

# Generation of monthly flows in the Casma River basin up to the Tutuma Hydrometric Station using the GR2M precipitation-runoff model

Rojas Villegas Jose Luis<sup>1</sup>, Tomas Ayala Edson Nayger<sup>2</sup>, Carmona Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos<sup>3</sup>




<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, N00173798@upn.pe, N00151153@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

*Abstract- Given the recurrent floods in many areas of the Casma River Basin and the lack of records in its hydrometeorological stations, in the present investigation a study has been carried out for the generation of monthly flows in the Tutuma hydrometric station for the last 34 years between the years 1981 and 2015, using the French GR2M precipitation runoff model. For this, the average precipitation values of the climatic gridded products of RAIN4pe precipitation and ERA5 land temperatures have been used. These climate products have been obtained by creating a source code in JavaScript to be used on the Google Earth Engine (GEE) platform. Good calibrations have been obtained between the measured and generated monthly flows for the period between 1982 and 1984. This demonstrates a reliable simulation of the behavior of the generated flows, which will be fundamental later for future hydro energy projects, storage and control of avenues, etc.*

**Keywords:** Casma Basin, GR2M, ERA5-Land, RAIN4PE, GEE

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Generación de caudales mensuales en la cuenca del río Casma hasta la Estación Hidrométrica Tutuma usando el modelo de precipitación - esorrentía GR2M

Rojas Villegas Jose Luis<sup>1</sup>, Tomas Ayala Edson Nayger<sup>2</sup>, Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, N00173798@upn.pe, N00151153@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

**Resumen-** Ante las recurrentes inundaciones en muchas áreas de la Cuenca del río Casma y la falta de registros en sus estaciones hidrometeorológicas, en la presente investigación se ha realizado un estudio para la generación de caudales mensuales en la estación hidrométrica Tutuma para los últimos 34 años entre los años 1981 y 2015, usando el modelo francés de precipitación esorrentía GR2M. Para ello se han usado los valores promedios de precipitación de los productos grillados climáticos de precipitación RAIN4pe y temperaturas ERA5 land. Dichos productos climáticos han podido ser obtenidos creando un código fuente en JavaScript para ser usado en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Se ha obtenido buenas calibraciones entre los caudales mensuales medidos y generados para el periodo entre los años 1982 y 1984. Esto demuestra una confiable simulación del comportamiento de los caudales generados los que serán fundamentales más adelante para para futuros proyectos hidro energéticos, almacenamiento y control de avenidas, etc.

**Palabras claves:** Cuenca Casma, GR2M, ERA5-Land, RAIN4PE GEE

## I. INTRODUCCIÓN

Los pobladores que viven cerca de la margen de ríos en las cuencas de la vertiente del Pacífico siempre han sufrido de recurrentes inundaciones de sus centros poblados y zonas de cultivo, pero también en otras ocasiones de sequía. El régimen hidrológico de estos lugares es muy variable y esto puede deberse también a fenómenos climáticos como es el caso del Niño costero, el cual desde tiempos inmemoriales ha afectado a estas poblaciones. En los últimos años a consecuencia de las altas emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera la temperatura del planeta se ha incrementado, lo que está ocasionando un cambio climático a escala global. El Perú viene siendo afectado por estos fenómenos climatológicos que ocasionan graves problemas sociales y pérdidas económicas al país. Urge tomar conciencia ante este problema y poder tomar medidas preventivas para un futuro.

¿Qué se puede hacer o planificar para mitigar esta problemática?

Lo que se podría realizar es la construcción de represas en las partes altas de algunas cuencas con el fin de poder cubrir la demanda de agua a las poblaciones en la parte baja de la cuenca y a su vez regular los caudales extremos que podrían venir.

Si se sabe cómo afrontar el problema, ¿Por qué no se hace nada al respecto?

Sabemos que para el dimensionamiento de una obra hidráulica como una represa se necesitan registros de caudales promedio diarios y mensuales, estos últimos para poder saber de qué tamaño debería ser el embalse para poder cubrir con la demanda actual y proyectada.

Lamentablemente, en el Perú como en muchos países de Sudamérica, no se han realizado mediciones de muchos de sus ríos, lo cual imposibilita realizar correctos estudios de dimensionamiento para estas obras.

Uno de estos casos es el del río Casma, el cual, así como muchos ríos de la vertiente del Pacífico han presentado un aumento de desbordes e inundaciones de sus afluentes en los últimos años. Ver en la figura 1.



06/04/2022 / Exitosa Noticias / Exitosa Perú / Actualizado al 09/01/2023

Fig.1 Noticias sobre inundaciones el río Grande afluente del río Casma. [1]

## II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Por lo expuesto anteriormente y ante la escasa información hidrometeorológica en la cuenca del río Casma, en esta investigación se planteó realizar la generación de las series de caudales promedio mensuales en la cuenca del río Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma para el periodo entre los años 1981 al 2015, usando el modelo de precipitación – escorrentía GR2M. para este modelo se ha previsto usar la información climática grillada de precipitaciones RAIN4PE y la de temperaturas ERA5-Land.

## III. MARCO TEÓRICO

### A. Ubicación del proyecto

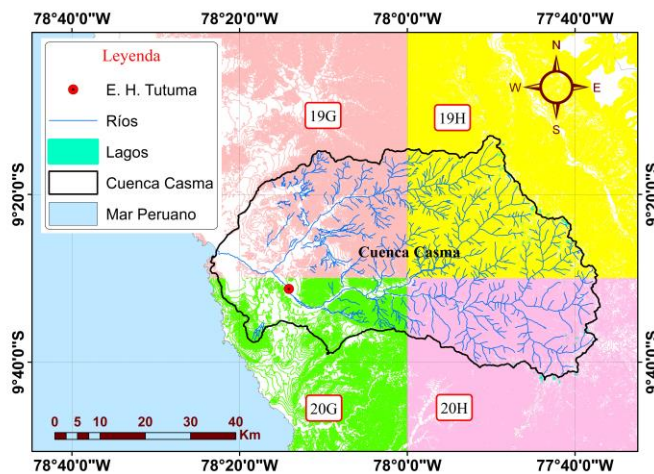
La cuenca del río Casma se encuentra en la parte norcentral del Perú, está entre las siguientes coordenadas geográficas WGS84 sur: Latitud  $9^{\circ}12'9''$ , longitud  $78^{\circ}25'13.5''$  y latitud  $9^{\circ}42'34''$ , longitud:  $77^{\circ}35'55''$  se encuentra ubicada en la vertiente del Pacífico y sus afluentes nacen en los andes peruanos.

### B. Áreas políticas

La cuenca del río Casma abarca las áreas parciales de las provincias de Ayabaca, Huancabamba, Morropón, Paita, Piura, Sechura y Sullana del Departamento de Piura.

### C. Datos cartográficos

Para realizar los planos y las delimitaciones de las cuencas se usó la información de las cartas nacionales del IGN a una escala de 1:100000.



Como se muestra en la fig. 2, Las cartas nacionales del IGN, fueron empleadas para trazar los límites y determinar la extensión total de la cuenca del río Casma y de la cuenca hasta la estación Tutuma. Las cartas usadas fueron: 19-g, 19-h, 20-g, 20-h.

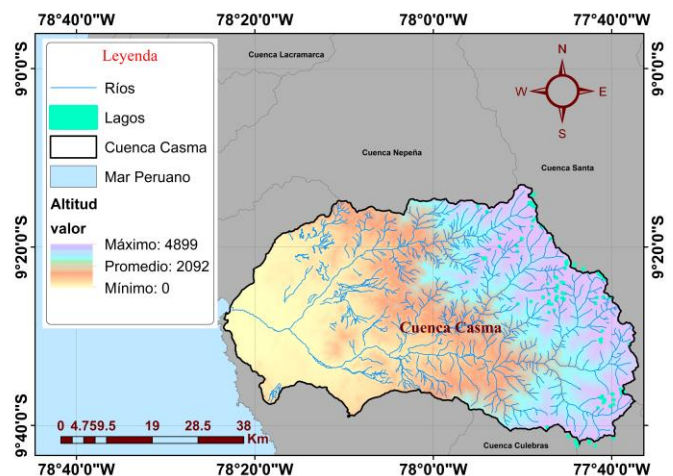
### D. Datos morfológicos de la cuenca

Para tener conocimiento de las pendientes en la cuenca se usó las curvas de nivel del IGN cada 25 metros, con ellas se pudo elaborar la figura 2. Aquí se aprecia que las pendientes en la parte alta son muy altas y están en el rango de 80 a 60 por ciento mientras que la parte baja y media de la cuenca se encuentra entre 0 a 10 por ciento.

La cuenca del río Casma tiene una extensión aproximada de  $2990.70\text{km}^2$  y la cuenca que abarca hasta la estación Tutuma una extensión aproximada de  $1762\text{km}^2$  hasta este punto el cauce principal recorre unos  $103.08\text{km}$  desde su nacimiento en la cordillera de los Andes hasta su desfogue en el océano Pacífico. Como se observa en la fig. 3, la cuenca presenta un gradiente altitudinal importante debido a su ubicación entre la cordillera andina y la costa. La zona de la cuenca en la sierra andina, donde nace el río Casma, alcanza altitudes máximas del orden de  $4900\text{m.s.n.m.}$ , una altitud promedio de  $469\text{m.s.n.m.}$  y en su parte más baja desciende hasta los  $0\text{m.s.n.m.}$  antes de la desembocadura del río en el océano.

### E. Datos cartográficos

La Cuenca Casma, colinda por el norte con la cuenca Nepeña; por el este con la cuenca Santa; por el sur con las cuencas Culebras y Huarmey como se muestra en la figura 3. El río Casma presenta un régimen hidrológico irregular y fluctuante a lo largo del año. Los meses de lluvias comienzan a fines de noviembre y terminan a comienzos de abril. Las precipitaciones son muy bajas en la zona baja y media de la cuenca, mientras que en épocas de lluvias las precipitaciones son elevadas en la parte alta. Sumado a esto las características morfológicas de la cuenca hacen que las precipitaciones en la parte alta ocasionen en muchos casos huaicos, los cuales afectan a las poblaciones cercanas a las márgenes de las quebradas y ríos.



Sus principales afluentes son el río Grande, el río Sechin los cuales al juntarse se forma el río Casma. La estación hidrométrica Tutuma, objeto del presente estudio, en las

coordenadas geográficas sur WGS84: Latitud 9.521", longitud -78.235.

**F. ArcGIS**

Es un sistema de información geográficas (SIG) desarrollado por Environmental Systems Research Institute (ESRI), que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica [4].

**G. Instituto Geográfico Nacional (IGN)**

El IGN es el ente rector de la cartografía nacional, tiene la misión de elaborar y actualizar la cartografía básica oficial del Perú [3].

**H. Autoridad Nacional del Agua (ANA)**

Es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos del Perú [8].

**I. Google Earth Engine (GEE)**

Es una plataforma informática que permite a los usuarios ejecutar análisis geoespaciales en la infraestructura de Google. [5]. Para obtener esta información de análisis geoespaciales, en este caso, datos meteorológicos, se tuvo que realizar la creación de códigos, los cuales fueron proporcionados por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga.

**J. Producto Grillado RAIN4PE**

RAIN4PE es un novedoso conjunto de datos de precipitación cuadrículada diaria, que proporciona información a nivel global con una resolución espacial de 10 km. [9]. El marco esquemático del producto RAIN4PE se ve en las figuras 4 y figura 5.

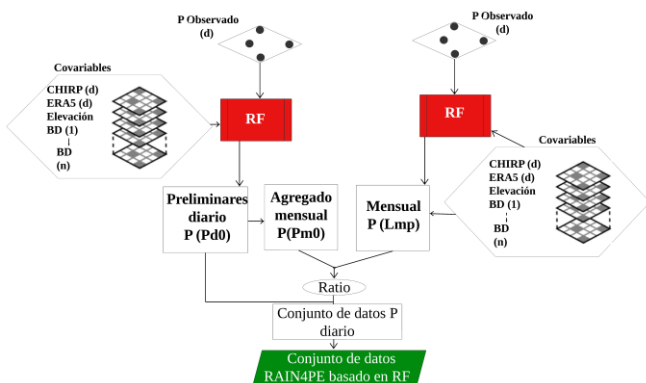


Fig.4. Marco esquemático del producto RAIN4PE para determinar el Conjunto de datos RAI4PE basado en RF (Fernández et al., 2022)

ii) calibración y ajuste hidrológico de conjuntos de datos de P utilizando flujo de corriente (Q)

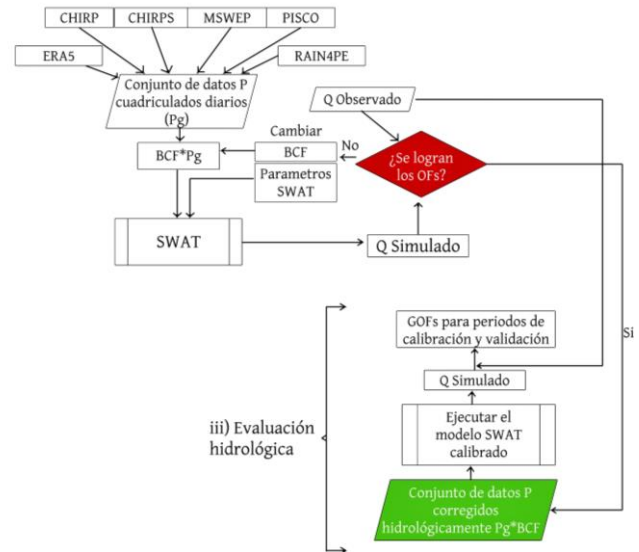


Fig.5. Marco esquemático del producto RAIN4PE para determinar el Conjunto de datos P corregidos hidrológicamente Pg\*BCF (Fernández et al., 2022)

Para extraer la información de precipitaciones promedio dentro de la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma se usó el código creado en JavaScript perteneciente al Ingeniero Fernández Palomino [7]. A continuación, se describe el código creado para esta finalidad:

```
// rain4pe: Conjunto de datos de precipitación cuadrículada de
// alta resolución para cuencas peruanas y ecuatorianas (1981-
// 2015)
// Propiedades de la imagen
-'system:time_start' (Unix time)
Spatial resolution: 0.1° (or roughly 10km x 10km)
Google Earth Engine assets.
-rain4pe monthly: "users/csaybar/rainpe/monthly"
-rain4pe daily: "users/csaybar/rainpe/monthly" &
"users/ryali93/rainpe/monthly"
-rain4pe monthly climatology:
"users/csaybar/rainpe/monthly_clim"
-rain4pe annual mean: "users/csaybar/rainpe/annual"
// 1. Parámetros globales
var ROI = ee.FeatureCollection(projects/ee-
etomasayala/assets/CUENCA_CASMA_ESTACION_SECTO
R_TUTUMA');
var start_date = "1981-01-01";
var end_date = "2015-12-31";
// 2. Función para calcular el promedio espacial
var pproducer = function(rain4pe) {
var params = {collection: ROI, reducer: ee.Reducer.mean(),
scale: 5000};
var image_value =
rain4pe.reduceRegions(params).first().get('mean');
```



```

var image_date = rain4pe.get('system:time_start');
var ft = ee.Feature(null, {'system:time_start': image_date,
'date': ee.Date(image_date).format('Y-M-d'), 'value':
image_value});turn ft;);
// 3. Crear un gráfico de series de tiempo
var rain4pe_daily_data = ee.ImageCollection("projects/sat-
io/open-datasets/rainpe/daily")
var rain4pe_data = rain4pe_daily_data.filterDate(start_date,
end_date).map(ppreducer);
var graph = ui.Chart.feature.byFeature(
rain4pe_daily_data.filterDate("1981-06-01", "1983-06-
01").map(ppreducer),'system:time_start','value');
print(graph.setChartType("ColumnChart").setOptions({vAxis:
{title: 'PP (mm/dia)',hAxis: {title: 'fecha'}}));
//4. Exportar resultados
export.table.toDrive({collection: rain4pe_data,selectors: 'date,
value',description: "rain4pe-daily data",
fileNamePrefix:"rain4pe_ts"})
//5. Mostrar un día específico
var daily_rain =
ee.Image("users/ryali93/rainpe/daily/1998_01_25")
var palette = ['000096','0064ff','00b4ff','33db80',
'9beb4a','ffeb00','ffb300','ff6400','eb1e00','af0000'];
Map.addLayer(daily_rain, {min:0, max:80, palette: palette})
Map.centerObject(ROI);
Map.addLayer(ROI)
//Hay que recalcar que la precipitación se obtiene en milímetros
(mm/día).

```

### K. ERA5 land

Es un conjunto de datos de reanálisis climático producido por European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), que proporciona datos por hora sobre muchos parámetros atmosféricos, de la superficie terrestre y del estado del mar junto con estimaciones de incertidumbre [10]. Ver figura 6.

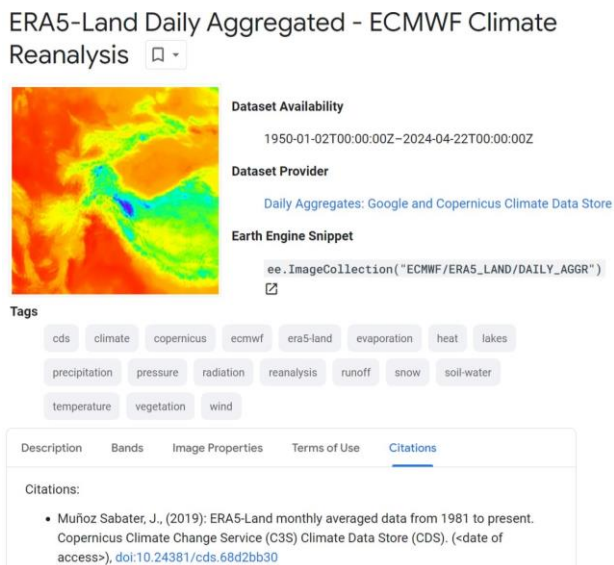


Fig. 6 Conjunto de productos grillados climáticos ERA5 Land a paso mensual

Para poder descargar los registros climáticos de temperatura del proyecto ERA5 land desde GEE se usó el código en JavaScript creado por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga [7].

```

// Definir periodos
var param = { T1:'1984-03-01', T0:'1980-01-01',}
// Cuenca analizada en formato Shapefile
var Estacion = ee.FeatureCollection("projects/ee-
etomasayala/assets/CUENCA_CASMA_ESTACION_SECTO
R_TUTUMA")
//var Estacion = geometry
// Recopile datos y filtre por fechas totales
var Precipitacion =
ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5/DAILY');
//var Precipitacion = ee.ImageCollection('UCSB-
CHG/CHIRPS/DAILY')
// Colecciones de datos de viento para todos los años, un valor
por hora
// Aquí es donde puede cambiar las fechas
var collection01 =
ee.ImageCollection(Precipitacion.filterDate(param.T0,
param.T1));
// Recortar a la región especificada
var clipped01 = collection01.mean().clip(Estacion)
// Gráficos //
// Series de tiempo a largo plazo.
var TS1 = ui.Chart.image.seriesByRegion({
imageCollection: collection01,
regions: Estacion,
reducer: ee.Reducer.mean(),
// Cambiar fuente de datos//
// Para usar Copérnico temperatura media del aire a 2m en
Kelvin
band:'mean_2m_air_temperature',
scale: 5000,
xProperty: 'system:time_start',
seriesProperty: 'Subbasin'})
.setOptions({
title: 'Precipitación promedio en una cuenca P(metros) a paso
diario',
hAxis: {title: 'Intervalo de tiempo en dias'},
vAxis: {title: 'P (metros)}});
print(TS1);
Map.addLayer(Estacion,{palette: 'blue'}, 'cuenca')

```

La temperatura en Kelvin (K), estas últimas se tuvieron que convertir a Celsius para ingresar al modelo Gr2m y poder usarlos para obtener los valores de evapotranspiración potencial.

### L. Modelo GR2M

Es un modelo francés de simulación de caudales en una escala de tiempo mensual. Este modelo se ha utilizado como una simulación secuencial de datos de evapotranspiración y escorrentía superficial sobre el suelo en un modelo conceptual

con resultados muy satisfactorios. [11]. En la Figura 7, se observa el esquema del algoritmo del modelo GR2M.

El modelo hidrológico utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe como función objetivo en la fase de calibración.

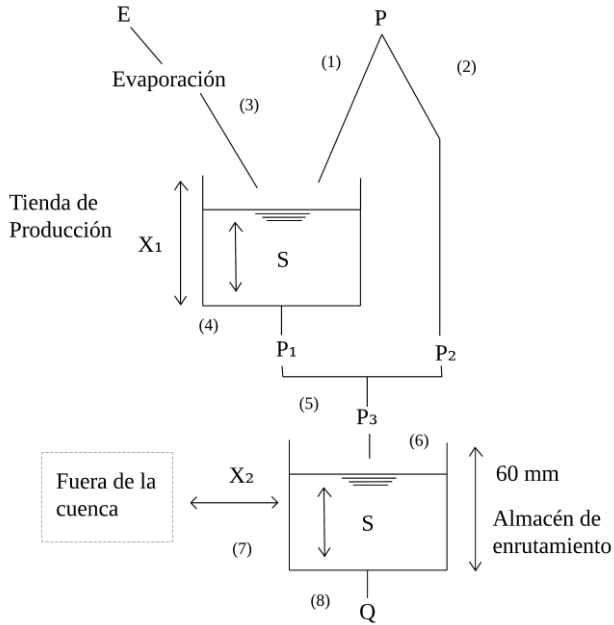


Fig. 7 Modelo de precipitación – escorrentía GR2M (Perrín et al., 2010)

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad (1)$$

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (2)$$

$$P_1 = P + S - S_1 \varphi \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad (4)$$

$$\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (5)$$

$$S = \sqrt[3]{1 + \left(1 - \frac{S_2}{X_1}\right)^3} \quad (6)$$

$$P_1 = S_2 - S \quad (7)$$

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (8)$$

$$R_1 = R + P_3 \quad (9)$$

$$R_2 = X_5 - R_1 \quad (10)$$

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (11)$$

$$R = R_2 - Q \quad (12)$$

### M. Coeficiente de determinación $R^2$

Expresa la dependencia lineal entre dos variables. Para este estudio, corresponde a los caudales medidos y los caudales simulados con el modelo GR2M.

En la Tabla I, se pueden apreciar los rangos de  $R^2$

TABLA I  
VALORES REFERENCIALES PARA EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN  
FUENTE: MIROSLAV Y OKRUSZKO (2011)

Rango del $R^2$	Categoría de calidad de modelo
$0.99 \leq R^2 < 1.00$	Excelente
$0.95 \leq R^2 < 0.99$	Muy bueno
$0.90 \leq R^2 < 0.95$	Bueno
$0.85 \leq R^2 < 0.90$	Bastante bueno
$0.80 \leq R^2 < 0.85$	Promedio
$0.70 \leq R^2 < 0.80$	Satisfactorio
$R^2 < 0.70$	Insuficiente

### N. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es uno de los criterios más usados en Hidrología. Se define como:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (9)$$

Dónde:

$Q_{sim,i}$  : caudales simulados en  $m^3/s$

$Q_i$  : Caudales observados en  $m^3/s$

$\bar{Q}$  : Caudales medios observados en  $m^3/s$

Y mide cuándo de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta,  $E=1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E=0$  [12].

En la Tabla II se puede apreciar los valores de referencia del criterio de Nash Sutcliffe.

VALORES REFERENCIALES DEL CRITERIO DE NASH – SUTCLIFFE (MOLNAR, 2011)

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

#### IV. METODOLOGÍA

Como se muestra en Figura 7, se realizó la delimitación de la Cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma, con el software ArcGIS, el cual también se utilizó para la obtención de los mapas presentados en la investigación, con la finalidad de no solo mostrar la información de manera textual, sino también de forma gráfica.

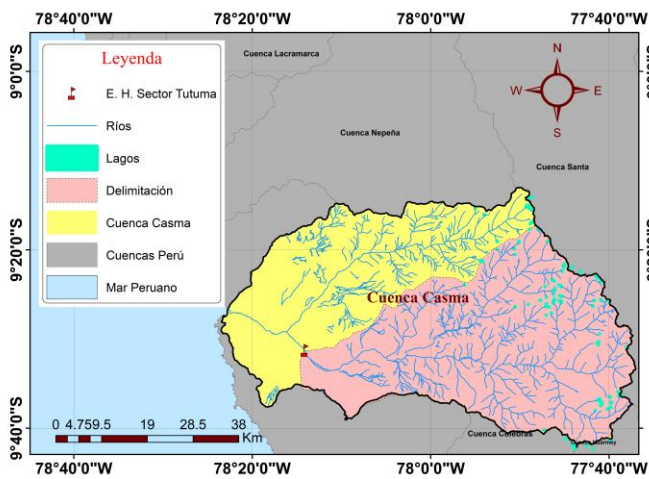


Fig. 7. Delimitación de la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma

Se realizó la creación de un código en el lenguaje Java (Script) y Python para GEE que nos permita obtener y promediar valores diarios climáticos de la cuenca, los cuales más adelante se promediaron en valores mensuales para el uso del modelo GR2M. Para esta investigación se utilizó el producto grillado de precipitación RAIN4PE y para temperaturas se utilizó ERA5, las cuales tienen una resolución de aproximadamente 10 Km cuadrados.

Para seleccionar una cuenca que cumpla los datos requeridos para realizar esta investigación se planteó un flujograma el cual se muestra en la Figura 8,

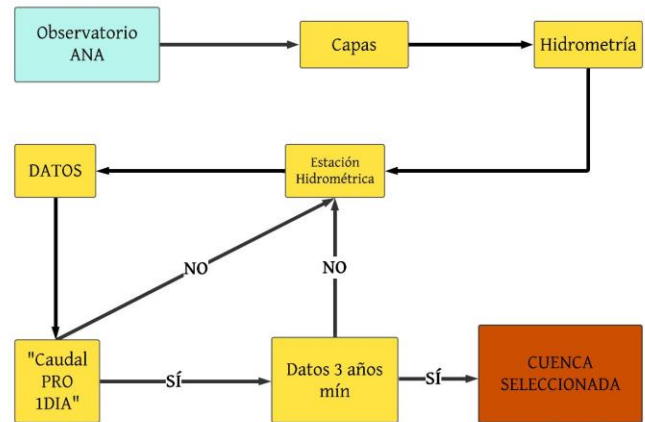


Fig.8 Diagrama de flujo indicando los pasos para seleccionar la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

Una limitación del método es que, GEE al realizar grandes cálculos a nivel diario, solo permite como máximo descargar 10 años de datos del área de la cuenca, por eso el intervalo de obtención de datos fue de 5 a 10 años de recolección.

Para finalizar realizamos la extracción de datos en GEE como se muestra en el en la figura 9.

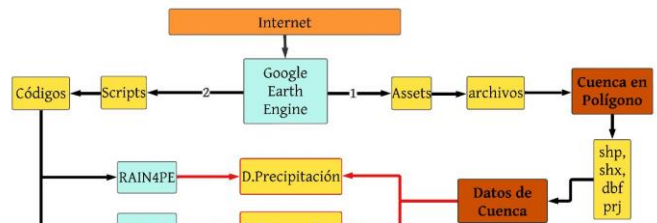


Fig.9 Diagrama de flujo de los pasos para la extracción de datos en GEE. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se comparte los códigos utilizados en este proyecto para el futuro uso en investigaciones:

•ERA5  
<https://code.earthengine.google.com/1456743c55ed62ec22949811c75b28c6> [6].

•RAIN4PE  
<https://code.earthengine.google.com/d27314726d192f33001ffe0f23c77307> [7].

#### 4.1. Calibración del Modelo GR2M

El objetivo de esta etapa es identificar los valores de los parámetros del modelo con la finalidad de ajustar de manera óptima un sistema lo más próximo al real que el modelo representa.

Para la calibración del método GR2M se aprovecharon los registros de caudales extraídos de la Autoridad Nacional del

Agua (ANA) en un periodo de tiempo entre 01/10/1982 al 31/03/1984.

#### 4.2. Validación

En este paso se determinará si los cálculos obtenidos mantienen una tendencia aceptable respecto al valor del Criterio Nash – Sutcliffe con los datos obtenidos y simulados en el periodo de tiempo entre 01/10/1982 al 30/09/1985.

#### 4.3. Extensión de Caudales

Al obtener nuestra validación de forma positiva, podremos extraer los datos de GEE, desde 01/01/1981 hasta el 31/12/2015 que es la fecha máxima que nos permite RAIN4PE.

De esta manera obtendremos datos a lo largo de 30 años para la actualización de los caudales medidos por el Observatorio ANA.

### V. RESULTADOS

Para desarrollar el método GR2M se empleó la Hoja de Cálculo elaborada por Charles Perrin y Vazken Andréassian [13], la versión mostrada está presentada por Mouelhi (2003) y Mouelhi et al. (2006).

Mouelhi realizaba una cadena coherente de modelos conceptuales globales de flujo de precipitaciones con pasos temporales, plurianuales, anuales, mensuales y diarios.

Además, los valores de los parámetros  $X_1$ ,  $X_2$ , del modelo se pueden optimizar utilizando la función "Solver" en una hoja de cálculo que también se utilizará para simulaciones de caudales a pasos de tiempo mensuales, haciendo una mejora de un modelo global de precipitación a través de un enfoque comparativo

#### A. Calibración

Para esta etapa se utilizaron de los datos obtenidos del Observatorio ANA con los datos simulados, se realizó con un área de 1762.004 Km<sup>2</sup>, y un periodo de tiempo que va desde 01/10/1982 al 31/03/1984. En la Tabla III, se observa el valor del criterio de eficiencia Nash (Q) obtenido es de 93.31%.

TABLA III  
CRITERIOS DE EFICIENCIA (%) OBTENIDOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Criterios de eficiencia (%)	
Nash (Q)	93.31
Nash (VQ)	87.15
Nash (ln(Q))	73.64
Bilan	111.64

En la Tabla IV se observan los parámetros del modelo GR2M.

TABLA IV  
PARÁMETROS DEL MODELO GR2M EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Parámetros	Transf.	Actual.
$X_1$ : Res. Salida (mm)	5.25	189.75
$X_2$ : Parámetro de intercambio (mm)	0.75	0.75

En la Tabla V se aprecian los valores iniciales de llenado

TABLA V  
VALORES INICIALES PARA LA CUENCA CASMA EN LA CALIBRACIÓN

Valores iniciales	
Nivel de llenado inicial S0 (máx.: x1 mm)	94.88
Nivel de llenado inicial R0 (máx.: 60 mm)	30

En la Tabla VI se muestran los datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración.

TABLA VI  
DATOS HIDROMÉTRICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Datos Hidrométricos	
Precipitación media observada (mm/mes)	60.28
Promedio de ETP observados (mm/mes)	2.2
Caudales promedios observados (mm/mes)	25.78
Promedio de las raíces de los caudales observados	4.16
Promedio de los flujos logarítmicos observados	2.43

Al realizar el proceso de calibración del modelo GR2M, se obtuvieron los parámetros de ajuste, en este se compararon los datos medidos (ANA) y los caudales mensuales simulados por el modelo GR2M. En la figura 10 se observan los meses comparados en del 01/10/1982 al 31/03/1984

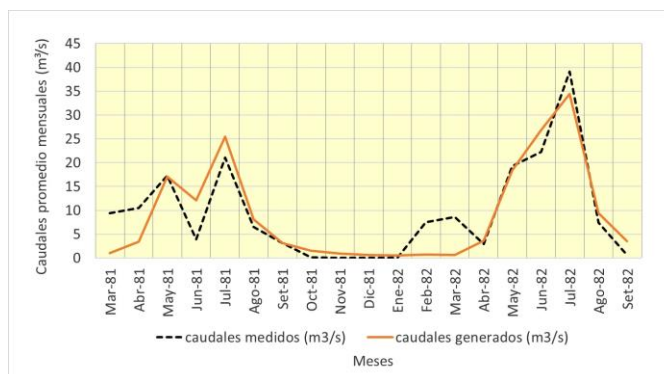


Fig.10 Comparativa de caudales diarios medidos y caudales generados para la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma en la calibración

En la Figura 11 se muestra el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) entre los de caudales diarios medidos (ANA) y caudales simulados (GR2M) para la cuenca del río Casma hasta la estación Tutuma en el proceso de calibración entre 01/10/1982 al 31/03/1984.



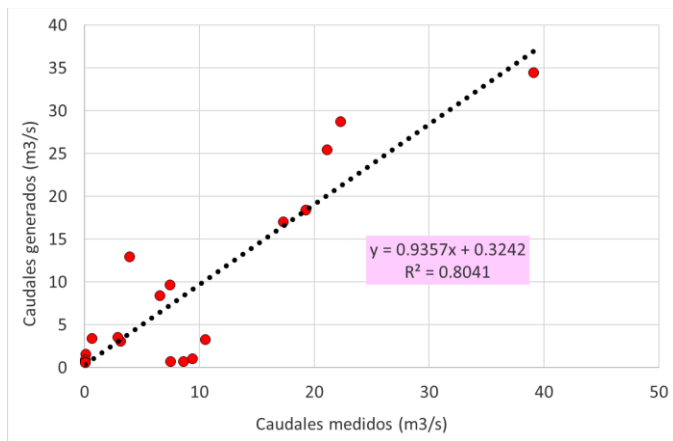


Fig.11 Correlación del  $R^2$  entre los caudales medidos y caudales generados para la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma en la calibración

Considerando una línea de tendencia lineal, se obtiene un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) igual a 80.41%.

### B. Validación

En esta etapa de análisis, se designó el periodo entre los días 01/10/1982 al 30/09/1985, conteniendo a la etapa de calibración, para determinar si los cálculos obtenidos mantienen una tendencia similar.

En la Tabla VII, se observa que el valor del criterio de eficiencia obtenida es de 86.89%. Considerando los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe, el resultado obtenido se ubica en el rango de “> 0.8”. De manera que, se interpreta que el ajuste realizado es excelente correspondiente de la Tabla VII.

TABLA VII  
CRITERIOS DE EFICIENCIA (%) OBTENIDOS EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	86.89
Nash(VQ)	72.43
Nash(ln(Q))	51.03
Bilan	101.18

En la Tabla VIII, se observan los parámetros del método GR2M calculados para la cuenca del río Casma hasta la estación Tutuma.

TABLA VIII  
PARÁMETROS DEL MODELO GR2M EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN

Parámetros	Transf.	Actual.
$X_1$ : Res. Salida (mm)	5.88	356.07
$X_2$ : Parámetro de intercambio (mm)	0.83	0.83

En la Tabla IX, se presentan los valores iniciales para la validación.

TABLA IX  
VALORES INICIALES PARA LA CUENCA CASMA EN LA VALIDACIÓN

Valores iniciales	
Nivel de llenado inicial $S_0$ (máx.: x1 mm)	178.04
Nivel de llenado inicial $R_0$ (máx.: 60 mm)	30

Además, en la Tabla X se tienen los valores hidrométricos obtenidos usando el modelo de validación de la cuenca del río Casma hasta la estación Tutuma.

TABLA X  
DATOS HIDROMÉTRICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN

Datos hidrométricos	
Precipitación media observada (mm/día)	27.18
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.12
Caudales medios observados (mm/día)	17.16
Promedio de las raíces de los caudales observados	3.66
Logaritmo promedio de flujos observados	2.36

En Figura 12 se presenta la comparativa entre los caudales diarios medidos (ANA) y caudales simulados (GR2M) para la cuenca del río Casma hasta la estación Tutuma para la validación.

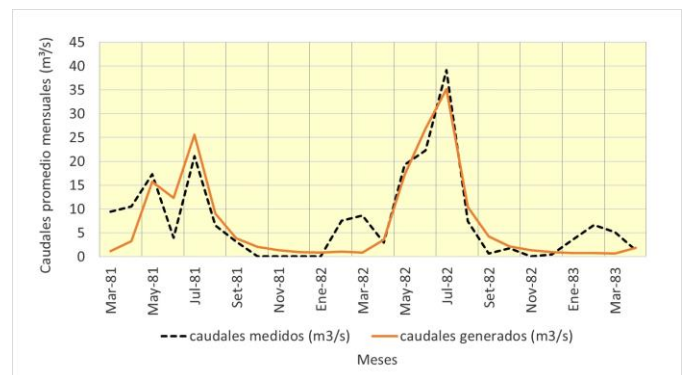


Fig.12 Comparativa de caudales diarios medidos y caudales generados para la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma en la validación

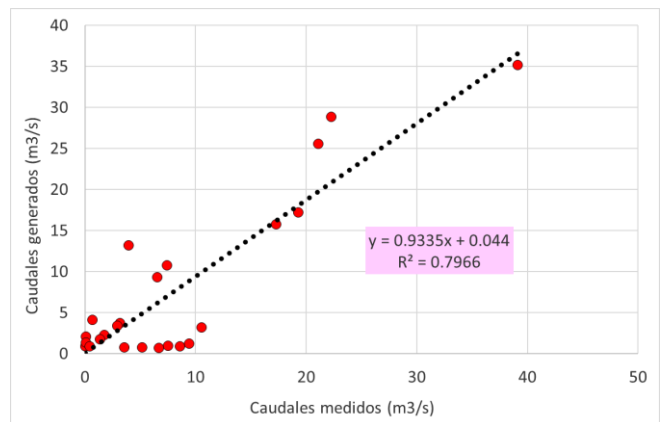


Fig.13 Correlación de  $R^2$  entre los caudales medidos y caudales generados para la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma en la validación

En la Figura 13 se presenta la comparativa de caudales estimados y medidos. Considerando una línea de tendencia lineal, se obtiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 79.66%.

### 5.3. Extensión de Caudales

Para finalizar, se usaron los valores de  $X_1$  y  $X_2$  de la validación para generar los caudales mensuales en el período de 01/01/1981 a 31/12/2015, pero antes se realizó una curva de reajuste entre los caudales generados y medidos para corregir el modelo. Con esta ecuación lineal mostrada en la figura 14 se corrigió y generó la serie de caudales que se ve en la figura 15.

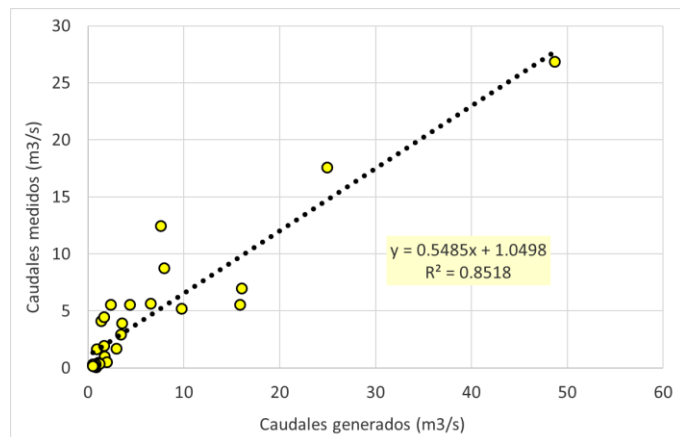


Fig.14 Correlación de  $R^2$  entre los caudales generados y caudales medidos para la cuenca Casma hasta la estación hidrométrica Tutuma en la validación

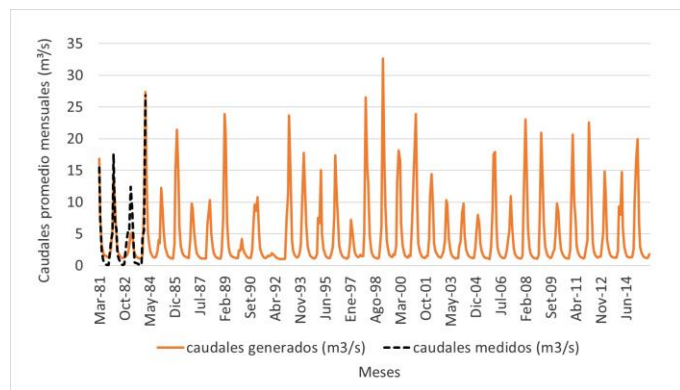


Fig.15 Comparativa mensual de caudales medidos (ANA) y caudales simulados (GR2M) para la Cuenca Casma en el periodo entre 01/01/1981 hasta el 31/12/2015

## VI. CONCLUSIONES

Según el análisis de esta investigación, se demostró un desempeño óptimo del modelo hidrológico. En la etapa de calibración, el valor del criterio de eficiencia de Nash fue 93.31%; en la validación, de 86.89%. Considerando el rango de valores, ambos se encuentran dentro de un rango excelente. Mostrando así el ajuste adecuado del modelo.

Obtuvimos coeficientes de correlación ( $R^2$ ) muy similares, ya que, estos son 80.41% para la calibración y 79.66% para la validación. El valor del criterio de Bilan en la primera etapa es 111.64% y en la siguiente es 101.18%.

Los caudales simulados en esta investigación servirán para futuros proyectos hidráulicos, construcción de represas para proyectos agrícolas y de control de máximas avenidas de irrigaciones cercanas a la estación hidrométrica Tutuma.

Si bien el tiempo de la calibración y validación frente al tiempo de la simulación es muy corto, en la figura 15 se aprecia la similitud de los datos generados, avalando así, que nuestros criterios de eficiencia representan de acuerdo a la Tabla II, una similitud “Excelente”.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Diario Exitosa (2023). Recuperado <https://www.exitosanoticias.pe/exitosa-peru/huaraz-crecida-rio-grande-afecta-puente-pampas-grande-n73759>
- [2] Ministerio de Agricultura (MINAGRI), (2007). Megaciudad en el desierto. Recuperado de <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3032>
- [3] Observatorio del Agua – ANA, (2023). Recuperado de <https://snirh.ana.gob.pe/observatoriosnirh/>
- [4] Instituto Geográfico Nacional (IGN), (2023). Recuperado de <https://www.gob.pe/ign>
- [5] Environmental Systems Research Institute (ESRI), (2023). Recuperado de <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm> Google Earth Engine, (2023). Recuperado de <https://earthengine.google.com/platform/>
- [6] Carmona, A. (2020). Code Google Earth Engine. Recuperado de <https://code.earthengine.google.com/a9d66b5bbc546d48be4756f6c401f98a>
- [7] Fernández et al. (2021). Lluvia para Perú y Ecuador (RAIN4PE). Potsdam Institute for Climate Impact Research Recuperado de <https://code.earthengine.google.com/b8f49ebdbbdeff0c0e8b102dfa23d6da>
- [8] Autoridad Nacional del agua (ANA), (2023). Recuperado de <https://www.ana.gob.pe/contenido/la-autoridad-nacional-del-agua>
- [9] Fernández et al. (2021). Lluvia para Perú y Ecuador (RAIN4PE). Potsdam Institute for Climate Impact Research Recuperado de <https://hllaica.github.io/posts/2023-06-04-quarto-blogs/>
- [9] Copernicus.eu (2018). Recuperado de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- [10] INRAE, 2023. Modèle du “Génie Rural à 4 paramètres Journalier. Recuperado de <https://webgr.inrae.fr/en/models/monthly-model-gr2m/description-of-the-gr2m-model/>
- [11] Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú. Recuperado de [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- [12] INRAE, 2023. Modèle du “Génie Rural à 4 paramètres Journalier . Recuperado de <https://webgr.inrae.fr/en/models/monthly-model-gr2m>