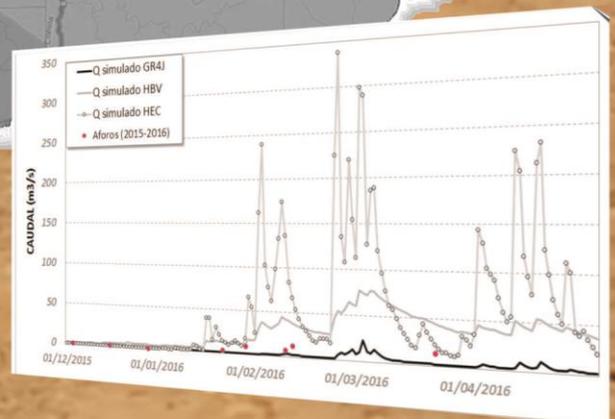
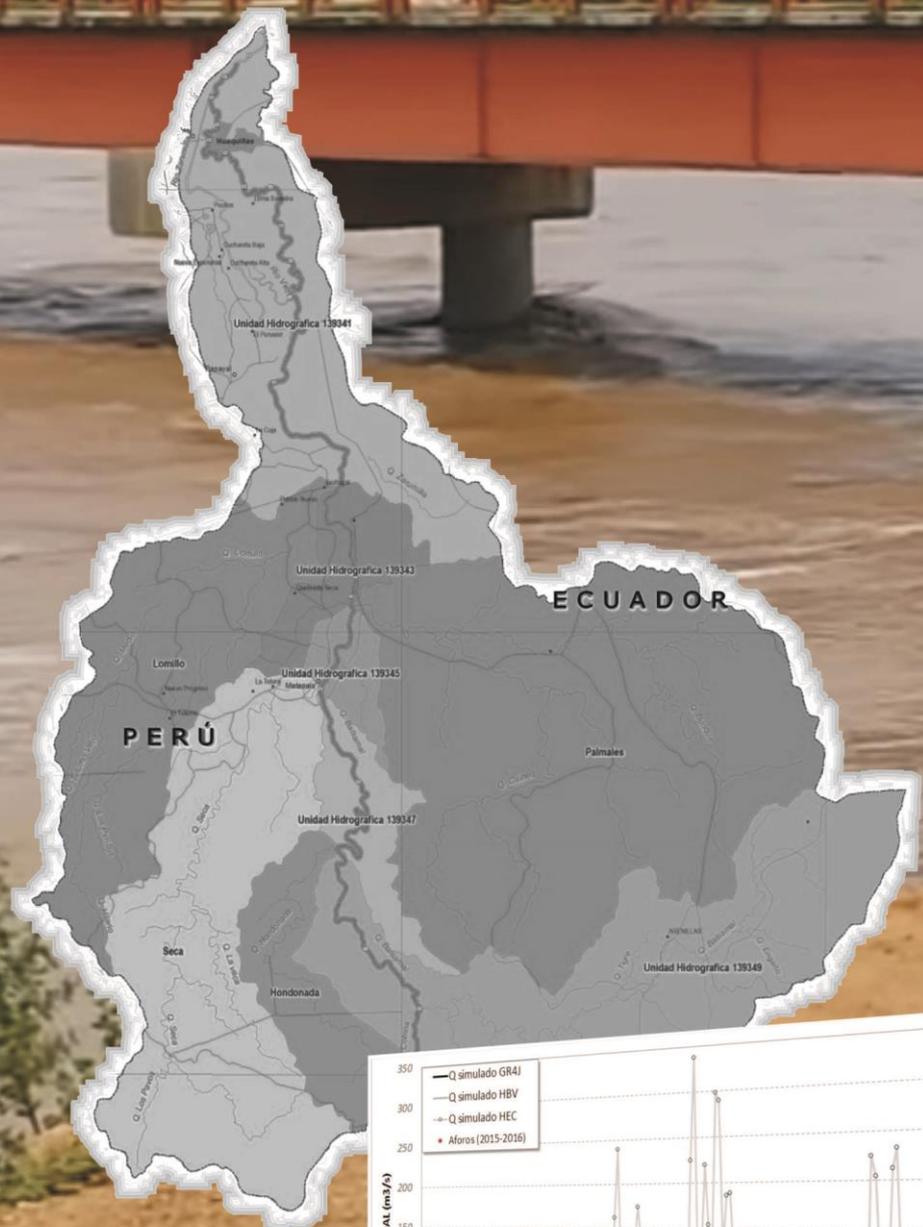


MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DEL RÍO ZARUMILLA





DIRECTORIO

Ing. Amelia Díaz Pabló
Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI

Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI*

REVISOR DEL ESTUDIO

Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI*

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

Mg. Sc. Luis Metzger Terrazas
Especialista en Hidrología del SENAMHI

Lima-Perú
Noviembre - 2016

ÍNDICE

ÍNDICE	i
LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. JUSTIFICACION	2
1.2. OBJETIVOS	2
2. EL MARCO TEÓRICO	3
2.1. Parámetros Fisiográficos	3
2.1.1. Parámetros de Forma	3
2.1.1.1. Factor de forma de Horton	3
2.1.1.2. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius	4
2.1.2. Parámetros de Relieve	4
2.1.2.1. Pendiente promedio de la cuenca	4
2.1.2.2. Curva hipsométrica	5
2.1.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas	5
2.1.3. Parámetros relativos a la red hidrográfica	5
2.1.3.1. Orden de la cuenca	6
2.1.3.2. Densidad de drenaje	6
2.2. Número Curva	7
2.3. Tiempo de concentración	7
2.4. Modelos hidrológicos	8
2.4.1. GR4J	8
2.4.2. HBV	10
2.4.3. HEC-HMS	11
2.5. Medidas de bondad de ajuste	12
2.5.1. NASH	12
2.5.2. RMSE	12
2.5.3. R	12
3. MATERIALES Y METODOS	13
3.1. Area de Estudio	13
3.1.1. Ubicación	13
3.1.2. Población	14
3.1.3. Clima	14
3.1.4. Hidrología	14
3.2. Información Utilizada	16
3.2.1. Selección de estaciones	16
3.2.2. Ubicación de estaciones	16
3.2.3. Periodo de información seleccionado	18
3.2.4. Control de calidad de los datos	21
3.2.4.1. Análisis de Doble Masa	21

3.3.	Estimación de la curva número de la cuenca Zarumilla	22
3.4.	Parámetros fisiográficos de la cuenca Zarumilla	23
3.5.	Estimación de la precipitación media	23
3.6.	Estimación de los caudales diarios	24
3.7.	Flujograma Metodológico	25
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	26
5.	CONCLUSIONES	33
6.	RECOMENDACIONES	33
7.	REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS.....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Números curva para áreas urbanas	8
Tabla 2-2 Rango de valores de los parámetros del modelo GR4J	9
Tabla 2-3 Rango de valores de los parámetros del modelo HBV	10
Tabla 2-4 Componentes de los datos de entrada	11
Tabla 2-5 Valores referenciales de NASH	12
Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado peruano	18
Tabla 3-2 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado ecuatoriano	18
Tabla 3-3 Estaciones hidrológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado peruano	18
Tabla 3-4 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Zarumilla (hasta la estación La Palma)	23
Tabla 4-1 Datos fisiográficos de la cuenca Zarumilla	27
Tabla 4-2 Resumen de la calibración y la validación de los 3 modelos hidrológicos	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca.....	4
Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca	4
Figura 2-3 Curvas hipsométricas características	5
Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas.....	5
Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca	6
Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Zarumilla sobre el modelo digital del Terreno	13
Figura 3-2 Evolución de la población en la cuenca del río Zarumilla	14
Figura 3-3 Precipitación media anual en la cuenca del río Zarumilla.....	15
Figura 3-4 Precipitación media diaria de las estaciones en la cuenca del río Zarumilla	16
Figura 3-5 Mapa de estaciones meteorológicas en la cuenca Zarumilla.....	17
Figura 3-6 Ubicación de estaciones empleadas en este estudio.....	17
Figura 3-7 Series de tiempo utilizadas para la calibración del modelo	19
Figura 3-8 Series de tiempo utilizadas para la validación del modelo	20
Figura 3-9 Análisis de doble masa de estaciones pluviométricas a) Estaciones del grupo homogéneo Versus Estación promedio b) Estaciones del grupo homogéneo versus estación Hito Bocana	21
Figura 3-10 Mapa de curva número a nivel nacional y para la cuenca Zarumilla	22
Figura 3-11 Precipitación media utilizando el método de Thiessen para la cuenca Zarumilla	23
Figura 3-12 Curvas altura gasto obtenidas para la estación Palmales	24
Figura 3-13 Data disponible de nivel y caudal en la estación Palmales (color gris) y sin datos (achurado).....	24
Figura 3-14 Flujograma metodológico para el modelamiento de la cuenca Zarumilla.....	25
Figura 4-1 Temperatura diaria de las estaciones Cabo Inga y Rica Playa.....	26
Figura 4-2 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo GR4J (Periodo Calibración)	28
Figura 4-3 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HBV (Periodo Calibración)	28
Figura 4-4 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Calibración).....	28
Figura 4-5 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo GR4J (Periodo Validación)	29
Figura 4-6 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HBV (Periodo Validación)	29
Figura 4-7 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2011)	29
Figura 4-8 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2012)	30
Figura 4-9 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2013)	30
Figura 4-10 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2014)	30
Figura 4-11 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2015).....	31
Figura 4-12 Simulación del caudal del río Zarumilla Vs. Aforos (2015-2016).....	32

RESUMEN

La cuenca del río Zarumilla es una cuenca binacional que se emplaza entre Perú y Ecuador. En ese sentido, como parte del Acuerdo de Paz firmado entre ambos países, se comprometieron a trabajar en la Integración Fronteriza y a enfrentar retos comunes de orden social y económico. Asimismo, cada año se realizan reuniones virtuales entre el Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI (Perú) y la Secretaría de Gestión de Riesgos (Ecuador); para tratar temas en común y en las cuales el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI participa a fin de dar a conocimiento sobre los estudios e investigaciones que han realizado en la cuenca del río Zarumilla.

Dado, que existen pocos estudios en hidrología del lado peruano, se ha elaborado el “Estudio de Modelamiento Hidrológico del río Zarumilla” en el cual se ha utilizado datos meteorológicos e hidrológicos provenientes de la red de observación terrena que administra SENAMHI.

Es así, el presente estudio, ha permitido conocer el estado actual de las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca Zarumilla, encontrándose que actualmente en el lado de Perú no existe ninguna estación hidrológica en funcionamiento, y en el lado de Ecuador existe una estación hidrológica automática que fue recientemente instalada en el año 2012 en la localidad de Carcabón.

Para fines del modelamiento hidrológico de la cuenca del río Zarumilla, se ha empleado información hidrológica registrada en la estación hidrológica La Palma y en las estaciones meteorológicas El Salto, Papayal, Hito Bocana y Matapalo. Se han evaluado 3 modelos hidrológicos (GR4J, HBV y HEC-HMS), a fin de determinar el de mejor performance mediante los indicadores estadísticos NASH, Error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de correlación (r). Asimismo, a pesar de la gran incertidumbre en los datos de caudal y de la escasa información pluviométrica, los modelos hidrológicos GR4J y HBV han logrado tener valores de NASH positivos y mayores a 0.40 los cuales representan un nivel de buen ajuste.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de las actividades del Plan Operativo Institucional 2016 que realiza la Dirección de Hidrología (DHI) a través de la Subdirección de estudios e investigaciones hidrológicas, se ha programado el desarrollo del “Estudio de modelamiento hidrológico del río Zarumilla”, el cual ha permitido realizar un primer análisis de la información disponible en la cuenca Zarumilla tanto de Perú como de Ecuador.

Un gran problema con respecto a los datos de caudal en la cuenca Zarumilla es que actualmente Perú no cuenta con ninguna estación hidrológica funcionando; y Ecuador solo cuenta con una estación hidrológica automática instalada en la localidad de Carcabón que viene funcionando desde setiembre del año 2012.

Un aspecto muy importante en la elaboración de todo estudio es la información que se va utilizar, por lo general se requiere que la información sea representativa de la zona de estudio y también debe tener un registro de datos lo suficientemente largo como para estimar el comportamiento promedio de las variables hidrometeorológicas, por este motivo se ha considerado un capítulo para evaluar la calidad de los datos. Cabe resaltar que para la realización de este estudio la información ha sido muy escasa y con algunos vacíos, debido a esto el periodo común de información observada de caudal y precipitación usado corresponde a solo 5 años correspondientes al periodo 1972-1976.

1.1. JUSTIFICACIÓN

Una de las razones por las que se decidió elaborar el estudio ha sido porque existe un compromiso por parte de Perú de trabajar en la integración fronteriza con Ecuador, esto como parte del Acuerdo firmado en Brasil el 17 de febrero de 1995 entre Perú y Ecuador “Tratado de Paz de Itamaraty”. Todos los años INDECI (Perú) y la Secretaría de Gestión de Riesgos (Ecuador) realizan reuniones virtuales para coordinar sobre la planificación del manejo integral de cuencas binacionales para disminuir las amenazas de origen hidrometeorológicos como las inundaciones y en las cuales también participa el SENAMHI.

El estudio que se presenta es importante y necesario porque evaluará que modelo hidrológico (GR4J, HBV, HEC-HMS), presenta mejor performance a fin de poder tener una herramienta de pronóstico de caudales en procesos futuros, ello tiene un gran valor porque ha sido validado con la escasa información histórica correspondientes a los años 1972-1976 e información de caudales proveniente de las campañas de aforo de los años 2015 y 2016 realizados por la DHI del SENAMHI. Así mismo servirá de referencia para estudios de modelamiento hidrológico que se puedan realizar en el futuro.

1.2. OBJETIVOS

- Recopilar toda la información hidrometeorológica en la cuenca Zarumilla.
- Realizar el análisis de la calidad de los datos hidrometeorológicos.
- Evaluar diversos modelos hidrológicos y determinar el de mejor performance.

2. EL MARCO TEÓRICO

2.1. Parámetros Fisiográficos

Las características fisiográficas de la cuenca pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La cuenca como unidad dinámica natural es un sistema hidrológico en el que se reflejan acciones recíprocas entre parámetros y variables. Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidas como entradas y salidas al sistema, tales como: precipitación, escorrentía directa, evaporación, infiltración, transpiración; y variables de estado, tales como: contenido de humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros.

Los parámetros en cambio permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfológicas de la cuenca. En general, las variables del sistema hidrológico cambian de tormenta a tormenta, en contraste con los parámetros que permanecen invariables. En hidrología superficial existe una relación muy estrecha entre parámetros y variables, relaciones que son muy bien aprovechadas por el ingeniero para solucionar problemas cuando se carece de información hidrológica en la zona de estudio.

La morfología de la cuenca se define mediante tres tipos de parámetros:

- Parámetros de forma
- Parámetros de relieve
- Parámetros relativos a la red hidrográfica

2.1.1. Parámetros de Forma

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento (hidrógrafa).

Existe una fuerte componente probabilística en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje. Por esta razón se han buscado relaciones de similitud geométrica entre las características medias de una cuenca y de su red de canales con esas de otras cuencas. Los principales factores de forma son:

2.1.1.1. Factor de forma de Horton

Las observaciones de un buen número de cuencas reales en todo el mundo permiten establecer la siguiente relación entre el área de la cuenca A y el área de un cuadrado de longitud L , siendo L la longitud del cauce principal:

$$\frac{A}{L^2} = \frac{A^{-0.136}}{2}$$

Despejando el valor de L se tiene: $L = 1.41 \times A_{0.568}$

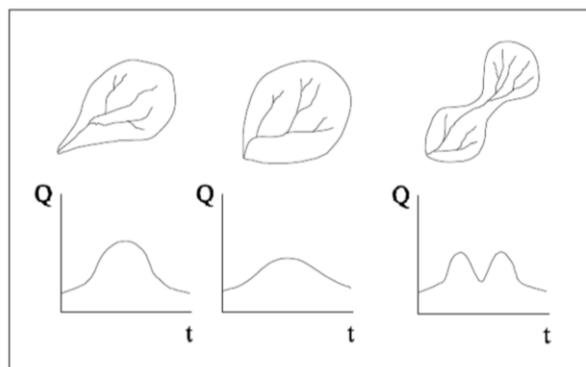


Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca

2.1.1.2. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

Está definido como la relación entre el perímetro P de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

2.1.2. Parámetros de Relieve

Son muy importantes ya que el relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma misma de la cuenca. Los parámetros relativos al relieve son:

2.1.2.1. Pendiente promedio de la cuenca

Este parámetro es de importancia pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca. Uno de los métodos más representativos para el cálculo es el muestreo aleatorio por medio de una cuadrícula; llevando las intersecciones de la cuadrícula sobre el plano topográfico y calculando la pendiente para todos los puntos arbitrariamente escogidos (Ver figura 2-2). Con todos estos valores se puede construir un histograma de pendientes que permite estimar el valor medio y la desviación estándar del muestreo de las pendientes.

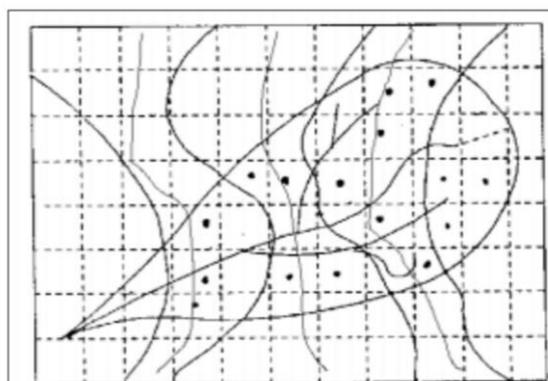


Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca

2.1.2.2. Curva hipsométrica

Esta curva representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. También podría verse como la variación media del relieve de la cuenca.

La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en km^2 o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros. Normalmente se puede decir que los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas.

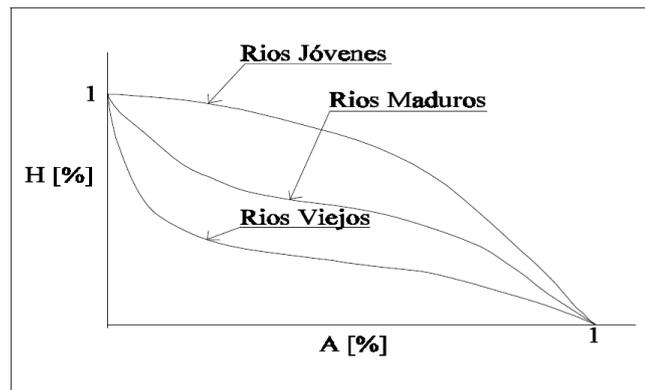


Figura 2-3 Curvas hipsométricas características

2.1.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación de la superficie, en km^2 o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene los mismos datos de esta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca.

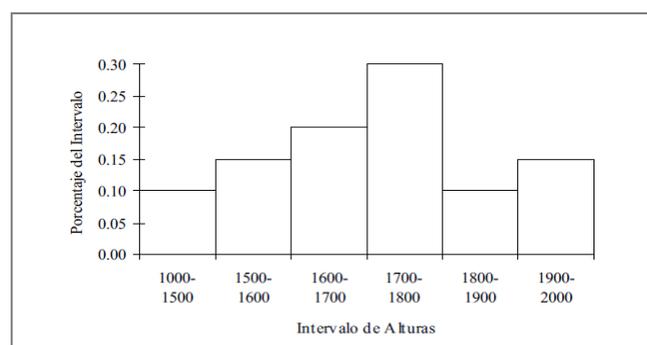


Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas

2.1.3. Parámetros relativos a la red hidrográfica

La red de ríos de una cuenca hidrográfica está constituida por el cauce principal y sus tributarios o afluentes. La forma en que estén conectados estos cauces en una cuenca determinada, influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. Se han desarrollado una serie de parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del sistema de ríos en la escorrentía superficial directa.

2.1.3.1. Orden de la cuenca

Es un número que refleja el grado de ramificación de la red de ríos. La clasificación de los cauces de una cuenca se realiza a través de las siguientes premisas:

- Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
- Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y en general, los cauces de orden n se forman cuando dos cauces de orden n-1 se unen.
- Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.
- El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida.

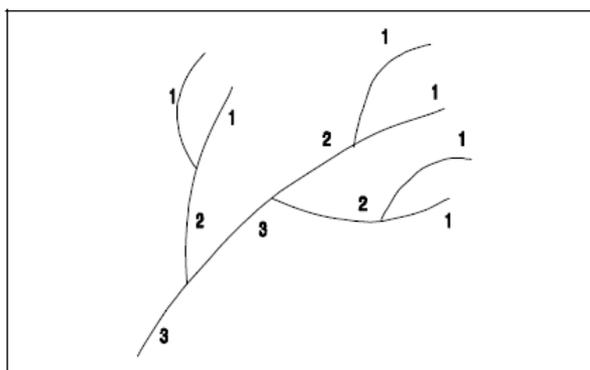


Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca

2.1.3.2. Densidad de drenaje

Esta definida como la relación, D_d entre la longitud total a lo largo de todos los canales de agua de la cuenca en proyección horizontal y la superficie total de la cuenca.

$$D_d = \frac{\sum l_i}{A}$$

Donde:

$\sum l_i$ = Longitud total de todos los ríos en km

A = Área en Km^2

l_i = Longitud de cada río

Para las unidades que se indican se han encontrado valores mínimos de D_d del orden de 7, valores promedios en el rango de 20 a 40 y valores máximos del orden de 400. Valores bajos de D_d generalmente están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Valores altos fundamentalmente son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso.

El valor inverso de D_d significa un promedio del número de unidades cuadradas que se necesita para mantener un caudal de una unidad de longitud. Por esta razón: $1/D_d$ suele ser llamada constante de mantenimiento de un canal.

2.2. Número Curva

El número curva es un parámetro empírico usado en hidrología para predecir la escorrentía directa o la infiltración del exceso de lluvia. El método del número de curva fue desarrollado por la USDA Natural Resources Conservation Service, el cual era antes llamado Soil Conservation Service o SCS.

El número de curva fue desarrollado a partir de un análisis empírico de escorrentía en pequeñas cuencas y ploteo de pendientes monitoreados por la USDA. Es ampliamente usado y es un método eficiente para determinar la cantidad aproximada de escorrentía directa de un evento de lluvia en un área en particular.

El número curva está basado en el grupo de suelo del área hidrológica, uso de tierra, tratamiento y condición hidrológica. La ecuación de escorrentía es:

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{Para } P \leq I_a \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & \text{Para } P > I_a \end{cases}$$

Donde:

Q es escorrentía

P es lluvia

S es la retención de humedad de suelo máximo potencial después que empieza la lluvia

I_a es la abstracción inicial o la cantidad de agua antes de la escorrentía, tales como la infiltración o intercepción de lluvia por la vegetación; históricamente se ha asumido que: $I_a = 0.2S$

El número de curva CN está relacionado de la siguiente forma:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

CN tiene un rango de variación entre 30 y 100. Números bajos indican bajo potencial de escorrentía mientras que números grandes indican incremento del potencial de escorrentía. Mientras más bajo el número de curva el suelo es más permeable.

2.3. Tiempo de concentración

Es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca llegue a la salida. Según Kirpich la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$t_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times S^{-0.385}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (minutos)

L = Máxima longitud del recorrido (m)

S = Pendiente media de la cuenca (m/m)

Tabla 2-1 Números curva para áreas urbanas

Cover description	Average percent impervious area ^{2/}	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
Fully developed urban areas (vegetation established)					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ^{3/} :					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) ^{4/}		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
Developing urban areas					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) ^{5/}		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c).					

2.4. Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo que por lo general es una cuenca hidrográfica. Los modelos hidrológicos son pues herramientas que nos ayudan a comprender y analizar eventos extremos como sequías e inundaciones, generar escenarios de disponibilidad hídrica y en general realizar un óptimo y adecuado manejo de los recursos hídricos.

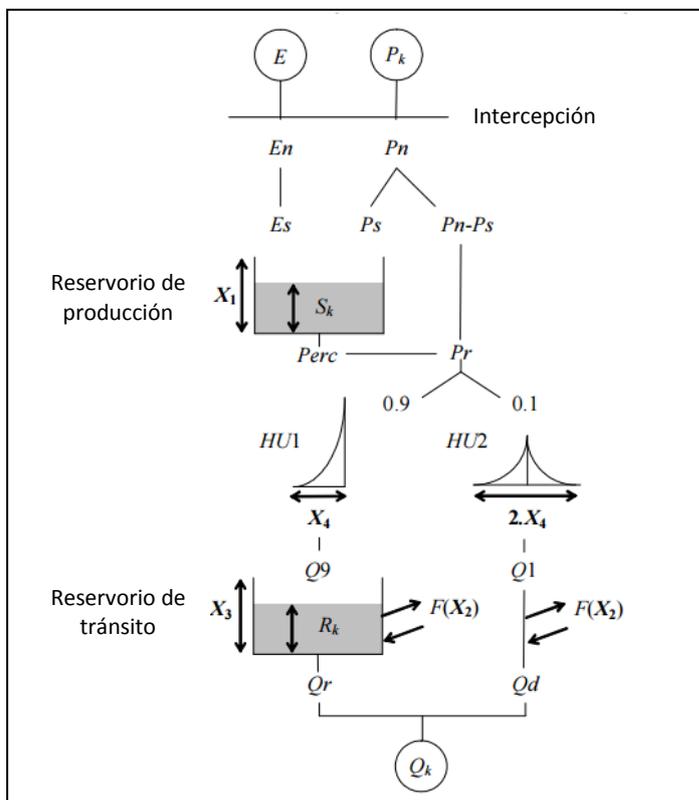
2.4.1. GR4J

El modelo GR4J ha sido desarrollado por el departamento de Ingeniería rural del CEMAGREF de Francia a principio de los años 80's. Es un modelo lluvia-escorrentía de 4 parámetros a paso de tiempo diario que se puede utilizar para estudios regionales. El objetivo principal de este modelo es para uso en aplicaciones de gestión de recursos hídricos.

Una de las ventajas de este modelo es que no tiene límites en cuanto a la superficie de la cuenca. Al principio, se aplicó a cuencas de hasta 4000 km² de área pero después se utilizó en forma global para cuencas más grandes (hasta 40000 km²) también en forma semi-distribuida, dividiendo la cuenca en sub-cuencas homogéneas.

El modelo GR4J sólo tiene cuatro parámetros a calibrar:

- X1: Capacidad del reservorio de producción (mm)
- X2: Coeficiente de cambios subterráneos (mm)
- X3: Capacidad a un día del reservorio de tránsito (mm)
- X4: Tiempo de base del hidrograma unitario UH1 (j)



Fuente: Cemagref (2007)

Figura 2-6 Esquema de la estructura del modelo GR4J

Sobre una amplia muestra de cuencas, se han obtenido los valores que se muestran en la tabla.

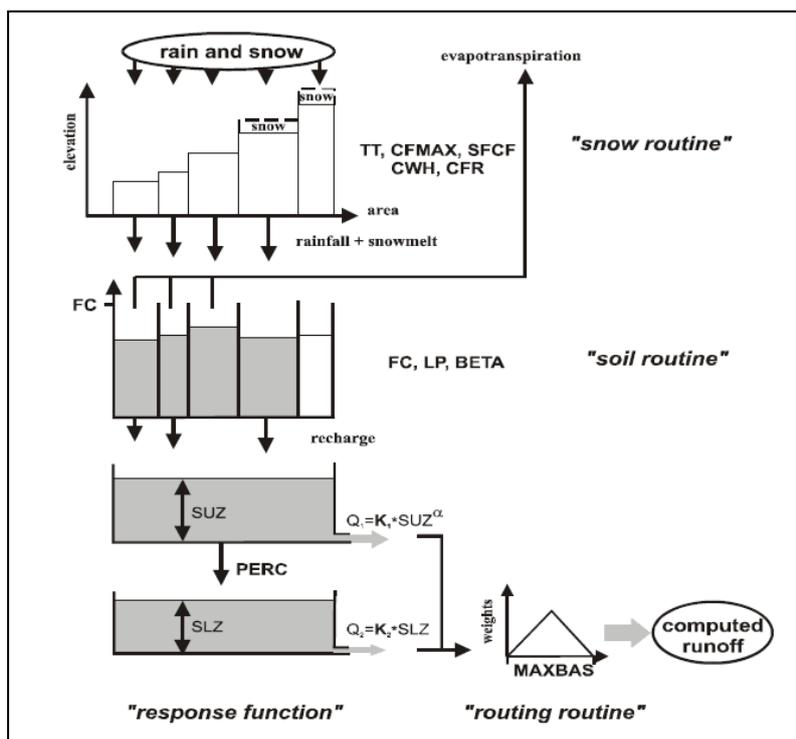
Tabla 2-2 Rango de valores de los parámetros del modelo GR4J

Parámetro	Mediana	Intervalo de Confianza al 80%
X1 (mm)	350	100 a 1200
X2 (mm)	0	-5 a 3
X3 (mm)	90	20 a 300
X4 (j)	1.7	1.1 a 2.9

Fuente: Cemagref (2007)

2.4.2. HBV

El modelo HBV desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco se ha usado para simular la escorrentía en Suecia, pero el modelo ha sido utilizado a veces en versiones modificadas en más de 30 países. Este modelo simula el caudal diario usando la lluvia diaria, temperatura y evapotranspiración potencial como datos de entrada. La precipitación es simulada a partir de la nieve o la lluvia dependiendo de si la temperatura esta encima o debajo del umbral de temperatura.



Fuente: Jan Seibert (2011)

Figura 2-7 Esquema de la estructura del modelo HBV

Tabla 2-3 Rango de valores de los parámetros del modelo HBV

Parámetro	Explicación	Mínimo	Máximo	Unidad
Rutina de nieve				
TT	Temperatura umbral	-2.5	2.5	° C
CFMAX	Factor grado día	1	10	mm ° C ⁻¹ d ⁻¹
SFCF	Factor de corrección de nevada	0.4	1	-
CWH	Capacidad de retención de agua	0	0.2	-
CFR	Coefficiente de recongelamiento	0	0.1	-
Rutina de suelo y evaporación				
FC	Máximo SM	50	500	mm
LP	Umbral SM para reducir evaporación	0.3	1	
BETA	Coefficiente de forma	1	6	
Rutina de agua subterránea y respuesta				
K ₀	Coefficiente de recesión	0.05	0.5	d ⁻¹
K ₁	Coefficiente de recesión	0.01	0.3	d ⁻¹
K ₂	Coefficiente de recesión	0.001	0.1	d ⁻¹
UZL	Umbral para la salida K ₀	0	100	mm
PERC	Flujo máximo de arriba hacia abajo	0	6	mm d ⁻¹
MAXBAS	Longitud de la funcion de ponderación	1	5	d

2.4.3. HEC-HMS

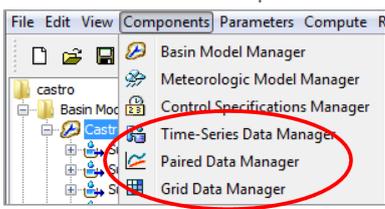
El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU.

El programa fue desarrollado a principios de 1992 como un reemplazo para el HEC-1, el cual ha sido por mucho tiempo considerado un estándar para la simulación hidrológica. El nuevo HEC-HMS proporciona casi todas las mismas capacidades de simulación, pero se ha modernizado con avances en análisis numérico que aprovecha la potencialidad de los computadores de hoy. También incluye algunas características que no estaban incluidas en HEC-1, tales como la simulación continua y la hidrología superficial en celda de grilla. Además proporciona una interfaz gráfica de usuario para hacer más fácil el uso del software.

El modelo HEC-HMS se usa para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia, incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Los hidrogramas producidos por el modelo son usados directamente o en combinación con otros softwares para estudios de disponibilidad hídrica, drenaje urbano, pronóstico de caudal, diseño de aliviadero de presas, reducción de daños por inundación, operación de sistemas entre otros.

Tabla 2-4 Componentes de los datos de entrada

Time-Series Data	Paired Data	Gridded Data
Precipitation gages	Storage-discharge functions	Precipitation gridsets
Discharge gages	Elevation-storage functions	Temperature gridsets
Stage gages	Elevation-area functions	Solar radiation gridsets
Temperature gages	Elevation-discharge functions	Crop coefficient gridsets
Solar radiation gages	Inflow-diversion functions	Storage capacity grids
Windspeed gages	Cross sections	Percolation rate grids
Air Pressure gages	Unit hydrograph curves	Storage coefficients grids
Humidity gages	Percentage curves	Moisture deficit grids
Altitude gages	ATI-meltrate functions	Impervious area grids
Crop coefficient gages	ATI-coldrate functions	SCS curve number grids
Snow water equivalent gages	Groundmelt patterns	Elevation grids
Sediment Load gages	Meltrate patterns	Cold content grids
Concentration gages		Cold content ATI grids
Percent gages		Meltrate ATI grids
Evapotranspiration gages		Liquid water content grids
		Snow water equivalent grids
		Water content grids
		Water potential grids
		Air pressure gridsets
		Humidity gridsets
		Windspeed gridsets
		Energy grids
		Albedo grids
		Snow depth grids



2.5. Medidas de bondad de ajuste

La calibración de los modelos se enfocan usualmente en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este estudio, se han utilizado los siguientes criterios estadísticos o coeficientes:

2.5.1. NASH

El criterio de Nash-Stcliffe es uno de los más usados en hidrología. Su valor se define como:

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

Donde:

Qsim = Caudales simulados

Qi = Caudales observados

\bar{Q} = Promedio de los caudales observados

A continuación se muestra una clasificación de los valores de NASH:

Tabla 2-5 Valores referenciales de NASH

NASH	AJUSTE
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011)

2.5.2. RMSE

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Su expresión se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}}$$

Donde:

Qsm = Caudales simulados

Qi = Caudales observados

n = Número de valores simulados

2.5.3. R

El coeficiente de correlación (R) expresa la dependencia lineal entre dos variables, para este estudio nos referimos a los caudales observados y los caudales simulados. Su expresión se define como:

$$r = \frac{S_{obs,sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}}$$

Donde: $S_{obs,sim}$ es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de Estudio

3.1.1. Ubicación

La cuenca del río Zarumilla, esta ubicado al Norte de Perú. Limita al norte con el oceano Pacífico, al oeste con el océano Pacífico, al sur con la cuenca del río Tumbes y por el este con la cuenca del río Tumbes y Ecuador. El río Zarumilla es parte de la frontera entre Ecuador y Perú.

La cuenca tiene un area total de 890.56 Km² se encuentra compartido entre las republicas del Perú y Ecuador en porcentajes de 45% y 55% respectivamente.

Geográficamente sus puntos extremos se ubican entre los paralelos 03° 20' y 04° 00' de latitud sur y los meridianos 80° 00' y 80° 20' de longitud oeste.

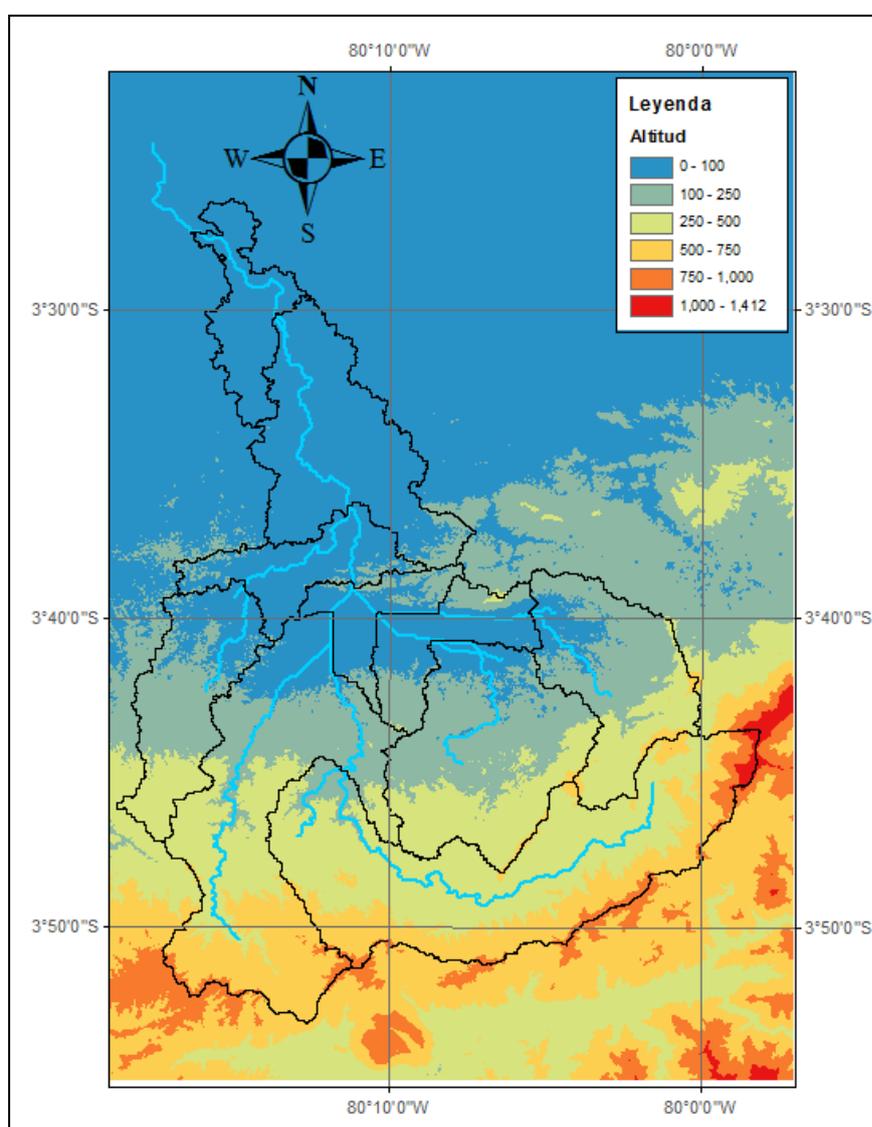


Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Zarumilla sobre el modelo digital del Terreno

3.1.2. Población

La cuenca del río Zarumilla tiene una población aproximada de 53385 Habitantes. distribuida en los distritos de Zarumilla, Aguas Verdes, Matapalo y Papayal según las estimaciones del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) para el año 2015. Esta población está concentrada principalmente en los distritos de Zarumilla y Aguas Verdes.

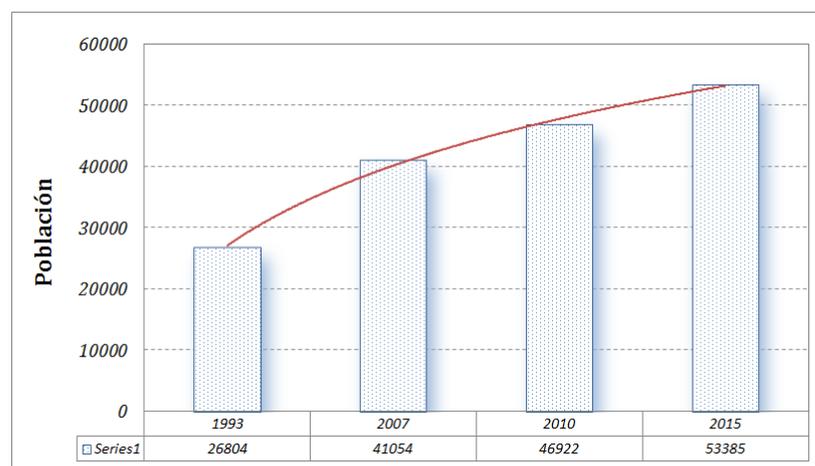


Figura 3-2 Evolución de la población en la cuenca del río Zarumilla

3.1.3. Clima

La cuenca del río Zarumilla puede definirse como subdesértico tropical (semiarido de estepa según Thornthwaite) con precipitaciones medias anuales de 282 mm en Zarumilla hasta 1106 mm en Condor Flores, el cual se puede observar en la Figura 3-3.

La variación interanual de la precipitación es muy amplia lo que da lugar a periodos de sequía pero también de inundaciones siendo la parte baja de la cuenca la zona más afectada. Este fenómeno es originado por el movimiento variable de las corrientes de Humboldt y El Niño respecto a la costa.

El periodo de lluvias se inicia en el mes de diciembre y termina en mayo, entre junio y noviembre las precipitaciones son muy escasas llegando incluso a valores de 0 mm.

En cuanto a la temperatura, el promedio anual registrado en la estación Los Cedros es de 24.5 °C sin embargo cuando las condiciones térmicas son afectadas por el fenómeno El Niño la temperatura puede llegar a sobrepasar valores máximos diarios de 36 °C.

3.1.4. Hidrología

El río Zarumilla, en su eje principal tiene una longitud de aproximadamente 90 km. El río Zarumilla permanece seco durante la mayor parte del año y por lo general presenta escorrentía entre los meses de enero a marzo.

La red de drenaje natural está constituida por numerosas quebradas que se caracterizan por presentar cauces profundos y erosionados que surcan toda la cuenca hasta desembocar en los ríos, los esteros y en el mar.

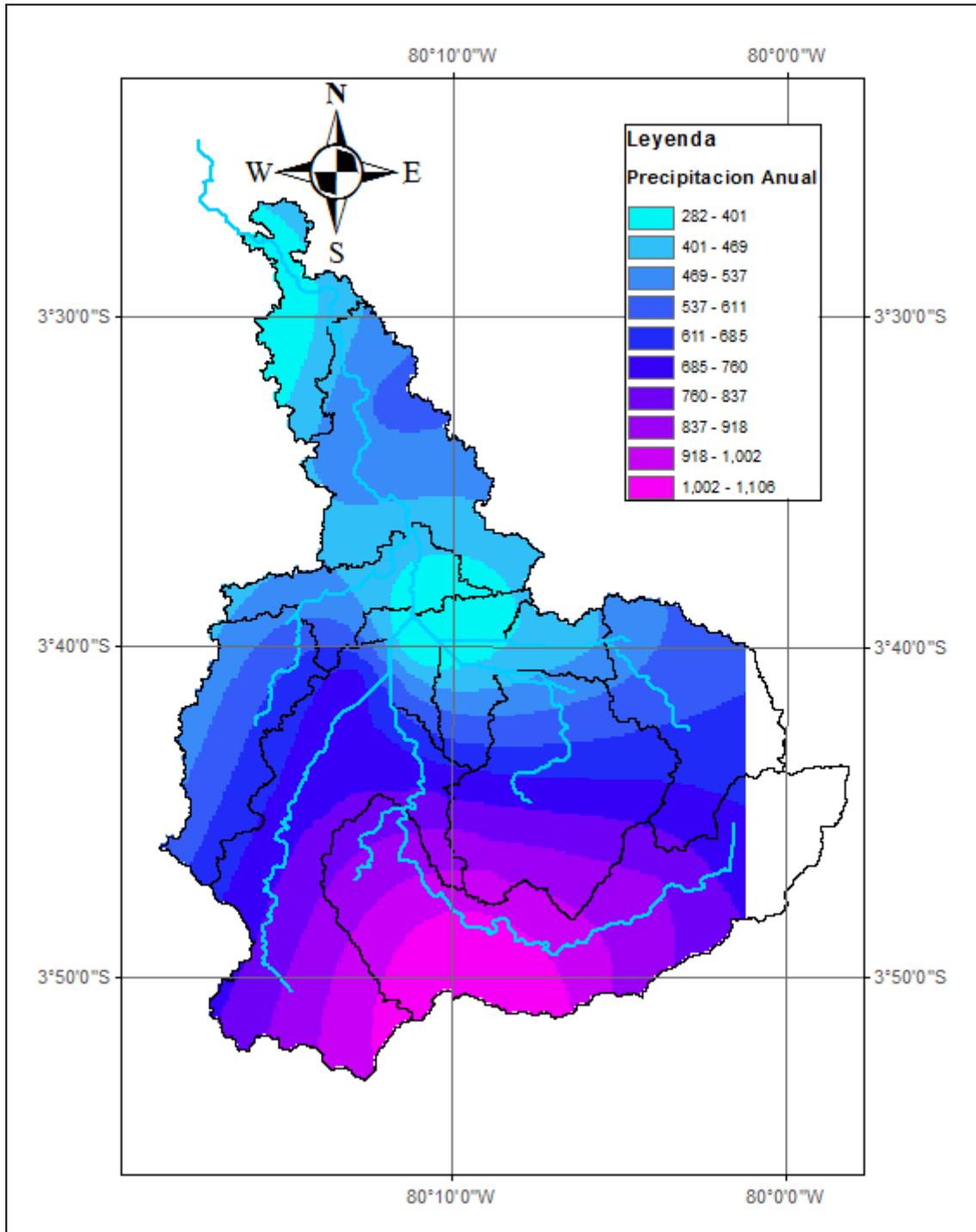


Figura 3-3 Precipitación media anual en la cuenca del río Zarumilla

3.2. Información Utilizada

3.2.1. Selección de estaciones

Existen muy pocas estaciones con datos observados de precipitación en la cuenca del río Zarumilla lado peruano, siendo las estaciones El Salto, Papayal, Hito Bocana y Matapalo, cuya variabilidad de la lluvia a escala diaria se muestra en la Figura 3-4.

Estaciones como Hito Cotrina, Chacritas y Condor Flores solo registran precipitación en el periodo 1993-1996, actualmente están clausuradas.

En relación a la información de caudales, proviene de la estación La Palma que cuenta con datos diarios desde mayo de 1968 hasta febrero de 1983.

Para el presente estudio no ha sido posible acceder a la información hidrometeorológica del lado Ecuatoriano.

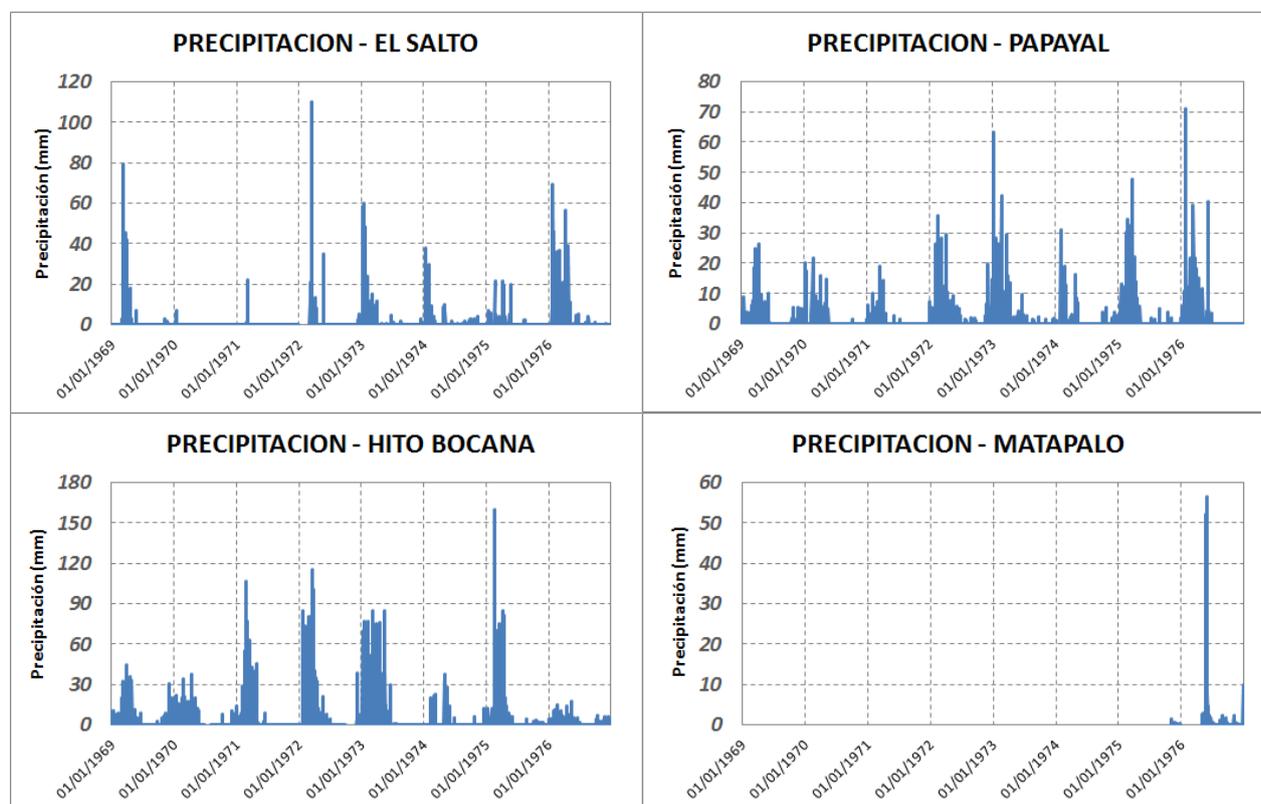


Figura 3-4 Precipitación media diaria de las estaciones en la cuenca del río Zarumilla

3.2.2. Ubicación de estaciones

Para la elaboración de este estudio se han utilizado cuatro estaciones meteorológicas y una estación hidrológica pertenecientes a la red de estaciones de SENAMHI y la estación Palmales del PEBPT (Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes). La Figura 3-5 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas en el lado peruano (color rojo) y en el lado ecuatoriano (color azul). Las estaciones que han sido utilizados para el modelamiento hidrológico se muestran en la Figura 3-6.

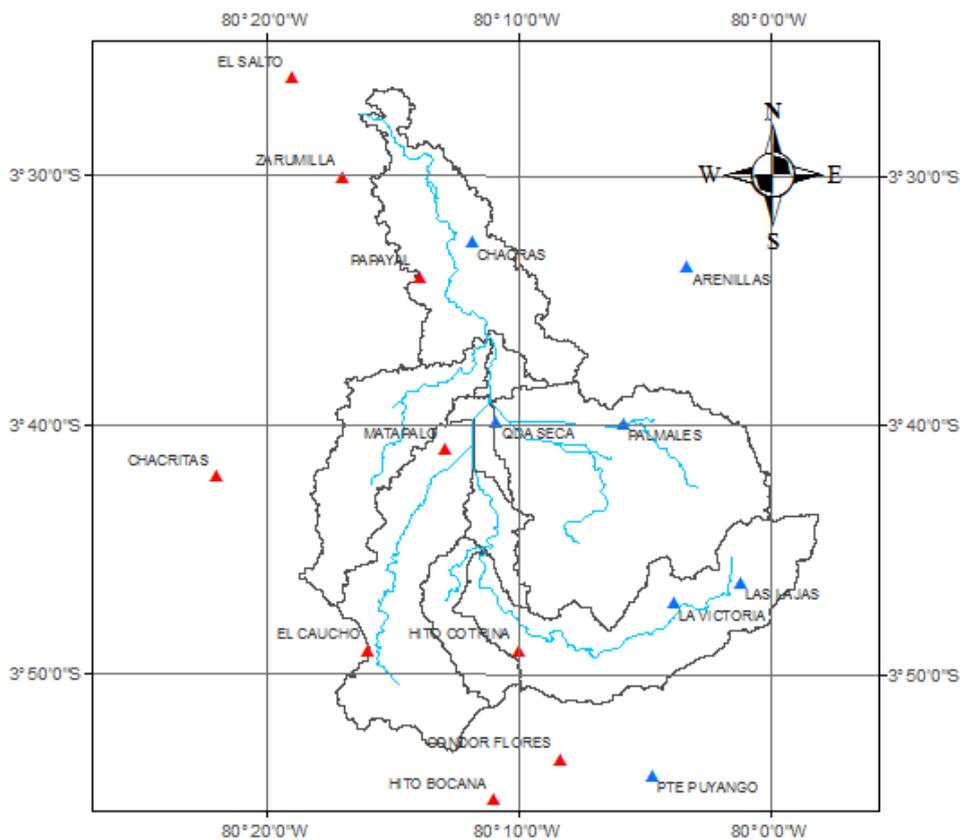


Figura 3-5 Mapa de estaciones meteorológicas en la cuenca Zarumilla

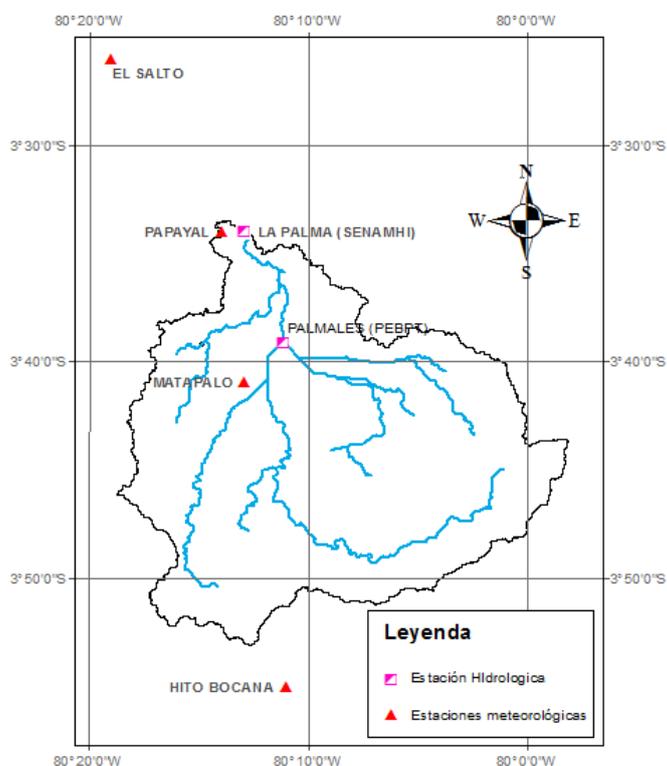


Figura 3-6 Ubicación de estaciones empleadas en este estudio

En la Tabla 3-1 al 3-3 se muestran la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas e hidrológicas que existen en la cuenca del río Zarumilla. Cabe mencionar que las estaciones hidrológicas actualmente están clausuradas.

Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado peruano

Nº	ESTACION	TIPO	CUENCA	DPTO	PROV	LON	LAT	ALT (msnm)
1	EL SALTO	CO	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°19'01"	03°26'01"	6
2	ZARUMILLA	CO	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°17'01"	03°30'01"	21
3	PAPAYAL	CO	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°13'59"	03°34'01"	50
4	MATAPALO	CO	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°12'55"	03°40'57"	65
5	CHACRITAS	PLU	TUMBES	TUMBES	TUMBES	80°22'01"	03°42'01"	99
6	EL CAUCHO	CO	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°16'01"	03°49'01"	438
7	HITO COTRINA	PLU	ZARUMILLA	TUMBES	ZARUMILLA	80°10'01"	03°49'01"	413
8	CONDOR	PLU	TUMBES	TUMBES	ZARUMILLA	80°08'23"	03°53'24"	384
9	HITO BOCANA	PLU	TUMBES	TUMBES	ZARUMILLA	80°11'01"	03°55'01"	333

Tabla 3-2 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado ecuatoriano

Nº	ESTACION	CODIGO	TIPO	PROV	LON	LAT	ALT (msnm)
1	CHACRAS	M482	CO	EL ORO	80°11'53"	03°32'37"	60
2	ARENILLAS	M179	CO	EL ORO	80°03'22"	03°33'37"	60
3	QUEBRADA SECA	M746	PLU	EL ORO	80°10'56"	03°39'50"	80
4	PALMALES	M745	PLU	EL ORO	80°05'54"	03°39'55"	120
5	LAS LAJAS	M741	PLU	EL ORO	80°01'15"	03°46'17"	430
6	LA VICTORIA	M742	PLU	EL ORO	80°03'52"	03°47'07"	410
7	PUENTE	M232	CO	EL ORO	80°04'43"	03°54'03"	305

Tabla 3-3 Estaciones hidrológicas ubicadas en la cuenca binacional Zarumilla en el lado peruano

Nº	ESTACION	TIPO	CUENCA	PROV	LON	LAT	ALT (msnm)
1	LA PALMA	HLM	ZARUMILLA	ZARUMILLA	80°13'01"	03°34'01.00"	43
2	PALMALES	HLM	ZARUMILLA	ZARUMILLA	80°03'22"	03°39'10.48"	56

3.2.3. Periodo de información seleccionado

El periodo común de información seleccionada para el análisis de la precipitación, temperatura y caudal fue para la fase de:

Calibración : 01/01/1972 - 31/12/1976 y

Validación : 05/01/2011 - 30/11/2015

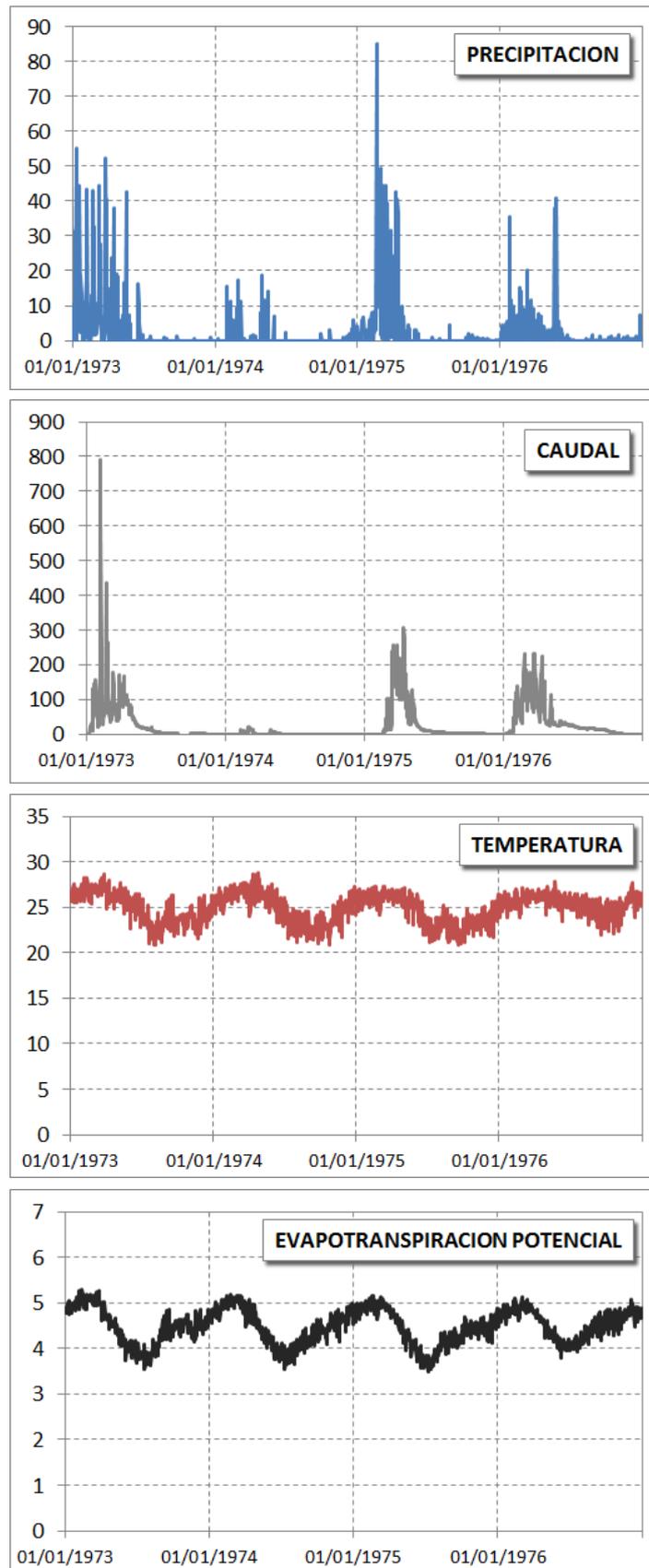


Figura 3-7 Series de tiempo utilizadas para la calibración del modelo

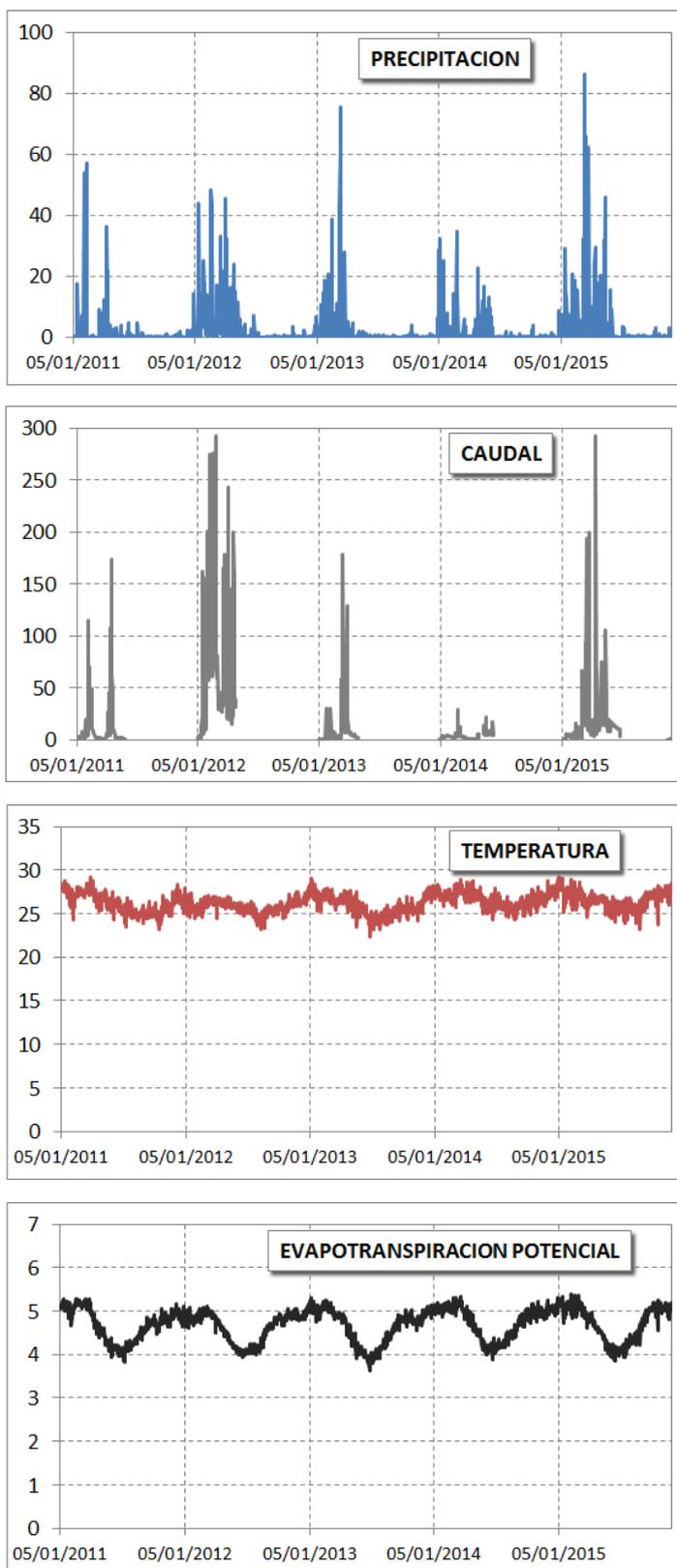


Figura 3-8 Series de tiempo utilizadas para la validación del modelo

3.2.4. Control de calidad de los datos

La información obtenida de las estaciones pluviométricas pueden dar lugar a un cierto número de errores, los cuales pueden ser: errores de observación, errores de transcripción y cálculo entre otros por eso es necesario realizar un análisis de consistencia de los datos. En este estudio se realizó el análisis de doble masa a los datos de precipitación.

3.2.4.1. Análisis de Doble Masa

El análisis de doble masa considera que en una zona meteorológica homogénea, los valores de precipitación que ocurren en diferentes puntos de esa zona en periodos anuales o estacionales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente. Ver Figura 3-9.

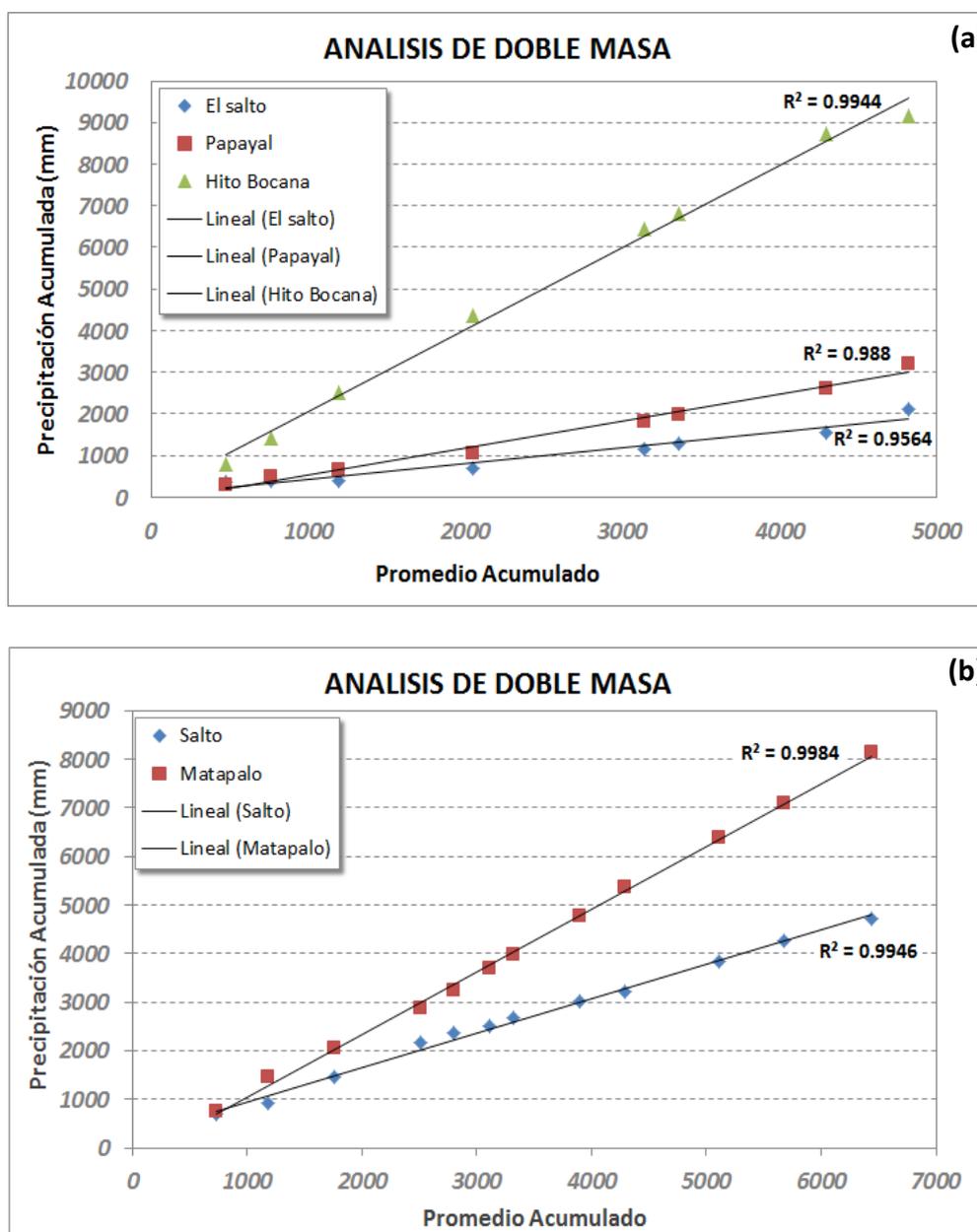


Figura 3-9 Análisis de doble masa de estaciones pluviométricas a) Estaciones del grupo homogéneo Versus Estación promedio b) Estaciones del grupo homogéneo versus estación Hito Bocana

La Figura 3-9 (a) muestra el análisis de doble masa de tres estaciones meteorológicas: El Salto, Papayal e Hito Bocana. El periodo analizado corresponde a 7 años de información diaria de 1969 a 1976. Se puede observar que la información pluviométrica se ajusta bastante bien a una ecuación lineal lo cual nos indica que la información ha sido medida de manera adecuada en las tres estaciones.

La Figura 3-9 (b) muestra el análisis de doble masa de dos estaciones meteorológicas: El Salto y Matapalo. El periodo analizado corresponde a 12 años de información diaria de 1999 al 2010. Al igual que el análisis anterior, se puede observar que la información pluviométrica también se ajusta muy bien a una ecuación lineal lo cual nos indica que la información también ha sido medida de manera adecuada en las dos estaciones.

3.3. Estimación de la curva número de la cuenca Zarumilla

En el estudio “Sistema de seguimiento de la escorrentía a nivel nacional” realizado por Cesar Aybar, se generó el mapa de curva número a nivel nacional. A partir de este mapa se obtuvo el número curva para el área de estudio en la cuenca del río Zarumilla. Así, luego de realizar la clasificación de los valores, se obtuvo un valor de curva número promedio de 85.

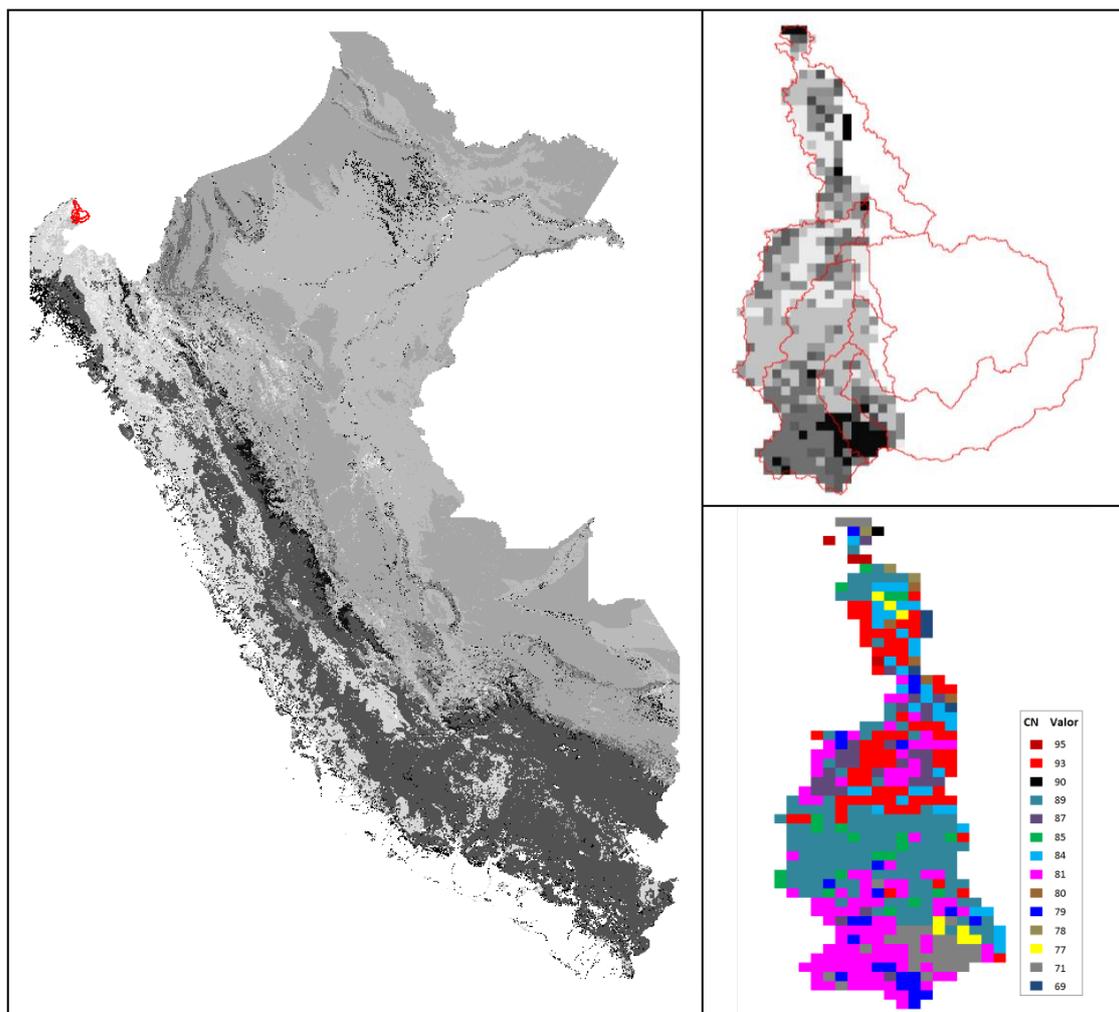


Figura 3-10 Mapa de curva número a nivel nacional y para la cuenca Zarumilla

3.4. Parámetros fisiográficos de la cuenca Zarumilla

En el proceso del modelamiento hidrológico se debe realizar la calibración de los parámetros del modelo. Estos parámetros están por lo general relacionados con información fisiográfica de la cuenca, por eso se muestra a continuación los parámetros fisiográficos de la cuenca del río Zarumilla.

Tabla 3-4 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Zarumilla (hasta la estación La Palma)

SUBCUENCA	ÁREA (Km ²)	PERÍMETRO (Km)	LONGITUD DE CAUCE (Km)	ALTITUD MEDIA (msnm)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	DENSIDAD DE RÍOS (Ríos/Km ²)
Zarumilla	801	215.9	90	245.7	2.029	1.8	0.32

Fuente: SENAMHI 2008

3.5. Estimación de la precipitación media

La precipitación media areal en la cuenca del río Zarumilla se calculó empleando la información pluviométrica disponible de la red de observación de SENAMHI. Se utilizó el software hydraccess para estimar los pesos de cada estación y de esta manera estimar la precipitación media diaria en la cuenca.

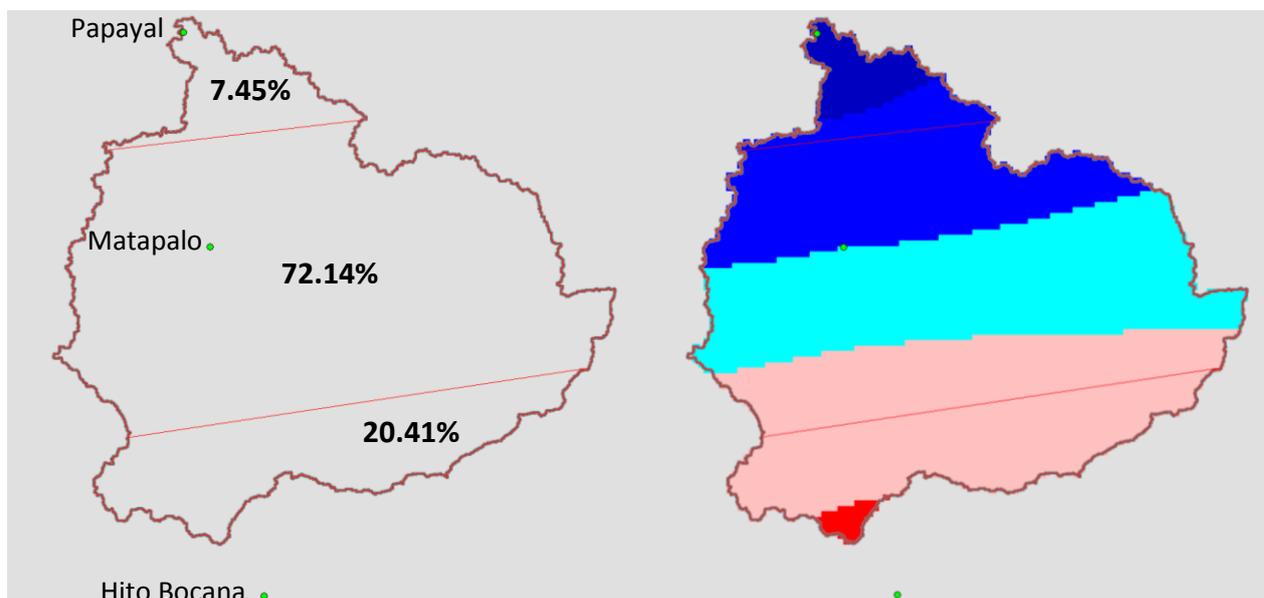


Figura 3-11 Precipitación media utilizando el método de Thiessen para la cuenca Zarumilla

3.6. Estimación de los caudales diarios

Los caudales diarios se han estimado a partir de la información de niveles diarios que ha registrado el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT) en algunos meses del año. Esta información ha sido proporcionada por el PEBPT para el periodo del 2011 al 2015.

A continuación se muestran las curvas altura gasto empleadas para convertir el nivel a caudal.

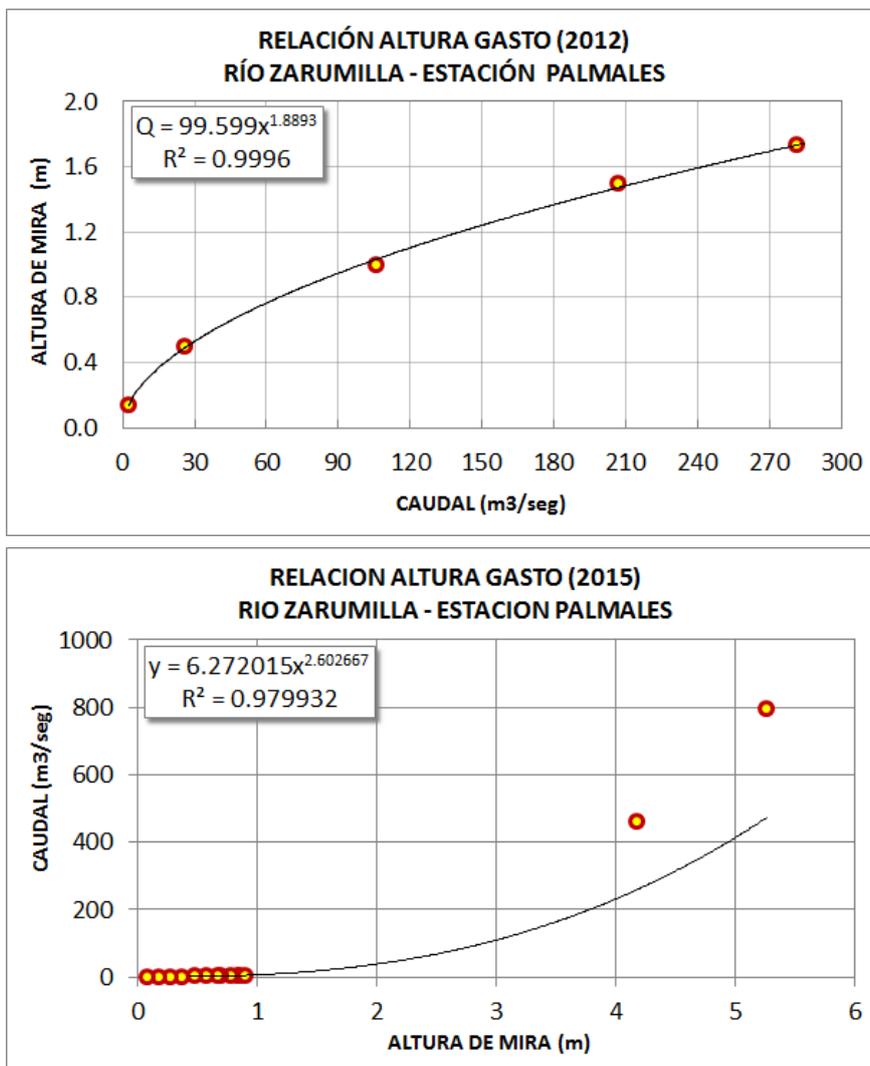


Figura 3-12 Curvas altura gasto obtenidas para la estación Palmales

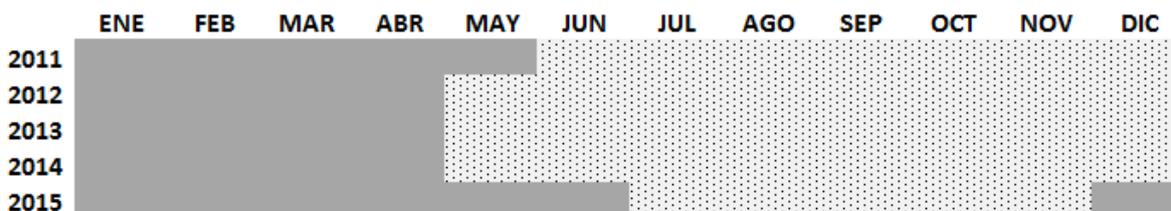


Figura 3-13 Data disponible de nivel y caudal en la estación Palmales (color gris) y sin datos (achurado)

3.7. Flujograma metodológico

La Figura 3-14 sintetiza el procedimiento metodológico desarrollado en el modelamiento hidrológico del presente estudio.

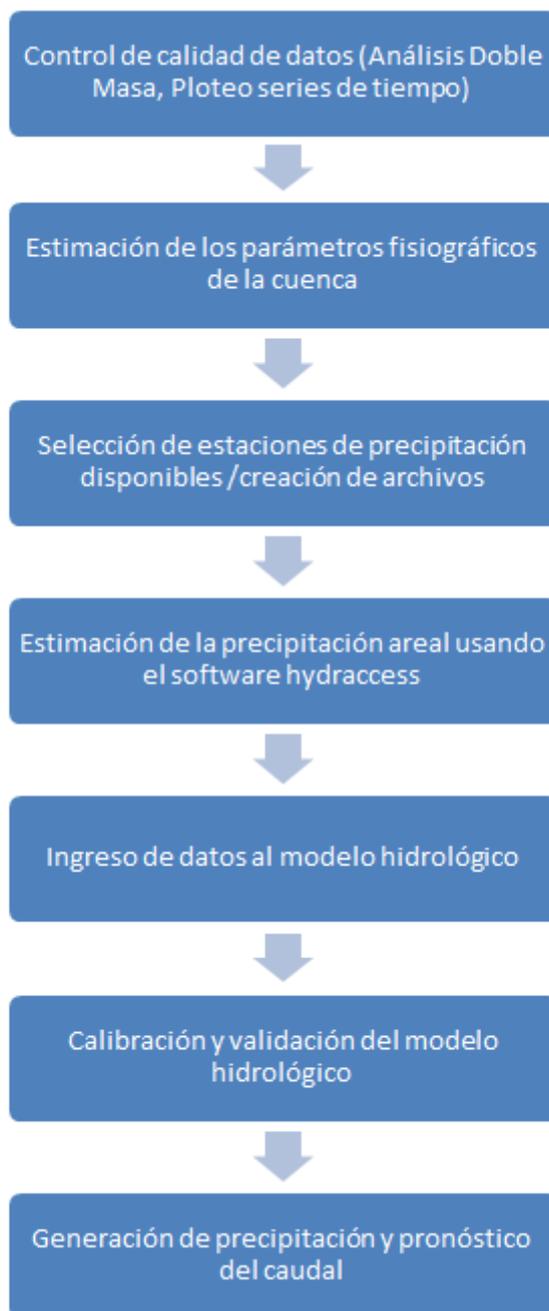


Figura 3-14 Flujograma metodológico para el modelamiento de la cuenca Zarumilla

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El periodo de información en común para todas las estaciones que se ha encontrado en la base de datos de SENAMHI de las variables precipitación, temperatura y caudal es de 5 años completos que corresponden al periodo: 01-01-1972 al 31-12-1976.

Debido a que no se cuenta con información de temperatura en la cuenca Zarumilla, se empleo la información de temperatura de las estaciones ubicadas en la cuenca vecina Tumbes. Así, se empleo los datos de temperatura diarias de las estaciones Cabo Inga y Rica Playa. Debido a que la diferencia de temperatura entre ambas estaciones es de 1 °C en promedio, se consideró el promedio de temperatura de ambas estaciones como el valor de la temperatura media en toda la cuenca.

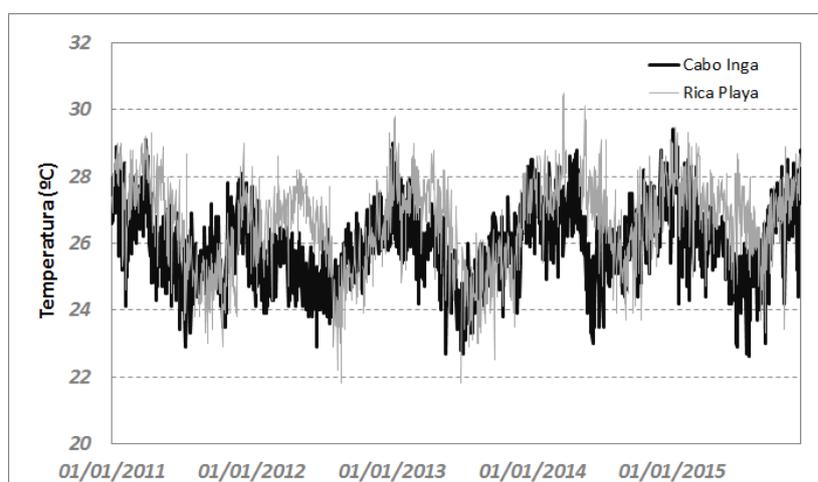


Figura 4-1 Temperatura diaria de las estaciones Cabo Inga y Rica Playa

Para el cálculo de la EP, se utilizó la formulación propuesta por Oudin et al. (2005), la cual utiliza la radiación global (que depende de la latitud y el día juliano) y la temperatura media diaria, por tanto se estimó la evapotranspiración potencial diaria para los periodos de calibración y validación.

También se tiene información de niveles diarios proporcionado por el PEBPT de los meses enero-abril de los años 2011 al 2015, esta información de niveles ha sido convertida a caudales diarios a través de las curvas altura-caudal que se han construido a partir de los aforos realizados por personal de la Dirección de Hidrología en las campañas de aforo realizados en las cuencas Zarumilla y Tumbes.

Con toda esta información disponible para la cuenca Zarumilla, se han considerado los siguientes periodos:

Periodo Calibración : 01-01-1972 al 31-12-1976

Periodo Validación : 05-01-2011 al 30-11-2015

Periodo Verificación: 01-12-2015 al 30-04-2016

En el periodo de calibración se emplea los datos de caudal generados por SENAMHI, en el periodo de validación se empleó datos de nivel del río Zarumilla medidos en el punto de control en Palmales y que pertenecen al PEBPT, finalmente en el periodo de verificación se empleó datos de los aforos realizados por los profesionales de SENAMHI en los años 2015-2016.

Tabla 4-1 Datos fisiográficos de la cuenca Zarumilla

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
ÁREA (*)	A	700	Km ²
LONGITUD DEL CAUCE (*)	L	52	Km
COTA MÁXIMA	Hmax	450	m
COTA MÍNIMA	Hmin	56	m
PENDIENTE	S	2.029	%
CURVA NÚMERO	CN	85	---

(*) Medido desde el inicio del río hasta la estación del PEBPT “Palmales”

El tiempo de concentración obtenido con la fórmula de Kirpich para la cuenca del río Zarumilla hasta el punto de aforo en Palmales es de 373.6 minutos, es decir 6.2 horas (6 horas con 20 minutos).

Es importante mencionar que tenemos dos puntos de medición de caudal distintos, ambos están ubicados dentro de la cuenca del río Zarumilla, sin embargo la estación “La Palma” que fue instalada por SENAMHI se encuentra aproximadamente 13 km aguas abajo de la estación “Palmales” que fue instalada por el PEBPT (ver ubicación de ambas estaciones en la tabla 3-3). El área de la cuenca hasta la estación “La Palma” es de 801 Km² y el área de la cuenca hasta la estación “Palmales” es de 700 Km², esto ha ocasionado que para los modelos de calibración se considere el valor del área igual a 801 Km² y para la validación de los modelos se emplee el valor del área igual a 700 Km².

Los valores de los parámetros obtenidos en la fase de calibración con el modelo hidrológico GR4J fueron: X1=5.64, X2=1.92, X3=3.4, X4=0.15; según el manual del CEMAGREF tres de estos parámetros no se encuentran dentro de los rangos establecidos (Ver Tabla 2-2), no es la primera vez que se observa esta situación con este modelo hidrológico por lo cual se sugiere que para las cuencas del Perú se establezcan nuevos rangos para los parámetros del modelo GR4J.

Los valores de los parámetros obtenidos en la fase de calibración con el modelo hidrológico HBV fueron: T_i=0, DD=3, FC=275, Beta=2, C=0.1, K₀=0.01, L₁=2, K₁=0.035, K₂=0.033, K_{perc}=0.28, PWP=225; según la Tabla 2-3, todos los parámetros estimados para el modelo HBV están dentro de los rangos establecidos.

Los valores de curva número y tiempo de concentración obtenidos en este estudio fueron 85 y 6 horas respectivamente. Sin embargo los valores que se emplearon para realizar el modelamiento con HEC-HMS fueron 70 y 6 horas. Cabe mencionar que el valor de curva número estimado en este estudio fue solo para la parte de Perú, de la parte de Ecuador no se conoce. Es importante mencionar que el modelo HEC-HMS realizó un mejor ajuste en el periodo de calibración con un valor de curva número de 70.

A continuación se muestran los caudales simulados durante los procesos de calibración y validación empleando los tres modelos hidrológicos: GR4J, HBV y HEC-HMS.

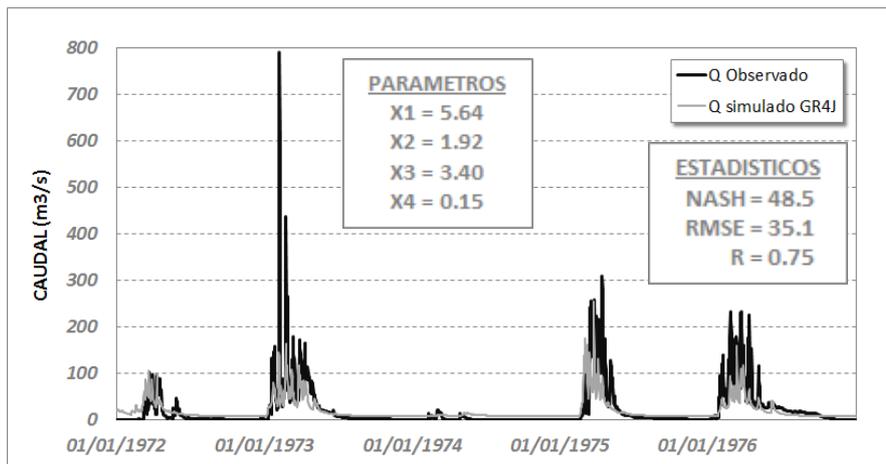


Figura 4-2 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo GR4J (Periodo Calibración)

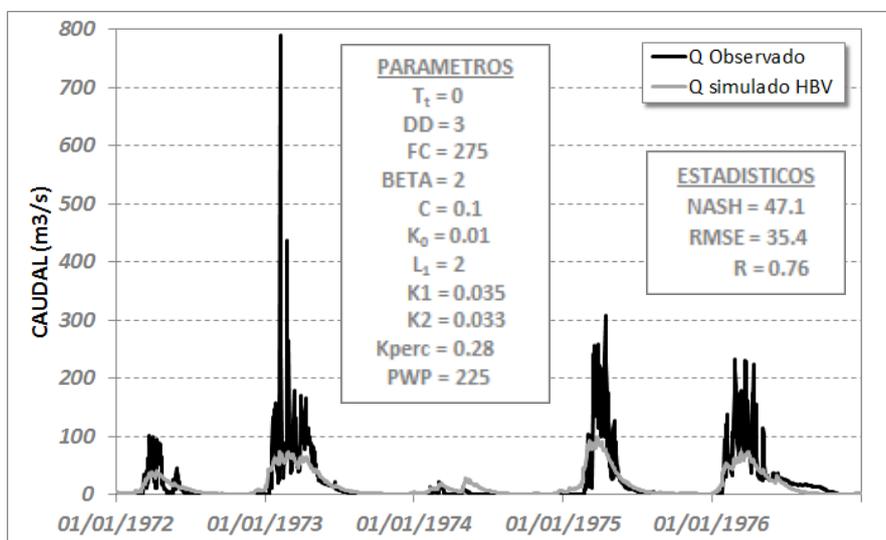


Figura 4-3 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HBV (Periodo Calibración)

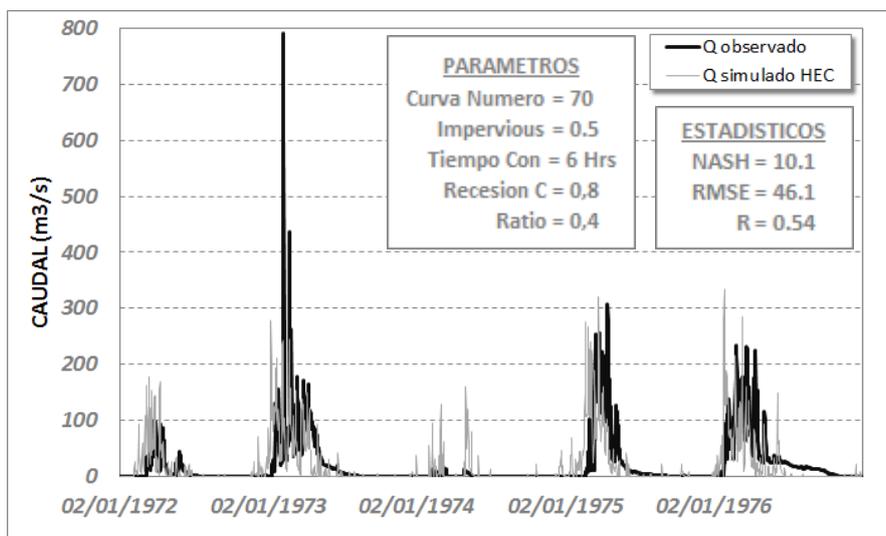


Figura 4-4 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Calibración)

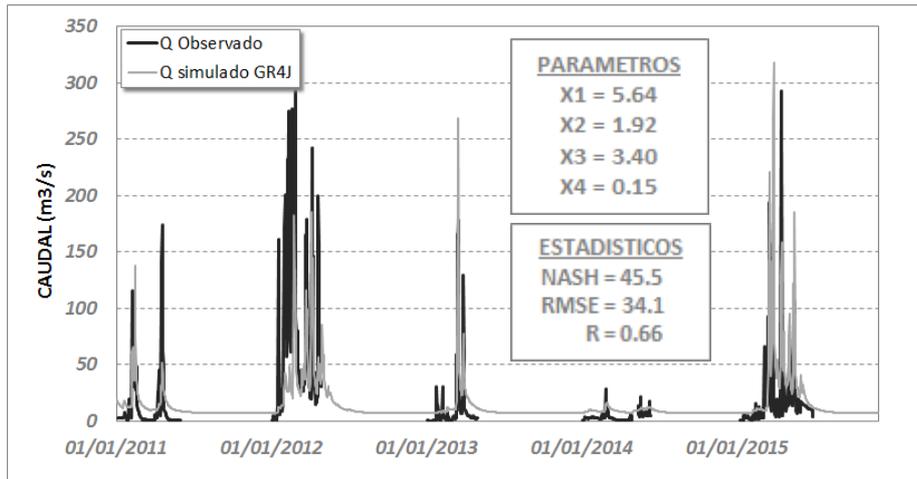


Figura 4-5 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo GR4J (Periodo Validación)

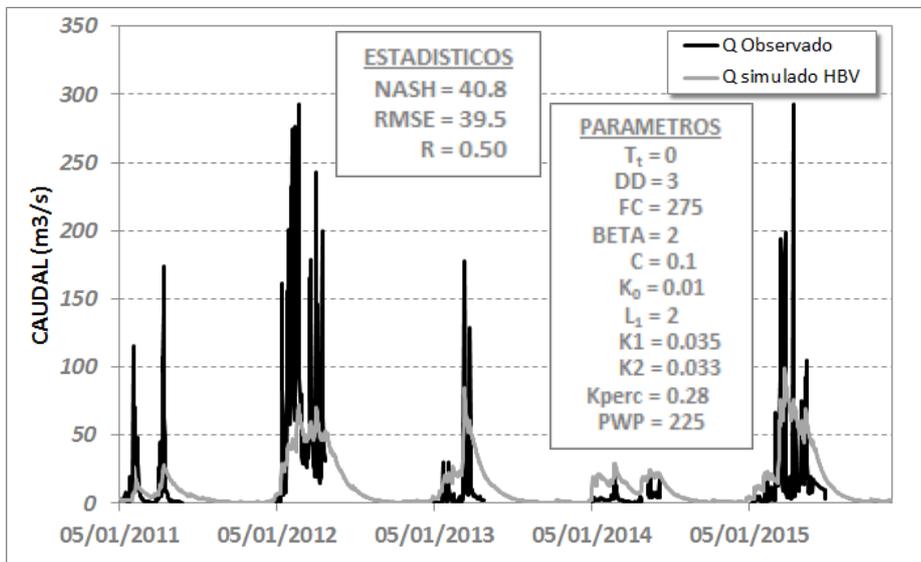


Figura 4-6 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HBV (Periodo Validación)

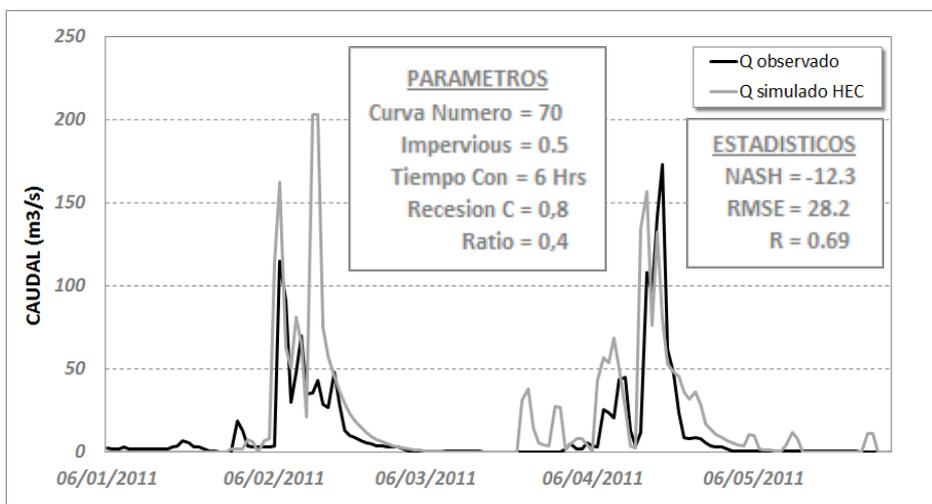


Figura 4-7 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2011)

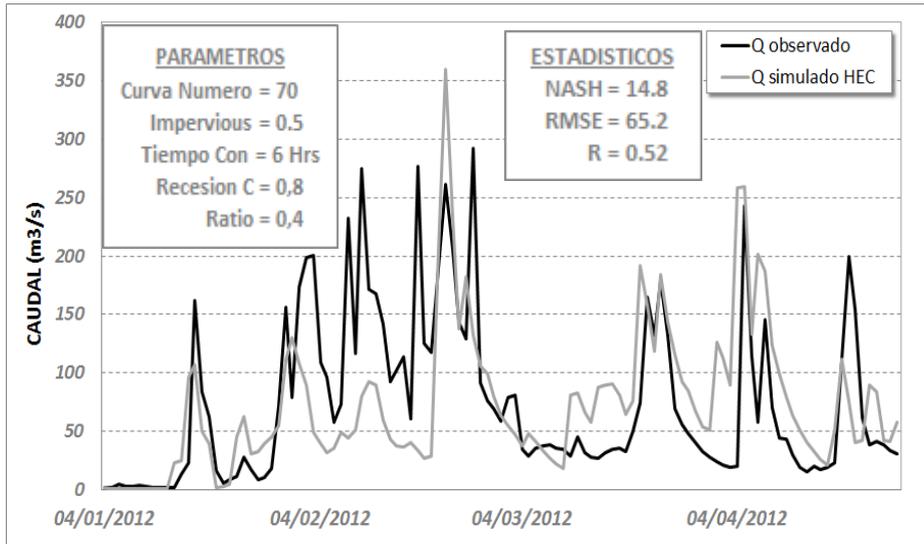


Figura 4-8 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2012)

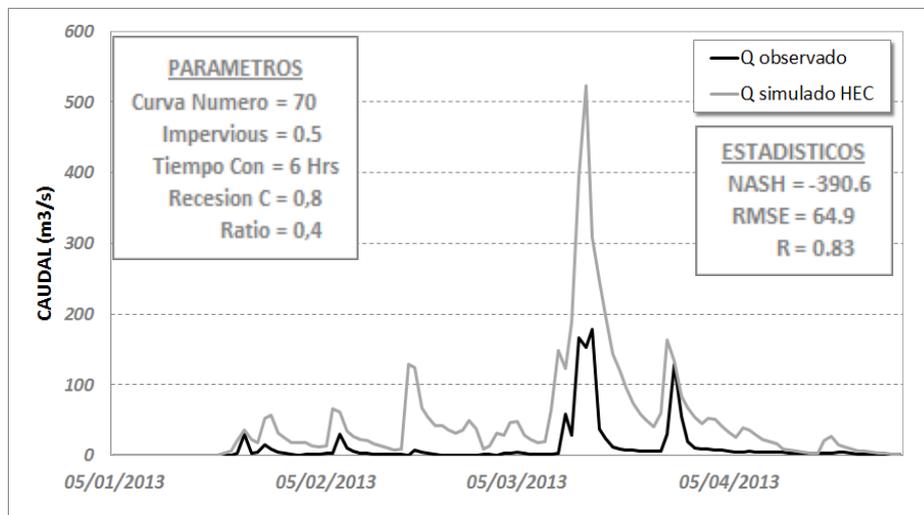


Figura 4-9 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2013)

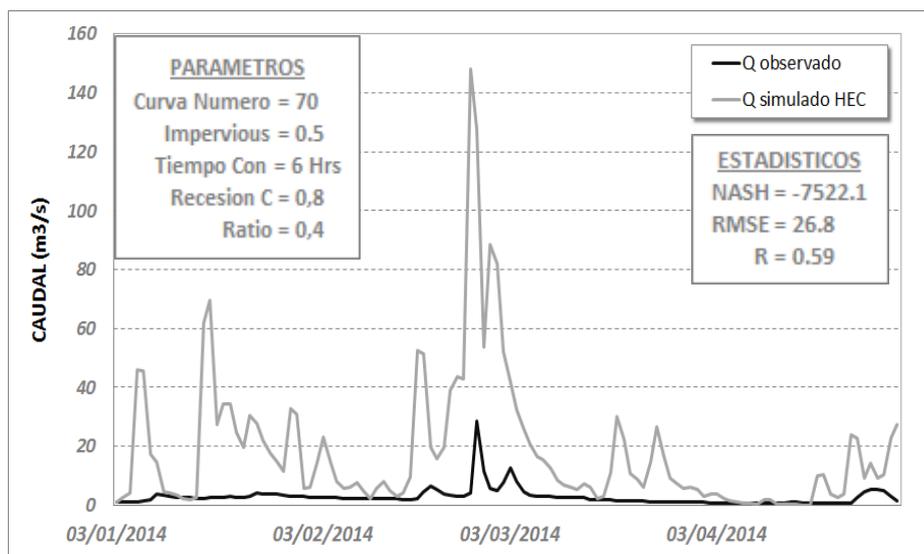


Figura 4-10 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2014)

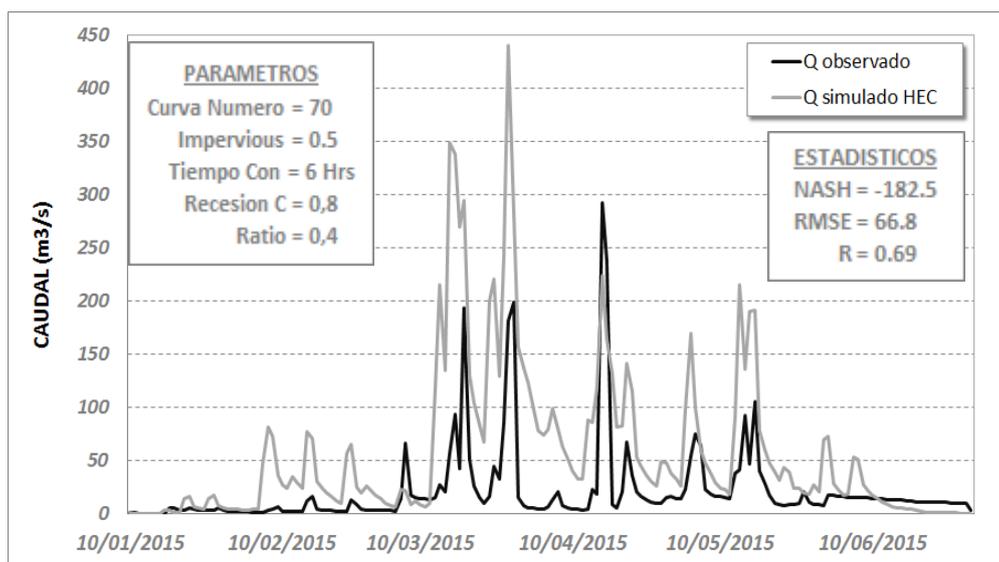


Figura 4-11 Simulación del caudal del río Zarumilla con el modelo HEC-HMS (Periodo Validación 2015)

En este estudio se ha realizado el modelamiento hidrológico del caudal diario del río Zarumilla utilizando los siguientes modelos: GR4J, HBV y HEC-HMS. En la fase de calibración, el modelo con mejor desempeño ha sido el GR4J y en la fase de validación el mejor modelo también ha sido el modelo hidrológico GR4J. Cabe mencionar que debido a que el caudal observado para el periodo de validación (01/01/2011-30/11/2015) no se encuentra disponible en forma continua (solo se tiene el dato del caudal en los meses de enero a abril), la validación con el modelo HEC-HMS se ha realizado para los periodos donde la información si está disponible.

En la fase de calibración el modelo GR4J presentó el mayor valor del coeficiente de NASH, el menor error cuadrático medio y el mayor coeficiente de correlación. Durante este periodo de calibración, según la base de datos de SENAMHI hay un pico en el caudal el día 7 de febrero de 1973 de $790 \text{ m}^3/\text{s}$, este pico no ha podido ser reproducido por ninguno de los tres modelos hidrológicos; con GR4J se obtuvo $135.4 \text{ m}^3/\text{s}$, con HBV se obtuvo $70.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y con HEC-HMS se obtuvo $119 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se ha mencionado la falta de información pluviométrica en la cuenca del río Zarumilla en el lado de Perú, asimismo no se cuenta con la información pluviométrica de casi el otro 50% del área de la cuenca que corresponde a Ecuador. Sumado a estos inconvenientes tampoco se conoce la forma como se ha obtenido el valor del caudal en la estación La Palma de SENAMHI. Aparentemente el valor del pico ocurrido el día 7 de febrero de 1973 está sobrevalorado puesto que ninguno de los modelos pudo acercarse al valor de $790 \text{ m}^3/\text{s}$ además tampoco se observó un valor similar en el periodo 2011-2015 donde el caudal máximo no superó los $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Asimismo, este supuesto caudal pico y en general todos los valores de caudal que no han sido bien estimados ya sea por errores en los métodos de medición del caudal, estimación de la curva altura-caudal, error de digitación entre otros, han ocasionado y afectado los valores de los coeficientes estadísticos: NASH, RMSE y R.

Se ha observado que el modelo HEC-HMS tiene una respuesta rápida ante la ocurrencia de un evento de precipitación comportamiento que es diferente a los caudales simulados con los modelos GR4J y HBV.

Con el fin de verificar la performance de los tres modelos hidrológicos evaluados en este estudio, se realizó la simulación del caudal diario del río Zarumilla para el periodo 01/12/2015-30/04/2016. A diferencia de las figuras anteriores, esta figura 4-12 compara los caudales simulados con el valor del aforo (circulo ojo) obtenido en campo. Solo se disponía de información de precipitación hasta el mes de abril del 2016 además ya no se tienen valores de aforo después del 30 de abril 2016.

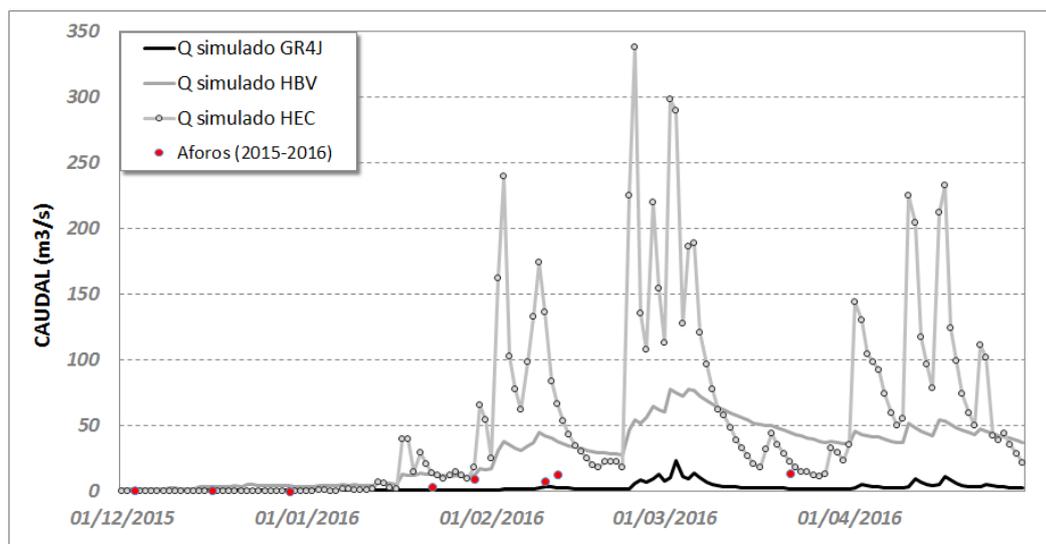


Figura 4-12 Simulación del caudal del río Zarumilla Vs. Aforos (2015-2016)

A continuación se muestra un tabla 4-2 donde se observa el resumen de los resultados obtenidos en los procesos de calibración y validación de los modelos hidrológicos evaluados basados en los indicadores NASH, Error cuadrático medio (RMSE) e índice de correlación (r).

Tabla 4-2 Resumen de la calibración y la validación de los 3 modelos hidrológicos

MODELO	CALIBRACIÓN			VALIDACIÓN		
	NASH	RMSE	R	NASH	RMSE	R
GR4J	48.5	35.1	0.75	45.5	34.1	0.66
HBV	47.1	35.4	0.76	40.8	39.5	0.50
HEC-HMS*	10.1	46.1	0.54	-12.3	28.2	0.69

* Los resultados de la validación obtenidos con el modelo HEC-HMS corresponden al periodo Ene-May 2011

5. CONCLUSIONES

- Existen pocas estaciones pluviométricas en la cuenca Zarumilla, en consecuencia la estimación de la precipitación media en la cuenca no ha sido la más óptima.
- Existen dudas en la calidad de los datos de caudal en la estación “La Palma” en el periodo 1972-1976 (día 7 de febrero de 1973 caudal de 790 m³/s) . Por otro lado, las mediciones de caudal realizado en el 2015 y 2016 es bastante confiable.
- El valor curva número promedio, estimado para la cuenca del río Zarumilla lado peruano, fue de 85. Basado en el modelo HEC-HMS, se estimó el CN representativo de la cuenca (parte peruana y ecuatoriana) resultando un CN=70 para toda la cuenca Zarumilla.
- A pesar de la gran incertidumbre en los datos de caudal y de la escasa información pluviométrica, los modelos hidrológicos GR4J y HBV han logrado tener valores de NASH positivos y mayores a 0.40 los cuales representan un nivel de buen ajuste.
- El modelo GR4J ha demostrado tener un mejor desempeño en las fases de calibración, validación y también cuando se le comparó con los valores de caudal aforado en los años 2015 y 2016.
- El modelo HEC-HMS se ha mostrado bastante inestable durante el periodo de validación.

6. RECOMENDACIONES

- Se deben instalar más estaciones pluviométricas en la cuenca Zarumilla, de preferencia reactivar las que funcionaron en la época de los años 70s como Hito Bocana, Hito Cotrina y el Caucho.
- Se sugiere utilizar información de satélite a partir del año 2011 que es el año donde se tiene también información de caudales en la estación Palmales del PEBPT para fines de modelamiento, asimismo mientras no se pueda estimar la precipitación media diaria en la cuenca Zarumilla de manera adecuada, no se puede esperar que un modelo hidrológico pueda simular el caudal de manera precisa.
- Se insta a que se continuen realizando aforos en la cuenca Zarumilla, porque de esta manera se puede obtener un caudal medido el cual es bastante confiable y va permitir validar la performance de cualquier modelo hidrológico.
- Realizar una clasificación de los parámetros de los modelos hidrológicos GR4J, HBV, HEC-HMS, Minerva entre otros, con el fin de estimar los rangos de cada parámetro; información de gran utilidad para el modelamiento de cualquier cuenca del Perú.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEMAGREF. 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), Lima - Francia.

Gerardo Canales Bedoya. 2012. Parámetros Geomorfológicos.

INEI. 2010. Perú: Estimaciones y proyecciones de población total y edades quinquenales según departamento, provincia y distrito, 2005-2015, Boletín Especial Nº21, Lima Perú.

JAN, Seibert. 2011. Introduction to hydrological modelling and the HBV model.

MOLNAR. 2011. Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources management, ETH Zürich, Switzerland.

SENAMHI. 2008. Atlas hidrológico de las cuencas Zarumilla y Tumbes ubicadas en el departamento de Tumbes.

LOUDIN, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology. 303, 290-306