

Tipo de artículo: Investigación

<https://doi.org/10.47460/uct.v28i124.841>

Generación de caudales medios mensuales mediante el modelo Gr2m para el análisis de tendencia

Yulissa Zorrilla Marcos
<https://orcid.org/0000-0002-5521-9101>
202112973@urp.edu.pe
Universidad Ricardo Palma
Lima-Perú

Elizabeth Clotilde Panana Holgado
<https://orcid.org/0009-0000-2758-7874>
epananah@unasam.edu.pe
Universidad Santiago Antúnez de Mayolo
Lima-Perú

Jeiner Eloy Solorzano Poma
<https://orcid.org/0000-0002-1312-0867>
jsolorzanop@unasam.edu.pe
Universidad Santiago Antúnez de Mayolo
Lima-Perú

David Minaya Huerta
<https://orcid.org/0009-0008-6619-0114>
dminayah@unasam.edu.pe
Universidad Santiago Antúnez de Mayolo
Lima-Perú

Luis Teodosio Javier Cabana
<https://orcid.org/0000-0003-4403-888X>
ljavierc@unasam.edu.pe
Universidad Santiago Antúnez de Mayolo
Lima-Perú

Julio César Coral Jamanca
<https://orcid.org/0009-0006-1081-2629>
jcoralj@unasam.edu.pe
Universidad Santiago Antúnez de Mayolo
Lima-Perú

*Autor de correspondencia: 202112973@urp.edu.pe

Recibido (03/06/2023), Aceptado (23/07/2024)

Resumen: El objetivo de este artículo es analizar la tendencia de los caudales medios mensuales en las cuencas de Chicama, Moche y Santa. La investigación se enmarca en un enfoque descriptivo y explicativo, con un diseño experimental, longitudinal y prospectivo. Los datos climáticos se recopilieron utilizando el software R (versión 3.6.3) a partir de las bases de datos grilladas de precipitación (PISCO V2.0) y temperatura (PISCO V1.0) desarrolladas por el SENAMHI. Se determinaron las ubicaciones de las estaciones mediante coordenadas geográficas específicas para cada cuenca. Esta información sirvió como variable de entrada para la simulación de caudales empleando el modelo GR2M. Los caudales simulados fueron utilizados para analizar la tendencia mediante las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y Free Cusum. El modelo hidrológico GR2M mostró una eficiencia catalogada como buena en cada una de las cuencas estudiadas, lo que sugiere una adecuada precisión en las simulaciones durante las etapas de calibración y validación.

Palabras clave: caudales, ciclo hidrológico, cuenca hidrológica.

Generation of monthly mean flows using the Gr2m model for trend analysis

Abstract.- This paper analyzes the monthly mean flow trend in the Chicama, Moche, and Santa basins. The research is framed in a descriptive and explanatory approach, with an experimental, longitudinal, and prospective design. The climatic data were collected using R software (version 3.6.3) from the gridded databases of precipitation (PISCO V2.0) and temperature (PISCO V1.0) developed by SENAMHI. Station locations were determined using specific geographic coordinates for each basin. This information served as an input variable for the flow simulation using the GR2M model. The simulated flows were used for trend analysis using the Mann-Kendall and Free Cusum nonparametric tests. The GR2M hydrologic model showed an efficiency rated as "Good" in each of the basins studied, suggesting adequate simulation accuracy during the calibration and validation stages.

Keywords: flows, hydrological cycle, hydrological basin.



I. INTRODUCCIÓN

En el contexto hidrológico peruano, la disparidad en la disponibilidad de datos sobre caudales de cuencas es un problema persistente, especialmente en ciertas regiones del país. Esta situación se evidencia claramente en la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), donde se observa una concentración de registros en algunas zonas en detrimento de otras. Esta carencia de datos ha motivado a numerosos especialistas a desarrollar soluciones que permitan superar las limitaciones impuestas por la falta de información, siendo el modelo hidrológico GR2M una de las respuestas más destacadas a esta problemática. Desarrollado por el Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia (CEMAGREF), el modelo GR2M se caracteriza por su capacidad de generar caudales mensuales utilizando solo dos parámetros principales: la capacidad de almacenamiento del reservorio y el coeficiente de intercambios de aguas subterráneas. Estos parámetros, en combinación con datos de precipitación y evapotranspiración, permiten una modelación efectiva incluso en cuencas con datos limitados, al aprovechar la homogeneidad de los procesos hidrológicos, ya sean observados o simulados.

El cambio climático global, manifestado a través de fenómenos climáticos inusuales en los últimos años, ha intensificado el interés en estudiar la tendencia de variables hidroclimáticas como la precipitación, la temperatura y el caudal de los ríos. Estos cambios tienen un impacto significativo en la disponibilidad y distribución de los recursos hídricos, lo que hace esencial la aplicación de modelos hidrológicos que puedan prever estas variaciones. En este contexto, la aplicación del modelo GR2M en cuencas de la vertiente del Pacífico ha mostrado resultados prometedores, demostrando su utilidad en la evaluación de la tendencia de los caudales en respuesta a la variabilidad climática.

La presente investigación tiene como objetivo determinar las tendencias de los caudales medios mensuales generados con el modelo hidrológico GR2M en las cuencas de Chicama, Moche y Santa, utilizando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Esta metodología permitirá identificar la existencia de tendencias significativas en los caudales simulados, proporcionando información valiosa para la gestión de los recursos hídricos en estas regiones. La investigación se enmarca en la necesidad de desarrollar herramientas robustas que permitan enfrentar los desafíos impuestos por el cambio climático y la escasez de datos hidrológicos, contribuyendo al fortalecimiento de la capacidad de adaptación de las cuencas a las condiciones climáticas futuras.

II. DESARROLLO

A. Fundamentos teóricos

El ciclo hidrológico, también conocido como ciclo del agua, es el proceso continuo de circulación del agua en la Tierra a través de diferentes compartimentos, incluyendo la atmósfera, la superficie terrestre, y el subsuelo. Este ciclo es fundamental para mantener el equilibrio hídrico del planeta y es impulsado principalmente por la energía solar. Las fases del ciclo hidrológico son las siguientes:

1. **Evaporación:** Es el proceso mediante el cual el agua se transforma de estado líquido a gaseoso (vapor de agua) debido al calor del sol. Esta evaporación ocurre principalmente en los océanos, mares, ríos, y lagos, pero también a partir del suelo y la vegetación (evapotranspiración).
2. **Condensación:** El vapor de agua en la atmósfera se enfría y se condensa para formar nubes y, eventualmente, gotas de agua líquida o cristales de hielo.
3. **Precipitación:** Cuando las gotas de agua en las nubes se agrupan y se vuelven lo suficientemente pesadas, caen a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo o aguanieve. La precipitación es la principal forma en que el agua regresa a la Tierra desde la atmósfera.

4. Infiltración: Parte del agua que cae como precipitación se infiltra en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos. Esta agua subterránea puede almacenar y liberar agua de manera más lenta que los ríos y lagos, y es una fuente importante de agua dulce para el consumo humano.

5. Escorrentía superficial: El agua que no se infiltra en el suelo fluye sobre la superficie terrestre, moviéndose a través de ríos, arroyos y eventualmente hacia océanos o lagos. Este proceso es esencial para el transporte de agua a lo largo de la superficie terrestre y contribuye a la erosión y la formación de paisajes.

6. Transpiración: Las plantas absorben agua a través de sus raíces y la liberan a la atmósfera a través de sus hojas. Este proceso es similar a la evaporación y juega un papel importante en el ciclo del agua.

7. Sublimación: Es el proceso en el cual el hielo o la nieve se convierten directamente en vapor de agua sin pasar por el estado líquido. Esto ocurre principalmente en las regiones polares y en las cumbres de montañas altas.

El ciclo hidrológico es un sistema cerrado, lo que significa que la cantidad total de agua en la Tierra permanece constante, aunque su distribución y estado cambian continuamente. Este ciclo es vital para todos los ecosistemas y para la vida en la Tierra, ya que regula el clima, distribuye nutrientes, y provee agua dulce, que es esencial para la vida. En la figura 1 se presenta el ciclo hidrológico, donde se puede observar que se trata de un proceso cerrado.



Fig. 1. Ciclo hidrológico

B. El modelo GR2m

El modelo GR2M es un modelo hidrológico mensual desarrollado para simular los caudales de ríos en cuencas hidrográficas, especialmente en regiones donde la disponibilidad de datos es limitada. Se trata de un modelo conceptual de tipo "caja negra", lo que significa que no requiere una descripción detallada de los procesos físicos internos de la cuenca. En lugar de eso, el GR2M simplifica la modelación al centrarse en la relación entre las entradas y salidas del sistema hidrológico, utilizando un número reducido de parámetros para capturar la dinámica del agua en la cuenca.

Este modelo se caracteriza por su simplicidad, lo que lo hace accesible y fácil de implementar, incluso para cuencas con información limitada. Solo utiliza dos parámetros principales: X_1 , que representa la capacidad de almacenamiento del reservorio (medido en milímetros), y X_2 , que corresponde al coeficiente de intercambios de aguas subterráneas, un parámetro adimensional que regula la interacción entre el agua almacenada en el subsuelo y el escurrimiento superficial. Estos parámetros son ajustados mediante procesos de calibración para cada cuenca específica, lo que permite al modelo adaptarse a las características particulares de cada región.

Una de las ventajas del GR2M es su bajo requerimiento de datos. Los únicos insumos necesarios para ejecutar el modelo son los datos de precipitación y evapotranspiración, que son relativamente fáciles de obtener. Gracias a su estructura simplificada, el GR2M es capaz de realizar simulaciones mensuales de caudales con una precisión razonable, haciendo uso de la homogeneidad de los procesos hidrológicos, tanto observados como simulados. Esto es especialmente útil en estudios hidrológicos a largo plazo o en áreas donde los datos históricos son escasos o fragmentados.

El modelo también se beneficia de su capacidad para integrarse con análisis de tendencia, como las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y Free Cusum, lo que permite evaluar cambios a largo plazo en los caudales y detectar posibles impactos del cambio climático o de variaciones en el uso del suelo. Esta capacidad de análisis de tendencia convierte al GR2M en una herramienta valiosa para la planificación y gestión de recursos hídricos, especialmente en cuencas que enfrentan desafíos significativos debido a la variabilidad climática. Este modelo ofrece una solución eficiente y versátil para la modelación hidrológica en cuencas con datos limitados, combinando simplicidad y capacidad de adaptación con un enfoque robusto para el análisis de tendencias hidro climáticas.

Para abordar de manera integral los elementos teóricos asociados a la modelización hidrológica de cuencas, particularmente en el contexto de la aplicación del modelo GR2M, es necesario desglosar varios aspectos clave: la modelización hidrológica, el análisis de tendencias hidro climáticas, y las aplicaciones.

C. Modelización Hidrológica

La modelización hidrológica es una herramienta fundamental para entender y predecir el comportamiento de los sistemas hídricos. Los modelos hidrológicos permiten simular el ciclo hidrológico en una cuenca, integrando diferentes procesos como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, y el escurrimiento superficial. Estos modelos se dividen en varias categorías, dependiendo de su complejidad y del nivel de detalle con el que representan los procesos físicos.

El modelo GR2M (modelo de balance hídrico mensual de dos parámetros) es un modelo de caja negra, lo que significa que no requiere una descripción detallada de los procesos internos de la cuenca. Fue desarrollado por el CEMAGREF en Francia y es especialmente útil en cuencas donde los datos hidrológicos son limitados. El modelo utiliza dos parámetros clave:

- X_1 : Capacidad de almacenamiento del reservorio (mm): Este parámetro representa la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, esencial para el cálculo del escurrimiento superficial y subsuperficial.
- X_2 : Coeficiente de intercambios de aguas subterráneas (adimensional): Representa la interacción entre el agua subterránea y el escurrimiento superficial.

El GR2M se destaca por su bajo requerimiento de datos, utilizando principalmente la precipitación y la evapotranspiración como entradas, lo que lo hace aplicable en diversas regiones, incluso aquellas con datos limitados.

D. Análisis de Tendencias Hidro climáticas

El análisis de tendencias en variables hidro climáticas, como los caudales de los ríos, es crucial para la gestión de los recursos hídricos, especialmente en un contexto de cambio climático. Estas tendencias pueden indicar cambios en la disponibilidad de agua, el régimen de precipitaciones, y otros factores críticos para la planificación hídrica.

El cambio climático global ha causado alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura, afectando los caudales de los ríos. Los estudios de tendencia permiten identificar si estas variables están experimentando un aumento, disminución, o permanecen constantes a lo largo del tiempo. Este análisis es vital para prever posibles escenarios futuros y tomar decisiones informadas en la gestión de cuencas hidrográficas.

E. Aplicación del Modelo GR2M en la Vertiente del Pacífico

La vertiente del Pacífico en Perú presenta características hidrológicas particulares, con cuencas que dependen en gran medida de la precipitación estacional y son vulnerables a fenómenos como El Niño. En este contexto, el modelo GR2M ha demostrado ser una herramienta eficaz para simular caudales y analizar tendencias en estas cuencas. La simplicidad del modelo permite su aplicación en cuencas donde los datos son escasos, proporcionando resultados útiles para la gestión de recursos hídricos.

III. METODOLOGÍA

En la figura 2 se describen las características de la investigación desarrollada. Por otro lado, resulta importante mencionar que la información cartográfica utilizada para el siguiente estudio se obtuvo de la base de datos de INEI y MINAM. Asimismo, se obtuvo la información del Modelo de Elevación Digital (DEM) del satélite ALOS PALSAR que tienen una resolución de 12,5 m x 12,5 m. Para la información hidrometeorológica, se consideró del registro de caudal administrado por el Proyecto Especial CHAVIMOCHIC (data publicada en plataforma de ANA); el registro de precipitación a escala mensual y temperatura media mensual obtenido de la base Peruvian Interpolated Data of the Senamhi's Climatological and Hydrological Observations (PISCO).

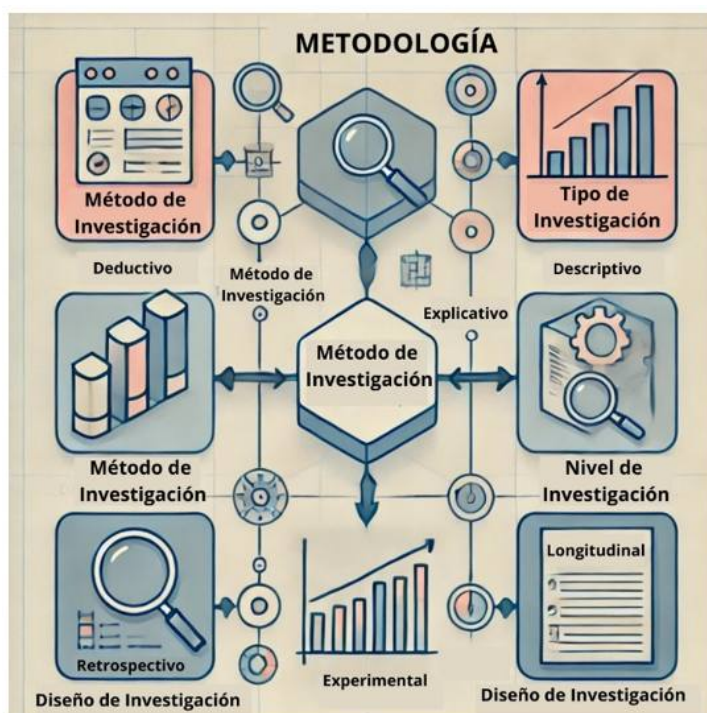


Fig 2. Características de la investigación.

Además, se extrajo información de precipitación mensual versión 2.0 (V2.0) del producto PISCO (resolución de grilla 5x5 km) para el periodo de estudio entre 1981 – 2015. Dentro de este marco, se trabajó con 58 estaciones espacialmente distribuidas en las tres cuencas de estudio, de las cuales se tiene 22 estaciones con ubicaciones existentes y 36 estaciones ficticias con la finalidad de mejorar la representatividad de datos en dichas cuencas. Para el proceso de extracción de data de precipitación V2.0 del producto PISCO, se empleó el software R 3.6.3.

Para la modelación se obtuvo la información de temperatura mensual versión 1.0 (V1.0) del producto PISCO (resolución de grilla 5x5 km) para el periodo de estudio entre 1981 – 2015. Del mismo modo, se trabajó con las 58 estaciones considerados en la recolectar datos pluviométricos. Para la obtención de data de temperatura mensual V1.0 del producto PISCO se empleó el software R 3.6.3. Respecto a la información hidrométrica se seleccionaron 3 estaciones de aforo una por cada cuenca, estas unidades se encuentran administradas por el Proyecto Especial CHAVIMOCHIC y publicado en la plataforma de la Autoridad Nacional del Agua, fueron seleccionados considerando la mayor cantidad de registro de caudales (caudales observados). El periodo de estudio corresponde al año 1981 – 2015.

IV. RESULTADOS

A. Comparación de precipitación observada con la precipitación PISCO V2.0

Se presentan los resultados de la correlación de 6 estaciones observadas con estaciones ficticias. Como resultado, se muestran en la tabla 1 los coeficientes de indicadores estadísticos (determinación R^2 , coeficiente de correlación lineal (r) y el coeficiente de Nash) empleados para validar el uso de datos del grilla PISCO.

Tabla 1. Precipitación PISCO V2.0 vs precipitación observado.

Orden	Estaciones	NASH	R^2	r	Ajuste
1	San Benito	91,86%	0,92	0,96	Cumple
2	Laredo	69,17%	0,74	0,86	Cumple
3	Molletapa	55,24%	0,58	0,76	Cumple
4	Pomabamba	64,26%	0,69	0,83	Cumple
5	Chiquián	53,4%	0,56	0,75	Cumple
6	Santiago A. Mayolo	88,35%	0,91	0,96	Cumple

B. Análisis de consistencia

Con el fin de verificar la homogeneidad y confiabilidad de los datos de precipitación mensual PISCO V2.0 se procedió con el análisis de consistencia de 58 estaciones pluviométricas mediante el método Doble Masa. En las siguientes figuras se muestra los resultados del análisis realizado en el periodo de estudio 1981 – 2015 de las cuencas de Chicama, la cuenca Moche y en la cuenca Santa.

La figura 1 muestra una gráfica de dispersión con líneas que relaciona la precipitación anual acumulada (en milímetros) con la precipitación promedio acumulada anual (en milímetros) para diferentes localidades, identificadas en la leyenda a la derecha del gráfico. El eje horizontal representa la precipitación promedio acumulada anual, mientras que el eje vertical muestra la precipitación anual acumulada. Las diferentes localidades se distinguen por el color y nombre asignado a cada línea.

Se puede observar que algunas localidades, como CACHACHI y CALLANCAS, presentan una tendencia más pronunciada, lo que indica una mayor acumulación de precipitación anual en comparación con otras áreas como C10 o C9, que muestran una acumulación significativamente menor. Este comportamiento sugiere variaciones considerables en la precipitación entre las diferentes localidades, lo cual podría estar influenciado por factores geográficos o climáticos específicos de cada región. Las diferencias en las pendientes de las líneas también reflejan cómo la precipitación acumulada anual varía con respecto a la precipitación promedio en estas localidades, destacando la importancia de un análisis más profundo para entender las dinámicas climatológicas particulares de cada zona.

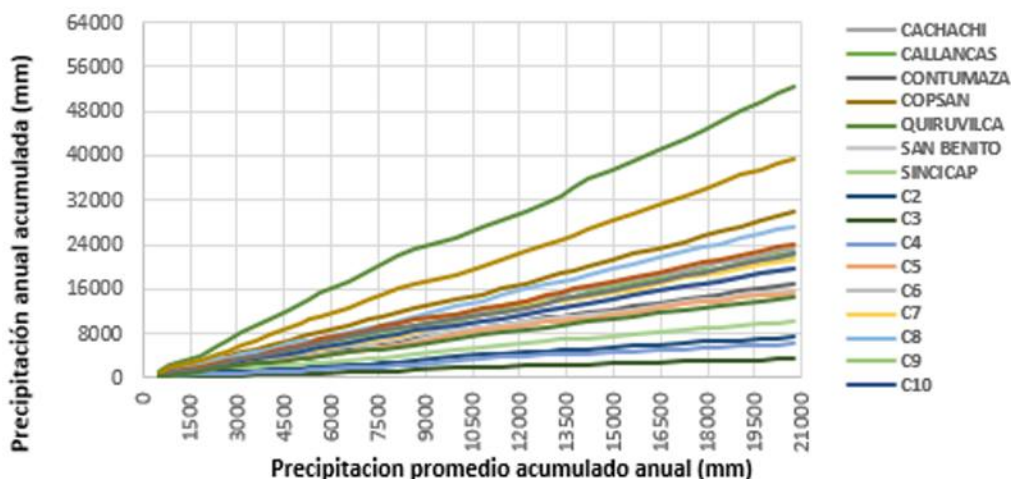


Fig 2. Diagrama de Curva de Doble Masa de estaciones pluviométricas de la cuenca Chicama.

En la figura 3, se presenta cómo las pendientes de las líneas varían notablemente entre las localidades, lo cual está asociado con diferencias geográficas, altitudinales y microclimáticas que afectan la distribución de la precipitación en estas áreas. Esta variabilidad subraya la importancia de realizar un análisis más detallado para comprender cómo diferentes factores locales influyen en los patrones de precipitación en cada localidad representada en el gráfico.

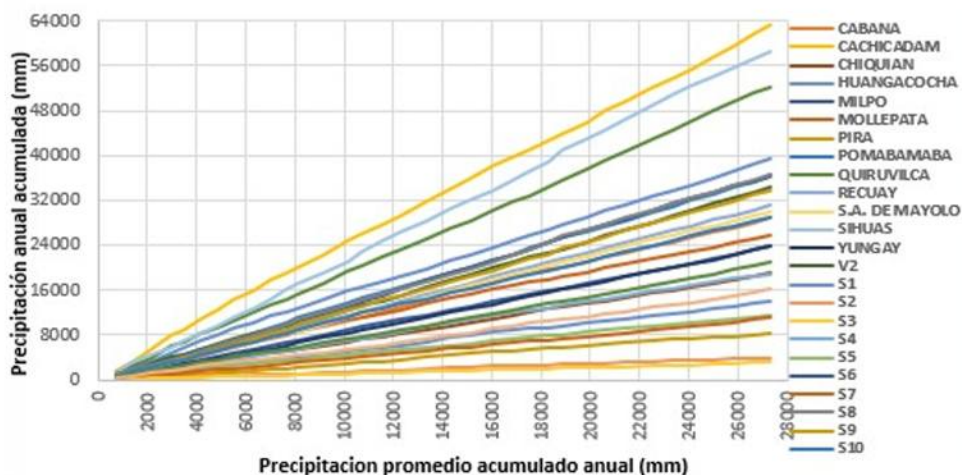


Fig. 3. Diagrama de Curva de Doble Masa de estaciones pluviométricas de c. Moche.

C. Evapotranspiración potencial (ETP)

La evapotranspiración potencial mensual (mm/mes) se determinó para cada estación seleccionada aplicando el método empírico de Thornthwaite. En la tabla 2 se presentan los valores de la temperatura media mensual (en °C) y la evapotranspiración potencial media mensual (en mm) para tres cuencas: Chicama, Moche y Santa, durante cuatro meses. En cuanto a la temperatura media, se observa que la Cuenca de Chicama mantiene temperaturas más elevadas en comparación con Moche y Santa, especialmente en los meses de marzo y abril. Por otro lado, Moche muestra una mayor variabilidad en las temperaturas, con un descenso notable en febrero.

La evapotranspiración potencial (EPT) sigue una tendencia similar, donde Chicama y Moche registran valores más altos en comparación con Santa, con Moche alcanzando su pico en marzo. La variabilidad en la EPT sugiere diferencias en las demandas de agua para las plantas debido a las condiciones climáticas de cada cuenca. En conjunto, estos datos indican que Chicama y Moche experimentan condiciones más cálidas y una mayor demanda de agua en comparación con Santa, lo que podría impactar las prácticas agrícolas y la gestión del agua en estas cuencas.

Tabla 1. Resumen de la temperatura y EPT Potencial media mensual mínima y máxima.

Temperatura media mensual (°C)	C. Chicama	C. Moche	C. Santa
Enero	16	14.8	9.7
Febrero	15	4	7
Marzo	20	20.8	15
Abril	7.5	9	2.5
EPT Potencial media mensual (mm)	C. Chicama	C. Moche	C. Santa
Enero	59	52.8	42
Febrero	94	8	8
Marzo	98	102	75
Abril	69	4	5.5

A partir de la data PISCO de temperaturas V1.0 se calculó la temperatura media mensual en las cuencas de estudio.

D. Modelamiento hidrológico con Gr2m

El modelamiento hidrológico con GR2M consta de dos procesos tales calibración y validación en las cuencas de estudio, se debe mencionar también que se optimizan los parámetros a calibrar y se determina la eficiencia del ajuste del modelo hidrológico en las cuencas antes mencionadas.

E. Cálculo de precipitación media mensual

La precipitación media se determinó a partir de la información pluviométrica disponible en la base PISCO V2.0. En la figura 4 muestra la comparación entre el caudal generado y el caudal observado (medido en metros cúbicos por segundo, m³/s) a lo largo de los meses del año. Se puede observar que ambos caudales, el generado y el observado, siguen un patrón similar, con un aumento significativo desde enero, alcanzando su pico máximo en marzo, donde el caudal generado supera ligeramente al caudal observado. Después de marzo, ambos caudales disminuyen progresivamente hasta estabilizarse en niveles bajos desde junio hasta diciembre.

Este comportamiento indica que la cuenca del río Moche experimenta su mayor caudal durante la temporada de lluvias, particularmente en marzo. La similitud entre los caudales generados y observados sugiere que el modelo utilizado para generar el caudal simulado es bastante preciso, aunque con una ligera sobrestimación en el pico máximo. A partir de mayo, las diferencias entre ambos caudales son mínimas, lo que podría indicar un equilibrio entre la cantidad de agua generada y la que realmente fluye en el río. Este análisis resalta la importancia de los modelos hidrológicos para predecir el comportamiento del caudal en la cuenca, especialmente en épocas críticas como la temporada de lluvias, que es crucial para la planificación y gestión de recursos hídricos en la región.

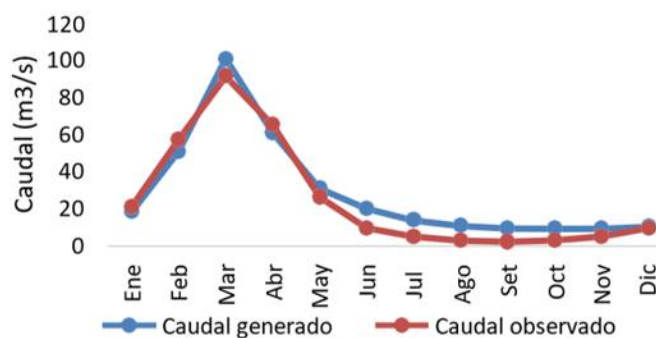


Fig. 4. Polígono de Thiessen en la Cuenca del río Moche

F. Tendencia de caudales simulados con Test estadístico Mann-Kendall y Free Cusum

En la tabla 3 se muestran resultados del análisis empleando las pruebas no paramétricas con el software TREND con un nivel de significancia del 5% o nivel de confianza al 95%. Se observa que las cuencas muestran diferencias notables en sus patrones de cambio. Mientras que Chicama presenta una tendencia significativa a nivel anual, Moche y Santa presentan variaciones principalmente en meses específicos.

Por otra parte, los puntos de cambio se agrupan en dos períodos: uno alrededor de los años 1990-1997 y otro más reciente en 2005-2015. Esto podría reflejar cambios climáticos o modificaciones en el uso del suelo que han influido en los patrones hidrológicos. La identificación de puntos de cambio y tendencias por meses, además del análisis anual, es crucial para comprender la dinámica hidrológica de cada cuenca y para la planificación de recursos hídricos, ya que sugiere que diferentes meses podrían estar sujetos a diferentes factores de cambio.

Tabla 3. Resultados analíticos en cada cuenca.

Periodo	CHICAMA			MOCHE			SANTA									
	MANN KENDALL		FREE CUSUM	KENDALL		FREE CUSUM	KENDALL		FREE CUSUM							
	Z	Tipo de tendencia	Punto de cambio	Z	Punto de cambio	Tipo de tendencia	Z	Punto de cambio	Tipo de tendencia							
ANUAL	3.569	SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1997	2.954	SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1997	2.279	NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1997							
ENERO	0.824	NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE		0.355	NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE	2006	1.378		NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE	2006						
FEBRERO	1.051			0.738		1997	1.292			NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE	2007					
MARZO	1.576			1.108			1.832									
ABRIL	1.477			0.994			1.733									
MAYO	1.363			0.809			2.173									
JUNIO	1.286			0.71			1.875									
JULIO	0.983			1.379			2015				1.889	SIGNIFICATIVA CRECIENTE	2005			
AGOSTO	1.347			1.378							1.676		SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1996		
SEPTIEMBRE	1.818			1.179							2.045			SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1992	
OCTUBRE	1.846			1.023							2					
NOVIEMBRE	1.846			2005							1.832				SIGNIFICATIVA CRECIENTE	1.491
DICIEMBRE	1.534		1996	1.463				NO SIGNIFICATIVA CRECIENTE			1.946				SIGNIFICATIVA CRECIENTE	

CONCLUSIONES

La tendenciade caudales en la cuenca del río Chicama, muestraun valor de significancia (z) 3.569 de tipo de tendencia significativa creciente evaluado anualmente, el punto de cambio ocurrió en el año 1997; en la cuenca del río Moche, muestra un valor de significancia (z) 2.954 de tipo de tendencia significativa creciente, el punto de cambio ocurrió en el año 1997; y la cuencadel río Santa,muestra un valorde significancia (z) 1.923 de tipo de tendencia no significativo creciente donde en punto de cambio fue en los años 2006,2007 y 1992.

Los datos de precipitación y temperatura grillados e interpolados a escala global PISCOp con resolución espacial con grilla 5x5 km presentan un coeficiente de determinación promedio 0.72, Nash de 69.43% y correlación lineal de 0.82, dicha información se empleó en las tres cuencas de estudio para un periodo de estudio entre los años de 1981 hasta 2015.

El análisis de consistencia de los datos grillados PISCOp se realizómediante el método de curva de doble masa, presentando buena confiabilidad. El cálculo de la precipitación media mensual se determinó aplicandoel método de Polígono de Thiessen.

En la aplicación de los modelos hidrológicos Gr2m en las cuencas Chicama, Moche y Santa se ha considerado un periodo de calibración de 23 años hidrológicos (1981 – 2003)y un periodo de validación de 12 años hidrológicos (2004 – 2015) con un periodo total de 35 años, siendo esta una cantidad optima.

Los parámetros calibrados en la estación Salinarde la cuenca del Rio Chicama son X₁:6.69 mm; X₂:1.24 mm correspondientes para el modelo hidrológico Gr2m; la calibración del ajuste se determinó mediante el coeficiente Nash-Sutcliffe de 89.9 % (Muy bueno) y coeficiente de determinación (R²) de 0.90 y la validación se determinó elcoeficiente Nash-Sutcliffe de 42.3 % (bueno) y coeficiente de determinación (R²) de 0.70.

Los parámetros calibrados en la estaciónSalinar de la cuenca del Rio Moche son X₁:6.29mm; X₂:1.17 mm correspondientes para el modelo hidrológico Gr2m; la calibración del ajuste se determinó mediante el coeficiente Nash-Sutcliffe de 86.7 % (Muy bueno) y coeficiente de determinación (R²) de 0.86 y la validación se determinó elcoeficiente Nash-Sutcliffe de 39.5 % (Satisfactorio) y coeficiente de determinación (R²) de 0.49.

Los parámetros calibrados en la estación Salinarde la cuenca del Rio Santa son X_1 :6.83 mm; X_2 :1.10 mm correspondientes para el modelo hidrológico Gr2m; la calibración del ajuste se determinó mediante el coeficiente Nash-Sutcliffe de 75.8 % (Muy bueno) y coeficiente de determinación (R^2) de 0.78 y la validación se determinó el coeficiente Nash-Sutcliffe de 78.0 % (Satisfactorio) y coeficiente de determinación (R^2) de 0.83.

REFERENCIAS

- [1] A. Alcántara, N. Montalvo, y A. Mejía, "Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque," Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), vol. 17, no. 33, pp. 7-17, 2014. Disponible en: <https://n9.cl/5yx2g>.
- [2] J. Alcazar, "El método del caudal básico para la determinación de caudales de mantenimiento," Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Lérida, España, 2007.
- [3] C. Aybar, W. Lavado-Casimiro, A. Huerta, C. Fernández, F. Vega, E. Sabino, y O. Felipe-Obando, "Uso del Producto Grillado 'PISCO' de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico," Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima, Perú, 2017.
- [4] A. Breña y M. Jacobo, Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Disponible en: <http://www.uamenlinea.uam.mx/>, 2006.
- [5] N. Buguña, "Aplicación de modelos hidrológicos para la estimación de caudales mensuales en la sub cuenca del río Bigote," Tesis de maestría, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2019. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4016>.
- [6] A. Carmona, "Tendencias, Validación y generación de caudales usando la data grillada PISCO para las cuencas del Río Biabo," Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima, Perú, 2019. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4214>.
- [7] J. Chaibou, "Hydrological modeling of the Bani Basin in West África: uncertainties and parameters regionalization," Tesis doctoral, Universidad de Abomey-Calavi, Benin, 2016.
- [8] W. Chereque, *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1989.
- [9] V. T. Chow, D. Maidment, y L. Mays, Applied Hydrology. New York, EE.UU.: International, 1988.
- [10] M. Fernández, A. Vela, y S. Castaño, "La utilización de modelos en hidrología," Facultad de educación de Albacete, vol. 12, pp. 305-318, 1997.
- [11] R. Hernández, C. Fernández, y M. Baptista, Metodología de la investigación. México D. F., México: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [12] J. Herrera, "Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M, en la cuenca del río Coata," Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno, Perú, 2015.
- [13] A. Sanabria, "Implementación de modelos de balance hídrico a nivel mensual para la evaluación del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Coello," Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2019. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77184>.
- [14] Ley de Recursos Hídricos N° 29338, Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 31 de marzo de 2009.