

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**



**“SIMULACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO MALA  
USANDO MODELOS HIDROLÓGICOS AGREGADOS Y  
SEMIDISTRIBUIDOS”**

Presentado por:

**DAVID YARANGA LÁZARO**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE  
**INGENIERO AGRICOLA**

**Lima – Perú**

**2017**

“No puedes conectar los puntos viendo hacia adelante, solo puedes conectarlos viendo hacia atrás. Así que tienes que confiar que de alguna manera se conectaran en un futuro. Debes confiar en algo, tu instinto, destino, vida, karma, lo que sea.”

**Steve Jobs**

“Según vamos adquiriendo conocimiento, las cosas no se hacen más comprensibles, sino más misteriosas”

**Albert Schweitzer**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por todo, y darme la oportunidad de poder seguir con mis objetivos.

A mis padres Fidencio y Estela, por su amor incondicional, ejemplo de esfuerzo y perseverancia por seguir siempre adelante.

A mis hermanos Hugo, Olivia y Elvis, por su apoyo incondicional y consejos.

A mis sobrinas Natalia y Gia Luciana, por darme muchas alegrías.

A mi abuelita Justina y tío Broder, que desde el cielo guían mis pasos y protegen.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Agraria la Molina, a los profesores y amigos que conocí en la Facultad de Ingeniería Agrícola, gracias por sus enseñanzas y sugerencias.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), que me brindo en un principio la oportunidad de poder realizar prácticas pre-profesionales; asimismo a todo el equipo humano que trabaja en el área de hidrología, en especial a los ingenieros Oscar Felipe y Juan Arboleda, por compartir sus conocimientos en hidrología e hidráulica.

Particularmente agradezco a mi asesora la Dra. Lía Ramos, por el apoyo, tiempo y motivación para poder terminar la tesis.

## **RESUMEN**

El uso de los modelos hidrológicos representa una necesidad y herramienta para conocer los diferentes procesos que ocurren en el ciclo hidrológico, además nos permite poder estimar la disponibilidad hídrica en lugares donde no se cuenta con estaciones hidrológicas, por ello es útil para la gestión y planeamiento del uso del agua.

En el presente estudio, se aplicó modelos hidrológicos agregados y semidistribuidos, bajo la plataforma RS-Minerve para la cuenca del río Mala a escala de tiempo diario.

En la cuenca en mención, se identificaron 15 subcuencas aguas arriba de la estación hidrológica La Capilla y cada subcuenca fue dividido en bandas altitudinales. Los procesos que se consideran en los modelos hidrológicos empleados para el estudio son, intercepción, infiltración, evapotranspiración, percolación, flujo superficial, flujo base y subterráneo. Previo a la modelización, se realizó el análisis exploratorio y análisis estadístico de la información hidrometeorológica.

La calibración de los modelos se llevó a cabo empleando descargas medias diarias registradas en la estación La Capilla durante el periodo del 01 de diciembre 2002 al 31 de diciembre 2010, para los modelos Sacramento, Socont, HBV y GR4J; para la validación de los modelos, se empleó el periodo del 01 de enero 2011 al 31 de marzo 2015, utilizando los parámetros obtenidos en la calibración. Para la evaluación del comportamiento y ajuste de los modelos fueron empleados los indicadores de coeficiente Nash, Nash Ln, coeficiente de Pearson, Error medio cuadrático (RRMSE), la razón RSR que relaciona la raíz cuadrada del error medio y la desviación estándar de las observaciones, y el error volumétrico (Ev). De los 4 modelos empleados en el estudio, el modelo hidrológico Sacramento presento mejor desempeño en los indicadores. Asimismo, se realizó el análisis de sensibilidad de los parámetros de cada modelo empleado en el estudio, conforme a los indicadores de Nash y coeficiente de Pearson. Finalmente se hizo las simulaciones de caudales en las 15 subcuencas utilizando el modelo hidrológico Sacramento.

Palabras claves: Plataforma RS-Minerve, Modelos hidrológicos, Mala, análisis de sensibilidad, calibración, validación y simulación.

## **ABSTRACT**

The use of hydrological models is a necessity and a tool when trying to understand the different processes that occur in the hydrological cycle. Furthermore, it provides us with the ability to calculate the water availability in places lacking hydrological stations. That is precisely the reason why it is useful for the planning and management of water usage.

In the current study, aggregate and semi-distributed hydrological models under the RS-Minerve platform were applied in the case of the Mala river basin, which was measured on a daily-scale basis.

In the basin that we are making reference to, 15 sub-basins were identified upstream the hydrological station at La Capilla and each sub-basin was divided in altitudinal ranges. The processes taken into account for the hydrological models applied in the study are: interception, infiltration, evapotranspiration, percolation, surface flow, groundwater and base flow. Prior to the modeling, an exploratory and a statistical analysis of the hydro-meteorological information was performed.

The calibration of the models was carried out using daily average discharges registered in the station La Capilla between December 01, 2002 to December 31, 2010; for the following models: Sacramento, Socont, HBV and GR4J. The time between January 01, 2011 and March 31, 2015 was used for the validation of the models using the parameters obtained in the calibration. In order to test the models' performance and adjustability, the following were used: Nash quotient indicators, Nash Ln, Pearson quotient, relative root mean squared error (RRMSE), the RSR reason, which relates the square root of the mean squared error and the standard deviation of the observations, and the volumetric error (Ev). Judging by the results shown on the indicators, the Sacramento hydrological model proved to have the best performance when matched against the four models used in the study. Likewise, the parameters sensibility analysis of each model used in the study was performed according to the Nash indicators and the Pearson quotient. Lastly, river flow simulations in 15 sub-basins were done using the Sacramento hydrological model.

Keywords: RS-Minerve platform, hydrological models, Mala, sensibility, calibration, validation and simulation.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	vii
INDICE GENERAL .....	1
INDICE DE CUADROS.....	3
INDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE ANEXO.....	8
I.    INTRODUCCIÓN .....	10
1.1.    OBJETIVO PRINCIPAL.....	10
1.2.    OBJETIVOS SECUNDARIOS .....	10
II.   REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
2.1.    Modelo hidrológico.....	11
2.1.1.    Calibración .....	12
2.1.2.    Exactitud y precisión .....	12
2.1.3.    Validación del modelo .....	14
2.2.    Modelo hidrológico SAC-SMA.....	14
2.3.    Modelo hidrológico SOCONT.....	16
2.4.    Modelo hidrológico HBV .....	20
2.5.    Modelo hidrológico GR4J .....	24
III.  MATERIALES Y METODOS .....	28
3.1.    Zona de estudio.....	28
3.1.1.    Accesibilidad - vías de comunicación.....	28
3.1.2.    Población – demografía.....	30
3.1.3.    Aspecto socioeconómico.....	30
3.1.4.    Condiciones climáticas.....	32
3.1.5.    Formaciones ecológicas en la cuenca.....	33

3.1.6.	Recursos hídricos superficiales .....	34
3.2.	Esquema hidráulico de funcionamiento en la cuenca del río Mala .....	36
3.2.1.	Uso y demanda de agua en la cuenca.....	39
3.3.	Información hidro-meteorológica .....	43
3.4.	Herramientas computacionales .....	44
3.5.	Metodología .....	44
3.5.1.	Caracterización la zona de estudio en cuanto a la hidrología, climatología y geomorfología.....	46
3.3.2.	Calibración y validación los modelos hidrológicos.....	51
3.3.3.	Simulación de caudal en las subcuencas del rio Mala.....	53
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	54
4.1.	Caracterización la zona de estudio en cuanto a la hidrología y geomorfología.....	54
4.2.	Calibración y validación de los modelos hidrológicos .....	67
4.2.1.	Análisis de sensibilidad de parámetros .....	74
4.3.	Simulación hidrológica en las subcuencas del rio Mala .....	76
V.	CONCLUSIONES .....	82
VI.	RECOMENDACIONES .....	83
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	84
VIII.	ANEXO.....	87

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Parámetros que caracterizan el modelo Hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA). .....	16
Cuadro 2: Parámetros que caracterizan el modelo Hidrológico Socont. ....	17
Cuadro 3: Rangos y parámetros para el modelo HBV. ....	21
Cuadro 4: Rangos y parámetros para el modelo GR4J.....	24
Cuadro 5: Tamaño y cantidad de lagunas.....	35
Cuadro 6: Declaración de áreas de las campañas agrícolas del valle de Mala. ....	39
Cuadro 7: Demanda hídrica total por bloque con área total de riego (MMC).....	39
Cuadro 8: Demanda del agua poblacional actual y requerida del valle de Mala.....	40
Cuadro 9: Superficie agrícola de la zona media y alta de la cuenca del río Mala. ....	42
Cuadro 10: Demanda de agua poblacional actual y demanda requerida de las zonas media y alta de la cuenca Mala. ....	42
Cuadro 11: Estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río Mala ubicadas en el Departamento de Lima. ....	44
Cuadro 12: Software utilizados para la elaboración de modelos hidrológicos en la cuenca del río Mala.....	44
Cuadro 13: Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Mala. ....	56
Cuadro 14: Análisis estadístico de precipitación a nivel diario.....	59
Cuadro 15: Grupos de estaciones para el análisis de curva de doble masa. ....	62
Cuadro 16: Resultados de la prueba de homogeneidad en la precipitación diaria. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015. ....	63
Cuadro 17: Resumen estadístico de las temperaturas medias diarias de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015. ....	64
Cuadro 18: Resultados de los indicadores de desempeño de los modelos hidrológicos utilizados en la cuenca del río Mala. ....	69
Cuadro 19: Niveles de rendimiento de un modelo hidrológico en función del índice E, RSR y Error en volumen (Ev). ....	69
Cuadro 20: Parámetros obtenidos de la calibración de los modelos hidrológicos. ....	71

Cuadro 21: Caudales medios mensuales multianuales (m <sup>3</sup> /s). Periodo Diciembre 2002 a Marzo 2015.....	72
Cuadro 22: Diferencia porcentual (%) entre caudales observados y caudales dados por los modelos hidrológicos de estudio. ....	73
Cuadro 23: Promedio de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) a nivel estacional para el modelo hidrológico Sacramento.....	78
Cuadro 24: Caudales mensualizados con una probabilidad del 75% en las subcuencas de la cuenca del río Mala para el modelo hidrológico Sacramento. ....	80
Cuadro 25: Volumen promedio mensual de la oferta y demanda hídrica (MMC) - Periodo diciembre 2002 a marzo 2015. ....	81

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Exactitud y precisión en mediciones. Izquierda: grupo de medidas consideradas exactas. Derecha: grupo de medidas consideradas precisas. ....	13
Figura 2: Estructura del modelo hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA). ....	15
Figura 3: Estructura del Modelo Hidrológico SOCONT. ....	17
Figura 4: Estructura del modelo Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV). ....	20
Figura 5: Estructura del modelo GR4J. ....	24
Figura 6: Variación espacial de la altitud y ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio. ....	29
Figura 7: Población a nivel distrital ubicado de la cuenca del río Mala en porcentaje (%). ....	30
Figura 8: Niveles socio-económicos, (a) Nivel de alfabetismo, (b) Nivel educacional y (c) Nivel socioeconómico y confort. ....	31
Figura 9: Formaciones ecológicas identificadas en el cuenca del río Mala. ....	34
Figura 10: Red de recursos hídricos de la cuenca del río Mala. ....	36
Figura 11: Esquema hidráulico de funcionamiento de la cuenca del río Mala. ....	38
Figura 12: Población pecuaria en las provincias de la cuenca del río Mala. ....	41
Figura 13: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio. ....	45
Figura 14: Gradiente de precipitación media anual de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. ....	47
Figura 15: Variación altitudinal de la cuenca del río Mala (izquierda), subdivisión de la cuenca y subcuencas a partir del punto de control hidrométrico La Capilla (centro) y bandas altitudinales cada 400 m (derecha). ....	48
Figura 16: Periodo y/o longitud de estaciones hidrometeorológicas disponibles. ....	49
Figura 17: Esquema hidráulico del modelo hidrológico de la cuenca del río Mala elaborado en la plataforma RS Minerve, teniendo como punto de calibración la estación hidrológica La Capilla. ....	52
Figura 18: Polígono de frecuencia (a), curva hipsométrica (b) y rectángulo equivalente (c) de la cuenca del río Mala. ....	55

Figura 19: Serie de precipitación total diaria de las estaciones con periodo de 01/12/2002 - 31/03/2015.....	57
Figura 20: Diagrama de cajas (Box Plot) de las precipitaciones acumuladas mensuales. Periodo: Diciembre 2002 a Marzo del 2015.....	58
Figura 21: Distribución de frecuencia relativa porcentual (%) diaria de precipitación. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015 .....	60
Figura 22: Matriz de correlación múltiple de precipitación acumulada mensual de las estaciones meteorológicas de estudio.....	61
Figura 23: Análisis de doble masa del grupo 1 (margen izquierda) y grupo 2 (margen derecha). .....	62
Figura 24: Serie temporal de las temperaturas promedio diario. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.....	64
Figura 25: Histograma de frecuencia absoluta diaria de la temperatura. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.....	65
Figura 26: Variación temporal de la evapotranspiración potencial diaria arial, en la cuenca del rio Mala. Periodo: 01/12/2002 al 31/12/2015.....	66
Figura 27: Contraste de la serie de caudales medios diario y precipitación areal, en la cuenca del rio Mala.....	66
Figura 28: (a) Histograma de frecuencia absoluta de caudales medios diarios y (b) diagrama de cajas de los caudales medios mensuales. ....	67
Figura 29: Hidrograma diario de caudales observados y simulados para los modelos hidrológicos Sacramento, Hbv, Socont y Gr4j. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015. .	68
Figura 30: Correlación lineal entre los caudales observados y simulados por los modelos hidrológicos, en la estación La Capilla.....	70
Figura 31: Dpi mensual obtenidos por los caudales de los modelos hidrológicos de estudio. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015. ....	73
Figura 32: Curva de duración mensual (a) y curva de variación estacional con probabilidad de ocurrencia del 75% (b), 80% (c) y 90%(c). ....	74
Figura 33: Análisis de sensibilidad de los modelos hidrológicos para los indicadores de eficiencia Nash y correlación de Pearson.....	75
Figura 34: Hidrograma mensual de la subcuenca 1 a la subcuenca 8 para el periodo de diciembre 2002 a marzo del 2015.....	76
Figura 35: Hidrograma mensual de la subcuenca 13 a la subcuenca 15 para el periodo de diciembre 2002 a marzo del 2015.....	77

Figura 36: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 1 (Rio Alto Mala). .....	79
Figura 37: Serie de balance hídrico mensual del periodo diciembre 2002 a marzo 2015, y estacional mayo a noviembre en la cuenca del rio Mala. ....	81

## INDICE DE ANEXO

Anexo 1: Bandas altitudinales cada 400 metros en el area de estudio, generadas a partir de la plataforma HydroPrepR.....	87
Anexo 2: Plataforma del RS-Minerve .....	88
Anexo 3: Calibración automática desde la plataforma RS-Minerve. ....	88
Anexo 4: Parte baja de la cuenca del rio Mala .....	89
Anexo 5: Estación hidrológica convencional La Capilla. ....	89
Anexo 6: Estación hidrológica automática La Capilla. ....	89
Anexo 7: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 2 (Rio Aguaquiri). .....	90
Anexo 8: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 3 (Rio Medio Alto Mala).....	91
Anexo 9: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 4 (Rio Acacache). .....	92
Anexo 10: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 5 (Rio Medio Mala). .....	93
Anexo 11: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 6 (Rio Tantara). 94	
Anexo 12: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 7 (Rio medio bajo Mala).....	95
Anexo 13: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 8 (RioQuinches). .....	96
Anexo 14: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 9 (Rio Quinches). .....	97
Anexo 15: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 10 (Rio Quinches). .....	98
Anexo 16: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 11 (Rio bajo Mala). .....	99
Anexo 17: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 12 (Rio bajo Mala). .....	100

Anexo 18: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 13 (Rio bajo Mala).	
.....	101
Anexo 19: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 14 (Rio bajo Mala).	
.....	102
Anexo 20: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 15 (Rio bajo Mala).	
.....	103

## **I. INTRODUCCIÓN**

El ciclo hidrológico es uno de los fenómenos naturales que siempre han cautivado y sorprendido al hombre, tanto por su exuberancia, complejidad y belleza como por su magnitud, frecuencia y peligrosidad. Pero es necesario el conocimiento de sus variables de estado en diversas áreas de la actividad humana, entre ellas la planificación para la toma de decisiones, siendo la precipitación y temperatura, variables importantes del ciclo hidrológico. Un modelo hidrológico busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca a fin de entender el sistema hidrológico y proveer información confiable para el manejo sostenible de los recursos hídricos (Sossa, 2009). Para estimar la cantidad de agua en las cuencas que no cuentan con estaciones hidrométricas de medición de caudales, los modelos hidrológicos son herramientas convenientes para la simulación, por su posible operación a bajo costo y a la confiabilidad de los resultados que arrojan (Argota, 2011).

### **1.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

- Comparar la simulación del caudal del río Mala mediante los modelos Sacramento, Socont, Hbv y Gr4j.

### **1.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS**

- Caracterizar la zona de estudio en cuanto a la hidrología, climatología y geomorfología.
- Calibrar y validar los modelos hidrológicos con un análisis previo de sensibilidad de los parámetros.
- Simular el caudal en las subcuencas de la cuenca del río Mala mediante los modelos Sacramento, Socont, Hbv y Gr4j.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos presentan como finalidad simular aquellos fenómenos naturales que ocurren en la realidad. En razón a que el ciclo hidrológico es muy complejo, no existe un modelo que simule a la perfección la hidrología, debido a la presencia de errores e incertidumbres que se van presentando al momento de hacer un modelo hidrológico, pero existen herramientas como la calibración que ayudan a minimizar estos errores.

Según Salgado y Güitrón (2012), la modelación hidrológica se clasifica en estocástica y determinística. Un modelo es estocástico cuando al menos una variable del mismo es tomada como un dato al azar y las relaciones entre variables se toman por medio de funciones probabilísticas; sin embargo, un modelamiento determinístico no considera términos aleatorios debido a su naturaleza matemática; es decir, cada simulación con las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas. Dentro de la modelación determinística se tienen tres tipos de modelos: empíricos (también llamados de caja negra), agregados y distribuidos.

Los modelos de caja negra o caja gris se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicados.

Los modelos hidrológicos agregados, son modelos conceptuales, que tratan de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia-escorrentía, también se conocen como modelos que consideran la humedad del suelo. Constan, en general de una parte de balance de agua, que calcula en el tiempo el balance entre lluvia, evaporación, escorrentía y almacenamiento; y una segunda parte de tránsito de los diferentes tipos de escorrentía. Por tanto, pueden modelar en continuo la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación.

Los modelos hidrológicos distribuidos, también llamados de base física, son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca, así como la variabilidad

espacial de los principales factores que intervienen. Se basan exclusivamente en parámetros físicos, por tanto medibles, con lo cual son directamente aplicables a cuencas no aforadas.

La aplicación de uno u otro modelo va a depender de los objetivos de la simulación, no necesariamente los modelos hidrológicos distribuidos son la mejor opción, sobre todo cuando se trata de proyectos de gran visión. Sin embargo, cuando se trata de representar la física de fenómenos hidrológicos en la cuenca, y ante la evidencia de la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura, la cobertura vegetal, entre otros parámetros; es una ventaja el empleo de los modelos hidrológicos distribuidos respecto a los modelos agregados. Sin pasar por alto que los primeros llegan a un notable incremento de complejidad en su aplicación, asociada principalmente, a la cantidad de información requerida para su modelación que se basa en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG.), en los cuales se procesa gran parte de los datos para representar la fisiografía de la cuenca, aunque esta complejidad es atenuada por el uso de equipo de cómputo que cada vez tiene mayor velocidad y capacidad de almacenamiento. (Salgado y Güitron, 2012).

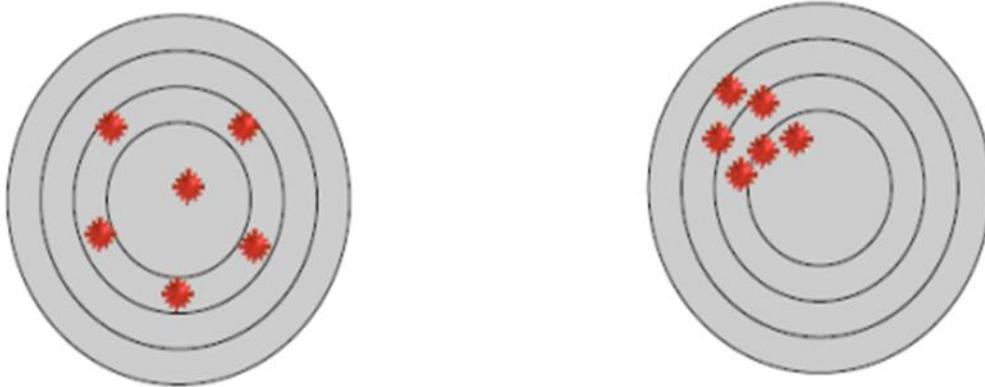
### **2.1.1. Calibración**

Por calibración se entiende la mejora selectiva de las estimaciones de los parámetros iniciales por medio de la comparación de los valores simulados con los medidos (Beven&O'Connell, 1982). Una consecuencia lógica de la naturaleza física del modelo es que puede calibrar un amplio número de parámetros. Cuando un parámetro ejerce una influencia cuantitativa en los resultados del modelo, no significa que automáticamente los cambios del parámetro resulten en una mejora o deterioro de la correlación entre dichos resultados y los valores observados. Esto podría deberse a un retardo, pues los efectos debidos a cambios en los parámetros podrían reflejarse en el siguiente intervalo de tiempo de modelización, lo que podría causar tanto una mejora como un deterioro de los resultados del modelo. En segundo lugar, cuando se incorpora un parámetro como una función más o menos lineal del modelo, los efectos en la correlación serán limitados. Finalmente, un parámetro podría ejercer una gran influencia durante periodos secos, cuando el efecto sobre la descarga será limitado, ya que la descarga total será también limitada (Bertens, Pascual & Van Beek, 2000).

### **2.1.2. Exactitud y precisión**

Dos conceptos importantes a tener en cuenta antes de utilizar modelos hidrológicos son “exactitud” y “precisión”. La exactitud mide la performance de un modelo; es decir, la cercanía entre los valores simulados y los observados. Un modelo exacto no arroja los

mismos resultados, pero estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor de la medida observada. La Figura 1 ilustra este concepto.



*Figura 1: Exactitud y precisión en mediciones. Izquierda: grupo de medidas consideradas exactas. Derecha: grupo de medidas consideradas precisas.*

*Fuente: Molnar (2011)*

La precisión mide la repetibilidad del experimento; es decir, la similitud entre valores simulados. Un modelo preciso arroja similares resultados, pero estos no son necesariamente cercanos a la medida observada. La Figura 1 (Derecha) ilustra este concepto.

Estos dos conceptos están relacionados con otros dos: errores aleatorios y errores sistemáticos. Los errores aleatorios son errores propios de fluctuaciones aleatorias de la magnitud medida o del proceso de medición y no son controlables. Debido a que son aleatorios, la medición realizada se encontrará alrededor de la medida real, muy característica de las medidas exactas. Por otro lado, los errores sistemáticos son errores que se repiten permanentemente y aproximadamente en la misma magnitud; esta característica hace que todas las mediciones se encuentren “desviadas” en un mismo valor de la medida real (como las medidas precisa). De esta manera, si se determina el valor sistemático, es fácil corregir la medida y obtener medidas mucho más exacta.

La función de error, también denominada función de criterio o función objetivo. Es una medida de la distancia entre las observaciones y las simulaciones. Las más simples consisten en diferencia absoluta entre los caudales observados y simulados para un intervalo específico de tiempo, mientras que los más complicados tienen en cuenta todo hidrograma. Entre los parámetros estadísticos más importantes a cuantificar y que usaran para el estudio, son el Nash-Sutcliffe (Nash), Nash – Ln, coeficiente de Pearson ( $r$ ), error medio cuadrático (RRMSE), RSR y error en volumen (Ev).

### **2.1.3. Validación del modelo**

Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para periodos fuera del periodo de calibración”. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el periodo de validación muestran errores o límites aceptables. Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada (así como es imposible realizar una calibración generalizada).

Usualmente, la validez de un modelo para un periodo diferente al de calibración se asume como verdadera considerando condiciones futuras similares a las actuales. Estas asunciones son válidas para casos simples como la completación de datos pues el periodo desconocido se encuentra “dentro” del periodo calibrado y las características pueden asumirse iguales, pero este no es el caso general.

Transponer un modelo a condiciones que podrían ser diferentes en el tiempo genera una gran incertidumbre. Para superar esta incertidumbre, Klemes (1986) propone un modelo jerárquico que supone tareas ordenadas de acuerdo a su complejidad y las demandas de las pruebas se incrementan en la misma dirección (Klemes, 1986). Las categorías principales para diferenciar la prueba de validación son: condiciones estacionarias (similares al periodo de calibración), y condiciones no estacionarias (diferentes a las del periodo de calibración). Cada una de estas categorías se subdivide en dos subgrupos de acuerdo al lugar donde se realizará la simulación: si se realizará en la misma cuenca que fue usada para la calibración, o si se realizará en una cuenca diferente.

## **2.2. Modelo hidrológico SAC-SMA**

Dentro de la plataforma RS MINERVE, se encuentra el modelo lluvia escorrentía Sacramento Soil Moisture Accounting SAC-SMA, este modelo fue creado por Burnash y Ferral en la década de los setentas, está constituido como un modelo determinístico conceptual del tipo agregado el cual fue desarrollado por el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio Meteorológico Nacional en Sacramento, California.

El modelo Sacramento está estructurado en tres tanques el primer tanque (color verde) está dividida por sectores permeables e impermeables aquí se origina la escorrentía superficial, que se da cuando la lluvia supera la tasa de infiltración. El segundo tanque (color rosado) representa la capa superior del suelo (denominada zona alta o upper zone) en ella se origina

la escorrentía subsuperficial esto puede entenderse como la transferencia agua lateral, al caudal base y solo se da cuando se satura la zona superior. El tercer tanque (color amarillo) representa la zona inferior del suelo (lower zone) y está vinculado a los procesos de descarga con respuesta lenta. Los procesos de evapotranspiración afectan a los tres tanques. La salida de los tres tanques origina el caudal simulado por el modelo. Ver Figura 2.

SAC-SMA requiere información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar descargas del mismo paso de tiempo. El modelo si bien es cierto tiene una gran capacidad para simular las descargas medias diarias requiere de dieciséis parámetros para su calibración además de requerir un conocimiento profundo de la cuenca a simular, como son la cobertura vegetal, áreas permeables e impermeables. Ver Cuadro 1.

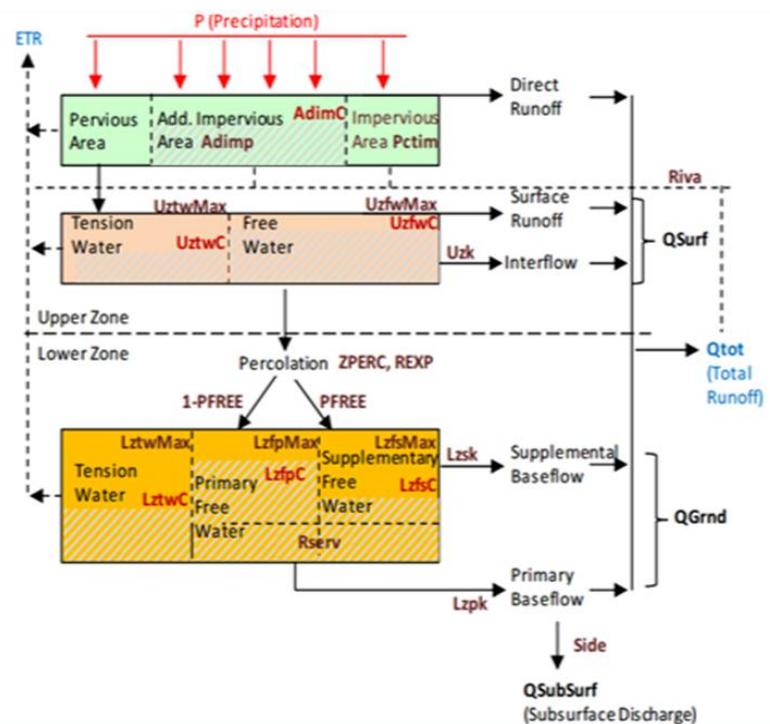


Figura 2: Estructura del modelo hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA).

Fuente: Foehn et al (2014)

*Cuadro 1: Parámetros que caracterizan el modelo Hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA).*

Parámetro	Unidad	Descripción	Rango
A	m <sup>2</sup>	Área de la cuenca	> 0
Adimp	-	Fracción máxima de área impermeable	0 a 0.2
Pctim	-	Fracción permanente de área impermeable	0 a 0.05
Riva	-	Fracción de cobertura vegetal	0 a 0.2
UztlwMax	m	Capacidad máxima del agua confinada para la zona superior.	0.01 a 0.15
UzflwMax	m	Capacidad máxima para el agua libre en la zona superior	0.005 a 0.1
Uzsk	1/d	Tasa de intercambio agua de la zona de superior	0.1 a 0.75
Zperc	-	Relación entre las tasas máximas y mínimas de percolación	10 a 350
Rexp	-	Parámetro de la curva de percolación	1 a 4
Pfree	-	Fracción de la percolación que va directamente de la zona libre a la zona baja.	0 a 0.6
LztlwMax	m	Capacidad máxima del agua confinada para la zona inferior.	0.05 a 0.04
LzflpMax	m	Capacidad máxima para el agua libre en la zona inferior	0.03 a 0.80
LzfsMax	m	Capacidad máxima de la zona inferior suplementaria.	0.01 a 0.4
Rserv	-	Fracción del agua almacenada en la zona más baja no transferible	0 a 1
Lzpk	1/d	Tasa de agotamiento del almacén de agua libre de la zona baja principal	0.001 a 0.03
Lzsk	1/d	Tasa de agotamiento del almacén de agua libre de la zona baja suplementaria	0.02 a 0.3
Side	-	Fracción de la percolación profunda que se pierde en la zona libre inferior.	0 a 0.5

*Fuente: Foehn et al (2014).*

### **2.3. Modelo hidrológico SOCONT**

El modelo SOCONT (Soil Contribution) el cual corresponde a la Snow-GSM, simula la evolución transitoria del snow pack (derretimiento acumulado) como una función de temperatura (T) y la precipitación (Peq). Además contiene al modelo GR3 el cual usa la precipitación producida por el snow pack y la evapotranspiración para entregar una parte de la escorrentía y la intensidad neta al sub-modelo SWMM (Storm Water Management Model). Ver Figura 3, que muestra la estructura del modelo hidrológico

El modelo fue desarrollado por Consuegra y Vez en 1996, este presenta una estructura similar a los modelos GR (Edijatno and Michel, 1989, citado en *RS MINERVE-Technical Manual*).

La descripción que se tiene del modelo Socont hace referencia a tres reservorios, un reservorio para la contribución del suelo, un reservorio que representa el agua subterránea y un reservorio para la escorrentía directa, tal como se muestra en la Figura 3. Asimismo, el

Cuadro 2 muestra los parámetros concernientes al modelo hidrológico Socont, la cual consta de once parámetros.

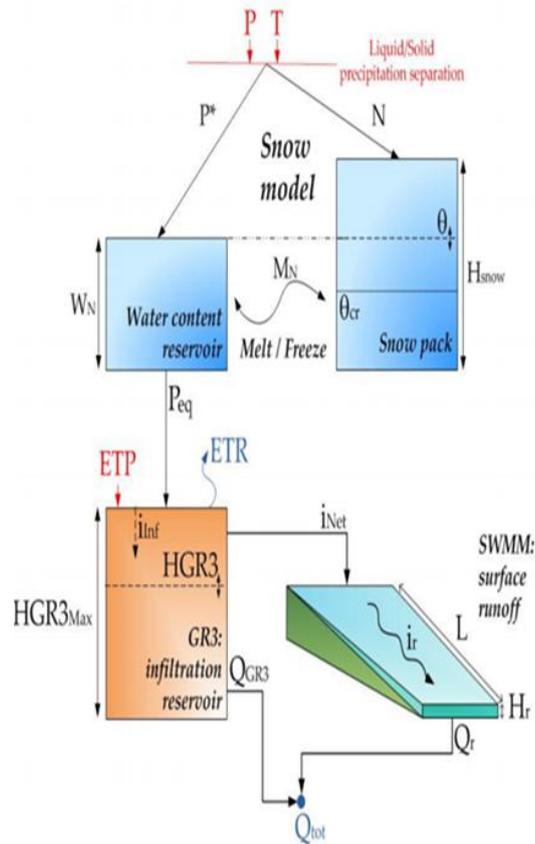


Figura 3: Estructura del Modelo Hidrológico SOCONT.

Fuente: Foehn et al (2014)

Cuadro 2: Parámetros que caracterizan el modelo Hidrológico Socont.

Parametro	Unidad	Descripción	RANGO
A	m <sup>2</sup>	Área de infiltración	>0
An	mm/°C/dya	Coefficiente de deshielo.	0.5 a 20
ThetaCri	-	Contenido critico de agua en la snow pack .	0.1
bp	s/m	Coefficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida.	0.0125
Tcp1	°C	Temperatura mínima para la precipitación líquida	0
Tcp2	°C	Temperatura mínima para la precipitación sólida	6
Tcf	°C	Temperatura crítica para el derretimiento de la precipitación sólida.	0
HGR3Max	m	Altura máxima del reservorio de infiltración.	0 a 2
KGR3	1/s	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración.	0.00025 a 0.1
L	m	Ancho del plano.	>0
J0	-	Pendiente de la escorrentía.	>0
Kr	m <sup>1/3</sup> /s	Coefficiente de Strickler.	0.1 a 90

Fuente: Foehn et al (2014)

Como primer paso la precipitación es dividida en una precipitación solida (N) y una precipitación líquida (P\*) como una función de la temperatura.

$$P^* = \alpha \cdot P,$$

$$N = (1 - \alpha) \cdot P$$

$$\alpha = 0 \quad \text{si } T < T_{cp1}$$

$$\alpha = (T - T_{cp1})(T_{cp2} - T_{cp1}) \quad \text{si } T_{cp1} < T < T_{cp2}$$

$$\alpha = 1 \quad \text{si } T > T_{cp2}$$

Dónde: P\*: Precipitación líquida (mm/día),  $\alpha$ : Factor de separación, N: Precipitación solida (mm/día), P: Precipitación (mm/día), T: Temperatura (°C),  $T_{cp1}$ : Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida (°C),  $T_{cp2}$ : Temperatura máxima crítica para la precipitación sólida (°C) y  $T_{cf}$ : Temperatura crítica para el derretimiento de la precipitación sólida (°C).

Si la temperatura observada es más baja que  $T_{cp1}$  solo se produce precipitación sólida. Si la temperatura es más alta que la  $T_{cp2}$  solo se produce precipitación líquida. Si la temperatura observada está entre estos dos valores críticos el modelo trabaja con ambas precipitaciones (líquida y sólida). La precipitación sólida (N) es la variable de entrada para el reservorio *snow pack*, el volumen de este reservorio es una función del derretimiento o la congelación de la lluvia en él. El cálculo del deshielo es realizado por las siguientes ecuaciones:

$$M_N = A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cf}) \quad \text{si } : T > T_{cf}$$

$$M_N = A_n \cdot (T - T_{cf}) \quad \text{si } : T \leq T_{cf}$$

$$\frac{dH}{dt} = N - M_N$$

$$M_N \leq N + H/dt$$

$$M_N \geq -W_N/dt$$

Dónde:  $M_N$ : Deshielo o congelación (mm/día),  $A_n$ : Coeficiente de derretimiento,  $b_p$ : Coeficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida. (mm/día),  $T_{cf}$ : Temperatura crítica para el derretimiento de la precipitación sólida (°C), H: Altura de nieve (m),  $W_N$ : Contenido de agua (m),  $T_{cp1}$ : Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida

(°C),  $T_{cp2}$ : Temperatura máxima crítica para la precipitación sólida (°C) y  $dt$ : Paso de tiempo (s).

La precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) es producida por el contenido de agua de la nieve.

$$\theta = W_N/dt$$

$$P_{eq} = P^* + W_N/dt \quad \text{si : } H = 0$$

$$P_{eq} = 0 \quad \text{si : } H > 0 \text{ y } \theta \leq \theta_{cr}$$

$$P_{eq} = (\theta - \theta_{cr}) \cdot H/dt \quad \text{si : } H > 0 \text{ y } \theta > \theta_{cr}$$

$$dW_N/dt = P^* + M_N + P_{eq}$$

Dónde:  $\theta$ : Contenido relativo de agua en la snow pack,  $\theta_{cr}$ : Contenido crítico relativo de agua en la snow pack y  $P_{eq}$ : Coeficiente de derretimiento.

Luego, la *infiltración reservorio* es calculado como sigue:

$$i_{nf} = P_{eq} \cdot (1 - (H/H_{Máx})^2) \quad \text{si : } H \leq H_{max}$$

$$i_{nf} = 0 \quad \text{si : } H > H_{max}$$

(3.12)

$$ETR = ETP \cdot \sqrt{H/H_{Máx}} \quad \text{si : } H \leq H_{max}$$

$$ETR = ETP \quad \text{si : } H > H_{max}$$

$$i_{Net} = P_{eq} - i_{nf}$$

$$Q = K \cdot H \cdot A \quad \text{si : } H \leq H_{max}$$

$$Q = K \cdot H_{max} \cdot A \quad \text{si : } H > H_{max}$$

$$dH/dt = i_{Net} - ETR - Q/A$$

La transferencia de una intensidad neta a un superficie impermeable es llevada a cabo por la ayuda de una no-linear reservorio denominado *Transfer reservoir*.

$$dH/dt = 2 \cdot (i_{Net} - i_r)$$

$$H_r \geq 0$$

$$i_r = K \cdot \sqrt{J_0} \cdot H^{5/3} \cdot L$$

$$Q = i_r \cdot A$$

Dónde:  $H$ : Altura de la escorrentía aguas debajo de la superficie,  $i_{Net}$ : Intensidad neta,  $i_r$ : Intensidad de la escorrentía,  $K$ : Coeficiente de Strickler,  $J_0$ : Altura promedio del plano,  $L$ : Longitud del plano y  $A$ : Superficie de la escorrentía.

Finalmente la descarga total del modelo es compuesta por la descarga base ( $Q_{GR3}$ ) y la descarga  $Q_r$ .

$$Q_{tot} = (Q_{GR3}) + Q_r$$

Dónde:  $Q_{tot}$ : Descarga total del modelo SOCONT,  $Q_{GR3}$ : Descarga parcial proveniente del sub-modelo GR3 y  $Q_r$ : Descarga parcial proveniente del sub-modelo SWMM.

#### 2.4. Modelo hidrológico HBV

El modelo lluvia-escurrimiento HBV (Bergström, 1976, 1992) se compone de una función de nieve, un depósito de humedad y dos (superior e inferior) del suelo depósitos de almacenamiento. La estructura de la ejecución del modelo se presenta en la Figura 4. Asimismo, en el Cuadro 3 se muestra los parámetros del modelo HBV, las cuales presentan catorce parámetros que fueron calibrados.

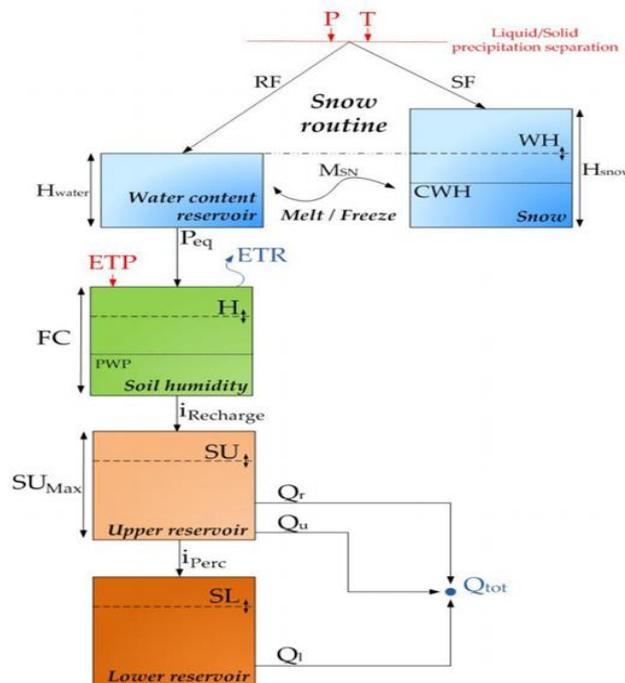


Figura 4: Estructura del modelo Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV).

Fuente: Foehn et al (2014)

Cuadro 3: Rangos y parámetros para el modelo HBV.

Parametro	Unidad	Descripción	RANGO
A	m <sup>2</sup>	Área de la cuenca	>0
CFMax	mm/°C/dya	Coefficiente de deshielo.	0.5 a 20
CFR	-	Factor de congelación	0.05
CWH	-	Contenido critico de agua en el snow pack.	0.1
TT	°C	Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	0 a 3
TTInt	°C	Intervalo de temperatura para lluvia nieve	0 a 3
TTSM	°C	Temperatura umbral para el derretimiento de nieve.	1 a 5
Beta	-	Parámetro del modelo denominado <i>coeficiente forma</i> .	50 a 650
FC	mm	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	50 a 650
PWP	mm	Punto de marchitez permanente del suelo	30 a 650
SUMAX	mm	Nivel umbral de agua del Reservorio superior (Upper reservoir)	0 a 100
Kr	1/d	Coefficiente de almacenamiento del flujo superficial	0.05 a 0.5
Ku	1/d	Coefficiente de almacenamiento del interflujo.	0.01 a 0.4
Kl	1/d	Coefficiente de almacenamiento del flujo base.	0 a 0.15
Kperc	1/d	Coefficiente de almacenamiento de percolación.	0 a 2

Fuente: Foehn et al (2014)

La precipitación es dividida, al igual que el modelo anterior en lluvia sólida (snowfall, SF) y lluvia líquida (rainfall, RF), como una función de la temperatura. Si la temperatura es más baja que  $TT - TTInt/2$ , solo se producirá lluvia sólida y al inverso cuando la temperatura es más alta que  $TT + TTInt/2$ , solo se producirá lluvia líquida. Si la temperatura se encuentra entre estos dos valores entonces se producirá lluvia en ambas fases (sólida y líquida).

$$RF = \alpha \cdot P$$

$$SF = (1 - \alpha) \cdot P$$

$$\alpha = 0$$

$$si T < TT - TTInt/2$$

$$\alpha = \frac{T - (TT - \frac{TTInt}{2})}{TTInt}$$

$$si T < TT - \frac{TTInt}{2} < T < TT + \frac{TTInt}{2}$$

$$\alpha = 1$$

$$si T > TT + TTInt/2$$

Donde: RF: Lluvia líquida,  $\alpha$ : Factor de separación, P: Precipitación, SF: Lluvia sólida, T: Temperatura, TT: Umbral de temperatura para lluvia/nieve y TTInt: Intervalo para lluvia/nieve mixta.

La lluvia sólida ingresa al reservorio llamado *snow pack*, su contenido es una función del derretimiento o congelación de esta. El derretimiento de nieve es determinado por las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$M_{sn} = CFMax.(T - TTSM) \quad \text{si } T > TTSM \quad (3.1)$$

$$M_{sn} = CFR.CFMax.(T - TTSM) \quad \text{si } T \leq TTSM$$

$$dH/dt = SF - M_{sn}$$

$$M_{sn} \leq SF + H_{snow}/dt \quad (3.2)$$

$$M_{sn} \geq -H_{water}/dt$$

Donde:  $M_{sn}$ : Derretimiento o congelamiento (mm/día),  $CFMax$ : Factor de derretimiento grado-día (mm/día/°c),  $CFR$ : Factor de recolección,  $TTSM$ : Temperatura critica de derretimiento,  $H_{snow}$ : Altura de nieve,  $H_{water}$ : Contenido de agua y  $dt$ : Paso de tiempo.

La precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) es producida por el contenido de nieve (ecuación 3.3, 3.4)

$$WH = H_{water}/H_{snow} \quad (3.3)$$

$$P_{eq} = RF + H_{water}/dt \quad \text{si } H_{snow} = 0$$

$$P_{eq} = 0 \quad \text{si } H_{snow} > 0 \text{ et } WH \leq CWH$$

$$P_{eq} = (WH - CWH).H_{snow}/dt \quad \text{si } H_{snow} > 0 \text{ et } WH > CWH$$

$$dH_{water}/dt = RF + M_{sn} - P_{eq} \quad (3.4)$$

Donde:  $WH$ : Contenido relativo de agua en el reservorio *Snow Pack*,  $CWH$ : Contenido crítico de agua en el snow pack,  $H_{snow}$ : Altura de nieve y  $P_{eq}$ : Precipitación equivalente.

La recarga está definida por el parámetro Beta de la ecuación 3.5. La ETR es determinado por la ecuación 3.6 y la humedad de la tierra ( $Hum$ ) es determinada como una variación entre la variable de entrada la precipitación equivalente ( $Peq$ ) y las salidas ( $i_{Recharge}$ ,  $ETR$ ).

$$i_{Recharge} = \left(\frac{Hum}{FC}\right)^{Beta} . Peq \quad (3.5)$$

$$ETR = ETR \cdot \frac{Hum}{PWP} \quad \text{si } Hum < PWP \quad (3.6)$$

$$ETR = ETP \quad \text{si } Hum \geq PWP$$

$$dHum/dt = (Peq - i_{Recharge}) - ETR$$

$$Hum \geq 0$$

Dónde:  $i_{Recharge}$ : Intensidad de recarga de los reservorios (mm/día),  $Hum$ : Humedad (mm),  $FC$ : Máxima capacidad de almacenamiento del suelo (mm),  $Beta$ : Contenido de agua,  $P_{eq}$ :

Precipitación equivalente (mm/día),  $ETR$ : Evapotranspiración (mm/día),  $ETP$ : Evapotranspiración Potencial (mm/día) y  $PWP$ : Evapotranspiración Potencial (mm/día).

La escorrentía superficial cercana ( $Q_r$ ) es calculada dependiendo del nivel de agua en el *Upper reservoir* ( $SU$ ), esta solo se produce si existe desborde, además la escorrentía producida ( $Q_r$ ) es castigada por el Coeficiente de almacenamiento del flujo superficial ( $K_r$ ), como muestra la ecuación 3.7.

$$Q_r = K_r(SU - SU_{Max}).A \quad \text{si } SU > SU_{Max}$$

$$Q_r = 0 \quad \text{si } SU \leq SU_{Max}$$
(3.7)

Dónde:  $Q_r$ : Escorrentía superficial cercana (m<sup>3</sup>/día),  $K_r$ : Coeficiente de almacenamiento del flujo superficial (1/día),  $SU$ : Nivel de agua del *Upper reservoir* para cada paso de tiempo,  $SU_{Max}$ : Nivel máximo de agua para *Upper reservoir* y  $A$ : Área de la cuenca.

El interfolio también es producido en el *Upper reservoir*, las siguientes ecuaciones definen esto:

$$dSU/dt = i_{Recarga} - (K_{perc} + K_u).SU - Q_r/A$$

$$SU \geq 0$$

$$i_{perc} = K_{perc}.SU$$

$$Q_u = K_u.SU.A$$

Dónde:  $Q_u$ : Interflujo (m<sup>3</sup>/día),  $K_u$ : Coeficiente de almacenamiento del interflujo (1/día),  $K_{perc}$ : Coeficiente de almacenamiento de percolación (1/día),  $i_{perc}$ : Intensidad de percolación y  $A$ : Área de la cuenca.

Luego el *Lower reservoir* produce el flujo base ( $Q_l$ ), este es calculado como muestran las ecuaciones 3.8 y 3.9

$$dSL/dt = i_{perc} - K_l.SL$$
(3.8)

$$SL \geq 0$$
(3.9)

$$Q_l = K_l.SL.A$$

Finalmente la descarga total es la suma de estas tres salidas:

$$Q_{tot} = Q_r + Q_u + Q_l$$

Dónde:  $Q_{tot}$ : Descarga total del modelo HBV,  $Q_r$ : Escorrentía superficial cercana (m<sup>3</sup>/día),  
 $Q_u$ : Interflujo (m<sup>3</sup>/día) y  $Q_l$ : Flujo base.

## 2.5. Modelo hidrológico GR4J

El modelo GR4J es un modelo hidrológico mundial con cuatro parámetros (Ver Cuadro 4) desarrollados por Perrin et al. (2003). Se trata de un modelo empírico, pero su estructura es similar a los modelos conceptuales. Se toma en cuenta la humedad y contiene dos embalses (producción y enrutamiento). Unidad hidrogramas también están asociadas para el comportamiento hidrológico de la cuenca (Ver Figura 5).

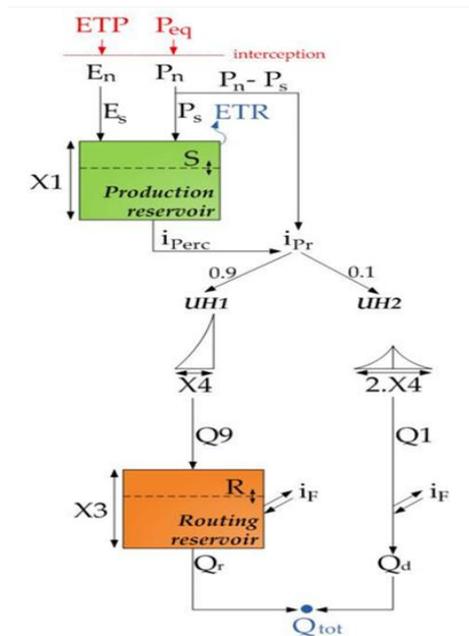


Figura 5: Estructura del modelo GR4J.

Fuente: Foehn et al (2014)

Cuadro 4: Rangos y parámetros para el modelo GR4J.

Parametro	Unidad	Descripción	RANGO
A	m <sup>2</sup>	Área	>0
X1	m	Capacidad del primer reservorio	0.1 a 1.2
X2	m	Coefficiente de intercambio de agua	-0.005 to 0.03
X3	m	Capacidad del segundo reservorio	0.02 a 0.3
X4	d	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	1.1 a 1.9

Fuente: Foehn et al (2014)

El modelo trabaja con dos reservorios, el primero de ellos (color verde) relaciona la evapotranspiración y la precipitación proporcionando el volumen de lluvia precipitada neta. La operación es calculada como si la capacidad de intercepción fuera cero.

Si:

$$P_{eq} \geq ETP, \rightarrow P_n = P_{eq} - ETP$$

Si:

$$P_{eq} \leq ETP, \rightarrow E_n = ETP - P_{eq}$$

Dónde:  $P_n$ : Precipitación neta (mm/día),  $P_{eq}$ : Precipitación equivalente (mm/día),  $ETP$ : Evapotranspiración (mm/día) y  $E_n$ : Evapotranspiración neta (mm/día).

Cuando  $P_n$  no es cero una parte ( $P_s$ ) de  $P_n$  alimenta al primer reservorio (ecuación 3.10). Similarmente cuando  $E_n$  no es cero una evapotranspiración ( $E_s$ ) es calculada en el primer reservorio la cual es descrita por la (ecuación 3.11)

$$P_s = \frac{d}{dt} \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)} \quad (3.10)$$

$$E_s = \frac{d}{dt} \frac{S \cdot \left(2 - \left(\frac{S}{X_1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n \cdot dt}{X_1}\right)} \quad (3.11)$$

En donde:  $P_s$ : Intensidad de lluvia que alimenta al primer reservorio (mm/día),  $X_1$ : Capacidad máxima del primer reservorio (mm/día),  $S$ : Contenido de agua en el primer reservorio (mm/día) y  $E_s$ : Evapotranspiración producida en el primer reservorio (mm/día).

De esta manera se determina la Precipitación neta ( $P_n$ ) en el primer reservorio en donde la altura de este reservorio está definida por el primer parámetro  $X_1$ , el cual varía con cada iteración tomando un de "S" para cada iteración.

Las salidas del primer reservorio están constituidas por un volumen per colado ( $iPerc$ , ver ecuación 3.12)

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (P_s - E_s) \cdot dt) \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{(S + (P_s - E_s) \cdot dt)}{X_1}\right)^4\right)^{1/4}\right) \quad (3.12)$$

$$iPr = iPerc + (P_n - P_s)$$

Donde:  $iPerc$ : Intensidad de percolación (mm/día) y  $iPr$ : Intensidad de flujo generado (mm/día)

Para el cálculo de los hidrogramas unitarios el flujo  $iPr$  es dividido en dos componentes: 90 por ciento es considerado para un hidrograma unitario UH1 el cual se almacenará en el primer reservorio y el 10 por ciento considerado para un hidrograma unitario simétrico UH2. Ambos hidrogramas dependen del parámetro  $X_4$  (ver tabla 4) el cual relaciona la base del tiempo de estos.

$$SH1_t = 0, \text{ si } t \leq 0$$

$$SH1_t = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, \text{ si } 0 < t < X_4 \quad SH1_t =$$

$$1, \text{ si } t \geq X_4$$

$$SH2_t = 0, \text{ si } t \leq 0$$

$$SH1_t = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, \text{ si } 0 < t < X_4$$

$$SH2_t = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, \text{ si } X_4 < t < 2X_4$$

$$SH2_t = 1, \text{ si } t \geq 2.X_4$$

$$UH1_t = SH1_j - SH1_{j-1}$$

$$UH2_t = SH2_j - SH2_{j-1}$$

Dónde: SH1: Hidrograma unitario 1, SH2: Hidrograma unitario 2, t: Paso de tiempo (s),  $X_4$ : Base de tiempo, UH1: Hidrograma unitario desde SH1 y UH2: Hidrograma unitario desde SH2.

Las salidas de los hidrogramas están representados por las salidas de  $Q_9$  y  $Q_1$  :

$$Q_9 = 0.9 \sum_{j=1}^l (UH1_j \cdot iPr_{k-j-l})$$

$$Q_1 = 0.1 \sum_{j=1}^m (UH2_j \cdot iPr_{k-j-l})$$

Dónde:  $Q_9$ : Flujo unitario de la salida del UH1 (m/s),  $Q_1$  : Flujo unitario de la salida del UH2 (m/s), j: Día y l: Valor entero de  $X_4 + 1$

El aporte de agua subterránea está restringido por la función de cambio ( $iF$ ) el cual relaciona al parámetro  $X_3$ , representada por la ecuación 3.13

$$iF = \frac{d}{dt} X_2 \left(\frac{R}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (3.13)$$

$$Qr' = \frac{d}{dt} (R + (Q_9 + iF) \cdot dt) \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R + (Q_9 + iF) \cdot dt}{X_3}\right)^4\right)^{-\frac{1}{4}}\right)$$

Donde:  $Qr'$ : Flujo unitario del *Routing reservoir* (m/s),  $X2$ : Coeficiente de intercambio de agua, positivo para contribuir y negativo para perder,  $R$ : Nivel máximo del *Routing reservoir*. (m) y  $X3$ : capacidad del reservorio.

El flujo unitario  $Q9$  es depositado a un segundo reservorio (*Routing reservorio*, ver Figura 6) cuya nivel máximo de agua está representado por el parámetro  $X3$  siendo “ $R$ ” la altura de agua para cada paso de tiempo. La salida de este reservorio esta denotado por  $Qr'$  el cual además de estar relacionada con las variables mencionadas relaciona la función de cambio  $iF$ .

Por otro el flujo unitario  $Q1$  es afectado solo por la función de cambio  $iF$ , entregando un flujo unitario  $Qd'$  como muestra la ecuación 3.14

$$Qd' = Q_1 + iF \quad (3.14)$$

Dónde:  $Qd'$ : Flujo unitario complementario. (m/s)

Por último la salida del modelo es representada por la suma de los flujos  $Qr$  y  $Qd$  como muestra las ecuaciones 3.56 y 3.57, siendo  $Qtot$  la suma de estos (ecuación 3.15).

$$Qr = Qr'.A$$

$$Qd = Qd'.A$$

$$Qtot = Qr + Qd \quad (3.15)$$

Dónde:  $Qr$ : Flujo proveniente del segundo reservorio (*Routing reservoir*) (m/día),  $Qd$ : Flujo complementario (m/día),  $A$ : Área de la cuenca (m<sup>2</sup>) y  $Qtot$ : Flujo total (m<sup>3</sup>/día).

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. Zona de estudio**

La cuenca del río Mala presenta una extensión de 2332 Km<sup>2</sup>, pertenece a la vertiente del Pacífico. Políticamente su territorio corresponde al departamento de Lima y provincias de Cañete, Huarochiri y Yauyos. Geográficamente se encuentra ubicado en los paralelos 11°53'36" y 12°41'03" de latitud Sur, y entre el meridiano 75°56'32" y 76°39'21" de longitud Oeste. Ver Figura 6.

##### **3.1.1. Accesibilidad - vías de comunicación**

Una de las principales carreteras de acceso hacia la cuenca del río Mala es la carretera Panamericana Sur (kilómetro 85). El poblado de Mala tiene un tramo asfaltado de 10.00 km., la misma que cruza al distrito de San Antonio hasta llegar al distrito de Mala. Partiendo del distrito de Mala con dirección Noreste se cuenta con una carretera afirmada de 60 km hasta llegar al distrito de Calango y de ésta continúa siguiendo la quebrada que discurren las aguas del río Mala, hasta llegar a los poblados de Minay, Viseas, Cochabambas y de éste hasta llegar al distrito de Huarochirí, con un recorrido aproximado de 110 km.

Del distrito de Huarochirí se inician tramos carreteros que unen los poblados de San Lorenzo de Quinti, Santiago de Anchucaya, San Juan de Tantarache, San Pedro de Huancayre y Sangayaya.

Partiendo del distrito de Mala en dirección Sureste pasando por los distritos de Asia, Omas, San Pedro de Pilas y siguiendo la ruta se llega al abra Tres Cruces y tomando una dirección Noreste se llega al distrito de Ayavirí, tramo de 114.00 km.

En el Abra Tres Cruces parte un tramo carretero hacia el distrito de Quinchas y de éste hacia los distritos de San Joaquín y Huañec con 100.00 km, de recorrido.

Para llegar al distrito de Huarochirí existe un tramo carretero que parte por el distrito de Cieneguilla y pasa por los poblados de Antioquia, San José de Chorrillos, Buena Vista y de ésta hasta llegar al distrito de Huarochirí, con 150 km, de distancia (EX-INRENA, 2007).

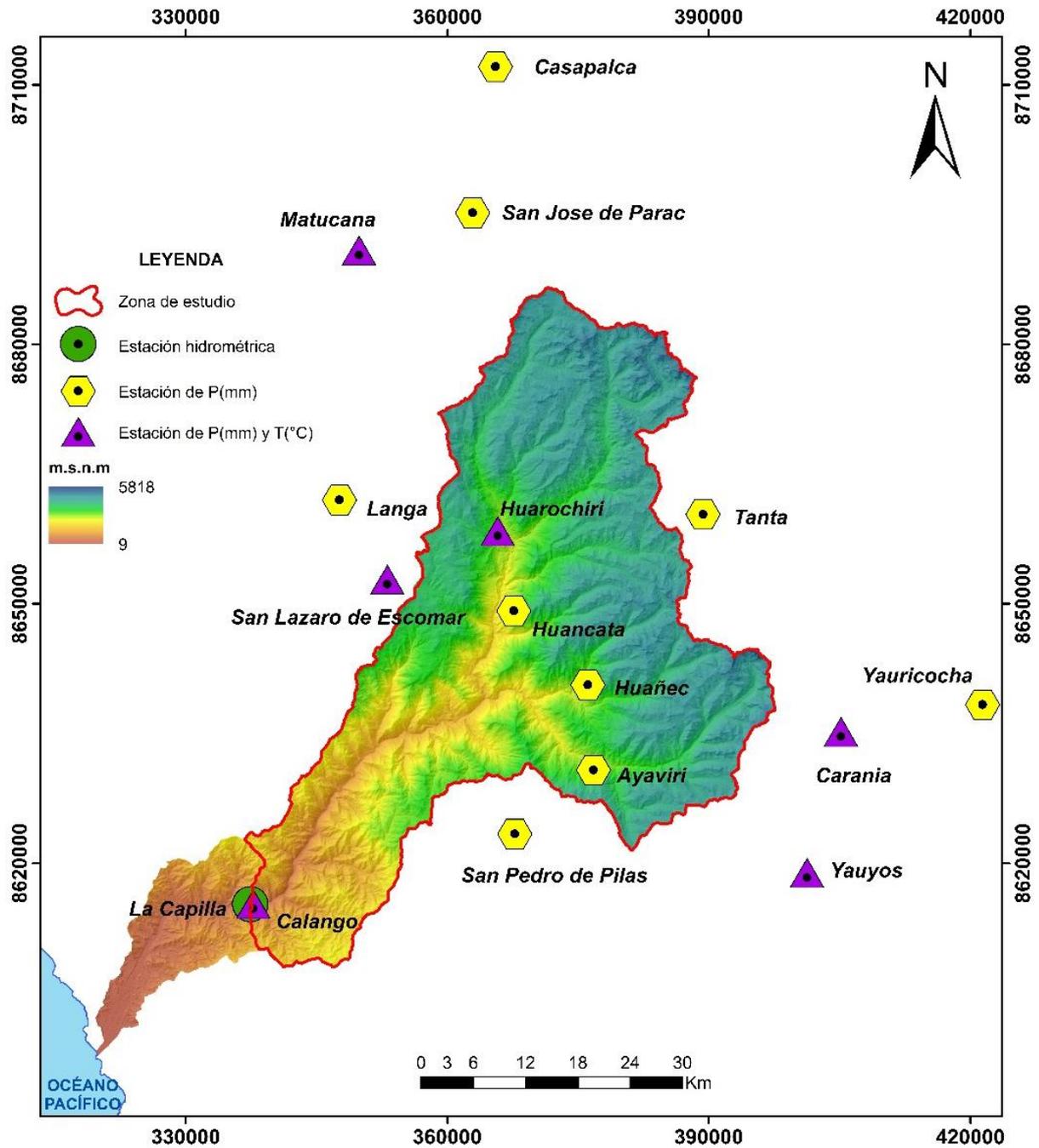


Figura 6: Variación espacial de la altitud y ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Población – demografía

De acuerdo al último censo efectuado en el 2007, la población total en la cuenca alcanza a 47,897 habitantes. Correspondiendo a la provincia de Yauyos una población de 4,916 habitantes, Cañete 36,292 habitantes, Huarochirí 6,689 habitantes.

En la Figura 7, se muestra el censo de población realizados por el INEI en los distritos de la cuenca del río Mala. Los distritos que presentan mayor población para cada Provincia de Mala son los distritos de Quinchés, Mala y S.L. Quinti, con una población en porcentaje del 21.64% de la provincia Yauyos, 76.82 % de la provincia de Cañete y 25.13 % de la provincia Huarochirí, respectivamente.

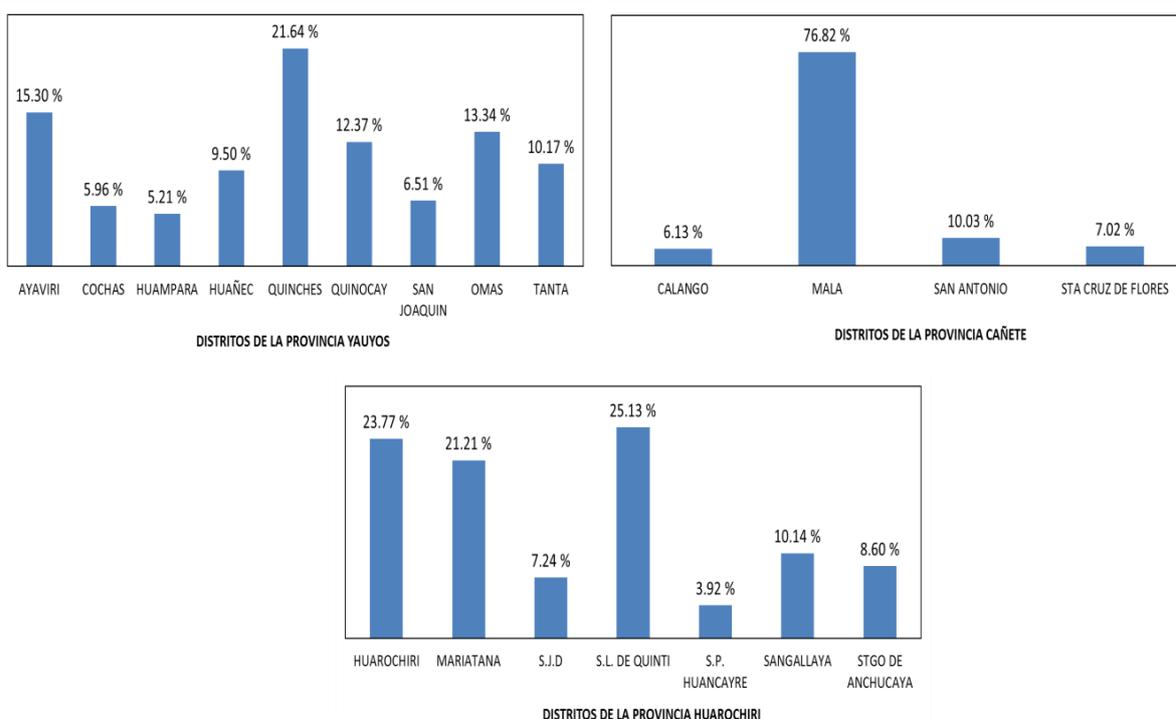


Figura 7: Población a nivel distrital ubicado de la cuenca del rio Mala en porcentaje (%).

Fuente: Elaborado en base a información de INEI (2007)

### 3.1.3. Aspecto socioeconómico

En las provincias de Yauyos, Cañete y Huarochirí, el 86.04%, 85.08% y 85.93%, de sus respectivas poblaciones saben leer; mientras que el 9.03%, 8.26% y 8.83% de su población es analfabeta. En la Figura 8 (a), se puede apreciar el grado de analfabetismo que existe en el ámbito de la cuenca.

En la Figura 8 (b), se observa, que los niveles educativos en las provincias que se ubican dentro de la cuenca Mala, el 86.43% realizaba alguna actividad educacional, el 7.29% no tiene nivel educacional, el 40.57% no tiene estudios completos en los niveles de primaria, secundaria, no universitario y universitario, y un 42.73% tiene estudios completos de nivel primaria, secundaria, no universitario y universitario.

En cuanto a lo socio económico y confort de los habitantes de las provincias de Yauyos, Cañete y Huarochirí, se tiene que el 75.46% cuenta con servicios de energía eléctrica, agua y desagüe, y tiene casa propia. Con mayor detalle se puede observar en la Figura 8 (c) (INEI, 2007).

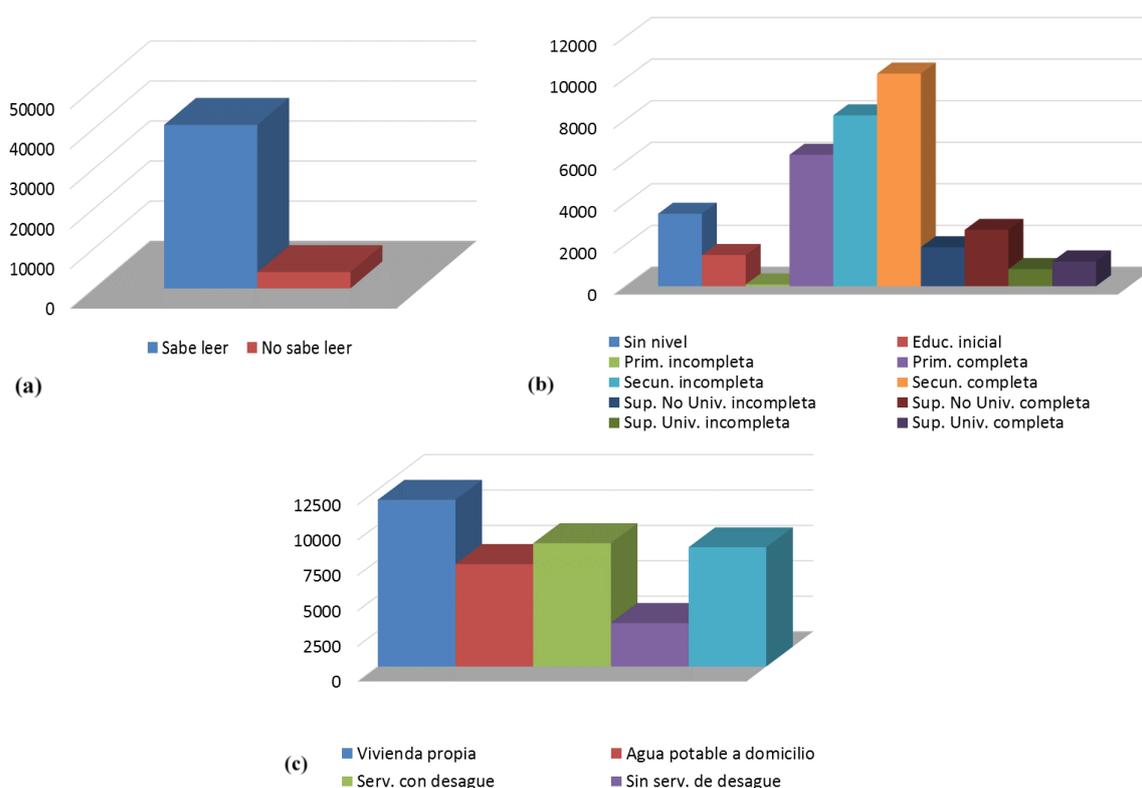


Figura 8: Niveles socio-económicos, (a) Nivel de alfabetismo, (b) Nivel educacional y (c) Nivel socioeconómico y confort.

Fuente: Elaborado en base a información de INEI (2007)

La población de la cuenca de Mala cuenta principalmente con tres fuentes de desarrollo económico:

- **Minería**

En la localidad de Mala, se ubica la compañía minera Condestable S.A.A., que es una empresa productora de cobre que produce 4200 Tn de mineral procesado; su actividad la realiza sobre 500 ha de la comunidad campesina de Mala de terrenos superficiales, teniendo por ello un contrato de servidumbre y usufructo a título oneroso y de tributo mutuo, con el fin de mejorar la zona.

- **Agricultura y ganadería**

El sector agrícola y ganadero en la cuenca del río Mala constituye el pilar de sostenimiento económico para los pobladores que viven en los distritos que se ubican dentro de la cuenca. Los distritos de Mala, San Antonio, Calango y Santa Cruz de Flores, cuentan con suelos fértiles y con una disponibilidad de agua superficial, la producción de cultivos está compuesta principalmente de manzana (31.32%), maíz grano (11.96%), vid (9.51 %), maíz chala (8.22%), camote (4.65%), plátano (5.54%), algodón (4.09%), entre otros. El cultivo con mayor frecuencia cultivable es la manzana Delicia. Este producto agrícola de mayor producción lo presentan en los mercados mayoristas de Lima Metropolitana y en parte a los mercados nacionales. Las actividades económicas de la provincia de Yauyos y Huarochirí, mayormente de los distritos ubicados en las partes altas, están totalmente concentradas en el sector ganadero el cual contribuye sustancialmente a la economía regional.

- **Turismo**

El turismo en la cuenca del río Mala es de menor importancia, desde el punto de vista económico, a pesar que la cuenca tiene recursos orientados al turismo de esparcimiento y ecológico, tales como el distrito de Santa Cruz de Flores donde se observa panorámicamente el valle del río Mala.

San Vicente de Azpitia se encuentra en el camino a Calango es un lugar muy atractivo, donde asisten personalidades del círculo político y social de la ciudad de Lima, donde disfrutan de un descanso placentero y un panorama visual del valle, para ello, cuentan con movilidad propia y sus pobladores ofrecen servicios de hospedaje y alimentación (EX-INRENA, 2007).

#### **3.1.4. Condiciones climáticas**

Según R. Schroeder, citado en el estudio “Evaluación de los Recursos Hídricos de la cuenca del río Mala”-2007, la clasificación climática para la cuenca Mala presenta los siguientes tipos:

**a. Clima de Estepa (BS)**, esta variación climática a su vez se subdivide en Clima de Estepa con lluvia escasa en el verano (BSw), comprende una franja ubicada entre los 0.00 msnm, hasta 200 msnm., y el Clima de Estepa con Lluvia en el invierno abarca generalmente toda la faja costera hasta los 800 msnm.

**b. Clima de desierto (BW)**, abarca las zonas desérticas carentes de lluvias y se ubican hasta los 1000 msnm.

**c. Clima Templado Moderado Lluvioso (Cw)**, se caracteriza por presentar un invierno seco con lluvias en periodos bien marcados entre diciembre a marzo, donde a veces lluvias son diez y mayores que los meses secos. Se extiende desde los 1000 msnm., hasta los 2800 msnm., con temperaturas media superior 12°C en los meses agosto a diciembre.

**d. Clima frio o boreal (Dwb)**, se caracteriza por tener un clima seco en invierno y con temperatura media superior a 10°C, por lo menos durante 4 meses al año se ubica inmediatamente debajo de la puna, a continuación del clima tipo China (Cw) y Clima de estepa muy cercana al invierno (BSw). Se ubica generalmente entre los 2800 hasta los 3800 msnm.

**e. Clima de Tundra Seca de Alta Montaña (ETH)**, se caracteriza por tener una temperatura media del mes más cálido, superior a 0°C, se ubica en las partes altas por encima de los 3800 msnm., y por debajo de los 4800 msnm.

**f. Clima de Nieve Perpetua de Alta montaña (EFH)**, caracterizándose por presentar una temperatura media en todos sus meses inferior a 0°C, presentándose en las cumbres más altas de la cuenca por encima de los 4800 msnm. (EX-INERNA, 2007)

### **3.1.5. Formaciones ecológicas en la cuenca**

Para hallar las formaciones ecológicas en la cuenca del río Mala, se siguen los lineamientos presentados por el INRENA en el 2007, en donde se logra identificar catorce formaciones ecológicas, las que se muestran en la Figura 9.

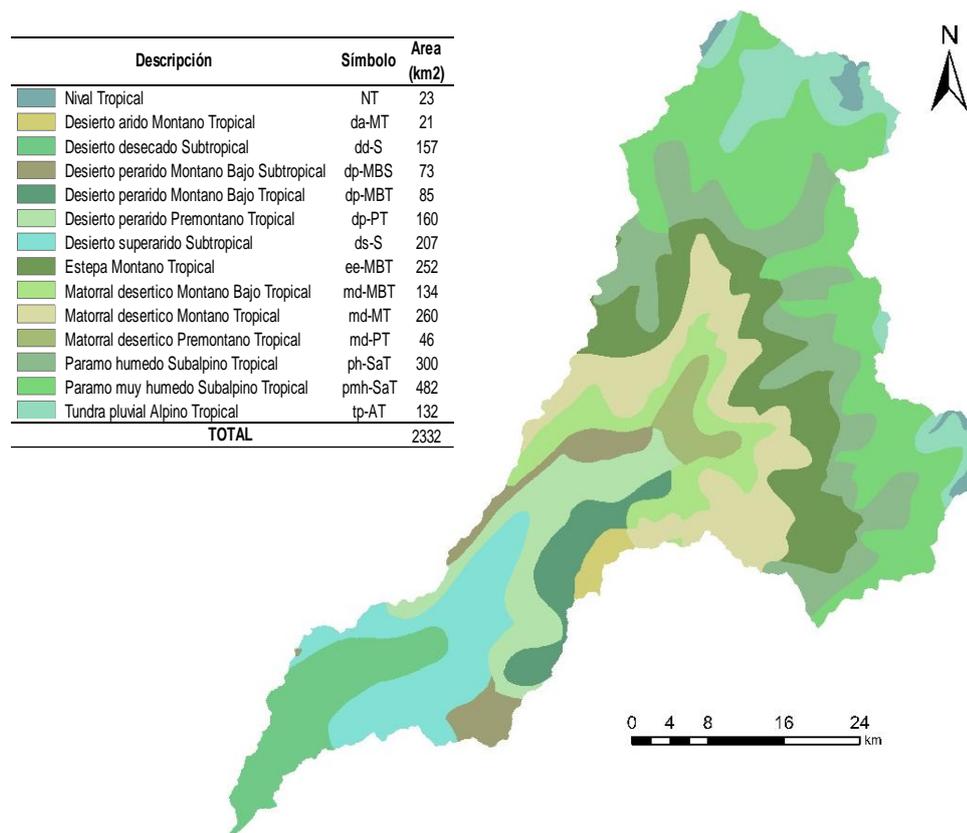


Figura 9: Formaciones ecológicas identificadas en el cuenca del río Mala.

Fuente: EX-INRENA (2007)

### 3.1.6. Recursos hídricos superficiales

En la cuenca del río Mala se ha evaluado cuatro tipos de fuentes de aguas superficial; lagunas, manantiales, escurrimiento superficial (ríos, quebradas) y glaciares o nevados, Ver Figura 10.

#### a. Lagunas y represamientos

Como toda cuenca hidrográfica, la del río Mala cuenta con lagunas ubicadas generalmente al pie de los nevados sobre los 4,000 msnm, formando cuencas litológicas de origen marino y continental que se formaron por los grandes movimientos orogenéticos y epirogenéticos, evidenciado por la formación de la Cordillera de los Andes.

En la cuenca del río Mala existen 117 lagunas, de las cuales 4 lagunas tienen superficies que varían entre 80 a 100 ha, 11 lagunas con superficies entre 10 a 20 ha, 12 lagunas con superficies entre 5 a 20 ha, 45 lagunas entre 1 a 5 ha, 23 lagunas entre 0.5 a 1 ha y 22 lagunas con áreas menores a media hectárea; lo que se puede deducir que las lagunas dentro de la

cuenca son de tamaño intermedio entre 1 y 10 ha, porque representan el 48.72 % del total de lagunas, como se puede apreciar en el Cuadro 5 (EX-INRENA, 2007).

*Cuadro 5: Tamaño y cantidad de lagunas.*

ITM	TAMAÑO (Ha)	CANTIDAD	%
1	0.1 a 0.5	22	18.8
2	0.5 a 1	23	19.66
3	1 a 5	45	38.46
4	5 a 10	12	10.26
5	10 a 20	11	9.4
6	80 a 100	4	3.42
TOTAL		117	100

*Fuente: EX-INRENA (2007)*

#### **b. Ríos y quebradas**

En la cuenca del río Mala se ha encontrado que existen 33 ríos y 709 quebradas, de las cuales 189 quebradas son perennes, 369 son quebradas intermitentes y 151 son quebradas efímeras (EX-INRENA, 2007).

#### **c. Manantiales y aguas de recuperación**

En la cuenca del río Mala cuenta con 245 manantiales. El caudal de los Manantiales "El Dorado" y "Chonta", situados en el Valle de Mala son los que aportan mayor caudal con 30.0 y 31.0 l/s, respectivamente; la mayoría de los manantiales fluctúan entre 1.0 a 5.0 l/s. El tipo de uso del recurso hídrico generalmente es agrícola y pecuario; sin embargo, también lo utilizan, en menor escala para el abastecimiento poblacional.

Asimismo, se ha encontrado 16 afloramientos de aguas subterráneas en la parte baja de la cuenca. Los caudales de las aguas de recuperación con mayor caudal son el "Monte Grande" con 17 l/s y el menor con 0,10 l/s denominado "Llanos" (EX-INRENA, 2007)

#### **d. Glaciares**

En las zonas altas de la cuenca del río Mala, se han identificado almacenes sólidos conocidos como glaciares. Estos glaciares andinos a la fecha se encuentran en una fase acelerada de retroceso debido al calentamiento global y al fenómeno meteorológico conocido como El Niño.

Este fenómeno, está ocurriendo desde 1970, donde INRENA por medio de la Unidad de Glaciología señaló que existían 2,041 km<sup>2</sup> de glaciares; y según el monitoreo realizado en

1997, se ha encontrado 1,595 km<sup>2</sup>, lo que significa que en 27 años se produjo una reducción del 21.8 %.

En varios lugares de Los Andes, se ha notado desde hace unas décadas un aumento significativo de los volúmenes escurridos en las cuencas con existencia de glaciares. El calentamiento global de la tierra, es otro factor del proceso de desglaciación, cuyo efecto está provocando grandes impactos ambientales que a corto plazo provocará sequías e inundaciones.

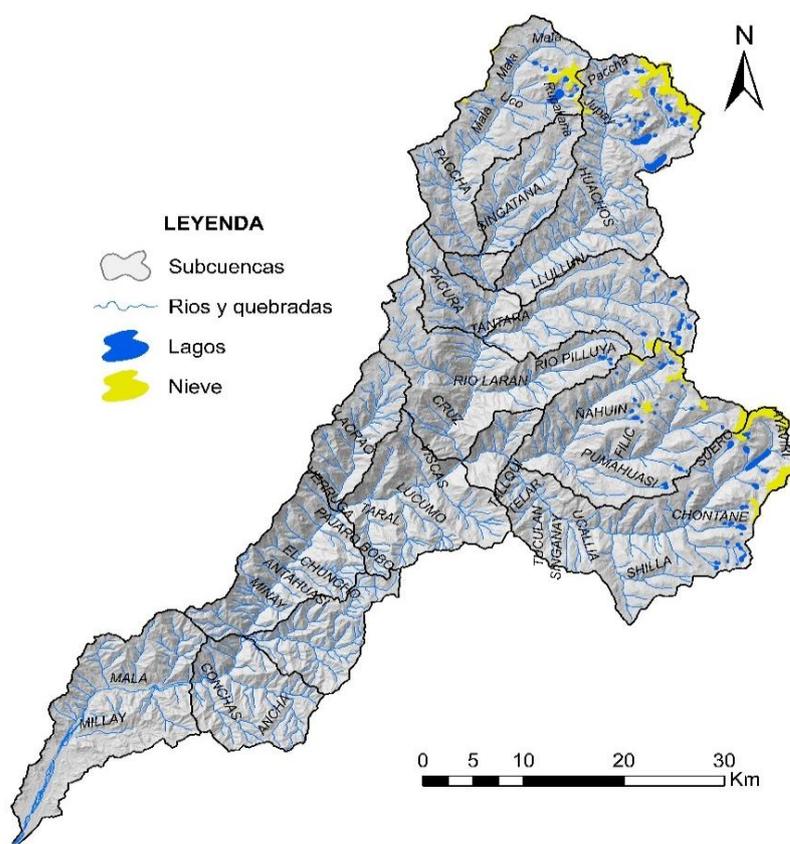


Figura 10: Red de recursos hídricos de la cuenca del río Mala.

Fuente: Elaborado con información del IGN

### 3.2. Esquema hidráulico de funcionamiento en la cuenca del río Mala

La Junta de Usuarios del Sub - Distrito de Riego Mala – Omas, está conformada por 8 Comisiones de Regantes, todas ellas pertenecen a la cuenca del río Mala, estas son: Escala Salitre, Flores – San Antonio, Flores Azpitia, Bujama, San Andrés, Correvientos – Rinconada, Calango y Minay. Ver Figura 11.

El sistema de captación de la junta de usuarios, consta de 63 captaciones, de las cuales 10 de estas estructuras han sido construidas de concreto armado y el resto son captaciones rústicas hechas en su mayoría por los mismos agricultores de la zona.

Las captaciones empiezan su operación a partir de la comisión de regantes Minay, contando esta comisión con un total de 32 captaciones, en segundo lugar el río entrega sus aguas a las 11 captaciones pertenecientes a la comisión de regantes de Calango, en la comisión de regantes de Calango también encontramos a la captación del canal San Andrés perteneciente a la comisión de regantes del mismo nombre.

En el trayecto del río la comisión de regantes de Correvientos – Rinconada capta agua mediante sus 7 captaciones, mientras que la comisión de regantes Flores – Azpitia capta agua en la única captación que posee del mismo nombre. La comisión de regantes aprovecha el agua del río mediante la captación del mismo nombre, mientras que la comisión de regantes Flores – San Antonio capta agua mediante 6 captaciones y hasta llegar finalmente a la comisión de regantes Escala – Salitre la que capta agua a ambos márgenes del río mediante 4 captaciones.

Las estructuras de captación permanente están implementadas de estructuras de control y regulación (compuertas), algunas en mal estado. El sistema de conducción principal lo constituyen mayormente canales sin revestir con los mismos nombres de su toma de captación. Asimismo el sistema de distribución mediante canales laterales, sub laterales, etc. también, mayormente son excavados en tierra, sin revestir. La red de conducción la constituyen 66 canales, debido a que del canal Azpitia derivan los, canales El Dorado y Cayaya; y del canal San Andrés se deriva el canal Los Rincones; esta red de conducción tiene una longitud total aproximada de 212.466 km., de los cuales aproximadamente 18.90Km son revestidos y el resto sin revestir. Entre los canales revestidos destaca el canal Bujama con un tramo revestido de 17.00 km, (EX-INRENA, 2007).



### 3.2.1. Uso y demanda de agua en la cuenca

Para este trabajo de Tesis, el consumo de agua en la cuenca se clasificará de acuerdo a la ubicación de las zonas de la cuenca respecto al punto de control de la estación La Capilla. Uno será las que se encuentran en la parte baja y la otra en la parte alta de la estación.

#### A. Consumo actual de agua en la parte baja o valle de la cuenca

##### A.1. Uso agrícola

El área consignada bajo riego para el valle es de 5,527.91 ha, por otro lado las campañas agrícolas de los planes de cultivo y riego 2005/2006 a 2008/2009 elaborado por la Junta de usuarios Mala -Omas, se muestra en el Cuadro 6.

*Cuadro 6: Declaración de áreas de las campañas agrícolas del valle de Mala.*

PCR	AREA (ha)		
	CAMPAÑA AGRICOLA	TERRENO NO CULTIVADO	BAJO RIEGO
2005-2006	4,800.87	727.04	5,527.91
2006-2007	5,051.23	476.68	5,527.91
2007-2008	4,990.96	536.95	5,527.91
2008-2009	4,965.36	562.55	5,527.91
PROMEDIO	4,952.11	575.81	5,527.91

*Fuente: Elaborado con información de la Junta de usuarios Mala-Omas*

En el área total irrigable del valle de Mala de acuerdo al Padrón de Usuarios de la Junta de Usuarios Mala-Omas con 5,527.91 ha, la demanda hídrica por bloques alcanza a 136.959 MMC, tal como se muestra en el Cuadro 7.

*Cuadro 7: Demanda hídrica total por bloque con área total de riego (MMC).*

BLOQUE	Área (ha)	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	TOTAL
MINAY	262.34	0.449	0.517	0.598	0.666	0.719	0.896	1.079	1.171	1.062	0.917	0.808	0.656	9.539
CALANGO	368.74	0.613	0.691	0.798	0.889	0.964	1.205	1.454	1.576	1.455	1.263	1.124	0.91	12.943
SAN ANDRÉS	557.07	0.636	0.714	0.875	1.036	1.232	1.536	1.755	1.78	1.587	1.233	1.021	0.772	14.176
CORREVIENTOS RINCONADA	815.81	0.845	0.922	1.161	1.463	1.809	2.289	2.621	2.487	2.184	1.75	1.441	1.042	20.014
FLORES AZPITIA	307.65	0.436	0.496	0.609	0.719	0.836	1.035	1.178	1.2	1.072	0.846	0.687	0.504	9.618
BUJAMA	1328.64	1.125	1.032	1.264	1.516	2.216	2.859	3.27	3.001	2.887	2.181	1.936	1.532	24.818
FLORES SAN ANTONIO	573.92	0.623	0.689	0.861	1.045	1.262	1.546	1.742	1.707	1.471	1.042	0.856	0.62	13.465
ESCALA SALITRE	1313.74	1.671	1.698	2.086	2.483	3.049	3.668	3.916	3.328	3.287	2.789	2.45	1.961	32.386
TOTAL	5527.91	6.4	6.76	8.25	9.82	12.09	15.03	17.02	16.25	15.01	12.02	10.32	8	136.959

*Fuente: Elaborado con información de la Junta de usuarios Mala-Omas*

## A.2. Demanda de agua para consumo poblacional

El agua es una de las preocupaciones diarias para los pobladores del valle de Mala. Algunas personas se preocupan más por la calidad del agua, sobre todo cuando el servicio de la misma llega sin ser potabilizada y con impurezas. Para otras personas, la calidad no es relevante frente a la necesidad latente de dotación que se les proporciona y los esfuerzos que deben hacer para obtener un poco de la misma. En todo caso, obtener agua en cantidad y calidad adecuadas es una demanda real y cotidiana.

En el Cuadro 8, se aprecia la demanda hídrica actual, donde los pobladores de los distritos señalados solo usufructúan con agua potable un 80% de la población total.

Es decir, actualmente la demanda hídrica total del valle alcanza a 190750.8 m<sup>3</sup>/año, considerando una demanda per cápita de 180 l/día y una pérdida por conducción y distribución del 20%.

*Cuadro 8: Demanda del agua poblacional actual y requerida del valle de Mala.*

DISTRITOS	POBLACION	POBLACION CON SERVICIO (*)	DEMANDA ACTUAL	
			l/día (**)	m <sup>3</sup> /año
Calango	2,224	2,047	320,256	11,689.3
Mala	27,881	20,416	4,014,864	146,542.5
San Antonio	3,640	2,768	524,160	19,131.8
Santa Cruz de Flores	2,547	1,960	366,768	13,387.0
Total	36,292	27,191	5,226,048	190,750.8

(\*)Según EMAPE MALA 80% de la población total cuenta con servicio de agua potable

(\*\*)Según EMAPA MALA, considera 20% de pérdida de conducción y distribución.

*Fuente: Elaborado con información de EMAPA - Mala (2007)*

## A.3. Otros consumos de agua

En el valle de Mala existen otras instituciones que usufructúan el recurso hídrico superficial como subterráneo, es así, que en el distrito de Calango existe la planta de producción y crianza de camarones Calango, que pertenece a la Municipalidad de Calango. Esta planta cosecha dos veces al año y las aguas del río Mala son desviadas a la planta mediante un canal aductor.

La empresa de producción y cría de aves de corral San Fernando es otra empresa que utiliza las aguas subterráneas del valle de Mala.

En la cuenca del río Mala, actualmente no existen instituciones que utilicen el recurso hídrico para uso energéticos ni industrial.

En el uso pecuario, las provincias Huarochiri, Cañete y Yauyos, cuentan con una población de 39751, 3750 y 37720, respectivamente. En la Figura 12, se señala por provincia la población pecuaria en porcentaje; cabe señalar que en la costa se presenta una población pecuaria que es mínima, que conlleva a no considerar como consumo importante.

En el sector del poblado de Azpitia, existen numerosas casas de hospedaje y viviendas que utilizan las aguas subterráneas con fines recreacionales, para el llenado de sus piscinas que usan los turistas que concurren al mirador de la zona de Azpitia.

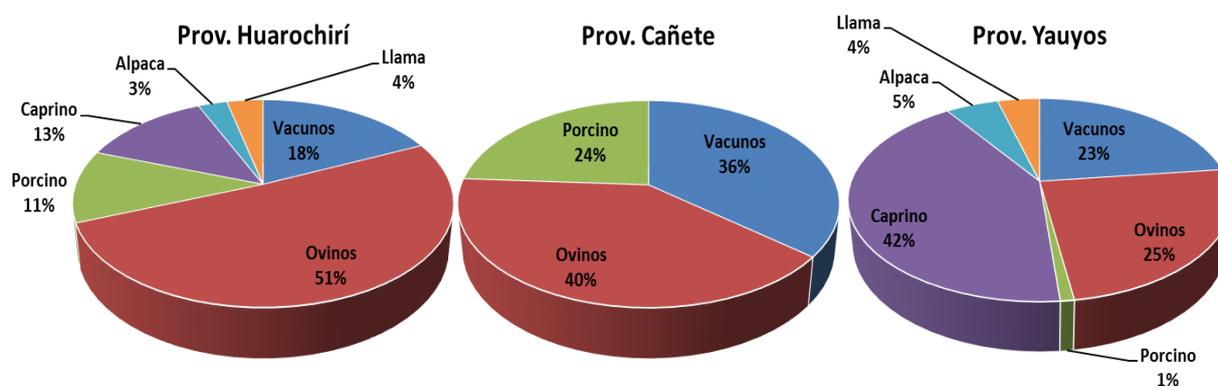


Figura 12: Población pecuaria en las provincias de la cuenca del río Mala.

Fuente: Elaborado con información de la Dirección de información agraria – (2009)

## B. Consumo actual de agua en la parte media y alta de la cuenca

### B.1. Uso Agrícola de Agua

En la parte media y alta de la cuenca del río Mala, cuenta con una superficie agrícola de 6,600.06 ha, de las cuales, 5,272.61 ha se encuentran bajo riego y 1,327.45 ha son tierras de cultivo en seco. La superficie no agrícola se cuenta con una superficie de 197,509.28, como se puede apreciar en el Cuadro 9.

Como se puede apreciar en la tabla, la cuenca Mala de la zona media y alta ofrece 6,600.06 ha, que son regadas generalmente en el periodo de siembra (machaco) y algunos riegos durante el periodo de crecimiento. La cédula de cultivo en la cuenca media está conformada generalmente por cultivos de manzana, chirimoya, entre otros y la mayoría de las áreas es sembrada con cultivos como la papa, maíz amiláceo, habas, trigo, cebada, pastos y otros cultivos.

En la parte alta, la cedula de cultivos está conformada por cultivos como la papa, oca, mashua y algunas áreas con pastos cultivables.

*Cuadro 9: Superficie agrícola de la zona media y alta de la cuenca del río Mala.*

PROVINCIA	DISTRITOS	SUPERFICIE AGRICOLA (ha)			SUPERFICIE NO AGRICOLA (ha) (pastos naturales, bosques y otros)
		TOTAL AGRICOLA	BAJO RIEGO	EN SECANO	
YAUYOS	Ayaviri	660.65	634.22	26.43	11,095.02
	Cochas	197.8	197.8	0	2,475.24
	Huampara	170.24	112.19	58.05	3,731.62
	Huañec	188.99	185.99	3	3,417.98
	Quinchos	1,214.35	1,191.71	22.64	10,088.43
	Quinocay	282.75	228.65	54.1	14,799.50
	San Joaquin	232.25	229.75	2.5	3,886.50
	Tanta	0.01	0.01	0	31,845.20
HUAROCHIRI	Huarochiri	560.99	524.53	36.46	23,013.21
	Mariatana	367.23	183.39	183.84	22,955.92
	San Juan de Tantaranché	177.36	136.25	41.11	10,686.25
	San Lorenzo de Quinti	1,326.39	528.65	797.74	45,987.76
	San Pedro de Huancayre	128.91	126.56	2.35	3,195.62
	Sangallaya	662.75	563.52	99.23	7,527.44
	Santiago de Anchucya	429.39	429.39	0	5,278.83
	TOTAL	6,600.06	5,272.61	1,327.45	197,509.28

*Fuente: Elaborado con información de la Dirección de información agraria – (2009)*

## **B.2. Demanda de agua para consumo poblacional**

En la zona media y alta de la cuenca del río Mala, la mayoría de los distritos cuenta con servicio de agua potable, generalmente no bien tratada. De acuerdo a los trabajos de campo durante el levantamiento de información se ha encontrado que el 65% de la población en los distritos cuenta con agua potable a domicilio, encontrándose en algunos poblados solamente piletas para el uso doméstico. En el Cuadro 10 se puede apreciar la demanda de uso poblacional a nivel distrital.

*Cuadro 10: Demanda de agua poblacional actual y demanda requerida de las zonas media y alta de la cuenca Mala.*

PROVINCIA	DISTRITO	POBLACION	POBLACION CON SERVICIO	DEMANDA ACTUAL		DEMANDA REQUERIDA	
				l/día	m3/año	l/día	m3/año
Yauyos	Ayaviri	719	467	28041	10235	43140	15746
	Cochas	831	540	32409	11829	49860	18199
	Huampara	214	139	8346	3046	12840	4687
	Huañec	550	358	21450	7829	33000	12045
	Quinchos	1788	1162	69732	25452	107280	39157
	Quinocay	113	73	4407	1609	6780	2475
	San Joaquin	56	36	2184	797	3360	1226
	Tanta	457	297	17823	6505	27420	10008
HUAROCHIRI	Huarochiri	1610	1047	62790	22918	96600	35259
	Mariatana	1155	751	45045	16441	69300	25295
	San Juan de Tantaranché	365	237	14235	5196	21900	7994
	San Lorenzo de Quinti	1757	1142	68523	25011	105420	38478
	San Pedro Huancayre	282	183	10998	4014	16920	6176
	Sangallaya	662	430	25818	9424	39720	14498
	Santiago de Anchucaya	604	393	23556	8598	36240	13228
	TOTAL	11163	7256	435357	158905	669780	244470

(\*)Según Encuesta de Campo 65% de la población total cuenta con servicio de agua potable.

(\*\*)Según EMAPA MALA, considera 20% de pérdida de conducción y distribución.

*Fuente: Elaborado con información de EMAPA-Mala (2007)*

Como se puede apreciar el Cuadro muestra que en la cuenca tiene una demanda actual de 158,905 m<sup>3</sup>/año, con un consumo per cápita de 50 l/día y una pérdida 20% por efecto de conducción y operación del sistema.

### **B.3. Otros consumos de agua**

En las partes altas las comunidades utilizan el agua de algunas lagunas para fines de explotación y cría de peces (Truchas), caso de las lagunas Huascacocha, Chiccococha, Cochatupe, entre otras. La laguna Huascacocha recibe el apoyo de la ONG Santa Rosa, para la explotación y cría de truchas, las cuales les sirve como base en la alimentación de los hijos de los comuneros de la zona.

### **3.3. Información hidro-meteorológica**

La información meteorológica que se utilizó para la generación de simulaciones de los modelos corresponde, tres estaciones a la cuenca Rímac, dos a la cuenca Lurín, cuatro a la cuenca Cañete, uno a la cuenca Omas y cinco a la cuenca del río Mala. Asimismo, la información fue administrada por el SENAMHI, la cual cuenta con información de precipitación y temperatura a nivel diario.

Mientras que para la información hidrológica, se tomó como punto de control la estación hidrológica La Capilla, esta estación está ubicada en el mismo cauce del río Mala, por lo cual dicha estación mide el escurrimiento superficial originado por la precipitación que se produce en la parte baja, media y alta de la cuenca Mala.

En el Cuadro 11, se muestra la categoría, ubicación geográfica y política, de las estaciones empleadas en el estudio.

El análisis exploratorio y crítica de datos fue realizado mediante análisis visual, estadístico, doble masa y box plot. En esta etapa de análisis de consistencia de la información pluviométrica, se ha realizado series de tiempo a paso diario con cada una de las estaciones, con la finalidad de ver de forma visual si existen picos en la serie histórica.

*Cuadro 11: Estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río Mala ubicadas en el Departamento de Lima.*

N°	ESTACION	VARIABLE *	LATITUD (gg°mm'ss")	LONGITUD (gg°mm'ss")	ALTITUD (msnm)	PROV.	DIST.
1	La Capilla	Q	12°31'18.90"	76°29'46.60"	424	Cañete	Calango
2	Ayaviri	P	12°23'0.00"	76° 8'0.00"	3228	Yauyos	Ayaviri
3	Calango	P,T	12°31'18.10"	76°29'35.30"	442	Cañete	Calango
4	Carania	P,T	12°20'39.80"	75°52'19.70"	3875	Yauyos	Carania
5	Casapalca	P	11°38'52.00"	76°14'0.30"	4214	Huachochi	Chicla
6	Huancata	P	12°13'0.00"	76°13'0.00"	2700	Huachochi	San Lorenzo de Quintin
7	Huañec	P	12°17'39.64"	76° 8'19.82"	3205	Yauyos	Huañec
8	Huachochi	P,T	12° 7'60.00"	76°14'0.00"	3154	Huachochi	Huachochi
9	Langa	P	12° 5'60.00"	76°24'0.00"	2860	Huachochi	Lahuaytambo
10	Matucana	P,T	11°50'20.80"	76°22'40.80"	2479	Huachochi	Matucana
11	San Jose de Parac	P	11°48'1.90"	76°15'29.20"	3866	Huachochi	San Mateo
12	San Lazaro de Escomar	P,T	12°10'60.00"	76°20'60.00"	3600	Huachochi	Langa
13	San Pedro de Pilas	P	12°27'0.00"	76°13'0.00"	2600	Yauyos	San Pedro de Pilas
14	Tanta	P	12° 7'0.00"	76° 0'60.00"	4323	Yauyos	Tanta
15	Yauricocha	P	12°18'59.30"	75°43'21.50"	4675	Yauyos	Alis
16	Yauyos	P,T	12°29'30.40"	75°54'30.40"	2327	Yauyos	Colonia

\*Q: Caudal, P: Precipitación, T: Temperatura

*Fuente: Elaborado con información de SENAMHI*

### 3.4. Herramientas computacionales

En el Cuadro 12 se muestra los software y sus aplicaciones, que fueron utilizados para el presente estudio.

*Cuadro 12: Software utilizados para la elaboración de modelos hidrológicos en la cuenca del río Mala.*

Software	Detalle
RS-Minerve 2.3. 	Plataforma en la cual se hayan los modelos hidrológicos utilizados para el estudio.
HydroPrepR. 	Software utilizado para la generación de bandas altitudinales en la cuenca del río Mala.
Water - International Potato Center. 	Completación de datos diarios de precipitación.
R versión 3.2.5. 	Software estadístico utilizado para la elaboración de gráficos box plot, series de tiempo, etc.
ArcGis 10.2. 	Software utilizado para la elaboración de planos de ubicación de la cuenca y estaciones hidrometeorológicas

*Fuente: Elaboración propia*

Asimismo, los software fueron instalados en una computadora portátil con las siguientes características: Procesador Intel(R) Core i7 – 2.40 GHZ, Memoria RAM de 12.0 GB

### 3.5. Metodología

Para la realización de los modelos hidrológicos en la cuenca del río Mala se siguió la siguiente metodología de trabajo como se aprecia en la Figura 13.

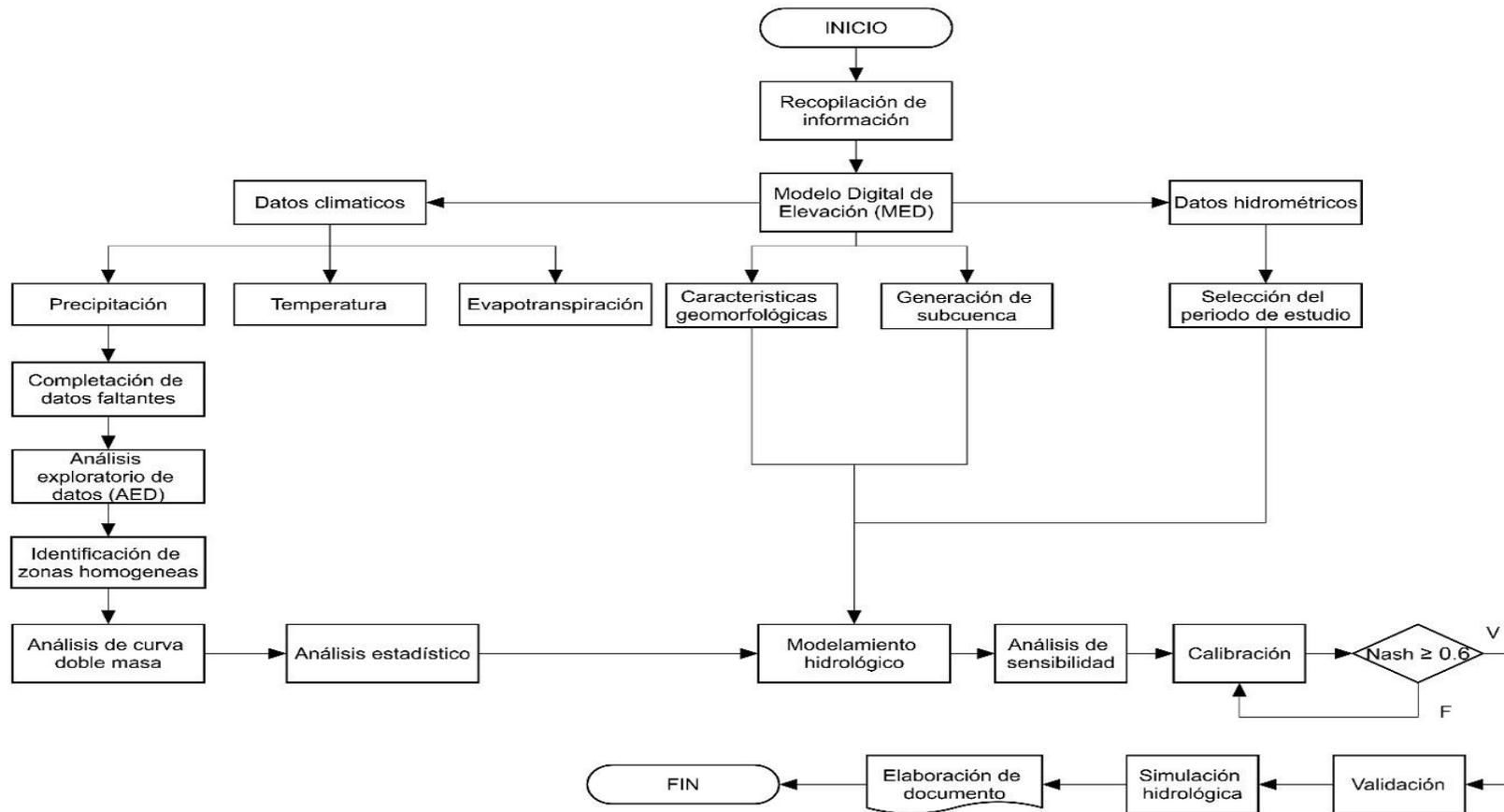


Figura 13: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.

Fuente: Elaboración propia

### **3.5.1. Caracterización la zona de estudio en cuanto a la hidrología, climatología y geomorfología**

#### **a. Recopilación de información**

Una etapa previa a la realización de la caracterización de la zona de estudio, calibración y validación de los modelos hidrológicos, y la simulación de caudales en varias subcuencas del río Mala, fue la recopilación de información bibliográfica de la zona de estudio. Además se requirió modelos digitales de elevación (MED) y datos de caudales en la estación hidrológica la Capilla, así como información climática; asimismo, la información del software RS-Minerve donde se encuentran los modelos hidrológicos empleados para el estudio.

#### **b. Generación de subcuencas y bandas altitudinales**

Para la delimitación de la zona de estudio se utilizó la cartografía de la cuenca hidrográfica a nivel nacional propuesta por la Autoridad Nacional del agua (formato .shp), mientras que para la generación de las subcuencas se utilizó el modelo digital de elevación ASTER GDEM v.2 de la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industrial de Japon, con resolución espacial de 30m.

Con la finalidad de estimar los caudales producidos en la parte alta y media, de la cuenca del río Mala, y teniendo como punto de control la estación hidrométrica La Capilla, se delimitaron 15 subcuencas, y se generaron 117 bandas altitudinales cada 400 m (Figura 15).

#### **c. Gradiente de precipitación**

En la Figura 14, se elaboró la gradiente de precipitación para la cuenca del río Mala, a partir de las precipitación media anual de las 15 estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, siendo esta una variable de entrada para la especialización de la precipitación en la plataforma RS MINERVE, de este modo se pudo obtener una gradiente de 0.2556 y un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.8082.

#### **d. Características morfométricas de la cuenca**

Morfometría es la medición y análisis matemático de la configuración de la superficie de la tierra, forma y dimensión de sus accidentes geográficos (Agarwal, 1988). Las características morfométricas en una cuenca pueden contener información importante sobre su formación y desarrollo porque los procesos hidrológicos y geomorfológicos se producen dentro de ella (Singh, 1990). El análisis morfométrico de una cuenca proporciona una descripción

cuantitativa del sistema de drenaje, que es un aspecto importante en su caracterización (Strahler, 1964). La teledetección y la técnicas GIS son usadas actualmente para evaluar los parámetros morfométricos de una cuenca, ya que proporcionan un entorno flexible para la manipulación y análisis de la información espacial (Pareta, 2012).

Para el presente estudio, se describe los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Mala, los cuales fueron clasificados en: parámetros de relieve, de forma y de la red de drenaje.

#### e. Completación de datos faltantes

Los datos de varios países de América Latina son incompletos y no están actualizados, lo que provoca que muchos de los estudios de nivel mundial que utilizan los datos puedan llegar a conclusiones no precisas (Giddings & Soto, 2006). Asimismo, el Perú no es ajeno a esta problemática, es por ello la necesidad de completación de información de datos de precipitación. Para el presente estudio se utilizó el método de la transformada Wavelet (TW), para la completación de datos diarios de precipitación, la cual se encuentra instalada en el software WATER (Version 1.2). En la completación de datos se requirió dos estaciones, una con información completa (estación vecina) y otra con información incompleta.

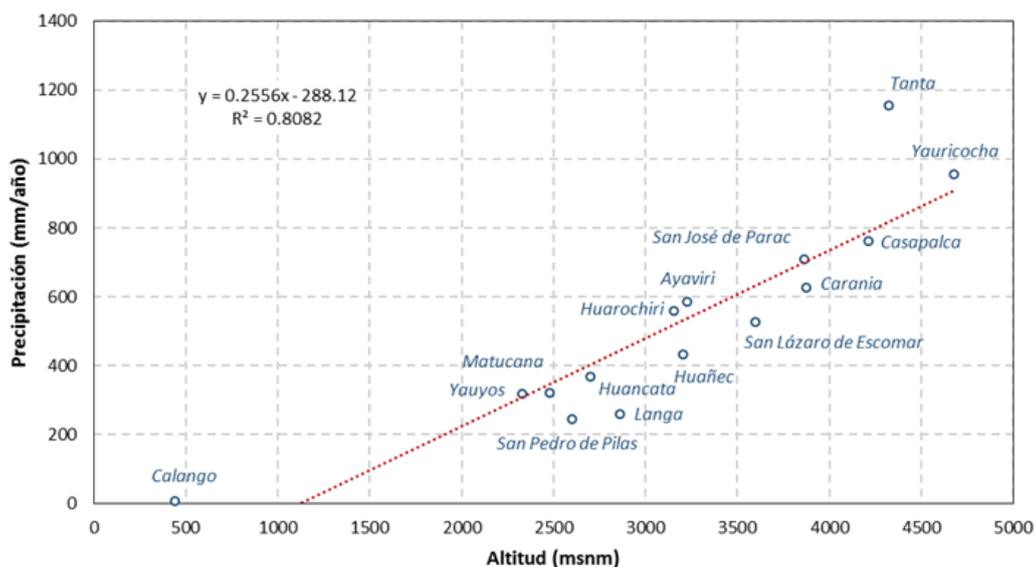


Figura 14: Gradiente de precipitación media anual de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Fuente: Elaboración propia

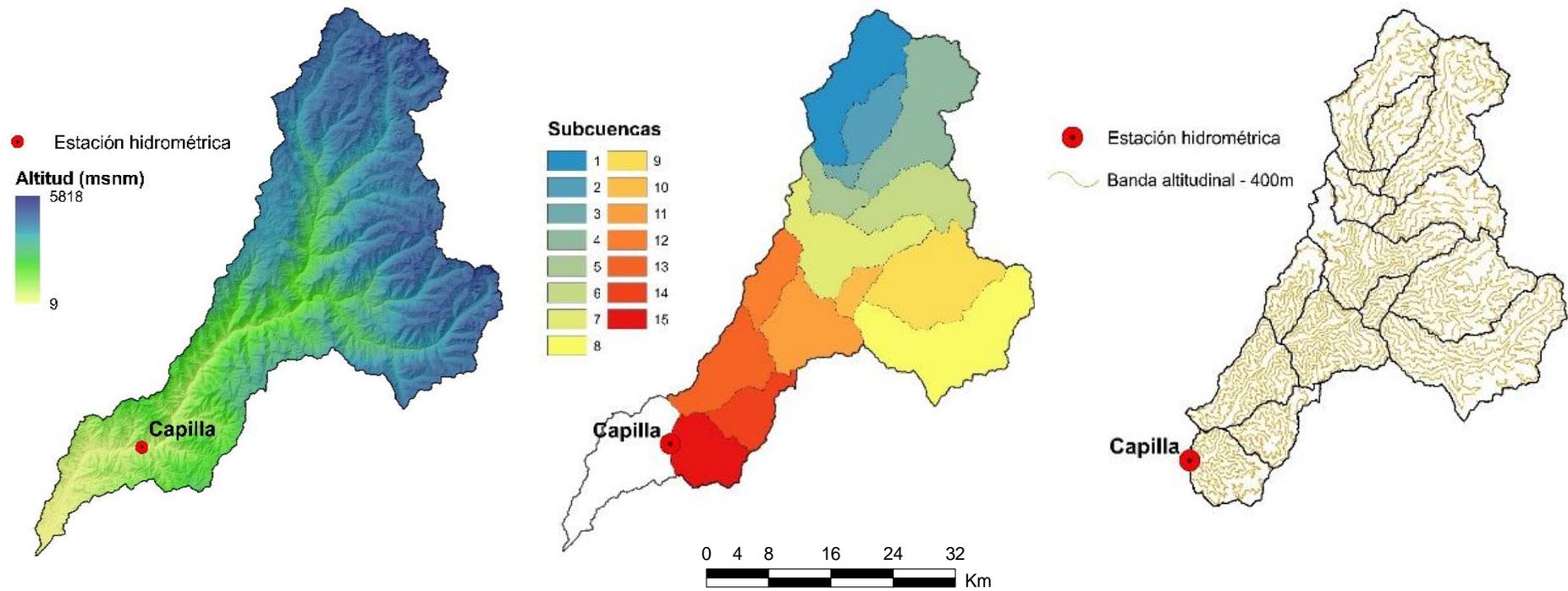
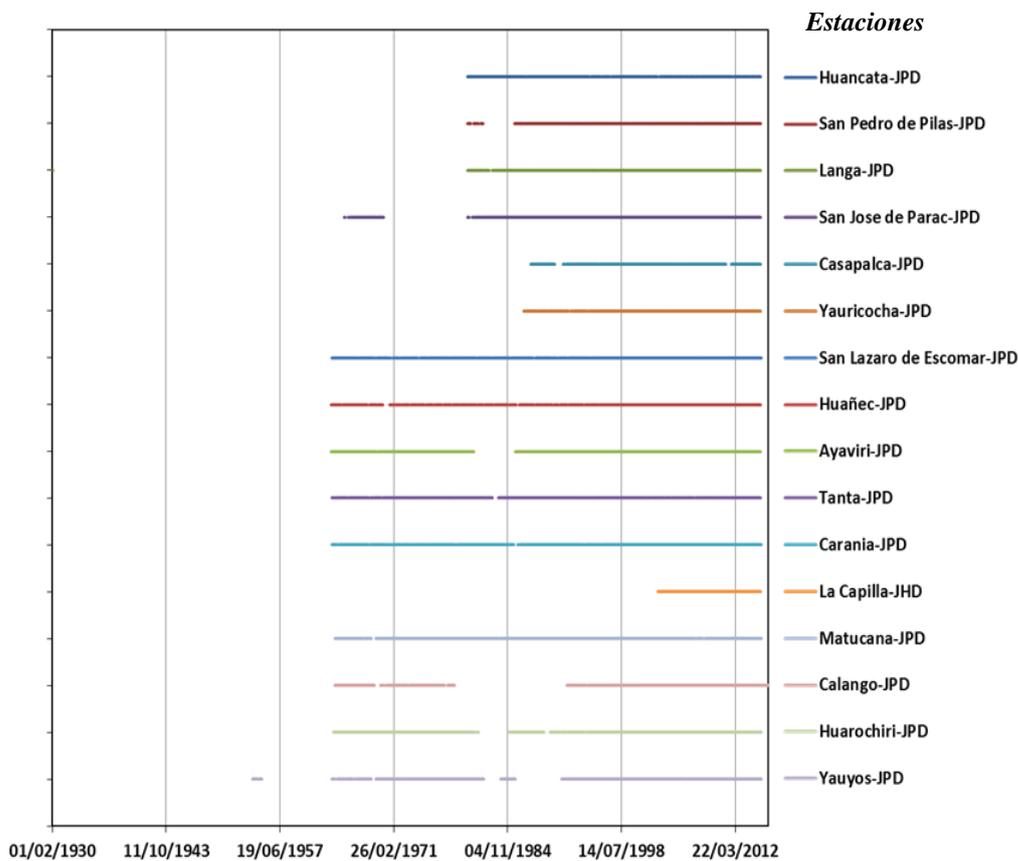


Figura 15: Variación altitudinal de la cuenca del río Mala (izquierda), subdivisión de la cuenca y subcuencas a partir del punto de control hidrométrico La Capilla (centro) y bandas altitudinales cada 400 m (derecha).

Fuente: Elaboración propia

## f. Selección del periodo de estudio

El periodo de estudio para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Mala fue definido a partir de las series completas de caudales medios diarios en la estación hidrométrica La Capilla. De acuerdo a ello, se seleccionaron solo las estaciones meteorológicas cuyas series temporales presentan el menor porcentaje de vacíos posibles dentro del periodo de estudio (series con porcentaje de vacíos menor al 5 por ciento). En la Figura 13 se muestra las longitudes de las series de datos hidrometeorológicos disponibles.



\* JHD: Periodo de caudal diario, JPD: Periodo de precipitación diaria.

Figura 16: Periodo y/o longitud de estaciones hidrometeorológicas disponibles.

Fuente: Elaboración propia

## g. Análisis exploratorio de datos (AED)

Como etapa previa a la modelización en la cuenca del río Mala, se realizó el análisis exploratorio de datos (AED) para las variables de precipitación, temperatura y caudal, las cuales constan de la elaboración de diagramas box plot e histogramas; asimismo, se realizó la prueba de consistencia de datos mediante el análisis doble masa para la variables de precipitación.

En el análisis de curva doble masa, las estaciones se agruparon conformando dos bloques pluviométricos interdependientes de precipitación. El agrupamiento de las estaciones para formar un bloque se ha realizado en base a criterios de ubicación geográfica y correlaciones entre estaciones.

#### **h. Identificación de zonas homogéneas**

No existen métodos objetivos universalmente aceptados de zonas o regionalización homogénea. Esto es debido a la complejidad de los factores que afectan la generación de inundaciones. Hubo varios intentos de diferentes autores para identificar regiones hidrológicamente homogéneas basadas en consideraciones geográficas o características de datos de inundación, o combinación de ambos (Kachroo et al., 2000).

Una etapa previa al análisis de curva de doble masa es la identificación de zonas homogéneas, es decir regiones pluviométricas que poseen similar comportamiento. Para la presente tesis se identifica las regiones pluviométricas en base a la variable de precipitación mensual, para este caso se realizó una matriz de correlación ( $r$ ) de todas las estaciones utilizadas en el estudio, con la finalidad de formar grupos de estaciones que presentan alta correlación entre estaciones de un mismo grupo.

#### **i. Análisis de evapotranspiración**

Por otro lado, la evapotranspiración fue calculado por el método Turc, Mcguinness y Oudin que se encuentra incluido dentro de la plataforma RS- Minerve; finalmente el método que mejores resultados se obtuvieron, fue el método Turc,

La evapotranspiración potencial propuesto por Turc (1955, 1961) se presenta en la ecuación:

$$ETP = CoeffETP * K * \frac{T}{T+15} * (R_g + 50) \quad \text{Si } T > 0$$

$$ETP = 0 \quad \text{Si } T \leq 0$$

En donde T: Temperatura del aire en °C,  $R_g$ : Radiación global (cal/cm<sup>2</sup>/día), K: Constante

Valor de la constante K es:

$$K = 0.4 \quad \text{Si mes} \neq \text{Febrero}$$

$$K = 0.37 \quad \text{Si mes} = \text{Febrero}$$

### **3.3.2. Calibración y validación los modelos hidrológicos**

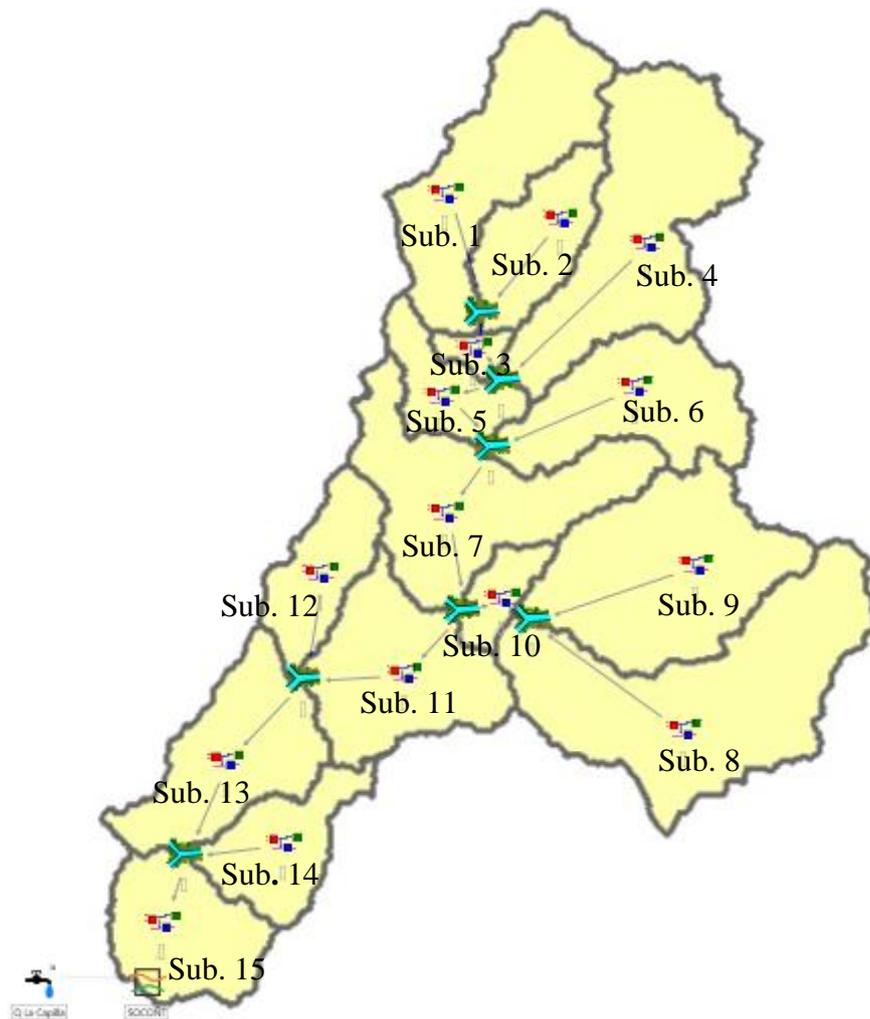
Después de la preparación de la información de entrada que requiere la plataforma RS-Minerve, se realiza la construcción de una base de datos de acuerdo al formato de la plataforma, asimismo se elabora el esquema hidráulico de la cuenca del río Mala.

#### **a. Construcción de la base de datos**

La información hidrometeorológica en la plataforma RS Minerve, a través de la construcción de un database, permite la mejora en la administración de la información así como en la interpolación y obtención de información hidrometeorológica (P, T, ETP) para estación virtual de cada objeto hidrológico. Se elaboró las respectivas bases de datos incorporando la información diaria de precipitación y temperatura de 15 estaciones meteorológicas y la información observada de caudales de una estación hidrológica (La Capilla) para el caso de la cuenca del río Mala. El método de interpolación utilizado para la especialización de la precipitación y temperatura fue el Inverso de la Distancia mientras que se utilizó la metodología de Turc para el cálculo de la ETP a partir de datos de temperatura media diaria, estos métodos se encuentran dentro de la plataforma RS- Minerve.

#### **b. Construcción del esquema hidráulico**

De la delimitación de la cuenca en estudio, se construyó el esquema hidráulico de la cuenca del río Mala (Figura 17), haciendo el uso del módulo RS GIS de la plataforma RS Minerve, constituyendo 15 subcuencas generadas dentro de la cuenca del río Mala. Cabe señalar que dentro de cada subcuenca existen bandas altitudinales cada 400 metros.



*Figura 17: Esquema hidráulico del modelo hidrológico de la cuenca del río Mala elaborado en la plataforma RS Minerve, teniendo como punto de calibración la estación hidrológica La Capilla.*

*Fuente: Elaboración propia*

### **c. Calibración**

En principio la cuenca del río Mala pertenece a un sistema no regulado, debido a que no cuenta con obras que almacenan el recurso hídrico, a pesar que existen obras de represamiento como las lagunas de Suyoc y Chumpicocha que en la actualidad no funcionan, es debido a esto que no se requiere la naturalización del escurrimiento superficial en la estación hidrológica la Capilla.

Los modelos hidrológicos Sacramento, Socont, Hbv y Gr4j, en principio, fueron calibrados de manera manual, con la finalidad de ver la influencia que tiene cada parámetro con el modelo, para entender el proceso físico-matemático. Seguidamente se realizó la calibración automática mediante el algoritmo SCE-UA, teniendo este último un máximo de 7000 iteraciones.

Evolución compleja de la barajada - Universidad de Arizona (SCE-UA) método fue desarrollado para obtener el mejor conjunto de parámetros tradicionales y su distribución posterior subyacente en un único ciclo de optimización. El objetivo es encontrar un solo mejor parámetro establecido en el espacio factible. Comienza con una muestra aleatoria de puntos distribuidos a lo largo del parámetro factible espacio y utiliza una adaptación del esquema de búsqueda Downhill Simplex (Nelder y Mead, 1965, citado en RS MINERVE-Technical Manual), para evolucionar constantemente a la población hacia las mejores soluciones en el espacio de búsqueda, abandonando progresivamente la ocupación de las regiones con menor probabilidad posterior (Mariani et al., 2011, citado en RS MINERVE-Technical Manual).

#### **d. Análisis de sensibilidad de los parámetros**

Mediante el análisis de sensibilidad podemos entender cómo funciona el modelo o por que no funciona correctamente la cual podemos aprender más acerca de su funcionamiento. Algo que se debe entender es que cada parámetro juega en el modelo un rol importante. Por la cual la sensibilidad del modelo al parámetro será equivalente a la sensibilidad del sistema al parámetro. Es por ello que para el presente estudio se realizó una variación de +/- 20 por ciento para cada parámetro obtenido en la calibración de cada modelo. Esto se realizó mediante la corrida del modelo para cada parámetro modificado mientras que los parámetros restantes permanecían constantes.

El análisis de sensibilidad se centró en determinar los parámetros más sensibles para cada modelo a partir de la variación del coeficiente de Nash y el Coeficiente de Pearson (r) dentro de la calibración.

#### **e. Validación temporal**

Tomando los parámetros obtenidos en la calibración se procedió a validar los caudales, frente a la información observada. El periodo que se tomó para la validación fue distinto al periodo de calibración.

### **3.3.3. Simulación de caudal en las subcuencas del rio Mala**

Después de obtenido los parámetros óptimos para los modelos hidrológicos y evaluar qué modelo presenta mejor desempeño en los indicadores de eficiencia, se realizó las simulaciones de los caudales en las 15 subcuencas aguas arriba de la estación hidrológica la Capilla.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Caracterización la zona de estudio en cuanto a la hidrología y geomorfología

La cuenca del río Mala presenta una superficie de 2332.09 km<sup>2</sup>, y de acuerdo a la clasificación propuesta por Wu (1963) y Springall (1970) es una cuenca Intermedia-Grande, por lo que el almacenamiento en el cauce principal es más pronunciado a comparación de las cuencas pequeñas donde generalmente la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura (Campos, 1998).

El factor de forma (Ff), coeficiente de compacidad (Cc), relación de elongación (Re) y relación de circularidad (Rc), son indicadores de la forma de una cuenca. Los valores de Ff, Cc, Re y Rc, son 0.13, 1.98, 0.51 y 0.25 respectivamente. Villon (2002) afirma que las cuencas con  $Ff < 1$  tienden a ser alargadas, Gisbert (2005) menciona que valores de Cc mayores a 1.5 es un indicador de formas oblongas, y valores de Re que se alejan de la unidad son propias de cuencas que pierden la forma circular, Strahler (1952) asevera que valores de Re menores a 1 corresponden a cuencas alargadas. En este sentido, es evidente caracterizar la cuenca Mala como alargada u oblonga, de alta capacidad receptora de precipitación y que se encuentra menos sujeta a crecientes (Monsalve, 1999).

En la Figura 18, se muestra la curva hipsométrica en la cual se identifica que la altitud máxima, mínima y mediana son 5818, 9 y 3688.5 msnm, respectivamente. Asimismo se observa tres tramos principales: un primer tramo que corresponde a la cabecera de la cuenca y comprende entre 5818 – 5044 msnm, zona que se caracteriza por la fuerte pendiente del terreno y gran poder de erosión de las aguas de escorrentía, que da por resultado la forma V en el valle y sus quebradas. La segunda zona de la curva hipsométrica comprende entre los 5044 - 4269 msnm, y se caracteriza por la disminución paulatina de la pendiente. La tercera zona oscila entre los 4269 – 9 msnm, el valle se ensancha notablemente y reduce su pendiente, permitiendo la deposición de los materiales en suspensión que lleva el río. Asimismo en la Figura 14 se describe el polígono de frecuencia y rectángulo equivalente de la cuenca del río Mala, en ello se observa que la mayor área se encuentra concentrada entre los 3495 m.s.n.m y los 5044 m.s.n.m (52.81%). Debido a que dentro de este rango de

altitudes se presentan las mayores precipitaciones, esta cuenca presenta una alta capacidad de recepción. Asimismo la cuenca del río Mala presenta un rectángulo equivalente que presenta lados de longitud  $L= 1554.54$  Km. y  $l = 14.99$  Km.

En el Cuadro 13 se muestra el resumen de la información geomorfológica de la cuenca del río Mala.

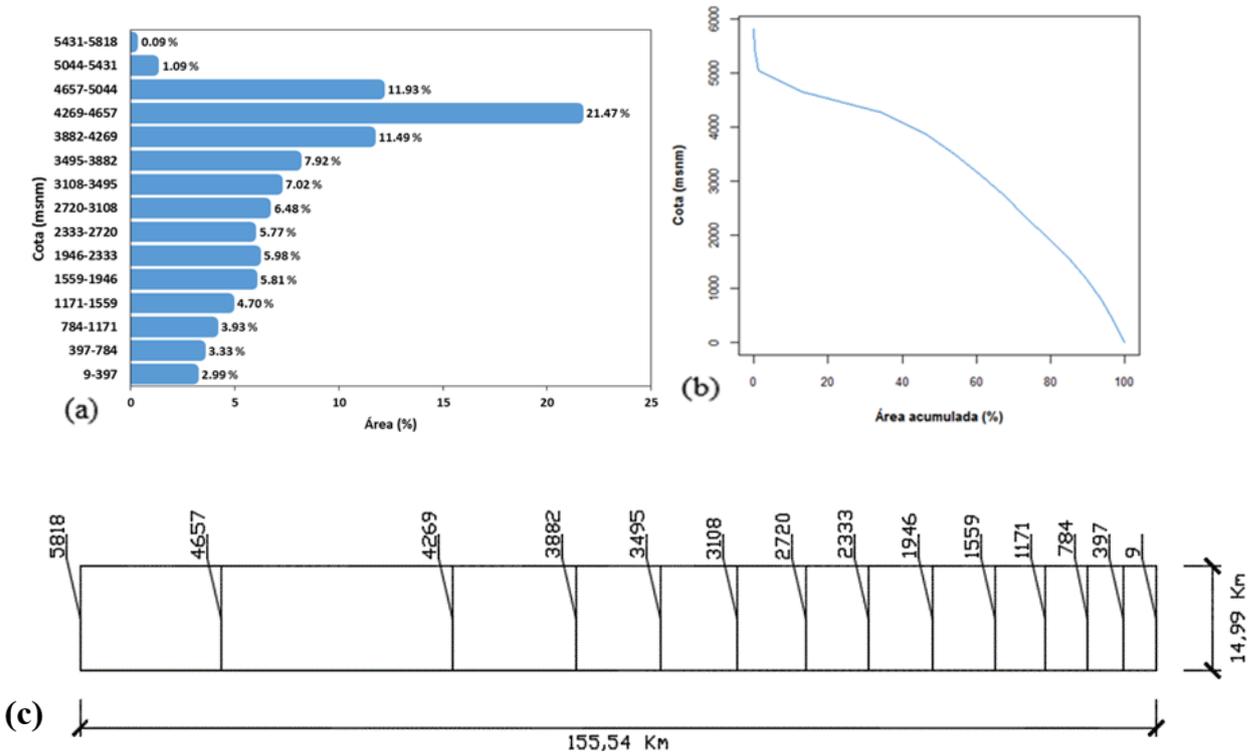


Figura 18: Polígono de frecuencia (a), curva hipsométrica (b) y rectángulo equivalente (c) de la cuenca del río Mala.

Fuente: Elaboración propia

*Cuadro 13: Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Mala.*

	PARAMETROS	Valor
	Superficie (Km <sup>2</sup> )	2332.09
	Perímetro (km)	339.33
	Pendiente media de la cuenca (%)	48.18
De Relieve	Altitud media ponderada de la cuenca (m.s.n.m)	3390.00
	Altitud máxima (m.s.n.m)	5818.00
	Altitud mínima (m.s.n.m)	9
	Rectángulo equivalente: Lado menor (km)	14.99
	Lado mayor (Km)	155.54
	Coefficiente de masividad (m/Km)	1.45
	Coefficiente de compacidad	1.98
De Forma	Factor de forma	0.13
	Relación de elongación	0.51
	Relación de circularidad	0.25
	Longitud de cauce principal (Km)	132.74
	Pendiente equivalente constante del cauce principal (%)	3.76
	Orden de cuenca	7
De Drenaje	Frecuencia de corriente	0.59
	Densidad de drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	2.17
	Extensión media del escurrimiento (Km)	0.12
	Coefficiente de torrencialidad (mm/km <sup>2</sup> )	0.20
	Relación de bifurcación	1.82
	Tiempo de concentración (hr)	10.16

*Fuente: Elaboración propia*

#### **a. Análisis exploratorio de datos (AED)**

A continuación en la Figura 19, se muestra los registros diarios de precipitación de las estaciones empleadas para el presente estudio; mediante los gráficos se observa de manera visual la secuencia cíclica de precipitación y algunos saltos, las cuales serán analizadas en un análisis estadístico.

En la Figura 20 se aprecia diagramas de cajas (Box plot). En estos se observa claramente la presencia de un ciclo anual con máximos bien definidos en las estaciones Yauricocha, San Lazaro de Escomar y Tanta. En términos generales se puede observar que existe mayor variabilidad y magnitud de precipitaciones mensuales en los meses de diciembre a marzo, excepto la estación Calango que presentan las mayores precipitaciones acumuladas en los meses de enero a marzo.

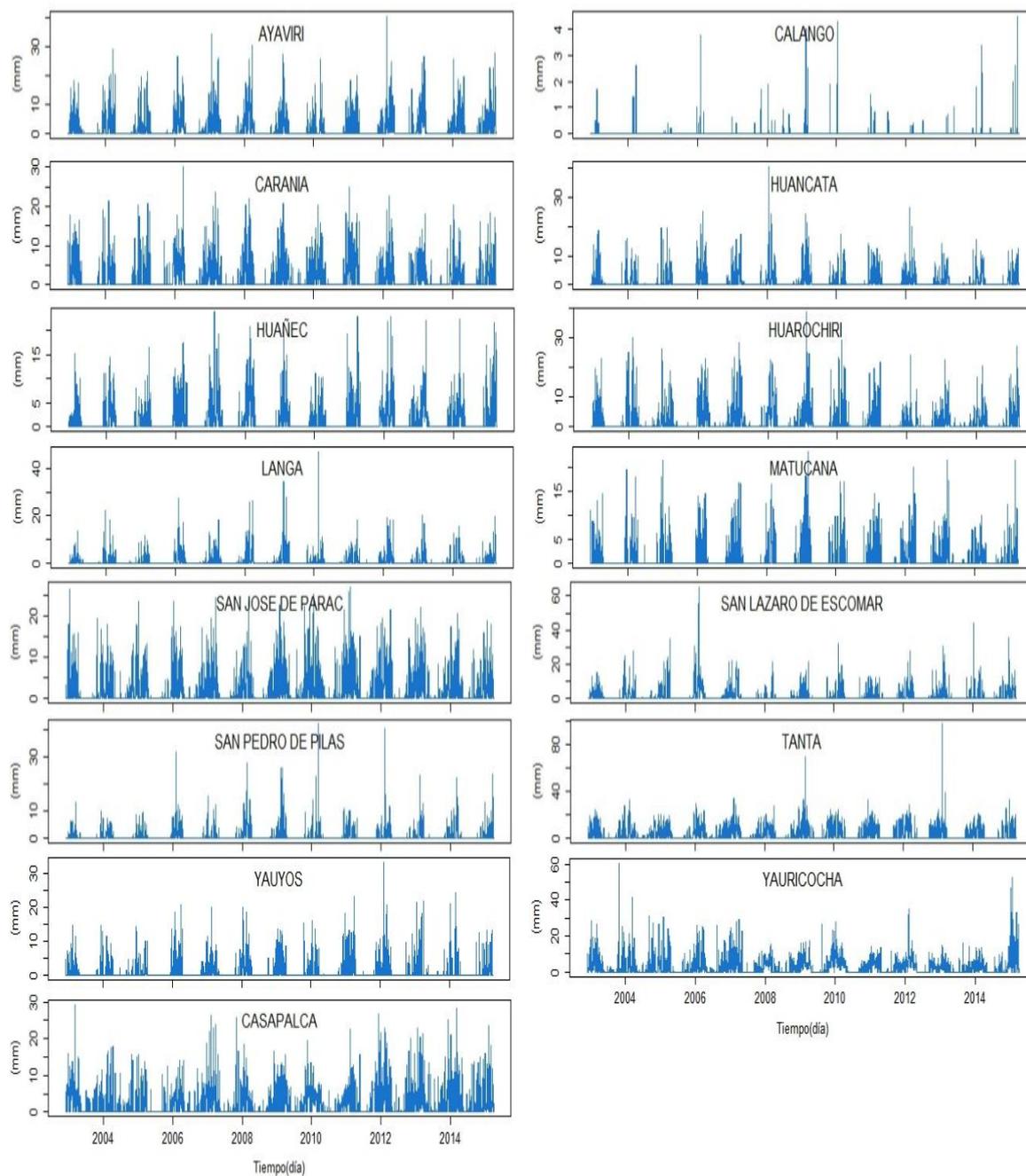
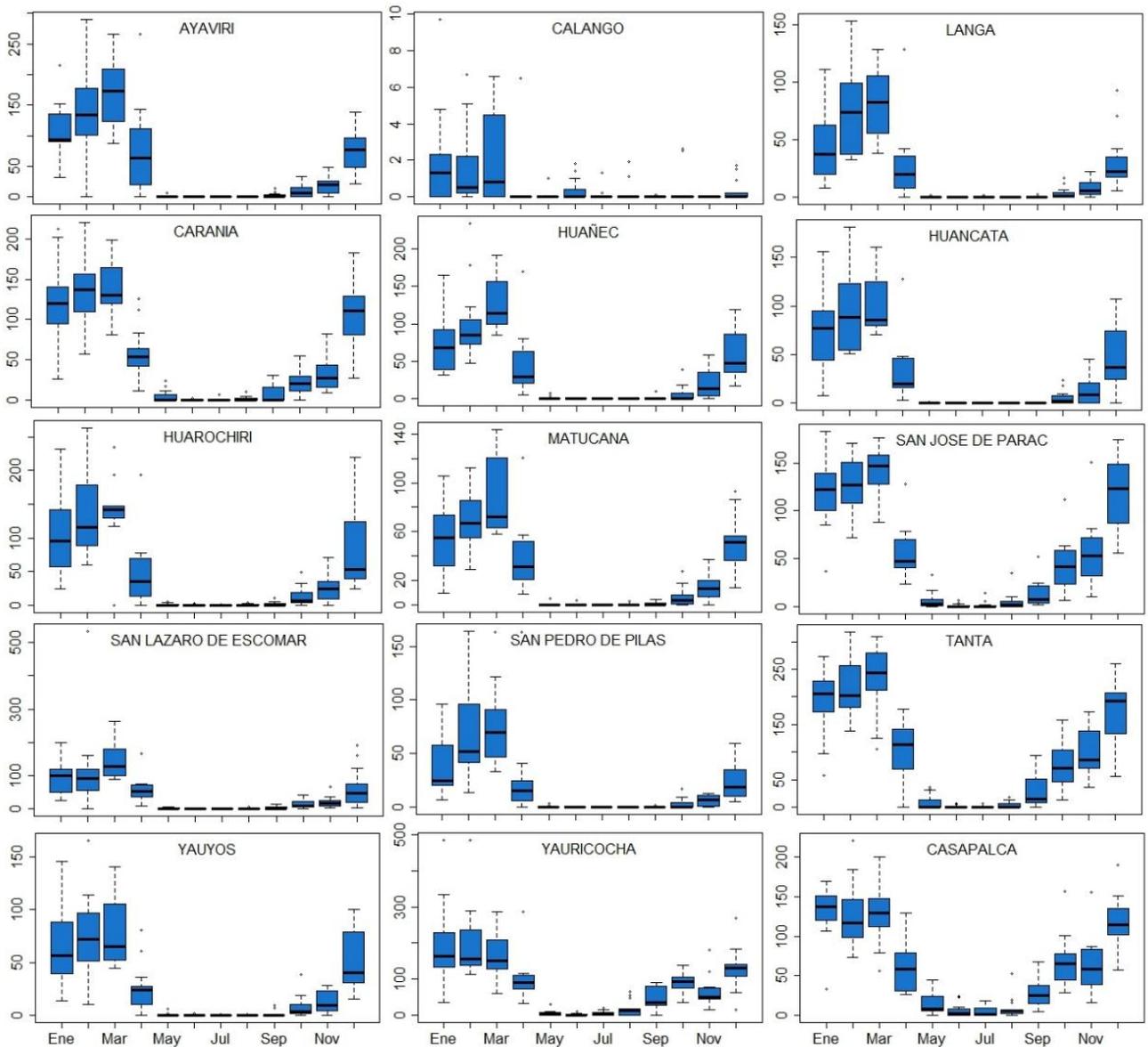


Figura 19: Serie de precipitación total diaria de las estaciones con periodo de 01/12/2002 - 31/03/2015.

Fuente: Elaboración propia



*Figura 20: Diagrama de cajas (Box Plot) de las precipitaciones acumuladas mensuales. Periodo: Diciembre 2002 a Marzo del 2015*

*Fuente: Elaboración propia*

En el Cuadro 14 se muestra el análisis estadístico de precipitación a nivel diario de cada una de las estaciones empleadas en el estudio. En un rango de altitud de 4214 a 4675 msnm se presentan precipitaciones medias diarias que oscilan de 2.1 a 3.2 mm, para el rango de 3154 a 3875 msnm existen precipitaciones medias diarias de 1.2 a 1.9 mm, mientras que para una altitud de 442 a 2860 msnm presentan precipitaciones medias de 0.02 a 1 mm. Las precipitaciones en la estación Yauricocha, que se encuentra a una altitud de 4675 msnm, presentan mayor variabilidad y con precipitaciones comprendidas en 0 a 29.3 mm

*Cuadro 14: Análisis estadístico de precipitación a nivel diario.*

ESTADISTICO	Ayaviri (3228 msnm)	Calango (442 msnm)	Carania (3875 msnm)	Huancata (2700 msnm)	Huañec (3205 msnm)	Huarochiri (3154 msnm)
n	4504	4504	4504	4504	4504	4504
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max.	40.20	4.50	30.10	40.30	23.80	38.50
Media	1.69	0.02	1.77	1.05	1.24	1.58
Var	14.81	0.04	12.22	7.30	7.72	14.18
Sd	3.85	0.20	3.50	2.70	2.78	3.77

ESTADISTICO	Langa (2860 msnm)	Matucana (2479 msnm)	San Jose de Parac (3866 msnm)	San Lazaro de Escomar (3600 msnm)	San Pedro de Pillas (2600 msnm)	Tanta (4323 msnm)
n	4504	4504	4504	4504	4504	4504
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max.	46.90	23.10	27.10	65.30	42.20	97.40
Media	0.75	0.91	1.98	1.48	0.70	3.23
Var	6.01	5.98	13.52	16.70	5.91	31.43
Sd	2.45	2.44	3.68	4.09	2.43	5.61

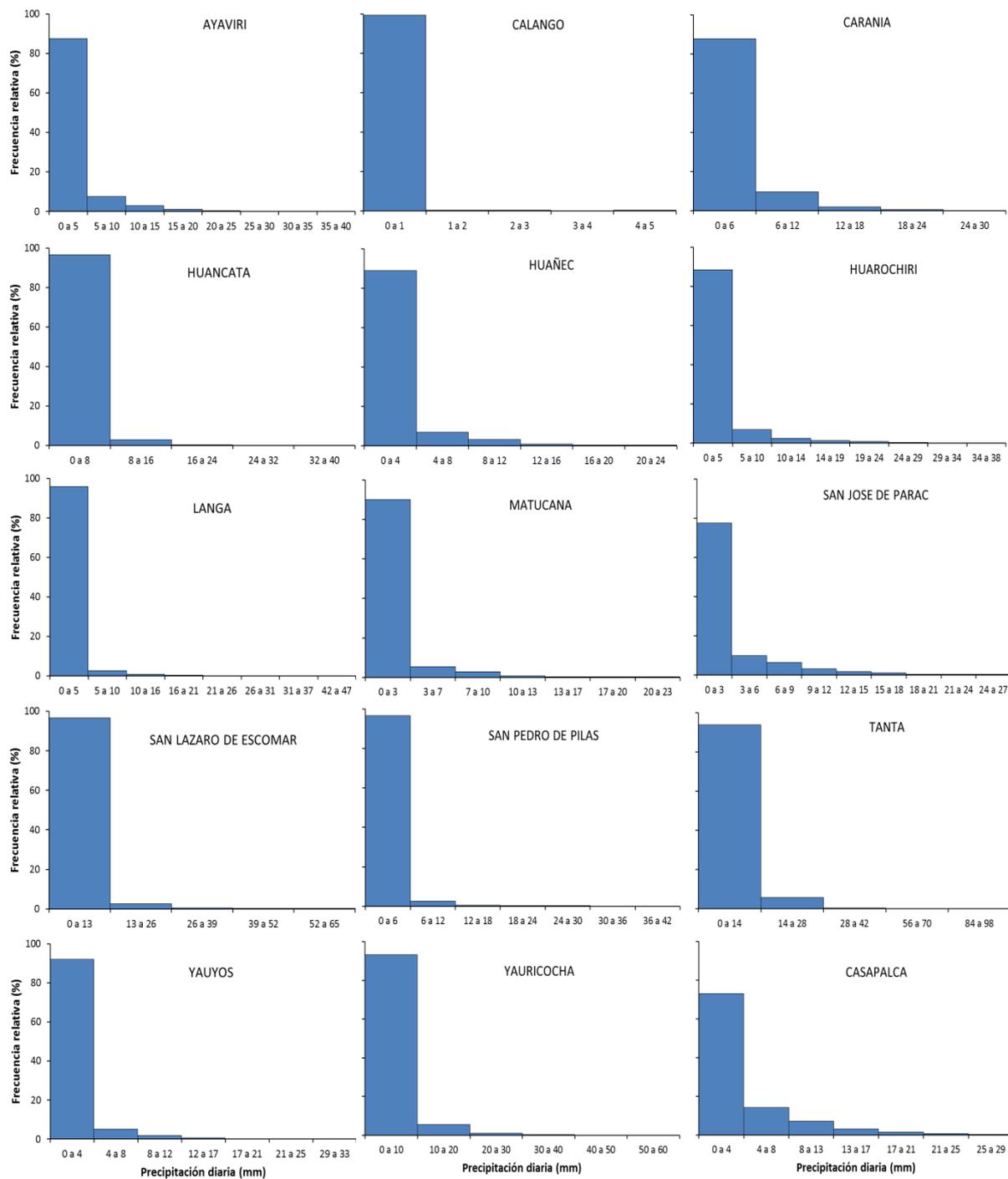
ESTADISTICO	Yauyos (2327 msnm)	Yauricocha (4675 msnm)	Casapalca (4214 msnm)
n	4504	4504	4504
Min.	0.00	0.00	0.00
Max.	33.00	60.40	29.30
Media	0.91	2.80	2.14
Var	6.55	22.02	12.92
Sd	2.56	4.69	3.59

*Fuente: Elaboración propia*

Asimismo, se realizó gráficas de distribución de frecuencias relativa porcentual presentes en la Figura 21, en ello muestra clara asimetría en las distribuciones; esto es debido a la escala diaria de trabajo, tomando en cuenta la predominancia de días con valor de precipitación nula (0.00mm).

- **Análisis de doble masa**

En la Figura 22, se muestra la matriz de correlación de precipitación de las estaciones. En ellos se puede observar que existen estaciones con correlación mayor a 0.8, las cuales se fueron agrupando hasta formar dos grupos que presenta un mismo comportamiento en la precipitación.



*Figura 21: Distribución de frecuencia relativa porcentual (%) diaria de precipitación. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015*

*Fuente: Elaboración propia*

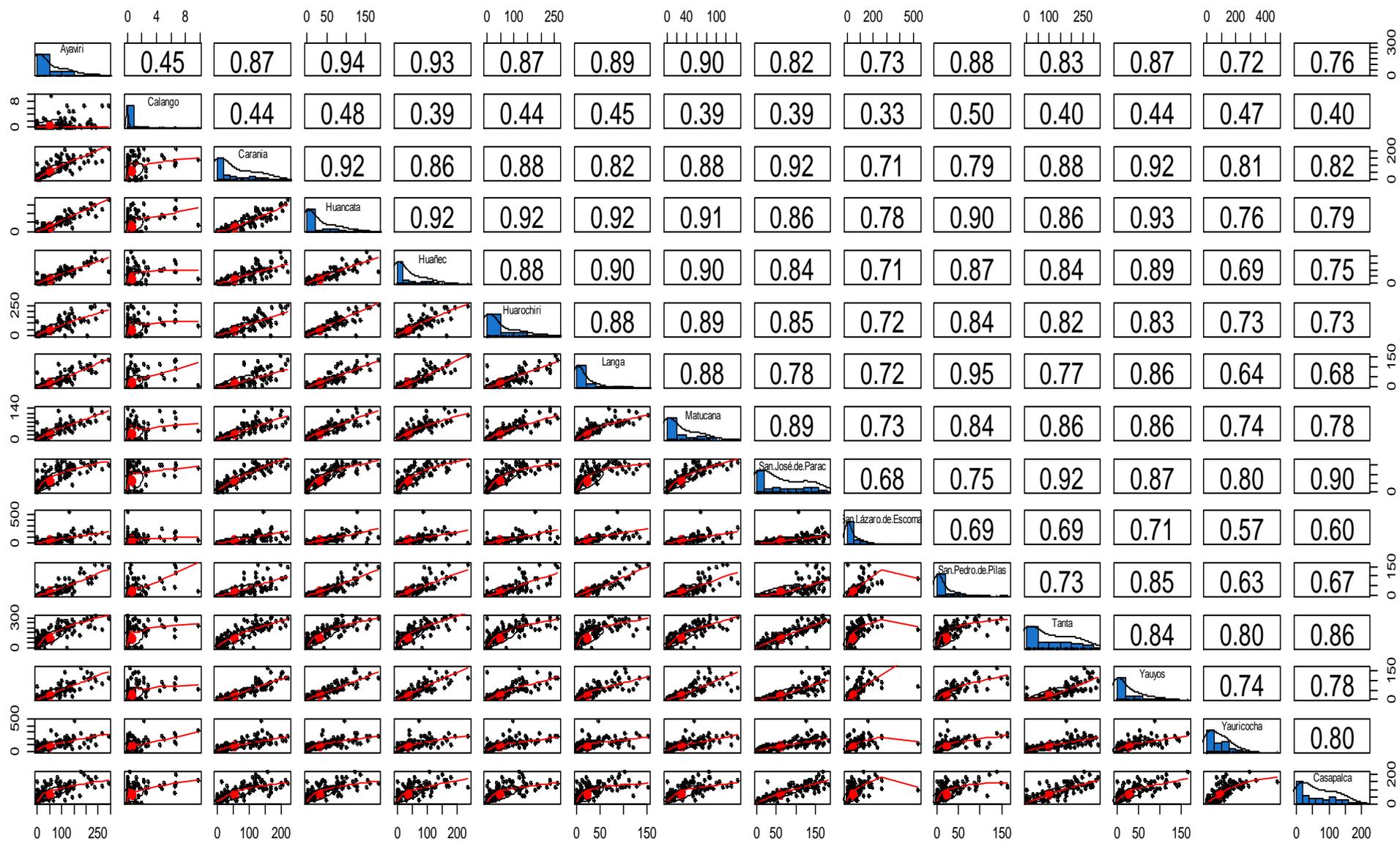


Figura 22: Matriz de correlación múltiple de precipitación acumulada mensual de las estaciones meteorológicas de estudio.

Fuente: Elaboración propia

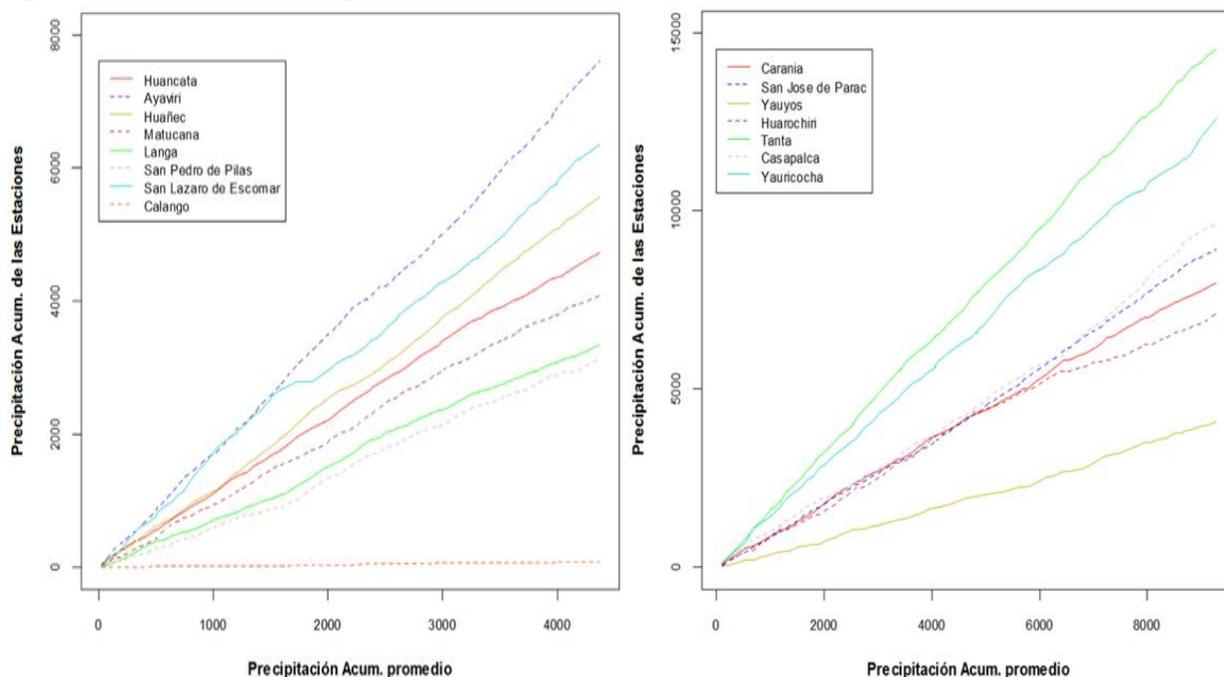
A continuación, en el Cuadro 15, se muestra los grupos formados a partir de los criterios de correlación y ubicación geográfica.

*Cuadro 15: Grupos de estaciones para el análisis de curva de doble masa.*

Grupo 1:	Huancata, Ayviri, Huañec, Matucana, Langa, San Pedro de Pilas, San Lazaro de Escomar y
Grupo 2:	Carania, San Jose de Parac, Yauyos, Huarochiri, Tanta, Casapalca y Yauricocha.

*Fuente: Elaboración propia*

A continuación en la Figura 23 se aprecia el análisis de la curva de doble masa de los grupos 1 y 2; en ello se observa un claro alineamiento a una recta en la estaciones, excepto en la estación Langa del grupo 1 y Huarochiri del grupo 2, la cual presentan un ligero desvío y que será analizado en un posterior análisis estadístico.



*Figura 23: Análisis de doble masa del grupo 1 (margen izquierda) y grupo 2 (margen derecha).*

*Fuente: Elaboración propia*

- **Análisis de homogeneidad**

El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba t (prueba de hipótesis), si los valores medios ( $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ ) de las submuestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% de significación (Villon 2011); además se considera que, el valor absoluto del t de Student calculado ( $T_c$ ) sea menor o igual al t de Student obtenido de la tabla estadística ( $T_t$ ). Asimismo, se realizó la consistencia de la desviación estándar, la cual

consiste en probar, mediante la prueba F, si los valores de las desviaciones estándar de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes, con un 95% de probabilidad de significación; además se considera que, el F calculado (Fc) debe ser menor o igual al F tabular (Ft), obtenida de la tabla estadística, para que la serie sea consistente.

En el Cuadro 16 se muestra el análisis estadístico de las precipitaciones diarias de las estaciones de estudio, la cual se prueba que son series consistentes para el análisis de la media, y para el análisis de la desviación estándar se tuvo algunas inconsistencias como es el caso de la estación Langa y Huarochirí, sin embargo las diferencias en la desviaciones estándar para cada periodo son mínimas, por consiguiente dichas estaciones fueron empleadas para el presente estudio hidrológico.

*Cuadro 16: Resultados de la prueba de homogeneidad en la precipitación diaria. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.*

ESTACION	PERIODO	nº de meses	Media	Desviación Estandar (S)	Tc	$\alpha$	Tt	Fc	Ft	Observación
Ayaviri	ene-02/ago-08	2101	1.65	3.79	0.71	0.025	1.96	1.06	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	1.73	3.90						(Ft>Fc) Consistente
Huancata	ene-02/dic-07	1857	0.97	2.62	1.70	0.025	1.96	1.10	1	(Tt>Tc) Consistente
	ene-08/mar-15	2647	1.11	2.76						(Ft>Fc) Inconsistente
Huañec	ene-02/ago-08	2101	1.20	2.75	0.83	0.025	1.96	1.03	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	1.27	2.80						(Ft>Fc) Inconsistente
Matucana	ene-02/ago-08	2101	1.65	3.79	0.71	0.025	1.96	1.06	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	1.73	3.90						(Ft>Fc) Inconsistente
Langa	ene-02/ago-08	2101	0.72	2.38	0.71	0.025	1.96	1.12	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	0.77	2.52						(Ft>Fc) Inconsistente
San Pedro de Pilas	ene-02/ago-08	2101	0.63	2.08	1.52	0.025	1.96	1.68	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	0.77	2.70						(Ft>Fc) Inconsistente
San Lazaro de Escomar	ene-02/ago-08	2101	1.39	3.67	0.31	0.025	1.96	1.05	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	1.43	3.58						(Ft>Fc) Inconsistente
Calango	ene-02/ago-08	2101	0.02	0.16	1.23	0.025	1.96	1.98	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	0.02	0.23						(Ft>Fc) Inconsistente
Carania	ene-02/dic-07	1857	1.72	3.52	0.81	0.025	1.96	1.02	1	(Tt>Tc) Consistente
	ene-08/mar-15	2647	1.81	3.48						(Ft>Fc) Inconsistente
San Jose de Parac	ene-02/abr-12	3439	2.01	3.74	0.69	0.025	1.96	0.85	1	(Tt>Tc) Consistente
	may-12/mar-15	1065	1.92	3.45						(Ft>Fc) Consistente
Yauyos	ene-02/ago-08	2101	0.02	0.16	1.23	0.025	1.96	1.98	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	0.02	0.23						(Ft>Fc) Inconsistente
Huarochiri	ene-02/dic-05	1127	1.44	3.71	1.50	0.025	1.96	1.04	1	(Tt>Tc) Consistente
	ene-06/mar-15	3377	1.63	3.78						(Ft>Fc) Inconsistente
Tanta	ene-02/ago-08	2101	3.09	5.09	1.22	0.025	1.96	1.40	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	3.35	6.02						(Ft>Fc) Inconsistente
Casapalca	ene-02/mar-05	852	2.12	3.41	0.19	0.025	1.96	0.88	1	(Tt>Tc) Consistente
	abr-05/mar-15	3652	2.15	3.64						(Ft>Fc) Consistente
Yauricocha	ene-02/ago-08	2101	2.69	4.87	1.44	0.025	1.96	0.87	1	(Tt>Tc) Consistente
	sep-08/mar-15	2403	2.89	4.53						(Ft>Fc) Consistente

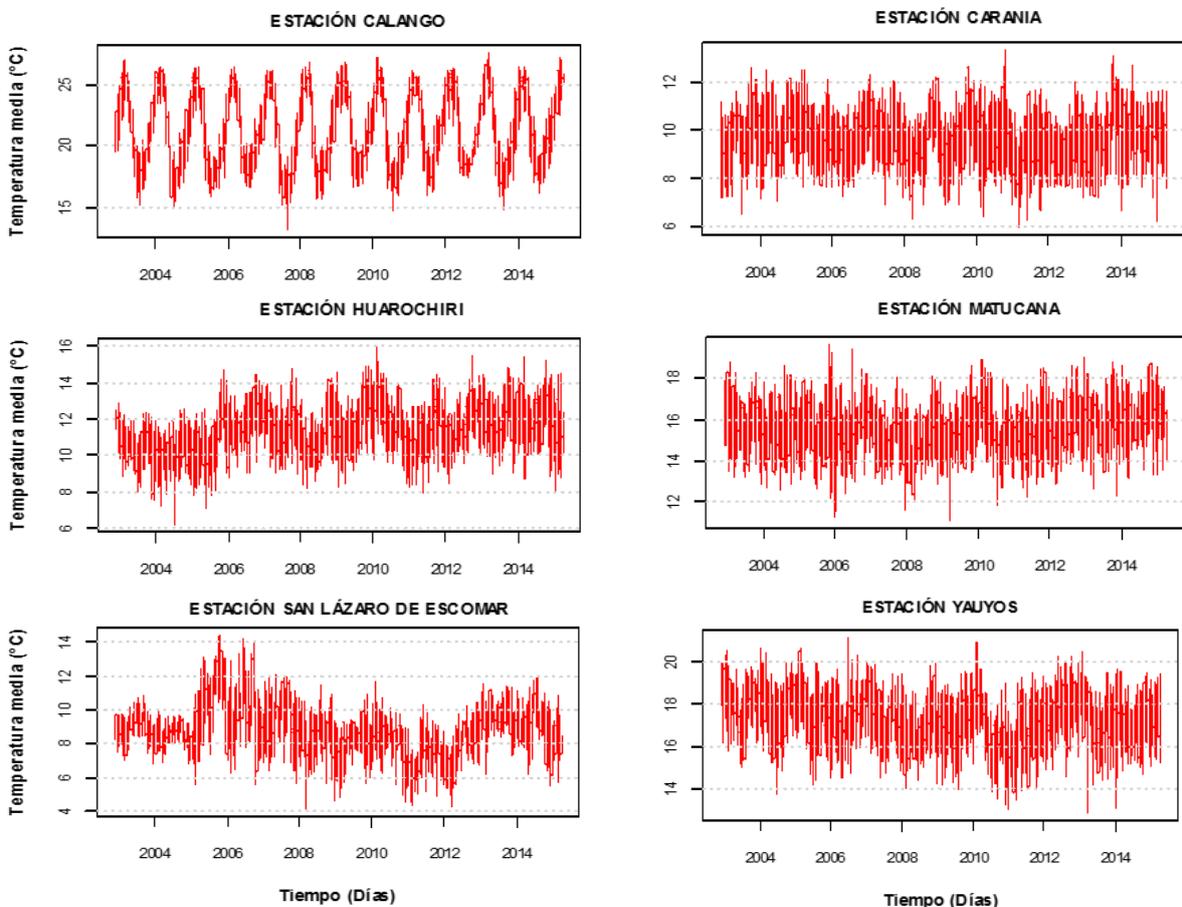
*Fuente: Elaboración propia*

### a. Análisis de temperatura

En el Cuadro 17 se muestra que la estación Carania, ubicada a una altitud de 3875 msnm, se presentan la temperatura promedio diario más bajo; mientras que en la estación Calango, con una altitud de 442 msnm, presentan las temperaturas promedio diario más elevado. Asimismo, en la Figura 24 se aprecia la variabilidad cíclica de las series de tiempo que se tiene de las temperaturas medias diarias.

*Cuadro 17: Resumen estadístico de las temperaturas medias diarias de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.*

ESTADISTICO	Calango (442 msnm)	Carania (3875 msnm)	Huaroquiri (3154 msnm)	Matucana (2479 msnm)	San Lazaro de Escomar (3600 msnm)	Yauyos (2327 msnm)
n	4504	4504	4504	4504	4504	4504
Min.	13.05	5.90	6.20	11.10	4.10	12.85
Max.	27.60	13.30	16.00	19.60	14.40	21.15
Media	21.34	9.70	11.39	15.58	8.80	17.31
Var.	8.97	1.06	1.67	1.22	2.14	1.39
Sd.	2.99	1.02	1.27	1.10	1.46	1.18



*Figura 24: Serie temporal de las temperaturas promedio diario. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.*

*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 25, se muestran los histogramas de frecuencia relativa porcentual de las temperaturas medias diarias, las cuales muestran una distribución normal, excepto la estación Calango que presento una distribución bimodal.

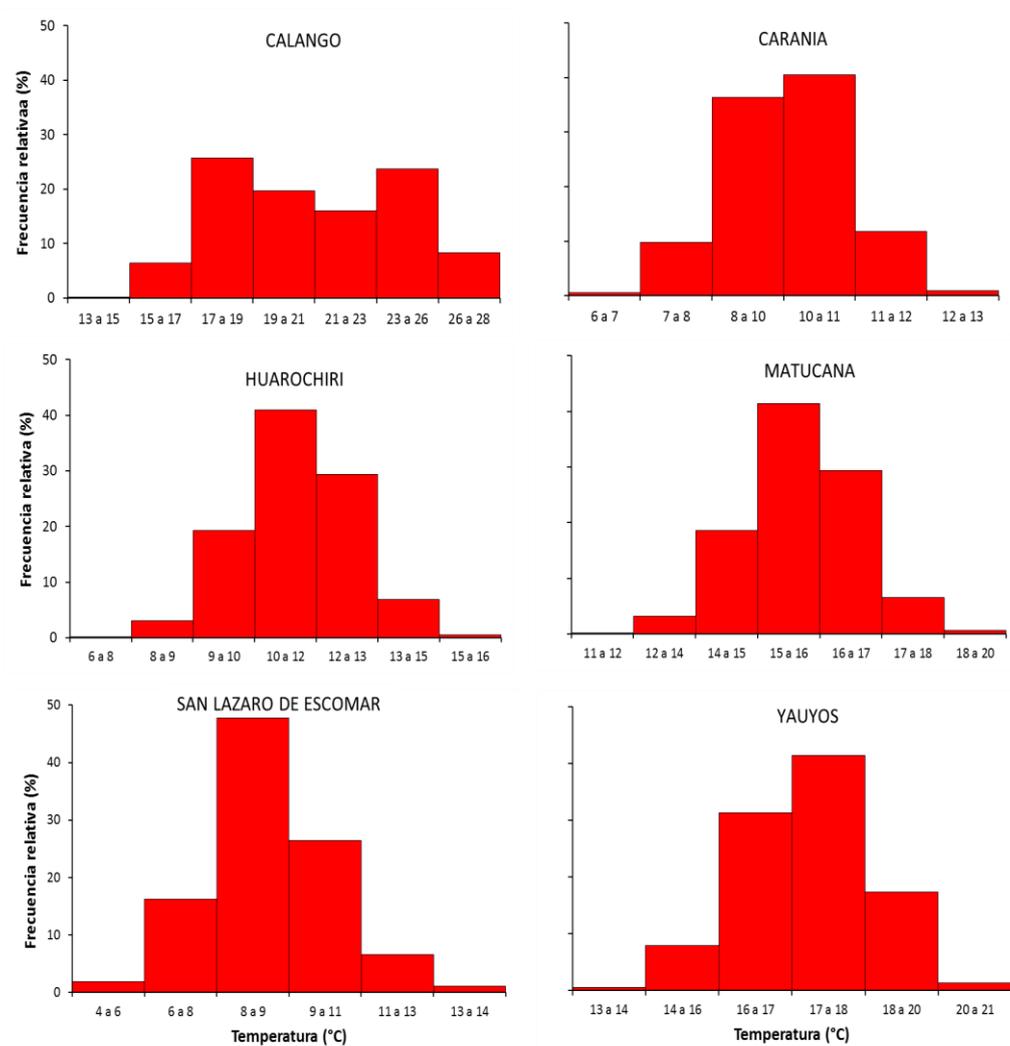


Figura 25: Histograma de frecuencia absoluta diaria de la temperatura. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.

Fuente: Elaboración propia

### b. Análisis de evapotranspiración

En la Figura 26 se muestra la evapotranspiración areal diario, en ello se observa un máximo valor alcanzado de 3.8 mm en el mes de noviembre, y un mínimo de 2.3 mm presentándose en el mes de marzo. El valor promedio de la serie de datos es de 2.99 mm.

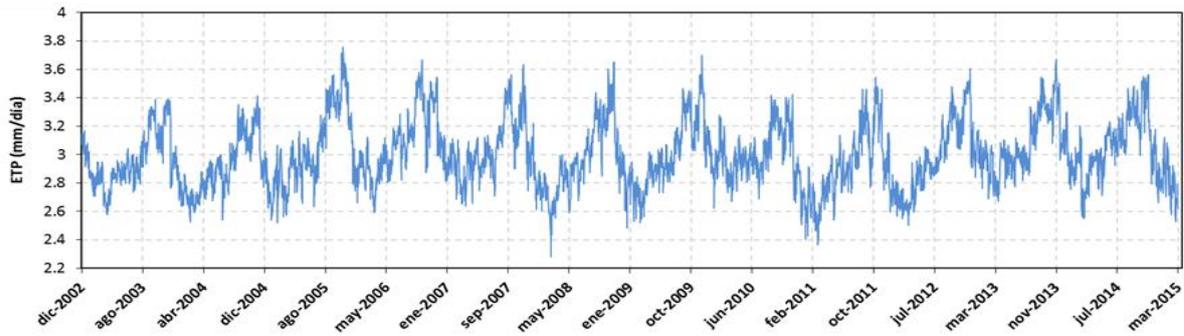


Figura 26: Variación temporal de la evapotranspiración potencial diaria arial, en la cuenca del rio Mala. Periodo: 01/12/2002 al 31/12/2015.

Fuente: Elaboración propia

### c. Análisis de caudal

En la Figura 27 se observa el contraste entre la precipitación areal y el caudal observado (Est. La capilla) a paso mensual; en ello se muestra que los caudales medios ocurridos en abril del 2006, abril del 2007 y marzo del 2008, con valores de 97, 100 y 96 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, representan una buena respuesta de la cuenca, frente a la precipitación areal, cuyo acumulado mensual superaron los 150 mm para esas fechas.

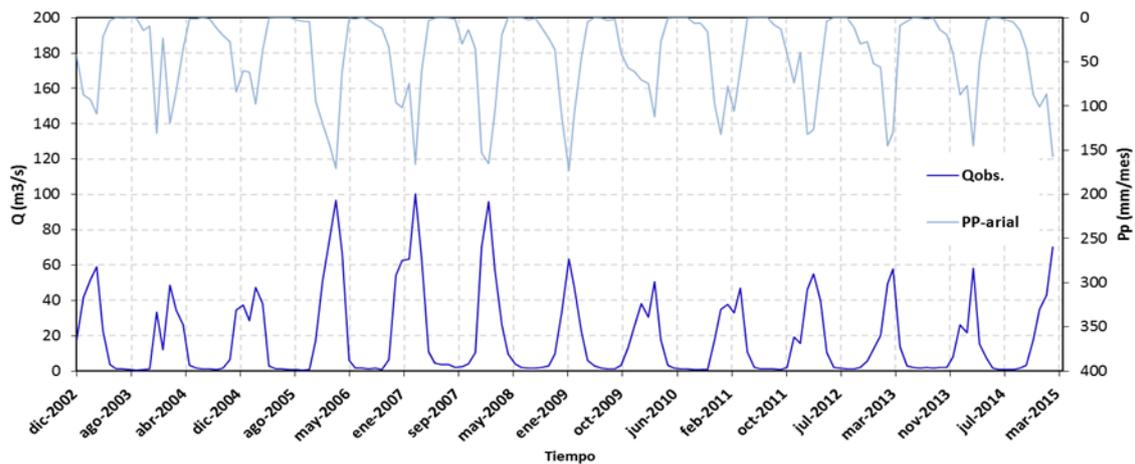


Figura 27: Contraste de la serie de caudales medios diario y precipitación areal, en la cuenca del rio Mala.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 28 se observa el histograma de caudales medios diarios observados y diagrama de cajas (Box Plot) de caudales medio mensual, de la estación hidrológica La Capilla. Según el histograma de frecuencia los caudales con mayor registro presentan valores de 0 a 10 m<sup>3</sup>/s; mientras que en el diagrama de cajas de caudales medios mensuales, existen mayor variabilidad y magnitud, en los meses de diciembre a abril.

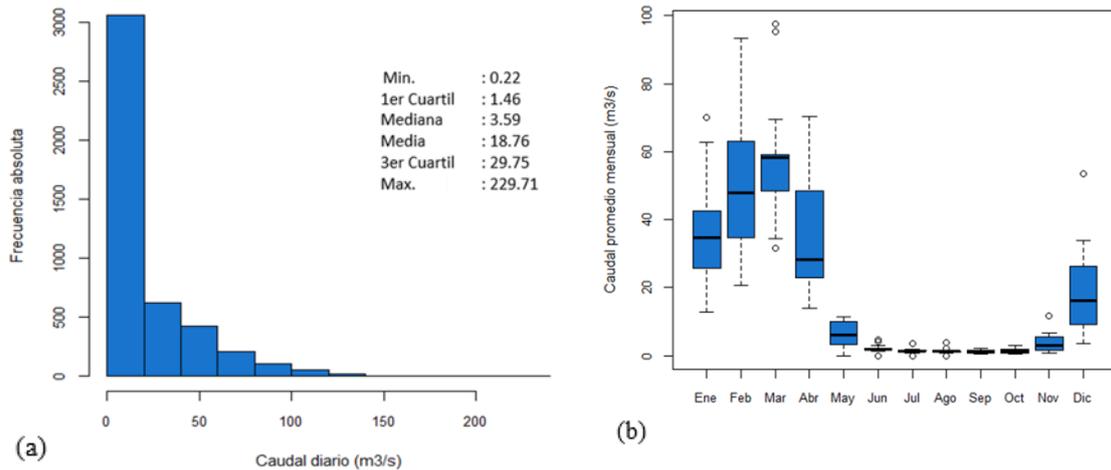
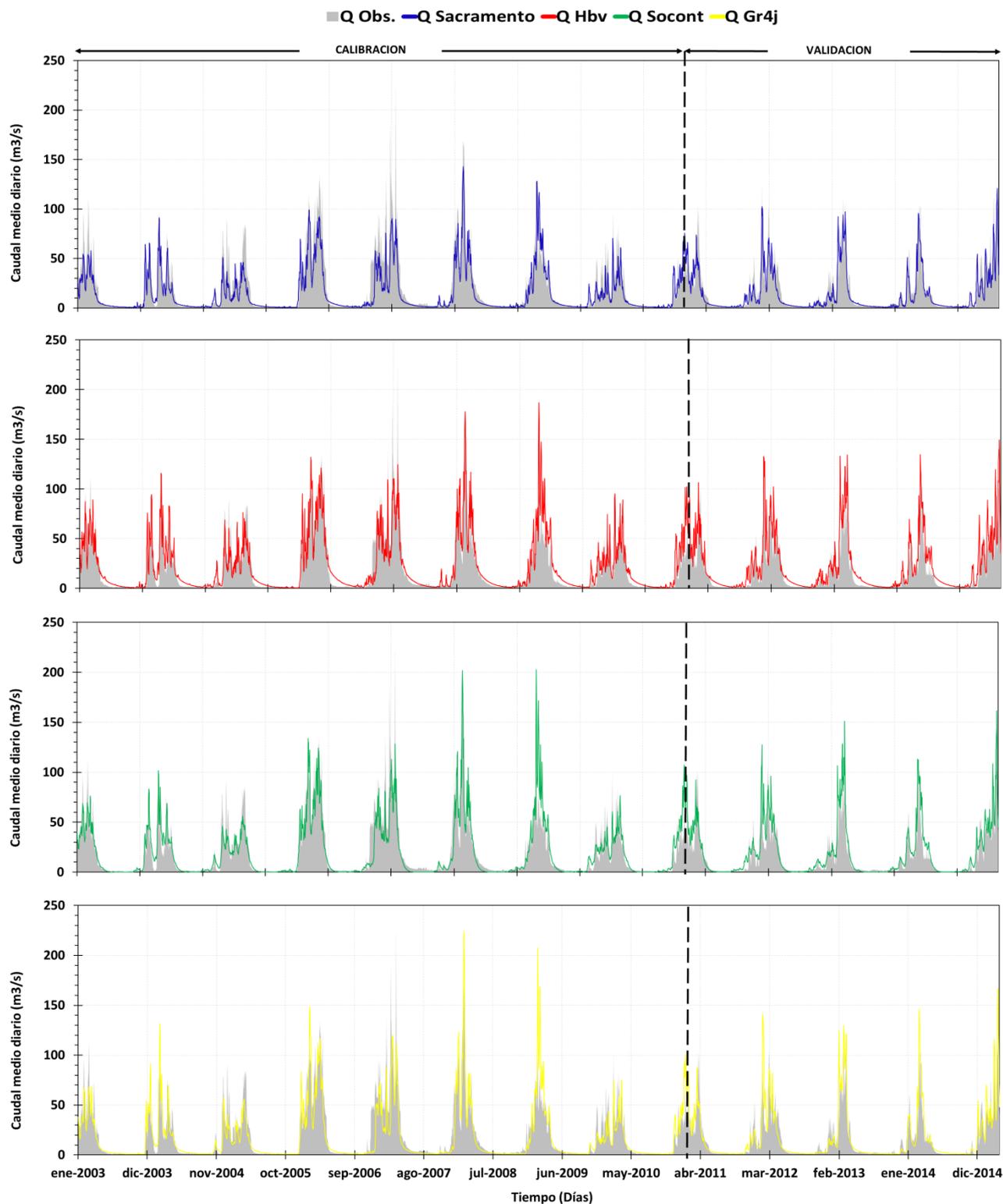


Figura 28: (a) Histograma de frecuencia absoluta de caudales medios diarios y (b) diagrama de cajas de los caudales medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. Calibración y validación de los modelos hidrológicos

La serie de caudales generados por los modelos hidrológicos fue comparado con la serie de datos observados de la estación hidrológica “La Capilla” para los periodos (01/12/2002 – 31/12/2010) y (01/01/2011 – 31/03/2015), concernientes a la calibración y validación, respectivamente. Cabe mencionar que el periodo de calibración abarca mayor cantidad de información con la finalidad de mejorar la estimación de los parámetros. En la Figura 29 se muestra la serie de caudales observados y simulados, obtenidas en la calibración y validación.



*Figura 29: Hidrograma diario de caudales observados y simulados para los modelos hidrológicos Sacramento, Hbv, Socont y Gr4j. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.*

*Fuente: Elaboración propia*

El desempeño hidrológico de los modelos se evaluó en base a seis indicadores estadísticos, como se muestra en el Cuadro 18. Asimismo, los indicadores de los modelos hidrológicos dieron calificativos en rendimiento de bueno a muy bueno en base al Cuadro 19, cuya

calificación está dado por en el indicador de la razón RSR que relaciona la raíz cuadrada del error medio y la desviación estándar de las observaciones, Nash (E) y error volumétrico (Ev).

*Cuadro 18: Resultados de los indicadores de desempeño de los modelos hidrológicos utilizados en la cuenca del rio Mala.*

	ESTADISTICO	GR4J	SOCONT	HBV	SAC
CALIBRACION (01/12/2002 - 31/12/2010)	Nash	0.74	0.82	0.83	0.74
	Nash-ln	0.95	0.40	0.88	0.91
	Coef. Pearson	0.87	0.91	0.91	0.90
	RRMSE	0.73	0.61	0.58	0.72
	RSR	0.51	0.43	0.41	0.51
	Ev	-0.15	-0.09	0.05	-0.29
VALIDACION (01/01/2011 - 31/03/2015)	Nash	0.67	0.75	0.67	0.80
	Nash-ln	0.92	0.40	0.83	0.90
	Coef. Pearson	0.89	0.92	0.92	0.90
	RRMSE	0.77	0.67	0.78	0.60
	RSR	0.57	0.50	0.58	0.44
	Ev	0.08	0.20	0.36	-0.10

*Fuente: Elaboración propia*

*Cuadro 19: Niveles de rendimiento de un modelo hidrológico en función del índice E, RSR y Error en volumen (Ev).*

Rendimiento	RSR	E	[Ev]
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < E \leq 1.00$	< 10%
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < E \leq 0.75$	10-15%
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < E \leq 0.65$	
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$E \leq 0.50$	
Desfavorable			15-25%

*Fuente: Moriasi et al. (2007) y Donigian y Imhoff (2002). Citado por Ramos (2013)*

En la Figura 30 muestra la relación lineal entre los caudales observados (eje X) y simulados (eje Y) en la estación La Capilla, para las salidas de los modelos hidrológicos. Se puede observar el alto coeficiente de determinación ( $>0.75$ ) entre las descargas observadas y simuladas. Estas correlaciones se hicieron tanto para la calibración y validación. También se puede notar que el modelo Sacramento presenta menor grado de dispersión frente a los demás modelos. Otro aspecto a mencionar, es que la línea de ajuste perfecto es aquella que forma un ángulo de  $45^\circ$ ; la línea de regresión estimada en la calibración de los modelos forman ángulos menores al ángulo de ajuste perfecto; sin embargo, para la validación los ángulos que forma la línea de regresión estimada son mayores, excepto en el modelo sacramento que presenta un ángulo menor.

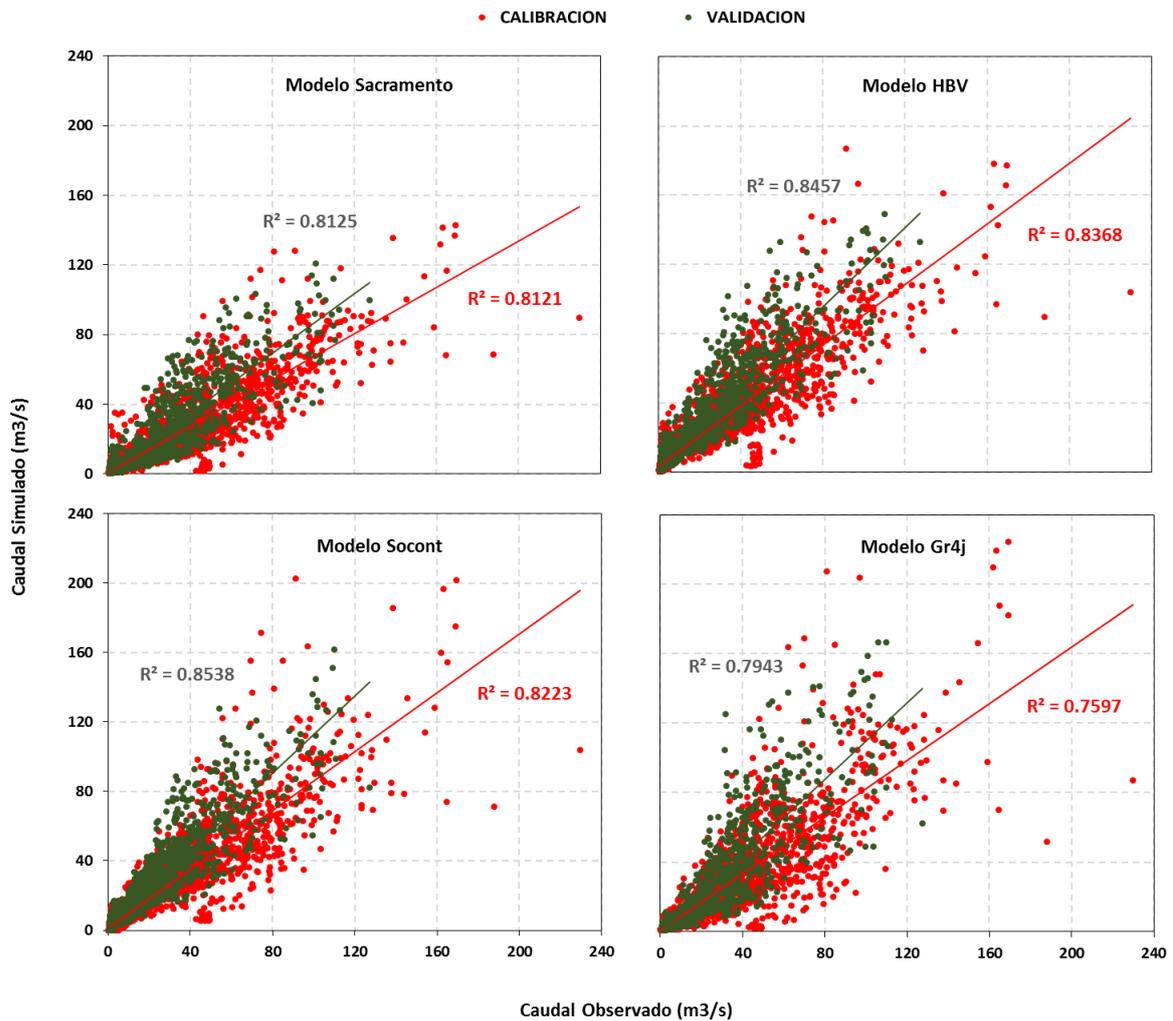


Figura 30: Correlación lineal entre los caudales observados y simulados por los modelos hidrológicos, en la estación La Capilla.

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 20 muestra los parámetros de los modelos hidrológicos obtenidos de la calibración. En el modelo hidrológico Sacramento presentan 13 parámetros que fueron seleccionados para la optimización manual (prueba y error) y automática (algoritmo SCE-UA). Dichos parámetros fueron evaluados conforme a los umbrales máximos y mínimos establecidos en el Manual Técnico de RS Minerve (Garcia et al., 2015). Del modelo HBV, se calibraron 11 parámetros de los 14 que posee, considerando CFR, CWH y TTSM, como constantes. Asimismo, en el modelo Socont fueron calibrados 6 parámetros y los parámetros TheraCri, bp, Tcp1, Tcp2 y Tcf, se consideraron constantes. Mientras que en el modelo hidrológico GR4J, se calibraron los 4 parámetros que le corresponden.

Cuadro 20: Parámetros obtenidos de la calibración de los modelos hidrológicos.

MODELO	PARAMETROS	VALOR	UNIDAD	MODELO	PARAMETROS	VALOR	UNIDAD
GR4J	X1	0.0018003	mm		CFMax	2.2300317	mm/°C/día
	X2	0.0005996	mm		CFR	0.05	-
	X3	0.0045703	mm		CWH	0.1	-
	X4	1.1002165	día		TT	0.0083679	°C
SAC	Adimp	0.02	-	HBV	TTInt	1.2051115	°C
	Pctim	0.04999	-		TTSM	0	°C
	Riva	4.31E-05	-		Beta	1.0015088	-
	UztlwMax	0.0100052	m		FC	0.0500058	m
	UzfwMax	0.090888	m		PWP	0.0685593	m
	Uzk	0.1452925	1/día		SUMax	0.0794736	m
	Zperc	10.0147606	-		Kr	0.3553538	1/día
	Rexp	2.9972267	-		Ku	0.2806398	1/día
	Pfree	0.5999998	-		Kl	0.02	1/día
	LztlwMax	0.050015	m		Kperc	0.15	1/día
	LzfpMax	0.0301844	m		Asn	13.8295299	mm/°C/día
	LzfsMax	0.1000184	m		ThetaCri	0.1	-
	Rserv	0.1099748	-		bp	0.0125	día/mm
	Lzpk	0.0023498	1/día		Tcp1	0	°C
Lzsk	0.0200015	1/día	Tcp2	4	°C		
Side	0.0400032	-	SOCOINT	Tcf	0	°C	
				HGR3Max	0.1099609	m	
				KGR3	0.0010005	1/s	
				L	961.4687	m	
				JO	0.0010041	-	
				Kr	0.9902869	m1/3/s	

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de variación de los caudales medios mensuales observados y simulados (Ver Cuadro 21) con los modelos hidrológicos Gr4j, Socont, Hbv y Sacramento, se ha optado por evaluar los caudales medios multianuales, utilizando la diferencia porcentual por cada mes según la siguiente ecuación:

$$DPi = \frac{(QS_i - Qo_i)}{Qo_i} \times 100$$

Dónde: Dpi: Diferencia porcentual entre el caudal simulado y observado, Qsi: Caudal simulado para el mes i, Qoi: Caudal observado para el mes i.

Los resultados se muestran en el Cuadro 22 y Figura 31, a nivel anual se observa una subestimación de 3.24 % usando los caudales simulados por el modelo Gr4j, para el modelo Socont la subestimación es de 17.93 %, mientras que para el modelo Hbv sobrestima en 47.04 %, por último el modelo Sacramento subestima en 12.18 %.

A nivel mensual los caudales simulados por el modelo Gr4j muestran subestimaciones en los meses de enero, abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, con un mínimo de 4.96 % en el mes de septiembre y un máximo de 30.19 % en el mes de abril; asimismo para los meses que muestran sobrestimación se presentó un mínimo de 2.41 % en el mes de agosto y un máximo de 34.04 % en el mes de junio.

Por otro lado los caudales simulados por el modelo Socont muestran subestimaciones en los meses de enero, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre, con un mínimo de 4.29 % en el mes de enero y un máximo de 93.05 % en el mes de julio; asimismo en para los meses que muestran sobrestimación se presentó un mínimo de 7.89 % en el mes de marzo y un máximo de 57.87 % en el mes de noviembre.

De igual manera los caudales simulados por el modelo Hbv solo muestra subestimación de 3.09 % en el mes de abril; asimismo para los meses que muestran sobre estimación se presentó un mínimo de 1.69 % en el mes de enero y un máximo de 167 % en el mes de junio.

Por último, para el modelo Sacramento se muestran sobrestimaciones en los meses de junio, julio y octubre, con un mínimo de 8.14 % en el mes de julio y un máximo de 31.24 % en el mes de octubre; asimismo para los meses que presentan subestimaciones se encuentra un mínimo de 4.41 % en el mes de noviembre y un máximo de 44.5 % en el mes de abril.

En relación al periodo de estiaje, el cual se presenta entre los meses de abril a noviembre, los caudales obtenidos con los modelos Gr4j, Socont y Sacramento, subestimaron en 0.94, 27.78 y 7.56%, respectivamente, mientras que los caudales obtenidos con el modelo Hbv sobrestimaron en 64.98 %.

Asimismo para el periodo de avenidas, el cual se presenta entre los meses de diciembre a marzo, los caudales obtenidos por el modelo Gr4j subestimaron en 7.84 % a los caudales observados, los caudales dados por el modelo Sacramento subestiman en 21.43 %, los caudales del modelo Socont sobrestimaron en 1.78 % y los caudales del modelo Hbv sobrestimaron en 11.16 %.

*Cuadro 21: Caudales medios mensuales multianuales (m3/s). Periodo Diciembre 2002 a Marzo 2015.*

Meses	Caudal Observado (m3/s)	Caudales Simulados (m3/s)			
		Gr4j	Socont	Hbv	Sacramento
Ene	36.64	30.32	35.07	37.26	24.60
Feb	50.11	53.49	54.94	57.54	42.39
Mar	58.64	60.12	63.27	66.81	49.72
Abr	34.82	24.30	30.92	33.74	19.32
May	6.73	5.89	5.92	11.59	4.76
Jun	2.24	3.01	0.70	6.01	2.69
Jul	1.56	2.02	0.11	3.27	1.69
Ago	1.48	1.51	0.12	1.81	1.16
Sep	1.29	1.22	0.62	1.36	1.03
Oct	1.53	1.43	2.28	2.74	2.01
Nov	3.89	3.14	6.14	6.47	3.72
Dic	20.45	15.67	19.20	23.35	15.90
Promedio	18.30	16.84	18.27	21.00	14.08

Cuadro 22: Diferencia porcentual (%) entre caudales observados y caudales dados por los modelos hidrológicos de estudio.

Meses	DPI			
	Gr4j	Socont	Hbv	Sacramento
Ene	-17.24	-4.29	1.69	-32.85
Feb	6.74	9.64	14.83	-15.41
Mar	2.52	7.89	13.92	-15.22
Abr	-30.19	-11.19	-3.09	-44.50
May	-12.57	-12.13	72.04	-29.34
Jun	34.04	-68.70	167.75	19.69
Jul	29.70	-93.05	109.67	8.14
Ago	2.41	-91.66	22.56	-21.07
Sep	-4.96	-52.14	5.56	-20.22
Oct	-6.64	48.76	78.97	31.24
Nov	-19.35	57.87	66.38	-4.41
Dic	-23.37	-6.10	14.18	-22.24
Anual	-3.24	-17.93	47.04	-12.18
Dic-Mar	-7.84	1.78	11.16	-21.43
Abr-Nov	-0.94	-27.78	64.98	-7.56

Fuente: Elaboración propia

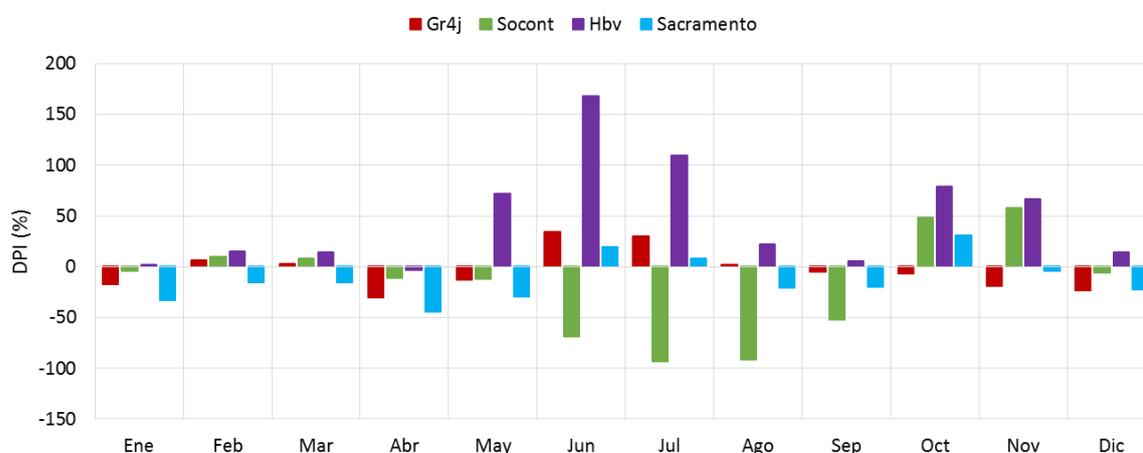


Figura 31: Dpi mensual obtenidos por los caudales de los modelos hidrológicos de estudio. Periodo: 01/12/2002 al 31/03/2015.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32 se muestra las curvas de duración y variación estacional. En la curva de duración se observa que, para una probabilidad de excedencia entre 10 y 32 por ciento, son subestimados los modelos Sacramento, Gr4j y Socont, mientras que el modelo Hbv tiende a sobreestimar. Según la curva de variación estacional para la probabilidad de excedencia del 75, 80 y 90 por ciento, en los meses de marzo a julio, los modelos tienden a sobreestimar los caudales, y para los meses de noviembre a marzo, los modelos Gr4j y Sacramento tienden a subestimar, excepto los modelos Hbv y Socont, que sobrestiman. Sin embargo en los meses de julio a noviembre, los modelos no presentan mucha variación, con respecto a los caudales

observados. Otro aspecto a mencionar, es que el caudal observado tiende a encontrarse dentro del rango de los caudales simulados por los modelos hidrológicos.

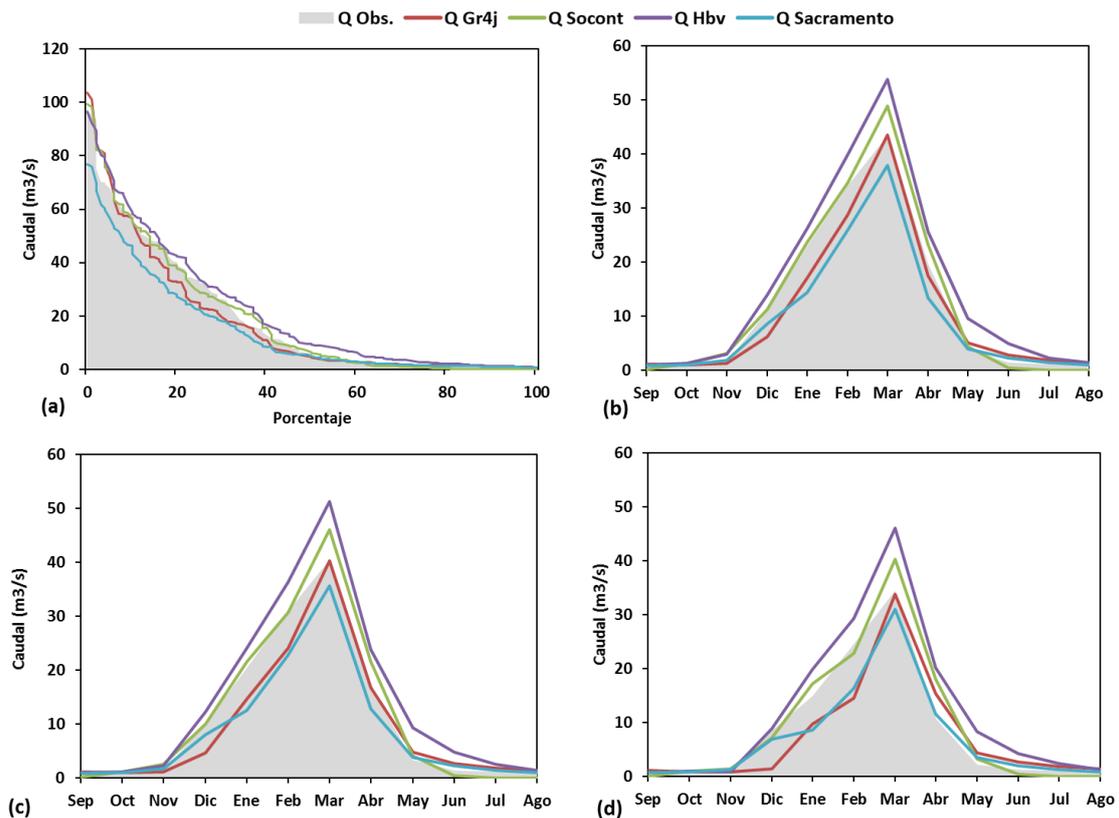


Figura 32: Curva de duración mensual (a) y curva de variación estacional con probabilidad de ocurrencia del 75% (b), 80% (c) y 90%(c).

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1. Análisis de sensibilidad de parámetros

En la Figura 33 se muestra el análisis de sensibilidad, la cual consistió en determinar que tanto se ven afectados las eficiencias (Nash y Coeficiente correlación de Pearson) del modelo al aplicar variaciones de +/- 20% del parámetro obtenido en la calibración.

Los parámetros más sensibles que se obtuvieron en el modelo Gr4j fueron X3 y X4, relacionadas a la capacidad del segundo reservorio y al tiempo base; mientras que en el modelo Socont los parámetros más sensibles fueron HGR3Max y KGR3, que representan la altura máxima del reservorio de infiltración y coeficiente de liberación del reservorio de infiltración; asimismo, para el modelo hidrológico Hbv el parámetro más sensible es el coeficiente de almacenamiento de interflujo (Ku); por último en el modelo sacramento se tiene los parámetros Uzck, Rexp, Pfree y LzfsMax, más influyentes sobre el modelo en cuestión.

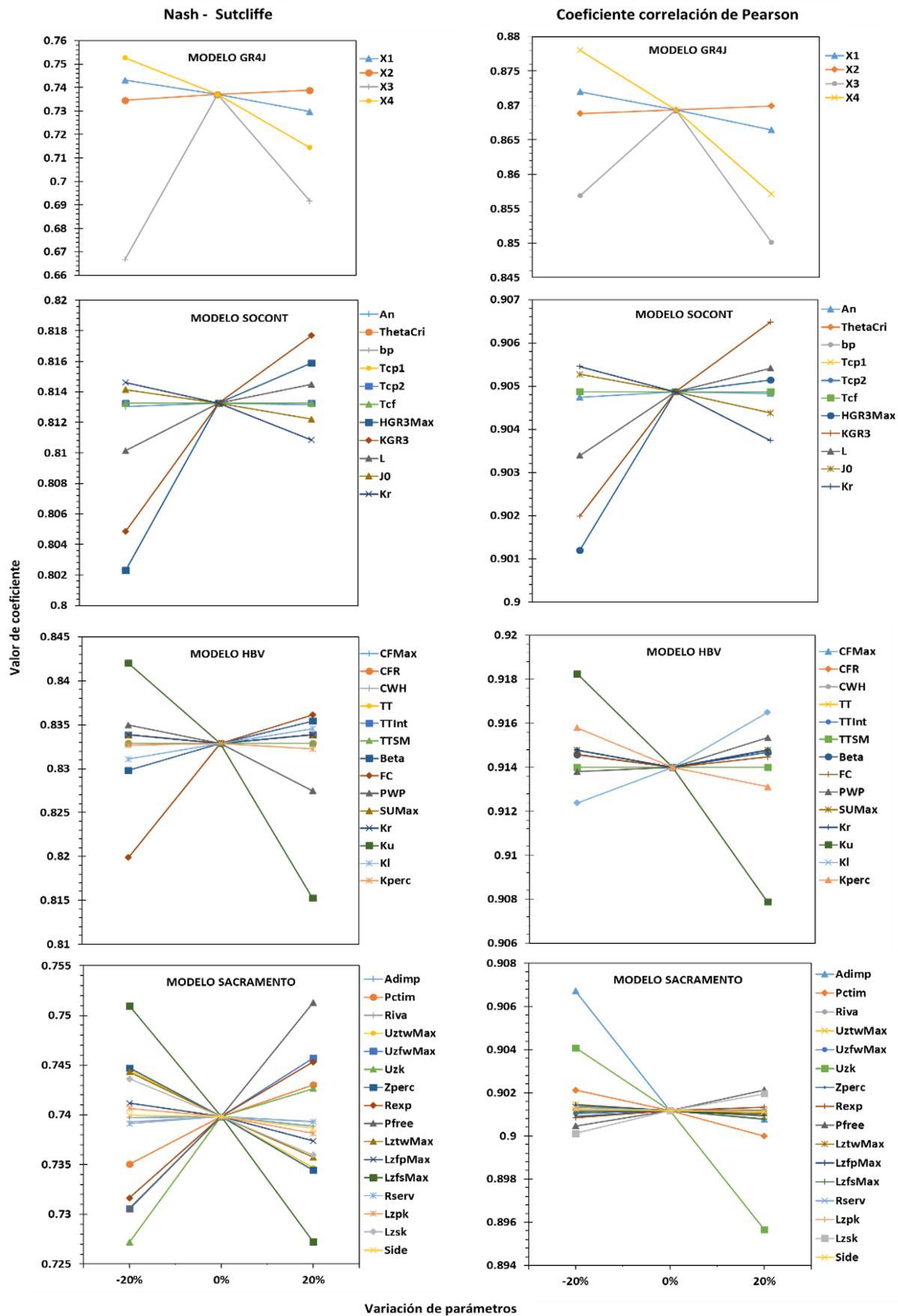


Figura 33: Análisis de sensibilidad de los modelos hidrológicos para los indicadores de eficiencia Nash y correlación de Pearson.

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Simulación hidrológica en las subcuencas del río Mala

En la Figura 34 y Figura 35, se muestran los hidrogramas de las aportaciones mensuales de las 15 subcuencas aguas arriba del punto de control la Capilla, utilizando las simulaciones obtenidas por el modelo hidrológico Sacramento, para el periodo de diciembre 2002 a marzo 2015.

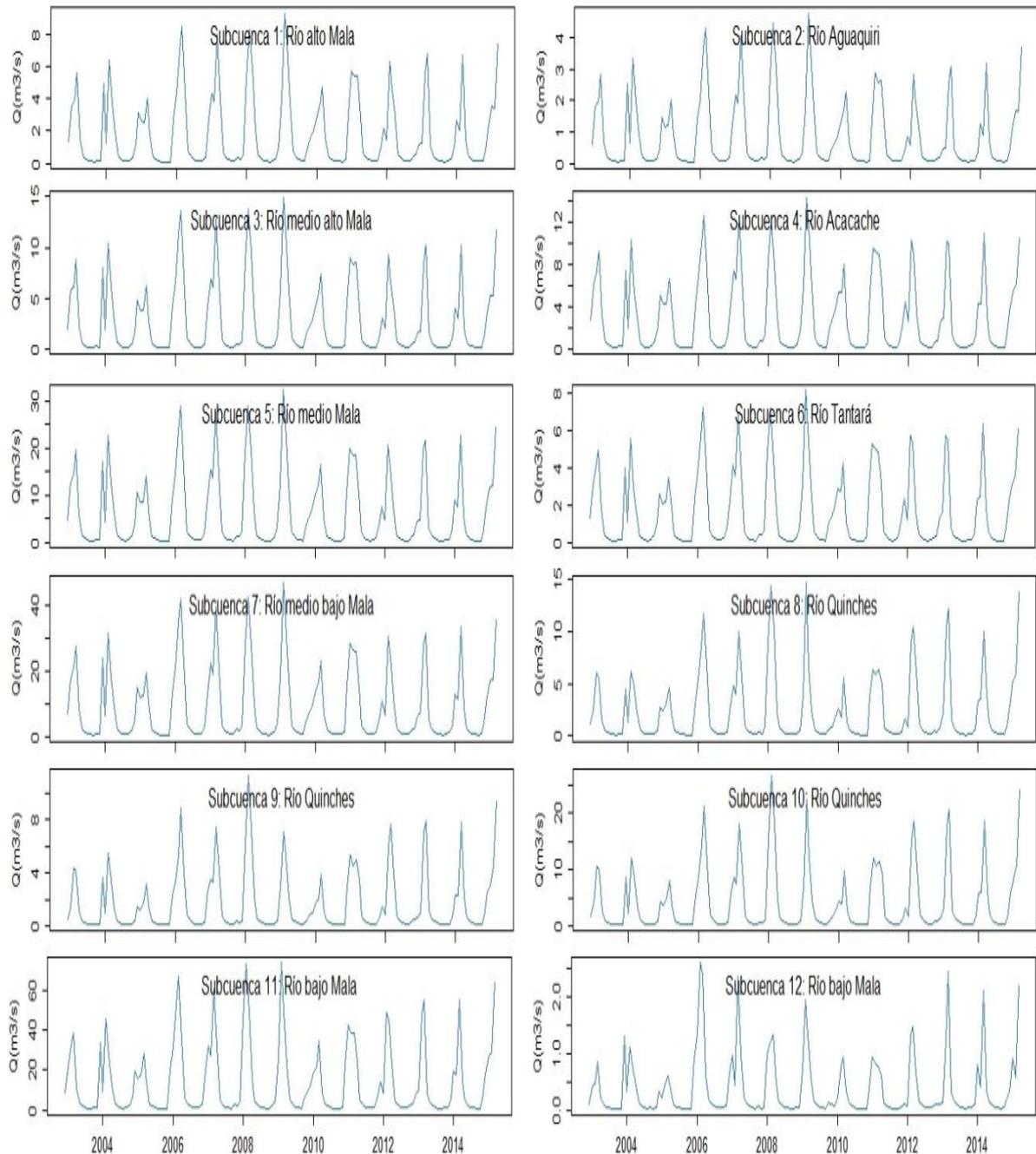
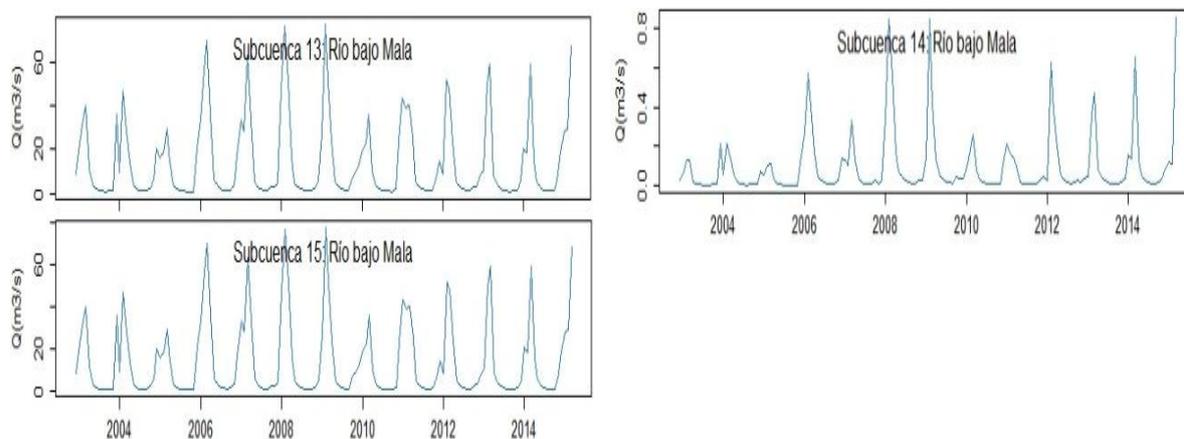


Figura 34: Hidrograma mensual de la subcuenca 1 a la subcuenca 8 para el periodo de diciembre 2002 a marzo del 2015.

Fuente: Elaboración propia



*Figura 35: Hidrograma mensual de la subcuenca 13 a la subcuenca 15 para el periodo de diciembre 2002 a marzo del 2015.*

*Fuente: Elaboración propia*

A continuación, en el Cuadro 23 se muestra los caudales medios mensuales de acuerdo a las estaciones del año para el modelo hidrológico Sacramento, del cuadro en mención se observa que los mayores caudales se presentan en verano, excepto en las subcuencas 8,9,10 y 12, que registran los mayores caudales medios en otoño; la quebrada que tuvo mayores aportaciones de caudales en su salida fue la subcuenca 15, con un caudal medio en verano de 27.45 m<sup>3</sup>/s y caudal medio anual de 14.02 m<sup>3</sup>/s; asimismo, la quebrada que registro los caudales medios más bajos es la subcuenca 14, ubicada en la parte baja de la cuenca Mala, registrando de esta manera un caudal promedio en verano de 0.18 m<sup>3</sup>/s y un caudal medio anual de 0.1 m<sup>3</sup>/s, cabe señalar que esta quebrada es una subcuenca aportante y que para esa zona las precipitaciones son poco frecuentes, dando lugar a que se generan caudales bajos.

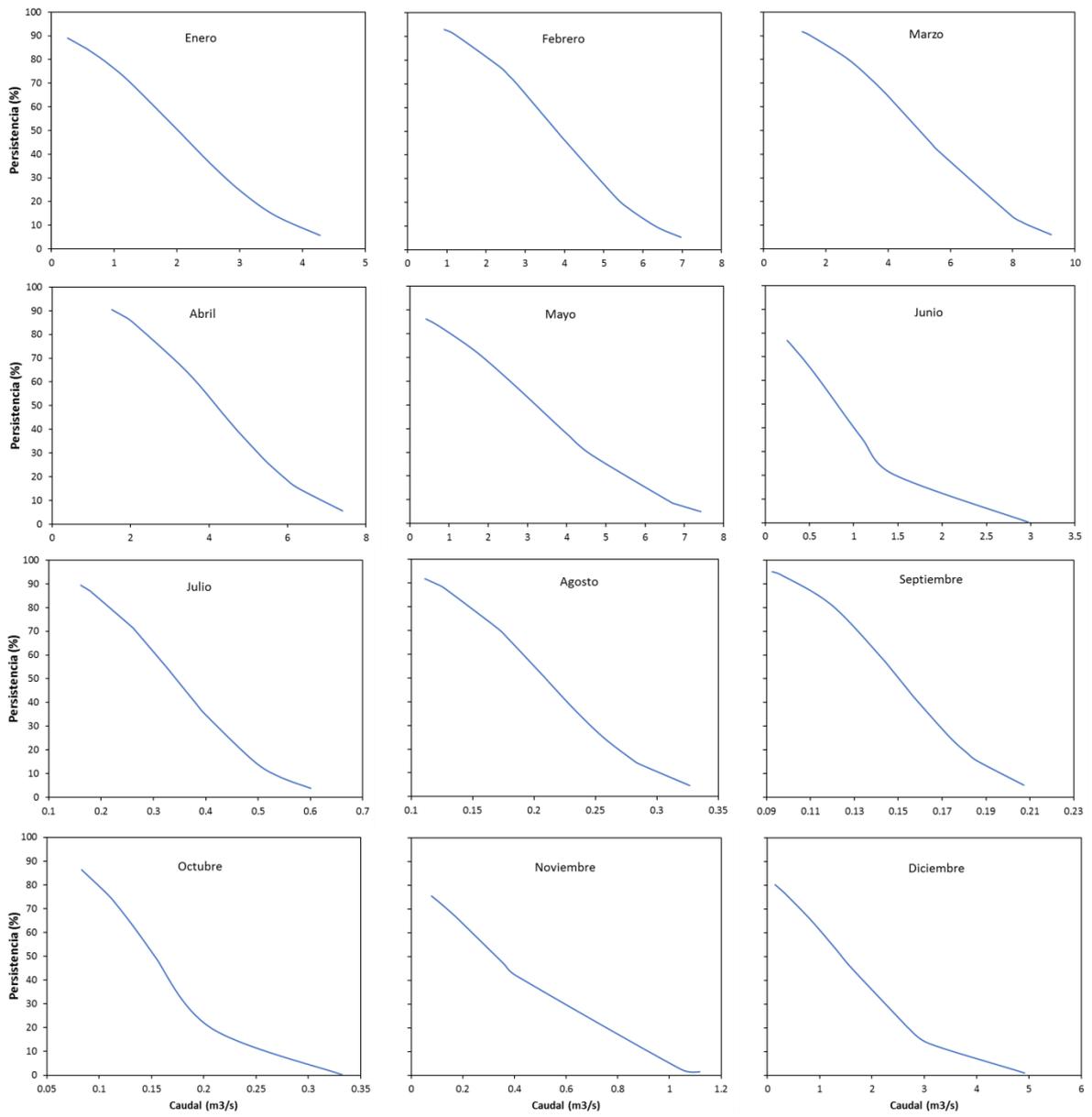
En la Figura 36 se muestra las curvas de distribución acumulada de probabilidad normal mensual para la subcuenca 1, correspondiente al río Alto Mala. Es posible apreciar el régimen estacional comprendido entre diciembre a marzo como periodo húmedo y un periodo seco de abril a noviembre. Cada una de las curva de distribución acumulada nos da información de la probabilidad de que un caudal sea igual o mayor a una probabilidad de ocurrencia. En el Anexo 6 se presentan los gráficos de probabilidad normal de las demás subcuencas.

*Cuadro 23: Promedio de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) a nivel estacional para el modelo hidrológico Sacramento.*

Sub.	Variación estacional				ANUAL
	Verano (Dic-Feb)	Otoño (Mar-May)	Invierno (Jun-Ago)	Primavera (Sep-Nov)	
1	3.53	3.09	0.22	0.31	1.78
2	1.71	1.50	0.10	0.13	0.86
3	5.52	4.83	0.34	0.46	2.77
4	5.93	4.96	0.33	0.64	2.95
5	12.36	10.59	0.73	1.15	6.17
6	3.23	2.74	0.19	0.33	1.61
7	17.62	15.21	1.08	1.60	8.82
8	4.36	4.41	0.31	0.26	2.28
9	3.05	3.13	0.23	0.21	1.62
10	7.67	7.81	0.57	0.49	4.04
11	26.24	24.01	1.74	2.16	13.37
12	0.67	0.74	0.06	0.05	0.37
13	27.24	25.08	1.83	2.24	13.91
14	0.18	0.18	0.02	0.01	0.10
15	27.45	25.28	1.85	2.25	14.02

*Fuente: Elaboración propia*

Asimismo, con los gráficos obtenidos de la curva de distribución acumulada de probabilidad normal mensual, se calculó los caudales que son igual o mayores a una probabilidad de persistencia del 75 %, ver Cuadro 24. De las tablas en mención, se observa que existen caudales medios mensuales que varían en 0.03 a 7.91 m<sup>3</sup>/s, en la salida de la subcuenca 14 y 15, respectivamente; además se puede notar que en lo general los máximos caudales se registran en el mes de marzo y los mínimos en el mes de octubre.



*Figura 36: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 1 (Rio Alto Mala).*

*Fuente: Elaboración propia*

*Cuadro 24: Caudales mensualizados con una probabilidad del 75% en las subcuencas de la cuenca del río Mala para el modelo hidrológico Sacramento.*

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1	1.05	2.49	3.18	2.81	1.48	0.29	0.24	0.16	0.13	0.11	0.09	0.42	1.04
2	0.43	1.14	1.52	1.36	0.69	0.16	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.16	0.48
3	1.53	3.80	4.93	4.35	2.27	0.49	0.38	0.25	0.20	0.17	0.13	0.59	1.59
4	1.97	4.34	5.24	5.16	2.50	0.54	0.37	0.25	0.20	0.14	0.20	0.94	1.82
5	3.67	8.69	10.96	10.18	5.13	1.17	0.83	0.54	0.43	0.34	0.36	1.60	3.66
6	0.97	2.29	2.80	2.84	1.37	0.30	0.21	0.14	0.11	0.09	0.12	0.47	0.98
7	5.00	12.23	15.49	14.48	7.41	1.72	1.21	0.80	0.64	0.51	0.55	2.21	5.19
8	0.90	2.68	3.37	3.81	1.79	0.24	0.30	0.21	0.16	0.15	0.14	0.32	1.17
9	0.60	2.04	2.38	2.64	1.40	0.23	0.24	0.16	0.12	0.11	0.10	0.24	0.85
10	1.55	4.90	6.01	6.66	3.32	0.50	0.57	0.38	0.29	0.27	0.26	0.59	2.11
11	6.75	17.70	22.28	22.10	11.26	2.36	1.87	1.25	0.99	0.86	0.87	2.90	7.60
12	0.06	0.25	0.55	0.52	0.32	0.09	0.07	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.17
13	6.91	18.17	23.12	22.84	11.71	2.50	1.97	1.31	1.04	0.91	0.92	2.97	7.86
14	0.02	0.07	0.09	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
15	6.94	18.28	23.25	22.98	11.78	2.52	1.99	1.32	1.05	0.92	0.93	2.99	7.91

*Fuente: Elaboración propia*

Con la información que se tiene de “Recursos Hídricos en el Perú” elaborado por el ANA en el 2010, se toma información de la demanda hídrica en la cuenca del río Mala para elaborar el balance hídrico tal como se aprecia en el Cuadro 25 y Figura 37; en ello se observa que existe una demanda anual promedio de 107.61 MMC, la cual es menor en volumen a la oferta hídrica observada (570.87 MMC), y a la oferta dada por el modelo hidrológicos Sacramento que es de 437.84 MMC; además, se presenta la máxima demanda en el mes de enero con un valor de 15.29 MMC y la máxima oferta del modelo se registra en el mes de marzo con un valor de 133.17 MMC.

Asimismo, existen meses en el que la demanda es superior a la oferta, tal es el caso del modelo Sacramento que registro déficit en el mes de junio, agosto, septiembre y octubre, con un valor mínimo de 0.16 MMC en el mes de junio y un máximo de 3.19 MMC en el mes de septiembre.

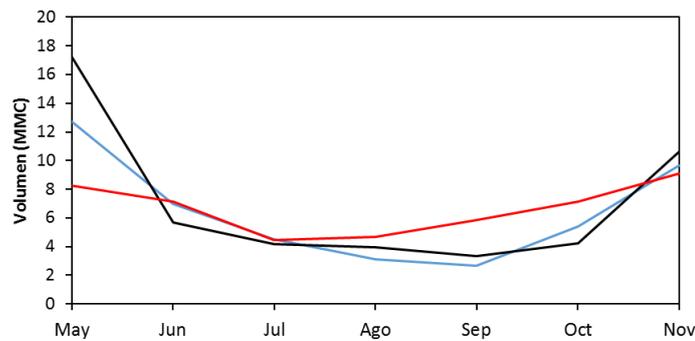
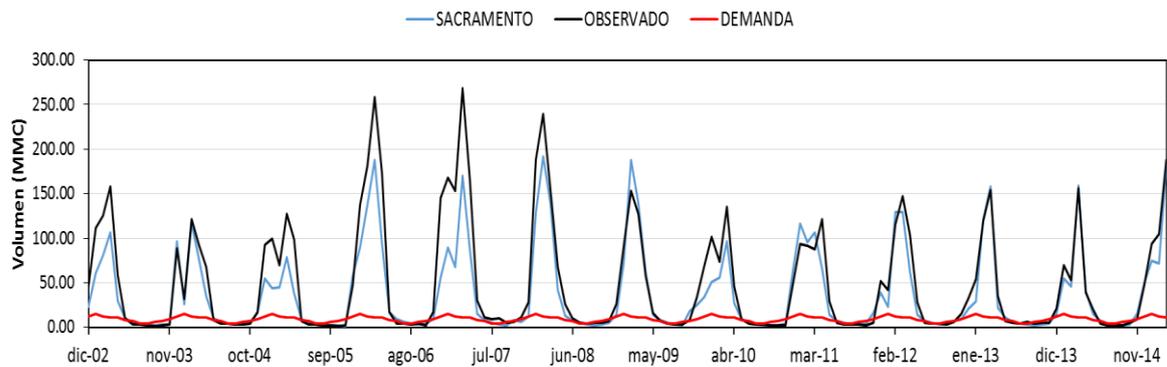
En relación al balance hídrico con respecto al caudal observado, se registra déficit de junio a octubre, teniendo un máximo de 2.90 MMC en el mes de octubre y un mínimo de 0.25 en julio, con un promedio mensual de 1.57 MMC.

*Cuadro 25: Volumen promedio mensual de la oferta y demanda hídrica (MMC) - Periodo diciembre 2002 a marzo 2015.*

Mes	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	ANUAL	
Oferta	Sacramento	2.66	5.39	9.64	41.11	65.90	102.54	133.17	50.08	12.75	6.96	4.52	3.12	437.84
	Observado	3.32	4.26	10.60	57.05	98.46	121.90	158.11	86.13	17.25	5.68	4.18	3.94	570.87
*Demanda	5.85	7.16	9.10	11.79	15.29	11.63	11.18	11.14	8.26	7.12	4.43	4.66	107.61	

\*ANA (2010)

*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 37: Serie de balance hídrico mensual del periodo diciembre 2002 a marzo 2015, y estacional mayo a noviembre en la cuenca del río Mala.*

*Fuente: Elaboración propia*

## V. CONCLUSIONES

Se realizó la simulación de caudal en la estación hidrológica La Capilla, usando los modelos hidrológicos de la plataforma RS-Minerve, como son el modelo Sacramento, Socont, HBV y GR4J. En base a estas simulaciones se realizó la sensibilidad de parámetros para la calibración y determinar la eficiencia de la modelación, con simulaciones en quince puntos de la cuenca del río Mala. Asimismo se determinó las características geomorfológicas de la cuenca del río Mala:

1. De la caracterización de relieve, forma y drenaje, indican que la cuenca Mala es de tamaño intermedia grande y de forma alargada de densidad de drenaje baja, con suelos permeables, según Villon (2002). Además la precipitación alcanza valores de 900 a 1200 mm/año, en la parte alta en los meses de diciembre a marzo; y la temperatura anual varía de 11.4°C a 21.3°C, con valores máximos en verano (febrero) y mínima térmica en invierno (julio).
2. En la calibración diaria de los cuatro modelos, realizado en la estación hidrológica La Capilla, y validación temporal, se obtuvo un rendimiento de “muy bueno” a “bueno” según Moriasi et al. (2007) y Donigian y Imhoff (2002), citado por Ramos (2013). Siendo el modelo hidrológico Sacramento el de mejor desempeño.
3. En el análisis de sensibilidad de parámetros calibrados, indica que para el modelo GR4J, X3 y X4, fueron los parámetros más sensibles, relacionadas a la capacidad del segundo reservorio y al tiempo base, respectivamente. Para el modelo Socont, fueron HGR3Max y KGR3, que caracterizan la altura máxima del reservorio de infiltración y coeficiente de liberación del reservorio de infiltración, respectivamente. Para el modelo HBV, fue el Ku, llamado coeficiente de almacenamiento de interflujo. Y en el modelo Sacramento, fueron los parámetros UzK, Rexp, Pfree y LzfsMax, que están relacionados a la percolación y la capacidad máxima del subsuelo.
4. De las simulaciones de caudal en las quince subcuencas, se obtuvo caudales medios mensuales que varían de 0.1 a 14.02 m<sup>3</sup>/s, para la subcuenca 14 y 15, respectivamente. Asimismo, para una probabilidad del 75% de ocurrencia, se obtuvo caudal medio mensual que varían de 0.03 a 7.91 m<sup>3</sup>/s, pertenecientes al río bajo Mala.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Instalar estaciones hidrológicas en puntos estratégicos de interés para realizar nuevas calibraciones en los modelos, además de la instalación de estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura, en la parte media y cabecera de la cuenca del río Mala.
2. Instalación de estaciones hidrológicas y meteorológicas automáticas, para la recalibración a paso horario. Esto ayudaría a poder realizar un sistema de alerta temprana para zonas vulnerables a inundaciones, suministrando a los modelos hidrológicos previsiones de variables de precipitación y temperatura horaria futura.
3. Proyectar la oferta de agua con los modelos hidrológicos empleando proyecciones de temperatura y precipitación de diferentes escenarios de cambio climático.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agarwal, CS. 1998. Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district, U.P. Journal of Indian Society of Remote Sensing, 26: 169-175.

ANA -2010. Recursos Hídricos en el Perú. Dirección de conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos.

ANA -2015. Estimación de Oferta Hídrica Mediante sensoramiento remoto Cuenca del Rio Ramis

Argota, T. 2011. Simulación hidrológica de la cuenca del Rio Amajac, estado de Hidalgo aplicando el modelo SWAT. Tesis Mag. Sc. Mexico. p. Instituto Politecnico Nacional, Escuela superior de ingeniería y arquitectura u Zac. P. 114.

Bertens, JA; Pascual, JA; Van Beek, R. 2000. Modelización hidrológica de una cuenca mediterránea de media escala con el modulo pc rater dynamic modelling. Cuad. De Geogr. (67/68): 277-294.

Beven, K. O'Connel, PE. 1982. On the role of physically based distributed modeling in hydrology Institute of hydrology. Reporte n° 81.

Campos, DF. 1992. Procesos del ciclo hidrológico: Intercepcion y Almacenamiento en depresiones. San Luis de Potosí. Editorial Universitaria Potosiana. P. irr.

Chow, VT. Maidement, DR. Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada. Trad. JG Saldarriaga. Santafé de Bogotá, CO. McGraw-Hill. P. 2-13.

Foehn, A.; Garcia, H. J.; Claude, A.; Roquier, B.; Paredes, A. J.; Boillat, J.-l. 2014. Rs Minerve - user's manual v1.9. rs minerve group, switzerland.

Foehn, A.; Garcia, H. J.; Claude, A.; Roquier, B.; Paredes, A. J.; Boillat, J.-l. 2014. Rs Minerve - user's manual v1.9. rs minerve group, switzerland. Fuente original: Monsalve, G. 1999. Hidrologia en la ingenieria. Mexico DF. Alfaomega. p. 150. Fuente original: Dalton, I. 1802. Experiments and observations made to determine whether the quantity of rain and

dew is equal of wáter carried off by rivers, and raised by evaporation. Lit. Phil. Soc. Of Manch. Vol. 5, part 2. P. 346-372.

Foehn, A.; Garcia, H. J.; Claude, A.; Roquier, B.; Paredes, A. J.; Boillat, J.-I. 2014. Rs Minerve - user's manual v1.9. rs minerve group, switzerland.. Fuente original: Nelder, J. A. and Mead, R. (1965). A Simplex Method for function minimization. Computer Journal, Vol. 7, No. 4, 308-313.

Giddings, L. & Soto, M. (2006). Participación de America Latina y del Caribe en los Registros Globales Climatologicos, GHCN. Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnologia de America, 31(9), 632-637.

Gisbert, JM. 2005. Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del Rio Monachil (Granada). Universidad de Granada. S.p.

INRENA-MINAG-CEPES-ATDR/MOC – 2007. Evaluacion de los recursos hidricos de la Cuenca del rio Mala. Estudio Hidrologico-Mala.

Kachroo, R. K., Mkhanda, S. H y Parida, B. P., 2000. Flood frequency analysis of southern: I. Delineation of homogeneous regions. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques 45(3), 437-447.

Klemes, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences Journal. 31:1, 13-24.

Llauca, H. 2014. Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín, Perú (periodo 2013-2014). Tesis de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria la Molina.

Monsalve, G. 1999. Hidrologia en la ingenieria. Mexico DF. Alfaomega. p. 150. Fuente original: Dalton, I. 1802. Experiments and observations made to determine whether the quantity of rain and dew is equal of wáter carried off by rivers, and raised by evaporation. Lit. Phil. Soc. Of Manch. Vol. 5, part 2. P. 346-372.

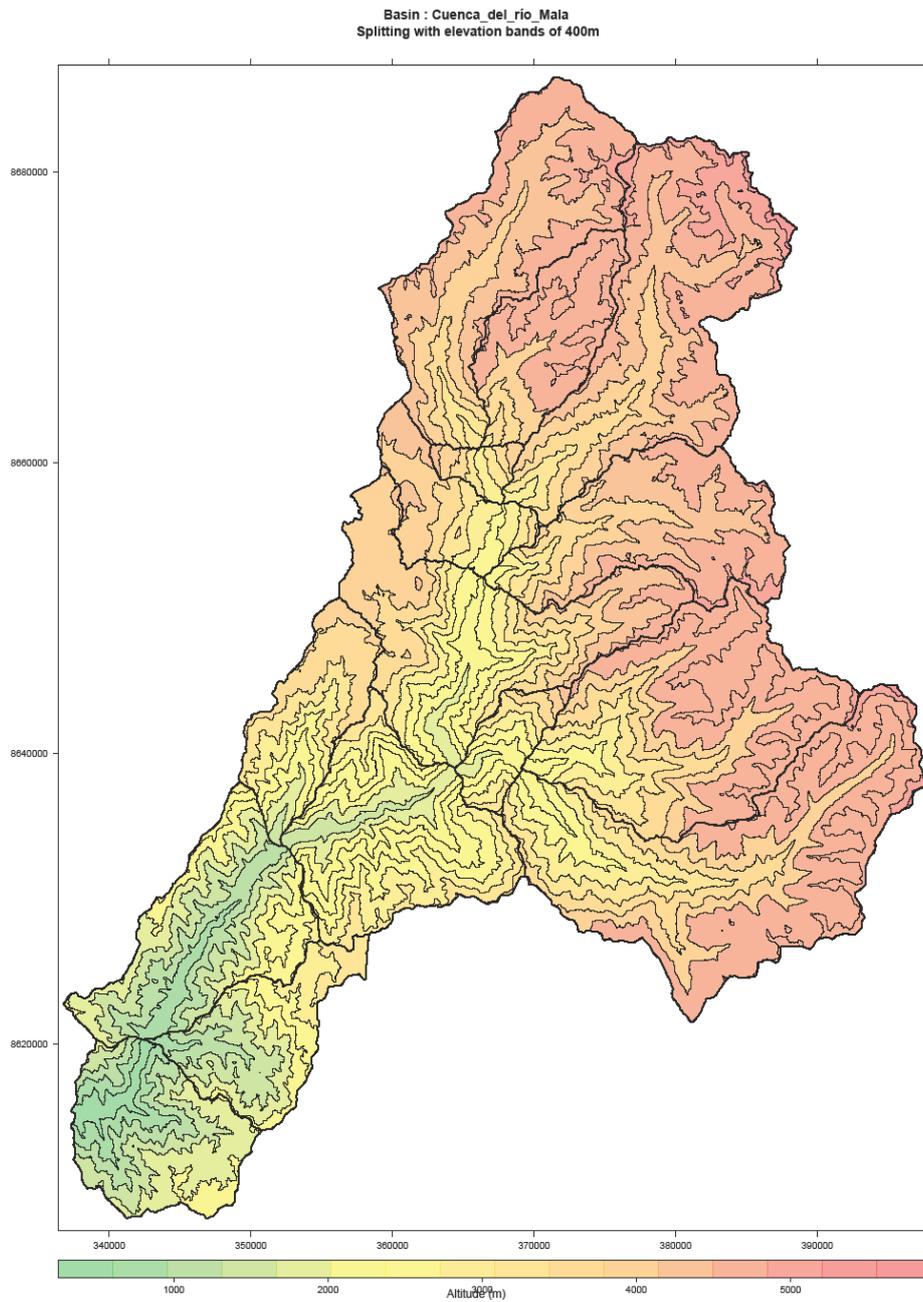
OMM, Ed. 2011. Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología. Volumen I: Hidrología – De la medición a la información hidrológica. OMM-N°168. Sexta Edición. Ginebra, Suiza.

Pareta, K, 2012. Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India. International Journal of Remote Sensing and GIS. 1(1): 47-62.

- Ramos, F. L. 2013. Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente. UPV. España
- Refsgaard, J; Knudsen, J. 1996. Water Resources Research: Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. s.l. s.e. v. 32, p 2189 – 2202.
- Salgado, J; Güitron de los Reyes, A. 2012. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos (en línea). Acapulco, MX. Consultado 04 abr. 2016. Disponible en [http://www.revistatlaloc.org.mx/amh\\_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLICABILIDAD\\_DE\\_LOS\\_MODELOS\\_HIDROLOGICOS\\_DISTRIBUIDOS\\_AMH.pdf](http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLICABILIDAD_DE_LOS_MODELOS_HIDROLOGICOS_DISTRIBUIDOS_AMH.pdf)
- Singh, N. 1990. Geomorphology of Himalayan rivers (a case study of Tawi basin), Jay Kay Book House, Jammu Tawi.
- Sossa, E. 2009. Modelos hidrológicos como una alternativa para la evaluación de los recursos hídricos en Latinoamérica. Santiago, Bolivia.
- Springall, GR. 1970. Hidrología, Instituto de Ingeniería, UNAM, Mexico DF. P. 7-33.
- Strahler, AN. 1952 a). Dynamic basis of geomorphology. Bulletin of the Geological Society of America. 63: 923-938.
- Strahler, AN. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel network, Handbook of Applied Hydrology: 39-76.
- Villon, M. 2002. Hidrologia: la cuenca hidrológica. Lima. Taller de publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. P. 22-64.
- Villon M. 2011. Hidrología Estadística. Lima. Taller de publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica P. 307-345
- Wu, I-Pai. 1963. Design hydrographs for small watershed in Indiana. Journal of the Hydraulics Division. 89(6): 35-36.

## VIII. ANEXO

*Anexo 1: Bandas altitudinales cada 400 metros en el area de estudio, generadas a partir de la plataforma HydroPrepR.*



## Anexo 2: Plataforma del RS-Minerve

RS MINERVE

File Model MINERVE\_RIO\_MA... Database Data Base GIS

Model Properties Database GIS Modules Settings Help

Hydrology

River

Standard

Infrastructure

Data source

Name	Group	Dataset
Station	Est_Meteorológica	Meteorológicas
Source	Est_Hidrologica	Hidrologica

Solver

Start: 01/12/2002 00:00:00

End: 31/12/2010 00:00:00

Simulation time step 1 day

Simulation completed in 15 seconds

## Anexo 3: Calibración automática desde la plataforma RS-Minerve.

RS MINERVE

Model MINERVE\_RIO\_MA... Database Data Base GIS Calibrator x

Calibration configuration Model Parameters

Calibration Configuration

Name	Order
Calibracion HBV	
Calibracion SAC	

Comparators

Comparator SAC  
Comparator GR4J  
Comparator HBV  
Comparator SOCONT

Parameters

Select All All selected Initial Values (IV): From Model Defined Random

Model	bx	Name	Min	Max	IV From Model	Defined IV	Random IV	Units
SAC		UzfwMax	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			m
SAC		UzfwMax	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			m
SAC		Uzsk	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			1/d
SAC	<input checked="" type="checkbox"/>	Zperc	10	350	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 20	<input type="checkbox"/>	-
SAC		Rexp	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			-
SAC		Pfree	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			-
SAC		LzfwMax	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			m
SAC		LzfpMax	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>			m

Models

Type	Name	Parent model	Zone
SAC	2_1	Sub2	A
SAC	2_2	Sub2	A
SAC	2_3	Sub2	A
SAC	2_4	Sub2	A

Objective Function (OF)

Total Weight for the Objective Function 20

Indicators	Weight
Nash	8
Nash-In	5

Hydrologic parameters optimization

Solver Algorithm parameters

Start: 01/12/2002 00:00:00

End: 31/12/2010 00:00:00

Stop

Summary results

Process

Start: 16/10/2016 06:22:17 p.m.  
Algorithm: SCE-UA

Objective Function (OF) to maximize:  
 $OF = 8 \cdot \text{Nash} + 5 \cdot \text{Nash-In} + 3 \cdot \text{Pearson Correlation Coeff} + 2 \cdot \text{Kling-Gupta}$   
Maximum possible OF value = 19

Iteration 9

Initial Values

Iteration 0 (before optimization) with parameters from model  
Initial parameters:

Graphic results

OF Progress Current Solution Best Solution

Evolution of the OF

Objective Function [-]

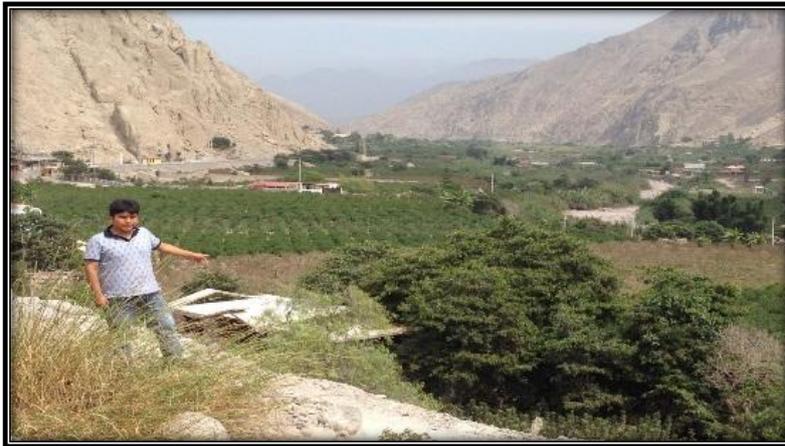
Iteration

Initial value  
Current value

Computing the selected calibration (Calibracion SAC)...

06:25 p.m. 16/10/2016

*Anexo 4: Parte baja de la cuenca del río Mala*



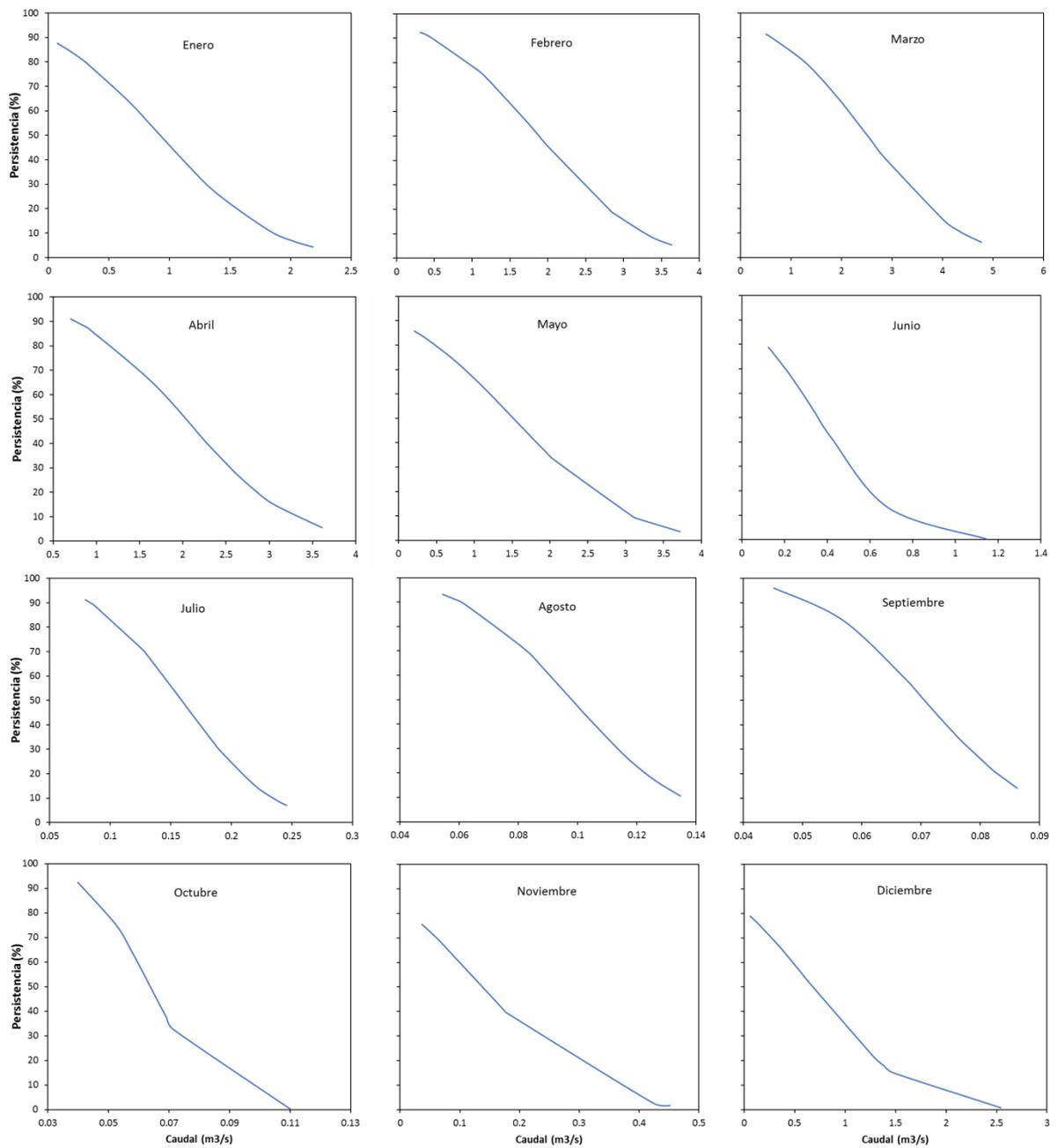
*Anexo 5: Estación hidrológica convencional La Capilla.*



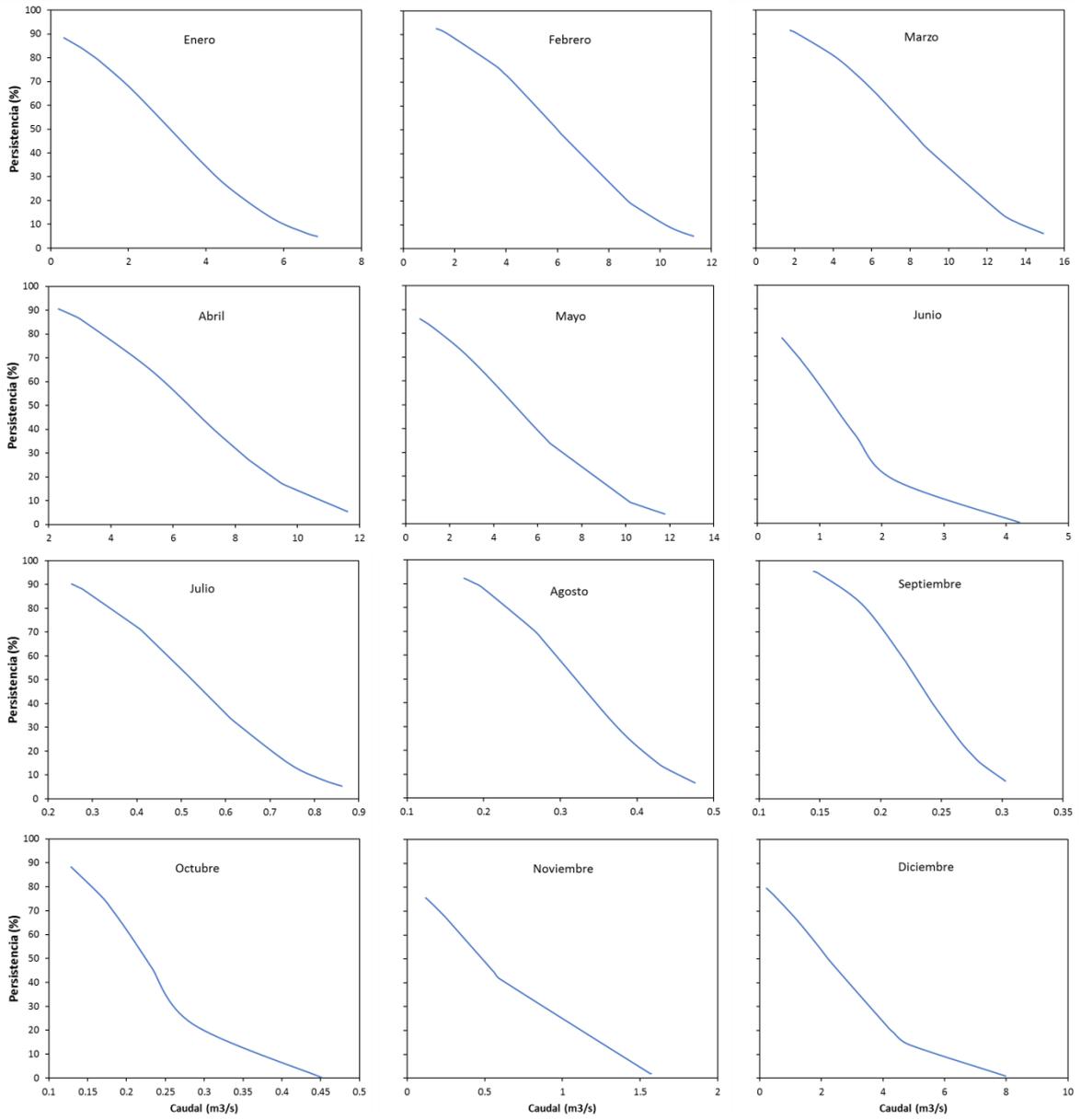
*Anexo 6: Estación hidrológica automática La Capilla.*



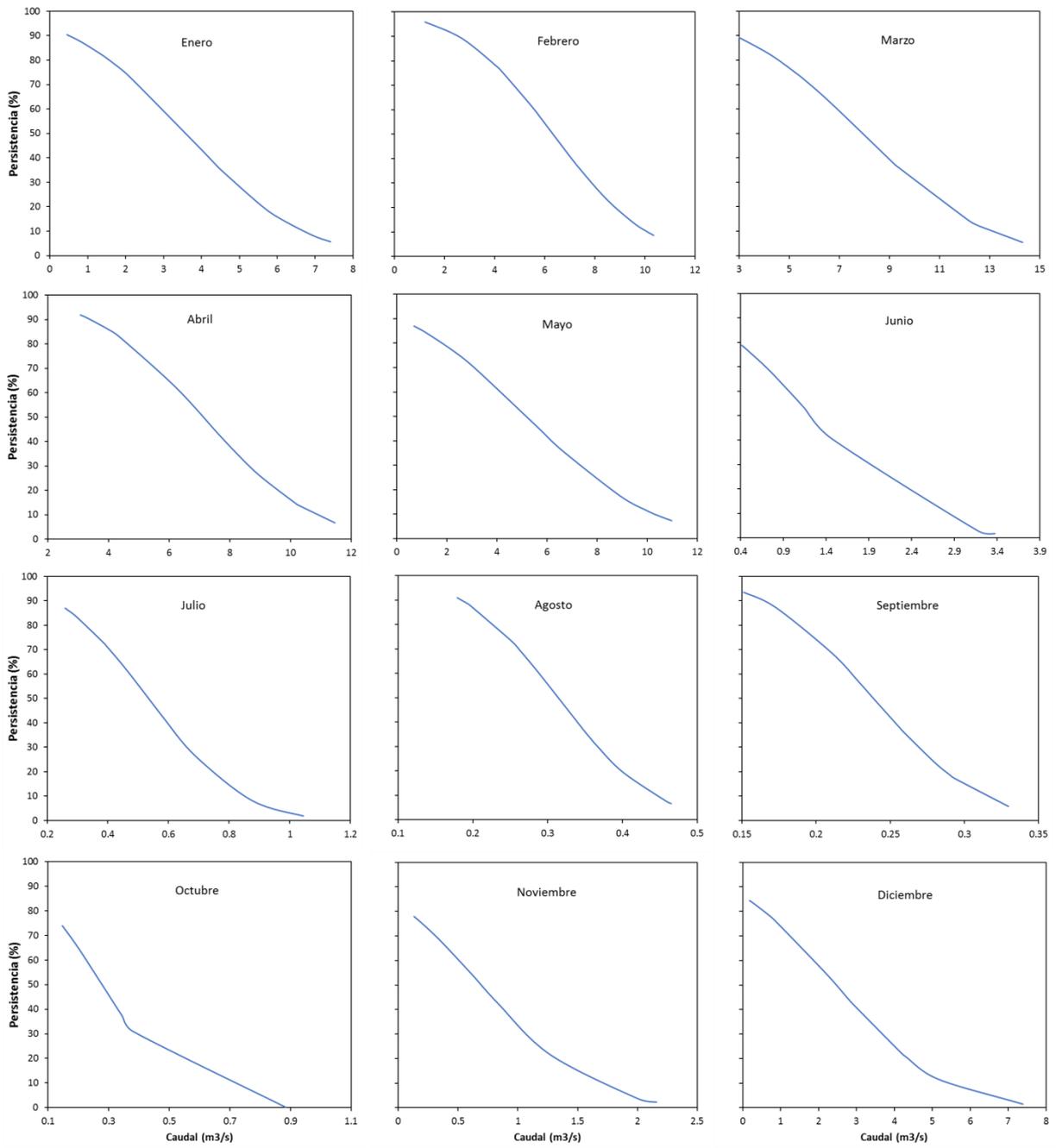
*Anexo 7: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 2 (Rio Aguaquiri).*



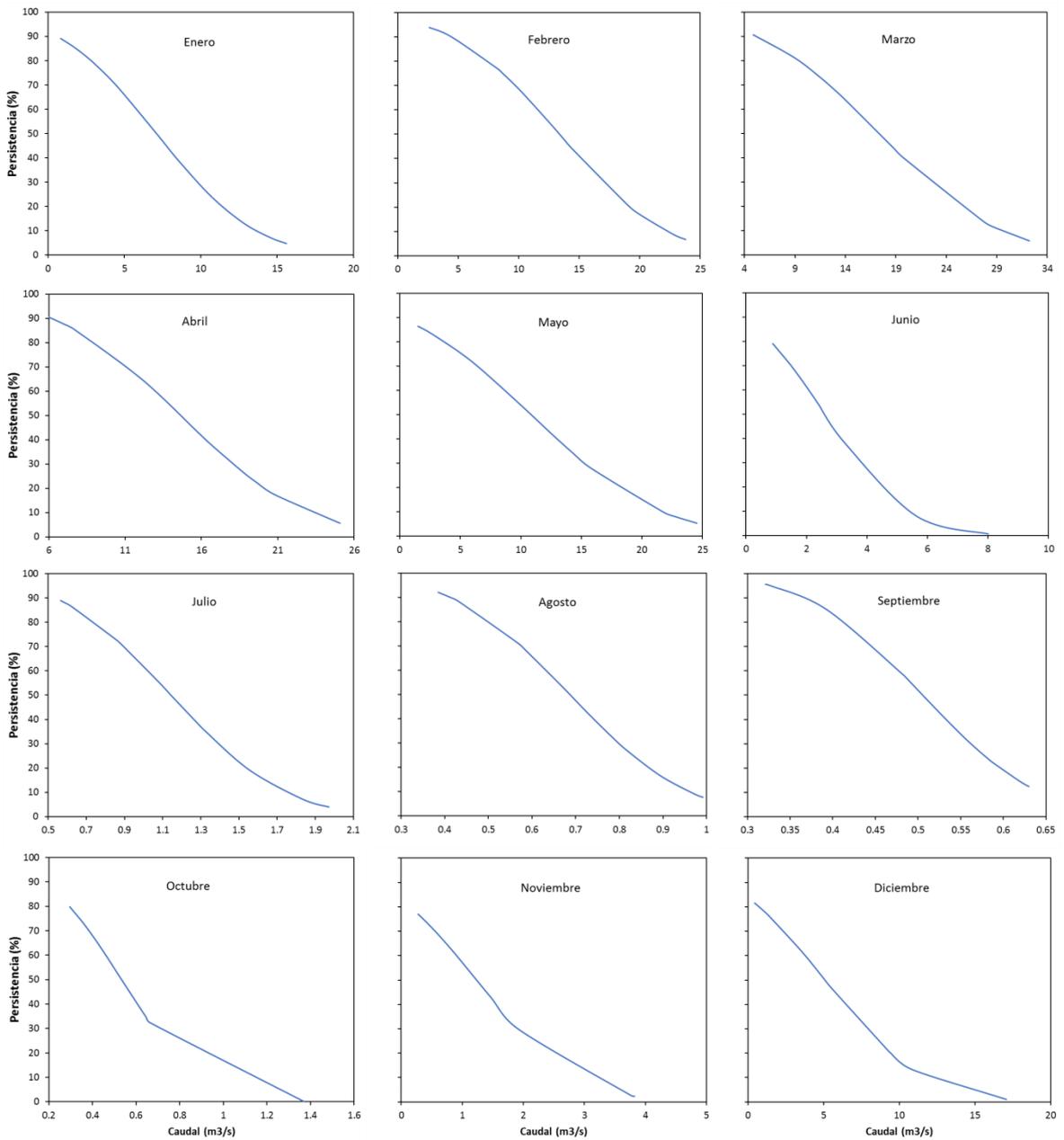
*Anexo 8: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 3 (Rio Medio Alto Mala).*



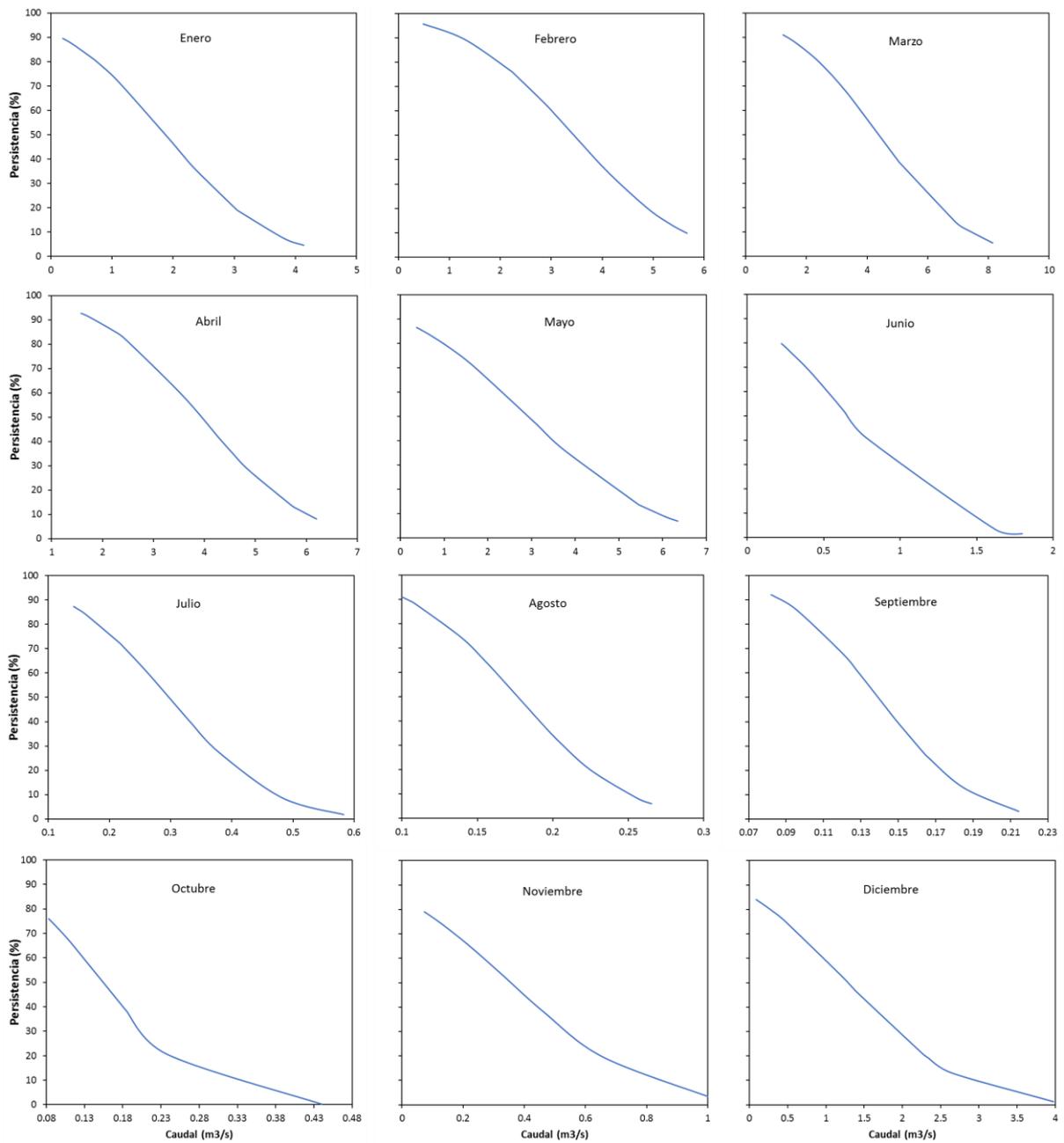
*Anexo 9: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 4 (Rio Acacache).*



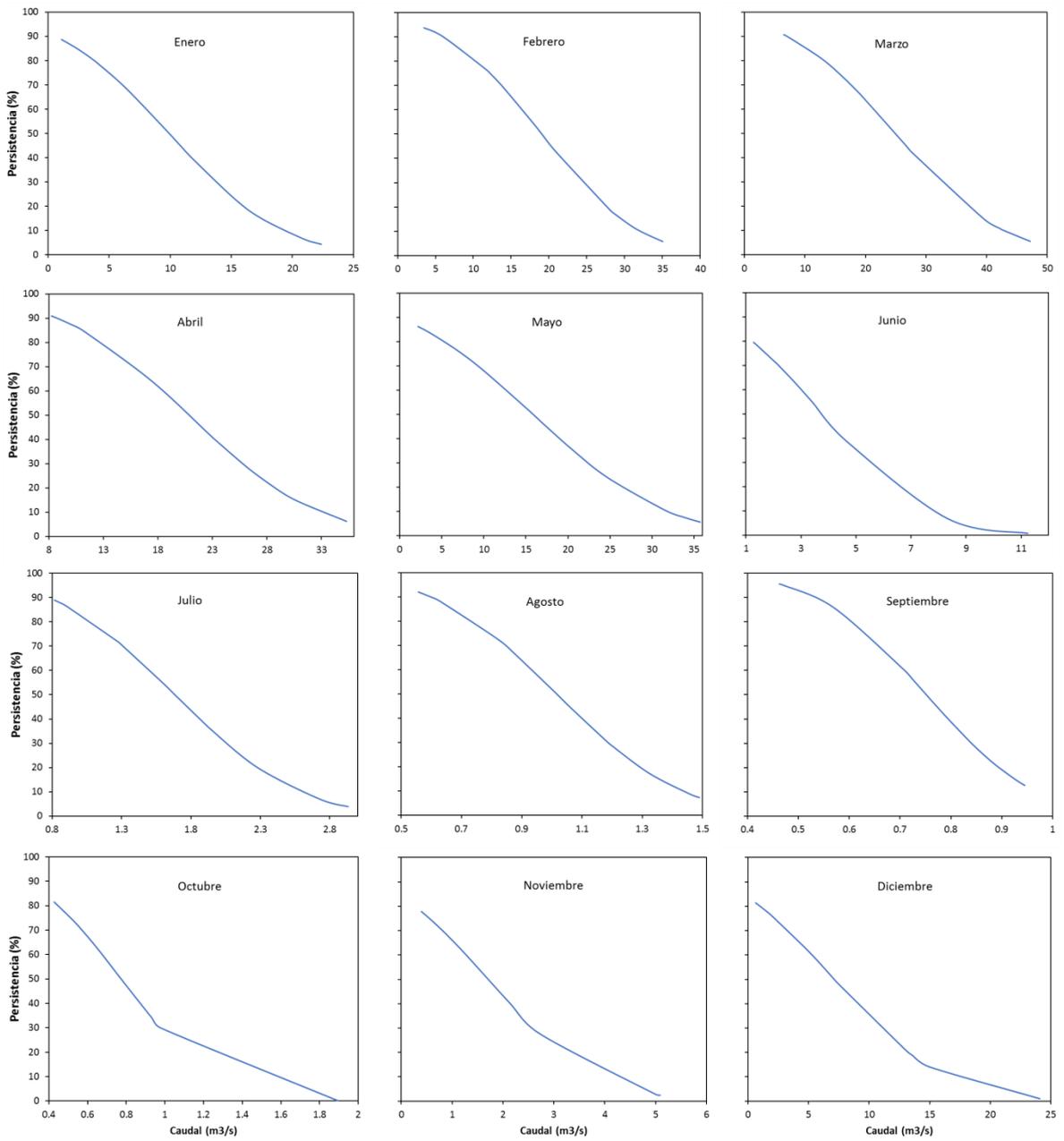
*Anexo 10: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 5 (Rio Medio Mala).*



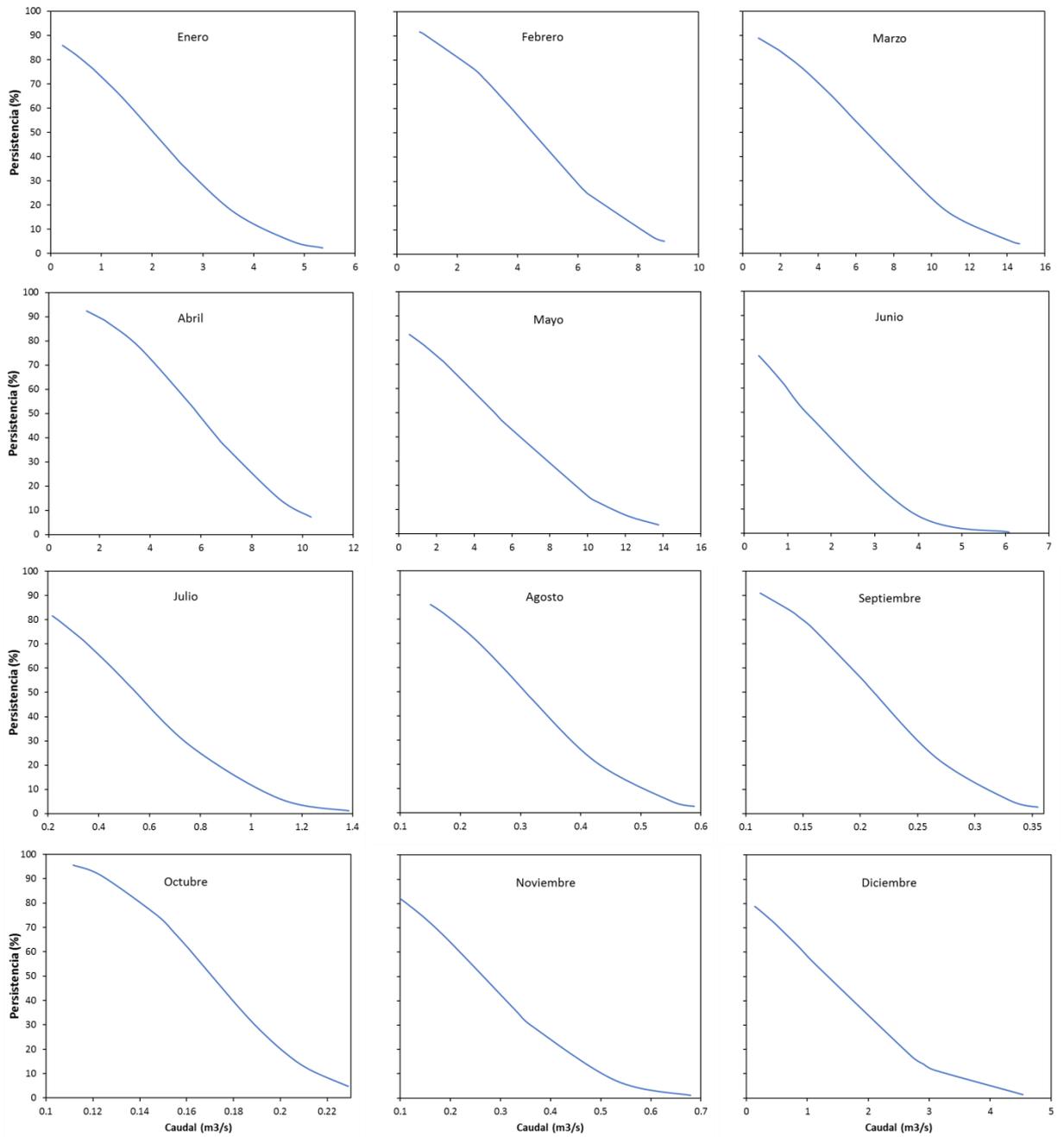
Anexo 11: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 6 (Rio Tantara).



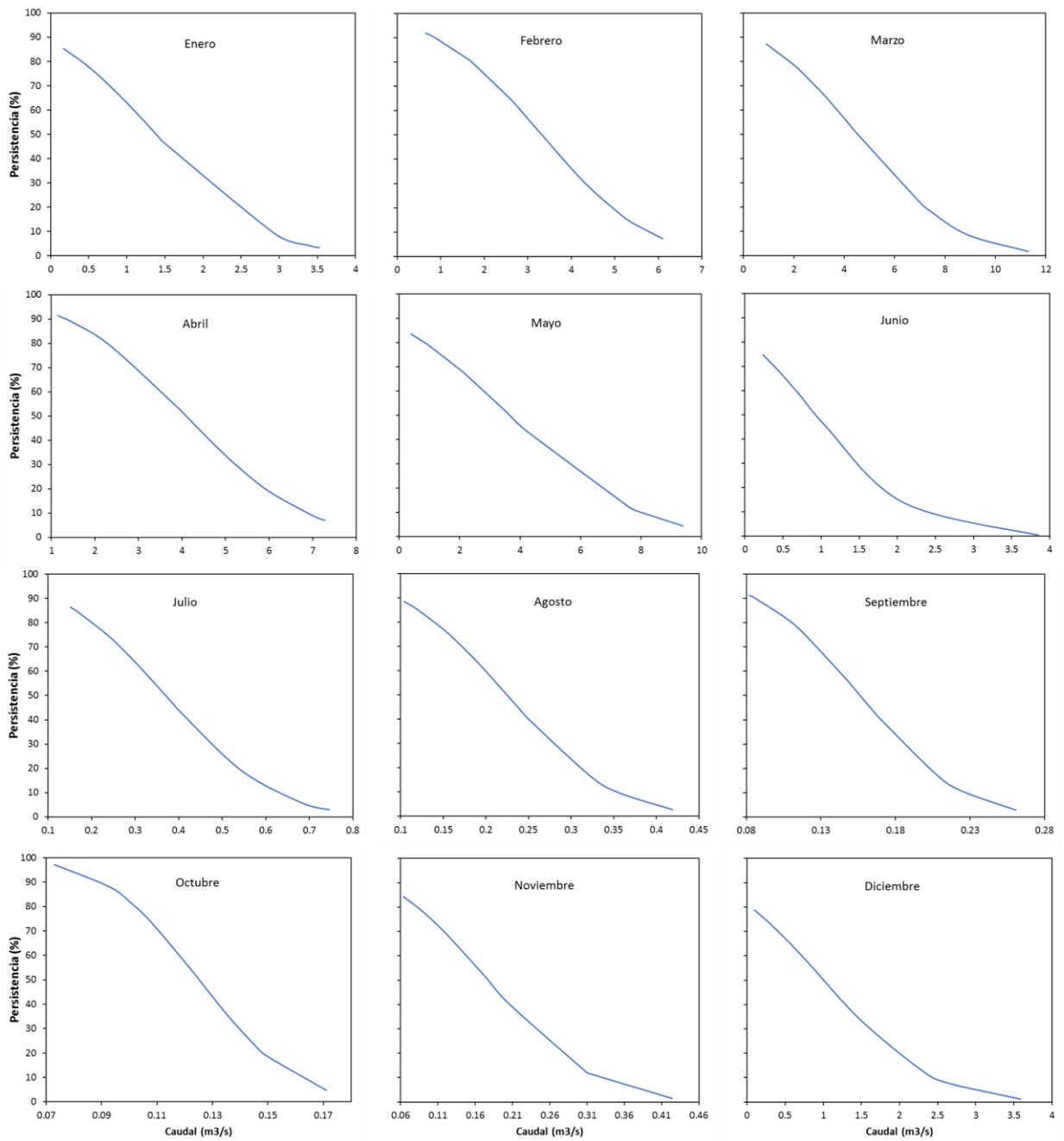
*Anexo 12: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 7 (Rio medio bajo Mala).*



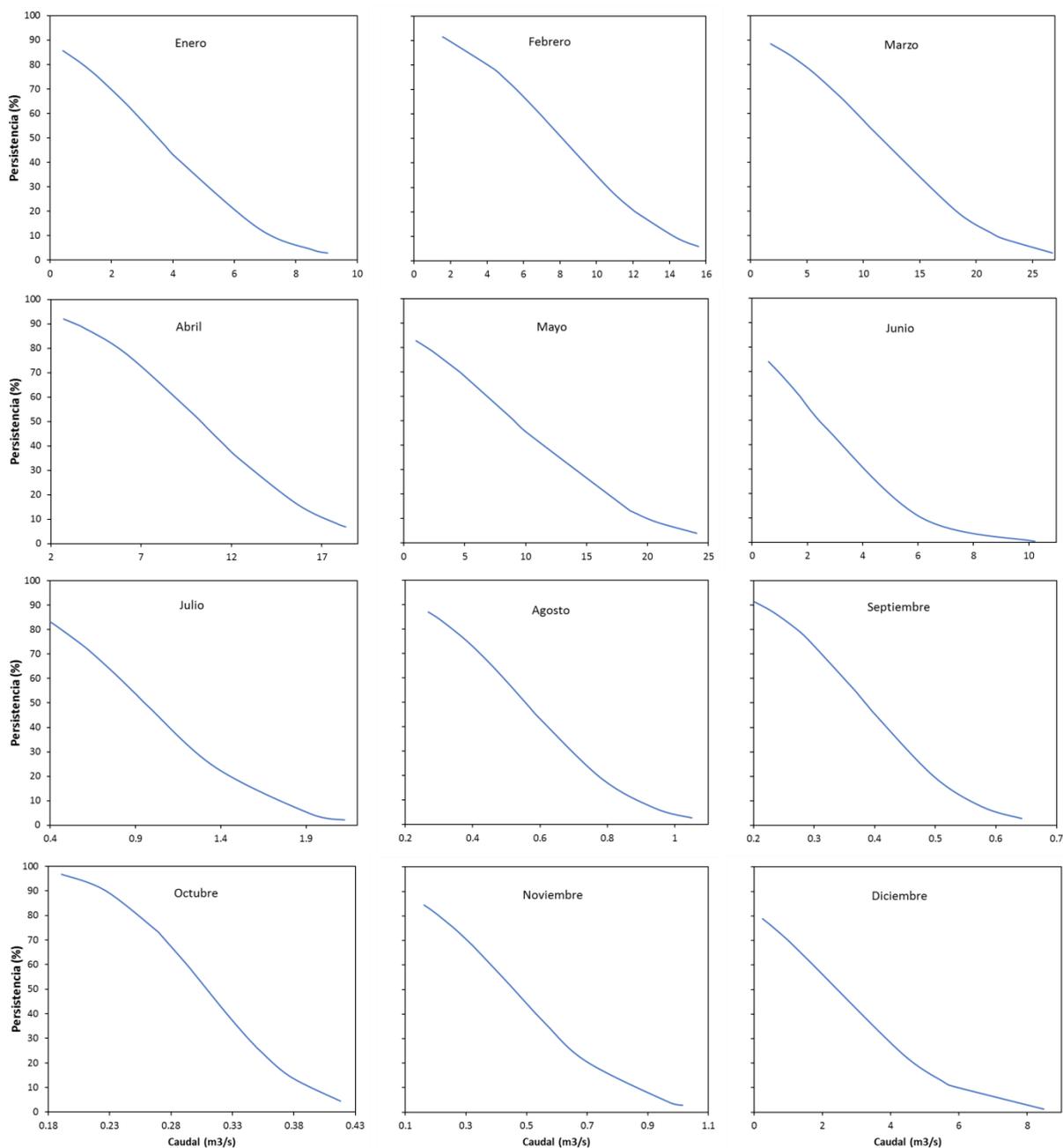
Anexo 13: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 8 (RioQuinches).



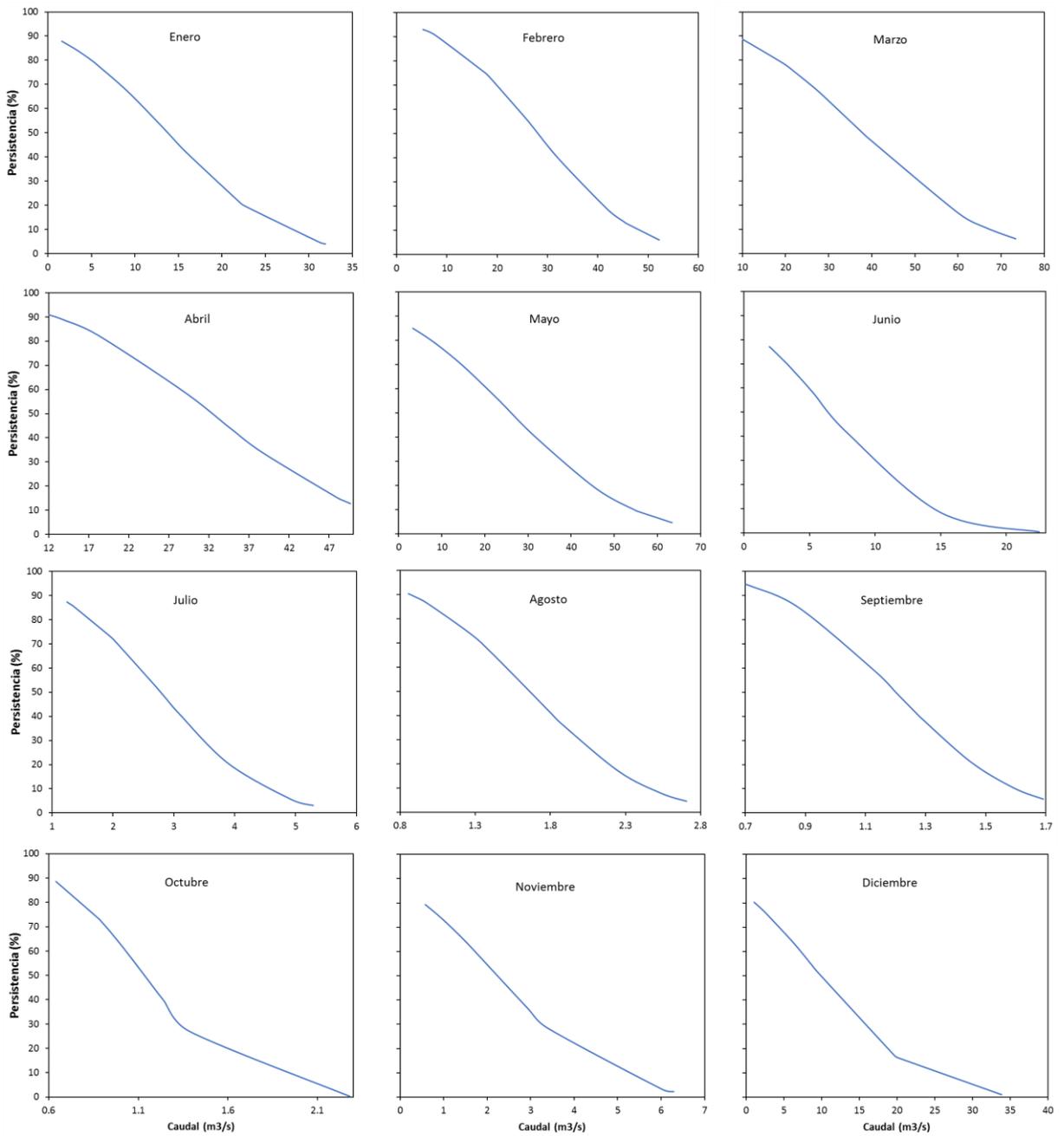
Anexo 14: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 9 (Rio Quinches).



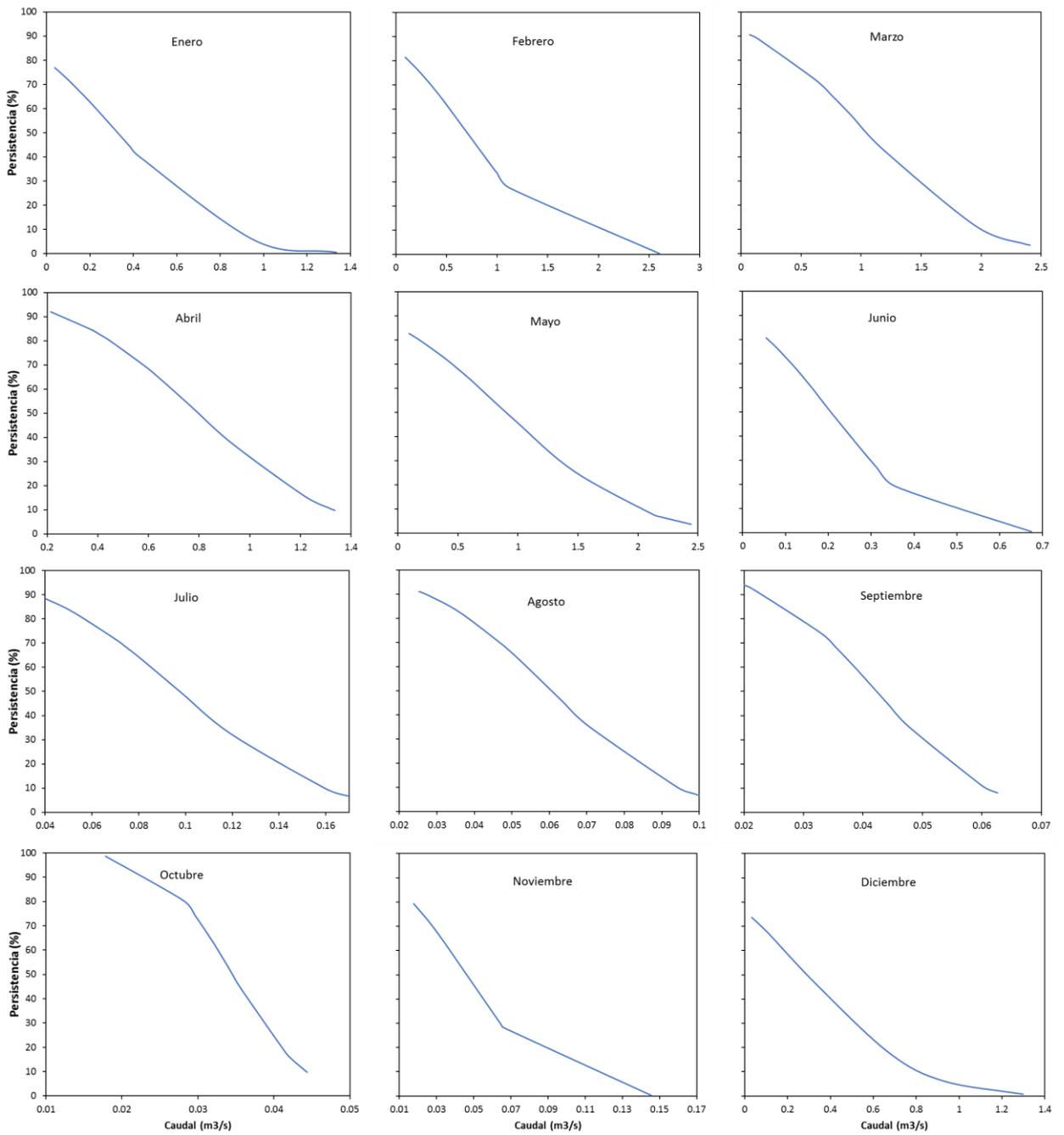
*Anexo 15: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 10 (Rio Quinches).*



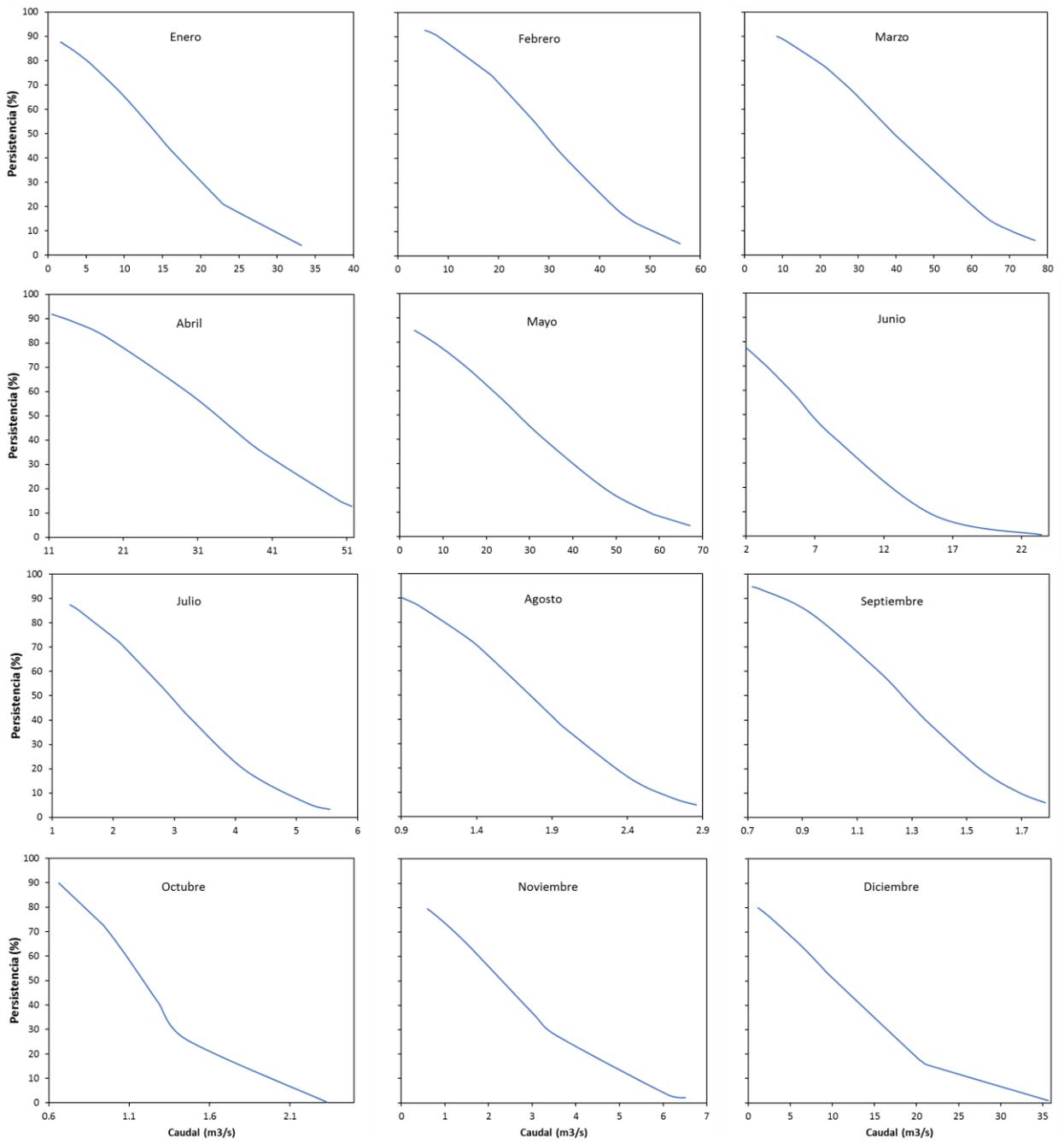
*Anexo 16: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 11 (Rio bajo Mala).*



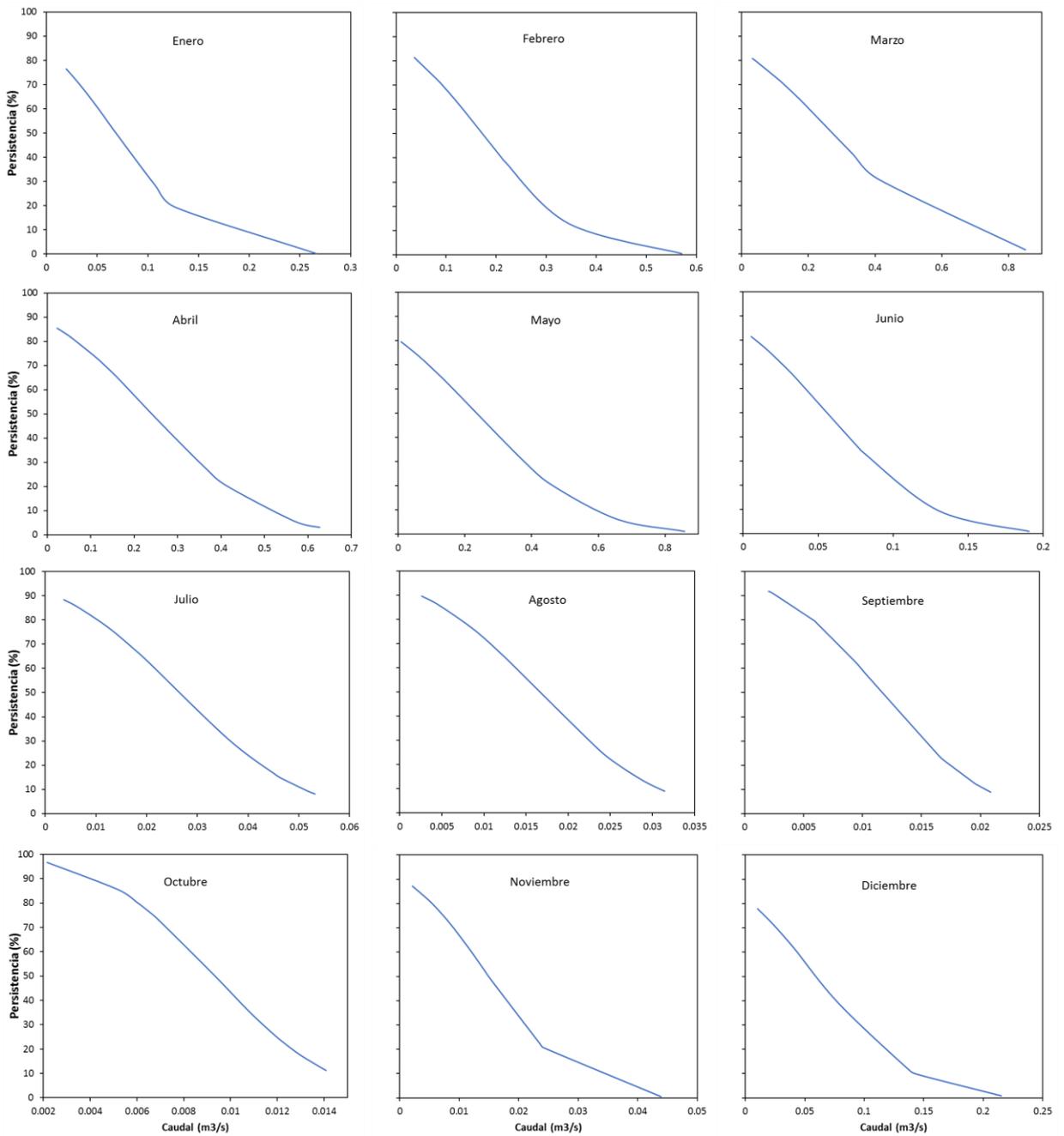
*Anexo 17: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 12 (Rio bajo Mala).*



*Anexo 18: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 13 (Rio bajo Mala).*



*Anexo 19: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 14 (Rio bajo Mala).*



*Anexo 20: Curva de distribución acumulada mensual para la Subcuenca 15 (Rio bajo Mala).*

