las variaciones estimadas para los caudales generados aplicando el modelo GR2m, considerando la magnitud de los caudales obtenidos empleando los registros de sensoramiento remoto respecto de la magnitud de los caudales generados empleando los registros históricos.

**Tabla 20:** *Parámetros óptimos del modelo GR2m obtenidos en la calibración.*

Parámetro	X1 [mm]	X2 [mm]
Históricos	129.24	2.57
CHIRPS	32.46	2.14
Variación [%]	-75%	-17%

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, a partir de lo descrito en los párrafos previos, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_a$ ) demostrando que los parámetros óptimos del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica si varían significativamente, siendo esta variación mayor al 5%, la cual considera el criterio establecido en la Tabla 3.

**Contraste de hipótesis 3:** Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS, precipitación histórica y eficiencia del modelo hidrológico.

Para la contrastación se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0$ : La eficiencia del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS no es significativamente alta frente a la precipitación Histórica.

$H_a$ : La eficiencia del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS si es significativamente alta frente a la precipitación Histórica.

### **Eficiencia del modelo hidrológico.**

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 17 y Tabla 18 se observa que los resultados de las eficiencias del modelo GR2m, obtenidas empleando las series de precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS y empleando las series históricas,

si presentan variaciones entre ellas, siendo que estas variaciones de los estadísticos de eficiencia empleando los registros de sensoramiento remoto varían en alrededor del 6%, respecto de los valores de caudales generados obtenidos empleando registros históricos, siendo una mejora en los estadísticos de eficiencia la que se obtiene al evaluar el modelo hidrológico GR2m con los registros de sensoramiento remoto.

La Tabla 21 presenta el resumen de las variaciones estimadas para estadísticos de eficiencia generados aplicando el modelo GR2m, considerando la magnitud de los caudales obtenidos empleando los registros de sensoramiento remoto respecto de la magnitud de los caudales generados empleando los registros históricos.

**Tabla 21:** *Estadísticos de eficiencia del modelo GR2m obtenidos en la calibración.*

Estadístico	Históricos	CHIRPS	Variación [%]
Nash Sutcliffe	0.454	0.491	8%
Coef. De Pearson	0.679	0.706	4%
Error Volumétrico	4.6%	-3.9%	-9%

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, a partir de lo descrito en los párrafos previos, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_a$ ) demostrando que la eficiencia del modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS si es significativamente alta frente a la precipitación Histórica, siendo esta variación mayor al 5%, la cual considera el criterio establecido en la Tabla 3.

## V. DISCUSIÓN

Ditthakit et. al. (2021) en su investigación “*Empleo de métodos de aprendizaje automático como soporte para el modelo GR2m en la estimación de escurrimiento en cuencas hidrográficas no aforadas*” tuvo como objetivo en su investigación la de evaluar métodos de regionalización para determinar los parámetros regionales de modelos hidrológicos de transformación de precipitación a escurrimiento, en este caso GR2m. La investigación empleó dos tipos de métodos de regionalización (basados en regresión lineal y basados en distancias), de estos métodos se emplearon 3 del tipo regresión lineal y dos métodos basados en distancias, asimismo, se analizaron 37 subcuencas con sus respectivas subcuencas aportantes en la cuenca sur de Tailandia. Los resultados obtenidos presentan que el método de regionalización del modelo GR2m por Random Forrest (árboles de decisión) es el que presenta resultados con el más bajo error, asimismo, es el método de regionalización, de los caudales obtenidos, considerando parámetros del mismo modelo hidrológico que mejor desempeño presenta frente a una regionalización por parámetros físicos de cuenca. En contraste a la investigación presentada, el modelo implementado en la cuenca aportante al embalse Viconga permite asimismo generar caudales con eficiencias estadísticas, del modelo construido, cualitativamente aceptables, lo cual finalmente ha permitido generar caudales natural en el embalse que permitan su empleo con una alta confiabilidad de estos registros, los cuales, como ha sido calibrados, ha sido disminuida la incertidumbre que presentan todos los modelos hidrológicos, los cuales son finalmente un conjunto de fórmulas matemáticas de fundamento físico que reproducen el ciclo hidrológico a partir del descarte de una gran cantidad de variables y considerando solo las más principales, precipitación y evapotranspiración.

González-Rojí et. al. (2022) en su investigación “*Sensibilidad de la precipitación en las tierras altas y bajas del Perú a las opciones de parametrización física en WRF V3.8.1*” tiene como objetivo evaluar la respuesta del modelo WRF v3.8.1 en el sur peruano empleando diversas fuentes de precipitación satelital o productos de precipitación obtenidos por sensoramiento remoto. La investigación se aplica de forma específica en la zona transfronteriza Perú - Brasil - Bolivia, al ser una zona

de bajo impacto de los fenómenos ENSO considerando precipitación de CHIRPS, PISCO, GPM y ERA5. Los resultados de esta investigación indican que son los datos del producto PISCO los que presentan mejor desempeño respecto de las otras fuentes de precipitación. Se logra concluir que el modelo WRF, empleado para la predicción de lluvias en determinados lugares, no tiene un buen desempeño cuando se evalúa durante la época de estiaje en la vertiente del pacífico. En contraste a la investigación presentada, se ha implementado un modelo hidrológico para generar caudales naturales empleando los registros de precipitación obtenida por sensoramiento remoto CHIRPS, el cual, tal como se presenta en la investigación de Gonzalez-Rojí, es uno de los productos de precipitación de sensoramiento remoto que presenta un excelente desempeño en la zona evaluada, siendo que para la investigación que se ha realizado en esta tesis, el producto de precipitación obtenida por sensoramiento remoto tiene una excelente respuesta para generar caudales medios mensuales en la cuenca de aporte al embalse Viconga.

Rincón (2019) en su investigación denominada "*Aplicación de los modelos lluvia-escorrentía GR2m y GR4j en la cuenca del río Guali para la gestión de los recursos hídricos*" tuvo como objetivo evaluar la aplicabilidad de los modelos hidrológicos GR2m y GR4j en generar caudales para la cuenca del río Guali. La investigación estableció tres fases de estudio en la que en la primera se evalúan los datos hidroclimatológicas, siendo que en la segunda y tercera fase se generan los caudales bajo los modelos hidrológicos empleados y se analiza y evalúa la eficiencia de cada uno de los modelos al generar caudales. Los principales resultados del estudio muestran para la cuenca Guali, empleando el modelo GR2m, se obtuvieron, posterior a la calibración, los parámetros X1 es igual a 2949 mm y el parámetro X2 es igual a 0.51. En contraste a la investigación presentada, se ha obtenido los parámetros óptimos del modelo hidrológico empleando los registros históricos y los registros obtenidos por sensoramiento remoto CHIRPS, posterior a la calibración con valores iguales a 129.2 mm y 2.57 mm para los parámetros X1 y X2 considerando el empleo de los registros históricos y valores iguales a 32.5 mm y 2.14 mm considerando el empleo de los registros obtenidos por sensoramiento remoto CHIRPS, observándose diferencias significativas entre los valores obtenidos por Rincón debido a la diferencia entre las ubicaciones, siendo latitudes

completamente distintas, lo cual genera diferencias en los patrones de lluvia que se presentan año a año, siendo generalmente la distribución de lluvias mensuales en la ubicación del área estudiada por Rincón del tipo Bimodal mientras que el régimen de lluvias en el Ande peruano es del tipo unimodal.

Rodríguez Villalba y Rodríguez Cárdenas (2020) en su investigación "*Comparación de los modelos hidrológicos lluvia esorrentía GR2m y GR4j en la obtención de caudales medios en la cuenca del río Subachoque*" tuvo como objetivo el realizar el proceso de calibración, para la cuenca alta del río Subachoque, de los modelos hidrológicos GR4j y GR2m. Este estudio tiene un enfoque cuantitativo descriptivo del tipo aplicado. Se emplearon finalmente, luego de un proceso de selección a partir de polígonos de Voronoi, 6 estaciones con registros de precipitación, dos estaciones con registros de temperatura y una estación con registros de caudales observados. La metodología propuesta por esta investigación está constituida de tres (03) fases, las cuales son recolección de información, delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca y el procesamiento de los datos. Los principales resultados obtenidos muestran que el modelo hidrológico GR2m, posterior a la calibración, presenta valores para sus parámetros óptimos X1 y X2 iguales a 7.79 mm y 0.09 mm. En contraste a la investigación presentada, se ha obtenido los parámetros óptimos del modelo hidrológico empleando los registros históricos y los registros obtenidos por sensoramiento remoto CHIRPS, posterior a la calibración, con valores iguales a 129.2 mm y 2.57 mm para los parámetros X1 y X2 considerando el empleo de los registros históricos y valores iguales a 32.5 mm y 2.14 mm considerando el empleo de los registros obtenidos por sensoramiento remoto CHIRPS, observándose diferencias considerables entre los valores obtenidos por Rodríguez Villalba y Rodríguez Cárdenas, debido a la diferencia en las latitudes, las cuales son completamente distintas, debe de considerarse que mientras que las intensidades y magnitudes de precipitación se incrementan en regiones más cercanas a la línea ecuatorial, por lo que el régimen de lluvias es distinta a la de los andes peruanos centrales.

Cordero (2023) en su investigación "*Generación de caudales sintéticos en la zona de recarga del río Pativilca aplicando el modelo hidrológico GR4j y el producto*

*grillado PISCO v2.1.*” realizó la evaluación a nivel de subcuencas y bandas altitudinales la cuenca alta del río Pativilca, en dónde se ubica el embalse Viconga, empleando para ello un modelo de paso de tiempo diario como es el modelo GR4j. La investigación fue realizada a nivel de la cuenca Pativilca, ubicada en las regiones de Áncash y Lima. Los resultados obtenidos en la investigación muestran que, para una de las subcuencas consideradas en su estudio, la cual es la cuenca de aporte al embalse Viconga, se obtienen estadísticos de eficiencia del modelo hidrológico construido lo suficientemente aceptables, de acuerdo al criterio establecido por Molnar (2011), siendo que el valor del coeficiente de Nash Sutcliffe obtenido en la calibración es igual a 0.67 y en la validación se obtuvo un coeficiente de Nash Sutcliffe igual a 0.46. En contraste a la investigación presentada, empleando el modelo GR2m, el cual es un modelo a paso de tiempo mensual, se ha obtenido estadísticos de Nash Sutcliffe iguales 0.38 y 0.52 cuando se emplean los registros de precipitación históricas y los registros de precipitación obtenidas por sensoramiento remoto CHIRPS respectivamente, es este último producto de precipitación satelital el cual sirve como punto de comparación principal debido a que el producto de precipitación PISCO es una derivación calibrada de los registros de precipitación obtenidas por sensoramiento remoto (CHIRPS, TRMM, GPM, entre otros) con registros históricos, presentando finalmente por ello una mejor eficiencia estadística respecto a los registros de CHIRPS, siendo que la limitante principal sería la extensión temporal de los registros, la cual llega solo hasta el año 2016, respecto de los registros de CHIRPS que llegan hasta el año actual 2023.

Cruz y Romero (2018) en su investigación “*Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: GR2m, Témez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas*” evaluaron al modelo GR2m para la generación de caudales que permitan representar la respuesta hidrológica de la cuenca Callazas. El estudio es del tipo aplicado experimental. Esta investigación fue realizada en la cuenca de los andes denominada Callazas, cuya área es de 980 km<sup>2</sup>, se empleó registros históricos de las estaciones pluviométricas Pasto Grande, Tacalaya, Suches y Vilacota, asimismo se utilizaron los caudales de la estación hidrométrica Coranchay, de propiedad de SPCC obteniéndose finalmente eficiencias de Nash Sutcliffe igual a 0.85 para el modelo GR2m. Las principales conclusiones de la investigación arrojan



que el modelo GR2m es el que mejor representa la respuesta hidrológica de la cuenca Callazas, siendo mucho mejores los ajustes de los caudales en el estiaje. En contraste a la investigación presentada, empleando el modelo GR2m, el cual es un modelo a paso de tiempo mensual, se ha obtenido estadísticos de Nash Sutcliffe iguales 0.38 y 0.52 cuando se emplean los registros de precipitación históricas y los registros de precipitación obtenidas por sensoramiento remoto CHIRPS respectivamente, en este último punto, se puede considerar los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo GR2m empleando los registros históricos como punto de comparación, resultando que los resultados obtenidos por Cruz y Romero presentan una diferencia significativa respecto de los resultados obtenidos en esta investigación, esa diferencia de eficiencia de Nash Sutcliffe, siendo 0.85 para Cruz y Romero y 0.38 el obtenido en esta investigación, se explica directamente en las condiciones de simulación consideradas, siendo que para Cruz y Romero se presentan estaciones climáticas al interior de la cuenca y muy próximas entre sí, situación que no se presenta en la cuenca del río Viconga, en dónde cada una de las estaciones consideradas se encuentran muy alejadas del área aportante o en alguna cuenca vecina, por lo que la respuesta del área aportante al sistema presenta muchas mayores incertidumbres debido a la ausencia de registros en el área de estudio.

## VI. CONCLUSIONES

1. Tras la evaluación de los caudales generados mediante el modelo GR2m, empleando los registros de precipitación obtenida por sensoramiento remoto CHIRPS y los registros de precipitación histórica obtenida de las estaciones pluviométricas instaladas, se pudo llegar a la conclusión que las dos fuentes de registros de tormentas pueden emplearse para la construcción de un modelo de balance de aguas, teniendo un mejor desempeño, en representar la respuesta hidrológica de la cuenca, entre ellas, los registros de precipitación obtenida mediante sensoramiento remoto, la cual presenta mejores estadísticos de eficiencia en la calibración, lo cual también finalmente valida el empleo de estos registros satelitales como una fuente secundaria confiable a poder emplearse en otros proyectos y estudios en la cuenca, por lo cual la variación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m es notable en la cuenca Viconga.
2. Se generaron exitosamente los caudales naturales mediante el uso del modelo hidrológico GR2m en la cuenca de aporte al embalse Viconga, logrando el modelo representar de forma aceptable la respuesta hidrológica de la cuenca estudiada empleando para ello los registros de precipitación obtenida por sensoramiento remoto CHIRPS y los registros de precipitación histórica obtenida de las estaciones pluviométricas instaladas, las cuales se encuentran alejadas del área de estudio, por lo que el caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica varía significativamente.
3. Se lograron obtener los parámetros óptimos del modelo hidrológico GR2m, el cual cuenta con dos parámetros importantes que se emplean para calibrar los caudales generados y que son parte de la construcción matemática asumida para poder representar los procesos físicos que se presentan en las cuencas a evaluar, en este caso la cuenca de aporte al embalse Viconga, obteniéndose dos grupos de valores para cada uno de los parámetros X1 (Capacidad de almacenamiento de la humedad en el suelo) y X2 (Coeficiente de intercambio de agua de flujo subsuperficial), estos valores se encuentran en los rangos estimados por la bibliografía, siendo valores distintos a los determinados por

otros autores que han aplicado el mismo modelo en otras cuencas, siendo que no se cuenta con una referencia que actúe directamente en una zona de condiciones hidrológicas similares, por lo que los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica obtenidos en la calibración varían significativamente.

4. Se concluye, a partir de la evaluación realizada que el modelo hidrológico GR2m es aplicable en la cuenca de estudio, debido a que se han obtenido estadísticos de eficiencia, cualitativamente, bastante buenos, tanto cuando se emplean los registros de precipitación obtenidos por sensoramiento remoto como cuando se emplean los registros de precipitación histórica obtenidos de las estaciones ubicadas alrededor y alejadas de la cuenca evaluada, el hecho que se presente una buena eficiencia estadística del modelo en la calibración da pie a que se puedan emplear los caudales generados para los propósitos que puedan proyectarse para la cuenca, además, demuestra la aplicabilidad del modelo en representar los fenómenos de crecientes medias solo en función de registros pluviométricos, lo cual indirectamente indica que el aporte nival al sistema no es muy significativo, por lo que la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es significativamente alta frente a la precipitación Histórica.

## VII. RECOMENDACIONES

1. Evaluar el empleo del modelo hidrológico GR2m en otras cuencas del país, particularmente en aquellas que alimenten un embalse que tenga un impacto económico importante en el valle de la cuenca intervenida, ya sea empleando, para su construcción, registros de precipitación obtenida por sensoramiento remoto o los registros históricos de estaciones pluviométricas instaladas en la cuenca o cercanas a la misma, de tal manera que se pueda evaluar cuán eficiente es una de las fuentes en representar la respuesta hidrológica ante ausencia de información.
2. Considerar la instalación de una mayor cantidad de estaciones pluviométricas al interior de la cuenca, por lo menos dos o tres, tanto en la cabecera como en la cuenca intermedia, ya que estos registros van a permitir tener un mayor comprensión de los caudales generados ante cada evento en el área estudiada y de esta manera indirectamente mejorar los modelos hidrológicos que se hayan implementado previamente con registros de precipitaciones satelitales, con ello tener una menor incertidumbre de los caudales reconstruidos mediante un modelo de precipitación – escorrentía.
3. Realizar mayores evaluaciones del modelo GR2m en cuencas de la vertiente del océano pacífico, en puntos de evaluación en donde ese disponga de una cantidad de registros corta que permitan calibrar el modelo GR2m y obtener los valores óptimos de  $X_1$  y  $X_2$ , con los cuales posteriormente se pueda generar un estudio de regionalización de los factores, empleando como alternativa la consideración de isolíneas para cada parámetro y cada grupo de cuencas, cercanas y de la misma vertiente, evaluadas.
4. Determinar, mediante la aplicación del modelo GR2m, zonas de confiable aplicabilidad del modelo, mediante un análisis simple por isolíneas o métodos derivados de la ciencia de datos o machine learning como el análisis K-Means, Random Forrest o PCA, mediante el cual ya se dispongan de zonas en donde el modelo GR2m es aplicable y se cuenten con rangos estimados de cuánto es el valor de los estadísticos de eficiencia del modelo, de esta forma se puede establecer regiones en donde es más práctico emplear el modelo utilizado en esta investigación, el cual es de solo dos parámetros alimentado solo con

precipitación y evapotranspiración, respecto de otras zonas o regiones en donde se tenga que emplear modelos que involucren reproducir el fenómeno de fusión de nieve, es decir, tengan un aporte nival significativo.

## REFERENCIAS

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* [en línea]. 2015, 524, 733–752 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027. ISSN 0022-1694.

ACREMAN, M. C. y M. J. DUNBAR. Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrology and Earth System Sciences* [en línea]. 2004, 8(5), 861–876 [consultado el 30 de junio de 2023]. ISSN 1607-7938. Disponible en: doi:10.5194/hess-8-861-2004

APARICIO Mijares, Francisco. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Editorial Limusa, 1992. ISBN: 9789681830144

ARSENAULT, Richard et al. Streamflow prediction in ungauged basins: analysis of regionalization methods in a hydrologically heterogeneous region of Mexico. *Hydrological Sciences Journal* [en línea]. 2019, 64(11), 1297–1311 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1080/02626667.2019.1639716. ISSN 2150-3435.

ASURZA Véliz, Flavio Alexander y Waldo Sven LAVADO Casimiro. Regional parameter estimation of the SWAT model: methodology and application to river basins in the peruvian pacific drainage. *Water* [en línea]. 2020, 12(11), 3198 [consultado el 19 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.3390/w12113198. ISSN 2073-4441.

AYBAR, Cesar et al. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal* [en línea]. 2019, 65(5), 770–785 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1080/02626667.2019.1649411. ISSN 2150-3435.

AYBAR, Cesar et al. Uso del producto grillado PISCO de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI. Lima, 2017.

BLACUTT, Luis A. et al. Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia. Atmospheric Research [en línea]. 2015, 163, 117–131 [consultado el 22 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.atmosres.2015.02.002. ISSN 0169-8095.

CHEREQUE, Wendor. Hidrología para estudiantes de ingeniería civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1991.

CHOW, Ven Te., MAIDMENT, David. y MAYS, Larry. Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamerica S.A., 1994. 584 pp. ISBN: 9586001717.

COLLET, Lila et al. Integrated modelling to assess long-term water supply capacity of a meso-scale Mediterranean catchment. Science of The Total Environment [en línea]. 2013, 461-462, 528–540 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.036. ISSN 0048-9697.

CORDERO Mescoco, Yazid Pedro Nilton. Generación de caudales sintéticos en la zona de recarga del río Pativilca aplicando el modelo hidrológico GR4J y el producto grillado PISCO v2.1. En: Repositorio institucional Cybertesis UNMSM [base de datos en línea]. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2023 [consultado el 10 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/20117>

COY Murcia, Luisa. Ajuste y validación del modelo precipitación – escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca nevado. [en línea] Universidad Santo Tomás, 2017 [Fecha consulta: 17 de junio 2023]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2857/2017luisacoy.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.

CRUZ Adrián, Erwin Jhonatan y ROMERO Callo, Jean Andrés. Análisis Comparativo de los modelos lluvia-escorrentía GR2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados a la cuenca del río Callazas. Tesis (Ingeniero Civil). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2018. 120 pp.

DITTHAKIT, Pakorn et al. Using machine learning methods for supporting GR2M model in runoff estimation in an ungauged basin. *Scientific Reports* [en línea]. 2021, 11(1) [consultado el 17 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1038/s41598-021-99164-5. ISSN 2045-2322.

EDIJATNO y MICHEL, C. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* [en línea]. 1989, (2), 113–122 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1051/lhb/1989007. ISSN 1958-5551.

FATTORELLI, P. y FERNÁNDEZ, C. *Diseño Hidrológico*. Colombia: Editorial Digital, 2011.  
ISBN: 978-987.05-2738-2.

FERNÁNDEZ García, Paula, VALLEJO Seco, Guillermo, LIVACIC Rojas, Pablo E., TUERO Herrero Ellián. Validez Estructurada para una investigación cuasi-experimental de calidad. Se cumplen 50 años de la presentación en sociedad de los diseños cuasi-experimentales. *Anales de Psicología* [en línea]. 2014, 30(2), 756-771 [fecha de Consulta 14 de Junio de 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=16731188039>. ISSN: 0212-9728.

FUERTES Melchor, Néstor. Aplicación y evaluación de modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA para generación de caudales medios diarios en la cuenca del río Huallaga. Tesis (Ingeniero Mecánico de Fluidos). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* [en línea]. 2015, 2(1) [consultado el 1 de julio de 2023]. ISSN 2052-4463. Disponible en: doi:10.1038/sdata.2015.66



GICHAMO, Tseganeh Z. et al. HydroDS: data services in support of physically based, distributed hydrological models. *Environmental Modelling & Software* [en línea]. 2020, 125, 104623 [consultado el 30 de junio de 2023]. ISSN 1364-8152. Disponible en: doi:10.1016/j.envsoft.2020.104623

GONZALEZ Manríquez, Irving Alejandro; LUGO Espinosa, Oziel y AYALA de la Vega, Joel. Diseño y desarrollo de un pluviógrafo semiautomático tipo Hellman. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* [online]. 2016, vol.7, n.1, pp.95-101.

GONZÁLEZ-ROJÍ, Santos J. et al. Sensitivity of precipitation in the highlands and lowlands of Peru to physics parameterization options in WRFV3.8.1. *Geoscientific Model Development* [en línea]. 2022, 15(7), 2859–2879 [consultado el 22 de noviembre de 2023]. ISSN 1991-9603. Disponible en: doi:10.5194/gmd-15-2859-2022.

GUEVARA Perez, Edilberto. *Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada*. Carabobo: Universidad de Carabobo, Venezuela, 1991. 357 pp.

LINSLEY Kohler, Paulus. *Hidrología para ingenieros*. Bogotá: Editorial Mc Graw Hill, 1977.

MEJÍA Mejía, Abel. *Hidrología Aplicada volumen I, II*. Lima: Centro de Impresiones y Publicaciones FIA, 2001.

MOHAMMADI, B., SAFARI, M.J.S. & VAZIFEHKAHAH, S. IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. *Sci Rep* 12, 12096 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16215-1>

MOHAMMADI, Babak et al. Improving streamflow simulation by combining hydrological process-driven and artificial intelligence-based models. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 2021 [consultado el 17 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1007/s11356-021-15563-1. ISSN 1614-7499.

MORLOTE S. y CELISEO S. (2003). Metodología de la investigación. Editorial MCGRAW-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. ISBN: 970-10-4611-0.

MUÑOZ, Eduardo y MENDOZA, Pablo. Rutas Hidrológicas recordando a un colega por los senderos de la hidrología [en línea]. Santiago de Chile: Ximena Vargas Mesa, 2021, pp- 33-45 [fecha de consulta: 17 de junio de 2023]. Capítulo 3. Identificabilidad de parámetros en modelos hidrológicos GR4J: ¿Somos consistentes? Disponible en: <https://libros.uchile.cl/files/presses/1/monographs/1185/submission/proof/>. ISBN: 978-956-09599-0-4

MUÑOZ R. (2015). Metodología de la investigación. Editorial Progreso S.A de C.V. ISBN 9786074265422

PNUD. Manual y guías para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible. New York, 1992.

RAMOS Taype, Cayo. Métodos de análisis en Recursos Hídricos. Lima: UNALM, 2012. 233 pp. ISBN: 9786124147029.

REICHL, Fabian y JOCHEN, Hack. Derivation of Flow Duration Curves to Estimate Hydropower Generation Potential in Data-Scarce Regions. Water [en línea]. 2017, 9(8), 572 [consultado el 19 de junio de 2023].. Disponible en: [doi:10.3390/w9080572](https://doi.org/10.3390/w9080572). ISSN 2073-4441

RINCON Achury, Laura Viviana. Aplicación de los modelos de lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del río Guali para la gestión de los recursos hídricos. Tesis (Ingeniero Ambiental). Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2019. 70 pp.

RINTIS, Hadiani, SUYANTO y SETYOASRI Yosephina Puspa. Rainfall-Discharge simulation in bah bolon catchment area by mock method, NRECA method, and GR2M method. Applied Mechanics and Materials [en línea]. 2016, 845, 24–29

[consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.4028/www.scientific.net/amm.845.24. ISSN 1662-7482.

RODRIGUEZ Villalba, Angie Julieth y RODRIGUEZ Cardenas, Fabian Esteban. Comparación de los modelos hidrológicos Lluvia-Escorrentía GR2M y GR4J en la obtención de caudales medios en la cuenca del río Subachoque. Trabajo de grado (Especialista en Recursos Hídricos). Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2020. 72 pp.

SALAZAR Raymond, María Belén; ICAZA Guevara, María de Fátima y ALEJO Machado, Oscar José. La importancia de la ética en la investigación. Universidad y Sociedad [online]. 2018, vol.10, n.1 [citado 2023-06-15], pp.305-311. Disponible en: <[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202018000100305&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000100305&lng=es&nrm=iso)>. Epub 02-Mar-2018. ISSN 2218-3620.

STRAUCH, Michael et al. Adjustment of global precipitation data for enhanced hydrologic modeling of tropical Andean watersheds. Climatic Change [en línea]. 2016, 141(3), 547–560 [consultado el 1 de julio de 2023]. ISSN 1573-1480. Disponible en: doi:10.1007/s10584-016-1706-1

TARAZONA Santos, Nicianceno Edilberto. Generación de descargas mensuales en subcuenca de la cuenca del río Santa utilizando el método de Lutz Scholz. Tesis (Ingeniero.Agrícola). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2005. 332 pp.

TRAORE Vieux Boukhaly, SAMBOU Soussou, TAMBA Séni, FALL Sidy, DIAW Amadou Tahirou y CISSE Mohamed Talla. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. American Journal of Environmental Protection. Vol. 3, No. 1, 2014, pp. 36-44. [consultado el 19 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.11648/j.ajep.20140301.15. ISSN 2328-5680

UR Rahman, Khalil et al. Hydrological evaluation of merged satellite precipitation datasets for streamflow simulation using SWAT: A case study of Potohar Plateau, Pakistan. Journal of Hydrology [en línea]. 2020, 587, 125040 [consultado el 19 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125040. ISSN 0022-1694

VASQUEZ Villanueva, A. et al. Manejo y Gestión de cuencas Hidrográficas. Lima: Fondo Editorial UNALM, 2016. 646 pp. ISBN: 9786124147555

VELÁZQUEZ Zapata J.A., DÁVILA Ortiz R. (2017) Uncertainty Related to Meteorological Data: Implications for Hydrological Modelling. Ingeniería Investigación y Tecnología, volume XVIII (issue 2), April-June. pp: 199-208.

VILLAZÓN Gómez, Mauricio e INTURIAS Guzman, Diego. Modelación hidrológica distribuida con datos satelitales a gran escala, escenarios de precipitación con datos de Tierra y TRMM. Caso de estudio: Cuenca del río Mamoré-Bolivia. [en línea]. Conferencia Nacional de Especialista en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección aplicado a Cuencas y recursos hídricos (1º:2015: La Paz). Panel [fecha de consulta: 18 de junio de 2023]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/307602370\\_Modelacion\\_hidrologica\\_distribuida\\_con\\_datos\\_satelitales\\_a\\_gran\\_escala\\_escenarios\\_de\\_precipitacion\\_con\\_datos\\_de\\_Tierra\\_y\\_TRMM\\_Caso\\_de\\_estudio\\_Cuenca\\_del\\_Rio\\_Mamore\\_-\\_Bolivia](https://www.researchgate.net/publication/307602370_Modelacion_hidrologica_distribuida_con_datos_satelitales_a_gran_escala_escenarios_de_precipitacion_con_datos_de_Tierra_y_TRMM_Caso_de_estudio_Cuenca_del_Rio_Mamore_-_Bolivia)

VILLÓN Bejar, Máximo. Hidrología. Segunda Edición. Lima: Editorial Villón, 2002. 430 pp.

WANG, Lili et al. Improving the prediction accuracy of monthly streamflow using a data-driven model based on a double-processing strategy. Journal of Hydrology [en línea]. 2019, 573, 733–745 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.jhydrol.2019.03.101. ISSN 0022-1694.

XU, Ran et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network. Journal of Geophysical Research: Atmospheres [en línea]. 2017, 122(2), 910–924 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1002/2016jd025418. ISSN 2169-897X.

YASEEN, Zaher Mundher et al. Stream-flow forecasting using extreme learning machines: A case study in a semi-arid region in Iraq. Journal of Hydrology [en línea].

2016, **542**, 603–614 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1016/j.jhydrol.2016.09.035. ISSN 0022-1694.

ZUBIETA, Ricardo et al. Potential conditions for fire occurrence in vegetation in the Peruvian Andes. *International Journal of Wildland Fire* [en línea]. 2021, 30(11), 836 [consultado el 18 de junio de 2023]. Disponible en: doi:10.1071/wf21029. ISSN 1049-8001.

# ANEXOS

## Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables

**Título:** Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Ancash-2023

**Autor:** Cordero Mescco Yazid Pedro Nilton.

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	ESCALA DE MEDICION			
<b>Variable 1</b> Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica (VI)	Según Villón (2004), toda aquella masa de agua o humedad que se condensa en la nubes y llega hasta la superficie del suelo, es denominada precipitación, de acuerdo con ello se podría identificar distintas formas de precipitación, sólida como granizo o nieve y líquida como las garúas.	La precipitación es aquella masa de agua que retorna a la superficie terrestre en estado sólido o líquido, en el proceso sufre un retorno a la atmosfera en forma de vapor de agua dando nuevamente pie al desarrollo del ciclo hidrológico.	Precipitación de sensoramiento remoto	Precipitación de Sensoramiento remoto CHIRPS	De Razón			
				Duración del evento	De intervalo			
				Frecuencia de ocurrencia	De intervalo			
			Precipitación Histórica	Precipitación medida	De Razón			
				Duración del evento	De intervalo			
				Frecuencia de ocurrencia	De intervalo			
			Modelo Hidrológico GR2m	Parámetros geomorfológicos de la cuenca	De Razón			
			<b>Variable 2</b> Caudal generado (VD)	Se define como caudal a aquellas variaciones de flujo en el tiempo en determinada ubicación de una red hidrográfica cuya importancia es de gran relevancia para la conservación y mantenimiento del ecosistema hidrológico. (Poff, et al. 1997)	El caudal natural es aquel volumen de agua que escurre en un determinado momento sobre un cauce natural o artificial	Caudal	Caudal generado por modelo GR2m	De Razón
							Parámetros del modelo hidrológico	De intervalo
Eficiencia del modelo hidrológico	De intervalo							

## Anexo 2. Matriz de consistencia

**Título:** Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Ancash-2023

**Autor:** Cordero Mescco Yazid Pedro Nilton.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Metodología
<b>Problema General:</b>	<b>Objetivo general:</b>	<b>Hipótesis general:</b>	<b>Variable 1</b> Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica (VI)	Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS	Precipitación de Sensoramiento remoto	Ficha de Registro de Datos	<b>Tipo de investigación:</b> Tipo aplicada.  <b>Enfoque de investigación:</b> Cuantitativo.  <b>El diseño de la investigación:</b> Quasi experimental.  <b>El nivel de la investigación:</b> Explicativa  <b>Población:</b> Todas las cuencas o unidades hidrográficas menores (UH) ubicadas en la cuenca de orden mayor del río Pativilca  <b>Muestra:</b> Cuenca Viconga  <b>Muestreo:</b> No probabilístico por conveniencia.
¿Cuál es la variación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando del modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Ancash-2023?	Evaluar el caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Ancash-2023	La variación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, es notable en la cuenca Viconga-Ancash-2023			Duración del evento	Ficha de Registro de Datos	
						Frecuencia de ocurrencia	
				Precipitación Histórica	Precipitación medida	Ficha de Registro de Datos	
Duración del evento	Ficha de Registro de Datos						
Frecuencia de ocurrencia	Ficha de Registro de Datos						
Modelo Hidrológico GR2m	Parámetros geomorfológicos de la cuenca	Ficha de Registro de Datos					
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos específicos:</b>	<b>Hipótesis específicas:</b>	<b>Variable 2</b> Caudal generado (VD)	Caudal	Caudal generado por modelo GR2m	Ficha de Registro de Datos	
¿En cuánto varía el caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica?	Generar caudal usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica	El caudal generado usando el modelo GR2m, mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica varía significativamente.					
¿En cuánto varían los parámetros óptimos del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, obtenidos en la calibración?	Determinar los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, obtenidos en la calibración	Los parámetros óptimos del modelo hidrológico mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica obtenidos en la calibración varían significativamente					
¿Cuál es la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica?	Conocer la eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica.	La eficiencia del modelo hidrológico GR2m mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es significativamente alta frente a la precipitación Histórica					
					Eficiencia del modelo hidrológico	Ficha de Registro de Datos	

### Anexo 3. Instrumentos de recolección de datos



#### Ficha de recolección de datos: Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica

"Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Vicosga-Ancash-2023"

Fecha: 05 de junio de 2023  
 Numero de ficha: 01

#### Parte A: Datos generales

##### Ubicación geográfica

Provincia: Cajatambo Distrito: Cajatambo Localidad: P. Vicosga

#### Parte B: Precipitación de Sensoramiento remoto CHIRPS

La precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es desarrollada por la USGS, el Centro de riesgos climáticos CHC de la Universidad de Santa Bárbara, junto al soporte de la USAID, NASA y NOAA. Enlace : <https://chc.usab.edu/data/chirps>



CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations

#### CHIRPS Background

Since 1999, USGS and CHC scientists—supported by funding from USAID, NASA, and NOAA—have developed techniques for producing rainfall maps, especially in areas where surface data is sparse.

Estimating rainfall variations in space and time is a key aspect of drought early warning and environmental monitoring. An exciting alternative to ground-based gauges is the use of satellite-based precipitation estimates from NOAA and NASA. These improved observations can remove systematic bias—a key technique in the production of the 1999 to present CHIRPS data set. The creation of CHIRPS has supported drought monitoring efforts by the USAID Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET).

La descarga de dicha información, en una escala temporal de un (01) día se realiza

desde la siguiente página, en la cual se presentan una serie de archivos tipo NetCDF en formato ".NC" con información de precipitación estimada para cada día en cada año (Enlace de descarga: [https://data.chc.usab.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/netcdf/p05/](https://data.chc.usab.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/))

El respectivo archivo ".nc" que compile todos los años de registro se puede descargar desde la base de datos global de la universidad de Columbia, desde el cual se pueden descargar una inmensa cantidad de registros de distintas variables climatológicas, para el producto CHIRPS en específico se puede emplear el siguiente enlace: <https://indl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/UCSB/CHIRPS/>

#### Parte C: Precipitación Histórica.

Los datos serán descargados directamente de la página del "Observatorio del Agua", desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y cuya página es la siguiente: <https://snirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/>.

#### Ficha de Recolección de Datos

En función del proceso de descarga de datos, se empleará la siguiente ficha de registro de datos para los registros pluviométricos descargados.

Estación:	Ocos (Código: 155105)	
Variable:	Precipitación Acumulada En 12 Horas (mm)	
Operador:	Servicio Nacional Meteorología e Hidrología	
WGS 84 Geográfico:	Latitud: -10.4 / Longitud: -77.4 / Altitud(msm): 3230	
Tipo:	Convencional / Climatológica	
Ámbito Político:	Dpto. Ancash / Prov. Ocos / Dist.: Ocos	
Ámbito Administrativo:	AAA: Cafete Fortaleza / ALA: Barranca	
Unidad Hidrográfica:	Cuenca Pativilca	
Nombre de la Fuente:		
Los datos descargados corresponden a información primaria sin control de calidad, la misma que está sujeta a variación según el criterio del operador de la estación.		
FECHA	HORA	VALOR (mm)

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [ ] No aplicable [ ]

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: James Franco David Espinoza García

Especialista: Metodólogo [ ] Temático [X]

Grado: Maestro [ ] Doctor [ ]

Título profesional: Ingeniero Civil

Nº de registro CIP: 189644

*(Signature)*  
 JAMES FRANCO DAVID ESPINOZA GARCÍA  
 R. C. N.º 128844  
 Firma y Sello



**Ficha de recolección de datos: Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica**

"Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2M, en la cuenca Yloanga-Ancash-2023"

Fecha: 05 de junio de 2023  
Numero de ficha: 01

**Parte A: Datos generales**

**Ubicación geográfica**

Provincia: **Cajatambo** Distrito: **Cajatambo** Localidad: **P. Viconga**

**Parte B: Precipitación de Sensoramiento remoto CHIRPS**

La precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es desarrollada por la USGS, el Centro de riesgos climáticos CHC de la Universidad de Santa Bárbara, junto al soporte de la USAID, NASA y NOAA. Enlace : <https://chc.ucsb.edu/data/chirps>

University of California, Santa Barbara



About People Publications Tools Data Sets Monitoring and Forecasting News Activities CHC Blog

CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations

**CHIRPS Background**

Since 1999, USGS and CHC scientists—supported by funding from USAID, NASA, and NOAA—have developed techniques for producing rainfall maps, mostly in areas where surface data is sparse. Estimating rainfall variations in space and time is a key aspect of drought early warning and environmental monitoring. An exciting alternative to normal season rain fall is provided by a historical context so that the severity of rainfall deficits can be quickly evaluated. However, estimates derived from satellite data provide even greater value because they cover the entire globe, including areas where there are no rain gauge stations. CHIRPS was created in collaboration with scientists at the USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, in order to deliver complete, reliable, up-to-date data sets for a number of early warning objectives, including analysis and monitoring drought monitoring.

Early research focused on combining models of satellite-based precipitation enhancement with reinterpolated station data. More recently, new measures of satellite observations like global satellite based precipitation estimates from NASA and NOAA have been leveraged to build high-resolution (0.25°) global precipitation estimates. When applied to satellite-based precipitation fields, these improved observations can remove systematic bias to help improve the production of the 1981 to the present CHIRPS data set. The creation of CHIRPS has supported drought monitoring efforts by the USAID Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET).

La descarga de dicha información, en una escala temporal de un (01) día se realiza

desde la siguiente página, en la cual se presentan una serie de archivos tipo NetCDF en formato ".nc" con información de precipitación estimada para cada día en cada año (Enlace de descarga: [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/netcdf/p05/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/) )

Index of /products/CHIRPS-2.0/global\_daily/netcdf/p05

Name	Last Modified	Size	Description
CHIRPS Directory			
by month	2023-06-15 13:23		
chirps-v2.0.1991.davs_v05.nc	2015-11-20 16:59	1.1G	
chirps-v2.0.1992.davs_v05.nc	2015-11-20 17:08	1.0G	
chirps-v2.0.1993.davs_v05.nc	2015-11-20 17:19	1.0G	
chirps-v2.0.1994.davs_v05.nc	2015-11-20 17:34	1.1G	
chirps-v2.0.1995.davs_v05.nc	2015-11-20 17:47	1.0G	
chirps-v2.0.1996.davs_v05.nc	2015-11-20 17:57	1.0G	
chirps-v2.0.1997.davs_v05.nc	2015-11-20 18:08	1.0G	
chirps-v2.0.1998.davs_v05.nc	2015-11-20 18:21	1.0G	
chirps-v2.0.1999.davs_v05.nc	2015-11-20 18:33	1.0G	
chirps-v2.0.1999.davs_v05.nc	2015-11-20 21:23	1.0G	
chirps-v2.0.1991.davs_v05.nc	2015-11-20 21:37	1.0G	
chirps-v2.0.1992.davs_v05.nc	2015-11-20 21:52	1.0G	
chirps-v2.0.1993.davs_v05.nc	2015-11-20 22:05	1.1G	
chirps-v2.0.1994.davs_v05.nc	2015-11-20 22:18	1.0G	
chirps-v2.0.1995.davs_v05.nc	2015-11-20 22:31	1.0G	
chirps-v2.0.1996.davs_v05.nc	2015-11-20 22:46	1.0G	
chirps-v2.0.1997.davs_v05.nc	2015-11-20 23:00	1.0G	
chirps-v2.0.1998.davs_v05.nc	2015-11-20 23:14	1.0G	
chirps-v2.0.1999.davs_v05.nc	2015-11-20 23:29	1.0G	
chirps-v2.0.2000.davs_v05.nc	2015-11-20 23:43	1.1G	
chirps-v2.0.2016.davs_v05.nc	2018-05-07 06:12	1.1G	
chirps-v2.0.2017.davs_v05.nc	2018-01-17 16:18	1.1G	
chirps-v2.0.2018.davs_v05.nc	2019-01-30 13:57	1.2G	
chirps-v2.0.2019.davs_v05.nc	2020-01-18 14:24	1.2G	
chirps-v2.0.2020.davs_v05.nc	2021-01-18 15:53	1.2G	
chirps-v2.0.2021.davs_v05.nc	2022-01-18 14:42	1.1G	
chirps-v2.0.2022.davs_v05.nc	2023-01-18 15:32	1.1G	
chirps-v2.0.2023.davs_v05.nc	2023-06-15 13:25	482M	

El respectivo archivo ".nc" que compile todos los años de registro se puede descargar desde la base de datos global de la universidad de Columbia, desde el cual se pueden descargar una inmensa cantidad de registros de distintas variables climatológicas, para el producto CHIRPS en específico se puede emplear el siguiente enlace: <https://indl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/UCSB/CHIRPS/>



**Parte C: Precipitación Histórica.**

Los datos serán descargados directamente de la página del "Observatorio del Agua", desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y cuya página es la siguiente: <https://snirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/>.



**Ficha de Recolección de Datos**

En función del proceso de descarga de datos, se empleará la siguiente ficha de registro de datos para los registros pluviométricos descargados.

<b>Estación:</b>	Drcos (Codigo: 155105)
<b>Variable:</b>	Precipitación Acumulada En 12 Horas (mm)
<b>Operador:</b>	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
<b>WGS 84 Geográficas:</b>	Latitud: -10.4 / Longitud: -77.4 / Altitud(mom): 3230
<b>Tipo:</b>	Convencional / Climática
<b>Ámbito Político:</b>	Dpto: Ancash / Prov: Drcos / Dist.: Drcos
<b>Ámbito Administrativo:</b>	AAA: Cafete Fortaleza / ALA: Barranca
<b>Unidad Hidrográfica:</b>	Cuenca Pativilca
<b>Nombre de la Fuente:</b>	

Los datos descargados corresponden a información primaria sin control de calidad, la misma que está sujeta a variación según el criterio del operador de la estación.

FECHA	HORA	VALOR (mm)

**Opinión de aplicabilidad:** Aplicable  Aplicable después de corregir  No aplicable

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: **Diego Iparraguirre Huaringa**

Especialista: Metodólogo  Temático

Grado: Maestro  Doctor

Título profesional: **Ingeniero Civil**

Nº de registro CIP: **228394**

  
Firma y Sello



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Ficha de recolección de datos: Precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e Histórica

"Evaluación del caudal generado mediante precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS e histórica, usando el modelo GR2m, en la cuenca Viconga-Ancash-2023"

Fecha: 16 de junio de 2023  
Numero de ficha: 01

Parte A: Datos generales

Ubicación geográfica

Provincia: Cajatambo Distrito: Cajatambo Localidad: P. Viconga

Parte B: Precipitación de Sensoramiento remoto CHIRPS

La precipitación de sensoramiento remoto CHIRPS es desarrollada por la USGS, el Centro de registros climáticos CHC de la Universidad de Santa Bárbara, junto al soporte de la USAID, NASA y NOAA. Enlace: <https://chc.ucsb.edu/data/chirps>

CHIRPS Background  
Since 1998, CHIRPS and CHC products are generated by combining data from USGS, NASA, and NOAA. These data are processed using a variety of techniques, including satellite-based precipitation estimates, ground-based precipitation gauges, and reanalysis data. The resulting CHIRPS products are available in a variety of formats and resolutions, and are used for a wide range of applications, including hydrological modeling, climate research, and disaster response.

La descarga de dicha información, en una escala temporal de un (01) día se realiza



desde la siguiente página, en la cual se presentan una serie de archivos tipo NetCDF en formato ".nc" con información de precipitación estimada para cada día en cada año (enlace de descarga: [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/netcdf/p05/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/))

Index of /products/CHIRPS-2.0/global\_daily/netcdf/p05

Name	Last modified	Size	Description
chirps-v2.0.1998-daily-rs05.nc	2015-11-20 16:59 1.10		
chirps-v2.0.1999-daily-rs05.nc	2015-11-20 17:08 1.00		
chirps-v2.0.2000-daily-rs05.nc	2015-11-20 17:16 1.00		
chirps-v2.0.2001-daily-rs05.nc	2015-11-20 17:34 1.10		
chirps-v2.0.2002-daily-rs05.nc	2015-11-20 17:47 1.00		
chirps-v2.0.2003-daily-rs05.nc	2015-11-20 17:54 1.00		
chirps-v2.0.2004-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:02 1.00		
chirps-v2.0.2005-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:10 1.00		
chirps-v2.0.2006-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:18 1.00		
chirps-v2.0.2007-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:26 1.00		
chirps-v2.0.2008-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:34 1.00		
chirps-v2.0.2009-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:42 1.00		
chirps-v2.0.2010-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:50 1.00		
chirps-v2.0.2011-daily-rs05.nc	2015-11-20 18:58 1.00		
chirps-v2.0.2012-daily-rs05.nc	2015-11-20 19:06 1.00		
chirps-v2.0.2013-daily-rs05.nc	2015-11-20 19:14 1.00		
chirps-v2.0.2014-daily-rs05.nc	2015-11-20 19:22 1.00		
chirps-v2.0.2015-daily-rs05.nc	2015-11-20 19:30 1.00		
chirps-v2.0.2016-daily-rs05.nc	2015-11-20 19:38 1.00		
chirps-v2.0.2017-daily-rs05.nc	2018-05-01 09:12 1.10		
chirps-v2.0.2018-daily-rs05.nc	2019-01-30 13:07 1.20		
chirps-v2.0.2019-daily-rs05.nc	2020-01-18 14:24 1.20		
chirps-v2.0.2020-daily-rs05.nc	2021-01-18 15:53 1.20		
chirps-v2.0.2021-daily-rs05.nc	2022-01-18 14:42 1.10		
chirps-v2.0.2022-daily-rs05.nc	2023-05-15 13:25 1.10		
chirps-v2.0.2023-daily-rs05.nc	2023-05-15 13:25 1.10		

El respectivo archivo ".nc" que compile todos los años de registro se puede descargar desde la base de datos global de la universidad de Columbia, desde el cual se pueden descargar una inmensa cantidad de registros de distintas variables climatológicas, para el producto CHIRPS en específico se puede emplear el siguiente enlace: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/UCSB/CHIRPS/>



Climate Data Library  
Search for data by location, date, and variable. Includes filters for data type, format, and resolution.

Parte C: Precipitación Histórica.

Los datos serán descargados directamente de la página del "Observatorio del Agua", desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y cuya página es la siguiente: <https://nirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/>.

Observatorio del Agua  
Mapa de precipitación histórica y datos de series de tiempo.



Ficha de Recolección de Datos

En función del proceso de descarga de datos, se empleará la siguiente ficha de registro de datos para los registros pluviométricos descargados.

Estación:	Ocros (Código: 155105)
Variable:	Precipitación Acumulada En 12 Horas (mm)
Operador:	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas:	Latitud: -10.4 / Longitud: -77.4 / Altitud(msnm): 3230
Tipo:	Convencional / Climática
Ámbito Político:	Dpto: Ancash / Prov: Ocros / Dist.: Ocros
Ámbito Administrativo:	AAA: Cafete Fortaleza / AIA: Barranca
Unidad Hidrográfica:	Cuenca Pativilca
Nombre de la Fuente:	
Los datos descargados corresponden a información primaria sin control de calidad, la misma que está sujeta a variación según el criterio del operador de la estación.	
FECHA	VALOR (mm)

Opinión de aplicabilidad:  Aplicable  Aplicable después de corregir  No aplicable

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: Espinosa Carhuaransa Wendy Diana

Especialista: Metodólogo  Temático

Grado: Maestro  Doctor

Título profesional: Ingeniera Civil

Nº de registro CIP: 238547



## Anexo 4. Validez

Validez	Pregunta	Puntuación		Observaciones
		0	1	
De contenido	1 ¿El instrumento persigue el fin del objetivo general?		1	
	2 ¿El instrumento persigue los fines de los objetivos específicos?		1	
	3 ¿EL número de dimensiones es adecuado?		1	
	4 ¿Hay claridad en la estructura de los instrumentos?		1	
	5 ¿Las hipótesis planteadas se contrastarán con la información recolectada en los instrumentos?		1	
De constructo	6 ¿El número de indicadores es adecuado?		1	
	7 No existe ambigüedad en los indicadores.		1	
	8 ¿Los indicadores considerados son acorde al nivel de información necesitada?		1	
	9 ¿Los indicadores miden lo que se busca investigar?		1	
	10 ¿Las dimensiones consideradas bastan para evaluar la variable?	0		
De criterio	11 ¿Los indicadores son medibles?		1	
	12 ¿Los instrumentos se comprenden con facilidad?		1	
	13 ¿Las opciones del instrumento se presentan en orden lógico?		1	
	14 ¿La secuencia planteada es adecuada?		1	
	15 No es necesario considerar otros campos.		1	
Total			14	

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Existe Suficiencia

Opinión de aplicabilidad: Aplicable  Aplicable después de corregir  No aplicable

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: James Franco David Espinoza García


Especialista: Metodólogo  Temático

Grado: Maestro  Doctor

Título profesional: Ingeniero Civil

Nº de registro CIP: 189644

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

  
James Franco David Espinoza García  
R. CIP. N° 189644  
Firma y Sello

Validez	Pregunta	Puntuación		Observaciones
		0	1	
De contenido	1 ¿El instrumento persigue el fin del objetivo general?		1	
	2 ¿El instrumento persigue los fines de los objetivos específicos?		1	
	3 ¿EL número de dimensiones es adecuado?		1	
	4 ¿Hay claridad en la estructura de los instrumentos?		1	
	5 ¿Las hipótesis planteadas se contrastarán con la información recolectada en los instrumentos?		1	
De constructo	6 ¿El número de indicadores es adecuado?		1	
	7 No existe ambigüedad en los indicadores.		1	
	8 ¿Los indicadores considerados son acorde al nivel de información necesitada?		1	
	9 ¿Los indicadores miden lo que se busca investigar?		1	
	10 ¿Las dimensiones consideradas bastan para evaluar la variable?		1	
De criterio	11 ¿Los indicadores son medibles?		1	
	12 ¿Los instrumentos se comprenden con facilidad?		1	
	13 ¿Las opciones del instrumento se presentan en orden lógico?		1	
	14 ¿La secuencia planteada es adecuada?		1	
	15 No es necesario considerar otros campos.		1	
Total			15	

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Existe Suficiencia

Opinión de aplicabilidad: Aplicable  Aplicable después de corregir  No aplicable

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: Diego Iparraguirre Huaranga

Especialista: Metodólogo  Temático

Grado: Maestro  Doctor

Título profesional: Ingeniero Civil

Nº de registro CIP: 228394

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

  
Diego Iparraguirre Huaranga  
R. CIP. N° 228394  
Firma y Sello

Validez	Pregunta	Puntuación		Observaciones
		0	1	
De contenido	1 ¿El instrumento persigue el fin del objetivo general?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	2 ¿El instrumento persigue los fines de los objetivos específicos?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	3 ¿EL número de dimensiones es adecuado?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	4 ¿Hay claridad en la estructura de los instrumentos?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	5 ¿Las hipótesis planteadas se contrastarán con la información recolectada en los instrumentos?		<input checked="" type="checkbox"/>	
De constructo	6 ¿El número de indicadores es adecuado?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	7 No existe ambigüedad en los indicadores.		<input checked="" type="checkbox"/>	
	8 ¿Los indicadores considerados son acorde al nivel de información necesitada?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	9 ¿Los indicadores miden lo que se busca investigar?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	10 ¿Las dimensiones consideradas bastan para evaluar la variable?		<input checked="" type="checkbox"/>	
De criterio	11 ¿Los indicadores son medibles?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	12 ¿Los instrumentos se comprenden con facilidad?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	13 ¿Las opciones del instrumento se presentan en orden lógico?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	14 ¿La secuencia planteada es adecuada?		<input checked="" type="checkbox"/>	
	15 No es necesario considerar otros campos.		<input checked="" type="checkbox"/>	
Total			<input checked="" type="checkbox"/>	

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Es suficiente

Opinión de aplicabilidad: Aplicable  Aplicable después de corregir  No aplicable

Apellidos y nombre(s) del juez evaluador: Espinoza Cerbasi me Wendy Dávila

Especialista: Metodólogo  Temático

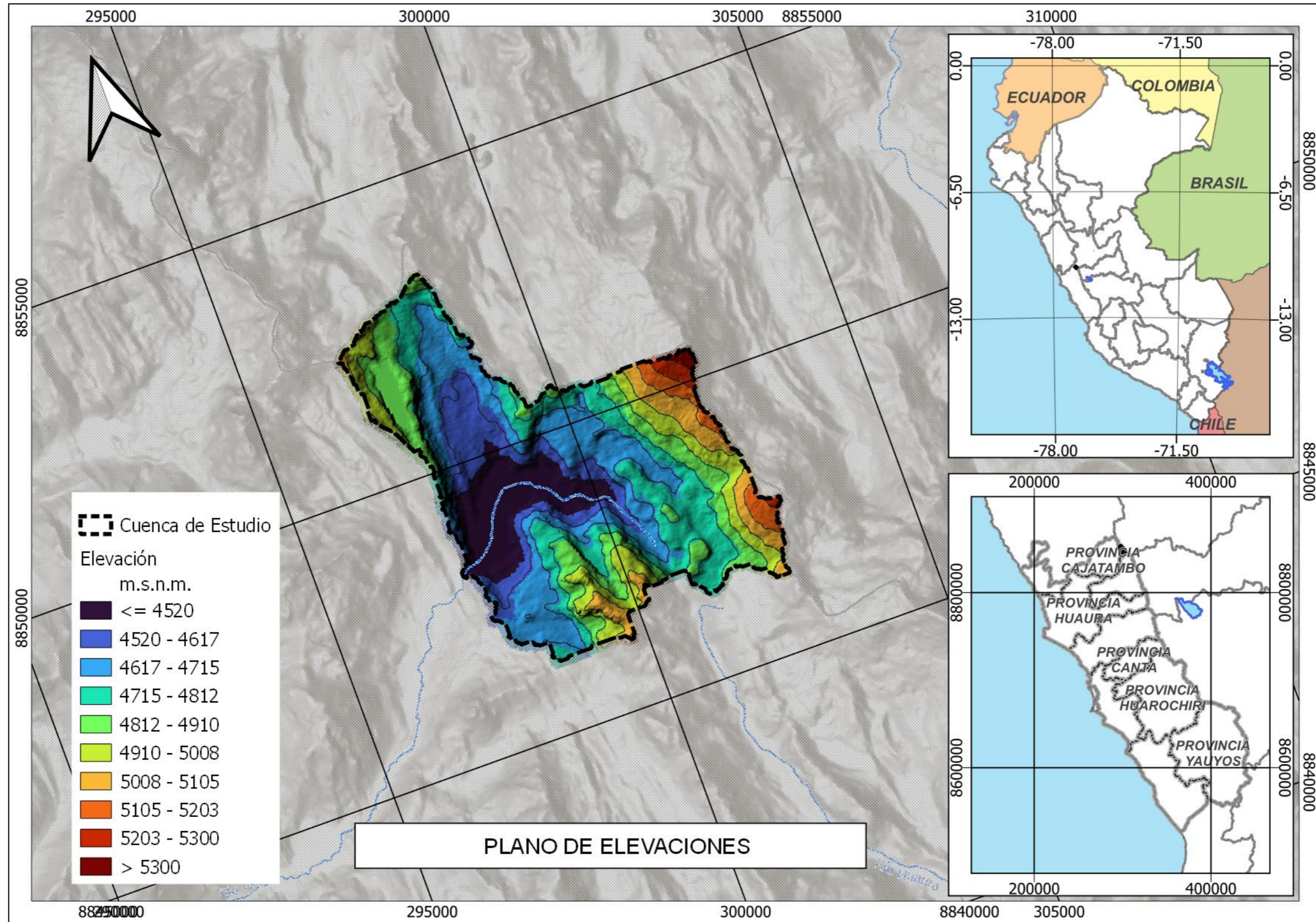
Grado: Maestro  Doctor

Título profesional: Ingeniero Civil

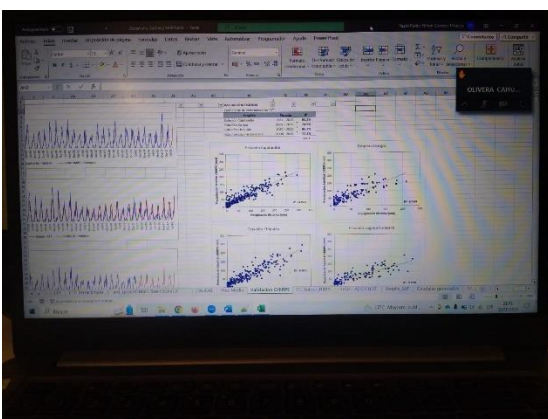
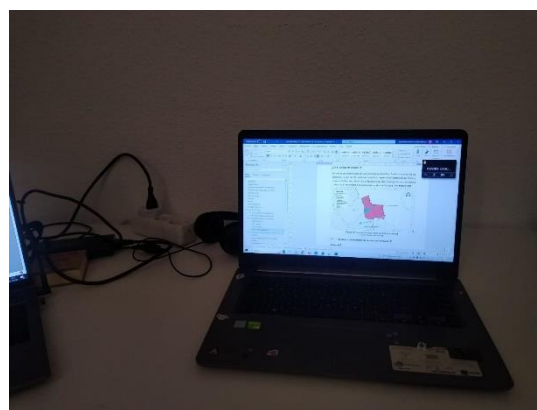
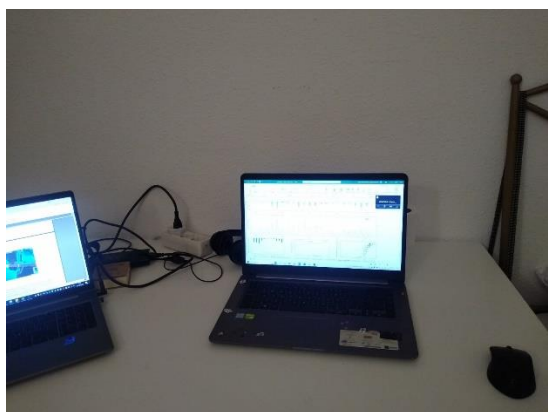
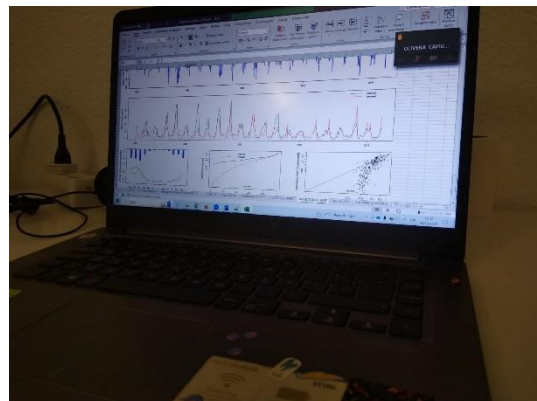
Nº de registro CIP: 738147

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

  
W. Darío Espinoza Cerbasi  
INGENIERO CIVIL  
CIP. N° 738147  
Firma y Sello



## Anexo 6. Panel fotográfico



# Anexo 8: Hoja de Cálculo.

Utilisation de GRAJ sous Excel

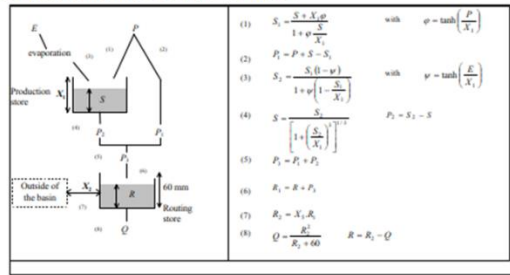
**Application du modèle pluie-débit mensuel GR2M sous Excel**  
 Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Antony  
 Contacts : Charles Perrin (charles.perrin@inrae.fr), Vazken Andréassian (vazken.andreassian@inrae.fr)  
 Version 1.0  
 Octobre 2005  
**Avertissement:** Application proposée à des fins pédagogiques  
**Les résultats obtenus à partir de cette application sont de l'entière responsabilité de l'utilisateur**

## Lire les instructions ci-dessous avant utilisation

### Introduction

La feuille "GR2M" permet de faire des simulations de débit au pas de temps mensuel à l'aide du modèle GR2M (voir schéma ci-dessous). La version utilisée ici est celle présentée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006). On se référera à ces documents pour avoir plus de détails sur ce modèle.

Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENVRFP, Cemagref Antony, France, 323 pp.  
 Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. J. Hydrol., 318, 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.014.



### Données à rentrer

- Pour une utilisation sur un bassin donné, l'utilisateur doit remplir les cellules en jaune avec les données suivantes:
- les valeurs transformées des deux paramètres (cellules D12 et D13): ce sont en fait les valeurs réelles des cellules E12 et E13 qui sont utilisées dans les calculs; les transformations appliquées sont données par les formules des cellules E12 et E13;
- l'utilisation des valeurs transformées est plus commode pour le cas où l'on optimise les paramètres par le solveur;
- les valeurs initiales des taux de remplissage des deux réservoirs (cellules E16 et E17): l'effet d'une mauvaise initialisation de ces états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une année de mise en route;
- la longueur de la période de mise en route (cellule E20). Un minimum d'une année complète (12 mois) est généralement conseillé;
- le nombre de pas de temps (cellule E21) sur lesquels les critères d'efficacité seront calculés;
- les chroniques de pluie (mm), ETP (mm), débit (mm) (cellules A40:D40 et suivantes, chaque ligne représentant un mois);
- La pluie et l'ETP sont utilisées comme entrées du modèle. Le débit est utilisé pour le calage des paramètres et l'évaluation des performances.

La convention adoptée pour les lacunes est une valeur négative.

La période de simulation choisie doit être exempte de lacunes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, des lacunes dans les débits n'étant, elles, pas gênantes.

Charles Perrin  
R.C.P. N° 120544

Utilisation de GRAJ sous Excel

Rq: les pluies correspondent aux pluies moyennes de bassin, éventuellement issue d'une moyenne de plusieurs postes

### Simulations

Le tableur calcule à chaque pas de temps des différents états internes du modèle (cellules F40 à O40 et suivantes) et le débit (cellule P40). L'unité adoptée est le mm.

Rq: les formules de la ligne 40 (qui prend en compte les valeurs initiales S0 et R0 des niveaux des réservoirs - cellules E16 et E17) diffèrent de celles de la ligne 41 et suivantes (qui doivent être identiques). Il faut recopier les formules de la ligne 41 sur les lignes suivantes avant de fois que nécessaire pour réaliser la simulation sur toute la période.

### Critères d'efficacité

Quatre critères d'efficacité sont calculés pour juger de la qualité des simulations (cellules E32 à E35):

- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits
- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits
- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits
- critère de bilan

Le calcul de ces critères exclut les résultats sur les n premiers pas de temps (cellule E20) réservés pour la mise en route du modèle (l'effet d'une mauvaise initialisation de ces états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une période de mise en route).

**Important:** Le calcul du critère s'adapte à la longueur de la période choisie (cellule E21)

### Optimisation

Les valeurs des paramètres du modèle peuvent être optimisées en utilisant la fonction "Solveur" d'Excel (disponible dans le menu Outils. Si le solveur n'est pas installé, aller dans Outils/Macro complémentaires et cocher la fonction Solveur).

Dans "Cellule cible à définir", on pourra choisir comme fonction objectif l'un des critères de Nash mentionnés ci-dessus, suivant l'application à laquelle on s'intéresse, et on le maximisera (le critère de Bilan seul n'est pas un bon critère d'optimisation).

Dans "Cellules variables", on choisira les valeurs transformées des paramètres, c'est-à-dire les cellules D12 et D13.

En début d'optimisation, on pourra choisir les valeurs initiales suivantes pour les paramètres transformés: x1=0, x2=1

**Nota: la méthode d'optimisation utilisée dans le solveur n'a pas fait l'objet de tests préalables particuliers de fiabilité, pour ce modèle. Garder un œil critique sur les résultats de l'optimisation.**

### Graphiques

Quatre graphiques sont donnés pour illustrer les résultats du modèle:

- feuille "S": donne l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production;
- feuille "R": donne l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage;
- feuille "Hydrogrammes": permet de visualiser les chroniques de débits observés et simulés;
- feuille "Débit XY": compare les débits observés et les débits simulés (pour une bonne comparaison, on veillera à avoir les mêmes gammes d'échelle en abscisse et en ordonnée).

Charles Perrin  
R.C.P. N° 120544

### Modèle pluie-débit mensuel GR2M (version Mouelhi et al., 2006)

(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules F41 à AE41 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	La Seine à Paris Austerlitz	
Superficie du bassin (km <sup>2</sup> )	43800	
Paramètres modèle	Transf	Réels
	x1: Capacité rés. production (mm)	6.48
x2: Paramètre d'échange (mm)	0.80	0.80
Valeurs initiales		
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)		325.35
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)		30
Période		
Longueur de la période de mise en route (mois)		12
Durée de la période test (mois)		50
Date de départ		01/1991
Date de fin		01/1900

Moyenne des pluies observées (mm/mois)	58.4
Moyenne des ETP observées (mm/mois)	59.3
Moyenne des débits observés (mm/mois)	12.3
Moyenne des racines des débits observés	3.3
Moyenne des log des débits observés	2.3

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	73.3
Nash(VQ)	76.3
Nash(N(Q))	72.6
Bilan	96.2

Variables du modèle											Débit observé
S1	P1	S2	S	P2	P3	R1	F	R2	R		
191.50	14.82	294.97	207.81	17.26	22.14	57.34	-1.33	48.91	27.34	22.50	
191.50	9.40	343.68	328.33	15.30	20.88	63.30	-10.92	42.97	24.07	17.80	
191.50	17.62	314.66	303.82	11.04	30.66	63.93	-10.97	42.86	25.03	17.62	
191.50	8.12	289.66	284.38	5.28	13.40	38.44	-7.89	30.85	20.37	10.47	
191.50	18.21	247.97	243.06	4.41	22.62	43.00	-8.49	34.61	21.91	12.60	
191.50	6.17	201.49	199.54	1.90	8.12	30.03	-5.83	24.10	17.19	6.91	
191.50	8.94	196.46	188.60	1.57	8.11	25.30	-5.02	20.31	16.17	5.13	
191.50	6.41	197.15	195.35	1.79	7.20	22.38	-4.42	17.98	13.82	4.14	
191.50	12.70	206.83	211.59	8.24	17.54	31.56	-6.23	25.53	17.81	7.52	
191.50	14.88	205.19	205.36	0.82	24.71	42.62	-8.39	34.12	21.76	12.37	
191.50	24.21	189.86	192.23	17.72	41.83	63.88	-12.87	51.11	27.60	23.81	
191.50	21.91	178.06	180.62	22.04	43.95	71.50	-14.13	57.42	29.34	26.08	
191.50	8.93	190.91	182.45	16.46	27.39	56.74	-11.20	46.53	25.69	16.65	
191.50	17.00	145.01	139.19	15.81	32.61	68.50	-11.65	48.56	25.34	20.61	
191.50	12.19	104.97	105.17	8.80	21.66	49.29	-8.63	39.73	23.64	15.21	
191.50	3.61	241.88	237.89	3.89	7.91	31.15	-6.15	25.00	17.66	7.35	
191.50	12.85	128.28	122.02	3.09	16.64	32.69	-6.65	27.04	18.64	8.40	
191.50	8.33	188.41	185.07	1.84	10.17	28.81	-5.89	23.12	16.69	6.43	
191.50	3.02	170.22	169.02	1.00	4.02	20.71	-4.09	16.62	13.01	3.60	
191.50	7.12	197.81	195.80	1.81	8.83	21.94	-4.33	17.81	13.81	4.00	
191.50	6.67	221.77	218.91	2.86	8.52	22.13	-4.57	17.78	13.71	4.08	
191.50	14.15	285.40	277.88	7.91	21.76	35.47	-7.00	28.47	19.31	9.19	
191.50	11.75	214.40	203.40	11.00	22.78	42.06	-6.31	33.78	21.60	12.15	
191.50	3.00	308.40	298.48	9.90	13.08	34.88	-6.85	27.83	19.01	8.82	
191.50	10.82	137.43	136.01	11.41	22.23	41.25	-6.14	33.10	21.33	11.77	
191.50	19.26	125.76	113.18	12.89	31.85	53.18	-10.00	42.68	24.64	17.74	
191.50	11.80	293.50	288.04	8.47	20.45	45.59	-6.66	36.43	22.67	13.78	
191.50	10.73	254.22	249.35	4.80	15.80	38.28	-7.56	30.71	20.31	10.40	
191.50	12.23	220.75	220.48	3.29	15.91	35.62	-7.17	29.75	19.43	9.21	
191.50	9.42	203.83	201.88	2.05	11.47	30.91	-6.10	24.81	17.50	7.29	
191.50	11.10	210.44	208.00	2.34	13.40	31.62	-6.12	24.88	17.68	7.29	
191.50	5.22	207.31	205.12	2.10	7.40	24.60	-4.83	20.08	15.03	6.22	
191.50	13.75	285.11	282.89	7.72	18.47	34.60	-6.81	27.60	18.66	8.74	
191.50	26.82	145.83	130.08	16.76	44.27	62.22	-12.48	60.74	27.60	23.25	
191.50	15.81	381.52	342.84	18.98	34.48	61.07	-12.24	48.74	27.19	22.84	

Charles Perrin  
R.C.P. N° 120544

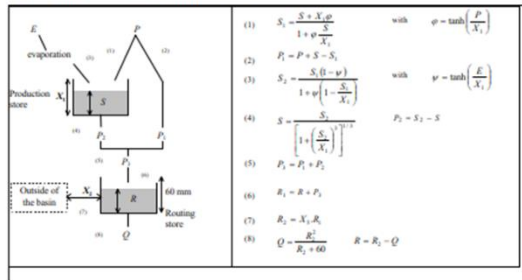
Application du modèle pluie-débit mensuel GR2M sous Excel  
 Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Antony  
 Contacts: Charles Perrin (charles.perrin@inrae.fr), Vazken Andréassian (vazken.andreassian@inrae.fr)  
 Version 1.0  
 Octobre 2006

Avertissement: Application proposée à des fins pédagogiques  
 Les résultats obtenus à partir de cette application sont de l'entière responsabilité de l'utilisateur

**Lire les instructions ci-dessous avant utilisation**

**Introduction**

La feuille "GR2M" permet de faire des simulations de débit au pas de temps mensuel à l'aide du modèle GR2M (voir schéma ci-dessous). La version utilisée ici est celle présentée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006). On se référera à ces documents pour avoir plus de détails sur ce modèle.  
 Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.  
 Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. J. Hydrol., 318, 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.1008.1014.



**Données à rentrer**

Pour une utilisation sur un bassin donné, l'utilisateur doit remplir les cellules en jaune avec les données suivantes:  
 - les valeurs transformées des deux paramètres (cellules D12 et D13); ce sont en fait les valeurs réelles des cellules E12 et E13 qui sont utilisées dans les calculs; les transformations appliquées sont données par les formules des cellules E12 et E13;  
 - l'utilisation des valeurs transformées est plus commode pour le cas où l'on optimise les paramètres par le solveur;  
 - les valeurs initiales des taux de remplissage des deux réservoirs (cellules E16 et E17); l'effet d'une mauvaise initialisation de ces états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une année de mise en route;  
 - la longueur de la période de mise en route (cellule E20). Un minimum d'une année complète (12 mois) est généralement conseillé;  
 - le nombre de pas de temps (cellule E21) sur lesquels les critères d'efficacité seront calculés;  
 - les chroniques de pluie (mm), ETP (mm), débit (mm) (cellules A40-D40 et suivantes, chaque ligne représentant un mois); La pluie et l'ETP sont utilisées comme entrées du modèle. Le débit est utilisé pour le calage des paramètres et l'évaluation des performances.  
 La convention adoptée pour les lacunes est une valeur négative.  
 La période de simulation choisie doit être exempte de lacunes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, des lacunes dans les débits n'étant, elles, pas gênantes.

*Signature*  
 OUIDO GLEVER  
 INGENIEUR CIVIL  
 Reg. CIP N° 22894

*Signature*  
 OUIDO GLEVER  
 INGENIEUR CIVIL  
 Reg. CIP N° 22894

**Modèle pluie-débit mensuel GR2M (version Mouelhi et al., 2006)**

(R: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules F41 à AE14 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	La Seine à Paris Austerlitz	
Superficie du bassin (km²)	43800	
Paramètres modèle	Transf.	Reels
x1: Capacité rés. production (mm)	6.48	650.70
x2: Paramètre d'échange (mm)	0.80	0.80
Valeurs initiales		
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)	325.36	
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 80 mm)	30	
Periode		
Longueur de la période de mise en route (mois)	12	
Durée de la période test (mois)	50	
Date de départ	01/1991	
Date de fin	01/1993	
Moyenne des pluies observées (mm/mois)	58.4	
Moyenne des ETP observées (mm/mois)	59.3	
Moyenne des débits observés (mm/mois)	12.3	
Moyenne des racines des débits observés	3.3	
Moyenne des log des débits observés	2.3	
Critères d'efficacité (%)		
Nash(Q)	73.3	
Nash(VQ)	76.3	
Nash(ln(Q))	76.2	
Bilan	92.6	

Variables du modèle											
S1	P1	S2	S	P2	P3	R1	F	R2	R	Débit simulé	Débit observé
488.10	14.82	294.11	327.41	6.48	0.80	325.36	30	12	50	01/1991	01/1993
376.00	5.49	343.68	325.29	15.19	13.88	63.50	-10.52	42.77	24.97	17.80	
371.21	17.52	314.66	303.82	11.04	28.56	53.83	-10.57	42.96	25.03	17.92	
320.75	8.12	259.69	254.38	5.26	13.40	38.44	-7.59	30.85	20.27	10.47	
328.61	18.21	247.97	243.56	4.41	22.62	43.00	-8.49	34.51	21.91	12.80	
278.00	6.17	201.49	189.54	1.96	8.12	30.03	-5.80	24.10	17.19	6.61	
247.99	6.54	190.46	189.90	1.97	8.11	25.30	-5.00	20.31	15.17	5.13	
234.34	5.41	197.15	195.35	1.79	7.20	22.38	-4.42	17.96	13.82	4.14	
277.37	12.70	256.63	251.56	6.04	17.74	31.56	-6.23	25.33	17.81	7.52	
314.67	14.88	305.10	295.36	9.83	24.71	42.52	-8.39	34.12	21.75	12.37	
364.50	24.21	356.66	339.23	17.72	41.83	62.88	-12.57	51.11	27.80	23.51	
387.33	21.91	378.68	356.82	22.04	43.95	71.55	-14.13	57.42	29.34	26.08	
375.88	8.93	360.91	342.45	16.48	27.39	56.74	-11.20	45.53	28.89	19.65	
380.41	17.00	345.01	329.38	10.81	32.91	66.50	-11.85	46.65	26.34	20.81	
360.41	12.15	304.97	295.17	9.80	21.95	48.29	-8.53	38.75	23.54	15.21	
328.35	3.81	241.68	237.66	3.99	7.81	31.15	-6.15	25.00	17.65	7.35	
300.00	12.95	228.28	223.20	3.09	16.04	33.89	-6.85	27.04	18.64	8.40	
272.06	8.33	198.41	198.57	1.84	10.17	28.81	-5.69	23.12	16.69	6.43	
222.61	3.02	170.02	169.02	1.00	4.02	20.71	-4.09	16.62	13.01	3.80	
234.87	7.12	197.81	195.80	1.81	8.93	21.64	-4.33	17.61	13.81	4.00	
240.33	6.87	221.77	218.91	2.85	8.92	32.13	-4.37	17.78	13.71	4.08	
294.54	14.15	285.49	277.88	7.61	21.78	35.47	-7.00	28.47	19.31	9.16	
321.35	11.75	314.40	303.40	11.00	32.78	42.06	-8.31	33.78	21.60	12.15	
314.04	3.09	306.46	298.48	9.98	13.08	34.68	-8.85	27.83	18.01	8.82	
331.95	16.82	317.43	306.01	11.41	22.23	41.25	-8.14	33.10	21.33	11.77	
321.35	11.75	314.40	303.40	11.00	32.78	42.06	-8.31	33.78	21.60	12.15	
347.59	11.99	293.50	285.04	8.47	20.45	45.39	-8.96	36.43	22.67	13.76	
323.29	10.73	254.22	246.35	4.86	18.60	38.28	-7.56	30.71	20.31	10.40	
304.28	12.23	229.75	226.48	3.28	15.51	35.82	-7.07	28.75	19.43	9.31	
278.11	9.42	203.03	201.88	2.05	11.47	30.01	-6.10	24.81	17.58	7.38	
273.12	11.10	210.94	208.80	2.34	13.49	31.00	-6.12	24.88	17.58	7.29	
245.99	5.32	207.31	205.12	2.19	7.40	24.89	-4.80	20.06	15.03	5.62	
285.34	13.75	285.11	280.38	5.72	19.47	34.50	-8.81	27.69	18.65	8.74	
356.13	28.52	345.83	330.08	15.75	44.27	63.22	-12.48	50.74	27.49	22.25	
368.12	15.91	361.02	342.04	10.58	34.48	61.97	-12.42	48.74	27.19	22.54	

*Signature*  
 OUIDO GLEVER  
 INGENIEUR CIVIL  
 Reg. CIP N° 22894

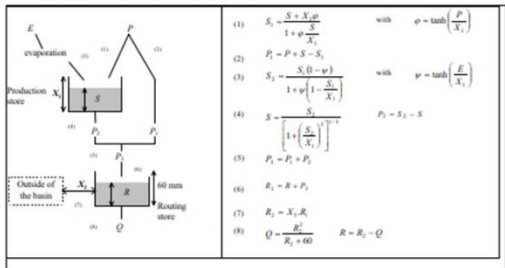
**Application du modèle pluie-débit mensuel GR2M sous Excel**  
 Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Antony  
 Contacts : Charles Perrin (charles.perrin@irrae.fr), Vazken Andréassian (vazken.andreassian@irrae.fr)  
 Version 1.0  
 Octobre 2006

**Avertissement: Application proposée à des fins pédagogiques**  
 Les résultats obtenus à partir de cette application sont de l'entière responsabilité de l'utilisateur

**Lire les instructions ci-dessous avant utilisation**

**Introduction**

La feuille "GR2M" permet de faire des simulations de débit au pas de temps mensuel à l'aide du modèle GR2M (voir schéma ci-dessous). La version utilisée ici est celle présentée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006). On se référera à ces documents pour avoir plus de détails sur ce modèle.  
 Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat. ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.  
 Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. J. Hydrol., 318, 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.1006.1014.



**Données à rentrer**

- Pour une utilisation sur un bassin donné, l'utilisateur doit remplir les cellules en jaune avec les données suivantes:
- les valeurs transformées des deux paramètres (cellules D12 et D13); ce sont en fait les valeurs réelles des cellules E12 et E13 qui sont utilisées dans les calculs; les transformations appliquées sont données par les formules des cellules E12 et E13;
- l'utilisation des valeurs transformées est plus commode pour le cas où l'on optimise les paramètres par le solveur;
- les valeurs initiales des taux de remplissage de deux réservoirs (cellules E10 et E17); l'effet d'une mauvaise initialisation de ces états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une année de mise en route;
- la longueur de la période de mise en route (cellule E20). Un minimum d'une année complète (12 mois) est généralement conseillé.
- le nombre de pas de temps (cellule E21) sur lesquels les critères d'efficacité seront calculés;
- les chroniques de pluie (mm), ETP (mm), débit (mm) (cellules A40:D40 et suivantes, chaque ligne représentant un mois); La pluie et l'ETP sont utilisées comme entrées du modèle. Le débit est utilisé pour le calage des paramètres et l'évaluation des performances.
- la convention adoptée pour les lacunes est une valeur négative.
- la période de simulation choisie doit être exempte de lacunes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, des lacunes dans les débits n'étant, elles, pas gênantes.



(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules F41 à AE41 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	La Seine à Paris Austerlitz	
Superficie du bassin (km²)	43800	

Paramètres modél.	Transf.	Réels
x1: Capacité res. production (mm)	6.48	650.70
x2: Paramètre d'échange (mm)	0.80	0.80

Valeurs initiales	
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)	325.35
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)	30

Période	
Longueur de la période de mise en route (mois)	12
Durée de la période test (mois)	50
Date de départ	01/1991
Date de fin	01/1900

Moyenne des pluies observées (mm/mois)	58.4
Moyenne des ETP observées (mm/mois)	59.3
Moyenne des débits observés (mm/mois)	12.3
Moyenne des racines des débits observés	3.3
Moyenne des log des débits observés	2.3

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	73.3
Nash(VQ)	76.3
Nash(ln(Q))	72.6
Bilan	96.2

**Simulations**

Le tableau calculé à chaque pas de temps les différents états internes du modèle (cellules F40 à O40 et suivantes) et le débit (cellule P40). L'unité adoptée est le mm.

Rq: les formules de la ligne 40 (qui prend en compte les valeurs initiales S0 et R0 des niveaux des réservoirs - cellules E10 et E17) diffèrent de celles de la ligne 41 et suivantes (qui doivent être identiques). Il faut recopier les formules de la ligne 41 sur les lignes suivantes autant de fois que nécessaire pour réaliser la simulation sur toute la période.

**Critères d'efficacité**

Quatre critères d'efficacité sont calculés pour juger de la qualité des simulations (cellules E32 à E35):

- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits
- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits
- critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits
- critère de bilan

Le calcul de ces critères exclut les résultats sur les n premiers pas de temps (cellule E20) réservés pour la mise en route du modèle (l'effet d'une mauvaise initialisation de ces états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une période de mise en route).

Important: Le calcul du critère s'adapte à la longueur de la période choisie (cellule E21)

**Optimisation**

Les valeurs des paramètres du modèle peuvent être optimisées en utilisant la fonction "Solveur" d'Excel (disponible dans le menu Outils). Si le solveur n'est pas installé, aller dans Outils/Macro complémentaires et cocher la fonction Solveur.

Dans "Cellule cible à définir", on pourra choisir comme fonction objectif l'un des critères de Nash mentionnés ci-dessus, suivant l'application à laquelle on s'intéresse, et on le maximisera (le critère de Bilan seul n'est pas un bon critère d'optimisation).

Dans "Cellules variables", on choisira les valeurs transformées des paramètres, c'est-à-dire les cellules D12 et D13. En début d'optimisation, on pourra choisir les valeurs initiales suivantes pour les paramètres transformés: x1=6, x2=1

**Nota: la méthode d'optimisation utilisée dans le solveur n'a pas fait l'objet de tests préalables particulières de fiabilité pour ce modèle. Garder un œil critique sur les résultats de l'optimisation.**

**Graphiques**

- Quatre graphiques sont donnés pour illustrer les résultats du modèle:
- feuille "S": donne l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production;
- feuille "R": donne l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage;
- feuille "Hydrogrammes": permet de visualiser les chroniques de débits observés et simulés;
- feuille "Débit XY": compare les débits observés et les débits simulés (pour une bonne comparaison, on veillera à avoir les mêmes gammes d'échelle en abscisse et en ordonnée).

Variables du modèle												
S1	P1	S2	S	P2	P3	R1	F	R2	R	DEBIT	DEBIT simulé	
1991	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1992	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1993	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1994	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1995	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1996	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1997	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1998	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
1999	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2000	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2001	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2002	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2003	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2004	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2005	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2006	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2007	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2008	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2009	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2010	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2011	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2012	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2013	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2014	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2015	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2016	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2017	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2018	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2019	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	
2020	14.80	164.41	197.61	17.38	12.48	61.18	19.38	48.89	17.24	21.60	19.60	