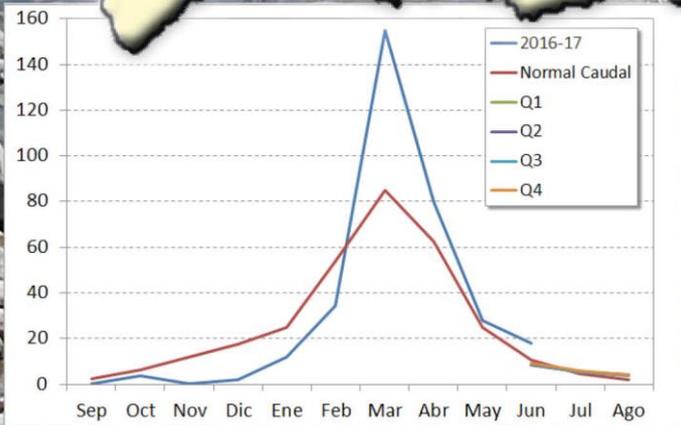


MODELAMIENTO HIDROLÓGICO PARA PRONÓSTICO ESTACIONAL DE CAUDALES DEL RÍO JEQUETEPEQUE



MODELAMIENTO HIDROLÓGICO PARA PRONÓSTICO ESTACIONAL DE CAUDALES DEL RÍO JEQUETEPEQUE



DIRECTORIO

Ing. Amelia Díaz Pablo
Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

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

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

REVISOR DEL ESTUDIO

Mg. Sc. Julia 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
Junio - 2017

Citar como:

Metzger, J. Modelamiento Hidrológico para Pronóstico estacional de caudales del río Jequetepeque. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Junio, 2017.

ÍNDICE

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Justificación	6
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Parámetros Fisiográficos	6
2.1.1. Parámetros de Forma	7
2.1.2. Parámetros de Relieve	8
2.1.3. Parámetros relativos a la red hidrográfica	9
2.2. Tiempo de concentración	10
2.3. Datos PISCO	11
2.4. Modelo hidrológico GR2M	12
2.5. Medidas de bondad de ajuste	13
2.5.1. NASH	13
2.5.2. RMSE	14
2.5.3. Coeficiente de correlación	14
3. MATERIALES Y METODOS	15
3.1. Area de Estudio	15
3.1.1. Ubicación geográfica	15
3.1.2. Clima	16
3.1.3. Zonas de vida	18
3.1.4. Cobertura vegetal	19
3.1.5. Capacidad de uso de suelo	20
3.1.6. Hidrología	21
3.2. Información Utilizada	22
3.2.1. Selección de estaciones	22
3.2.2. Red de estaciones	23
3.2.3. Periodo de estudio	24
3.3. Métodos	27
3.3.1. Control de calidad de los datos	27
3.3.2. Parámetros fisiográficos de la cuenca Jequetepeque	28
3.3.3. Estimación de la precipitación media	28
3.3.4. Pronóstico de precipitación del modelo WRF	29
3.3.5. Flujoograma Metodológico	31
4. RESULTADOS Y DISCUSION	32
5. CONCLUSIONES	45
6. RECOMENDACIONES	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca.....	7
Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca	8
Figura 2-3 Curvas hipsométricas características	9
Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas.....	9
Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca	10
Figura 2-6 Flujograma de generación de PISCO producto precipitación	12
Figura 2-7 Esquema de la estructura del modelo hidrológico GR2M	13
Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Jequetepeque.....	15
Figura 3-2 Temperatura media anual en la cuenca Jequetepeque periodo (1996-2016).....	17
Figura 3-3 Precipitación anual en la cuenca del río Jequetepeque periodo (1964-2016)	18
Figura 3-4 Zonas de vida en la cuenca del río Jequetepeque	19
Figura 3-5 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Jequetepeque	20
Figura 3-6 Capacidad de uso de suelo en la cuenca del río Jequetepeque.....	21
Figura 3-7 Precipitación media diaria de algunas estaciones en la cuenca Jequetepeque	22
Figura 3-8 Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca Jequetepeque	23
Figura 3-9 Series de precipitación, caudal, temperatura y evapotranspiración potencial utilizadas para la calibración del modelo GR2M	25
Figura 3-10 Series de precipitación, caudal, temperatura y evapotranspiración potencial utilizadas para la validación I del modelo GR2M	26
Figura 3-11 Curvas de doble masa de estaciones pluviométricas en la cuenca Jequetepeque.....	28
Figura 3-12 Polígonos de Thiessen para la cuenca Jequetepeque.....	29
Figura 3-13 Pronóstico de precipitación (miembro1) para abril-mayo-junio 2017 a nivel nacional	30
Figura 3-14 Precipitación normal observada para abril-mayo-junio a nivel nacional.....	30
Figura 3-15 Diagrama de flujo de la metodología para el modelamiento hidrológico	31
Figura 4-1 Precipitación media mensual en la cuenca Jequetepeque	32
Figura 4-2 Evapotranspiración media mensual en la cuenca Jequetepeque	32
Figura 4-3 Caudal medio mensual en la cuenca Jequetepeque	32
Figura 4-4 Temperatura diaria de estaciones Contumaza y San Juan en cuenca Jequetepeque	33
Figura 4-5 Pronóstico de precipitación WRF (AMJ) Vs. precipitación observada en la cuenca Jequetepeque.....	35
Figura 4-6 Pronóstico de precipitación WRF (JJA) en la cuenca Jequetepeque.....	36
Figura 4-7 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método media aritmética.....	36
Figura 4-8 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Inv. Distancia.....	37
Figura 4-9 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Krigging	37
Figura 4-10 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Thiessen.....	37
Figura 4-11 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal de PISCO	38
Figura 4-12 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método aritmético.....	38

Figura 4-13 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Inv. Distancia.....	39
Figura 4-14 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Krigging	39
Figura 4-15 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Thiessen	39
Figura 4-16 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida de PISCO.....	40
Figura 4-17 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Aritmética	40
Figura 4-18 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Inv. Distancia.....	41
Figura 4-19 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Krigging	41
Figura 4-20 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Thiessen	41
Figura 4-21 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por de PISCO	42
Figura 4-22 Caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (AMJ)	42
Figura 4-23 Caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (JJA).....	43
Figura 4-24 Pronóstico de caudal en mm/mes para los meses de junio-julio-agosto 2017	43
Figura 4-25 Comparación de los Pronóstico de caudales en m ³ /s para los meses de junio-julio-agosto 2017 en relación con los pronósticos del mismo trimestre.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Valores referenciales de NASH.....	14
Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Jequetepeque.....	24
Tabla 3-2 Estación hidrológica ubicada en la cuenca Jequetepeque	24
Tabla 3-3 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Jequetepeque.....	28
Tabla 4-1 Resultados de la calibración y validación con el modelo GR2M	34
Tabla 4-2 Rango de los parámetros del modelo GR2M	34
Tabla 4-3 Puntos pronosticados por el modelo WRF en la cuenca del río Jequetepeque.....	35

RESUMEN

La cuenca del río Jequetepeque está ubicada en la zona norte del Perú, en ella se ubica el reservorio de Gallito Ciego que forma parte del Proyecto Especial Jequetepeque Zaña (PEJEZA). Este proyecto tiene como finalidad regular las aguas del río Jequetepeque para fines de riego de tierras de cultivo y generación de energía eléctrica en la Central Hidroeléctrica de Gallito Ciego y de esta manera satisfacer las necesidades hídricas del valle. Cabe mencionar, que en los años 1982-83 y 1997-98 el Perú fue afectado por el Fenómeno “El Niño”, evento que ocasionó cuantiosas pérdidas en el sistema de producción e infraestructura del país; se calcula que las pérdidas económicas del año 1982-83 ascendieron a 3283 millones de dolares mientras que las del año 1997-98 ascendieron a 3500 millones de dolares (CAF 2000). Durante estos eventos, la cuenca del río Jequetepeque experimentó desbordes e inundaciones que ocasionaron daños en la infraestructura de agua potable y saneamiento, infraestructura de riego e infraestructura vial principalmente.

Es así, que el presente Estudio modelamiento hidrológico para fines de pronóstico estacional señala como una herramienta operacional al modelo GR2M agregado que simula caudales en intervalos mensuales, el cual, fue calibrado y validado con información hidrometeorológica terrena de la base de datos de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). Cabe mencionar que los datos de precipitación histórica han pasado por un control de calidad riguroso, resultando información consistente. Como dato de entrada al modelo hidrológico GR2M se ha empleado dos tipos de precipitación: a) Precipitación areal obtenida a partir de estaciones pluviométricas b) Precipitación areal obtenida de la base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations Precipitación v1.1) producto precipitación mensual, elaborado para el Sistema de monitoreo nacional de sequías e inundaciones.

Se concluye, que los datos hidrometeorológicos analizados en el período 1965-2016, la longitud de sus series es variable; para precipitación se obtuvieron desde completos como las estaciones Lives y San Juan; y con ausencia de algunos meses en la estación Llapa (3 meses), la estación Cospán (10 meses), la estación Chilete (21 meses) y la estación Asunción (24 meses); y para caudales, la estación hidrométrica Yonan presentó discontinuidad importante en dos períodos a) entre octubre de 1991 y setiembre 2001 y b) entre junio 2011 y agosto 2012. Estos vacíos de información fueron superados considerando el período de calibración del 01/01/1981 al 30/09/1991; y dos períodos de validación, el primero de 01/09/2001 al 24/02/2009 y el segundo de 01/09/2013 al 30/11/2016. Finalmente, la simulación hidrológica fue eficiente para las épocas de avenida y estiaje, obteniéndose un NASH de 89,27% para la etapa de calibración y 86,33% para la etapa de validación teniendo como datos de entrada información de precipitación terrena y un NASH de 87,47% para la etapa de calibración y 83,73% para la etapa de validación teniendo como datos de entrada información de precipitación de PISCO.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio ha sido elaborado por la Dirección de Hidrología del SENAMHI a través de la Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas, la cual esta orientada a desarrollar tres líneas de investigación: asimilación de datos y construcción de información hidrometeorológica, hidroclimatología; y modelamiento hidrológico e hidráulico, con el fin de generar y difundir información hidrológica que pueda ser útil y de soporte de decisiones, para fines de prevención y planificación de los recursos hídricos.

En el marco de las actividades del Plan Operativo Institucional 2017 se ha programado el “Estudio de modelamiento hidrológico para el pronóstico estacional del caudal del río Jequetepeque”, entendiéndose como modelo hidrológico a 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.

Para el Estudio, como primer análisis, se ha evaluado la información hidrometeorológica disponible en la cuenca observándose una gran limitación en la longitud de las series sobre todo en los datos de caudal. En la estación hidrológica Yonán, se ha verificado que no existen datos de caudal desde octubre de 1991 hasta setiembre 2001 es decir casi 10 años. Sin embargo, los datos de precipitación, han sido favorables ya que se recopiló hasta 11 estaciones, de las cuales 8 estaciones se encuentran dentro de la cuenca y 3 próximas a ella; esta condición ha permitido completar los meses faltantes en el periodo 1965-2016, de esta manera se ha conseguido series de tiempo de precipitación mensual confiables para la estimación de la precipitación areal en la cuenca del río Jequetepeque.

Un aspecto muy importante en la elaboración de todo estudio tiene que ver con el control de calidad de 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 ítem para evaluar la calidad de los datos; así como para el modelamiento hidrológico con GR2M de escala mensual, modelo precipitación escorrentía con bajo requerimiento de datos, la performance del modelo se evaluó con los estadísticos NASH, r (coeficiente de correlación) y RMSE (error de la raíz cuadrada media).

Es así, que se ha logrado obtener el modelo hidrológico GR2M (modelo que hace simplificaciones en el modelamiento de cuencas, como la homogeneidad de procesos que es característico de los modelos agregados) calibrado y validado operativo y eficiente para realizar el pronóstico estacional del caudal del río Jequetepeque, respecto al punto de control hidrométrico Yonán, esta herramienta requiere como datos de entrada la precipitación y caudales observados; y el pronóstico de precipitación trimestral.

1.1. Justificación

Los desastres naturales de origen hidrometeorológico, como las lluvias intensas y las inundaciones principalmente, afectan a las cuencas de la costa norte del Perú, estos eventos se presenta de manera recurrente caso los Fenomenos ENSO. Cuando ocurren inundaciones en la cuenca Jequetepeque las zonas afectadas son Tembladera, Chilete, Yonán, carretera Cajamarca-Ciudad de Dios entre otros, ocasionando cuantiosos daños.

Es importante el monitoreo del caudal del río Jequetepeque, pero es mucho más importante el pronóstico del caudal porque va permitir conocer con anticipación de meses el posible caudal que se podría presentar; esta información será de gran utilidad para las autoridades ya que podrán tomar las acciones correspondientes con fines de planificación de los impactos negativos y positivos de los eventos máximos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M con fines de pronóstico estacional del caudal en la cuenca del río Jequetepeque.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar toda la información hidrometeorológica en la cuenca Jequetepeque.
- Realizar el análisis de la calidad de los datos hidrometeorológicos disponibles.
- Evaluar los pronósticos de precipitación mensual del modelo WRF.
- Evaluar la performance del modelo hidrológico GR2M.

2. 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:

$$\frac{A}{L^2} = \frac{A - 0.136}{2} \dots\dots(1)$$

Despejando el valor de L se tiene:

$$L = 1.41 \times A^{0.568}$$

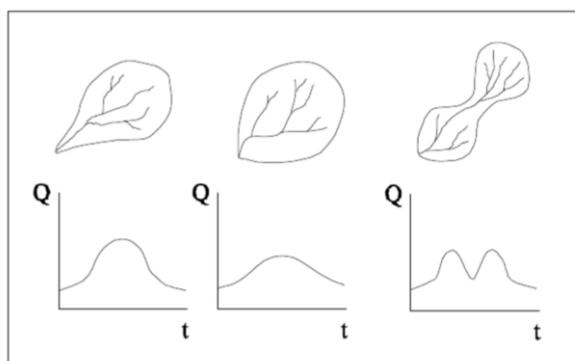


Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca

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:

$$K = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(2)$$

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.

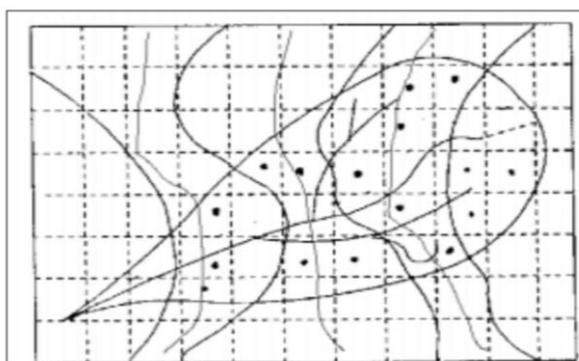


Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca

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 km² 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.

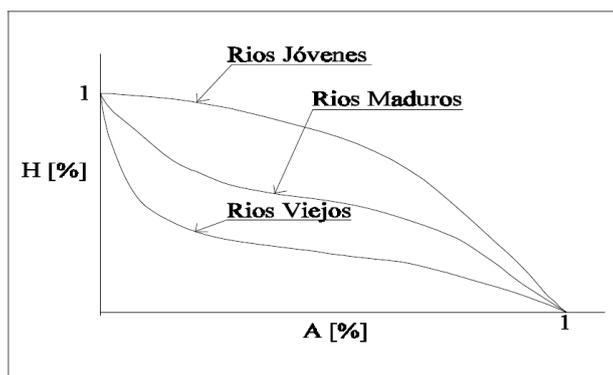


Figura 2-3 Curvas hipsométricas características

2.1.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación de la superficie, en km² 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.

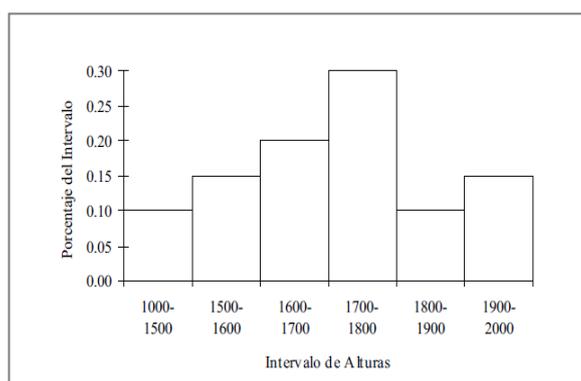


Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas

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.

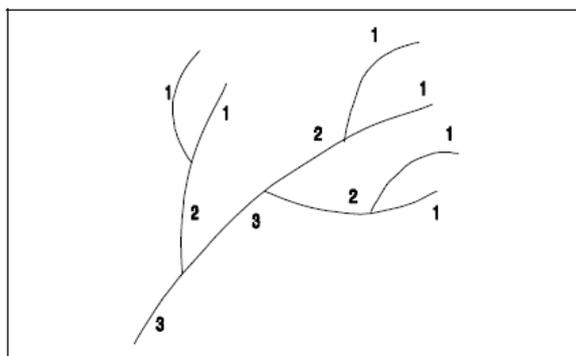


Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca

2.1.3.2. Densidad de drenaje

Está definida como la relación, D_d entre la longitud total de los cursos de agua: efímeros, intermitentes o perennes de una cuenca ($\sum l_i$) y el área total de la misma (A).

$$D_d = \frac{\sum l_i}{A} \quad \dots\dots(3)$$

Donde:

- $\sum l_i$ = Longitud total de todos los ríos en km
- A = Área en Km^2
- l_i = Longitud de cada río

La densidad de drenaje tiende a uno en ciertas regiones desérticas de topografía plana y terrenos arenosos. 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 húmedas, 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. 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:

$$t_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad \dots\dots(4)$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (minutos)

L = Máxima longitud del recorrido (m)

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

2.3. Datos PISCO

PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) producto precipitación es una base de datos espacial grillada de aproximadamente 5 km y cobertura a nivel nacional. Es una base continua y disponible desde el 1 de enero de 1981 hasta el presente.

PISCO en su primera versión es el producto resultado de la combinación (“merging”) entre los datos de precipitación estimados por el satélite del producto CHIRP (“Climate Hazards Group InfraRed Precipitation”) y los datos de precipitación observada de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Para generar PISCO producto precipitación diaria, se desarrolló un algoritmo de interpolación que selecciona la mejor técnica de interpolación para cada día entre “Inverse Distance Weighting” (IDW), “Kriging with External Drift” (KED) y “Regression Inverse Distance Weighting” (RIDW), el procedimiento consta de 2 etapas y se describe en las siguientes líneas (ver Figura 2-6):

i) Primero se evalúa el p-valor obtenido al correlacionar espacialmente para cada día los datos de las estaciones convencionales y los datos para su correspondiente CHIRP, si el valor no presenta significancia estadística al 95% (p-valor > 0.05), se procederá a realizar el IDW optimizando el exponente de ponderación, siendo la función objetivo la minimización del promedio del error medio cuadrático (EMC) obtenido en la validación cruzada. Si el p-valor es menor a 0.05 se procederá a evaluar cual técnica de interpolación de las restantes (KED y RIDW) se utilizará, esto se realiza también en función al EMC obtenido en la validación cruzada. Este procedimiento se realiza para todos los días desde 1981 hasta el 2015, generándose un producto de precipitación grillado preliminar diario y mensual (Pd y Pdm).

ii) En una segunda parte se plantea corregir la sub-estimación o sobre-estimación encontrada en el producto de precipitación grillado preliminar (Pd). Para ello utilizamos los datos CHIRP mensuales y la precipitación mensual de las estaciones del SENAMHI para generar un producto grillado mensual bajo las mismas condicionales (Pm). El producto grillado mensual generado (Pm) y el producto de precipitación grillado preliminar de datos diarios previamente acumulados a paso mensual (Pdm) son comparados, generando proporciones grilladas mensuales que son utilizados para corregir los datos diarios (producto de precipitación grillado).

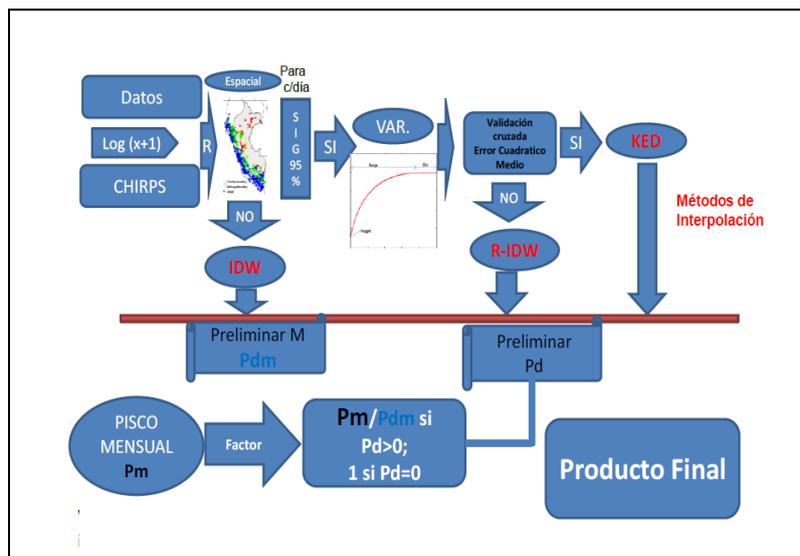


Figura 2-6 Flujograma de generación de PISCO producto precipitación

2.4. Modelo hidrológico GR2M

El modelo hidrológico GR2M es conceptual fue desarrollado por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia). Su uso en el Perú fue introducido por el IRD (Instituto de Investigación y Desarrollo) de Francia, primero en estudios de modelización hidrológica en cuencas de la vertiente del Pacífico (SOFI CONSULT S.A.) y luego en cuencas de la región hidrográfica del Atlántico (Lavado W.) y del Titicaca (Vera H.), es así que se ha extendido en estudios de simulación hidrológica bajo escenarios de cambio climático, sobre todo los elaborados por SENAMHI (PACC-PRAA).

GR2M es un modelo hidrológico agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia.

Su estructura consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional. La Figura 2-7 muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo. De acuerdo a este esquema, **P** es la precipitación media de la cuenca, **P1** es la escorrentía superficial, **E** es la evapotranspiración actual, **P2** la percolación profunda, **S** el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, **R** el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y **Q** el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es **X1** y la del reservorio gravitacional es asumida como 60mm.

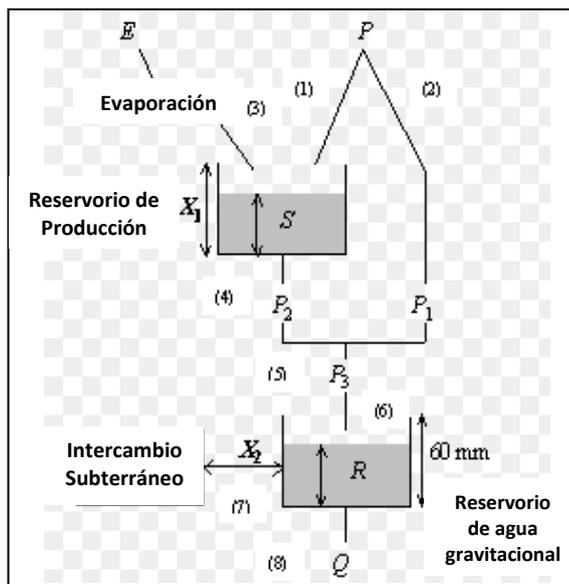


Figura 2-7 Esquema de la estructura del modelo hidrológico GR2M
Fuente: Cemagref (2007)

El modelo GR2M sólo tiene dos parámetros a calibrar:

- X1: Capacidad del reservorio suelo en milímetros (mm)
- X2: Coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional)

X2 oscila entre 1 y 2. Si $X2=1$ significa que toda la precipitación neta del mes es transferida a la salida de la cuenca sin ser retenida en el reservorio de transferencia. En el caso extremo si $X2=2$ toda la precipitación es retenida en el reservorio de transferencia.

El modelo ha sido implementado en diferentes programas como Fortran y hoja de cálculo, utiliza métodos de optimización para la calibración de los parámetros maximizando la eficiencia del modelo con el criterio de Nash-Sutcliffe (E).

El modelo GR2M, solo requiere datos mensuales de precipitación acumulada, evapotranspiración media mensual, y el escurrimiento mensual, expresado como lamina escurrida en milímetros.

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-Sutcliffe (E) es uno de los mas usados en hidrología. Su valor se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

Qsim = Caudales simulados

Q_i = Caudales observados

\bar{Q} = Promedio de los caudales observados

A continuación se muestra los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

Tabla 2-1 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 (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Su expresión se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

Qsm = Caudales simulados

Q_i = Caudales observados

n = Número de valores simulados

2.5.3. Coeficiente de correlación

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:

$$r = \frac{S_{obs,sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}} \dots\dots\dots(7)$$

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 geográfica

La cuenca del río Jequetepeque está ubicada en la costa Norte del Perú comprende territorios de las provincias de Cajamarca, Contumazá, San Pablo y San Miguel del departamento de Cajamarca, y las provincias de Chepén y Pacasmayo en el departamento de La Libertad.

La cuenca del río Jequetepeque, es parte de la región hidrográfica del Pacífico. Limita al norte con los ríos Chamán, Zaña y Chancay-Lambayeque, al este con el río Crisnejas, al sur con el río Chicama y al oeste con el océano Pacífico. La cuenca tiene un área total de 4971 km² y el área de interés (desde Yonán hacia aguas la divisoria de aguas) es 3287,4 km². La cuenca, no presenta nevados y solo algunas lagunas en sus partes altas como el sistema de lagunas de Alto Perú ubicadas en la provincia de San Pablo Cajamarca. En promedio estas lagunas suman un área de 1 Km².

Geográficamente la cuenca del río Jequetepeque se ubica entre las latitudes 06° 50' y 07° 30' sur y las longitudes 78° 20' y 79° 40' oeste. Altitudinalmente, se extiende desde el nivel del mar hasta la línea de cumbres de la Cordillera Occidental de los Andes, cuyos puntos más elevado es 4400 m s.n.m.. En la parte baja se presenta el valle, un inmenso graben regional resultado de la brusca disminución de la pendiente, que ha formado este cono de deyección o llanura aluvial producto de la deposición del material transportado por el río.

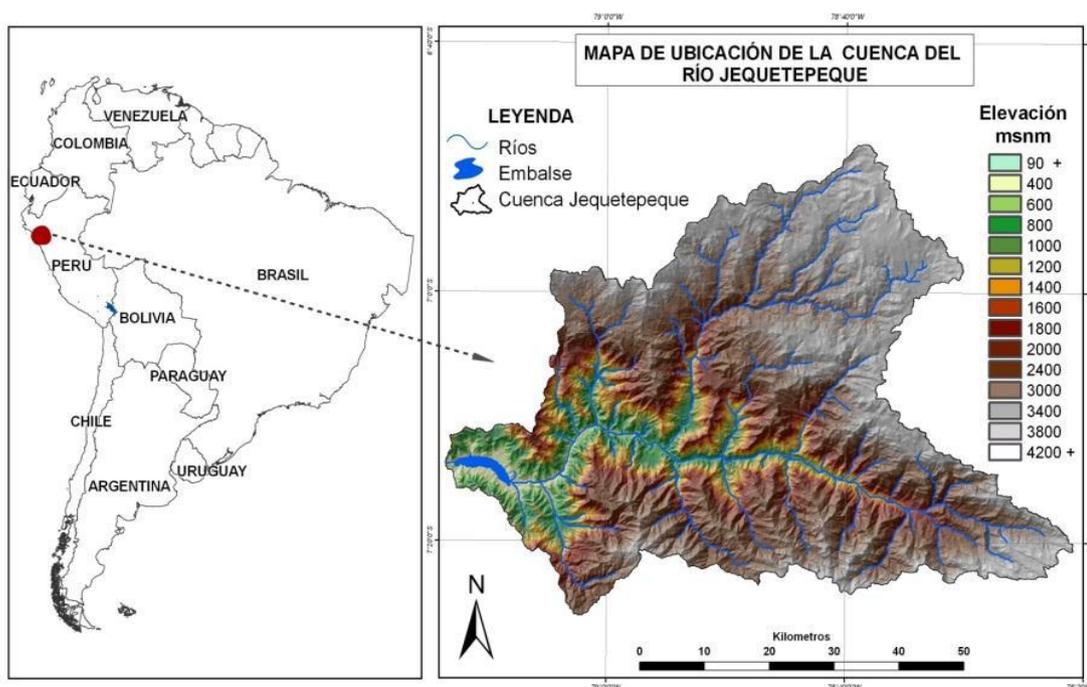


Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Jequetepeque

Fuente: Renny D. Díaz

3.1.2. Clima

El clima en la cuenca del río Jequetepeque varía desde el típico árido y semicálido en el desierto costero (400 a 800 m s.n.m.) hasta el pluvial y frío en el páramo pluvial andino (4000 m s.n.m.). La cuenca del río Jequetepeque se encuentra bajo la influencia del clima del Pacífico y del Atlántico. Las precipitaciones relativamente escasas en la zona cercana a la Costa están influenciadas principalmente por la temperatura de las aguas marinas (corriente Peruana de Humboldt), mientras que las precipitaciones de la parte superior dependen, en parte, del clima de la cuenca del Amazonas y de la humedad proveniente del Pacífico.

La temperatura media anual en la zona de estudio varía desde los 22 °C en la cuenca media (cerca de la localidad de Montegrande) hasta 11 °C (en las partes altas de la cuenca, entre Llapa y Quilcate). La precipitación media anual varía desde los 470 mm (cerca de la localidad de Montegrande) hasta los 1150 mm (en las partes altas de la cuenca, entre Llapa y Quilcate).

Los tipos de climas basados en la clasificación Climática del Perú (SENAMHI 1982), elaborado mediante el sistema de clasificación de climas de Werren Thornthwaite muestran cuatro tipos:

- Tipo climático Desértica semicálida [E(d) B1 ' H3]
Abarca toda la región costera hasta los 2 000 m s.n.m., caracterizándose por la deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año y humedad relativa calificada como húmeda. Corresponden a este tipo de clima la zona de Jequetepeque.
- Tipo climático Semi seca y templada [C(o,i,p) B2 ' H3]
Zona semiseca, templada, se caracteriza por deficiencias de lluvias en el otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda, este tipo de clima se ubica desde los 2 000 hasta 3 000 m s.n.m. Corresponden a este tipo de clima la zona de Contumaza.
- Tipo climático Semiseca y semifría [C(o,i,p) B3 ' H3]
La zona comprendida desde los 3 000 hasta los 4 000 m s.n.m., se caracteriza por la deficiencia de lluvias en el período mayo – setiembre, con humedad relativa calificada como húmeda.
- Tipo climático semiseco frío [C(i) C' H3]
Zona comprendida entre los 4 000 a 5 000 m s.n.m., se caracteriza por deficiencia de lluvias en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.

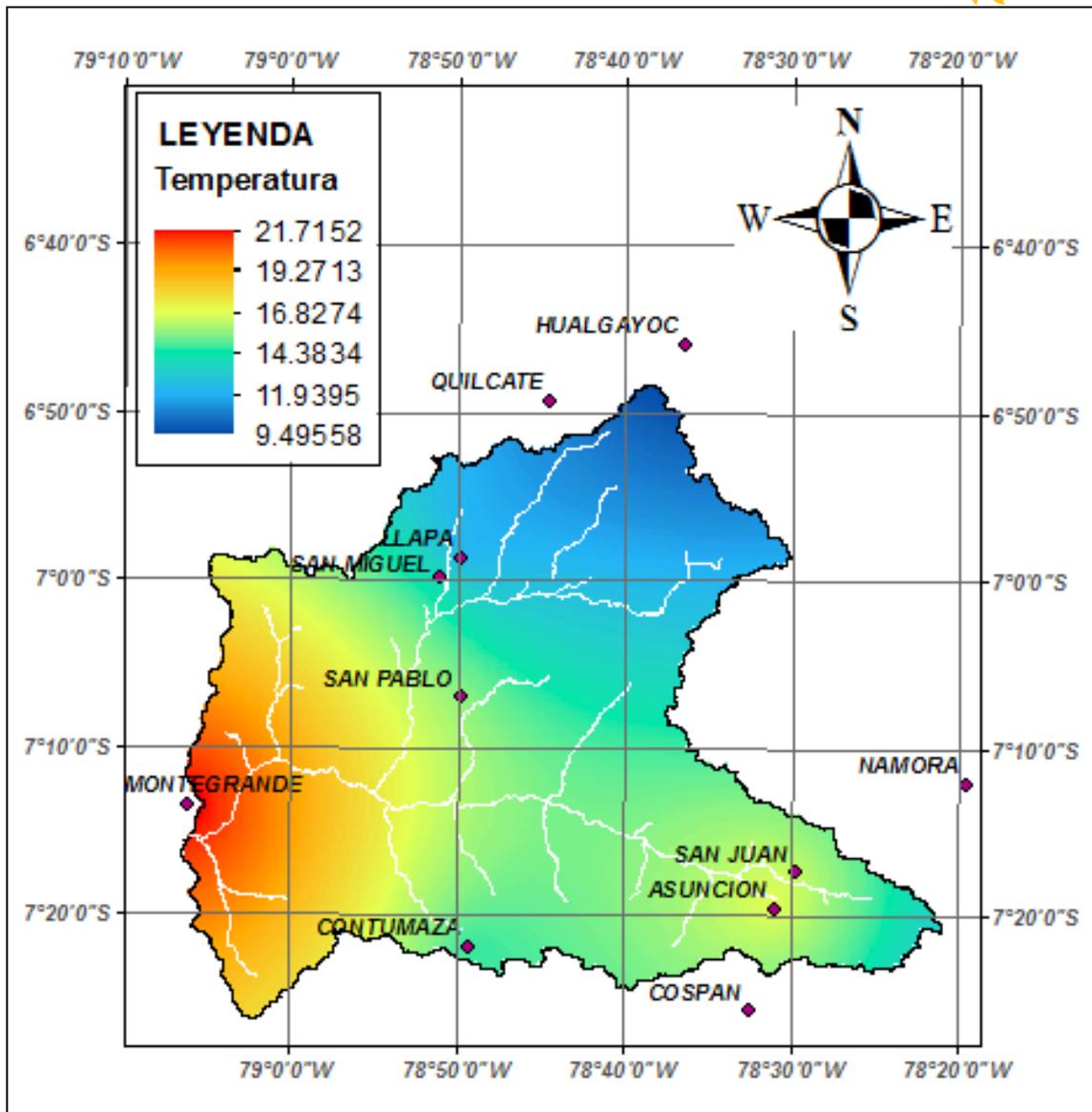


Figura 3-2 Temperatura media anual en la cuenca Jequetepeque periodo (1996-2016)

Fuente: Elaboración propia

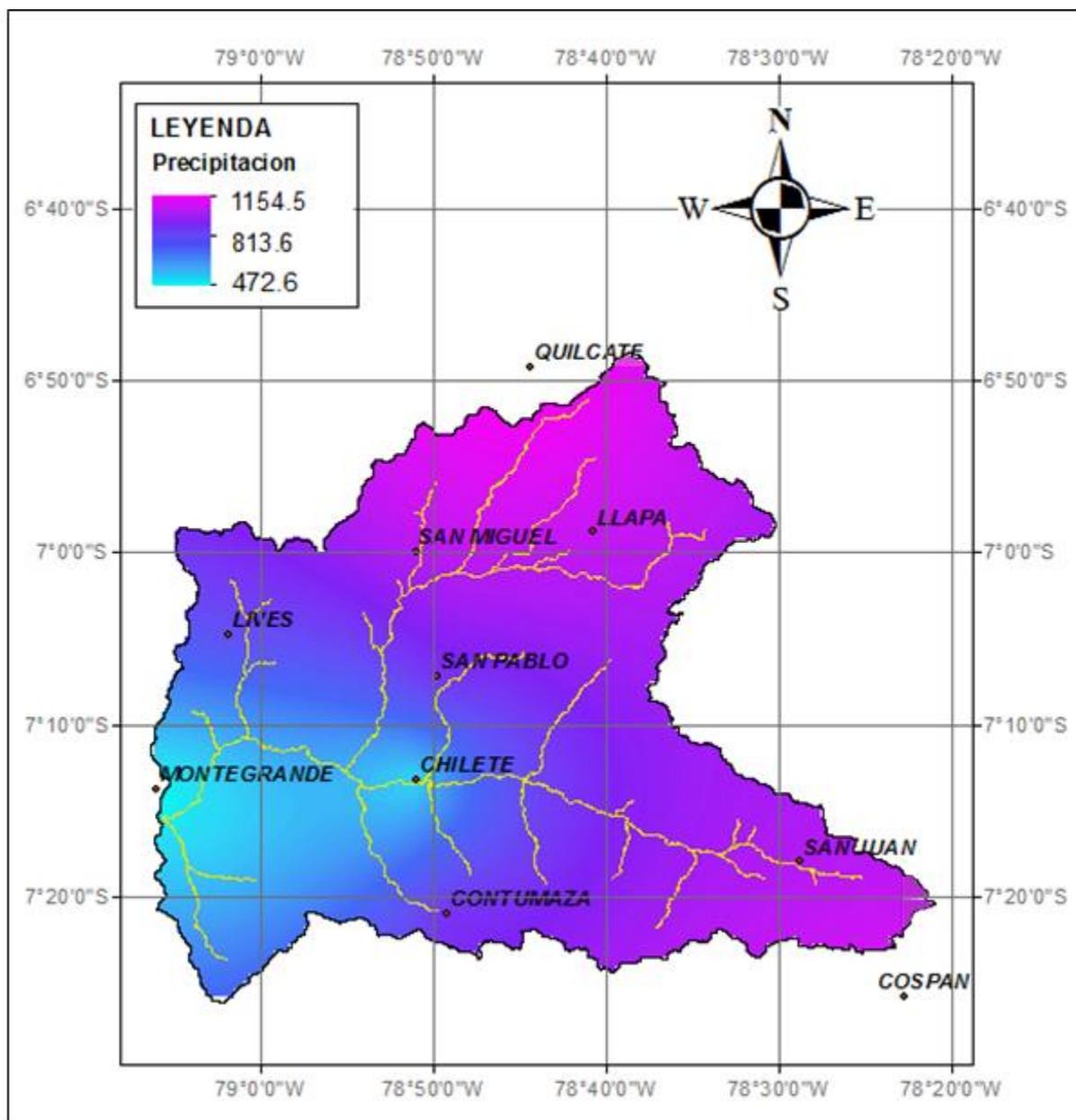


Figura 3-3 Precipitación anual en la cuenca del río Jequetepeque periodo (1964-2016)

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Zonas de vida

La parte baja de la cuenca Jequetepeque esta formada por Desierto Desecado Premontano Tropical (dd-PT) y Desierto Superarido Premontano Tropical (ds-PT), en la parte media de la cuenca encontramos monte espinoso Premontano Tropical (mte-PT) y matorral desértico Tropical (md-T) en la parte alta de la cuenca encontramos bosque muy húmedo Montano Tropical (bmh-MT) y bosque húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT).

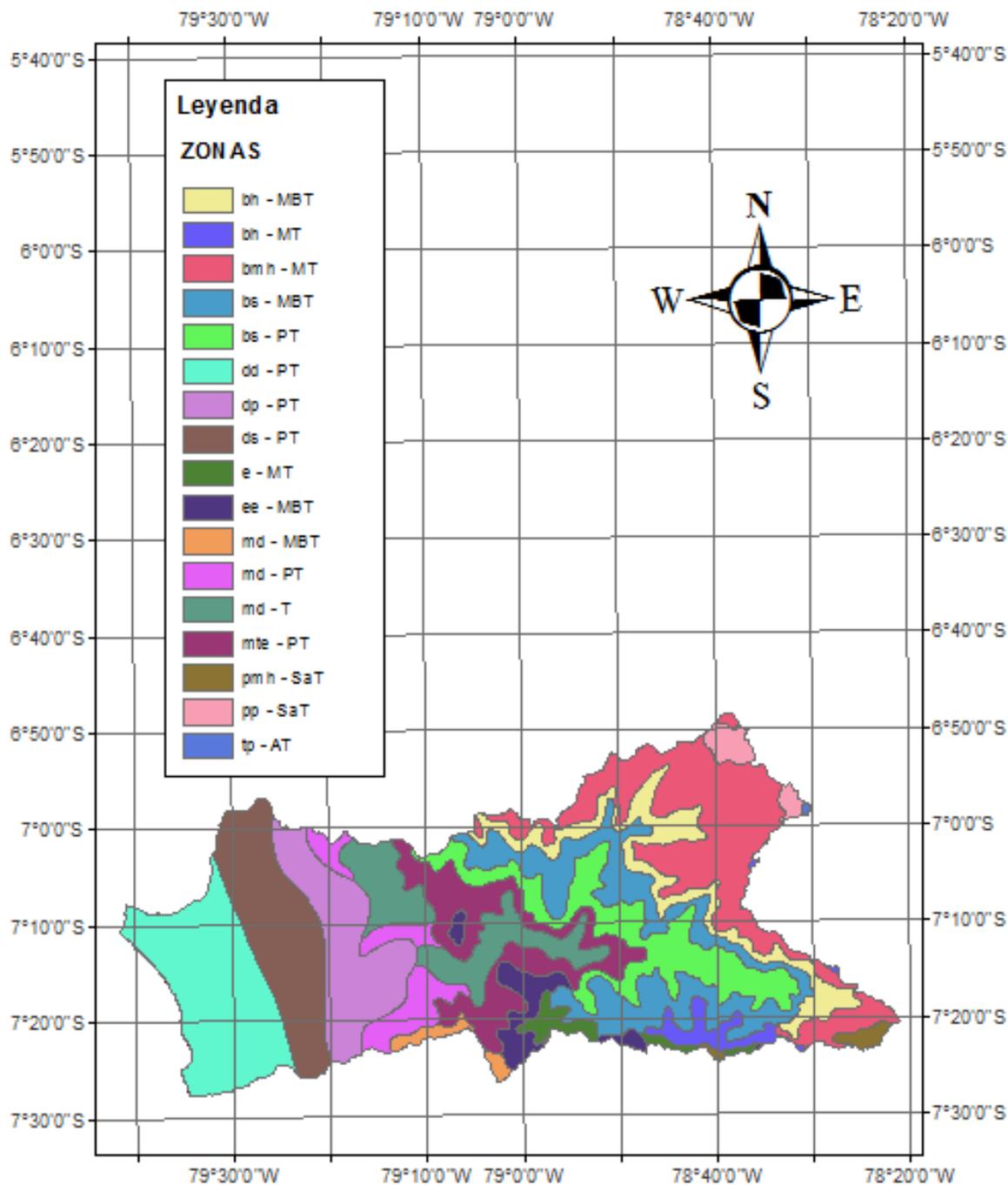


Figura 3-4 Zonas de vida en la cuenca del río Jequetepeque
Fuente: PLANGRACC

3.1.4. Cobertura vegetal

La parte baja de la cuenca Jequetepeque cuenta con matorrales (Ma), cultivos agrícolas (Cua) y planicies costeras y estribaciones andinas sin vegetación (Pl ce Sv), en la parte media de la cuenca también hay matorrales (Ma) y bosque seco de montañas (Bs m) y en la parte alta de la cuenca se puede encontrar cultivos agropecuarios (Cuap) y pajonal de puna (Pj pu).

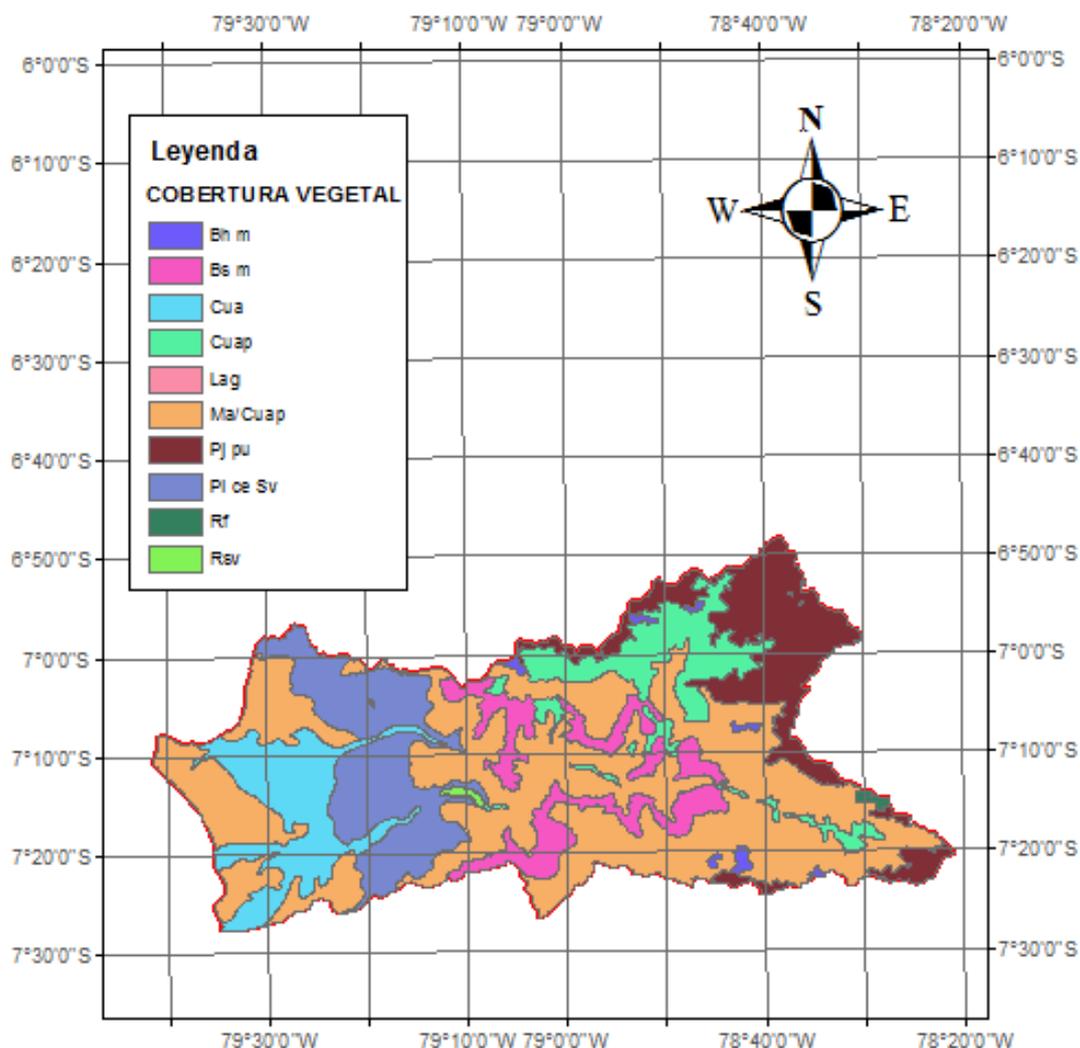


Figura 3-5 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Jequetepeque
Fuente: PLANGRACC

3.1.5. Capacidad de uso de suelo

La parte baja de la cuenca del río Jequetepeque cuenta con pastos temporales y producción forestal en costa (ambas de calidad agrológica baja), zonas de afloramiento líticos y mantos de arena, cultivos en limpio y permanente (de calidad agrológica alta y media respectivamente). En la parte media de la cuenca se tiene extensiones de áreas con Pastos Temporales y cultivo en Limpio, ambas de calidad agrológica Baja, los cultivos requieren riego suplementario, por lo que son zonas que requieren protección.

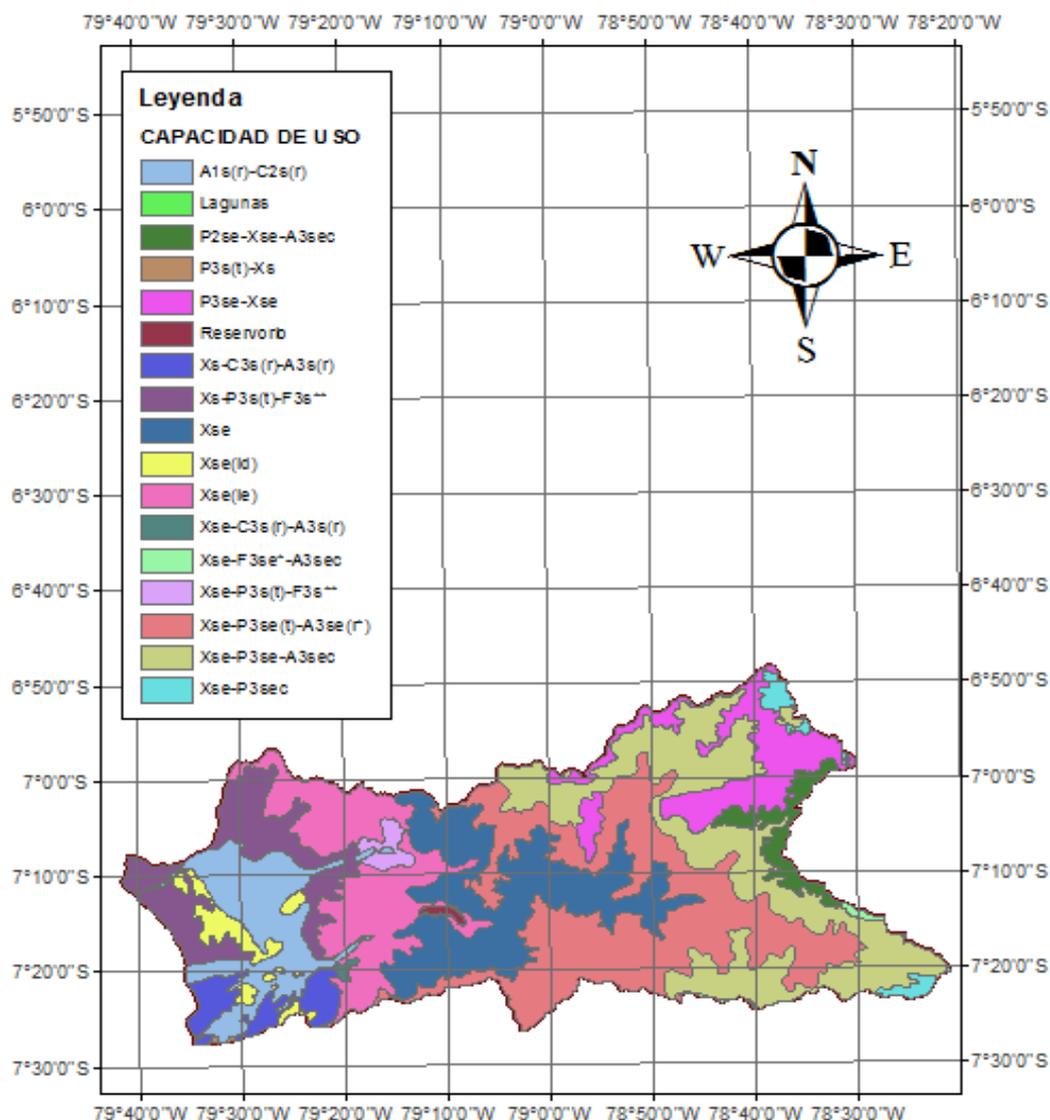


Figura 3-6 Capacidad de uso de suelo en la cuenca del río Jequetepeque

Fuente: PLANGRACC

3.1.6. Hidrología

La cuenca del río Jequetepeque tiene un área de 3287,4 Km² la longitud máxima de recorrido desde sus orígenes hasta su desembocadura es de 161,5 km, posee una pendiente promedio de 9,2%, siendo la pendiente en la cuenca alta de 12,6% y en la zona del valle bordea el 4.6%. Geomorfológicamente corresponde a una cuenca joven con ríos de fuerte pendiente, secciones transversales en forma de “V” y profundas zanjas de erosión en sus laderas con pendientes hasta de 20%.

La cuenca del río Jequetepeque pertenece a la región hidrográfica del Pacífico, está conformado por 03 ríos principales, 30 ríos secundarios, y una red de pequeños ríos y quebradas en las microcuencas.

Todos estos cursos de agua se originan en las cumbres de la cordillera occidental, como consecuencia de las precipitaciones que alcanzan 1150 mm anuales (en las partes altas de la cuenca). El río principal es Jequetepeque y resulta de la confluencia de los ríos Puclush y Magdalena, los cuales se unen a la altura del pueblo de Lllallán, en una cota aproximada de 710 m.s.n.m. Aguas abajo, el río Jequetepeque recibe los aportes del río Pallac por la margen derecha y de la quebrada Chausis por la margen izquierda.

El embalse Gallito Ciego se localiza sobre el curso inferior del río Jequetepeque, aproximadamente a 7° 13' latitud Sur y 79° 10' longitud Oeste, en un estrechamiento del valle con laderas inclinadas, forma un vaso de aproximadamente 12 km de largo y de 1 a 2 km de ancho, cubriendo un área de aproximadamente 14 km² y su volumen útil de 500 millones de metros cúbicos, constituyéndose como el segundo de mayor capacidad en el Perú.

3.2. Información Utilizada

3.2.1. Selección de estaciones

Existen 11 estaciones de precipitación en la cuenca del río Jequetepeque de las cuales 8 se ubican dentro de la cuenca y 3 se ubican fuera. Las estaciones pluviométricas se encuentran adecuadamente distribuidas lo cual permite estimar la serie de precipitación areal en la cuenca de forma representativa. En la cuenca del río Jequetepeque existe una estación hidrológica con información disponible de caudal, es la estación Yonán, que cuenta con datos diarios desde enero de 1976 hasta setiembre de 1991, setiembre 2001 hasta febrero 2009 y de setiembre 2013 hasta diciembre 2016.

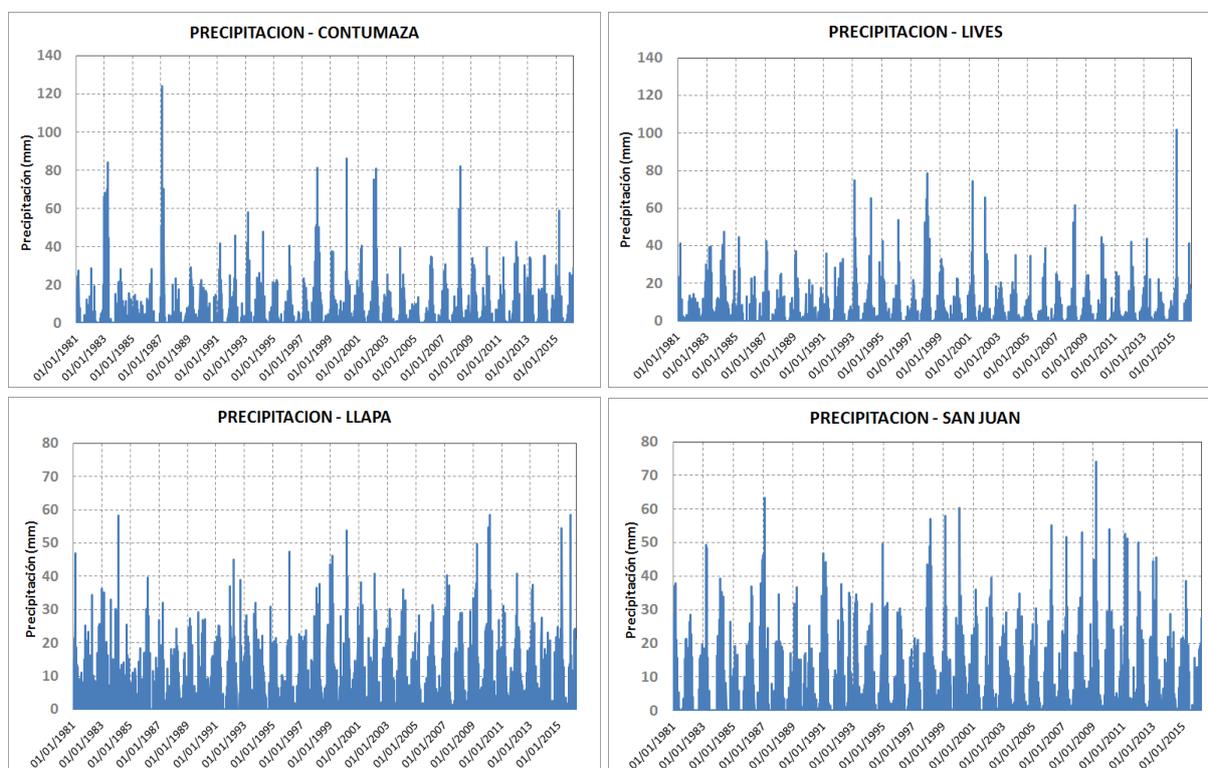


Figura 3-7 Precipitación media diaria de algunas estaciones en la cuenca Jequetepeque

La Figura 3-7 muestra las series de las estaciones Contumaza, Lives, Llapa y San Juan son las que presentan información casi completa (4/11) en el periodo de estudio 1981-2016.

3.2.2. Red de estaciones

Para la elaboración de este estudio se han utilizado once estaciones meteorológicas y una estación hidrológica pertenecientes a la red de estaciones de SENAMHI.

La Figura 3-8 muestra toda el área de la cuenca del río Jequetepeque, el área de estudio se encuentra delimitada en color naranja, se puede observar que la estación hidrológica Yonán (cuadrado de color blanco y negro) se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca y las estaciones meteorológicas (triángulo de color rojo) están adecuadamente distribuidas y ubicadas principalmente en la parte alta de la cuenca.

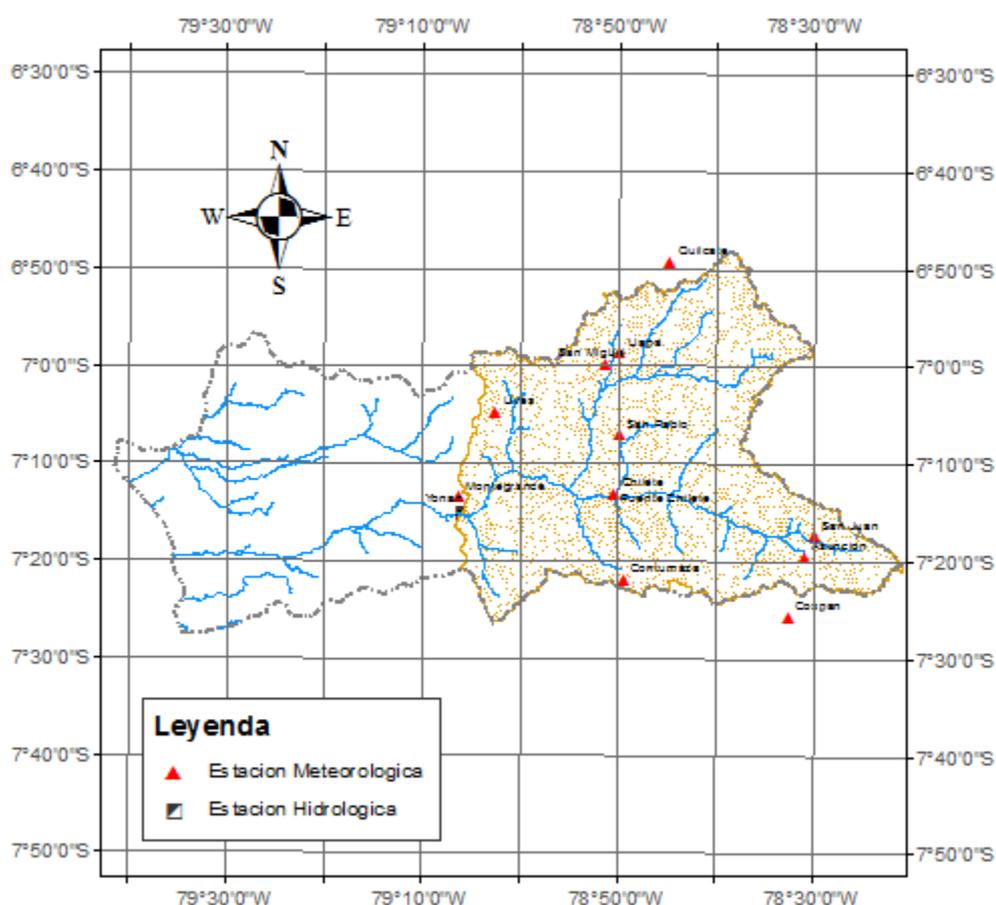


Figura 3-8 Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca Jequetepeque

Las Tablas 3-1 y 3-2 muestran la ubicación de las estaciones evaluadas para el análisis del presente estudio.

Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Jequetepeque

Nº	ESTACIÓN	TIPO	CUENCA	DPTO	PROV	LON	LAT	ALT
1	San Miguel	CO	Jequetepeque	Cajam.	San Miguel	78°51'11"	06°59'51"	2560
2	Llapa	CO	Jequetepeque	Cajam	San Miguel	78°49'50"	06°58'42"	2770
3	Lives	PLU	Jequetepeque	Cajam	San Miguel	79°02'26"	07°04'46"	1850
4	San Pablo	CO	Jequetepeque	Cajam	San Pablo	78°49'51"	07°07'04"	2190
5	Quilcate	PLU	Chancay Lamb.	Cajam	San Miguel	78°44'38"	06°49'22"	2930
6	Asunción	CO	Jequetepeque	Cajam	Cajamarca	78°30'57"	07°19'34"	2160
7	San Juan	CO	Jequetepeque	Cajam	Cajamarca	78°29'45"	07°17'27"	2185
8	Contumaza	CO	Jequetepeque	Cajam	Contumaza	78°49'22"	07°21'55"	2440
9	Cospán	PLU	Chicama	Cajam	Cajamarca	78°32'01"	07°26'01"	2227
10	Montegrande	CO	Jequetepeque	Cajam	Contumaza	79°06'13"	07°13'31"	1550
11	Chilete	PLU	Jequetepeque	Cajam	Contumaza	78°50'17"	07°13'11"	805

Tabla 3-2 Estación hidrológica ubicada en la cuenca Jequetepeque

Nº	ESTACIÓN	TIPO	CUENCA	PROV	LON	LAT	ALT
1	Yonán	HLM	Jequetepeque	Contumaza	79°06'01"	07°15'01"	600

3.2.3. Periodo de estudio

El periodo de estudio seleccionado fue la intersección común de la información de precipitación, temperatura y caudal, según lo recopilado de la base de datos del SENAMHI.

Para la etapa de calibración del modelo hidrológico:

Calibración: 01/01/1981 - 30/09/1991

Para la etapa de validación del modelo hidrológico:

Validación I: 01/01/2001 - 01/04/2010

Validación II: 01/09/2013 - 01/11/2016

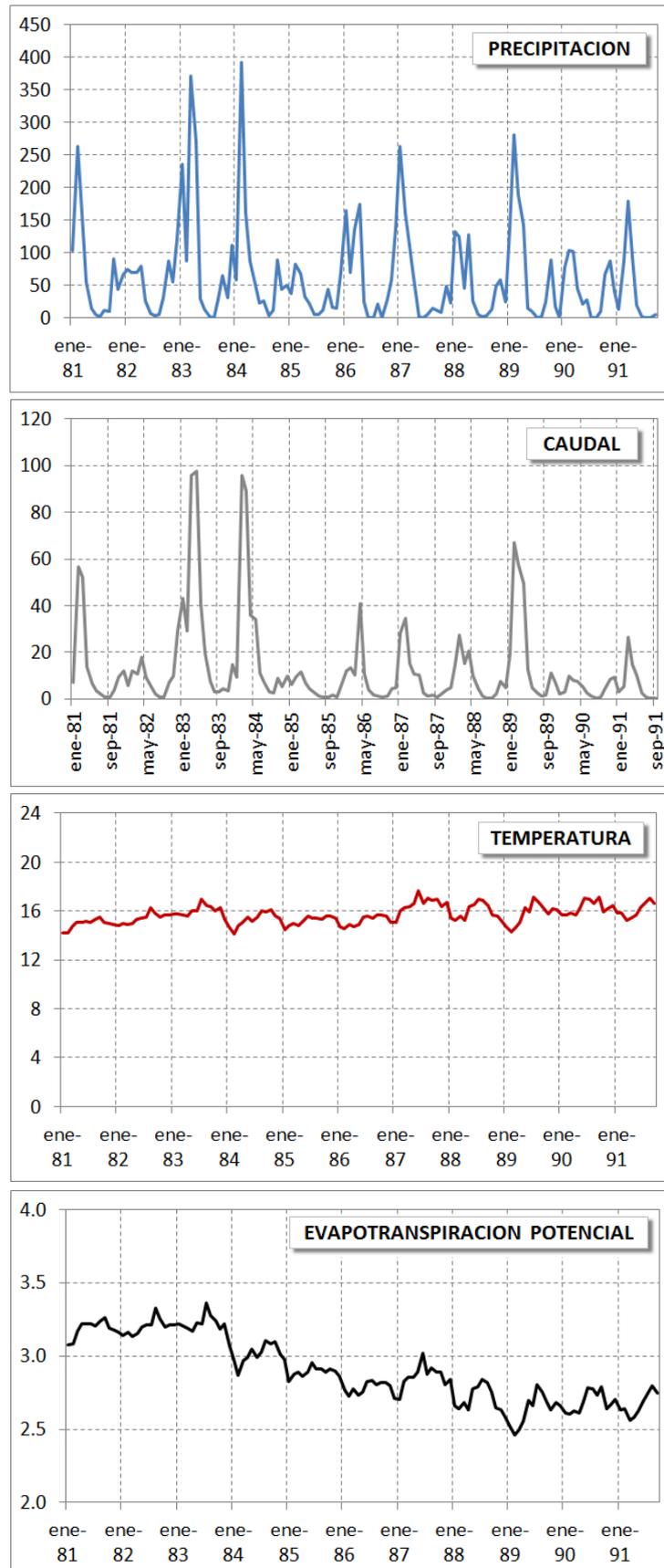


Figura 3-9 Series de precipitación, caudal, temperatura y evapotranspiración potencial utilizadas para la calibración del modelo GR2M

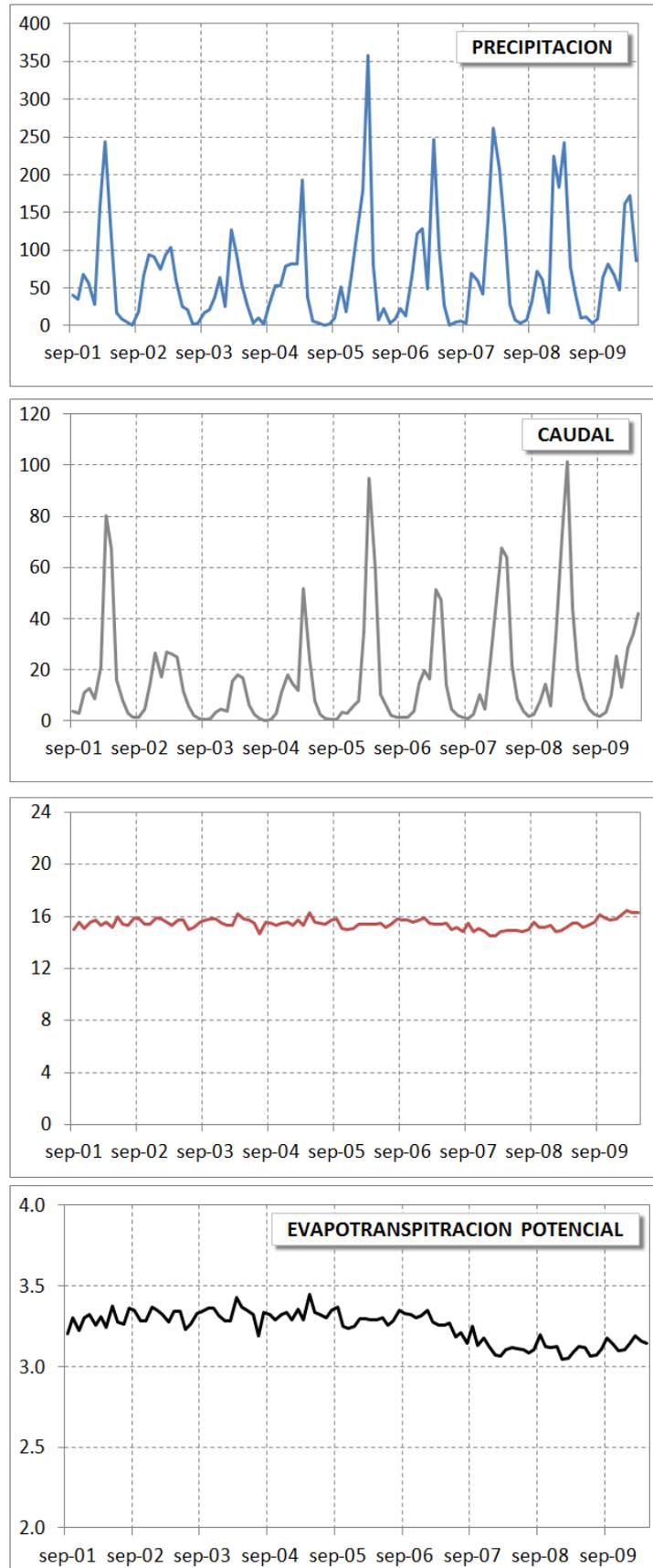


Figura 3-10 Series de precipitación, caudal, temperatura y evapotranspiración potencial utilizadas para la validación I del modelo GR2M

3.3. Métodos

3.3.1. 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 en dos periodos disponibles:

Periodo 1965-1982 y

Periodo 1997-2015.

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 como se muestran en la Figura 3-11.

La Figura 3-11 (a) muestra el análisis de doble masa de cinco estaciones meteorológicas: Asunción, Chilete, Lives, Llapa y San Juan. El periodo analizado corresponde a 18 años de información diaria de 1965 a 1982. Se puede observar que la información pluviométrica se ajusta bastante bien a una ecuación lineal lo cual indica que la información ha sido medida de manera adecuada en las cinco estaciones.

La Figura 3-11 (b) muestra el análisis de doble masa de once estaciones meteorológicas: Asunción, Contumaza, Lives, Montegrande, San Juan, San Pablo, Chilete, Cospán, Llapa, Quilcate y San Miguel. El periodo analizado corresponde a 19 años de información diaria de 1997 al 2015. 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 once estaciones.

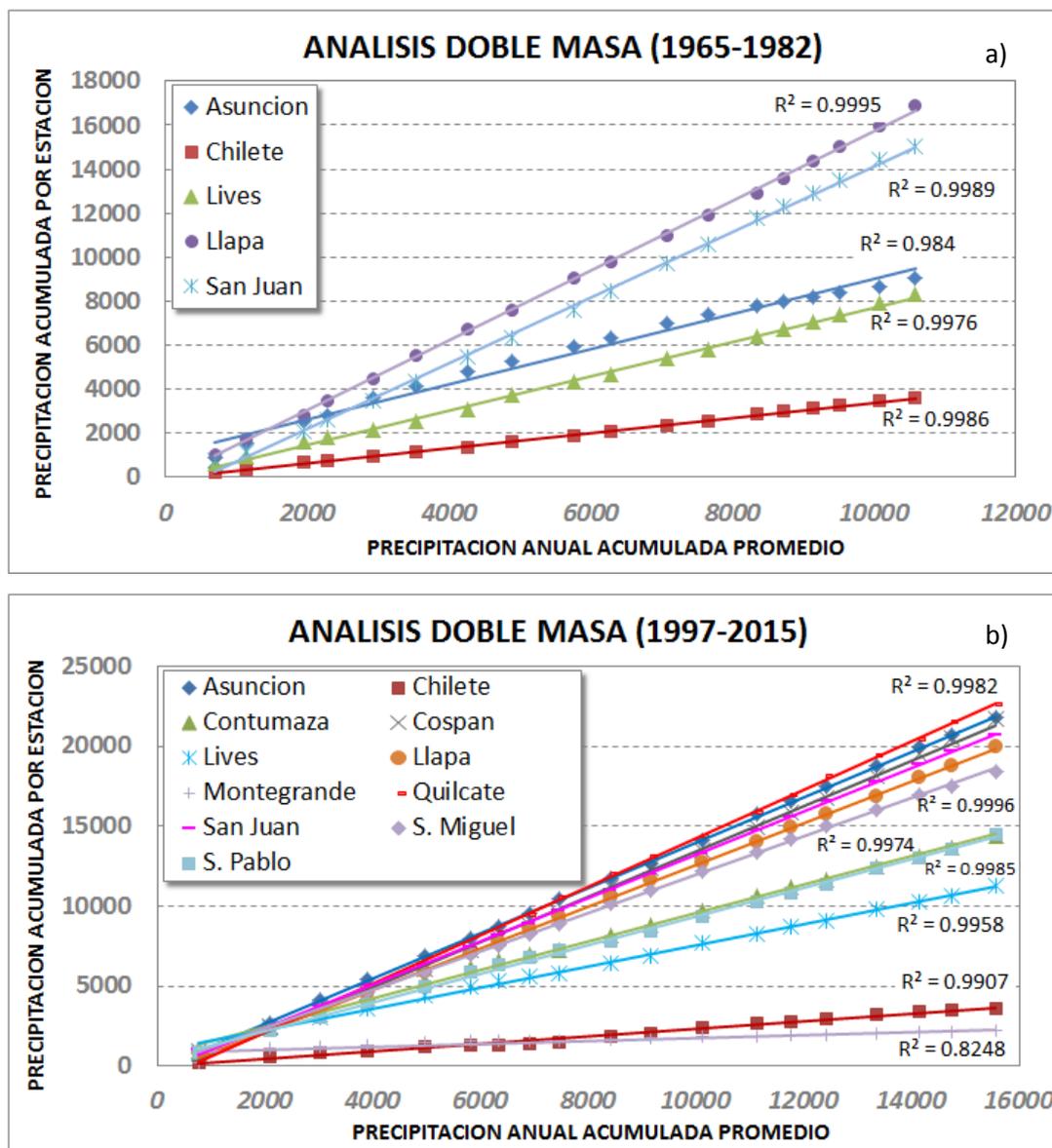


Figura 3-11 Curvas de doble masa de estaciones pluviométricas en la cuenca Jequetepeque

3.3.2. Parámetros fisiográficos de la cuenca Jequetepeque

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. A continuación se muestran los parámetros fisiográficos de la cuenca del río Jequetepeque.

Tabla 3-3 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Jequetepeque

CUENCA	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)
Jequetepeque	4971	441	150	2157	2.0	1.76	20,1

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Estimación de la precipitación media

La precipitación media areal en la cuenca del río Jequetepeque hasta la estación Yonán, se calculó empleando la información pluviométrica disponible en la base de SENAMHI. Se utilizó el software Hydraccess (software libre en <http://www.sohybam.org/index.php/esl/logiciels/Hydraccess>) para estimar los pesos de cada estación y de esta manera estimar la precipitación media diaria en la cuenca.

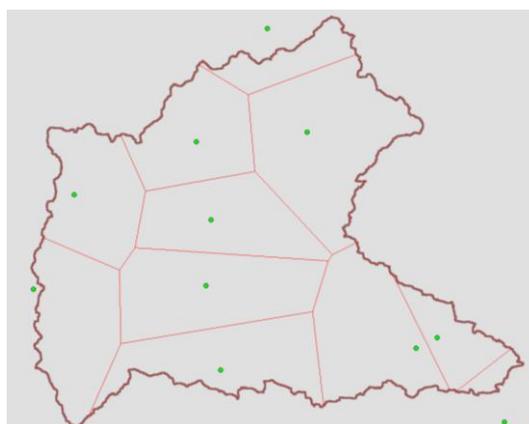


Figura 3-12 Polígonos de Thiessen para la cuenca Jequetepeque

3.3.4. Pronóstico de precipitación del modelo WRF

La subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera del SENAMHI viene generando pronósticos de precipitación trimestrales para 4 miembros de ensemble desde enero 2017 hasta la actualidad.

Estos pronósticos han utilizado condiciones iniciales y de borde del modelo WRF (datos predictados del modelo CFS v2 de resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$). Las salidas de la predicción numérica estacional de WRF tienen una resolución espacial inicial de 16 km y una resolución final que es de escala local y que ha tenido una corrección estadística BIAS.

Los datos del hindcast que se han utilizado para generar los pronósticos WRF han sido generados sobre la línea base del periodo 1981-2010, en 365 estaciones.

La Figura 3-13 y 3-14 muestra los pronósticos de la precipitación mensual en puntos de estación para los meses de abril, mayo y junio de alcance nacional, así como los módulos de la precipitación normal o media climática para los mismos meses en mención sobre la línea base de 1981-2010.

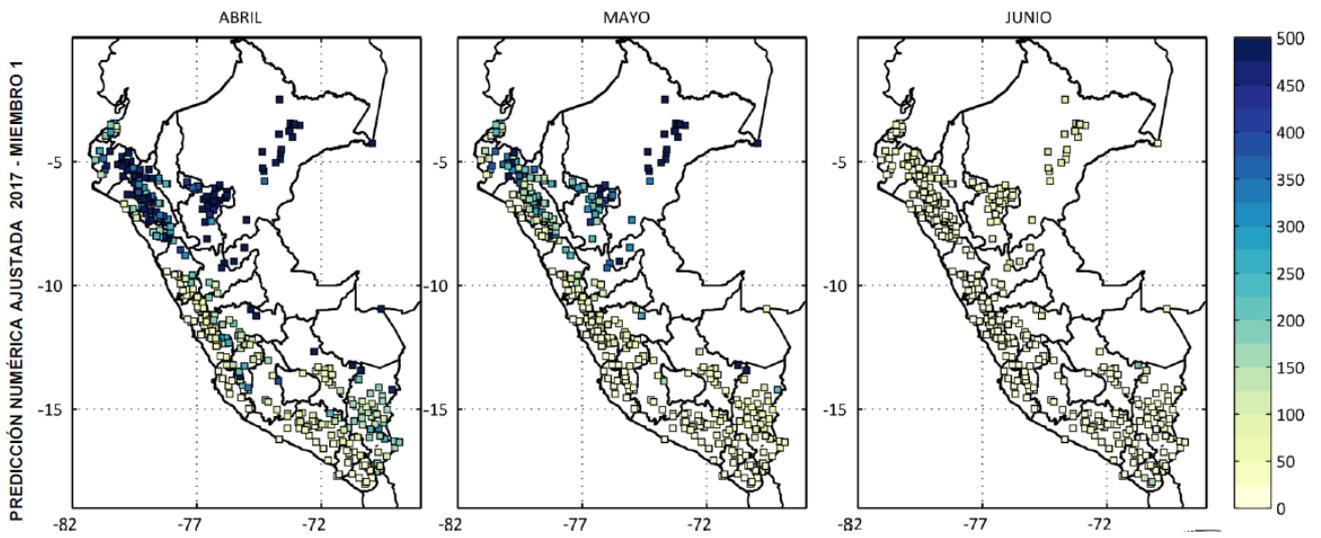


Figura 3-13 Pronóstico de precipitación (miembro1) para abril-mayo-junio 2017 a nivel nacional

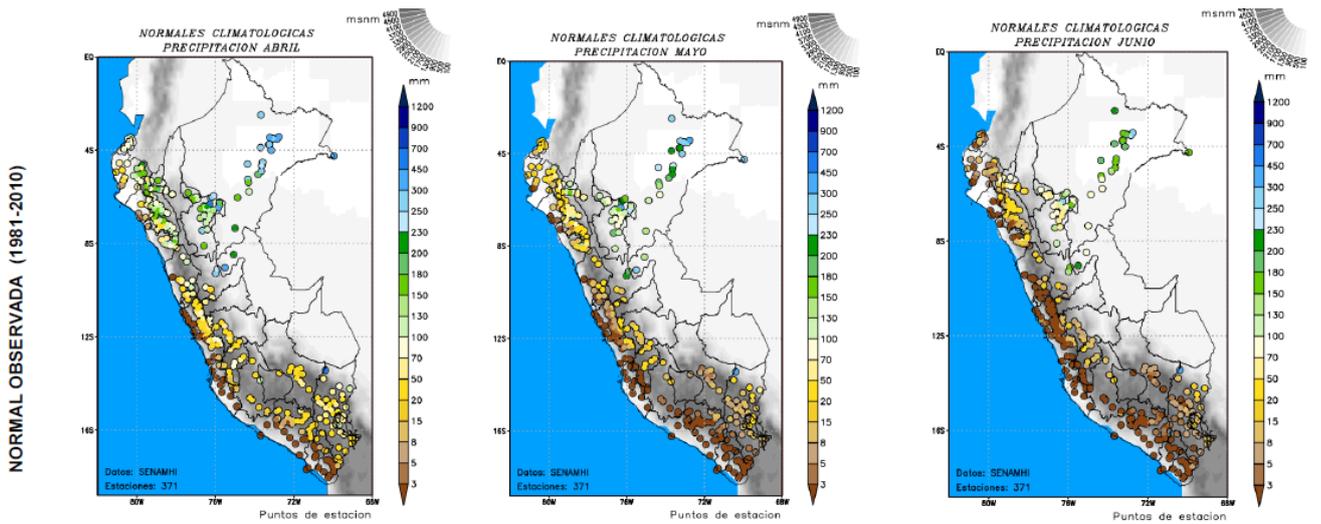


Figura 3-14 Precipitación normal observada para abril-mayo-junio a nivel nacional

3.3.5. Flujograma Metodológico

La Figura 3-15 sintetiza el procedimiento metodológico desarrollado en el modelamiento hidrológico del presente estudio.

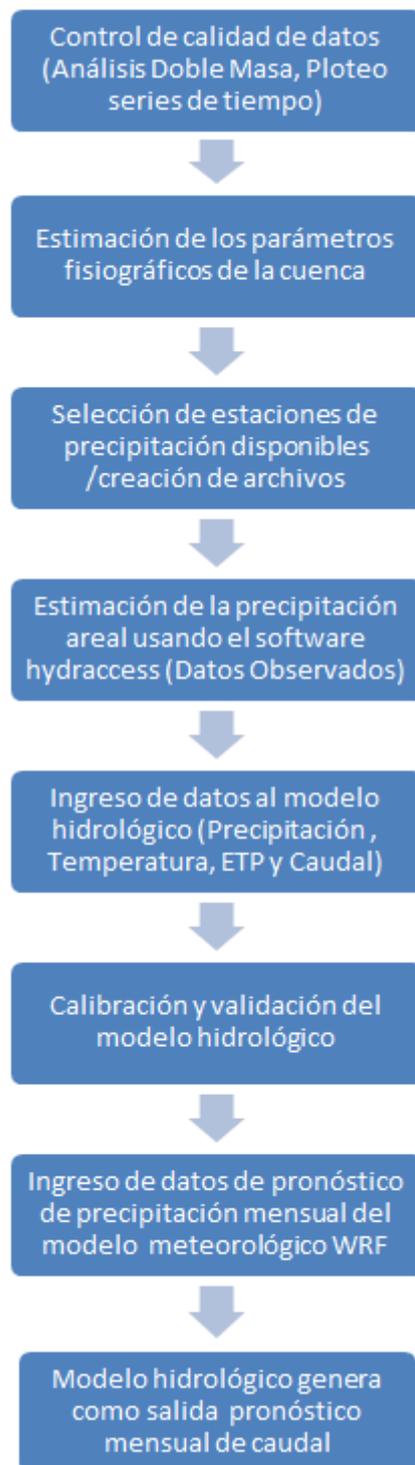


Figura 3-15 Diagrama de flujo de la metodología para el modelamiento hidrológico

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El periodo de información común para la mayoría de estaciones que se ha encontrado en la base de datos de SENAMHI para las variables precipitación, temperatura y caudal se indica a continuación: Calibración: Ene 1981 – Set 1991 y Validación: Set 2001 – Abr 2010, Set 2013 – Nov 2016. En este estudio se ha elegido como año de inicio 1981 correspondiente a la base de datos de Pisco.

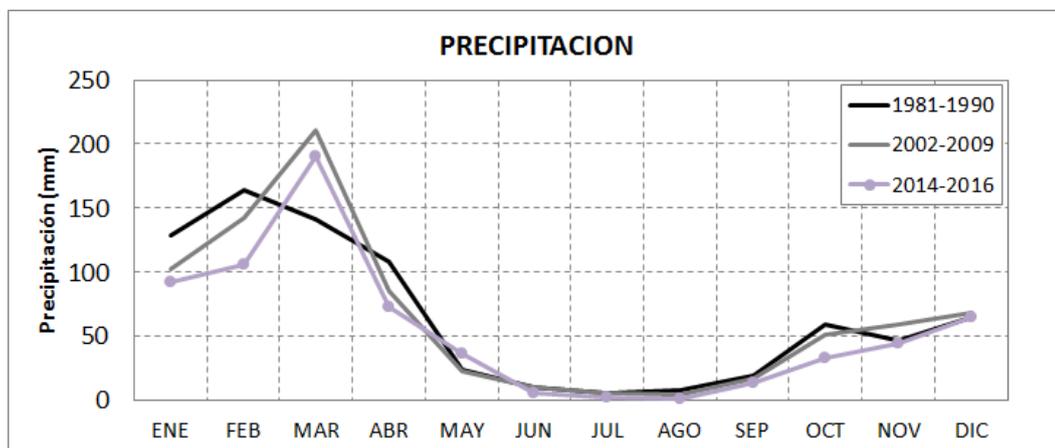


Figura 4-1 Precipitación media mensual en la cuenca Jequetepeque

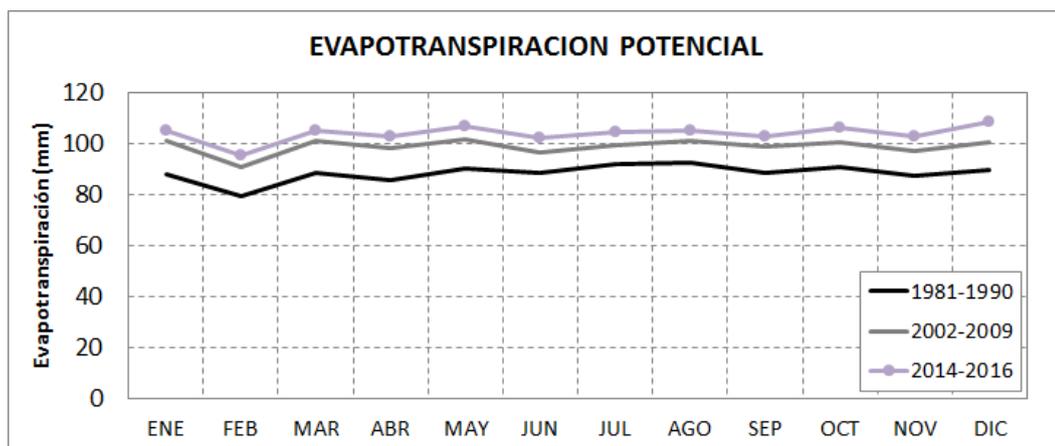


Figura 4-2 Evapotranspiración media mensual en la cuenca Jequetepeque

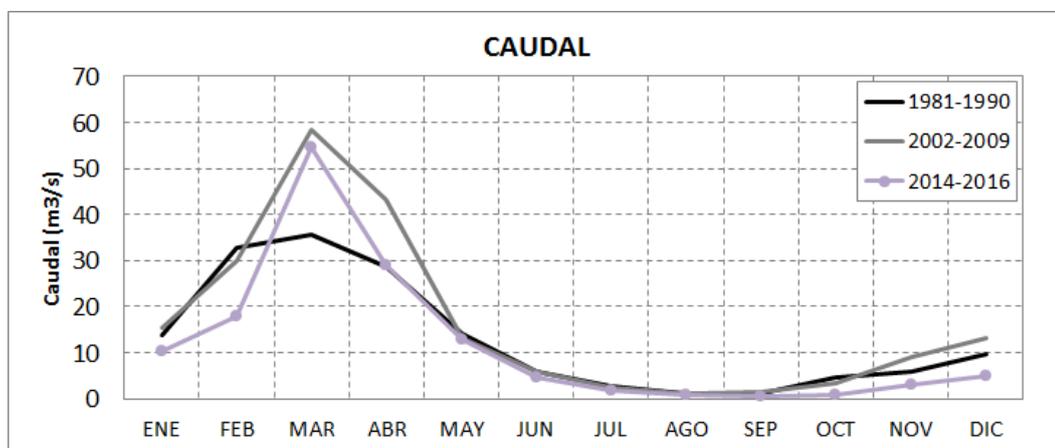


Figura 4-3 Caudal medio mensual en la cuenca Jequetepeque

Como se puede observar en la Figura 4-1, aparentemente el comportamiento pluviométrico ha cambiado, entre 1981-1990 los mayores valores de la precipitación areal en la cuenca Jequetepeque ocurrían en el mes de febrero pero del año 2002 en adelante la mayor precipitación areal se ha registrado en el mes de marzo. El mes que registra la menor precipitación areal a lo largo de todo el año ha sido julio.

De la Figura 4-2 se puede observar que la evapotranspiración potencial obtenida por el método Oudin, se ha ido incrementando de manera gradual, en los años 80's tenía un valor promedio mensual de 88 mm/mes, entre el 2002-2009 tenía un valor de 98 mm/mes y recientemente entre 2014-2016 tiene un valor promedio de 103 mm/mes.

De la Figura 4-3 se puede observar que el caudal medio mensual medido en la estación hidrológica Yonan registra los mayores valores de caudal en el mes de marzo e incluso los caudales registrados en el mes de abril son mayores a los del mes de febrero. Históricamente el caudal más bajo en el río Jequetepeque se ha registrado en el mes de agosto.

En la cuenca Jequetepeque, para los periodos mencionados anteriormente hay dos estaciones que cuentan con datos de temperatura y son las estaciones Contumaza y San Juan. Para este estudio se ha considerado el promedio de la temperatura de estas dos estaciones como la temperatura media para toda la cuenca. En la Figura 4-4 se puede observar la gran variabilidad de la temperatura en los últimos 35 años, por ejemplo la estación Contumaza registró el año 2008 la temperatura más baja ($9,8^{\circ}\text{C}$) y la estación San Juan registró el año 2009 la temperatura más alta ($23,6^{\circ}\text{C}$).

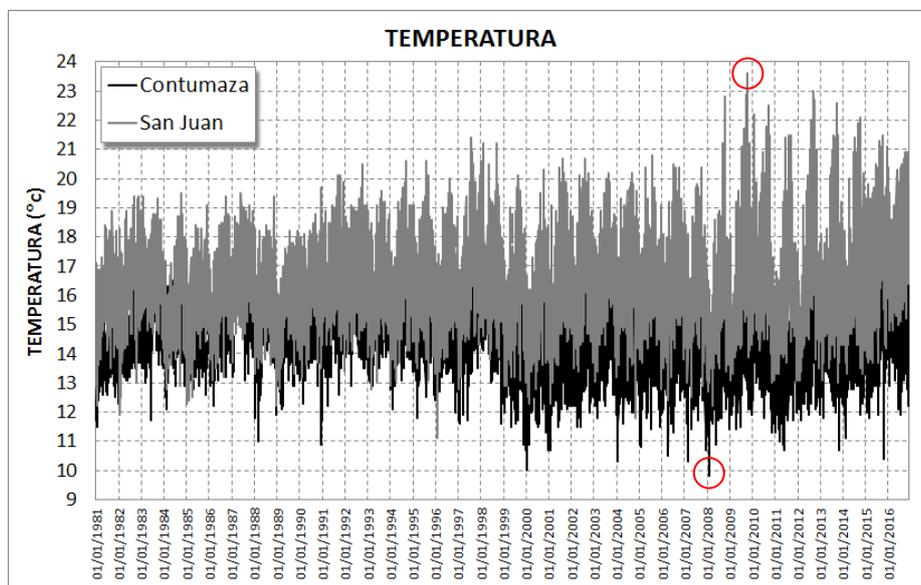


Figura 4-4 Temperatura diaria de estaciones Contumaza y San Juan en cuenca Jequetepeque

A partir de esta serie de tiempo de temperaturas diarias y utilizando el método de Oudin, se estimó la evapotranspiración potencial diaria y mensual para los periodos de calibración y validación.

Para la estimación de la precipitación media areal a partir de las estaciones convencionales en la cuenca Jequetepeque, se ha empleado el software Hydraccess y se han utilizado los 4 métodos de interpolación (Aritmético, Thiessen, Inverso de la distancia y Krigging).

A continuación se muestran los resultados del modelamiento hidrológico en la cuenca Jequetepeque usando el modelo GR2M, para evaluar la eficiencia de este modelo se han empleado 3 índices estadísticos: NASH, RMSE y r.

Tabla 4-1 Resultados de la calibración y validación con el modelo GR2M

GR2M	CALIBRACIÓN			VALIDACIÓN I			VALIDACIÓN II		
	NASH	RMSE	R	NASH	RMSE	R	NASH	RMSE	R
PISCO	87,47	6,91	0,88	82,11	8,99	0,91	83,73	6,61	0,92
ARITMETICO	89,27	6,40	0,90	84,75	8,30	0,91	86,33	6,06	0,93
THIESSEN	86,42	7,19	0,87	77,45	10,09	0,90	79,41	7,43	0,91
INVERSO D.	87,55	6,89	0,88	80,11	9,48	0,90	81,55	7,03	0,92
KRIGGING	86,78	7,10	0,87	79,24	9,68	0,90	80,90	7,16	0,92

Los valores de los parámetros obtenidos en la fase de calibración con el modelo hidrológico GR2M fueron: $X_1=6,85$, $X_2=0,42$; estos mismos parámetros se utilizaron en los periodos de validación I y validación II. A pesar de que el valor del parámetro X_1 no se encuentra dentro del rango (según el manual del CEMAGREF, ver tabla 4-2), los índices estadísticos obtenidos en los periodos de validación han sido muy buenos. Podemos decir por lo tanto que el rango de parámetros de la Tabla 4-2 debe ser reajustado para las cuencas del Perú.

Tabla 4-2 Rango de los parámetros del modelo GR2M

PARÁMETRO	MEDIANA	Intervalo de Confianza al 90%
X1	380	140 – 2640
X2	0.92	0.21 – 1.31

En este estudio se ha realizado también la validación del pronóstico de precipitación que ha generado el modelo WRF. Los pronósticos que ha generado la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmosfera (SPN) DEL SENAMHI son a nivel nacional pero para los fines de modelamiento de la cuenca Jequetepeque se han considerado los puntos que se muestran en la Tabla 4-3 debido a estar ubicados en la cuenca en estudio y próximas a ella.

Tabla 4-3 Puntos pronosticados por el modelo WRF en la cuenca del río Jequetepeque

PUNTO	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTITUD (msnm)
A. Weberbauer	-7,167	-78,485	2660
Niepos	-6,925	-79,129	2424
Talla	-7,271	-79,423	105
Contumaza	-7,356	-78,830	2610
Granja Porcón	-7,034	-78,627	2980
San Juan	-7,288	-78,491	2469
San Marcos	-7,322	-78,169	2298
Llapa	-7,000	-78,830	2900
Magdalena	-7,254	-78,661	1257
Asunción	-7,312	-78,516	2194
Lives	-7,085	-79,034	1800
Chilete	-7,224	-78,838	859

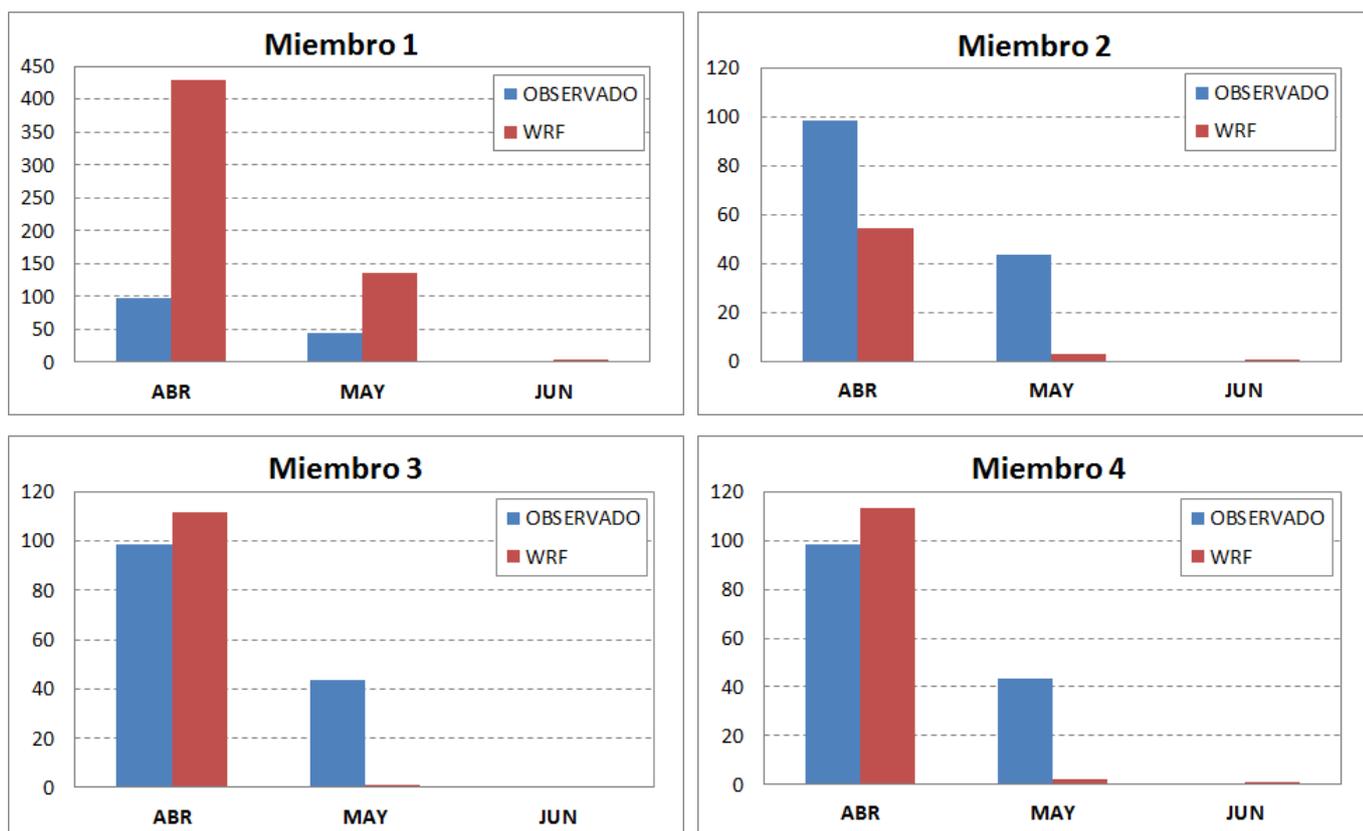


Figura 4-5 Pronóstico de precipitación WRF (AMJ) Vs. precipitación observada en la cuenca Jequetepeque
Fuente: SMN del SENAMHI

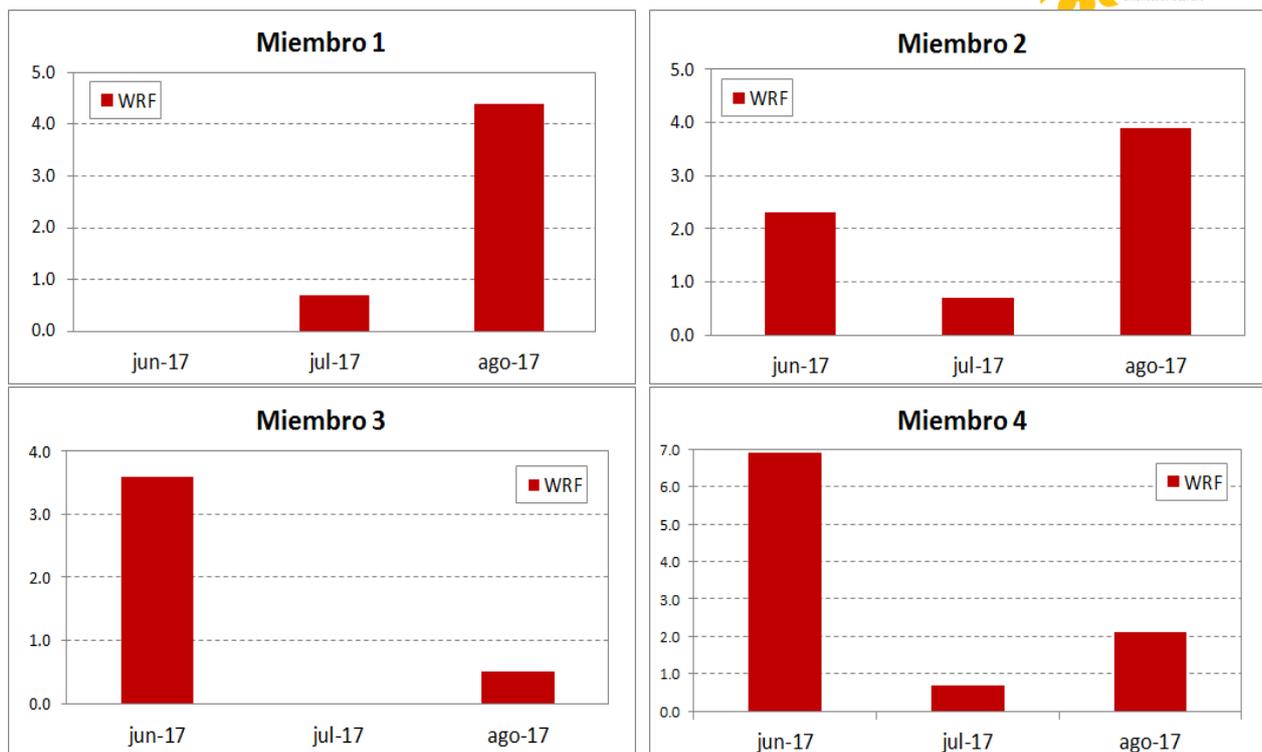


Figura 4-6 Pronóstico de precipitación WRF (JJA) en la cuenca Jequetepeque

En la fase de calibración el modelo GR2M presentó valores altos del coeficiente de NASH, por encima del 86% para los cinco métodos de estimación de precipitación empleados. En cuanto al error cuadrático medio este valor fluctuó entre 6,4 y 7,2; el menor valor se obtuvo usando la precipitación estimada con el método aritmético. El mayor coeficiente de correlación se obtuvo al utilizar la serie de precipitación estimada con el método aritmético, se obtuvo 0,9, tal como se muestran en las Figuras 4-7 a 4-11.

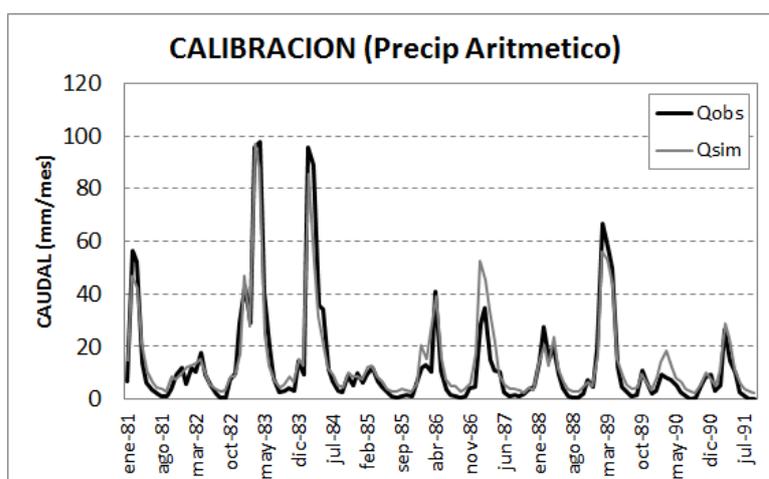


Figura 4-7 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método media aritmética

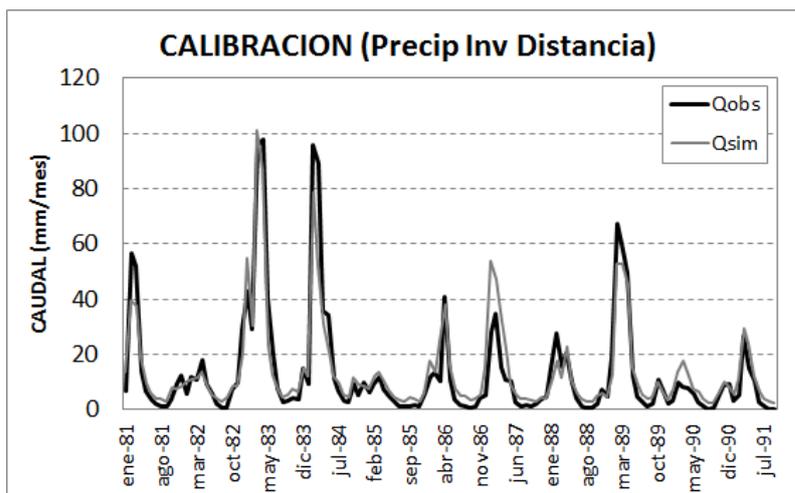


Figura 4-8 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Inv. Distancia

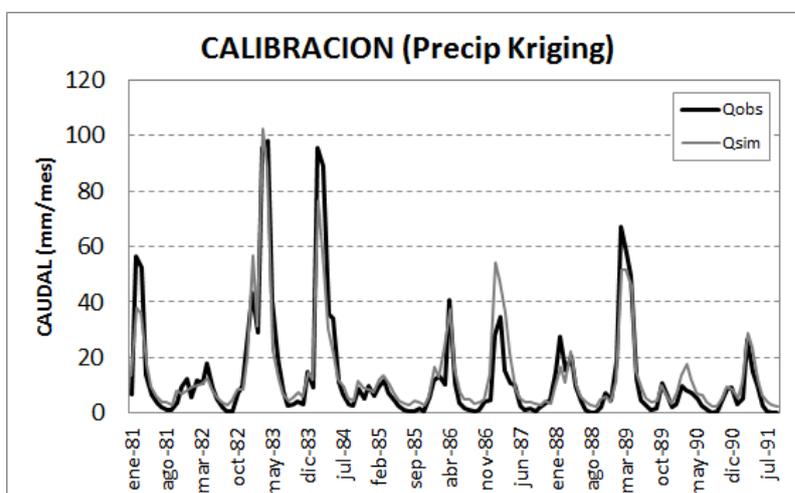


Figura 4-9 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Kriging

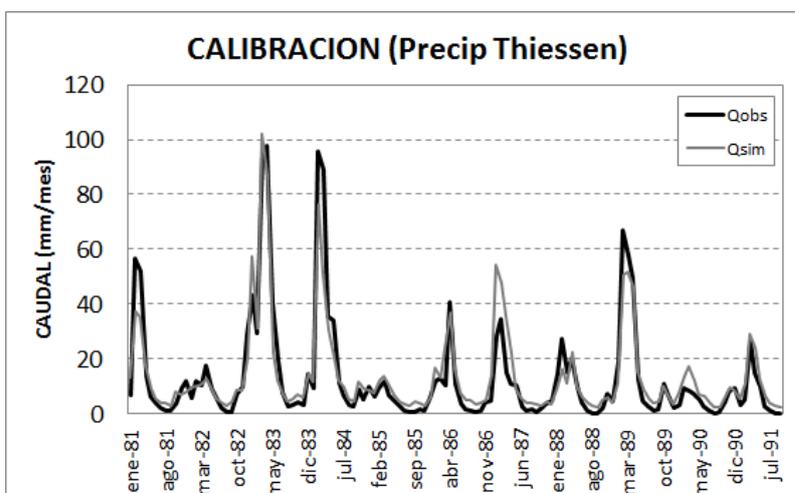


Figura 4-10 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal por método Thiessen

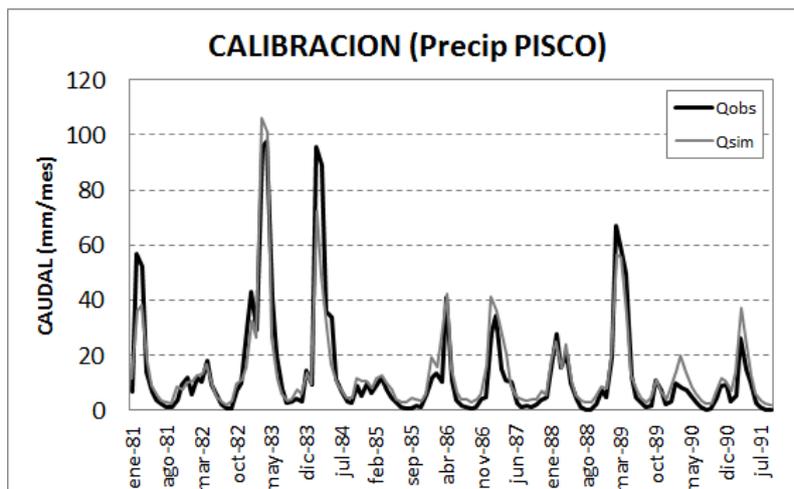


Figura 4-11 Calibración del GR2M considerando como dato de entrada la precipitación areal de PISCO

En la fase de validación periodo I, el modelo GR2M presentó valores del coeficiente de NASH por encima del 77% para los cinco métodos de estimación de precipitación empleados. El valor más alto de NASH obtenido fue de 0,84 con el método aritmético. En cuanto al error cuadrático medio (RMSE), este valor fluctuó entre 8,3 y 10,1; el menor valor de 8,3 se obtuvo usando la precipitación estimada con el método aritmético. Asimismo, el mayor coeficiente de correlación se obtuvo al utilizar la serie de precipitación estimada con el método aritmético, se obtuvo un valor de 0,91 pero en todos los casos el coeficiente obtenido fue igual o superior a 0,90. ver Figuras 4-12 a 4-16.

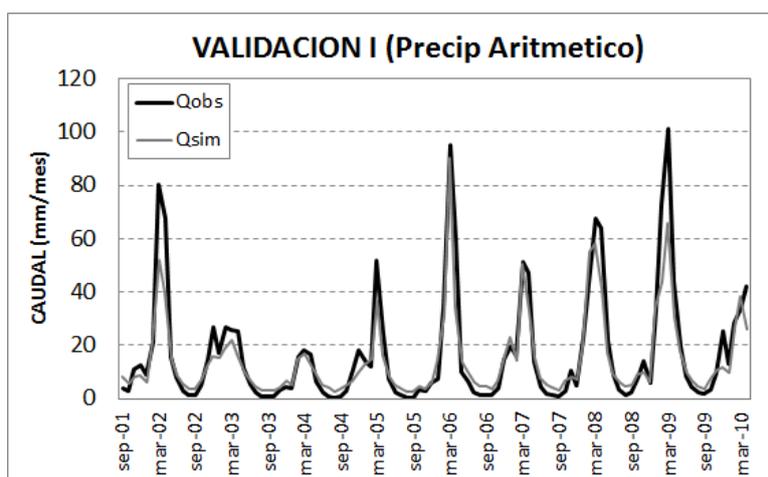


Figura 4-12 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método aritmético

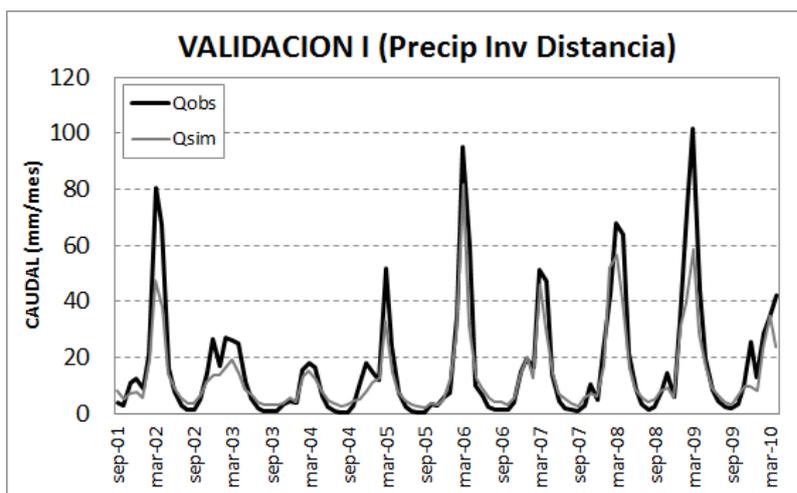


Figura 4-13 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Inv. Distancia

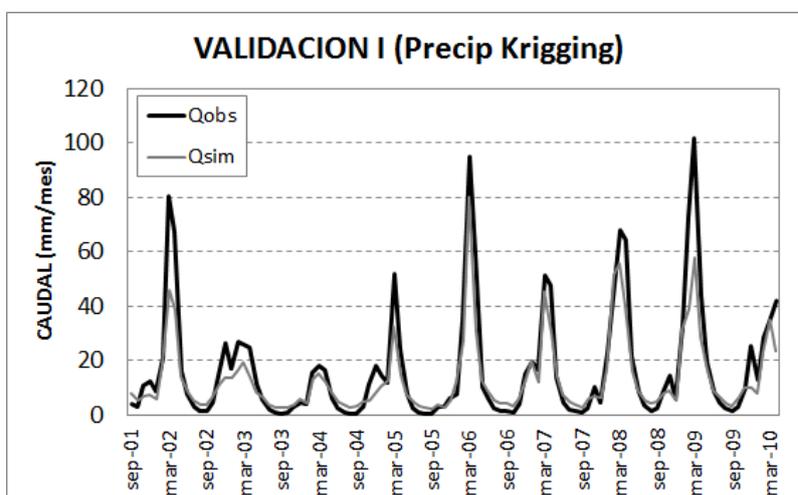


Figura 4-14 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Kriging

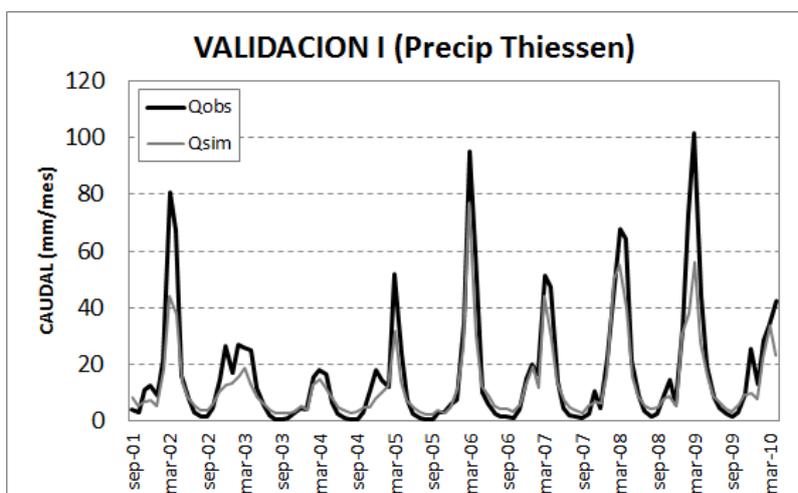


Figura 4-15 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Thiessen

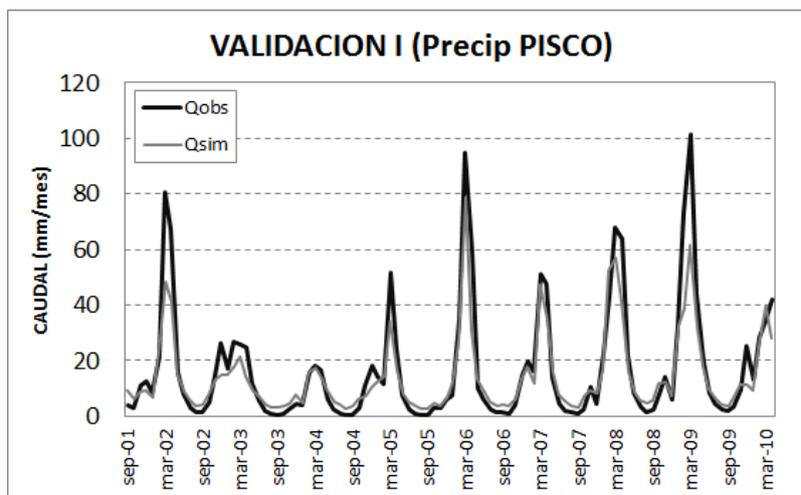


Figura 4-16 Validación del GR2M para el periodo I, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida de PISCO

En la fase de validación periodo II, el modelo GR2M presentó valores del coeficiente de NASH por encima del 79% para los cinco métodos de estimación de precipitación empleados. El valor más alto de NASH obtenido fue de 0,86 con el método aritmético. En cuanto al error cuadrático medio (RMSE), este valor fluctuó entre 6,1 y 7,4; el menor valor de 6,1 se obtuvo usando la precipitación estimada con el método aritmético. Asimismo, el mayor coeficiente de correlación se obtuvo al utilizar la serie de precipitación estimada con el método aritmético, se obtuvo un valor de 0,93 pero en todos los casos el coeficiente obtenido fue igual o superior a 0,91.

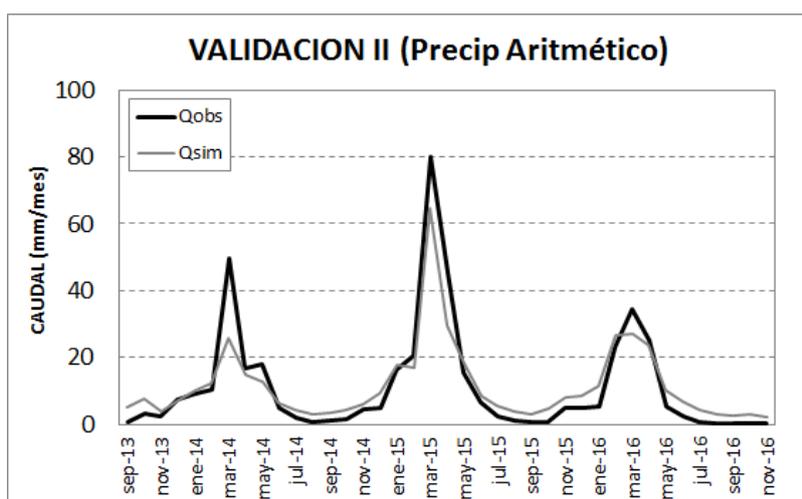


Figura 4-17 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Aritmética

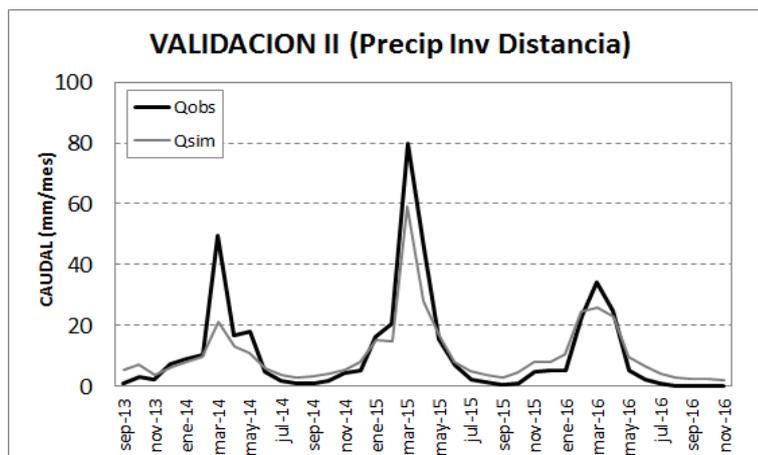


Figura 4-18 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Inv. Distancia

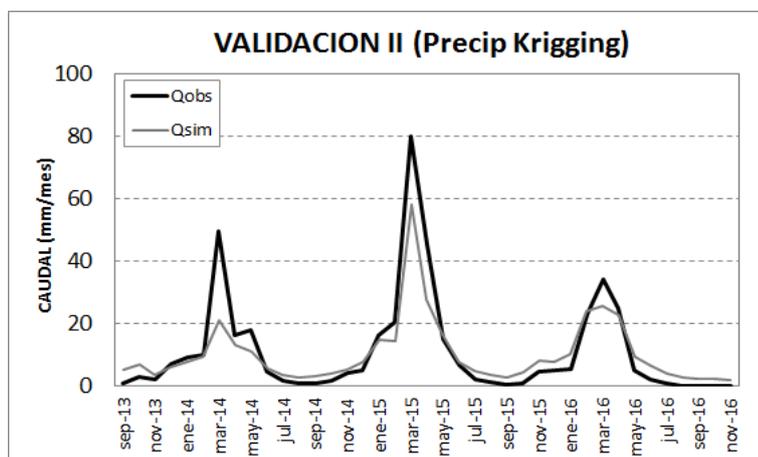


Figura 4-19 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Kriging

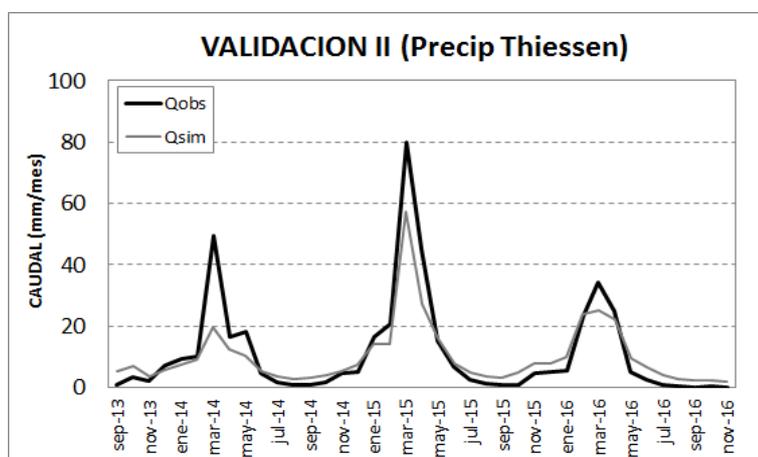


Figura 4-20 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por el método Thiessen

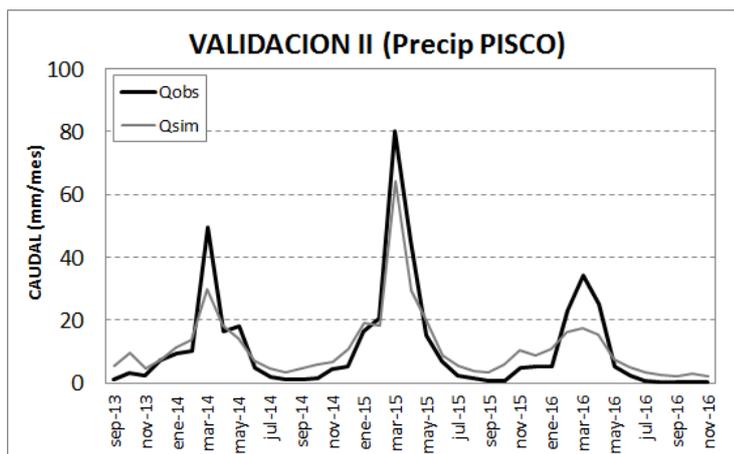


Figura 4-21 Validación del GR2M para el periodo II, considerando como dato de entrada la precipitación areal obtenida por de PISCO

En este estudio, se ha utilizado las salidas del modelo de predicción numérica del tiempo WRF que proporcionó la Subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera de SENAMHI para generar los pronósticos de caudales del río Jequetepeque para el trimestre abril – mayo - junio 2017 y trimestre junio - julio – agosto 2017. Debido a que tanto en las fases de calibración y validación se han obtenido buenos resultados usando como dato de entrada la precipitación areal obtenida con el método aritmético, para la generación de las precipitaciones areales pronosticadas, también se utilizará el método aritmético.

La Figura 4-22 muestra los caudales pronosticado (barra de color rojo) y los caudales observados (barra de color azul) en el trimestre abril a junio.

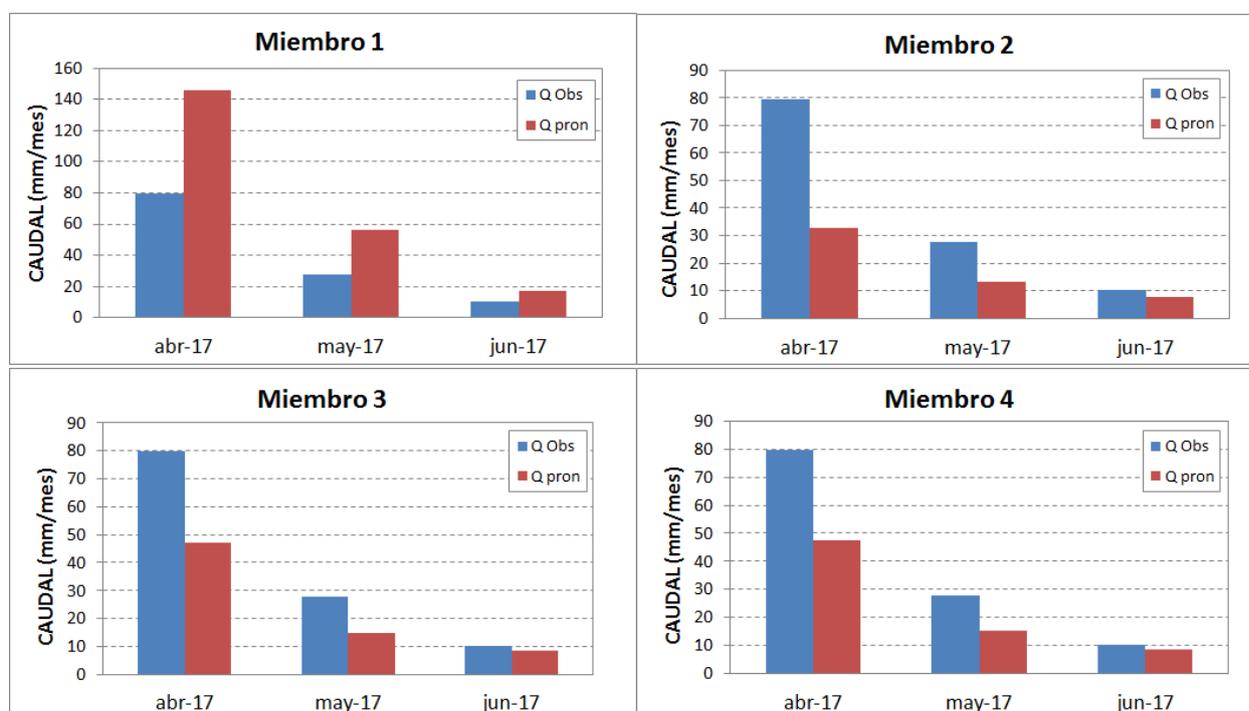


Figura 4-22 Caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (AMJ)

La Figura 4-23 muestra los caudales pronosticados (barra de color rojo) y los caudales observados (barra de color azul, en este caso es cero milímetros) en el trimestre junio a agosto.

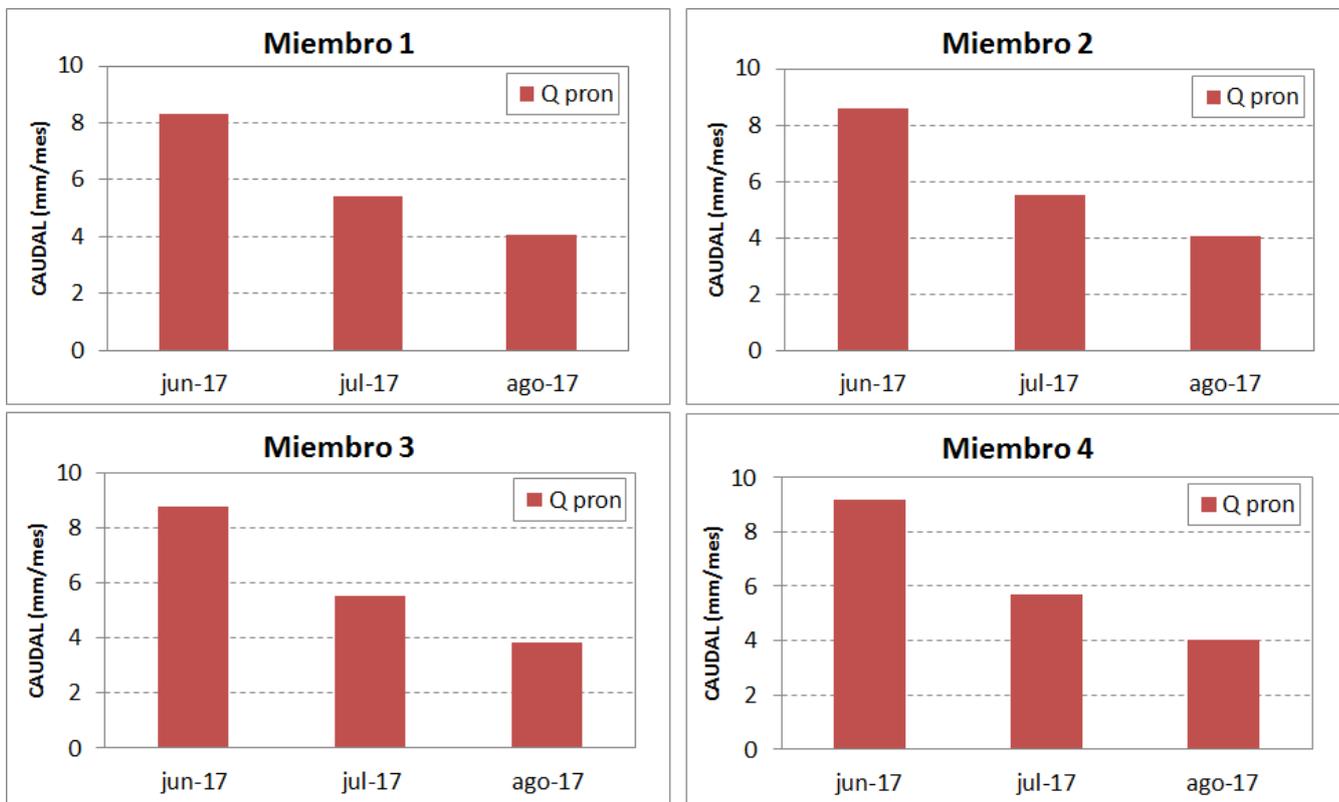


Figura 4-23 Caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (JJA)

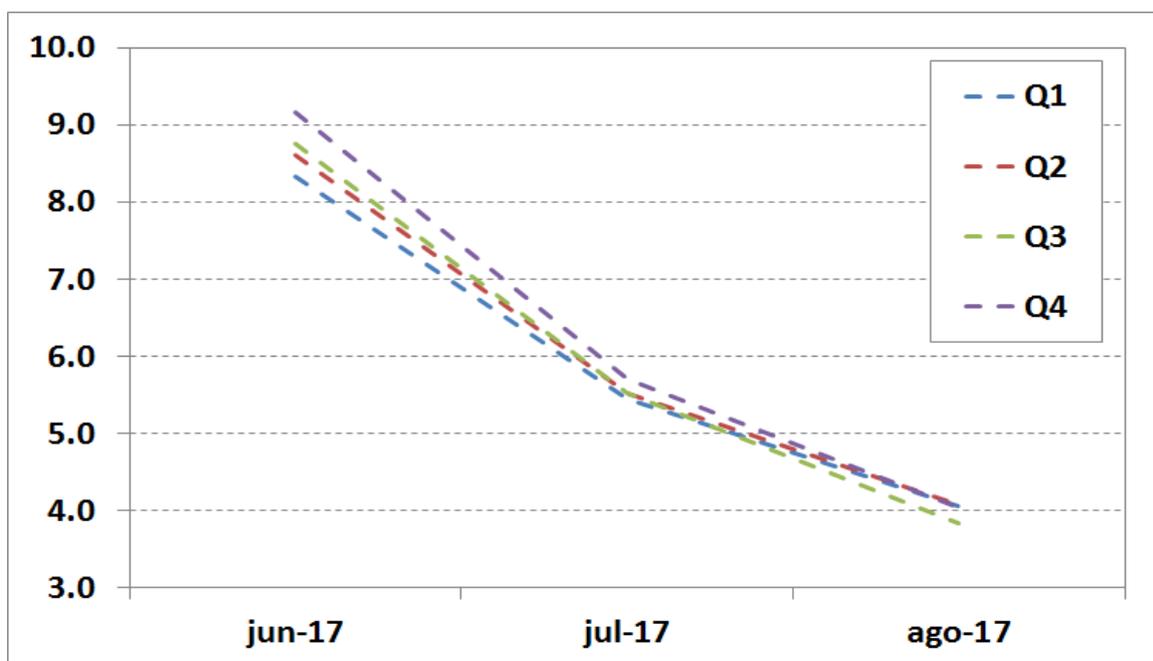


Figura 4-24 Pronóstico de caudal en mm/mes para los meses de junio-julio-agosto 2017

La Figura 4-25 muestra el hidrograma de caudales en m³/s, en la estación hidrométrica Yonán, en relación a los caudales históricos y los que se viene registrando durante el presente año hidrológico, respecto a los caudales generados según los cuatro pronósticos de precipitación (miembros del 1 al 4).

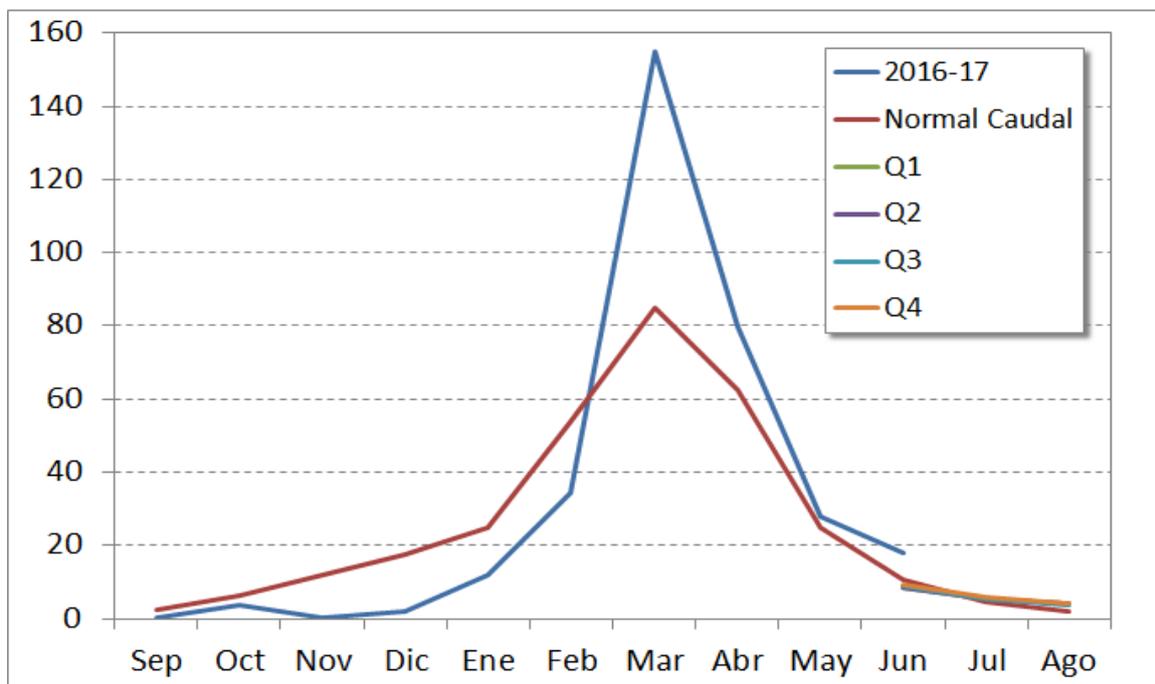


Figura 4-25 Comparación de los Pronóstico de caudales en m³/s para los meses de junio-julio-agosto 2017 en relación con los pronósticos del mismo trimestre.

5. CONCLUSIONES

- La principal limitante para el desarrollo del estudio ha sido la falta de información de caudales de la estación hidrológica Yonán, la cual tiene un vacío de información de casi 10 años entre octubre de 1991 y setiembre 2001, por este motivo el periodo de calibración considerado ha sido desde enero 1981 hasta setiembre 1991. Asimismo, la estación Yonán tiene otro vacío de información entre junio 2011 y agosto 2012, por este motivo el periodo de validación se ha dividido en 2 periodos: setiembre 2001 – abril 2010 y setiembre 2013 – noviembre 2016. Estos vacíos de información en la estación hidrológica Yonán han limitado el periodo de análisis.
- El análisis de la calidad de los datos se ha realizado mediante la técnica doble masa a los datos de precipitación, cabe resaltar que la cuenca cuenta con información, así tenemos que para el periodo 1965 a 1982 se han considerado cinco estaciones meteorológicas: Asunción, Chilete, Lives, Llapa y San Juan mientras que para el periodo 1997 a 2015 se han considerado once estaciones meteorológicas: Asunción, Contumaza, Lives, Montegrande, San Juan, San Pablo, Chilete, Cospán, Llapa, Quilcate y San Miguel. En ambos casos se ha observado que los datos se ajustan bien a una ecuación lineal lo cual indica que la información ha sido medida de manera adecuada por tanto la información es consistente.
- El comportamiento pluviométrico en la cuenca Jequetepeque ha cambiado, en los años 80's (1981-1990) las mayores precipitaciones ocurrían en el mes de febrero pero a partir del año 2002 en adelante las mayores precipitaciones ocurren en el mes de marzo. También se ha observado un cambio en la magnitud de la precipitación en la cuenca Jequetepeque, tomando como base la precipitación media del mes de enero de 1981-1990, la precipitación entre los años 2002-2009 ha descendido en 20% y entre los años 2014-2016 ha descendido en 29%. En el mes de febrero ocurre un comportamiento similar, tomando como base el mes de febrero 1981-1990, la precipitación entre los años 2002-2009 ha descendido en 14% y entre los años 2014-2016 ha descendido en 35%. Sin embargo para el mes de marzo la precipitación en los últimos años ha aumentado, así la precipitación del mes de marzo entre los años 2002-2009 ha aumentado en 49% y entre los años 2014-2016 ha aumentado en 34% con respecto a la precipitación media entre los años 1981-1990.
- La evapotranspiración potencial es la variable que más ha cambiado, en los años 80's tenía un valor promedio mensual de 88 mm/mes, entre el 2002 al 2009 tenía un valor de 98 mm/mes y entre 2014 al 2016 registró un valor promedio de 103 mm/mes, es decir entre los años 1980 a 2016 esta variable se ha incrementado en 17%.
- El comportamiento del caudal histórico en la estación Yonán sigue un patrón similar al de la precipitación en la cuenca Jequetepeque, es decir tomando como base el caudal promedio del mes de febrero entre los años 1981-1990, el caudal entre los años 2002-2009 ha disminuido en 8% y entre los años 2014-2016 ha disminuido en 45%.
- En cuanto a los pronósticos de precipitación del modelo WRF, el mes de abril ha sido el más variable, el miembro 1 ha sido el menos acertado puesto que en abril pronosticó un valor demasiado alto (casi 4 veces mayor al observado), así como el miembro 2 tampoco fue un buen

pronóstico puesto que para abril pronostió 55 mm cuando lo observado fue 98,3 mm. Los miembros 3 y 4 son bastante similares, ambos pronosticaron para abril 111 y 113 mm/mes respectivamente.

Los pronósticos de precipitación del modelo WRF en el periodo JJA muestran un comportamiento similar comparado con el pronóstico del periodo AMJ y es que los miembros 3 y 4 son bastante parecidos. Los pronósticos para junio 2017 muestran una fluctuación de entre 0 a 7 mm. Los pronósticos para julio 2017 muestran una fluctuación de entre 0 a 1 mm y los pronósticos para agosto 2017 muestran una fluctuación de entre 0 a 5 mm.

Los miembros 3 y 4 podrían ser utilizados para fines de pronóstico, sin embargo es necesario realizar un monitoreo y evaluación continuo de estos pronósticos de precipitación puesto que existe bastante incertidumbre. Sin embargo es posible reducir esta incertidumbre siempre y cuando se tengan suficientes pronósticos, de esta manera se podría conocer si es que hay un comportamiento sistemático del modelo.

- En el proceso de calibración, validación I y validación II, la mejor performance del modelo GR2M se ha obtenido empleando la precipitación areal estimada con el método aritmético y la precipitación areal estimada con la base de datos PISCO.
- Para el pronóstico de la precipitación en los meses de abril-mayo-junio y junio-julio-agosto se han empleado los pronósticos en 12 puntos.
- El pronóstico de caudal en el periodo abril-mayo-junio muestra que los pronósticos de abril y mayo empleando los miembros 2, 3 y 4 indican una subestimación del caudal pronosticado de entre 40% a 50%, también para los meses de abril y mayo; y con el miembro 1 el caudal pronosticado es sobreestimado entre 75 a 100% por lo cual es el menor acierto.
- El pronóstico de caudal en el periodo junio-julio-agosto indica una subestimación en el mes de junio puesto que los pronósticos de caudal indican un valor de 8,5 m³/s en promedio, cuando el caudal observado en este mes fue de 17,7 m³/s es decir una subestimación de casi el 50%. El pronóstico de julio 2017 fluctúa entre 5 y 6 m³/s y el pronóstico para agosto 2017 es de 4 m³/s.

6. RECOMENDACIONES

- Es recomendable contar con un periodo de información de 30 años por lo menos, en este caso para calibración del modelo hidrológico solo se tuvo 11 años de información de caudal.
- Se insta a que la Subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera de SENAMHI continúe trabajando en la mejora de los pronósticos de precipitación con el modelo WRF. Se sugiere tener acceso a mapas grillados de lluvias pronosticadas e indicar las incertidumbres con fines de optimización del modelamiento hidrológico.
- Se exhorta que se realicen trabajos de supervisión y mantenimiento permanente a la estación hidrológica Yonan así como continuar con los trabajos de aforo del río Jequetepeque para asegurar que la calidad de los datos medidos y registrados por el observador hidrológico sea lo más cercano a la realidad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAF (2000). "El Fenómeno El Niño 1997-1998 Memorias retos y soluciones", Volumen V: Perú.

CEPAL (1999). "Efectos Macroeconómicos del Fenómeno El Niño 1997-1998", LC/MEX/R.688

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

SENAMHI-DHI (2016) "Modelamiento hidrológico del río Zarumilla"