



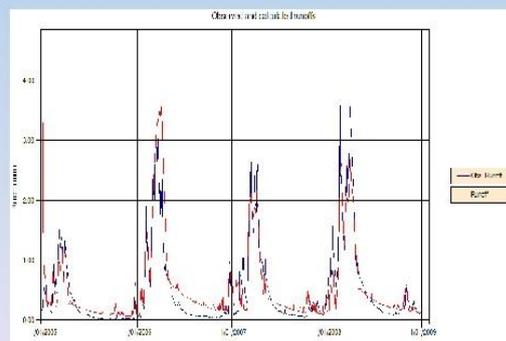
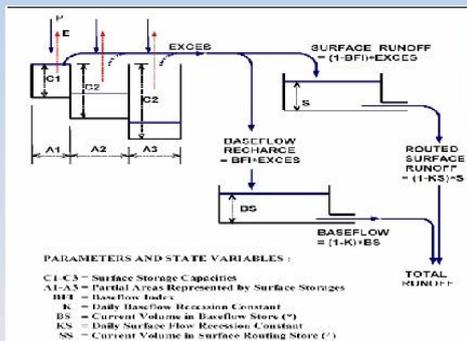
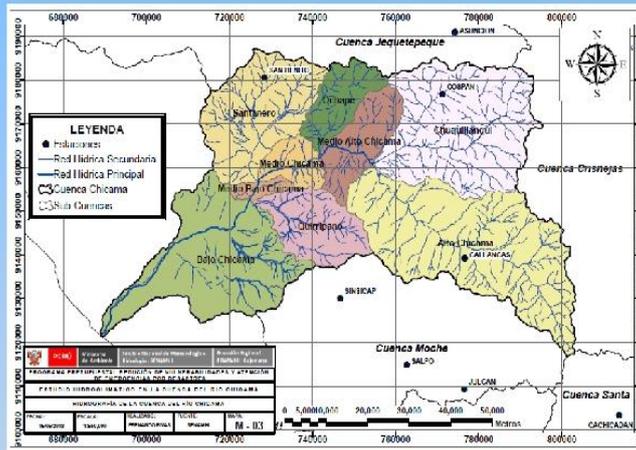
PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

PROGRAMA PRESUPUESTAL, REDUCCION DE VULNERABILIDAD Y ATENCION DE EMERGENCIAS POR DESASTRES - PREVAE

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMA



DICIEMBRE - 2013



**Presidenta Ejecutiva del SENAMHI**

Ing. Amelia Díaz Pabló

**Director Regional de Cajamarca**

Ing. Julio Urbiola del Carpio

**Coordinador General del PREVAE**

Ing. Fernando Arboleda Orosco

**Elaboración:** Ing. Fernando Rivas Alvarado

**Asesoramiento y Revisión:** Ing. Oscar Felipe Obando

**Diciembre - 2013**

**CAJAMARCA - PERÚ**

| ÍNDICE   | PÁG. |
|--|------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....   | 7    |
| <b>II. OBJETIVO</b> .....  | 8    |
| <b>III. MARCO TEÓRICO</b> .....  | 9    |
| <b>3.1. Descripción General de la Cuenca</b> .....                                 | 9    |
| 3.1.1. Ubicación .....   | 9    |
| 3.1.2. Demarcación hidrográfica.....   | 9    |
| 3.1.3. Demarcación política.....   | 10   |
| 3.1.4. Parámetros de forma y relieve de la cuenca.....                             | 10   |
| 3.1.5. Hidrografía .....   | 11   |
| <b>3.2. Descripción de los Modelos Lluvia-Escorrentía</b> .....                    | 12   |
| 3.2.1. Modelo GR4J .....   | 12   |
| 3.2.2. Modelo TANQUE.....  | 15   |
| 3.2.3. Modelo AWBM.....  | 19   |
| 3.2.4. Modelo SIMHYD.....  | 21   |
| 3.2.5. Modelo SACRAMENTO.....  | 24   |
| <b>3.3. Descripción del Método de Optimización</b> .....                           | 31   |
| 3.3.1. Algoritmos Genéticos .....  | 31   |
| <b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | 33   |
| <b>4.1. Materiales</b> .....   | 33   |
| <b>4.2. Metodología</b> .....  | 33   |
| 4.2.1. Análisis y selección de la información.....                                 | 33   |
| 4.2.2. Ordenamiento de la información.....   | 34   |
| 4.2.3. Calculo de la precipitación areal de la cuenca .....                        | 34   |
| 4.2.4. Calculo de la evapotranspiración en la cuenca.....                          | 35   |
| 4.2.5. Ingreso de la información al modelo GR4J.....                               | 36   |
| 4.2.6. Ingreso de la información al modelo TANQUE, AWBM, SACRAMENTO y SIMHYD ..... | 36   |
| <b>V. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....   | 36   |
| <b>5.1. Simulación de caudales diarios por el modelo TANQUE</b> .....              | 37   |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 5.2.        | <i>Simulación de caudales diarios por el modelo SACRAMENTO</i>              | 42 |
| 5.3.        | <i>Simulación de caudales diarios por el modelo SIMHYD</i>                  | 47 |
| 5.4.        | <i>Simulación de caudales diarios por el modelo AWBM</i>                    | 51 |
| 5.5.        | <i>Simulación de caudales diarios por el modelo GR4J</i>                    | 55 |
| 5.6.        | <i>Análisis comparativo entre los diferentes modelos lluvia-escorrentía</i> | 59 |
| <b>VI.</b>  | <b>CONCLUSIONES</b>   | 60 |
| <b>VII.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | 62 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura N°1.0 | Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del Río Chicama | 9  |
| Figura N°1.1 | Hidrografía de la Cuenca del Río Chicama              | 12 |
| Figura N°2.0 | Descripción del modelo lluvia-escorrentía GR4J        | 13 |
| Figura N°2.1 | Estructura del modelo lluvia-escorrentía “TANQUE”     | 16 |
| Figura N°2.2 | Estructura del modelo lluvia-escorrentía “AWBM”       | 20 |
| Figura N°2.3 | Estructura del modelo lluvia-escorrentía “SIMHYD”     | 22 |
| Figura N°2.4 | Estructura del modelo lluvia-escorrentía “SACRAMENTO” | 30 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Gráfico N°1.0 | Períodos de la calibración y validación para el modelamiento hidrológico  | 37 |
| Gráfico N°1.1 | Coefficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación-modelo TANKE                              | 38 |
| Gráfico N°1.2 | Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo TANKE – Cuenca Chicama        | 39 |
| Gráfico N°1.3 | Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo TANKE – Cuenca Chicama         | 39 |
| Gráfico N°1.4 | Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo TANKE – Cuenca Chicama | 39 |
| Gráfico N°1.5 | Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo TANKE – Cuenca Chicama  | 40 |

|   |    |
|---|----|
| Gráfico N°1.6 Moderada sensibilidad de los parámetros – Modelo TANQUE.....  | 40 |
| Gráfico N°1.7 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo TANQUE.....  | 41 |
| Gráfico N°1.8 Sensibilidad nula de los parámetros – Modelo TANQUE.....  | 42 |
| Grafica N°2.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo SACRAMENTO.....                             | 43 |
| Gráfico N°2.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama.....        | 44 |
| Gráfico N°2.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama.....         | 44 |
| Gráfico N°2.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama..... | 44 |
| Gráfico N°2.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama.....  | 45 |
| Gráfico N°2.5 Moderada sensibilidad de los parámetros – Modelo SACRAMENTO...45  |    |
| Gráfico N°2.6 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo SACRAMENTO.....  | 45 |
| Grafica N°3.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo SIMHYD.....                                 | 47 |
| Gráfico N°3.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama.....            | 48 |
| Gráfico N°3.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama.....             | 49 |
| Gráfico N°3.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama.....     | 49 |
| Gráfico N°3.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama.....      | 49 |
| Gráfico N°3.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo SIMHYD.....  | 50 |
| Gráfico N°3.6 sensibilidad nula de los parámetros – Modelo SIMHYD.....  | 50 |
| Grafica N°4.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo AWBM.....                                   | 51 |
| Gráfico N°4.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo AWBM – Cuenca Chicama.....              | 52 |
| Gráfico N°4.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo AWBM – Cuenca Chicama.....               | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Gráfico N°4.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo AWBM – Cuenca Chicama..... | 53 |
| Gráfico N°4.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo AWBM – Cuenca Chicama.....  | 53 |
| Gráfico N°4.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo AWBM.....  | 54 |
| Grafica N°5.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo GR4J.....                             | 55 |
| Gráfico N°5.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo GR4J – Cuenca Chicama.....        | 56 |
| Gráfico N°5.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo GR4J – Cuenca Chicama.....         | 57 |
| Gráfico N°5.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo GR4J – Cuenca Chicama..... | 57 |
| Gráfico N°5.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo GR4J – Cuenca Chicama.....  | 57 |
| Gráfico N°5.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo GR4J.....  | 58 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla N°1.0, Parámetros por defecto del modelo “TANQUE”.....     | 18 |
| Tabla N°1.1, Parámetros por defecto del modelo “AWBM”.....       | 21 |
| Tabla N°1.2, Parámetros por defecto del modelo “SIMHYD”.....     | 24 |
| Tabla N°1.3, Parámetros del modelo “SACRAMENTO”.....             | 26 |
| Tabla N°1.4, Parámetros por defecto del modelo “SACRAMENTO”..... | 29 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| Cuadro N° 1.0, Demarcación política de la cuenca del río Chicama.....  | 10 |
| Cuadro N° 1.1, Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Chicama.....  | 11 |
| Cuadro N° 1.2, Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Chicama.....  | 11 |
| Cuadro N° 2.0, Parámetros optimizados del modelo TANQUE.....   | 37 |
| Cuadro N°2.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo TANQUE –Cuenca del río Chicama..... | 38 |
| Cuadro N° 3.0, Parámetros optimizados del modelo SACRAMENTO.....   | 42 |

---

|  |    |
|--|----|
| Cuadro N°3.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo SACRAMENTO –Cuenca del río Chicama..... | 43 |
| Cuadro N° 4.0, Parámetros optimizados del modelo SIMHYD.....   | 47 |
| Cuadro N°4.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo SIMHYD –Cuenca del río Chicama.....     | 47 |
| Cuadro N° 5.0, Parámetros optimizados del modelo AWBM.....   | 51 |
| Cuadro N°5.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo AWBM –Cuenca del río Chicama.....       | 51 |
| Cuadro N° 6.0, Parámetros optimizados del modelo GR4J.....   | 55 |
| Cuadro N°6.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo GR4J –Cuenca del río Chicama.....       | 55 |
| Cuadro N°7.0, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación de los diferentes modelos lluvia-esorrentía.....   | 59 |

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los modelos matemáticos han tenido un impresionante desarrollo en todas las áreas del conocimiento humano, científico y de los recursos naturales en general.

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Un modelo hidrológico es pues una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática.

Por otro lado, una de la tareas fundamentales del hidrólogo es realizar el pronóstico de caudales para una determina cuenca hidrográfica en función a un punto de aforo, para aquello se deben usar modelos hidrológicos que no son más que representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca.

En el presente estudio denominado “**Modelización hidrológica de la cuenca del río Chicama**”, realizado en el marco de los estudios del PREVAE, tiene como objetivo evaluar diferentes modelos matemáticos de lluvia-escorrentía con fines de pronóstico de caudales. La calibración de los modelos se ha realizado con la información de caudales de la estación hidrológica TAMBO, utilizando 5 modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía a paso diario, modelos GR4J, TAMQUE, SACRAMENTO, AWBM Y SIMHY. En el caso de la modelización diaria se buscó obtener cuál de los diferentes modelos hidrológicos representa mejor el comportamiento de los caudales. Las ventajas de obtener una buena eficiencia en la etapa de calibración y validación del modelo es que nos permita utilizar el modelo para generar información de caudal a partir de los datos de lluvia y evapotranspiración con la finalidad de poder pronosticar caudales en un determinado lugar (estaciones de aforo) y anunciar alertas de riesgo ante la presencia de caudales que puedan provocar desbordamiento del río y por consiguiente afectar centros poblados.

## II. OBJETIVO

1. Realizar la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía GR4J en la cuenca del río Chicama
2. Realizar la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía TANQUE en la cuenca del río Chicama
3. Realizar la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía SACRAMENTO en la cuenca del río Chicama
4. Realizar la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía AWBM en la cuenca del río Chicama
5. Realizar la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía SIMHYD en la cuenca del río Chicama
6. Realizar un análisis comparativo entre los diferentes modelos lluvia-escorrentía utilizados en la simulación de caudales

### III. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

##### 3.1.1. Ubicación

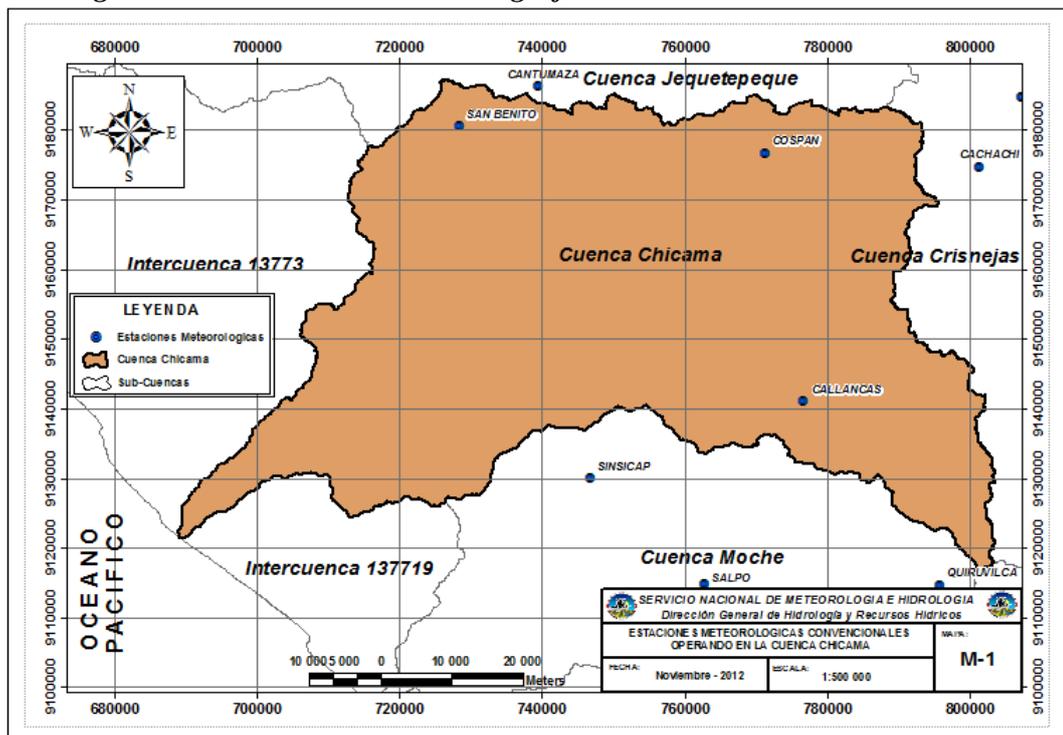
La cuenca del río Chicama está localizada entre las coordenadas UTM Norte 9110000 a 9190000, y coordenadas UTM Este 680000 a 820000; con una altitud que fluctúa entre los 500 y 4000 m.s.n.m.

##### 3.1.2. Demarcación hidrográfica

Hidrográficamente la cuenca del Río Chicama limita por el Norte con la cuenca del río Jequetepeque, por el sur con la cuenca del río Moche, por el este con la cuenca del río Crisnejas y por el oeste con el océano Pacífico. Tal como se muestra en la figura N°1.0

Posee 06 sub-cuencas, las cuales son: Sub-cuenca Río Huancay, Sub-cuenca Río Chuquillanqui, Sub-cuenca Río Ochape, Sub-cuenca Río Santanero, Sub-cuenca Río Quirripango, Sub-cuenca Media y Sub-cuenca Baja.

*Figura N°1.0 Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del Río Chicama*



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.3. Demarcación política

A continuación el cuadro N°1.0 muestra la demarcación política de la cuenca del río Chicama

*Cuadro N° 1.0, Demarcación política de la cuenca del río Chicama*

| Cuenca  | Departamento         | Provincia  |
|---------|----------------------|--|
| Chicama | Libertad y Cajamarca | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ascope</li> <li>• Santiago de Chuco</li> <li>• Otuzco</li> <li>• Gran Chimú-Cajamarca</li> <li>• Contumaza</li> </ul> |

Fuente: autoridad nacional del agua

### 3.1.4. Parámetros de forma y relieve de la cuenca

Las características físicas y funcionales de una cuenca hidrográfica pueden ser definidas como los diversos factores que determinan la naturaleza de la descarga en un curso de agua. El conocimiento de esas características, determina la naturaleza de descarga de los ríos, pueden ser agrupados en factores que dependen de las características físicas y de uso de la cuenca hidrográfica o factores fisiográficos y factores que dependen del clima, factores climáticos.

A continuación se describen los parámetros geomorfológicos de la cuenca:

Esta cuenca tiene un área de 4 517.7 Km<sup>2</sup>, una altitud media de 1 855 msnm y una pendiente media en el orden de 48 %. El Factor de Forma determinado es 0,37 lo cual nos estaría indicando que esta cuenca tiene regular respuesta a las crecidas, asimismo el Coeficiente de Compacidad determinado es 1,79 y que corresponden a cuencas de forma alargada (ver cuadro N°1.1).

**Cuadro N° 1.1, Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Chicama**

| Parámetros                              |                     | Cuenca del Chicama |
|---|---------------------|--------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )                 |                     | 4493.74            |
| Perímetro (Km)                          |                     | 427.8              |
| Altura Media (m)                        |                     | 1854.93            |
| Pendiente Media (%)                     |                     | 47.99              |
| Coeficiente de Compacidad (Kc)          |                     | 1.79               |
| Factor de Forma                         |                     | 0.37               |
| Rectángulo                              | Longitud Mayor (Km) | 190.28             |
| Equivalente                             | Longitud Menor (Km) | 23.62              |
| Longitud del Cauce Principal            |                     | 129.97             |
| Pendiente Media del Cauce Principal (%) |                     | 1.04               |

Fuente: autoridad nacional del agua

**3.1.5. Hidrografía**

La cuenca del río Chicama posee un drenaje hacia el Océano Pacífico en cual discurre Este a Oeste, comenzando desde las alturas de la cadena montañosa. Asimismo el río Chicama nace en las alturas de las provincias de Otuzco, Gran Chimú y Contumazá, en el cerro Collacuyan. Sus principales afluentes son los ríos Pinchaday, Huanca y San Felipe. La dirección general del río es de N.E. a S.O. La desembocadura del río Chicama está situada a 148 km al Norte de la desembocadura del río Santa, y a 32 km, al Norte del valle Santa Catalina.

La estación de aforo el TAMBO es la utilizada para la modelización de caudales del río Chicama, la cual controla 3680.7 Km<sup>2</sup> de la cuenca.

Los principales Afluentes del río Chicama se muestran en el cuadro N°1.2

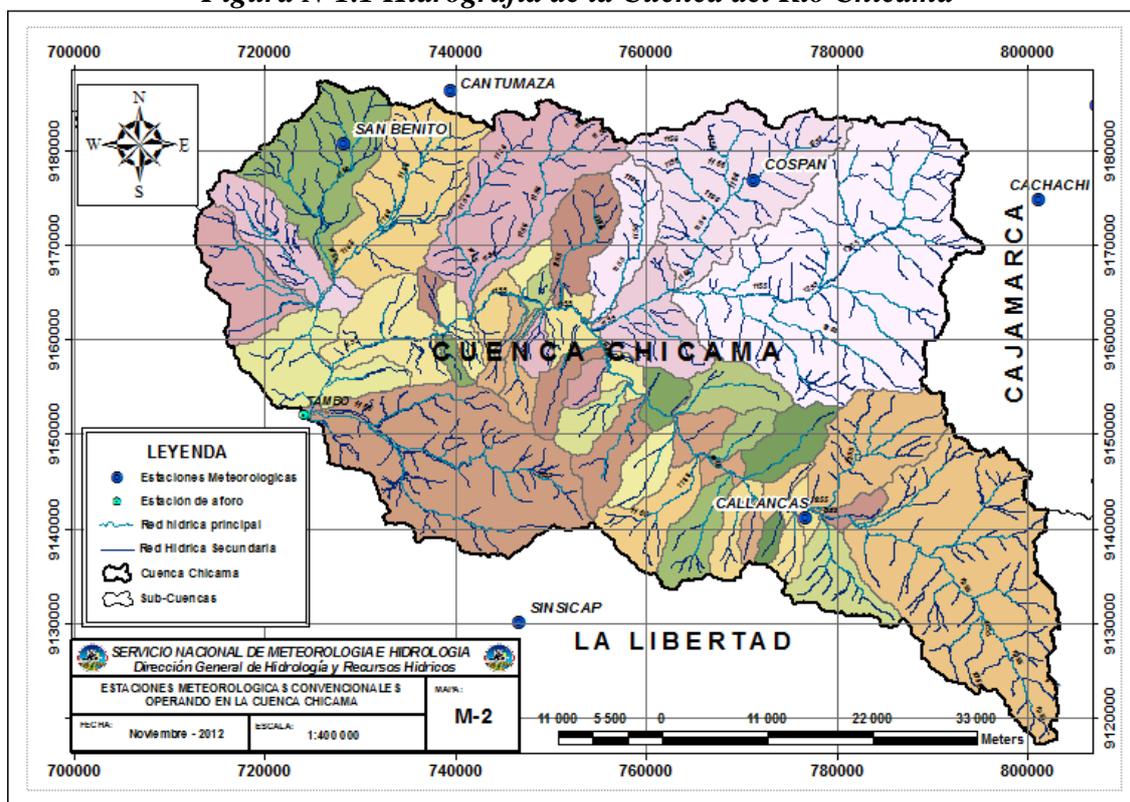
**Cuadro N° 1.2, Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Chicama**

| Cuenca Hidrográfica | Río Principal | Principales Afluentes   |   |
|---------------------|---------------|---|---|
|                     |               | Margen Derecha  | Margen Izquierda  |
| Chicama             | Río Chicama   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Río san Jorge</li> <li>• Río Cospan</li> <li>• Río Chepino</li> <li>• Río Santanero</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Río Huaranchal</li> <li>• Río Grande</li> <li>• Río Quirripiano</li> </ul> |

Fuente: autoridad nacional del agua

La figura N°1.1 muestra la delimitación hidrográfica de la cuenca del río Chicama a partir de la estación de aforo en tambo.

**Figura N°1.1 Hidrografía de la Cuenca del Río Chicama**



Fuente: elaboración propia

## 3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS LLUVIA-ESCORRENTÍA UTILIZADOS

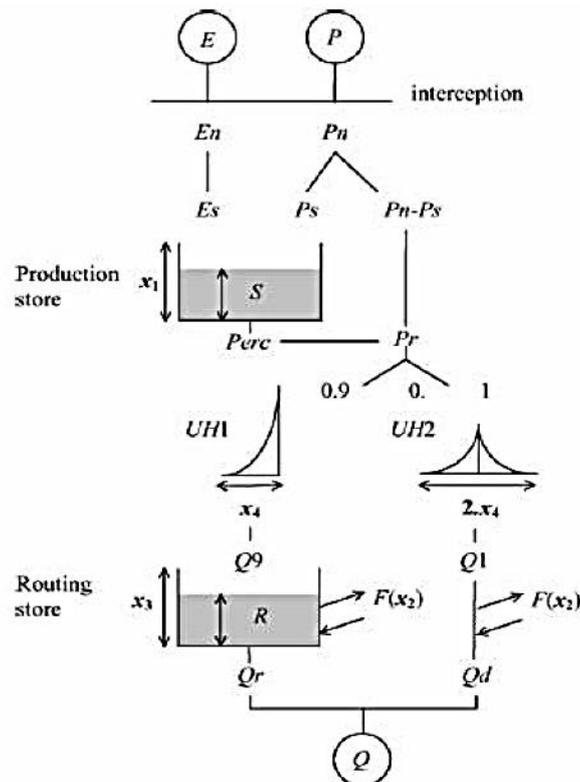
### 3.2.1. Modelo GR4J

#### 1. Descripción del modelo

GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier, siglas en Francés) es un modelo lluvia escorrentía, el cual se basa en 4 parámetros libres de datos de precipitación diaria. El objetivo es obtener con pocos parámetros las mejores simulaciones posibles del tal forma que la incertidumbre asociada al proceso de calibración no dependa fuertemente del número de parámetros del modelo. Este modelo fue desarrollado en Francia por Perrin *et al*, 2003. La calidad del ajuste es evaluado a través de 4 criterios de eficiencia calculados en el rango de caudales máximos,

medios y mínimos. En la figura N°2.0 se muestra la descripción general del modelo GR4J.

**Figura N°2.0 Descripción del modelo lluvia-escorrentía GR4J**



Fuente: Perrin et al., 2003

X1: Capacidad máxima de tanque de producción (mm).

X2: Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (mm).

X3: Capacidad máxima de tanque de enrutamiento (mm).

X4: tiempo base del hidrograma unitario UH1 (día).

En el estudio desarrollado por Perrin et al., el modelo GR4J ofrece mejores resultados que otros modelos lluvia-escorrentía. En este estudio, Perrin et al. uso 429 cuencas hidrográficas con diferentes climas. La descripción de los procesos físicos de lluvia a escurrimiento del modelo GR4J, se da de la siguiente manera.

El tanque de producción ( $x_1$ ), es el almacenamiento superficial del suelo, que puede almacenar las lluvias. En este tanque, se producen evapotranspiración y percolación. La capacidad de este tanque, depende del tipo de suelo de la cuenca hidrográfica. Poca porosidad del suelo puede permitir mayor almacenamiento en

el tanque de producción. Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (x2), es una función de intercambio de aguas subterráneas que incluyen en el tanque de enrutamiento. Cuando tiene un valor negativo, el agua ingresa a un acuífero profundo; cuando el valor es positivo, entonces el agua sale del acuífero al exterior (tanque de enrutamiento). Tanque de enrutamiento (x3), es el aumento de agua que puede ser almacenado en el suelo poroso. El valor del tanque de enrutamiento depende del tipo y humedad del suelo. Tiempo pico (x4), es el tiempo donde se forma el pico en la ordenada del hidrograma unitario del modelo GR4J. La ordenada de este hidrograma es creado a partir de la escorrentía, donde el 90% del caudal, es un flujo lento que se infiltra en el suelo y el 10% del caudal, es un flujo rápido que fluye sobre la superficie del suelo (ver figura N°2.0).

## 2. Metodología de calibración del modelo

Esta fase de calibración permite obtener los parámetros del modelo, para los cuales la serie simulada representa con mayor precisión la serie observada. Con el fin de optimizar los resultados del modelo GR4J, se utilizó la herramienta Solver de Microsoft Excel para obtener el conjunto de valores X1, X2, X3, X4, para los cuales los criterios de eficiencia son máximos.

Para estimar la bondad de ajuste de las calibraciones se utilizaron los criterios de eficiencia descritos a continuación:

$$E(Q) = 100x \left( \frac{\sum(Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum(\hat{Q}_i - Q_i)^2} \right)$$

$$E((Q)^{1/2}) = 100x \left( 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_i} - \sqrt{\hat{Q}_i})^2}{\sum(Prom(\sqrt{Q_i}) - \sqrt{Q_i})^2} \right)$$

$$E\left(\ln\left(Q - \frac{\bar{Q}}{40}\right)\right) = 100x \left( 1 - \frac{\sum\left(\ln\left(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40}\right) - \ln\left(\hat{Q}_i - \frac{\bar{Q}}{40}\right)\right)}{\sum\left(Prom\left(\ln\left(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40}\right)\right) - \ln\left(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40}\right)\right)} \right)$$

$$Balance = 100x \frac{\sum \hat{Q}_i}{\sum Q_i}$$

Dónde:  $Q_i$  es el caudal observado en el día  $i$ ,  $\widehat{Q}_i$  es el caudal simulado para el día  $i$  y  $\bar{Q}$  es el caudal medio de los caudales observados.

También se emplea para verificar la bondad del ajuste la comparación de la curva de duración de caudales registrados y simulados. Para evitar los efectos adversos de los valores iniciales de los parámetros del modelo, se definió como período de calentamiento el primer año de simulación para evaluar los criterios de eficiencia.

### **3.2.2. Modelo TANQUE**

#### **3.2.2.1. Descripción del modelo**

RRL (lluvia-escorrentía Library) simula el escurrimiento de cuencas mediante el uso de la precipitación diaria y los datos de evapotranspiración. Los modelos se pueden aplicar a zonas de captación de 10 km<sup>2</sup> a 10.000 km<sup>2</sup> en un paso de tiempo diario.

El modelo de tanque es un modelo muy simple, compuesto por cuatro tanques en vertical y en serie como se muestra en la Figura 2.1.

La precipitación es depositada en el tanque superior, y la evaporación se resta secuencialmente desde la parte superior hacia abajo del tanque. Como cada tanque se vacía el déficit de evaporación se toma del tanque siguiente hasta que todos los tanques están vacíos.

Las salidas de los puntos de venta secundarios son los escurrimientos calculados. La salida del tanque es superior considerado como escorrentía superficial, la salida del segundo tanque como el escurrimiento intermedio, desde el tercer tanque como sub-base y la escorrentía de salida del tanque de cuarto como flujo de base.

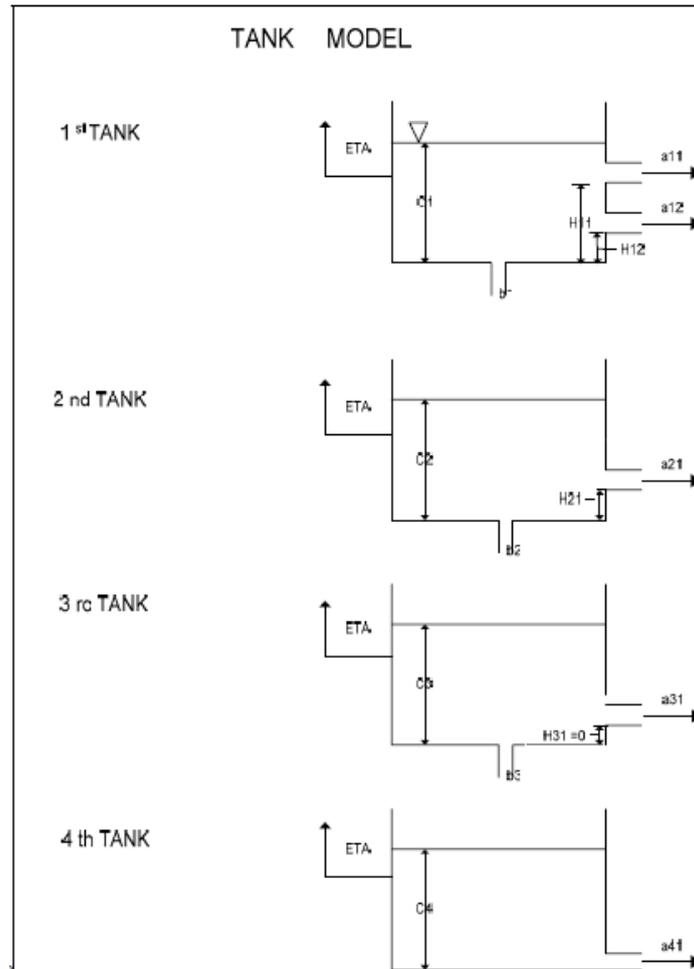
A pesar de esta conceptualización sencilla, el comportamiento del modelo de depósito no es tan simple. El comportamiento del modelo está fuertemente influenciada por el contenido de cada una de las tanques, bajo la misma cantidad de lluvia y volúmenes diferentes de almacenamiento de la escorrentía generada es significativamente diferente.

El modelo de depósito se aplica al análisis de descarga diaria de la precipitación diaria y entradas de evaporación. El concepto de pérdida inicial de la precipitación

no es necesario, ya que su efecto se incluye en la estructura no lineal del modelo de tanque.

Los parámetros utilizados en el modelo Tank son 18, los cuales reflejan el comportamiento físico en cuestión del tirante, salida del flujo superficial, sub-superficial, infiltración, flujo base, de los cuatro sistemas de almacenamiento, de acuerdo a la figura N° 2.1.

**Figura N°2.1 Estructura del modelo lluvia-escorrentía “TANQUE”**



Fuente: Rainfall Runoff Library

### 3.2.2.2. Escorrentía

El escurrimiento total se calcula como la suma de cada uno de los tanques mediante la expresión siguiente:

$$q = \sum_{x=1}^4 \sum_{y=1}^{nx} (C_x - H_{xy}) a_{xy}$$

Dónde:

$q$  = Escorrentía en profundidad (mm)

$C_x$  = Nivel de agua en el tanque x

$H_{xy}$  = Altura hasta la salida de escorrentía

$a_{xy}$  = Coeficiente de escorrentía hasta la salida de cada tanque respectivo.

Si el nivel de agua está por debajo de la salida no ocurre descarga o escorrentía de salida.

### 3.2.2.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es calculada usando la ecuación de Beken 1979.

$$ETA = ETA * \left( 1 - \exp \left( -\alpha \sum_{x=1}^4 C_x \right) \right)$$

Dónde:

ETA = Evapotranspiración en mm

$\alpha$  = Coeficiente de evapotranspiración (0.1)

$C_x$  = nivel de agua en cada tanque

ETP = evapotranspiración potencial (mm)

### 3.2.2.4. Infiltración

La infiltración en cada tanque es calculado usando la expresión siguiente

$$I_x = C_x B_x$$

Dónde:

$I_x$  = Infiltración en el tanque x en mm

$C_x$  = Nivel de agua en el tanque x

$B_x$  = Coeficiente de infiltración en el tanque x

### 3.2.2.5. Almacenamiento

La cantidad de agua en cada tanque afecta a la cantidad de lluvia, la infiltración, la evaporación y escorrentía. Los almacenamientos se calculan a partir de la parte superior a la parte inferior del tanque. La evaporación es inicialmente deducida de la primera de almacenamiento, hasta un máximo de la tasa potencial. El restante

de evapotranspiración potencial se toma de cada uno de los tanques inferiores hasta que la tasa potencial es alcanzada por todos los tanques que han sido evaporados.

Después que la evaporación se ha tomado de los tanques de precipitación se añade a la parte superior del tanque y basado en el nivel de escorrentía e infiltración revisado es estimado. Esta es posteriormente deducida a partir del nivel de almacenamiento. El siguiente tanque recibe posteriormente la infiltración desde el tanque de arriba. El proceso continúa a través de los otros tanques.

### 3.2.2.6. Rango de Variación de los Parámetros

El RRL (Rainfall Runoff Library) está configurado con un conjunto de valores por defecto para cada parámetro del modelo. Estos valores por defecto especifican al valor del parámetro inicial más los límites superior e inferior. La Tabla N°1.0 muestra los valores predeterminados para el modelo Tanque.

**Tabla N°1.0, Parámetros por defecto del modelo “Tanque”**

| Parámetros | Valor por defecto | Defecto Mínimo | Defecto Máximo |
|------------|-------------------|----------------|----------------|
| H11        | 0                 | 0              | 500            |
| A11        | 0.2               | 0              | 1              |
| A12        | 0.2               | 0              | 1              |
| A21        | 0.2               | 0              | 1              |
| A31        | 0.2               | 0              | 1              |
| A41        | 0.2               | 0              | 1              |
| Alfa       | 0.1               | 0              | 1              |
| B1         | 0.2               | 0              | 1              |
| B2         | 0.2               | 0              | 1              |
| B3         | 0.2               | 0              | 1              |
| C1         | 20                | 0              | 100            |
| C2         | 20                | 0              | 100            |
| C3         | 20                | 0              | 100            |
| C4         | 20                | 0              | 100            |
| H12        | 0                 | 0              | 300            |
| H21        | 0                 | 0              | 100            |
| H31        | 0                 | 0              | 100            |
| H41        | 0                 | 0              | 100            |

Fuente: Rainfall Runoff Library

### 3.2.3. Modelo AWBM

#### 3.2.3.1. Descripción del modelo

El AWBM es un modelo de balance de agua en una cuenca que puede relacionar escorrentía con precipitación a partir de datos horarios o diarios, además calcula las pérdidas por lluvia para el modelado del hidrograma de inundaciones. sin embargo el RRL está orientado a modelar a un paso de tiempo diario y AWBM no se ejecuta en los datos horarios. AWBM requiere como entrada la evapotranspiración, mientras que la mayoría de los modelos toman como dato de entrada la evapotranspiración potencial (PET)

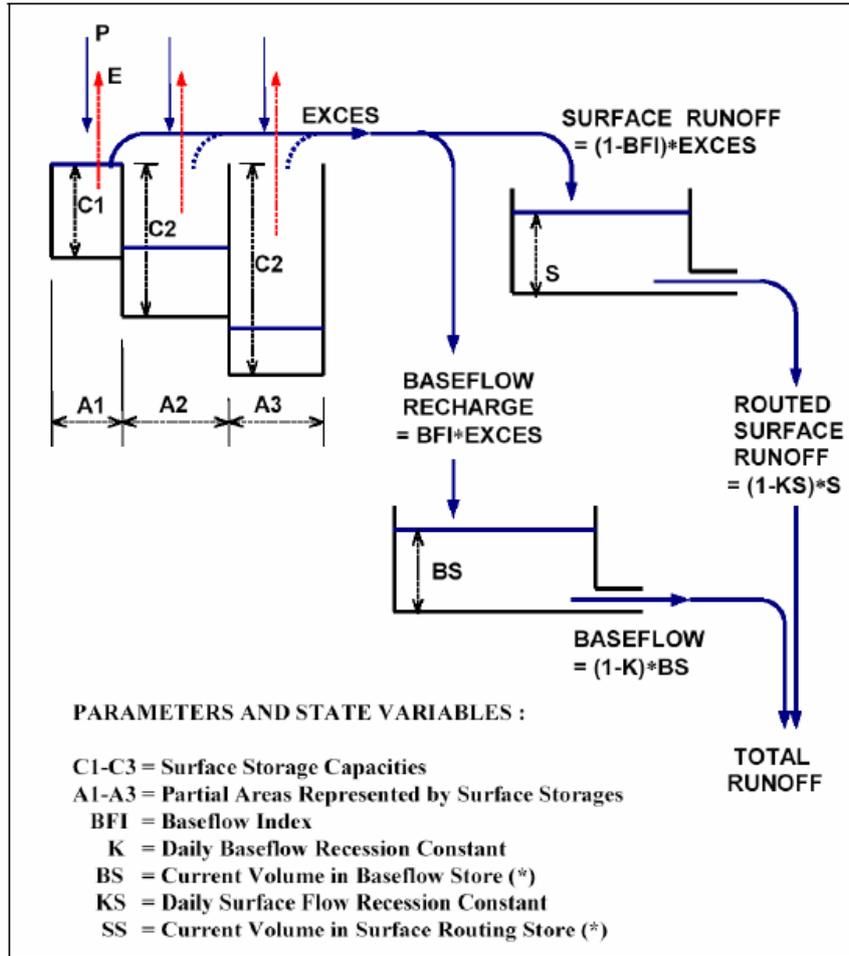
El modelo utiliza 3 superficies de almacenamiento para simular áreas parciales de escorrentía. El balance de agua de cada superficie de almacenamiento se calcula independientemente una de otra (ver figura N°2.2). El modelo calcula el equilibrio de humedad de cada zona parcial en cualquiera de los pasos de tiempo diarios o por hora. En cada paso de tiempo, la precipitación se añade a cada una de las 3 superficies de almacenamiento de humedad y la evapotranspiración es sustraída de cada almacén. La ecuación de balance de agua es la siguiente:

$$\text{store}_n = \text{store}_n + \text{rain} - \text{evap} \quad (n = 1 \text{ to } 3) \dots\dots\dots(8)$$

Si el valor de la humedad en el almacén se convierte en negativo, se repone a cero, ya que la demanda evapotranspiración es superior a la humedad disponible. Si el valor de la humedad en el almacén excede la capacidad de almacenamiento, la humedad en exceso se convierte en escorrentía y el almacén se restablece a su capacidad.

Los tres parámetros A1, A2 y A3 representan las proporciones de las áreas en donde las zonas de captación están limitadas, por lo que sólo A1 y A2 se puede ajustar. El patrón prefijado es A1 = 0,134, A2 = 0.433, A3 = 0. 433 siendo este patrón fijo (es decir, las herramientas de calibración no lo modificaran). Cuando A1 y / o A2 son cambiadas, A3 se ajustará para respetar la restricción. Si el usuario aumenta A1 y A3 no puede compensar, entonces A1 se reduce todavía a respetar la restricción.

**Figura N°2.2 Estructura del modelo lluvia-escorrentía “AWBM”**



Fuente: Rainfall Runoff Library

Cuando se produce escorrentía de cualquier almacén, parte del escurrimiento se convierte en la recarga del flujo base del almacén si hay flujo de base en el flujo de corriente. La fracción de la escorrentía utiliza para recargar el flujo base del almacén es  $BFI * \text{escorrimento}$ , donde  $BFI$  es el índice de flujo de base, es decir, la relación entre el flujo base y flujo total en el flujo de la corriente. El resto de la escorrentía, es decir  $(1,0 - BFI) * \text{escorrentía}$ , es la escorrentía superficial. El almacén de flujo base se agota a la velocidad de  $(1,0 - K) * BS$  donde  $BS$  es la humedad actual en el almacén de flujo base y  $K$  es la constante de recesión flujo base del paso de tiempo utilizado (día o cada hora).

El escurrimiento superficial se puede enrutar a través de un almacén si se requiere simular el retraso de la escorrentía superficial de llegar a la salida de un medio de captación grande. El almacén de superficie actúa de la misma manera como el

almacén de flujo de base, y se agota a la velocidad de  $(I,0 - KS) * SS$ , donde  $SS$  es la humedad actual en el almacén de la escorrentía superficial y  $KS$  es la constante de recesión de la escorrentía superficial del paso de tiempo que se utiliza.

### 3.2.3.2. Valores por defecto

La RRL está configurada con un conjunto de valores por defecto para cada parámetro del modelo. Estos valores por defecto especifican el valor del parámetro inicial más los límites superior e inferior para ese parámetro. La tabla N° 1.1 muestra los valores predeterminados para el modelo AWBM.

**Tabla N°1.1, Parámetros por defecto del modelo “AWBM”**

| Parámetros | Valores por defecto | Defecto mínimo | Defecto máximo |
|------------|---------------------|----------------|----------------|
| A1         | 0.134               | 0              | 1              |
| A2         | 0.433               | 0              | 1              |
| BF1        | 0.350               | 0              | 1              |
| C1         | 7                   | 0              | 50             |
| C2         | 70                  | 0              | 200            |
| C3         | 150                 | 0              | 500            |
| KBase      | 0.950               | 0              | 1              |
| KSurf      | 0.350               | 0              | 1              |

Fuente: Rainfall Runoff Library

## 3.2.4. Modelo SIMHYD

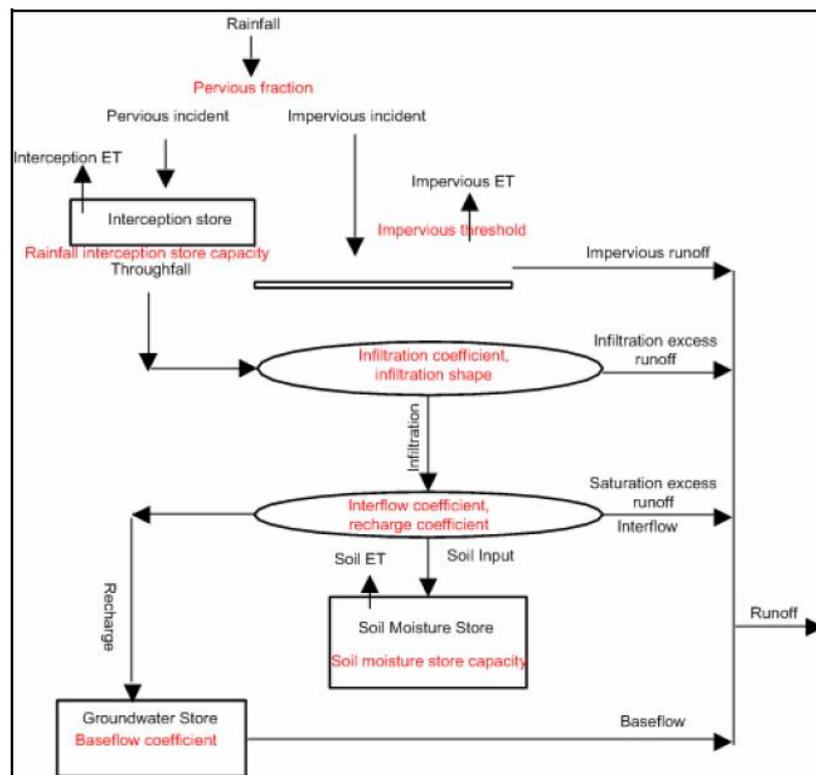
### 3.2.4.1. Descripción del modelo

SIMHYD es un modelo conceptual diario lluvia-escorrentía que estima el flujo de corriente a partir de los datos de precipitación diaria y evapotranspiración potencial.

SIMHYD es una versión simplificada del modelo conceptual diario lluvia-escorrentía y tiene 7 parámetros de calibración.

La estructura del simple agrupamiento conceptual diario del modelo lluvia-escorrentía, SIMHYD, se muestra en la Figura N°2.3

**Figura N°2.3 Estructura del modelo lluvia-escorrentía “SIMHYD”**



Fuente: Rainfall Runoff Library

En SIMHYD, la precipitación diaria primero llena la interceptación del almacén, que se vacía cada día por evaporación. El exceso de lluvia se somete entonces a una función de infiltración que determina la capacidad de infiltración. La precipitación en exceso que excede la capacidad de infiltración se convierte en escorrentía por exceso de infiltración.

La humedad que se infiltra se somete a una función de la humedad del suelo, que desvía el agua para corriente (interflujo), al almacén del agua subterránea (recarga) y al almacenamiento de la humedad del suelo. El flujo interno es estimado primero como una función lineal de la humedad del suelo (nivel de humedad del suelo dividida por la capacidad de humedad del suelo). La ecuación utilizada por lo tanto para simular el interflujo intenta imitar tanto el interflujo y saturación que son los procesos de escurrimiento en exceso. La recarga del agua subterránea se estima entonces, también como una función lineal de la humedad del suelo. La humedad restante fluye dentro del almacén de humedad del suelo.

Evapotranspiración del almacenamiento de la humedad del suelo se calcula como una función lineal de la humedad del suelo, pero no puede exceder la tasa atmosféricamente controlada de evapotranspiración potencial superficial. El almacén de la humedad del suelo tiene una capacidad finita y fluye hacia el almacenamiento del agua subterránea. Flujo de Base del almacén del agua subterránea se simula como una recesión lineal del almacenamiento.

El modelo, por tanto estima la generación de escorrentía a partir de tres fuentes - escorrentía por exceso de infiltración, interflujo (escorrentía por exceso de saturación) y el flujo base.

Las ecuaciones fundamentales del modelo son las siguientes:

- ✓  $\text{ImperviousET} = \min(\text{pet}, (1 - \text{perviousFraction}) * \text{perviousThreshold}, \text{imperviousIncident})$
- ✓  $\text{interceptionET} = \min(\text{perviousIncident}, \text{pet}, \text{rainfallInterceptionStoreCapacity})$
- ✓  $\text{infiltrationCapacity} = \text{perviousFraction} \times \text{infiltrationCoefficient} * \exp(-\text{infiltrationShape} * \text{soilMoistureFraction})$
- ✓  $\text{infiltration} = \min(\text{throughfall}, \text{infiltrationCapacity})$
- ✓  $\text{interflowRunoff} = \text{interflowCoefficient} * \text{soilMoistureFraction} * \text{infiltration}$
- ✓  $\text{infiltrationAfterInterflow} = \text{infiltration} - \text{interflowRunoff}$ ;
- ✓  $\text{recharge} = \text{rechargeCoefficient} * \text{soilMoistureFraction} * \text{infiltrationAfterInterflow}$
- ✓  $\text{soilInput} = \text{infiltrationAfterInterflow} - \text{recharge}$

#### 3.2.4.2. Valores por defecto

La RRL está configurado con un conjunto de valores por defecto para cada parámetro del modelo. Estos valores por defecto especifican el valor del parámetro inicial más los límites superior e inferior para ese parámetro. La Tabla N°1.2 muestra los valores predeterminados para el modelo SIMHYD.

**Tabla N°1.2, Parámetros por defecto del modelo “SIMHYD”**

| <i>Parámetros</i>                    | <i>Valor por defecto</i> | <i>Defecto Mínimo</i> | <i>Defecto Máximo</i> |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Baseflow Coefficient                 | 0.3                      | 0                     | 1                     |
| Impervious Threshold                 | 1                        | 0                     | 5                     |
| Infiltration Coefficient             | 200                      | 0                     | 400                   |
| Infiltration Shape                   | 3                        | 0                     | 10                    |
| Interflow Coefficient                | 0.1                      | 0                     | 1                     |
| Pervious Fraction                    | 0.9                      | 0                     | 1                     |
| Rainfall Interception Store Capacity | 1.5                      | 0                     | 5                     |
| Recharge Coefficient                 | 0.2                      | 0                     | 1                     |
| Soil Moisture Store Capacity         | 320                      | 1                     | 500                   |

Fuente: Rainfall Runoff Library

### 3.2.5. Modelo SACRAMENTO

#### 3.2.5.1. Descripción del modelo

El modelo Sacramento es un modelo continuo de lluvia-escorrentía utilizado para generar el caudal diario a partir del record de lluvia y evaporación. El diseño conceptual del modelo se muestra en la figura N° 2.4. En la cuenca los estudios de simulación a gran escala como los llevados a cabo en modelos como IQQM requieren registros a largo plazo de caudales continuos, que son generalmente imposibles. Sin embargo, a largo plazo, los registros de precipitación están más disponibles, y esto se puede combinar con datos de evaporación para calibrar un modelo de Sacramento frente a los datos de caudales a corto plazo, y por lo tanto ampliar o completar los períodos vacíos de información de caudales.

Al igual que con cualquier modelo, la precisión y la fiabilidad de los resultados del modelo de Sacramento están determinadas por el grado de representatividad del modelo en la cuenca, por la calidad de los datos de lluvia, evaporación y caudal. La exactitud y la fiabilidad del modelo se pueden evaluar utilizando los caudales simulados por el modelo y con los datos observados en la estación de aforo.

Como regla general, los valores de los parámetros calibrados de una cuenca de específica no deben ser transpuestos a otras cuencas, a menos que la fiabilidad de esta transposición se puede evaluar. El conjunto de parámetros es único para el tipo de clima, topografía, tamaño, geología, el suelo y la vegetación de la zona en

la que fue calibrado. No existe una metodología probada para ajustar estos parámetros a otras cuencas, incluyendo las subcuentas de la cuenca calibrada.

### **3.2.5.2. Principio del modelo SACRAMENTO**

El Modelo Sacramento utiliza la cantidad de humedad del suelo para simular el balance de agua dentro de la cuenca. El almacenamiento de la humedad del suelo se incrementa por la lluvia y se reduce por evaporación y por el flujo de agua fuera del almacenamiento. El tamaño y la humedad relativa del almacenamiento determinan la profundidad de precipitación absorbida, la evapotranspiración real, y la cantidad de agua que se mueve verticalmente o lateralmente fuera del almacén.

La precipitación en exceso de lo absorbido se transforma en escorrentía y se transforma a través de un hidrograma unitario empírico o dispositivo similar. Los movimientos laterales del almacenamiento de la humedad del suelo se superponen sobre esta escorrentía para generar caudal.

El modelo Sacramento utiliza un total de 16 parámetros para simular el balance hídrico. De ellos:

- 5 definen el tamaño de los almacenes de humedad del suelo
- 3 calculan la tasa de salidas laterales
- 3 calculan el agua de percolación desde la parte superior a inferior de los almacenes de humedad del suelo
- 2 calculan la escorrentía directa
- 3 calculan las pérdidas en el sistema

Estos parámetros se enumeran y describen en la Tabla N° 1.3

**Tabla N°1.3, Parámetros del modelo “SACRAMENTO”**

|       |                                   |  |
|-------|-----------------------------------|--|
| UZTWM | mm                                | Zona alta de máxima tensión de agua, El volumen máximo de agua retenida por la zona alta entre la capacidad de campo y punto de marchitamiento cual se puede perder evaporación directa y la evapotranspiración de la superficie del suelo. Este almacenamiento se llena antes cualquier agua en la zona superior transfiriéndose a otros almacenamientos. |
| UZFWM | mm                                | Zona alta de máxima agua libre, este almacenamiento es la fuente de agua para el interflujo y la fuerza impulsora para la transferencia de agua a mayores profundidades.   |
| LZTWM | mm                                | Zona baja de máxima tensión del agua, es la capacidad máxima de la zona baja de tensión de agua. El agua de este almacenamiento sólo puede ser removido a través de la evapotranspiración.   |
| LZFSM | m                                 | Zona Baja de máximo volumen de Agua libre , el volumen máximo del cual el flujo base primario puede ser atraído  |
| LZFPM | mm                                | Zona baja de máxima agua libre primaria, es la capacidad máxima del cual el flujo base puede ser atraído.  |
| UZK   | 1/day                             | La proporción de agua en UZFWM, que drena como interflujo cada día.  |
| LZSK  | 1/day                             | La proporción de agua en LZFSM que drena como flujo de base de cada día.   |
| LZPK  | 1/day                             | La proporción de agua en LZFPM, que drena como flujo de base de cada día.  |
| PFREE | -                                 | El porcentaje mínimo de percolación desde la zona superior a la zona baja directamente disponible para la recarga del almacenamiento de agua libre en la zona baja.  |
| REXP  | -                                 | Un exponente determinación de la tasa de cambio de la velocidad de percolación con el cambio de almacenamiento de agua en la zona más baja.  |
| ZPERC | -                                 | El factor aplicado a Pbase para definir máximo caudal de percolación.  |
| SIDE  | -                                 | La fracción decimal del flujo base observado, que sale de la cuenca, como flujo de agua subterránea.   |
| SSOUT | m <sup>3</sup> /S/Km <sup>2</sup> | El volumen del flujo que puede ser transmitido por el material poroso en el lecho de la corriente.   |
| PCTIM | -                                 | La fracción impermeable de la cuenca, y contribución a la escorrentía directa.   |
| ADIMP | -                                 | La fracción adicional de área permeable, que desarrolla las condiciones y las características impermeables de saturación del suelo.  |
| SARVA | -                                 | Una fracción decimal que representa la parte de la cuenca normalmente cubierto por los arroyos, lagos y vegetación que puede agotar el caudal por evapotranspiración.  |

Fuente: Rainfall Runoff Library

**3.2.5.3. Almacenamiento**

Hay cinco almacenes en el Modelo de Sacramento:

1. Zona Alta de tensión del agua (UZTW)
2. Zona Alta de agua libre (UZFW)
3. Zona de Baja de tensión del agua (LZTW)
4. Zona de baja de agua libre primaria (LSFWP)
5. Zona baja de agua libre suplementaria (LZFWS)

Las reservas de agua de tensión representan el volumen de agua que se mantiene en la matriz del suelo por la tensión superficial. El agua sólo puede ser retirada del almacenamiento de tensión por la evapotranspiración. En los almacenamiento de agua libre el agua puede moverse a través del suelo verticalmente a otros almacenes o lateralmente como interflujo (zona superior) o como flujo base (zona inferior).

El movimiento del agua a través de los almacenes está determinado por reglas, donde el almacén del UZTW recibe la primera lluvia, y cuando esto se llena de agua irá al almacén UZFW. El almacén de UZFW entonces suministra agua a los almacenes inferiores simultáneamente. Asimismo cuando el LZFW se llena de agua irán las reservas de agua por tensión.

#### **3.2.5.4. Flujo de generación**

Caudal generado con el modelo Sacramento se compone de tres componentes de flujo:

1. Escorrentía Superficial
2. Interflujo
3. Flujo Base

La generación de estos componentes depende de la cantidad de agua en cada en cada almacén que la capacidad de estos y la velocidad a la que el agua se mueve dentro y fuera de los mismos.

La escorrentía superficial se da manera directa u ocurre cuando el UZTWS se encuentra completamente lleno, o cuando la precipitación excede la suma de la tasa de infiltración y la máxima capacidad de drenaje del interflujo

Flujo interno se genera a partir de los UZFWS como el producto del volumen de agua en el almacenamiento, y un parámetro de tasa de drenaje, UZK. El flujo de base se calcula de una manera similar a interflujo, usando el volumen de agua en el almacén libre de la zona baja con sus correspondientes parámetros de la velocidad de escurrimiento, LZPK y LZSK. El flujo base se reduce por parámetros de pérdida de canal, laterales y SSOUT.

### 3.2.5.5. Evaporación

La evapotranspiración sólo puede realizarse a partir de las reservas de agua de tensión superior e inferior de tensión, las reservas de agua libre superior, y directamente de los arroyos. El límite superior de la evaporación es la demanda de evaporación, y es el producto de la evaporación del tanque modificada por el factor de tanque (especificado por el usuario). La evaporación se produce en primer lugar a partir de las UZTWS, luego de las UZFWS, y por último de los LZTWS. La evaporación puede ocurrir también directamente de la corriente tal como se establece por SARVA.

### 3.2.5.6. Percolación

La percolación del almacenamiento más bajo es un proceso clave del Modelo de Sacramento. La fuerza motriz para la filtración es la humedad relativa de los UZFWS como moderadas por la humedad relativa de los almacenes de la zona inferior.

Cuando la percolación aumenta puede suceder que el almacén en el UZFW aumente o decrezca en la zona más baja. Esto es equivalente a aumentar respectivamente la oferta y la demanda. Por el contrario, la percolación decrece cuando el almacén masa bajo empieza a llenarse.

El límite inferior de percolación,  $P_{base}$ , se produce cuando las zonas inferiores están saturadas y a su vez están determinadas por la velocidad con la cual drenan hacia las zonas inferiores tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{base} = LZFSM * LZSK + LZFPM * LZPK$$

La velocidad máxima de percolación se produce cuando las zonas inferiores están secas, y el  $P_{base}$  se factoriza usando el parámetro  $ZPERC$ , tal como se muestra a continuación.

$$PERC_{MAX} = P_{base}(1 + ZPERC)$$

La percolación real es moderada por la saturación relativa de las zonas inferiores y superiores, cual es la relación del almacenamiento real y el máximo en el depósito, para dar una estimación de percolación. Tal como se muestra en la siguiente ecuación

$$Perc = Pbase[1 + Zperc * [1 - LZ_{rs}]^{Rexp}] * UZ_{rs}$$

Normalmente, el almacenamiento en la zona baja podría llenarse antes que el agua se mueva a la zona de almacenamiento de agua libre. Sin embargo, las variaciones en los tipos de suelos puede causar desviaciones de las condiciones promedio y por lo tanto en el modelo de Sacramento una fracción de la percolación (PFREE) se hace disponible para la zona baja de almacenamiento de agua libre.

### 3.2.5.7. Herramientas de acción retardada

La escorrentía directa e interflujo puede retrasarse para representar mejor el hidrograma de caudales. El Modelo Sacramento utiliza un hidrograma unitario para este propósito. Cada eje de ordenadas representa la proporción de flujo que se llega a la salida del canal en períodos de tiempo sucesivos. El Modelo Sacramento también utiliza un proceso de enrutamiento en capas.

### 3.2.5.8. Otros factores

Otras entradas que también pueden ser alterados en el proceso de calibración incluye el parámetro RSERV.

### 3.2.5.9. Valores por defecto

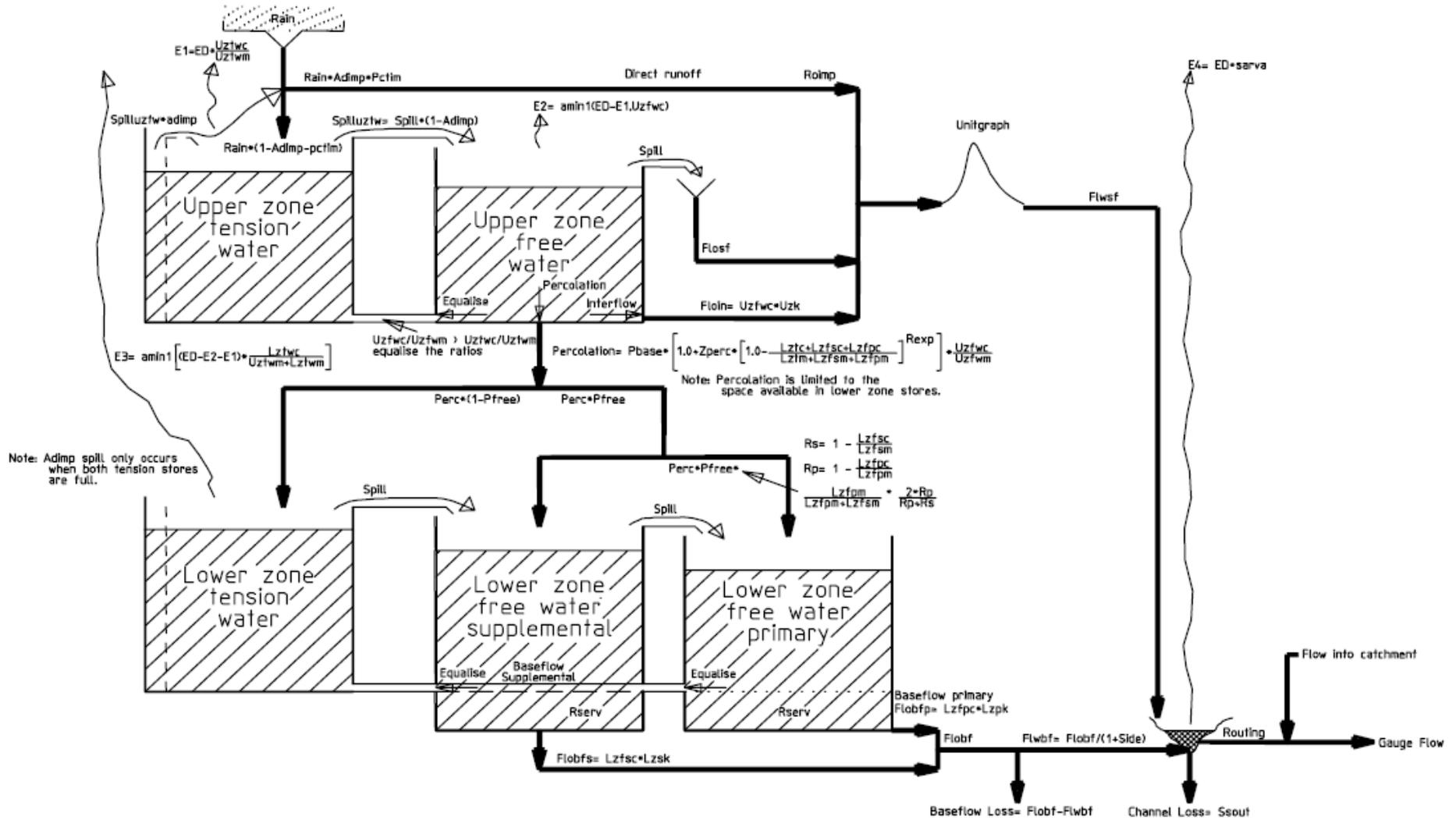
La RRL está configurado con un conjunto de valores por defecto para cada parámetro del modelo. Estos valores por defecto especifican el valor del parámetro inicial más los límites superior e inferior. La Tabla N°1.4 muestran los valores predeterminados para el modelo Sacramento.

**Tabla N°1.4, Parámetros por defecto del modelo “SACRAMENTO”**

| Parámetros        | ADIMP | LZFPM | LZFSM | LZPK  | LZSK  | LZTWM | PCTIM | PFREE | REXP | RSERV | SARVA | SIDE | SSOUT | UZFWM | UZK   | UZTWM | ZPERC |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valor por defecto | 0.01  | 40    | 23    | 0.009 | 0.043 | 130   | 0.01  | 0.063 | 1    | 0.3   | 0.01  | 0    | 0.001 | 40    | 0.245 | 50    | 40    |
| Defecto mínimo    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Defecto máximo    | 1     | 50    | 50    | 1     | 1     | 400   | 1     | 1.000 | 3    | 1     | 1     | 1    | 1.000 | 80    | 1.000 | 100   | 80    |

Fuente: Rainfall Runoff Library

Figura N°2.4 Estructura del modelo lluvia-escorrentía “SACRAMENTO”



Fuente: Rainfall Runoff Library

### 3.3.DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN

#### 3.3.1. Algoritmos Genéticos

El algoritmo genético es un procedimiento de búsqueda basado en la mecánica de la selección natural y la genética natural, que combina una supervivencia artificial de los más fuertes con los operadores genéticos extraídos de la naturaleza,[Holland, 1975].

Las búsquedas de algoritmos genéticos en una población de puntos trabaja con una codificación del conjunto de parámetros en lugar del valor parámetro que se valora, utiliza reglas probabilísticas de transición.

Una población de m (100) puntos se eligen inicialmente al azar en el espacio de búsqueda. Los valores de la función objetivo se calculan en todos los puntos y se compara. Desde estos puntos, dos puntos son seleccionados al azar. Los puntos seleccionados se utilizan a continuación para generar un nuevo punto de una cierta manera aleatoria con perturbación ocasionalmente añadido al azar. Esto se repite hasta que m (100) puntos nuevos son generados. Los puntos generados se espera que se concentre en las proximidades de los óptimos de los puntos originales. Los puntos de nueva población, que de nuevo se pueden utilizar para generar otro y así sucesivamente, produciendo más y más puntos en la vecindad de los óptimos.

##### 3.3.1.1. Parámetro de codificación

El algoritmo genético trabaja con la codificación de los parámetros. El método de codificación de parámetros que se ha utilizado se llama codificación binaria. Una variable binaria l bits se usa para representar un parámetro xi. El número entero de los rangos de las variables binarios descodificados de 0 a (2<sup>l</sup> - 1) y se pueden asignar linealmente al rango del parámetro [a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>]. El rango del parámetro es discretizado en puntos 2<sup>l</sup> y en el intervalo de discretización siguiente:

$$\Delta x_i = \frac{b_i - a_i}{2^l - 1}$$

### 3.3.1.2. Método de búsqueda

La búsqueda se lleva a cabo con los siguientes pasos:

- a) Localizar  $m$  puntos al azar en el espacio de búsqueda ( $m = 100$  se puede utilizar)
- b) Busque el valor de la función objetivo en cada punto.
- c) Ranking de los valores de la función objetivo en orden descendente.
- d) Asigne un valor de probabilidad  $p_j$  para cada punto  $j = 1, 2, \dots, m$ , dando mayor probabilidad a puntos con un valor de función inferior. El peor momento después de la clasificación es  $j = 1$ , y su  $p_1$  valor de probabilidad será la más pequeña. El mejor punto es  $j = m$ , y su probabilidad  $p_m$  valor será el más grande. Los valores de probabilidad para los demás puntos son linealmente interpolados como:

$$P_j = P_1 + \frac{P_m - P_1}{m - 1} (j - 1)$$

- e) Seleccionar dos puntos A y B de los  $m$  puntos al azar de acuerdo con la distribución de probabilidad  $p_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .
- f) Seleccionar dos posiciones de bit,  $K_1$  y  $K_2$ , a lo largo de la codificación general del conjunto de parámetros al azar, dando a cada posición de bit la misma probabilidad. Si  $k_1 > k_2$ , sus valles se intercambian.
- g) Formar un nuevo punto tomando los valores de los bits de  $k_1$  a  $k_2-1$  del punto A codificación y los valores de los bits  $K_2$  de la y de 1 a  $k_1-1$  de la codificación de punto b.
- h) En ocasiones cambiar algunos de los bits del punto recién formado. Un poco valor 0 se convertirse en 1 y viceversa. Esto ocurre a cada bit sólo un  $p_m$  de probabilidad muy pequeña ( $p_m = 0,01$  se usado).
- i) Repita los pasos (e) y (h),  $m$  veces para que los  $m$  puntos nuevos se producen. Los  $m$  puntos originales son reemplazadas por las nuevas, formando una nueva base de datos para la búsqueda aún mejor.
- j) Repita los pasos (b) y (i). El mejor punto encontrado hasta ahora siempre se graba. La terminación de la búsqueda se especifica por un número total de evaluaciones de funciones.

Los pasos (f) y (g) forman el núcleo del método, los mejores puntos tienen una mejor oportunidad de ser elegidos para formar nuevos puntos. Esto es análogo a la supervivencia del más apto en la teoría de la selección natural. Los individuos tienen mejores índices para producir más descendencia.

Un nuevo punto se forma tomando diferentes bloques de bits de los códigos de los dos puntos originales. Esto es análogo a un cruce en la teoría de la genética. Un descendiente toma algunos de los genes de un padre y algunos de la otra. La combinación de la selección y la reproducción aumenta el nivel de rendimiento de la población en el proceso que sigue adelante. El cambio ocasional de los valores de bit en el paso (h) es análogo a la mutación en la teoría de la genética y se proporciona cierta variación de fondo.

## **IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1.MATERIALES**

Los materiales utilizados en este estudio se presentan a continuación:

- Información de precipitación diaria de las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca (registro histórico 2005-2010)
- Información de caudales diarios de la estación de aforo el tambo (registro histórico 2005-2010)
- Imágenes raster de evapotranspiración a nivel mensual (de enero a diciembre)
- Shapefile de la cuenca de estudio delimitada a partir de la estación de aforo el TAMBO
- Programa office 2010, Arcgis 9.3, HYDRACCESS 4.3.
- Modelos GR4J, TANK, SACRAMENTO, AWBM y SIMHYD.

### **4.2.METODOLOGÍA**

#### **4.2.1.Análisis y selección de la información**

Para la selección del período de información de la precipitación diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca, se tomó como referencia la estación de aforo el tambo en la cual poseía una serie histórica completa y continua de 6 años para realizar el modelamiento.

#### 4.2.2. Ordenamiento de la información

Para el ordenamiento de la precipitación diaria de creo una base de datos en HYDRACCESS 4.3, para lo cual se realizó el siguiente proceso:

1. Creación de una hoja de cálculo EXCEL que contenga como información los códigos de las estaciones ,los nombres de las estaciones ,el nombre zona a cual pertenece la cuenca de estudio, el nombre de la cuenca, la latitud y longitud de la estaciones meteorológica
2. Creación de un libro Excel con diferentes hojas de cálculo para cada estación meteorológica, el cual contenga como información para cada una de ellas el código de la estación, el captor del HYDRACCESS 4.3 que identifica que los datos de entrada son diarios, la fechas de registro de información de la precipitación, el valor del dato de precipitación y el origen.
3. Creación de una base datos vacía en el programa HYDRACCESS 4.3
4. Importación en la base de datos vacía los 2 archivos Excel creados en los pasos 1 y 2.

#### 4.2.3. Calculo de la precipitación areal de la cuenca

En este paso se utilizó el programa HYDRACCESS para la determinación de la precipitación areal en la cuenca, en donde se utilizó 3 métodos de cálculo, los cuales son: Inversa de la distancia ponderada, Thiessen y Kriging. A continuación se detalla el proceso de cálculo en el programa HYDRACCESS 4.3:

1. Abrir el programa HIDRACCES e ir a la opción **UTILITARÍOS** y elegir la opción **cálculo de los valores medios de la cuenca**
2. Dentro de valores medio de la cuenca ir a **Archivos/Limite Cuenca/Shape Arcwiev** y escoger el Shapeflieid de la cuenca a estudiar.

3. Ir a **Archivos/Archivo MultiEstacion Excel** y elegir el archivo Excel que contenga en la información de precipitación de las estaciones meteorológicas.
4. Para el caculo de la precipitación areal de la cuenca ir a **Procesamientos** y escoger el método que se desea utilizar para el cálculo, entre ellos el programa posee *Inversa de la distancia ponderada, Thiessen y Kriging*
5. Por ultimo para visualizar el valor de precipitación areal de la cuenca ir a **Guardar/Valores Medios** en donde aparecerá la información en una hoja de cálculo Excel la cual posteriormente deberá ser guardad.

#### 4.2.4. Calculo de la evapotranspiración en la cuenca.

Para el cálculo de esta variable se utilizó el programa ArcGis 9.3 e imágenes rasters de evapotranspiración a nivel mensual, las cuales fueron trabajadas individualmente mes a mes siguiendo el proceso descrito a continuación:

1. Abrir el programa ArcGis 9.3 y cargar la imagen raster de evapotranspiración
2. Abrir el ArcToolbox del programa ArcGis 9.3 e ir a **conversión tool/Raster to Point** en donde transformaremos la imagen raster de evapotranspiración a un shapefield de puntos
3. Abrir la tabla de atributos del shapefield de puntos que contiene la información de evapotranspiración, hacer clic derecho sobre el campo que contiene la información de evapotranspiración, luego hacer click izquierdo y buscar la opción **Statistics** y seleccionar el valor medio de la evapotranspiración la cual será el valor representativo de evapotranspiración de la cuenca.
4. Calcular la evapotranspiración diaria de la cuenca dividiendo la evapotranspiración mensual calculada en el paso anterior entre el número de días del mes.

#### **4.2.5. Ingreso de la información al modelo GR4J**

Este modelo se encuentra configurado en un libro Excel en donde la información necesaria para el modelamiento es el área de cuenca Km<sup>2</sup>, la precipitación areal en mm, la evapotranspiración en mm y los caudales observados en m<sup>3</sup>/s. El método de optimización de parámetros que se utilizó para este modelo es el **SIMPLEX**.

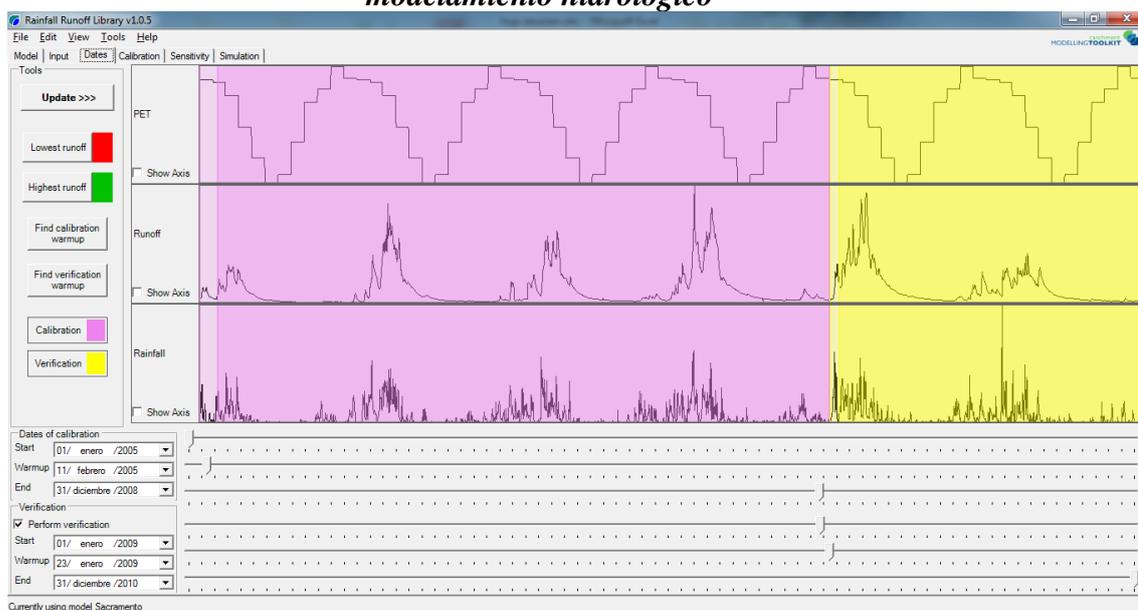
#### **4.2.6. Ingreso de la información al modelo TANQUE, AWBM, SACRAMENTO y SIMHYD**

El paquete *Rainfall Runoff Library (RRL) v1.05* es una plataforma hidrológica que administra los modelos *TANQUE*, *AWBM*, *SACRAMENTO* Y *SIMHYD* los cuales fueron utilizados para este estudio, en donde la información necesaria para el modelamiento es el área de cuenca en Km<sup>2</sup>, la precipitación areal en mm, la evapotranspiración en mm y los caudales observados en m<sup>3</sup>/s, mm. Asimismo esta información tiene que estar incorporada individualmente dentro de archivos de formato **cdt**, formato necesario para ser leídos por los modelos en mención.

## **V. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Para los diferentes modelos utilizados en este estudio, se utilizó la misma información histórica diaria de precipitación, evapotranspiración y de caudales diarios; la muestra se dividió de la siguiente manera: el período 2005-2008 como período de calibración y 2009-2010 como período de validación, tal como se muestra en el gráfico N° 1.0.

**Gráfico N°1.0 períodos de la calibración y validación para el modelamiento hidrológico**



Fuente: Rainfall Runoff Library

### 5.1.SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS POR EL MODELO TANQUE

Para este modelo se tomó como método de optimización de los parámetros el criterio de *algoritmos genéticos*, en donde se programó al modelo que realice un máximo de 10000 iteraciones, encontrando de esta forma los parámetros más adecuados para la obtención de la máxima eficiencia de Nash tanto en la etapa de calibración y validación. El cuadro N°2.0 muestra los parámetros del modelo tanque en donde se adquirió la mayor eficiencia de Nash.

**Cuadro N° 2.0, Parámetros optimizados del modelo TANQUE**

| CASO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | a11   | a12   | a21   | a31   | a41   | alfa | b1    | b2    | b3    | c1 | c2 | c3 | c4 | H11 | H12 | H21 | H31 | H41 |
|------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A    | Genetic Algorithm      | 0.608 | 0.239 | 0.471 | 0.867 | 0.569 | 4    | 0.043 | 0.318 | 0.008 | 16 | 64 | 4  | 85 | 327 | 198 | 0   | 98  | 51  |

Fuente: TANK MODEL

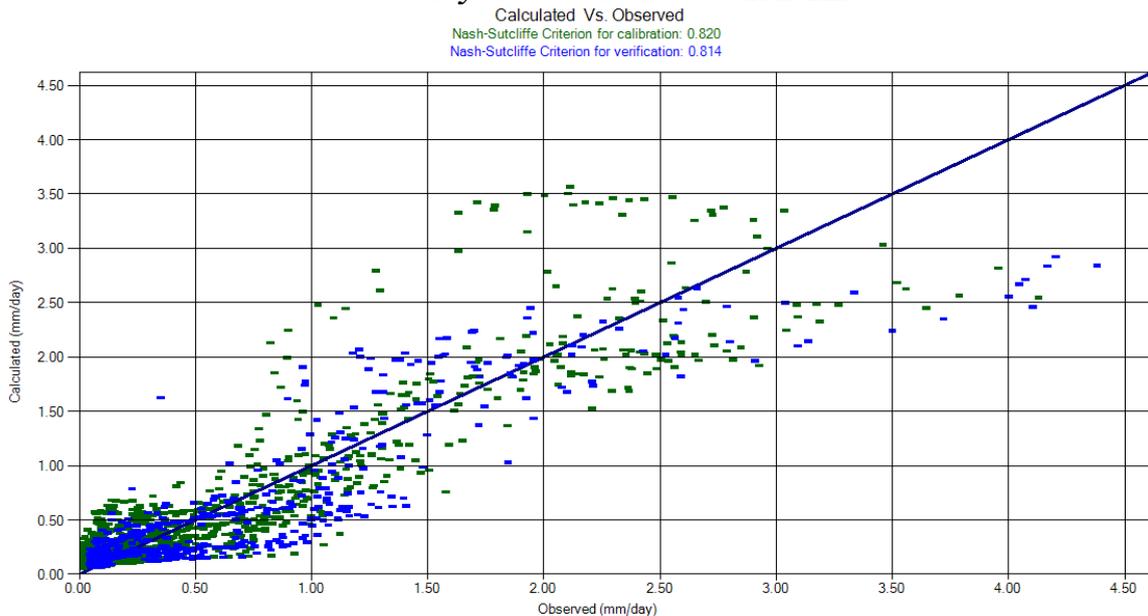
Con los parámetros mostrados en el cuadro N°2.0, los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.820 y 0.814 respectivamente. Tal como se muestra en el cuadro N°2.1 y en el gráfico N°1.1

**Cuadro N°2.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo TANQUE –Cuenca del río Chicama**

| CASO | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| A    | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.820            | 0.814             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: TANK MODEL

**Gráfico N°1.1 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación- modelo TANKE**

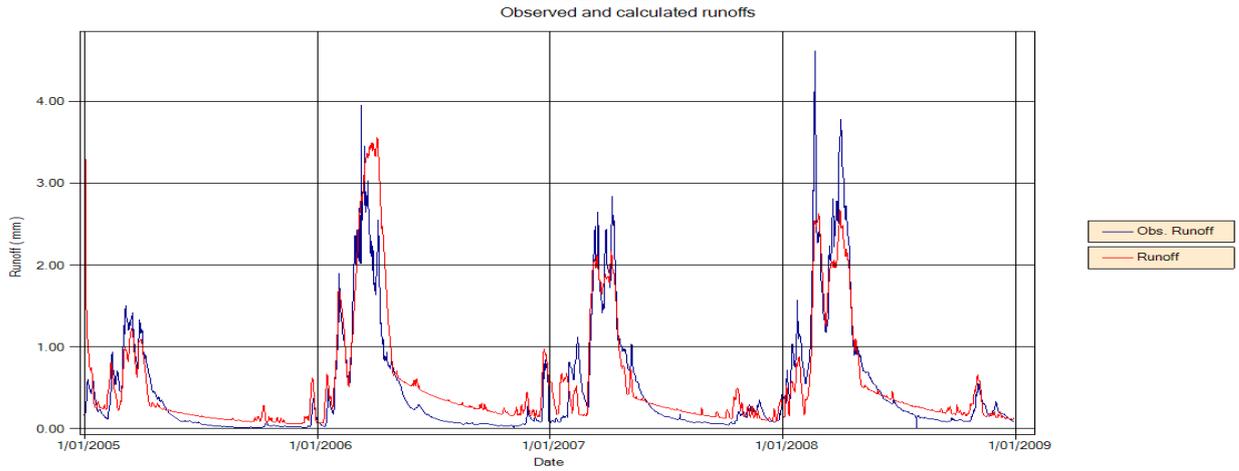


Fuente: TANK MODEL

Con respecto a los hidrograma generados por los caudales simulados y observados se observa que el modelo tanque no representa adecuadamente el caudal base por lo cual lo sobre estima tanto en la etapa de calibración y validación, además en los diferentes años el modelo no representa los caudales picos que fueron registrado en la estación el tambo. A continuación los hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración y validación se muestran en los gráficos N°1.2 y 1.3.

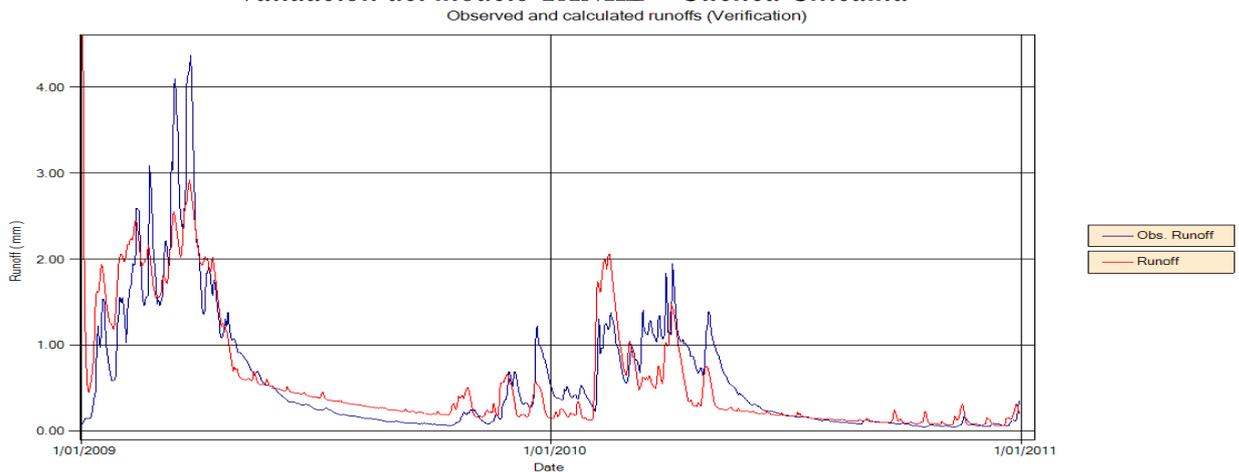
Por otro lado, se observa que la curva de duración generada con los caudales observados y simulados en la etapa de calibración son semejantes, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia (probabilidades de que los caudales puedan ser igualados o excedidos) es cercana a 0. Asimismo en la etapa de validación las curvas número no presentan un ajuste significativo a partir de una probabilidad de 0 a 40%. Tal como se muestran en las gráficas N° 1.4 y 1.5.

**Gráfico N°1.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo TANKE – Cuenca Chicama**



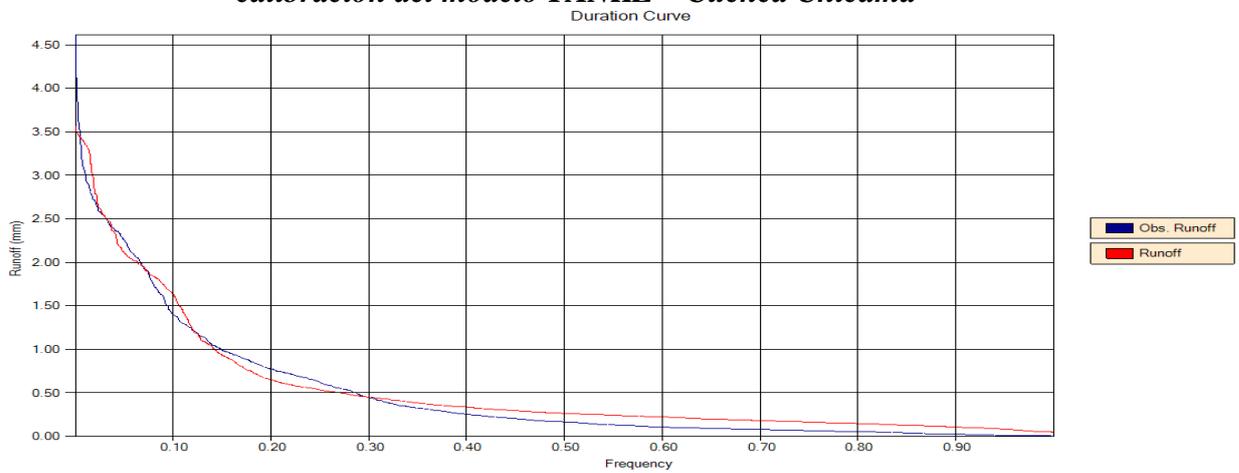
Fuente: TANK MODEL

**Gráfico N°1.3 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo TANKE – Cuenca Chicama**



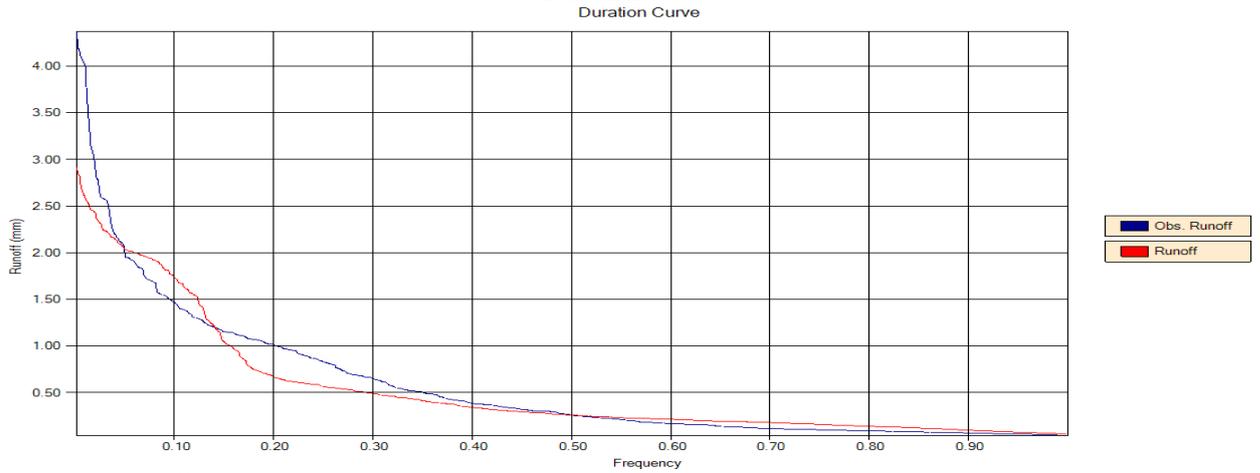
Fuente: TANK MODEL

**Gráfico N°1.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo TANKE – Cuenca Chicama**



Fuente: TANK MODEL

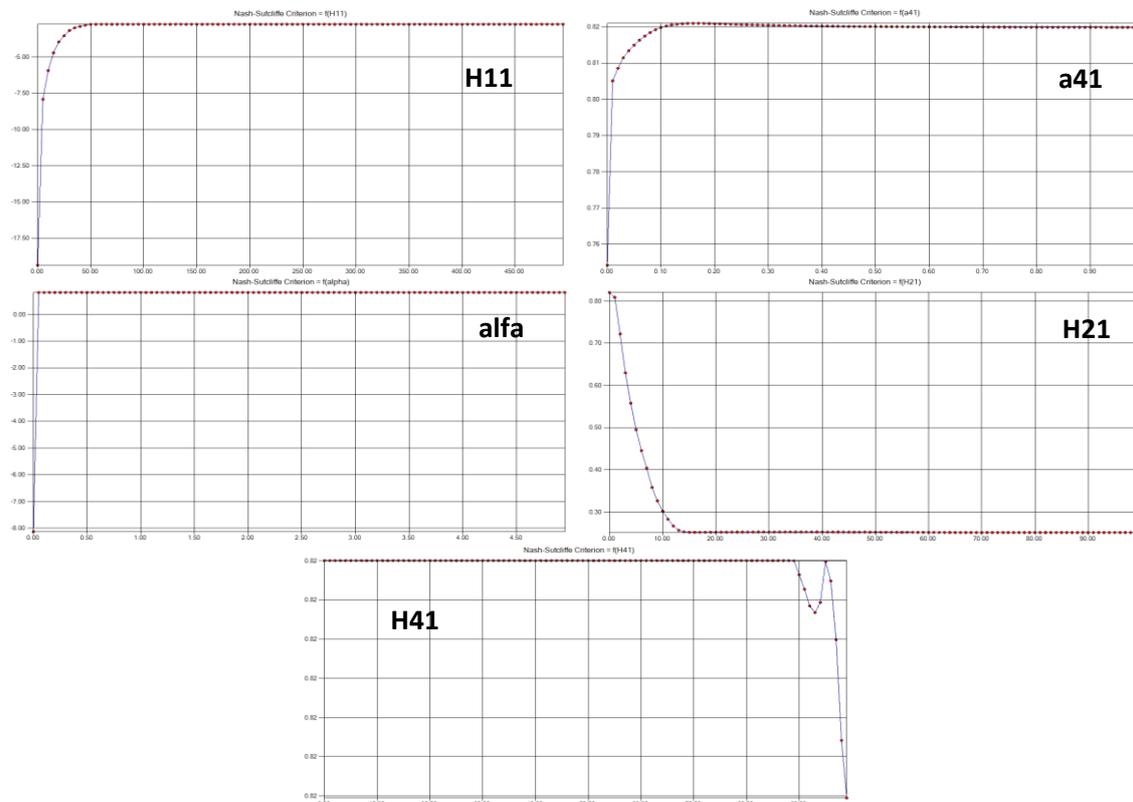
**Gráfico N°1.5 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo TANKE – Cuenca Chicama**



Fuente: TANK MODEL

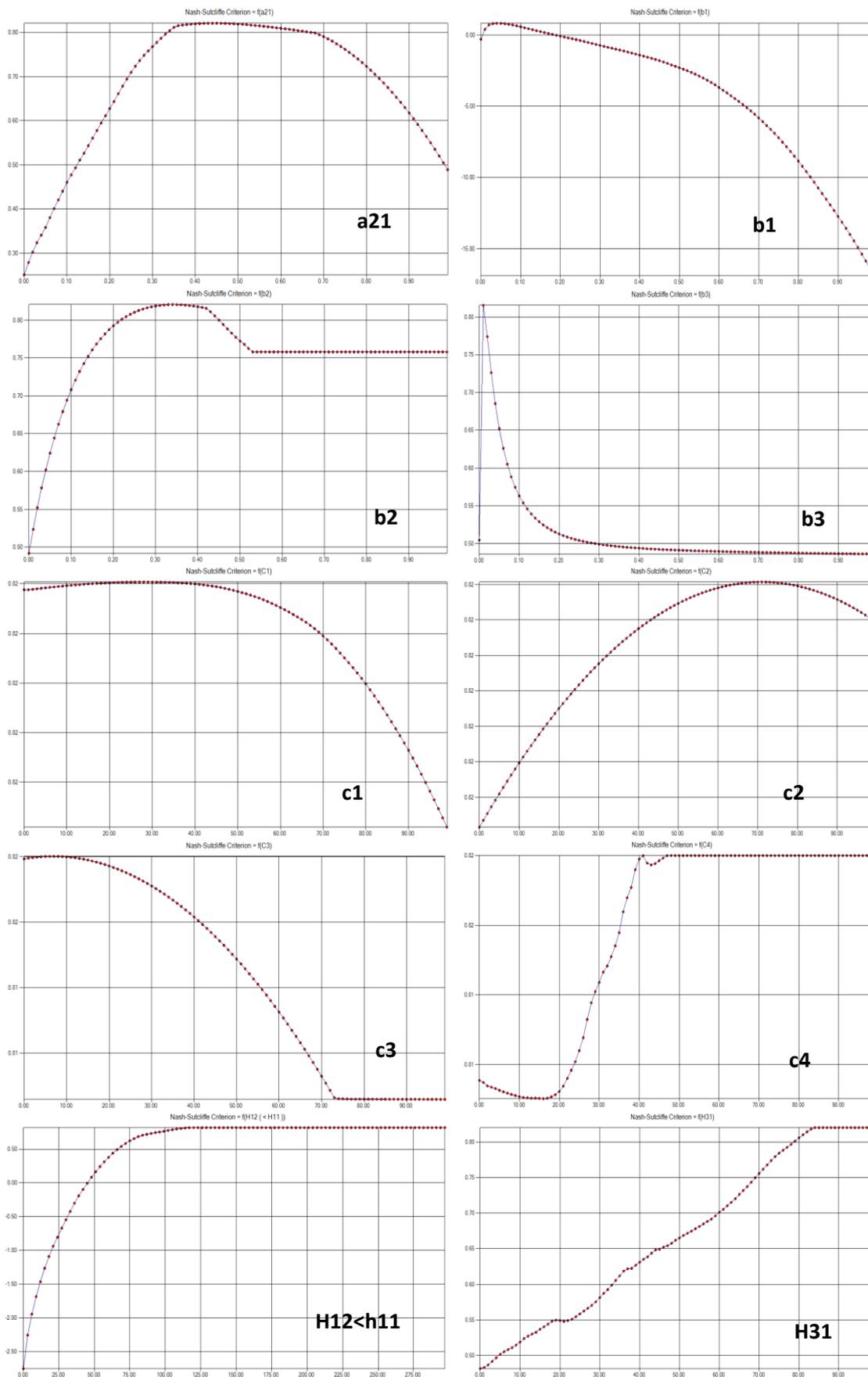
El modelo Tanque tiene 18 parámetros de los cuales 15 presentan moderada y alta sensibilidad respecto al coeficiente de Nash optimizado. Tal como se muestra en los gráficos N° 1.6, 1.7 y 1.8.

**Gráfico N°1.6 Moderada sensibilidad de los parámetros – Modelo TANQUE**



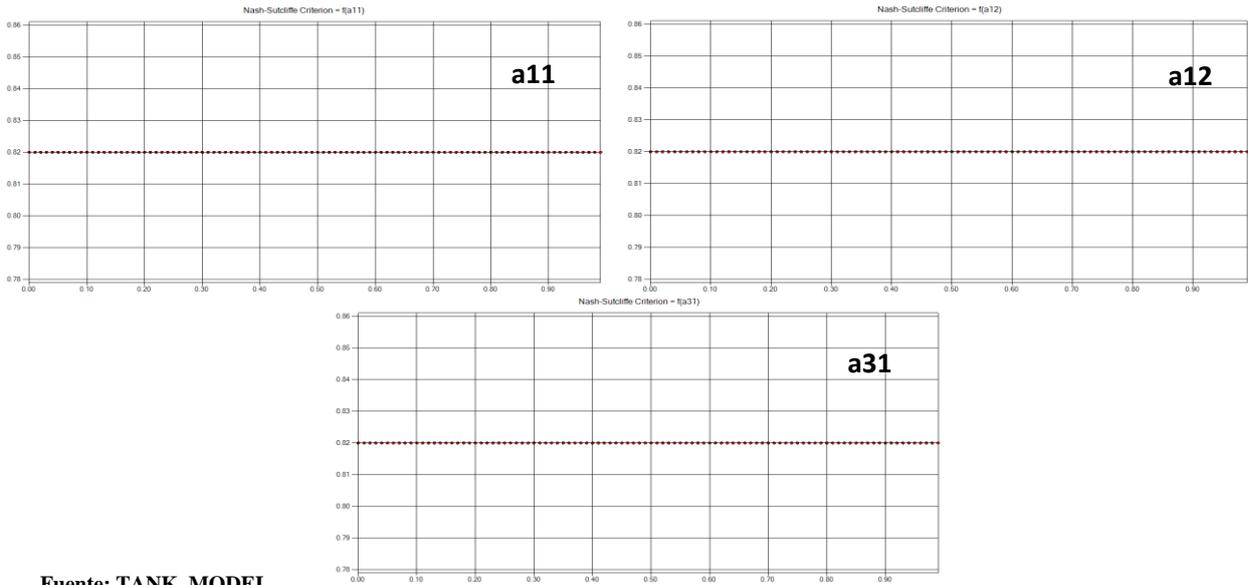
Fuente: TANK MODEL

### Gráfico N°1.7 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo TANQUE



Fuente: TANK MODEL

**Gráfico N°1.8 Sensibilidad nula de los parámetros – Modelo TANQUE**



Fuente: TANK MODEL

**5.2.SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS POR EL MODELO SACRAMENTO**

Para este modelo se tomó como método de optimización de los parámetros el criterio de *algoritmos genéticos*, en donde se programó al modelo que realice un máximo de 10000 iteraciones, encontrando de esta forma los parámetros más adecuados para la obtención de la máxima eficiencia de Nash tanto en la etapa de calibración y validación. El cuadro N°3.0 muestra los parámetros del modelo sacramento en donde se adquirió la mayor eficiencia de Nash.

**Cuadro N° 3.0, Parámetros optimizados del modelo SACRAMENTO**

| CASO | METODO DE OPTIMIZACIÓN   | ADIMP | LZFPM | LZFSM | LZPK | LZSK | LZTWM | PCTIM | PFREE | REXP | RSERV | SARVA | SIDE | SSOUT | UZFWM | UZK  | UZTWM | ZPERC |
|------|--------------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| A    | Nash-Sutcliffe Criterión | 0.01  | 50    | 50    | 0.03 | 0.02 | 392   | 0     | 0.7   | 1.62 | 0.24  | 0     | 0    | 0     | 80    | 0.04 | 13    | 3     |

Fuente: SACRAMENTO MODEL

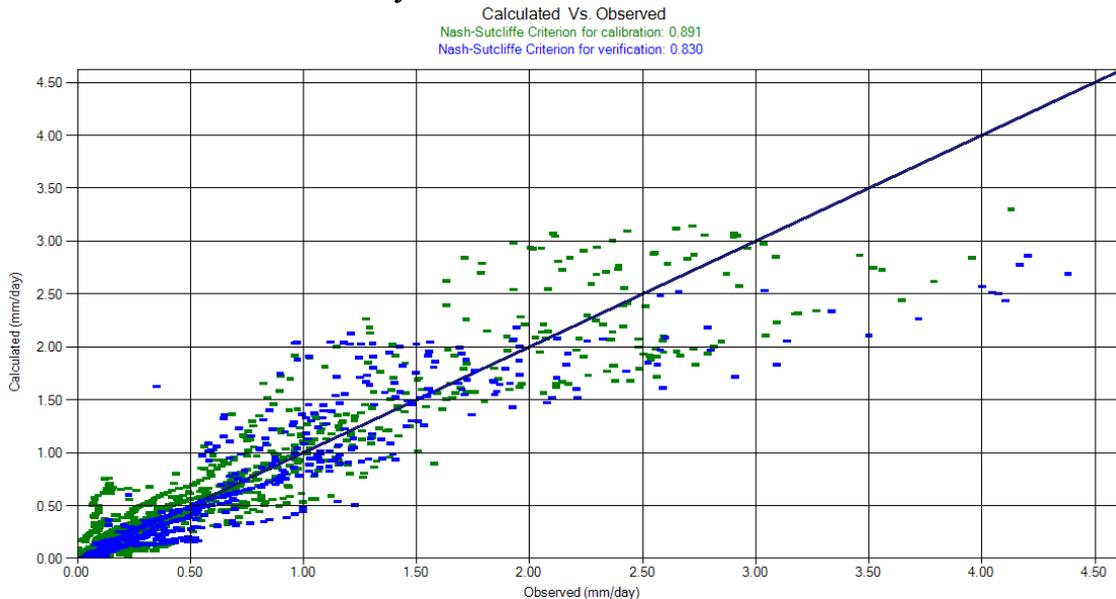
Con los parámetros mostrados en el cuadro N°3.0, los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.892 y 0.83 respectivamente. Tal como se muestra en el cuadro N°3.1 y la gráfica N°2.0

**Cuadro N°3.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo SACRAMENTO –Cuenca del río Chicama**

| CASO | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| A    | Nash-Sutcliffe Criterion | None                | Genetic Algorithm      | 0.892            | 0.83              | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: SACRAMENTO MODEL

**Grafica N°2.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo SACRAMENTO**

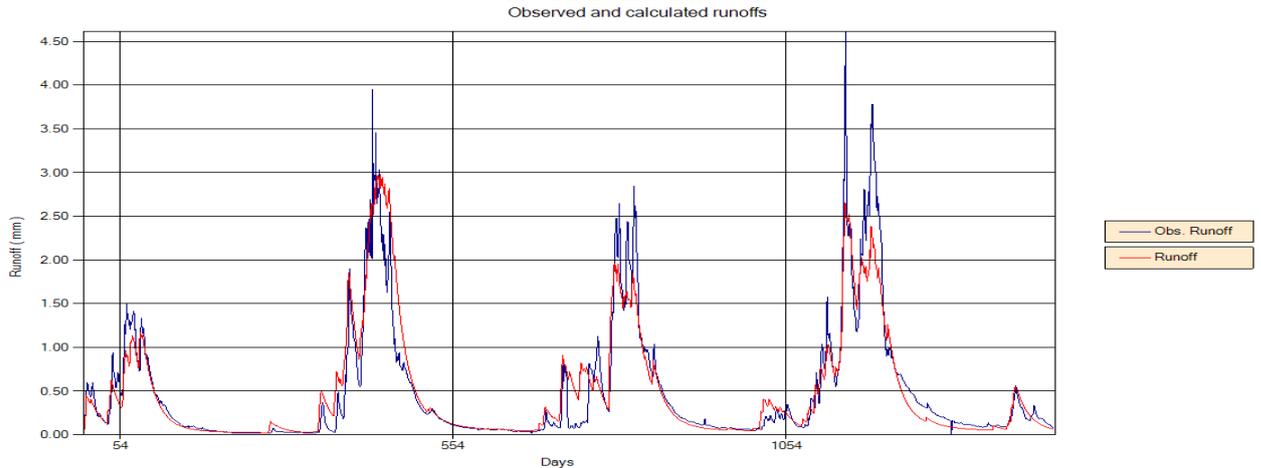


Fuente: SACRAMENTO MODEL

Con respecto a los hidrograma generados por los caudales simulados y observados se observa que el modelo Sacramento representa adecuadamente el caudal base en la etapa de calibración y validación, además en los diferentes años el modelo no representa los caudales picos que fueron registrado en la estación el tambo. A continuación los hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración y validación se muestran en los gráficos N°2.1y 2.2.

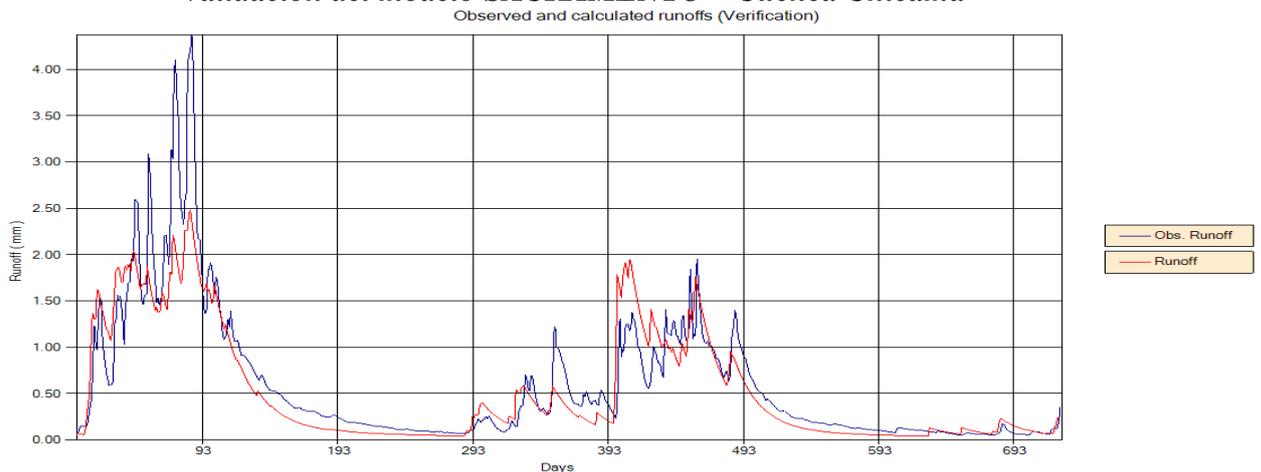
Por otro lado, se observa que la curva de duración generada con los caudales observados y simulados en la etapa de calibración son semejantes, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia (probabilidades de que los caudales puedan ser igualados o excedidos) es inferior a 0.12. Asimismo en la etapa de validación las curvas número no presentan un ajuste significativo, observándose que para una frecuencia de ocurrencia cualquiera los valores de caudales tendrán variación significativa. Tal como se muestran en las gráficas N° 2.3 y 2.4.

**Gráfico N°2.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama**



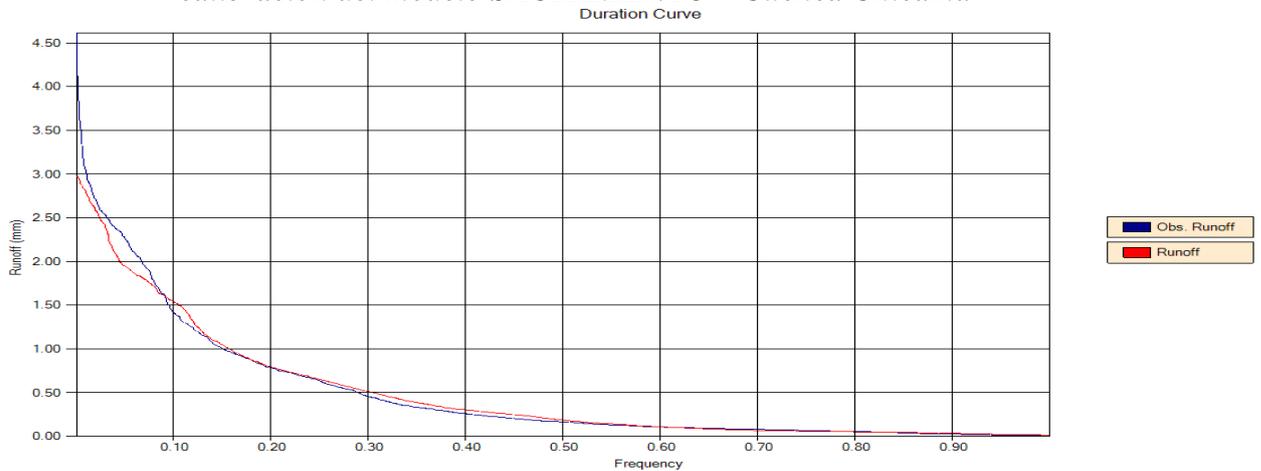
Fuente: SACRAMENTO MODEL

**Gráfico N°2.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama**



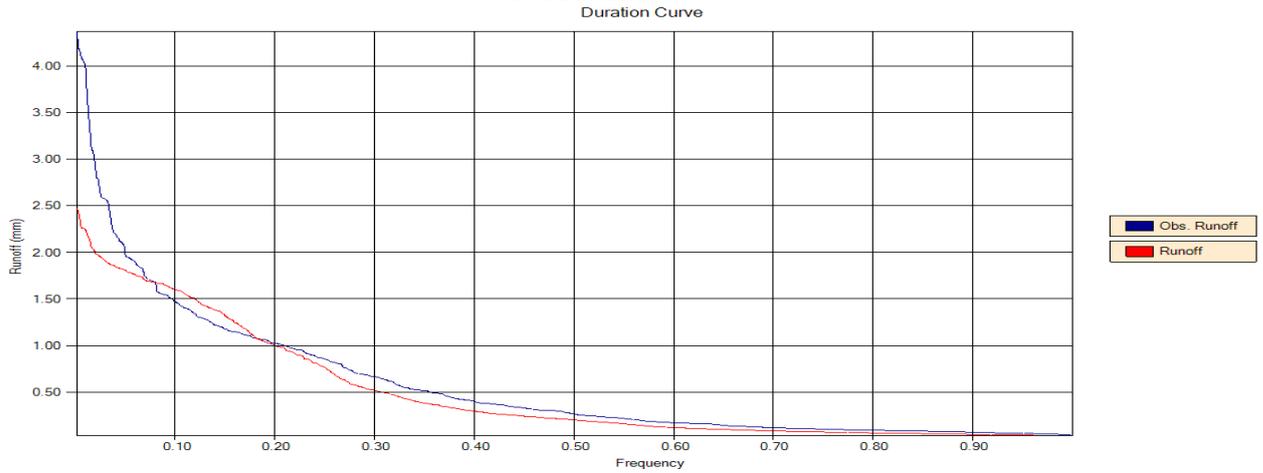
Fuente: SACRAMENTO MODEL

**Gráfico N°2.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama**



Fuente: SACRAMENTO MODEL

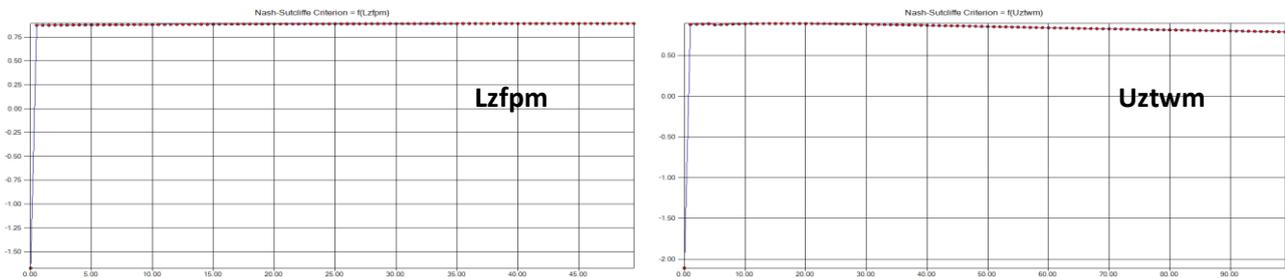
**Gráfico N°2.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SACRAMENTO – Cuenca Chicama**



Fuente: SACRAMENTO MODEL

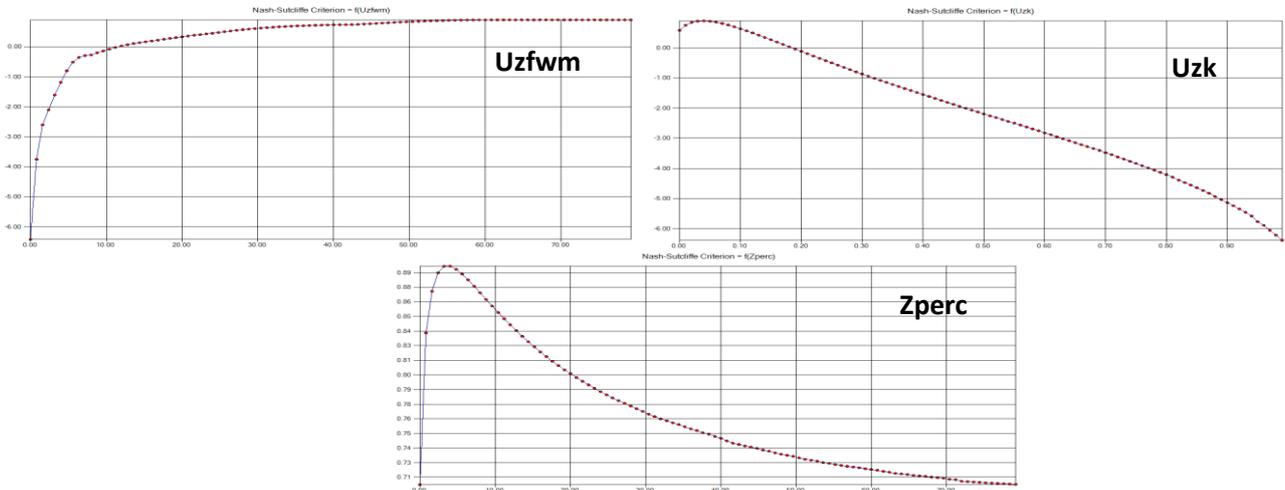
El modelo Sacramento tiene 17 parámetros de los cuales 2 presentan moderada sensibilidad y el resto alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash optimizado. Tal como se muestra en los gráficos N° 2.5 y 2.6

**Gráfico N°2.5 Moderada sensibilidad de los parámetros – Modelo SACRAMENTO**



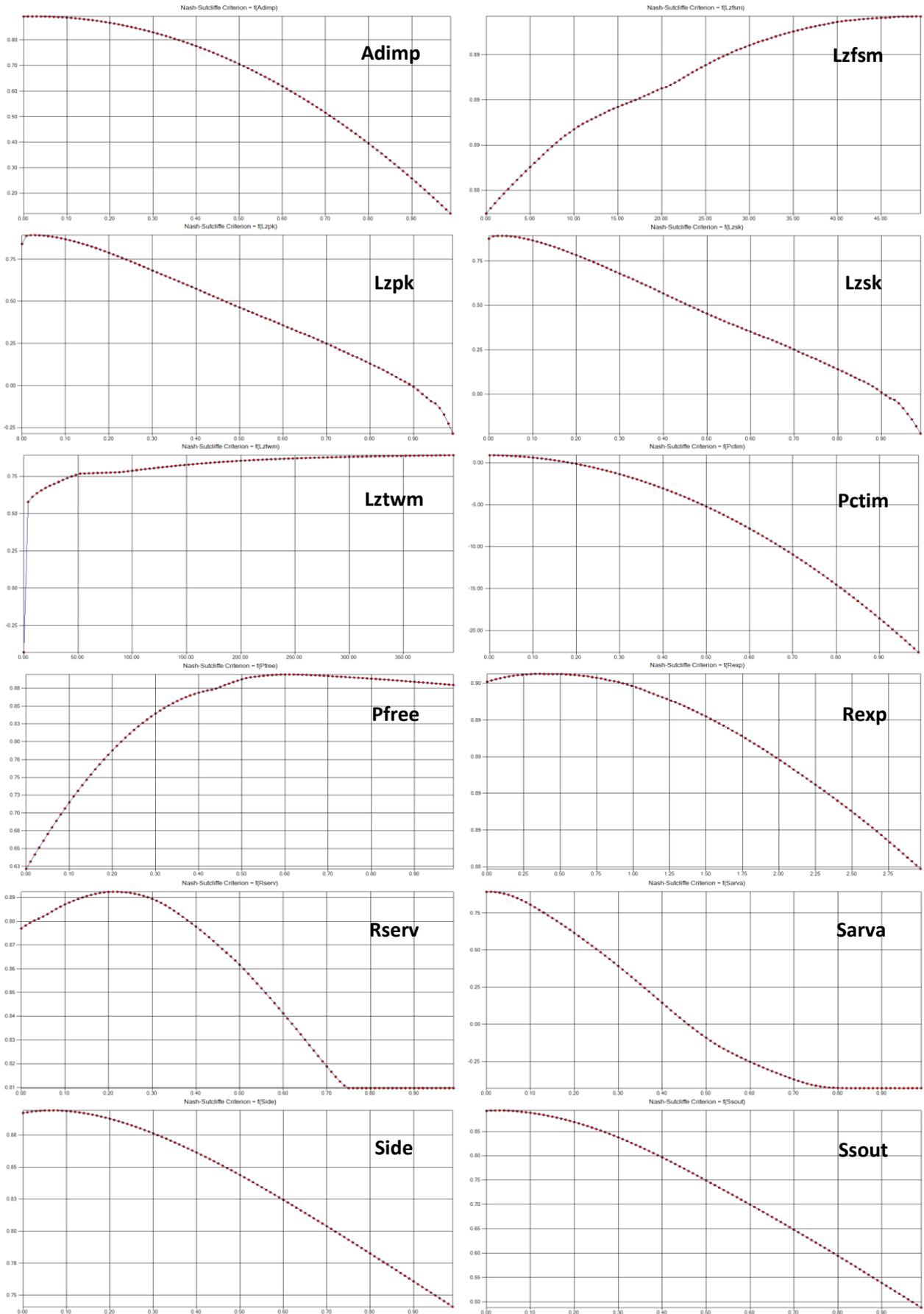
Fuente: SACRAMENTO MODEL

**Gráfico N°2.6 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo SACRAMENTO**



Fuente: SACRAMENTO MODEL

### Gráfico N°2.6 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo SACRAMENTO



Fuente: SACRAMENTO MODEL

### 5.3.SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS POR EL MODELO SIMHYD

Para este modelo se tomó como método de optimización de los parámetros el criterio de *algoritmos genéticos*, en donde se programó al modelo que realice un máximo de 10000 iteraciones, encontrando de esta forma los parámetros más adecuados para la obtención de la máxima eficiencia de Nash tanto en la etapa de calibración y validación. El cuadro N°4.0 muestra los parámetros del modelo SIMHYD en donde se adquirió la mayor eficiencia de Nash.

**Cuadro N° 4.0, Parámetros optimizados del modelo SIMHYD**

| CASO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | Baseflow coeff. | Impervious Threshold | Infiltration Coeff. | Infiltration Shape. | Interflow Coeff. | Perv.Fraction | RISC | Recharge Coefficient | SMSC |
|------|------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------|------|----------------------|------|
| A    | Genetic Algorithm      | 0.098           | 3.8                  | 85                  | 3.2                 | 0                | 1             | 0    | 0.768                | 500  |

Fuente: SIMHYD MODEL

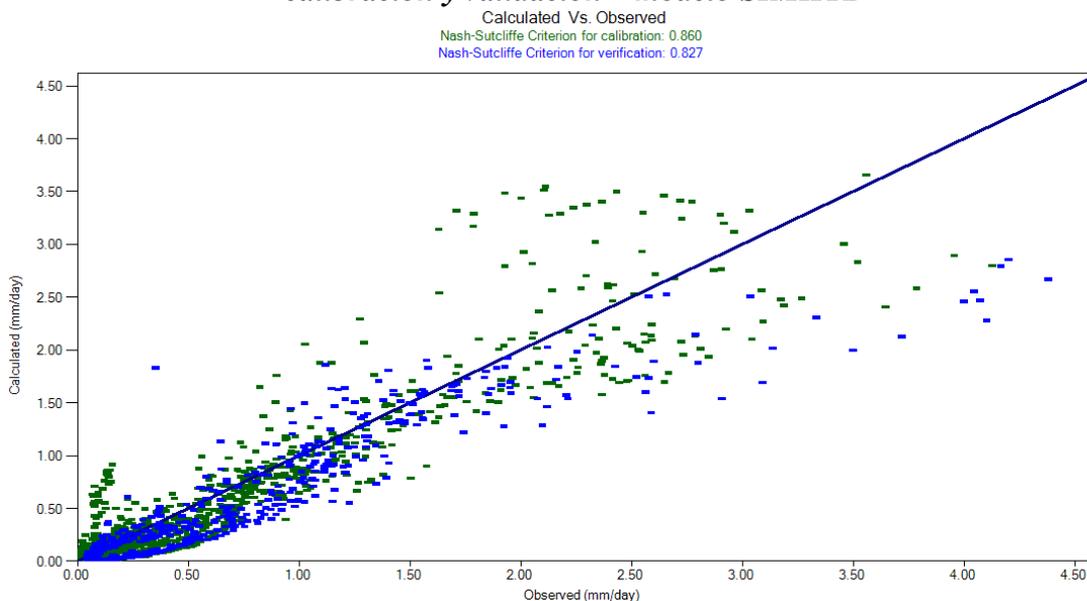
Con los parámetros mostrados en el cuadro N°4.0, los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.86 y 0.827 respectivamente. Tal como se muestra en el cuadro N°4.1 y la gráfica N°3.0

**Cuadro N°4.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo SIMHYD –Cuenca del río Chicama**

| CASO | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| A    | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.86             | 0.827             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: SIMHYD MODEL

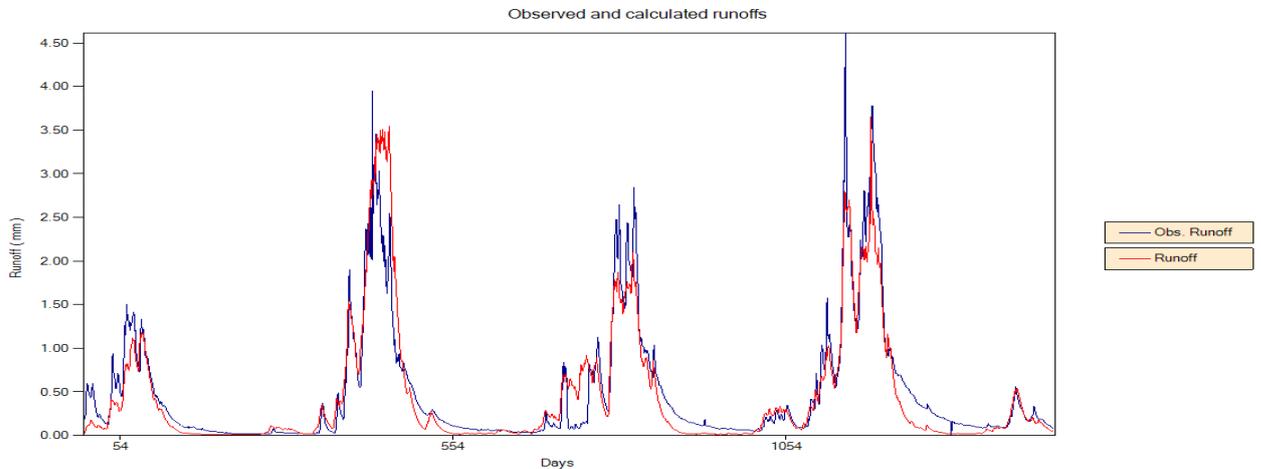
**Gráfica N°3.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo SIMHYD**



Con respecto a los hidrograma generados por los caudales simulados y observados se observa que el modelo SIMHYD no representa adecuadamente el caudal base por lo cual lo subestima tanto en la etapa de calibración y validación, además en los diferentes años el modelo no representa los caudales picos que fueron registrado en la estación el tambo. A continuación los hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración y validación se muestran en los gráficos N°3.1 y 3.2.

Por otro lado, se observa que la curva de duración generada con los caudales observados y simulados en la etapa de calibración son semejantes, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia (probabilidades de que los caudales puedan ser igualados o excedidos) es inferior a 0.08. Asimismo en la etapa de validación las curvas número no presentan un ajuste significativo, observándose que para una frecuencia de ocurrencia cualquiera los valores de caudales tendrán variación significativa. Tal como se muestran en las gráficas N° 3.3 y 3.4.

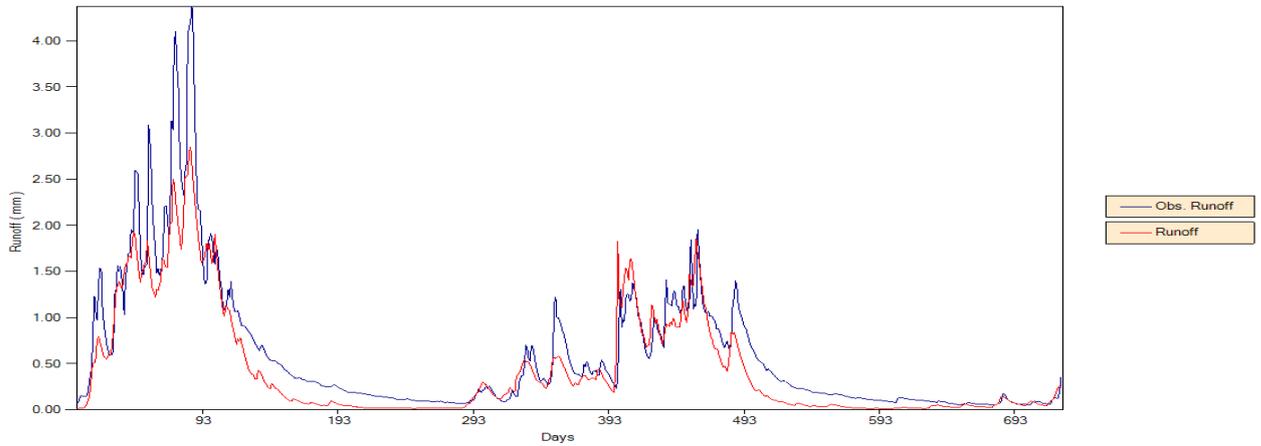
**Gráfico N°3.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama**



Fuente: SIMHYD MODEL

**Gráfico N°3.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama**

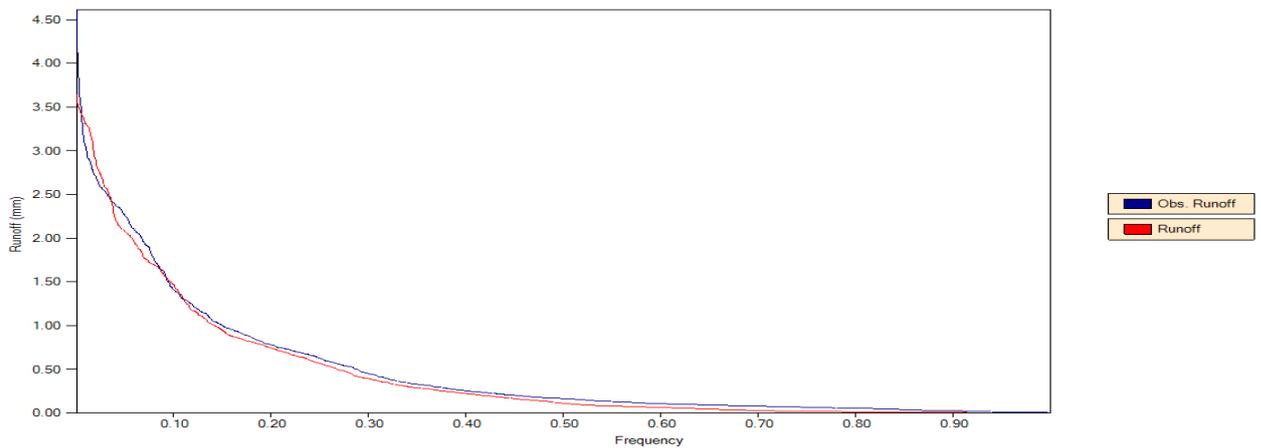
Observed and calculated runoffs (Verification)



Fuente: SIMHYD MODEL

**Gráfico N°3.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama**

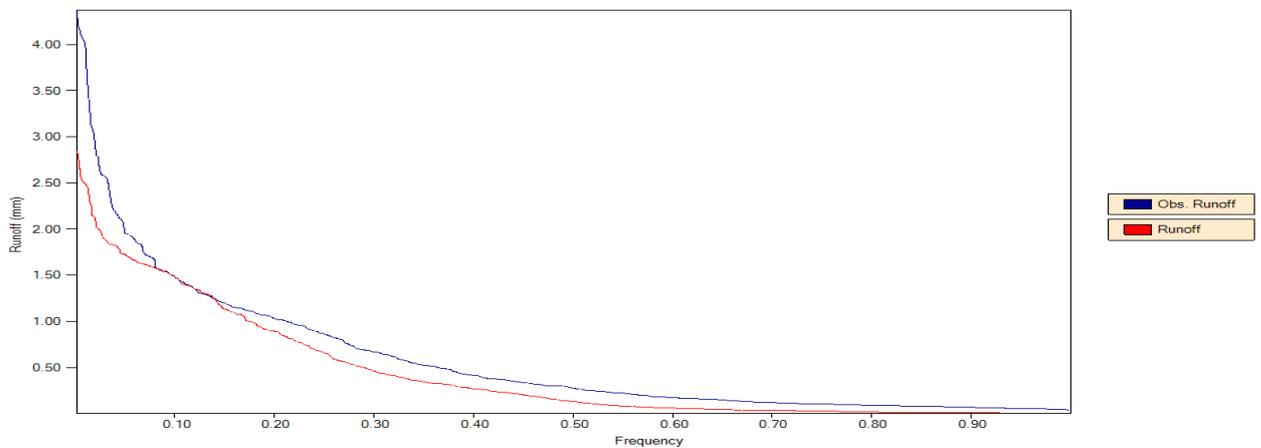
Duration Curve



Fuente: SIMHYD MODEL

**Gráfico N°3.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo SIMHYD – Cuenca Chicama**

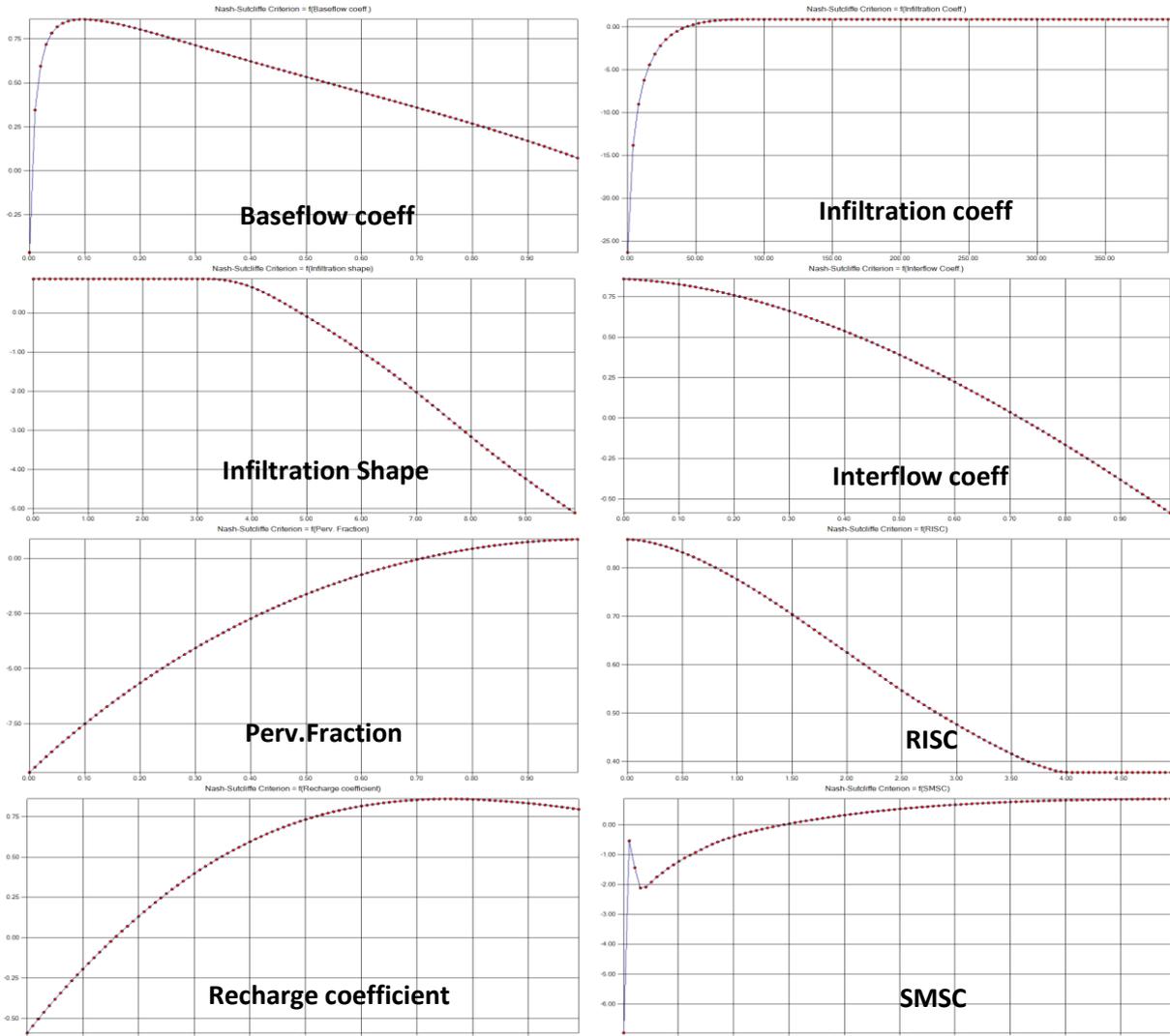
Duration Curve



Fuente: SIMHYD MODEL

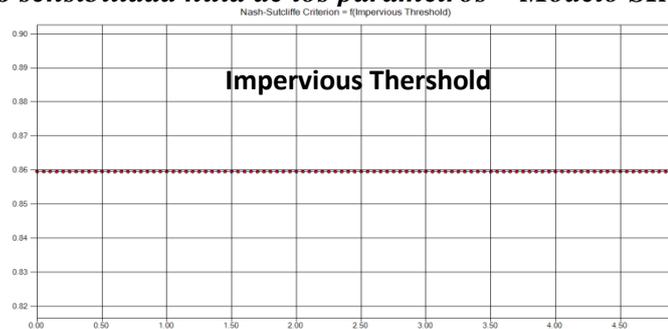
El modelo SIMHYD posee 9 parámetros de los cuales 1 presenta sensibilidad nula y el resto alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash optimizado. Tal como se muestra en los gráficos N° 3.5 y 3.6

**Gráfico N°3.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo SIMHYD**



Fuente: SIMHYD MODEL

**Gráfico N°3.6 sensibilidad nula de los parámetros – Modelo SIMHYD**



Fuente: SIMHYD MODEL

## 5.4.SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS POR EL MODELO AWBM

Para este modelo se tomó como método de optimización de los parámetros el criterio de *algoritmos genéticos*, en donde se programó al modelo que realice un máximo de 10000 iteraciones, encontrando de esta forma los parámetros más adecuados para la obtención de la máxima eficiencia de Nash tanto en la etapa de calibración y validación. El cuadro N°5.0 muestra los parámetros del modelo AWBM en donde se adquirió la mayor eficiencia de Nash.

**Cuadro N° 5.0, Parámetros optimizados del modelo AWBM**

| CASO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | A1    | A2    | BFL   | C1 | C2 | C3    | Kbase | Ksurf |
|------|------------------------|-------|-------|-------|----|----|-------|-------|-------|
| A    | Genetic Algorithm      | 0.134 | 0.433 | 0.878 | 0  | 0  | 480.4 | 0.949 | 0.992 |

Fuente: AWBM MODEL

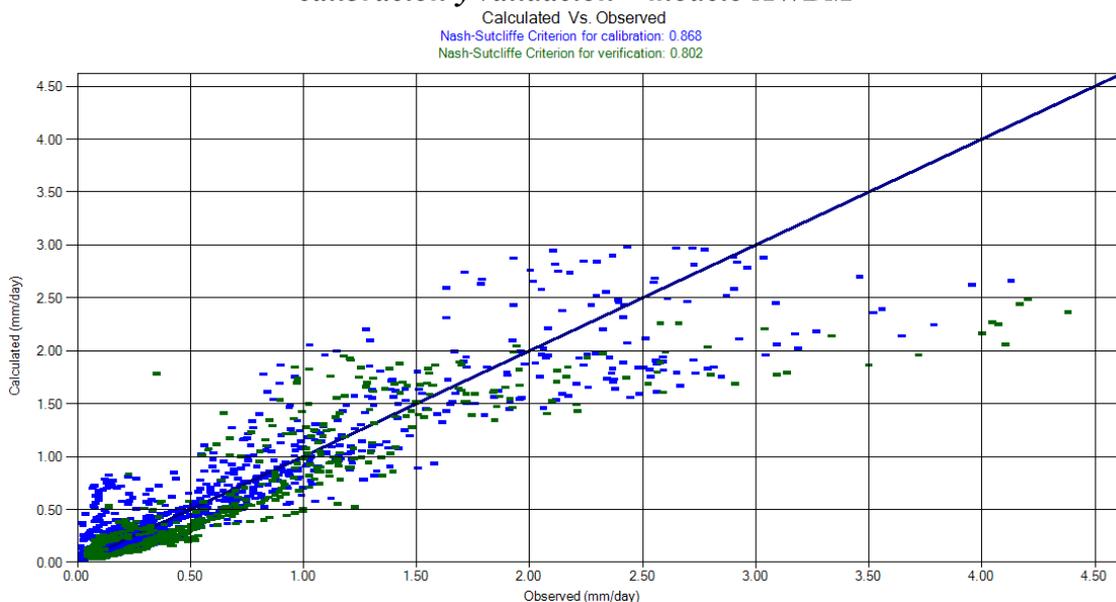
Con los parámetros mostrados en el cuadro N°5.0, los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.868 y 0.802 respectivamente. Tal como se muestra en el cuadro N°5.1 y la gráfica N°4.0

**Cuadro N°5.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo AWBM –Cuenca del río Chicama**

| CASO | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| A    | Nash-Sutcliffe Criterion | None                | Genetic Algorithm      | 0.868            | 0.802             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: AWBM MODEL

**Grafica N°4.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo AWBM**

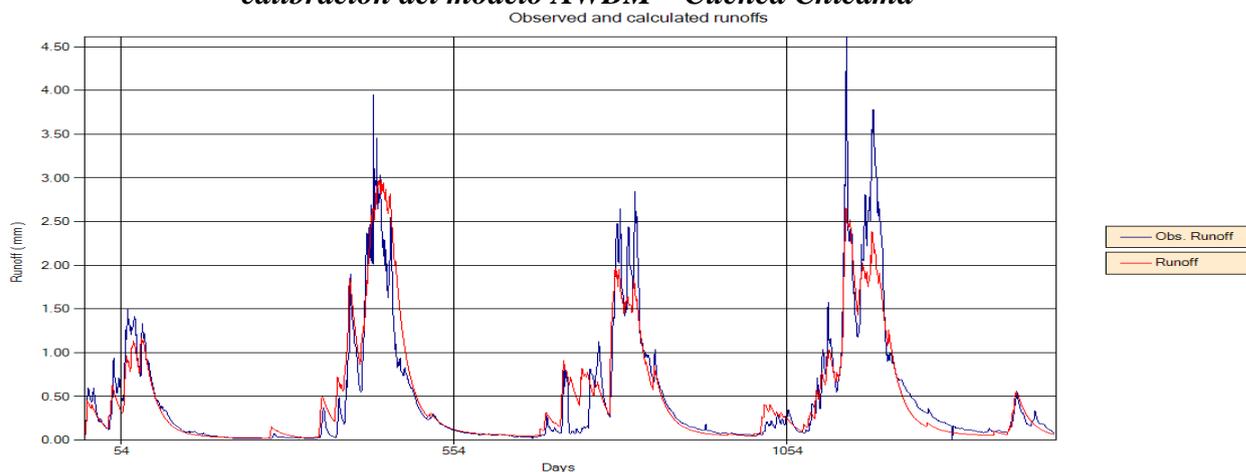


Fuente: AWBM MODEL

Con respecto a los hidrograma generados por los caudales simulados y observados se aprecia que el modelo AWBM representa adecuadamente el caudal base en la etapa de calibración, por lado, en la etapa de validación los caudales bases se encuentra por debajo del valor observado (caudal base subestimado), además en los diferentes años el modelo no representa los caudales picos que fueron registrado en la estación el tambo. A continuación los hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración y validación se muestran en los gráficos N°4.1y 4.2.

Por otro lado, se observa que la curva de duración generada con los caudales observados y simulados en la etapa de calibración son semejantes, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia (probabilidades de que los caudales puedan ser igualados o excedidos) es inferior a 0.12. Asimismo en la etapa de validación las curvas número no presentan un ajuste significativo, observándose que para una frecuencia de ocurrencia inferior a 0.5 los valores de caudales tendrán variación significativa. Tal como se muestran en las gráficas N° 4.3 y 4.4.

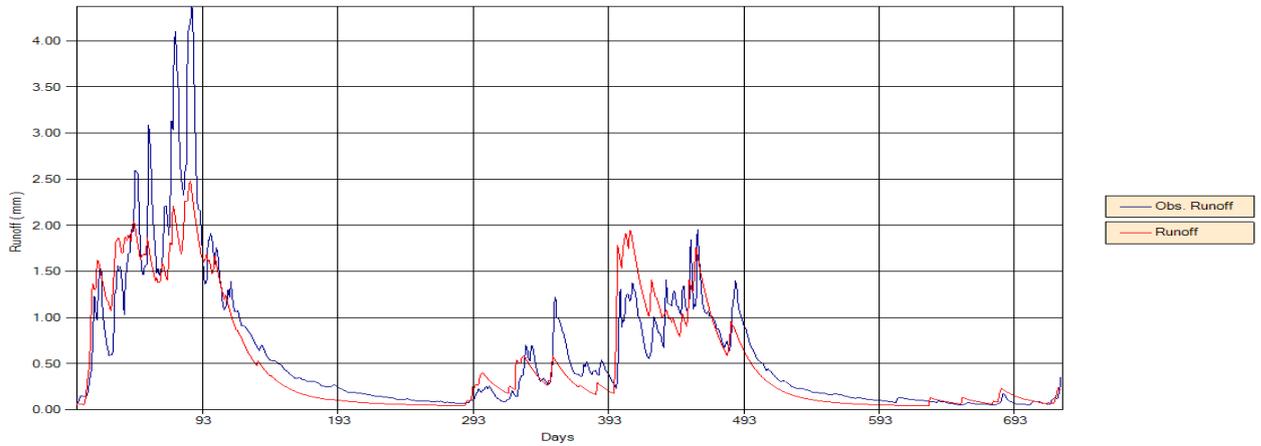
**Gráfico N°4.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo AWBM – Cuenca Chicama**



Fuente: AWBM MODEL

**Gráfico N°4.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo AWBM – Cuenca Chicama**

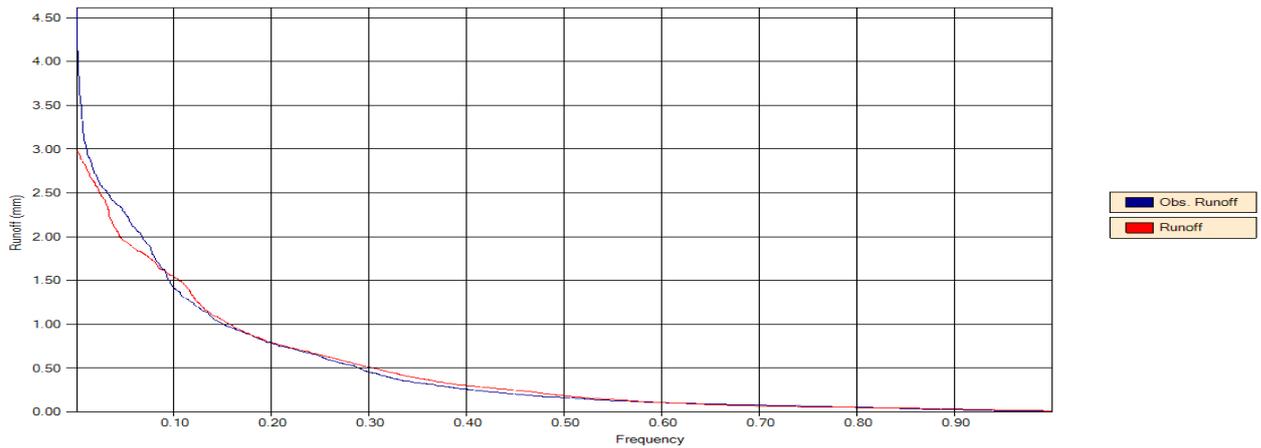
Observed and calculated runoffs (Verification)



Fuente: AWBM MODEL

**Gráfico N°4.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo AWBM – Cuenca Chicama**

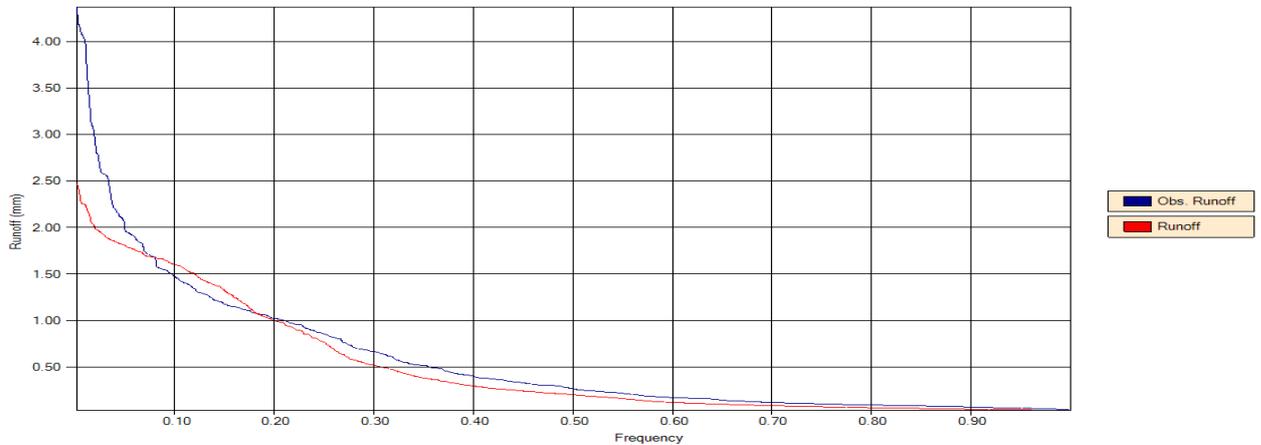
Duration Curve



Fuente: AWBM MODEL

**Gráfico N°4.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo AWBM – Cuenca Chicama**

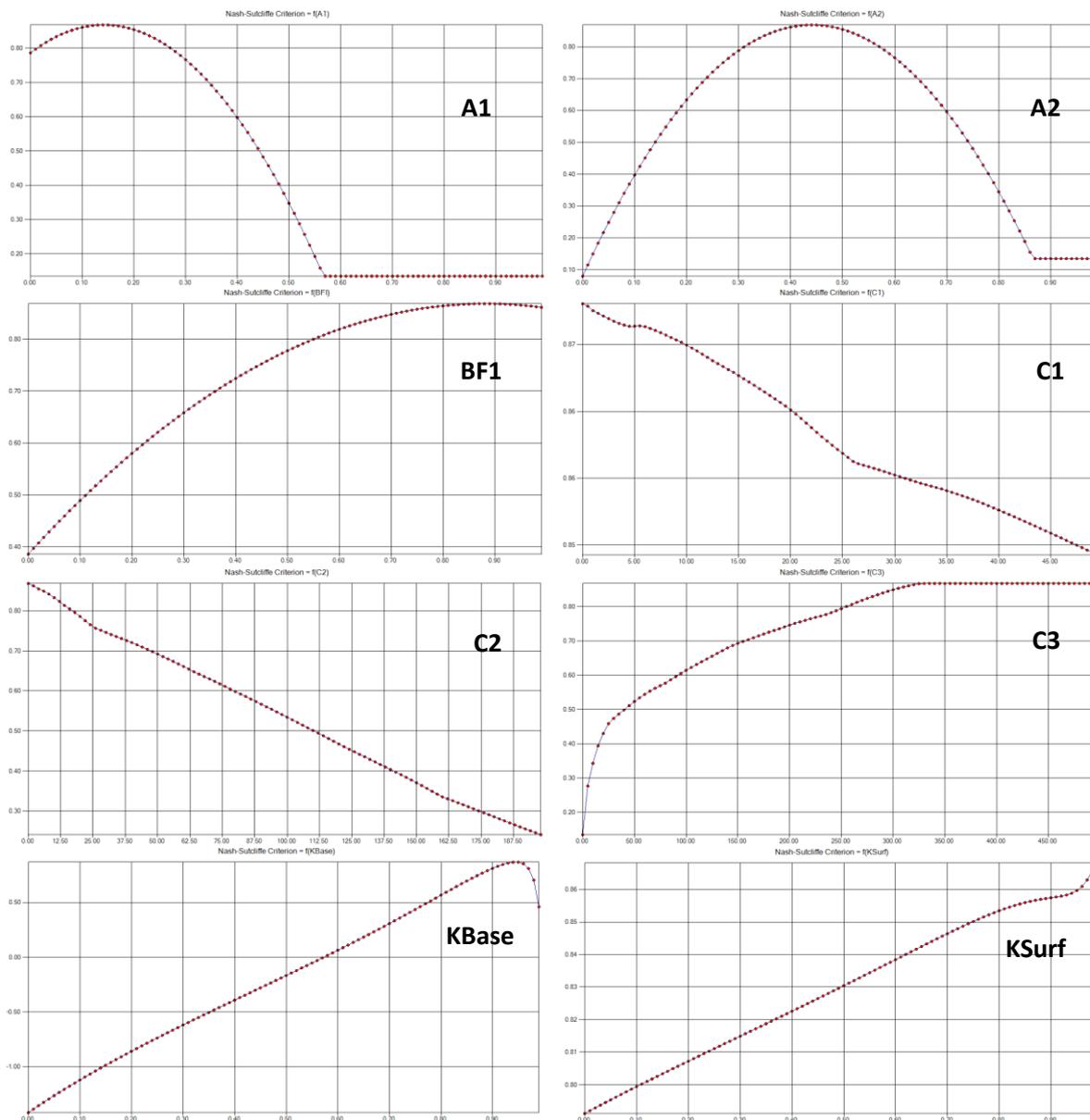
Duration Curve



Fuente: AWBM MODEL

El modelo AWBM posee 8 parámetros de los cuales todos presentan alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash optimizado. Tal como se muestra en los gráficos N° 4.5

**Gráfico N°4.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo AWBM**



Fuente: SIMHYD MODEL

### 5.5.SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS POR EL MODELO GR4J

Para este modelo se tomó como método de optimización de los parámetros el criterio de *simplex*, encontrando de esta forma los parámetros más adecuados para la obtención de la máxima eficiencia de Nash tanto en la etapa de calibración y validación. El cuadro N°6.0 muestra los parámetros del modelo GR4J en donde se adquirió la mayor eficiencia de Nash.

**Cuadro N° 6.0, Parámetros optimizados del modelo GR4J**

| CASO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | X1   | X2   | X3   | X4   |
|------|------------------------|------|------|------|------|
| B    | Simplex                | 6.20 | 0.79 | 1.99 | 0.67 |

Fuente: GR4J MODEL

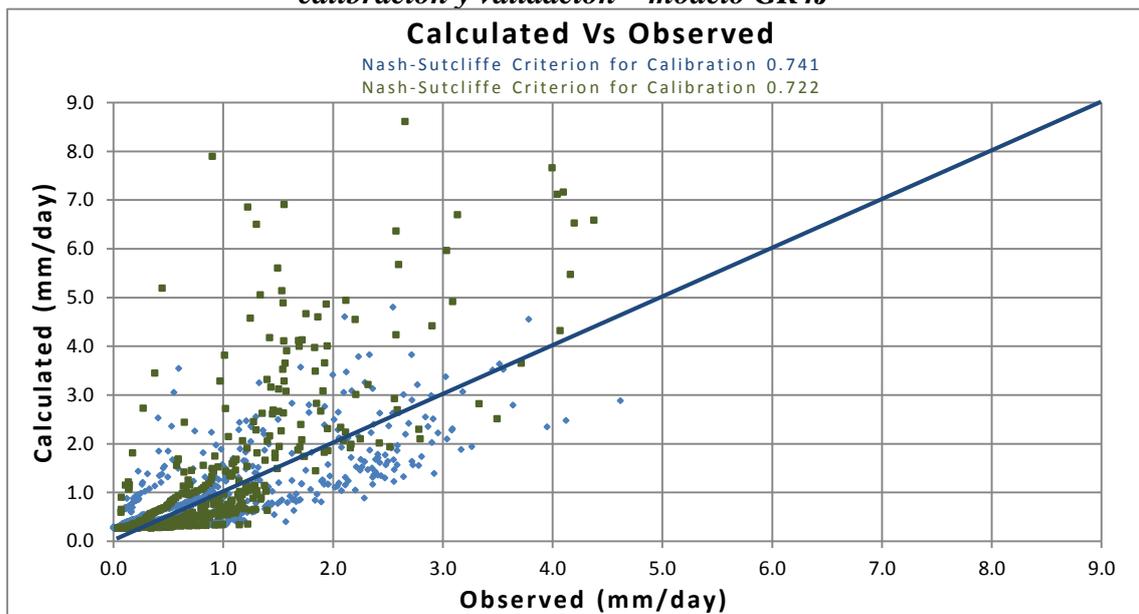
Con los parámetros mostrados en el cuadro N°6.0, los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.741 y 0.722 respectivamente. Tal como se muestra en el cuadro N°6.1 y la gráfica N°5.0

**Cuadro N°6.1, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación del modelo GR4J –Cuenca del río Chicama**

| CASO | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| B    | Nash-Sutcliffe Criterion | None                | Simplex                | 0.741            | 0.722             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: GR4J MODEL

**Grafica N°5.0 Coeficientes de Nash obtenidos en la etapa de calibración y validación – modelo GR4J**

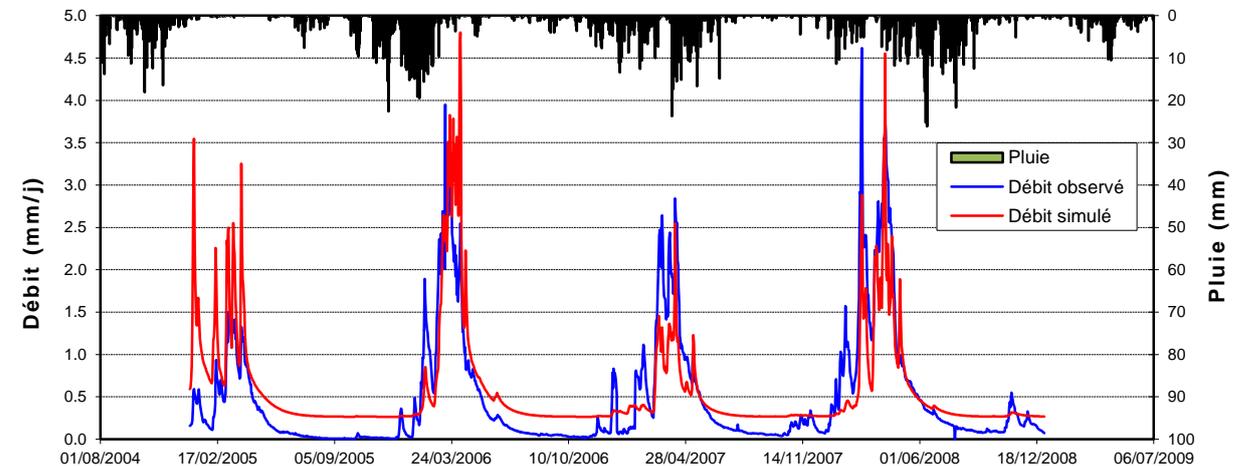


Fuente: GR4J MODEL

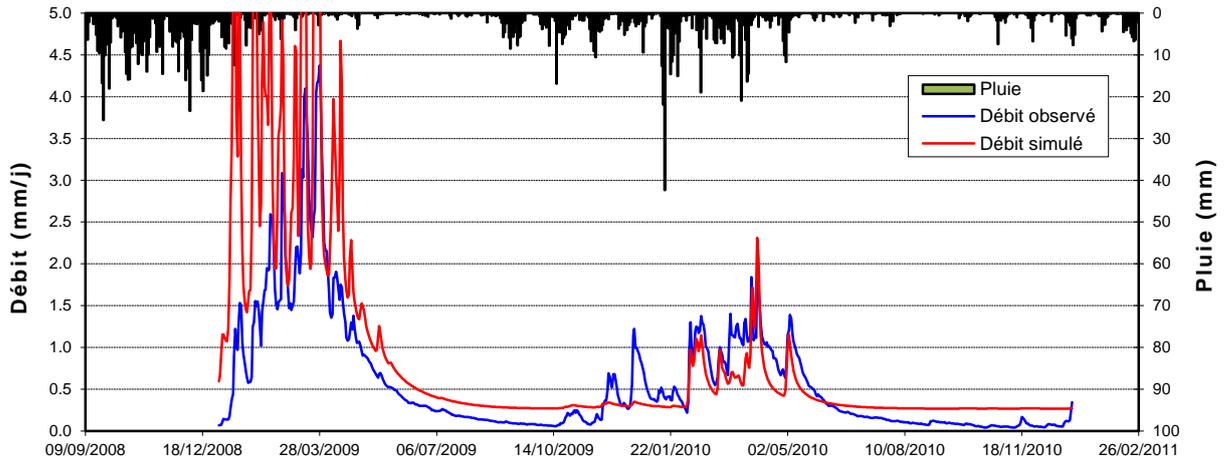
Con respecto a los hidrograma generados por los caudales simulados y observados se aprecia que el modelo GR4J no representa adecuadamente el caudal base por lo cual lo subestima tanto en la etapa de calibración y validación, además en los diferentes años el modelo no representa los caudales picos que fueron registrado en la estación el tambo. A continuación los hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración y validación se muestran en los gráficos N°5.1 y 5.2.

Por otro lado, se observa que la curva de duración generada con los caudales observados y simulados en la etapa de calibración no son semejantes, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia (probabilidades de que los caudales puedan ser igualados o excedidos) se encuentra entre el rangos de 0.02-0.025 y 0.22-0.28. Asimismo en la etapa de validación las curvas número no presentan un ajuste significativo, excepto en la parte en donde la frecuencia de ocurrencia se encuentra entre el rangos de 0.18-0.20 y 0.30-0.46. Tal como se muestran en las gráficas N° 5.3 y 5.4.

**Gráfico N°5.1 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo GR4J – Cuenca Chicama**

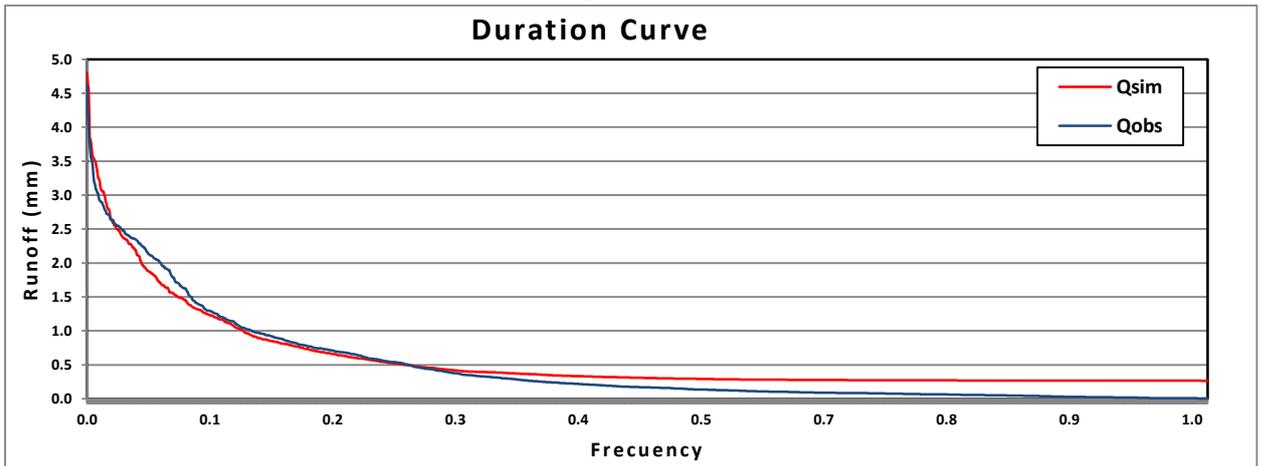


**Gráfico N°5.2 Hidrograma de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo GR4J – Cuenca Chicama**



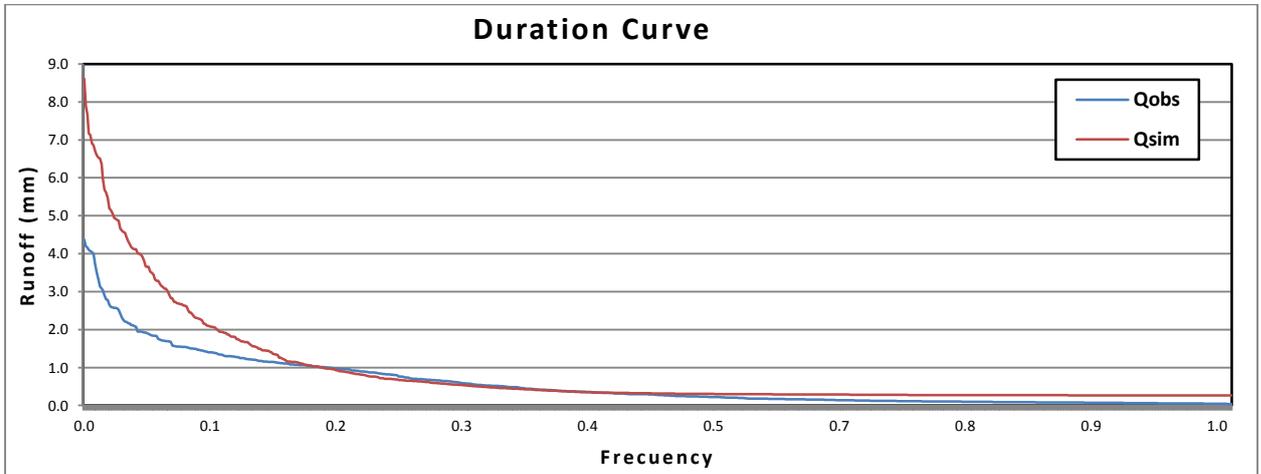
Fuente: GR4J MODEL

**Gráfico N°5.3 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del modelo GR4J – Cuenca Chicama**



Fuente: GR4J MODEL

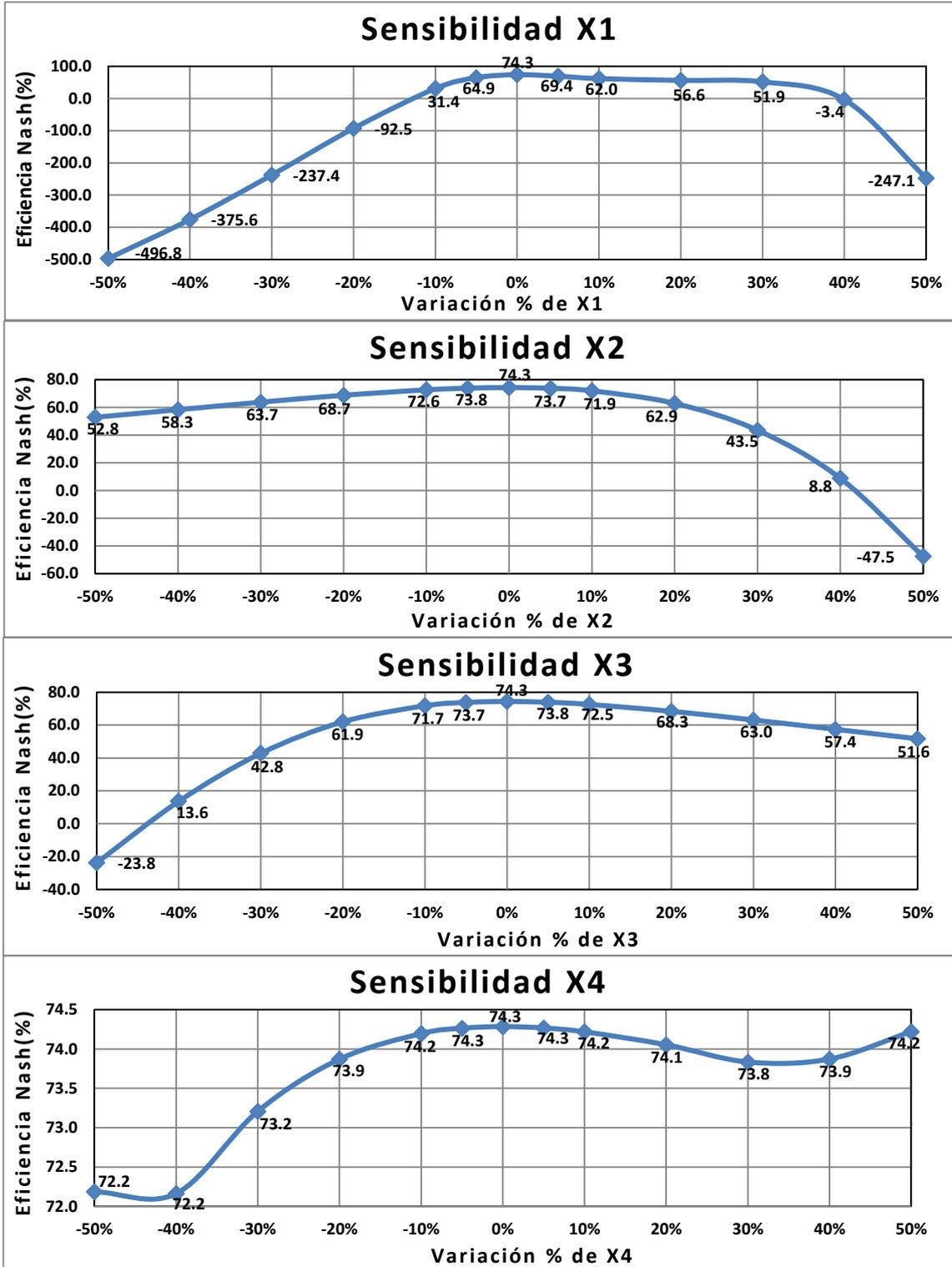
**Gráfico N°5.4 Curva de duración de caudales observados y simulados en la etapa de validación del modelo GR4J – Cuenca Chicama**



Fuente: GR4J MODEL

El modelo GR4J posee 4 parámetros de los cuales todos presentan alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash optimizado. Tal como se muestra en los gráficos N° 5.5

**Gráfico N°5.5 Alta sensibilidad de los parámetros – Modelo GR4J**



Fuente: GR4J MODEL

## 5.6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS DIFERENTES MODELOS LLUVIA-ESCORRENTÍA

Como se puede observar en el cuadro N°7.0, el modelo Sacramento es el mejor modelo que simula los caudales observados diarios en la estación de aforo el tambo, debido a que los coeficientes de Nash para la etapa de calibración y validación son de 0.891 y 0.830 respectivamente, siendo aquellas eficiencias las más altas en relación a los demás modelos utilizados.

El modelo Gr4j es el que ha resultado con la menor eficiencia de Nash, tanto en calibración como en validación. (0.74 y 0.72, respectivamente).

**Cuadro N°7.0, Coeficientes de NASH obtenidos en la calibración y validación de los diferentes modelos lluvia-escorrentía**

| MODELO     | OBJETIVO PRIMARIO        | OBJETIVO SECUNDARIO | METODO DE OPTIMIZACIÓN | NASH CALIBRACIÓN | NASH VERIFICACIÓN | PERÍODO CALIBRACION     | PERÍODO VERIFICACIÓN    |
|------------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| TANQUE     | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.868            | 0.802             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |
| SACRAMENTO | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.891            | 0.83              | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |
| SIMHYD     | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.86             | 0.827             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |
| AWBM       | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Genetic Algorithm      | 0.868            | 0.802             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |
| GR4J       | Nash-Sutcliffe Criterión | None                | Simplex                | 0.741            | 0.722             | 01/01/2005 - 31/12/2008 | 01/01/2009 - 31/12/2010 |

Fuente: ELABORACIÓN PROPIA

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- En el modelo GR4J las eficiencias de Nash obtenidas en la etapa de calibración y validación son de 0.741 y 0.722 respectivamente, asimismo, los períodos utilizados para las etapas en mención fueron 2005-2008 y 2009-2010. Finalmente en el análisis de sensibilidad se observó que todos parámetros del modelo presentan alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash, lo cual indica que los 4 parámetros del modelo tienen una incidencia fuerte en la simulación de la escorrentía. La eficiencia de este modelo es la más baja obtenida en relación a los otros.
- En el modelo TANQUE las eficiencias de Nash obtenidas en la etapa de calibración y validación son de 0.820 y 0.812 respectivamente, asimismo, los períodos utilizados para las etapas en mención fueron 2005-2008 y 2009-2010. Finalmente en el análisis de sensibilidad con respecto al coeficiente de Nash optimizado se observó que 5 parámetros del modelo presentan moderada sensibilidad, 10 alta sensibilidad y 3 sensibilidad nula.
- En el modelo SACRAMENTO las eficiencias de Nash obtenidas en la etapa de calibración y validación son de 0.892 y 0.830 respectivamente, asimismo, los períodos utilizados para las etapas en mención fueron 2005-2008 y 2009-2010. Finalmente en el análisis de sensibilidad con respecto al coeficiente de Nash optimizado se observó que 2 parámetros del modelo presentan moderada sensibilidad y 15 alta sensibilidad
- En el modelo AWBM las eficiencias de Nash obtenidas en la etapa de calibración y validación son de 0.868 y 0.802 respectivamente, asimismo, los períodos utilizados para las etapas en mención fueron 2005-2008 y 2009-2010. Finalmente en el análisis de sensibilidad se observó que todos parámetros del modelo presentan alta sensibilidad en relación al coeficiente de Nash optimizado.
- En el modelo SIMHYD las eficiencias de Nash obtenidas en la etapa de calibración y validación son de 0.860 y 0.827 respectivamente, asimismo, los períodos utilizados para las etapas en mención fueron 2005-2008 y 2009-2010. Finalmente en el análisis de sensibilidad con respecto al

coeficiente de Nash optimizado se observó que 8 parámetros del modelo presentan alta sensibilidad y 1a sensibilidad nula.

- El modelo SACRAMENTO es mejor modelo para simulación de caudales diarios en la cuenca del río Chicama en relación a los modelos TAMQUE, SIMHYD, AWBM y GR4J. Asimismo, los coeficientes de Nash para el modelo SACRAMENTO en la etapa de calibración y validación son de 0.891 y 0.830 respectivamente, siendo aquellas eficiencias las más altas en relación a los demás modelos utilizados.

## 6.2 Recomendaciones

- Para el pronóstico operativo de los caudales medios diarios del río Chicama se sugiere implementar por lo menos dos modelos, como son Sacramento y Tanque.
- Evaluar la respuesta de estos modelos con la incorporación de las estimaciones de lluvia por satélite como la del TRMM.
- Evaluar la calibración del modelo Sacramento con diferentes algoritmos de optimización y función multiobjetivo y comparar sus resultados en relación a la Eficiencia de Nash.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- 7.1 Autoridad Nacional del Agua –ANA (2010),** Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la vertiente del pacífico - cuencas de la costa norte, Lima
- 7.2 PODGER, Geoff (2004).** Rainfall Runoff Library User Manual, Australia, Editorial Toolkit, page.47-64.
- 7.3 CARVAJAL, Et Al (2007),** “Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del Río Aburra” , Revista DYNA, num.152, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Page.73-87.
- 7.4 Tucci.** Modelos Hidrológicos. 2da Edición. Editora da Universidade / UFRGS
- 7.5** La modelación en planificación hidráulica: modelos de simulación y síntesis de hidrología. Salas, J. D. y Andréu Álvarez, J., Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones (SPUPV 88.163), Valencia, 1988.