

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**MAPA DE CAUDALES MÁXIMOS EN CUENCAS DE
LA ZONA CENTRO DE LA VERTIENTE DEL PACIFICO
(Subregión hidrológica 5a4 IILA)**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil

Autor
Luis Alexis Vargas Curo

Asesor
Ronald Roger Gutierrez Llantoy, PhD.

Lima - Perú
2018

Dedicatoria

A Dios.

Por fortalecer mi espíritu, darme fuerzas, salud y cuidarme siempre.

A mis padres Luis y Reyna.

Por sus palabras, su paciencia, sus consejos, pero sobre todo por su amor.



Agradecimientos

Agradecer al grupo humano que conformamos los alumnos de la maestría asesorados por el profesor Ronald Gutierrez los cuales contribuyeron con datos, consejos y revisiones en la preparación de la tesis y obviamente a mi asesor Ronald Gutierrez, por su apoyo, interés y su inmensa contribución al desarrollo de la presente tesis.



Resumen

La caracterización y estimación de las crecidas de un río son indispensables para garantizar el correcto desempeño y seguridad de infraestructura hidráulica. Nuestro país, en tanto se ubica en una de las zonas con la mayor actividad relacionada a fenómenos hidrológicos extremos, requiere de herramientas y métodos desarrollados para nuestro contexto y situaciones hidrológicas.

En tal virtud, el objetivo principal de la presente investigación es el desarrollo y aplicación de técnicas que permitan estimar caudales máximos naturales, para diferentes probabilidades de ocurrencia, en puntos estratégicos de los principales ríos de la zona centro de la vertiente del Pacífico, los cuales se ubican en la región denominada 5a4 en el “Estudio de la hidrología del Perú”(IILA et al.,1982). Las referidas estimaciones plasmadas en mapas permiten el dimensionamiento de infraestructura hidráulica y el control de riesgos asociados a los caudales máximos.

Es importante mencionar que la presente contribución se distingue de la habitual forma de estimar caudales máximos en cuencas con pocas o sin estaciones de aforo, complementando información existente con bases de datos satelitales, aplicando modelos conceptuales que representen procesos físicos y que permitan validar la información generada.

La presente tesis se distribuye como sigue. En el capítulo1se presentan los aspectos generales de la investigación que comprende la introducción, problema de investigación y objetivos; asimismo, se describe el área de estudio especificando sus características fisiográficas y aspectos de hidrología e hidrografía; finalmente, se hace una breve revisión de conceptos importantes enfatizando aspectos usados en la metodología para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo2se presentan los datos y la metodología que se empleó en el presente trabajo, la primera sección comprende la descripción de los datos relevantes del área de estudio tales como la información hidrometeorológica convencional e información sobre estimaciones satelitales de variables climáticas. La segunda sección comprende la descripción detallada de los métodos y el procedimiento desde la recolección de información hasta la generación de mapas de caudales máximos.

En el capítulo3se presenta la discusión y los resultados del procedimiento el cual inicia con la selección y recolección de registros de estaciones hidrológicas en la zona de estudio. Subsecuentemente, los registros fueron evaluados mediante diversas técnicas para verificar la confiabilidad, consistencia y homogeneidad de los datos.

Debido a la limitada cantidad de estaciones de aforo disponibles en la zona de estudio, la evaluación de caudales máximos en diversos puntos de la red fluvial requirió aplicar técnicas de extrapolación de datos observados. Para tal efecto, se priorizó el uso de modelos hidrológicos calibrados en forma tal que puedan reproducir adecuados resultados en puntos aforados y reproducirlos a puntos no aforados con un buen nivel de confiabilidad.

Por otro lado, la baja densidad de registros pluviométricos y ausencia de registros de variables climáticas requeridas para desarrollar un modelo que relacione las precipitaciones con las descargas, requirieron el uso de diversas bases de datos y productos satelitales con el fin de optimizar, en espacio y tiempo, los registros disponibles de precipitación y suplir las limitaciones de información relativa a las variables climáticas. Entonces se eligieron los datos con estimaciones satelitales de lluvia y evapotranspiración que mejor representen los datos observados conformando una nueva base de datos compuesta de registros convencionales y satelitales. Posteriormente, se seleccionaron puntos de análisis al interior de las cuencas y adecuaron las subcuencas generadas por estos puntos al modelo GR2M para simular caudales mensuales, considerando adecuada una superficie de cuenca mayor a 300 km².

Los registros de caudales máximos en puntos aforados que pasaron la etapa de evaluación se ajustaron a funciones de distribución con la finalidad de determinar su ley de frecuencia. Asimismo, para los puntos no aforados, apoyándonos en los caudales simulados obtenidos de la etapa de modelamiento y a través de un análisis regional a nivel de cuenca se establecieron relaciones entre las curvas de frecuencia de caudales máximos mensuales y máximos diarios. Así se obtuvieron aproximaciones confiables de la probabilidad de ocurrencia de caudales máximos diarios en puntos no aforados, a partir de los cuales se construyeron mapas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Finalmente la tesis concluye con el capítulo 4 donde se presentan las conclusiones generales de la investigación y el trabajo futuro recomendado.

Abstract

The river's floods characterization and estimation are indispensable to guarantee the correct performance and safety of hydraulic infrastructure. Our country, while located in one of the areas with the highest activity related to extreme hydroclimatic phenomena, requires tools and methods developed for our context and hydrological situations.

In this virtue, the main objective of this research is development and application of techniques that allow estimating natural maximum flows, for different probabilities of occurrence, in strategic points of main rivers in the central area of Pacific slope, located in the region named 5a4 in the "Study of Hydrology of Peru" citep IILA1982. The referred estimations contained in maps allow the sizing of hydraulic infrastructure and the control of risks associated with the maximum flow rates.

It is important to mention that present contribution is different from the usual way of estimating maximum flows in watersheds with few or no gauging stations, complementing existing information with satellite databases, applying conceptual models that represent physical processes and that allow validating the generated information.

The present thesis is distributed as follows. In the chapter1 general aspects of the investigation that includes the introduction, research problem and objectives are presented; also, the study area is described specifying its physiographic characteristics and aspects of hydrology and hydrography; Finally, a brief review of important concepts is made emphasizing aspects used in the methodology for the development of the research.

In the chapter2 data and methodology that was used in the present work are presented, the first section includes a description of the relevant data of study area such as conventional hydrometeorological information and information about satellite estimations of climatic variables. The second section includes detailed description of methods and procedure from the information collection to the generation of maximum flow maps.

In the chapter3 the discussion and the results of the procedure are presented, which begins with selection and collection of hydroclimatic stations records in the study area. Subsequently, the records were evaluated using various techniques to verify the data reliability, consistency and homogeneity.

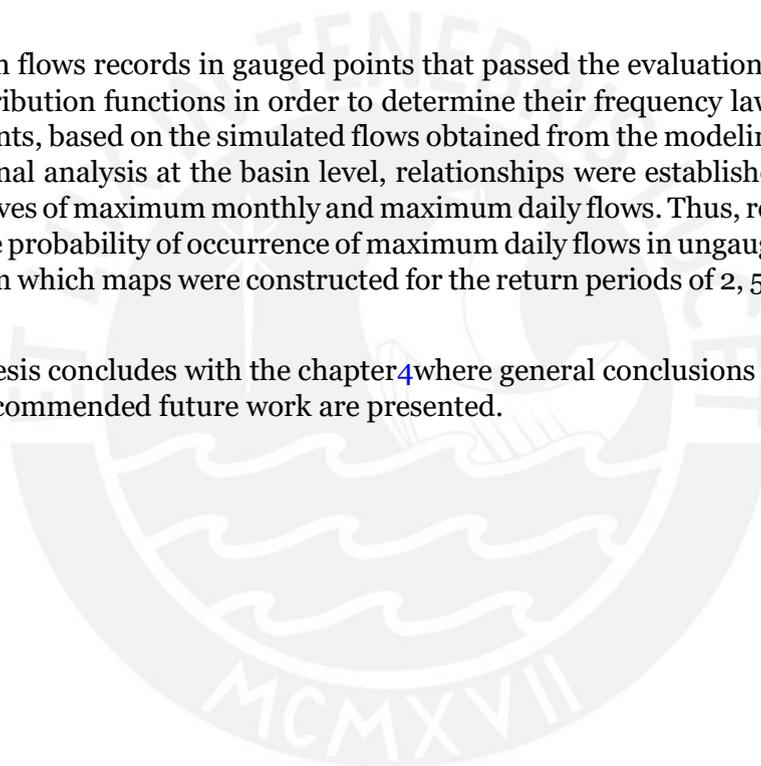
Due to the limited number of gauging stations available in the study area, the maximum flow evaluation at various points in the fluvial network required the application of extrapolation techniques in observed data. For this purpose, the use of hydrological models calibrated in such way that they can reproduce adequate results in gauged points and

reproduce them at ungauged points with a good level of reliability was prioritized.

On the other hand, the low density of rainfall records and absence of climatic variables records required to develop a model that relates precipitation and discharge, required the use of various databases and satellite products in order to optimize, in space and time, the available records of precipitation and supply the limitations of information related to climatic variables. The data was then chosen with satellite rainfall and evapotranspiration estimates that best represent the observed data, forming a new database composed of conventional and satellite records. Subsequently, analysis points were selected within the basins and the sub-basins generated by these points were adapted to the GR2M model to simulate monthly flows, considering a basin area greater than 300 km² adequate.

The maximum flows records in gauged points that passed the evaluation stage were adjusted to distribution functions in order to determine their frequency law. Likewise, for ungauged points, based on the simulated flows obtained from the modeling stage and through a regional analysis at the basin level, relationships were established between the frequency curves of maximum monthly and maximum daily flows. Thus, reliable approximations of the probability of occurrence of maximum daily flows in ungauged points were obtained, from which maps were constructed for the return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years.

Finally the thesis concludes with the chapter 4 where general conclusions of the investigation and recommended future work are presented.



Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	VI
Índice General	X
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XV
Capítulo 1 Aspectos generales	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de investigación y alcance	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivos General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Área de estudio	4
1.4.1 Localización y límites	4
1.4.2 Características fisiográficas y topográficas	4
1.4.3 Hidrología e hidrografía	6
1.4.3.1 Cuenca Chancay-Huaral	6
1.4.3.2 Cuenca Chillón	6
1.4.3.3 Cuenca Rímac.....	7
1.4.3.4 Cuenca Lurín.....	7
1.4.3.5 Cuenca Mala.....	8
1.4.3.6 Cuenca Cañete	9
1.5 Revisión bibliográfica	9
1.5.1 Análisis de datos pluviométricos	9
1.5.1.1 Método del vector regional (MVR)	10
1.5.1.2 Completación de datos	10
1.5.2 Datos satelitales.....	11
1.5.2.1 Precipitación	12

1.5.2.2	Evapotranspiración	13
1.5.2.3	Características de las bases de datos.....	14
1.5.3	Modelo hidrológico GR2M	15
1.5.3.1	Función de Producción	16
1.5.3.2	Función de Transferencia	17
1.5.4	Validación de modelos hidrológicos	17
1.5.4.1	Prueba de muestra dividida (split-sample test).....	18
1.5.4.2	Prueba de cuenca representativa (proxybasin test).....	18
1.5.5	Indices de eficiencia usados	18

Capítulo 2 Datos y método 20

2.1	Datos.....	20
2.1.1	Información hidrometeorológica convencional	20
2.1.1.1	Estaciones pluviométricas	21
2.1.1.2	Estaciones hidrométricas	21
2.1.2	Información de estimaciones de precipitación	22
2.1.2.1	TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)	22
2.1.2.2	Climate Hazards InfraRed Precipitation Station (CHIRPS).....	22
2.1.3	Información climática - Evapotranspiración	23
2.1.3.1	MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)	23
2.1.3.2	Global Land Data Assimilation System (GLDAS)	23
2.2	Método	24
2.2.1	Evaluación de información hidrometeorológica	24
2.2.1.1	Análisis hidrométrico	24
2.2.1.2	Análisis pluviométrico	25
2.2.2	Optimización de información meteorológica	25
2.2.3	Selección de puntos de análisis	26
2.2.4	Modelamiento hidrológico	26
2.2.4.1	Implementación del modelo hidrológico	26
2.2.4.2	Evaluación del modelo hidrológico	27
2.2.5	Análisis de caudales máximos	27
2.2.5.1	Caudales máximos en puntos aforados	27
2.2.5.2	Caudales máximos en puntos no aforados	27
2.2.5.3	Generación de mapas	28

Capítulo 3 Resultados y discusión 29

3.1	Evaluación de información hidrometeorológica	29
3.1.1	Análisis hidrométrico	29
3.1.1.1	Análisis exploratorio de datos	30
3.1.1.2	Completación y consistencia de registros hidrométricos ...	33
3.1.1.3	Naturalización de caudales	34
3.1.2	Análisis pluviométrico	35
3.1.2.1	Evaluación Preliminar	36
3.1.2.2	Identificación de registros anómalos	36
3.1.2.3	Evaluación a escala diaria	37
3.1.2.4	Evaluación a escala mensual	37
3.1.2.5	Evaluación a escala anual	39
3.2	Optimización de información meteorológica	44

3.2.1	Comparaciones gráficas	45
3.2.2	Verificación y validación	47
3.2.3	Completación espacial de precipitación	49
3.3	Selección de puntos de análisis	51
3.4	Modelamiento hidrológico	54
3.4.1	Implementación del modelo hidrológico	54
3.4.2	Evaluación del modelo hidrológico	56
3.4.2.1	Prueba de muestra dividida	56
3.4.2.2	Prueba de cuenca representativa	62
3.5	Análisis de caudales máximos	68
3.5.1	Caudales máximos en puntos aforados	69
3.5.2	Caudales máximos en puntos no aforados	70
3.5.2.1	Relación caudal mensual – caudal diario	71
3.5.2.2	Definición del factor de amplificación	74
3.5.2.3	Validación de resultados	75
3.5.3	Caudales máximos instantáneos	78
3.6	Mapas de caudales máximos	79
Capítulo 4 Conclusiones y trabajo futuro		84
4.1	Conclusiones.....	84
4.2	Perspectivas y trabajo futuro	85
Anexos		86
A	Detalle de estaciones pluviométricas	86
B	Detalle de estaciones Hidrométricas	89
C	Resultados - Análisis Pluviométrico	91
D	Cuantiles de caudales máximos	95
Bibliografía		104

Índice de figuras

1.1	Localización del área de estudio	4
1.2	Mapa de distribución de la elevación	5
1.3	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Chancay Huaral	6
1.4	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Chillón	7
1.5	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Rímac	7
1.6	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Lurín	8
1.7	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Mala	8
1.8	Mapa de delimitación de cuenca húmeda Cañete	9
1.9	Mapa que muestra los trimestres más húmedos globales basados en la CHP-Clim que usa la base de datos CHIRPS (Fuente: Funk et al., 2015).....	12
1.10	Evapotranspiración total promedio diaria en (mm) para el periodo 1948-2008, GLDAS (Fuente: Rui et al., 2012).....	13
1.11	Estructura del modelo GR2M(Fuente: Mouelhi, 2003)	15
2.1	Número de estaciones pluviométricas con información mensual (1965-2010)	21
2.2	Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas	21
2.3	Campos de precipitación anual, producto CHIRPS (izquierda), producto TMPA (derecha). Año 2000	22
2.4	Campos de evapotranspiración mensual, producto GLDAS (izquierda), producto MOD16 (derecha). Enero del año 1983	23
3.1	Ubicación de estaciones índice en el ámbito de estudio	30
3.2	Hidrograma de descargas mensuales - (01/1965-03/2010), a. E. Sosci (Cañete), b. E. Chosica (Rímac), c. E. La Capilla (Mala), d. E. Sto. Domingo (Chancay Huaral)	31
3.3	Hidrograma de descargas mensuales - (01/1965-12/2000), a. E. Pte. Magdalena (Chillón), b. E. Manchay (Lurín)	32
3.4	Hidrograma de descargas multimensuales – Periodo (1965-2010). Estaciones índice.....	32
3.5	Análisis de doble masa en estaciones hidrométricas	33
3.6	Hidrogramas de caudales promedio anuales en estaciones índice: La Capilla, Sosci y Chosica (Superior); Pte. Magdalena, Sto. Domingo y Manchay (inferior)	34
3.7	Serie de tiempo anual de precipitación - Estación Campo Marte	36
3.8	Serie de tiempo mensual de precipitación - Estación Huantan	36

3.9	Serie de tiempo anual de precipitación - Estación Vilca	37
3.10	Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 1 ...	38
3.11	Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 2 ...	38
3.12	Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 3 ...	39
3.13	Distribución geográfica de estaciones pluviométricas después de la etapa de regionalización	39
3.14	Curva de doble masa de los índices de las estaciones y del vector (izq.), estación y (DED) (dcha.). Regiones 2 y 3	40
3.15	Índices anuales del Vector y de las estaciones (izq.), estación y (R) (dcha.). Región 4 (superior), Región 5 (inferior)	41
3.16	Curva de doble masa de los índices de las estaciones y del vector (izq.), estación y (DED) (dcha.). Región 4 (superior), Región 5 (inferior)	42
3.17	Distribución espacial de cuadrantes de resolución (0.25°) en el área de estudio	45
3.18	Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - a. Punto P14, b. Punto P28. Cuenca baja.....	46
3.19	Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - a. Punto P47, b. Punto P17. Cuenca media.....	46
3.20	Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - a. Punto P42, b. Punto P25. Cuenca alta	47
3.21	Coefficiente de correlación (R) entre datos observados mensuales y TMPA.	48
3.22	Coefficiente de correlación (R) entre datos observados mensuales y CHIRPS	48
3.23	RMSE del promedio de los meses EFM entre datos observados y CHIRPS (izquierda); RMSE del promedio de los meses EFM entre datos observados y TMPA (derecha)	49
3.24	Estaciones virtuales adicionales - Área de estudio	50
3.25	Influencia espacial de las estaciones pluviométricas - Polígonos de Thiessen incluyendo estaciones virtuales (izq.), polígonos de Thiessen solo estaciones convencionales (dcha.)	50
3.26	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Chancay - Huaral	51
3.27	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Chillón	52
3.28	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Rímac	52
3.29	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Lurín	53
3.30	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Mala	53
3.31	Puntos y subcuencas de análisis cuenca Cañete	54
3.32	a. Precipitación media en puntos 1, 8, 13 y 16, b. Evapotranspiración (ET) media en puntos 1, 8, 13, 16 - Cuenca Cañete	55
3.33	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M - Estación Santo Domingo ...	56
3.34	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Santo Domingo (derecha).....	57
3.35	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M - Estación Puente Magdalena	57
3.36	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Puente Magdalena (derecha).....	58

3.37	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Chosica	58
3.38	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Chosica (derecha)	59
3.39	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Manchay	59
3.40	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Manchay (derecha)	60
3.41	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación La Capilla	60
3.42	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación La Capilla (derecha)	61
3.43	Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Chavín	61
3.44	Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Chavín	62
3.45	Hidrograma mensual simulado y observado de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Feb/86-Nov/97) - Estación Tinco	62
3.46	Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Tinco (derecha). Cuenca Cañete	63
3.47	Hidrogramas anuales para los meses enero, febrero y marzo de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/65-Dic/09) - Estación Sheque	63
3.48	Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Sheque (derecha). Cuenca R´imac.....	64
3.49	Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Tamboraque (derecha). Cuenca R´imac.....	64
3.50	Hidrogramas anuales meses enero, febrero y marzo de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/65-Dic/09) - Estación Tamboraque	65
3.51	Hidrograma mensual generado de la etapa de validación en la subcuenca (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/69-Dic/72) - Estación San Damián	66
3.52	Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación San Damián (derecha). Cuenca Lur´m.....	66

3.53	Hidrograma mensual generado de la etapa de validación en la subcuenca (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Oct/68-Ago/78) - Estación Pariacancha	66
3.54	Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Pariacancha (derecha). Cuenca del río Chillón	67
3.55	Ajuste estadístico de caudales – a. E. Sto. Domingo (Gumbel), b. E. Pte. Magdalena (Log-Normal), c. E. Chosica (Gumbel).....	69
3.56	Ajuste estadístico de caudales – a. E. Manchay (Gumbel), b. E. La Capilla (Gumbel), c. E. Sosci (Gumbel).....	70
3.57	Hidrograma diario y mensual, estaciones a. Pte. Magdalena (Chillón), b. Chosica (Rímac), c. Sosci (Cañete), periodo (01/01/1965-31/12/1975)	71
3.58	Hidrograma de máximos anuales de las series mensuales y diarias - a. E. Sto. Domingo, b. E. Pte. Magdalena, c. E. Chosica, d. E. Manchay, e. E. La Capilla, f. E. Sosci.....	72
3.59	Ajuste de frecuencia de la razón entre caudales máximos anuales (Q_{max}) y el promedio de la serie (Q_p) para valores diarios (Q_{maxd}/Q_{pd}) y mensuales (Q_{maxm}/Q_{pm}), estaciones índice.....	73
3.60	Ajuste de frecuencia de caudales máximos diarios dividido entre el promedio de la serie, grupo de estaciones de las cuencas Rímac, Chillón y Cañete ...	74
3.61	Ajuste de frecuencia de caudales máximos diarios divididos entre el promedio de la serie, estaciones índice subregión hidrológica 5a4.	75
3.62	Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (F_a) - a. E. Pariacancha, b. E. Obrajillo. Cuenca Chillón	76
3.63	Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (F_a) - a. E. Antapucro, b. E. San Damián. Cuenca Lurín.....	76
3.64	Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (F_a) - a. E. Sheque, b. E. San Mateo, c. E. Río Blanco. Cuenca Rímac.....	77
3.65	Ajuste estadístico de Gumbel, para series observadas y calculadas en la estación Río Blanco, cuenca Rímac	78
3.66	Mapa de caudales máximos $T=10$ años	80
3.67	Mapa de caudales máximos $T=25$ años	81
3.68	Mapa de caudales máximos $T=50$ años	82
3.69	Mapa de caudales máximos $T=100$ años	83

Índice de tablas

1.1	Principales parámetros fisiográficos en las cuencas	5
1.2	Características de las bases de datos usadas en el presente estudio.....	14
2.1	Características de la información hidrometeorológica convencional	20
3.1	Estaciones Índice	29
3.2	Principales parámetros de los registros a escala mensual	30
3.3	Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 3.43	
3.4	Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 4.44	
3.5	Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 5.44	
3.6	Cuadro resumen de estadísticos de eficiencia de la prueba de muestra dividida	67
3.7	Cuadro resumen de estadísticos de eficiencia de la prueba de cuenca representativa.....	68
3.8	Coefficiente caudal pico/caudal diario.....	79
A.1	Estaciones pluviométricas internas	86
A.2	Estaciones pluviométricas externas	88
B.1	Estaciones Hidrométricas	89
B.2	Estudios con información hidrométrica y pluviométrica recopilada	90
C.1	Resumen de parámetros estadísticos básicos para el periodo 1965-2010	91
C.2	Resumen valores completados diarios para el periodo 1965-2010	93
D.1	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Chancay-Huaral	95
D.2	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Chillón	95
D.3	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Rimac	96
D.4	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Lurín	96
D.5	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Mala	97
D.6	Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Cañete	98

Capítulo 1

Aspectos generales

1.1. Introducción

La presencia de eventos climáticos extremos en todo el mundo se ha incrementado en los últimos años, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) el cambio climático provocado por las actividades humanas favoreció numerosos eventos meteorológicos extremos registrados entre 2011 y 2015. En el Perú, el efecto de El Niño así como los enormes contrastes geomorfológicos de nuestro territorio hacen mucho más frecuente la presencia de eventos extremos, provocando intensas lluvias e inundaciones las cuales se reflejan en impactos económicos y sociales negativos.

En cuanto a la estimación de eventos extremos en nuestro medio existen diversas limitaciones entre las principales podemos nombrar, la baja densidad de estaciones hidrometeorológicas que a su vez presentan registros cortos y poco confiables.

Asimismo la estimación de caudales máximos mediante métodos empíricos debido a su sencillez tienen gran difusión, sin embargo hay evidencias de que pueden involucrar grandes errores ([Hidalgo,2014](#)).

El principal trabajo realizado sobre la hidrología peruana se remonta a los años ochenta, contenido en la publicación “Estudio de la hidrología del Perú” desarrollado por el Instituto Ítalo-Latino Americano (IILA), el Servicio Nacional de meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) ([IILA et al.,1982](#)).

En los últimos años, nuevas alternativas para la estimación de lluvia a escala espacial y temporal con cobertura global y en tiempo casi real han sido desarrollados, asimismo diversos grupos de investigación se han enfocado en validar esta información y complementarlas con mediciones terrestres podemos mencionar algunos: TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA), Climate Prediction Center Morphing (CMORPH) y Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) los cuales podrían ser útiles para regiones remotas, donde los datos de climáticos obtenidos por métodos convencionales son limitados, además de aportar información que pueda ser aplicada a modelos de transformación lluvia-escorrentía.

En nuestro país ([Casimiro et al.,2009](#)) en dos cuencas amazónicas; ([Laura et al.,2015](#)) en 1

la cuenca del río Rámis, ambos trabajos validaron el producto de lluvia satelital TRMM; (Quiroz et al.,2011) utilizaron el TMPA y CMORPH para modelamiento hidrológico en la cuenca del río Huallaga. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Yupanqui,2015) concluye que el producto CHIRPS logra eficientemente detectar precipitaciones en periodo húmedo y específicamente puede detectar eventos extremos producidos en la costa norte del Perú asociados al Fenómeno de El Niño; sin embargo falla en detectar precipitaciones en periodo seco.

Estudios de máximas avenidas realizados para las principales cuencas en la zona centro de nuestro país, evalúan y cuantifican caudales máximos mediante el modelo HEC-HMS, los cuales muestran una gran dispersión en la comparación de estimaciones a nivel de valle y cuenca alta, concluyendo que es consecuencia de la mala calidad de la información y de falta de parámetros para el modelo (Apaella,2010).

Países europeos a través de sus organismos directores de recursos hídricos, brindan información hidrológica de dominio público, y cuentan con mapas de caudales máximos implementados y desarrollados mediante software especialmente diseñado para su consulta y visualización (CEDEX,2011).

1.2.Problema de investigación y alcance

La estimación de eventos extremos y precisamente caudales máximos muchas veces es insatisfactorio dada la escasez información y el uso inadecuado de modelos aplicados para situaciones diferentes a las que fueron desarrolladas.

La subregión hidrológica 5a4 conformada por un grupo de cuencas que pertenecen a la región Lima alberga a la tercera parte de la población del Perú, gran parte de dicha población se encuentra ubicada en zonas vulnerables frente a eventos climáticos extremos principalmente por la presencia de El Niño.

Es necesario desarrollar herramientas y metodología para las situaciones y el contexto hidrológico de nuestro país, es así que la presente tesis pretende brindar una herramienta que simplifique los procesos en la estimación de los caudales de avenida, así como establecer parámetros mínimos asociados a los riesgos de la probabilidad de excedencia de caudales máximos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos General

Elaborar mapas que permitan obtener la magnitud de caudales de máximos en régimen natural, para diferentes probabilidades de ocurrencia, en cuencas con superficie mayor a 300 km² ubicadas en la zona central de la vertiente del pacifico (Subregión hidrológica 5a4).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar y validar registros pluviométricos e hidrométricos para su aplicación en el modelamiento hidrológico y estimación de caudales máximos.
- Estructurar una base de datos compuesta por datos de lluvia obtenida de manera convencional y productos de lluvia estimados por satélite.
- Evaluar la validez del uso de bases de datos con información de variables climáticas para la simulación de caudales con el modelo hidrológico GR2M.
- Establecer relaciones entre caudales máximos a escalas mensuales y diarias entre puntos aforados y no aforados del área de estudio y evaluar su validez.
- Caracterizar la probabilidad de ocurrencia de caudales máximos periodos de retorno de 5, 10, 25, 100 y 500 años para puntos aforados y no aforados de la subregión hidrológica 5a4 – IILA.

1.4. Área de estudio

La subregión hidrológica 5a4 está conformada por las cuencas de los ríos Chancay, Chillón, Rímac, Mala, Lurín, Cañete y 9 intercuenas de menor extensión pertenecientes a la vertiente del pacífico ubicados políticamente en la región Lima con una extensión total de 23900 km².

1.4.1. Localización y límites

Geográficamente la subregión hidrológica 5a4 se encuentra localizada entre los paralelos 11°00' y 13°30' de latitud sur y los meridianos 75°30' y 77°30' de longitud oeste y se extiende desde el nivel del mar hasta una altura aproximada de 5800 msnm. Limita al norte con la cuenca Huaura y la intercuenca 137559, al sur con las cuencas San Juan, Topará y la intercuenca 137539, al este con la cuenca Mantaro y al oeste con el océano pacífico (Figura 1.1).



Figura 1.1: Localización del área de estudio

1.4.2. Características fisiográficas y topográficas

El relieve de las cuencas en estudio es característico a la mayoría de los ríos de la vertiente del Pacífico, es decir, el de una hoya hidrográfica alargada, de fondo profundo y fuertes

pendientes; la cuenca se encuentra delimitada por cadenas de cerros que muestran un descenso sostenido y rápido del nivel de cumbres (INRENA,1994).

Según la fisiografía, desde el nivel del mar empieza una zona plana a manera de faja paralela a la costa hasta aproximadamente 200 msnm, posteriormente se forma el flanco occidental de los andes a nivel de cuenca media con altitudes promedio desde 200 msnm hasta 3500 msnm, esta zona se caracteriza por unidades geológicas de fuerte pendiente y valles de cañón, finalmente las altas cumbres a partir de los 3500 msnm donde se forman los nevados (ANA,2015a), como se muestra en la Figura 1.2.

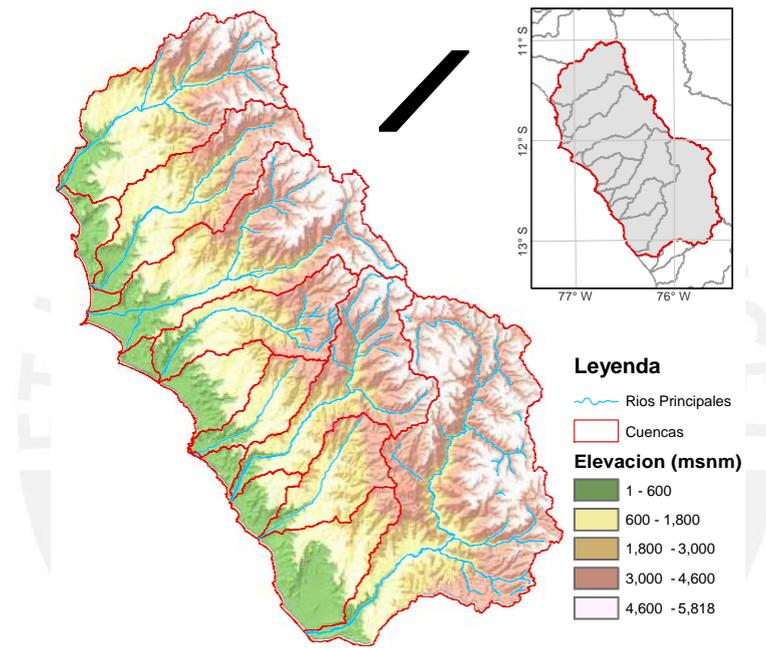


Figura 1.2: Mapa de distribución de la elevación

Los parámetros fisiográficos representativos de las cuencas de estudio (Tabla 1.1) muestran que el valor del coeficiente de compacidad (K) es mayor a 1.6 en todas las cuencas esto verifica la forma alargada de las cuencas a lo largo del río principal.

Tabla 1.1: Principales parámetros fisiográficos en las cuencas

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Altura media cuenca (msnm)	Longitud del cauce principal (km)	Pendiente del cauce (%)	Pendiente media cuenca (%)	Parámetros de forma	
							Coef. Compacidad (K)	Factor de forma (F)
Chancay-Huaral	3046.37	327.83	2727	94.00	3.15	48.80	1.66	0.35
Chillón	2210.51	321.00	2370	121.00	3.85	30.00	1.91	0.15
Rímac	3485.36	419.59	2979	127.02	1.88	47.34	1.99	0.22
Lurín	1633.80	257.53	2500	111.24	4.76	50.95	1.78	0.13
Mala	2319.70	339.05	3964	101.77	3.80	36.00	1.97	0.22
Cañete	6017.34	524.88	3686	168.00	1.85	47.09	1.89	0.21

1.4.3. Hidrología e hidrografía

El comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas de la costa tiene una particularidad relevante debido a la variabilidad espacial de las lluvias que producen excedentes y en consecuencia escorrentía, esta variabilidad permite distinguir tres zonas hidrológicas en las cuencas: [1] La zona húmeda o activa en la cual siempre se producen precipitaciones por encima de 250 mm/año y por ello es el área base de generación de escorrentía. [2] La zona árida donde nunca las lluvias han superado el límite de 250 mm/año y sin aporte propio de escorrentía. [3] La zona semiárida que recibe parcialmente lluvias que en ocasiones pueden superar los 250 mm/año, esta zona genera aportes de magnitud variable a la escorrentía total, además tiene una predisposición especial de sus suelos a ser erosionados por lo que es ahí donde se generan los huaycos y descargas importantes de agua y sólidos (Chávez,1994).

1.4.3.1. Cuenca Chancay-Huaral

El río Chancay se origina en la confluencia de los ríos Chicrin y Vichaycocha, el colector troncal del escurrimiento superficial recibe los aportes de varios afluentes, por la margen derecha, los ríos Carác, Lampian y Huataya, por la margen izquierda, los ríos Baños, Chillamayo y Añasmayo. La extensión de la cuenca colectora húmeda es de 1520 km² estando fijado este límite, aproximadamente, por la cota 2500 msnm (Figura 1.3), es decir aproximadamente el 50 % del área de la cuenca contribuye efectivamente al escurrimiento superficial (ANA,2011).

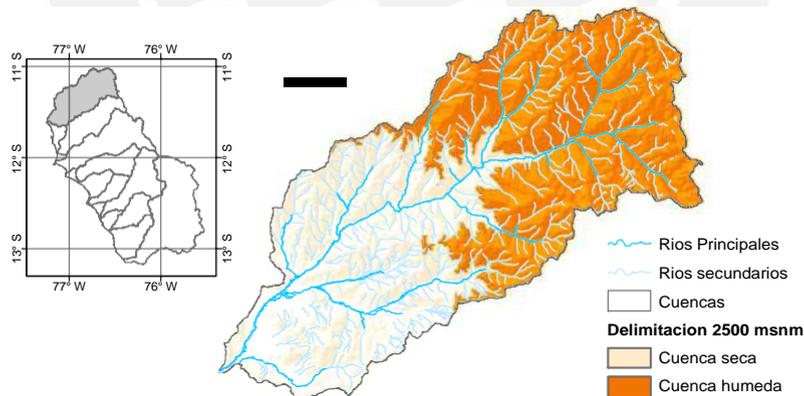


Figura 1.3: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Chancay Huaral

1.4.3.2. Cuenca Chillón

El río Chillón se origina en la laguna de Chonta a 4800 msnm, alimentándose con las precipitaciones que caen en las partes de su cuenca colectora y con los deshielos de la cordillera de la Viuda. La cuenca del río Chillón tiene una extensión aproximada de 2210.5 km² de la cual el 47 % corresponde a la denominada cuenca húmeda, fijada a partir de la cota

2500 msnm (Figura 1.4), esta porción de área contribuye efectivamente al escurrimiento superficial (INRENA, 2003).

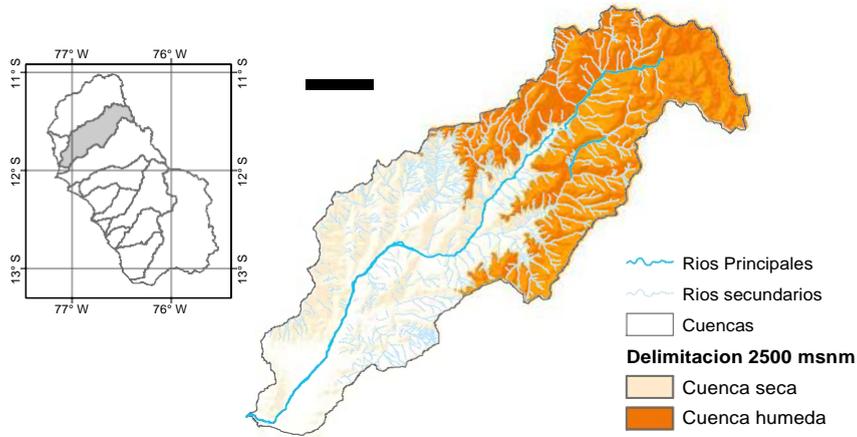


Figura 1.4: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Chillón

1.4.3.3. Cuenca Rímac

La cuenca del río Rímac tiene su origen en los deshielos del nevado Uco a 5100 msnm; la parte superior de la cuenca presenta un gran número de lagunas especialmente en la subcuenca del río Santa Eulalia. La extensión de la cuenca es de aproximadamente 3485.36 km², de la cual 2302.1 km² corresponde a la cuenca húmeda (Figura 1.5) representando el 66 % de la cuenca total (INRENA, 1994).

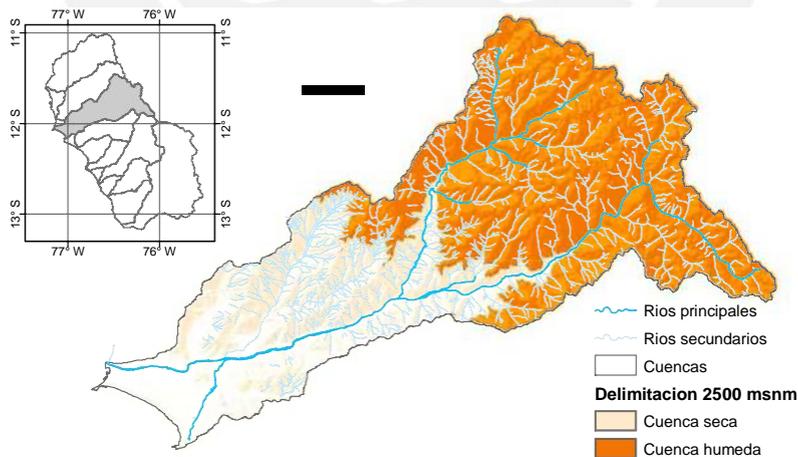


Figura 1.5: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Rímac

1.4.3.4. Cuenca Lurín

El río Lurín tiene su origen en los deshielos de los nevados Surococha a 5000 msnm alimentándose con la precipitación y deshielos que existen en la parte alta de la cuenca.

Cuenta con un área de drenaje total de 1633.8 km², la superficie de la cuenca húmeda es de 833 km² (Figura 1.6), es decir que el 49.1% del área contribuye efectivamente al escurrimiento superficial (INRENA, 1994).

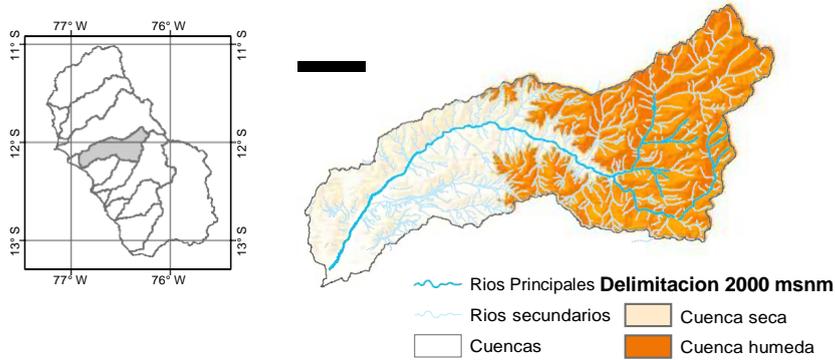


Figura 1.6: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Lurín

1.4.3.5. Cuenca Mala

El río Mala nace en la parte alta de la cuenca entre los cerros Champaverde, Huacaypaca, Huacuya y el nevado Huacaypaca aproximadamente a una altura de 4940 msnm formando una serie de lagunas en la parte alta de la cuenca las que se alimentan primordialmente de precipitaciones dando lugar a los ríos Quinches y San Lorenzo, los cuales en su confluencia, aguas arriba de la localidad de Visca, originan al río Mala (INRENA, 1994). La cuenca del río Mala tiene una superficie de 2319.7 km², de la cual, el 86% (2000 km²) pertenece a la cuenca húmeda (Figura 1.7).

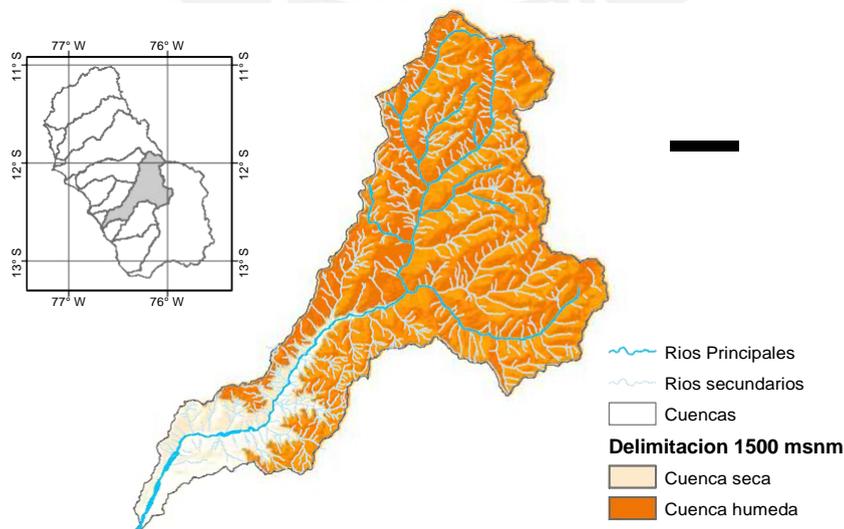


Figura 1.7: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Mala

1.4.3.6. Cuenca Cañete

El río Cañete nace en la laguna Tiellacocha, ubicada al pie de las cordilleras de Ticlla y Pichahuarco a una altitud de 4429 msnm en la divisoria de cuencas con el río Mala. Luego de recorrer 235.67 Km, presentando una pendiente promedio de 1.85 %, desemboca en el Océano Pacífico (INRENA, 2000). La cuenca del río Cañete tiene un extensión de 6017 km² donde la cuenca húmeda se genera a partir de la cota 2500 msnm y abarca aproximadamente el 80 % o sea 4856 km² de extensión (Figura 1.8).

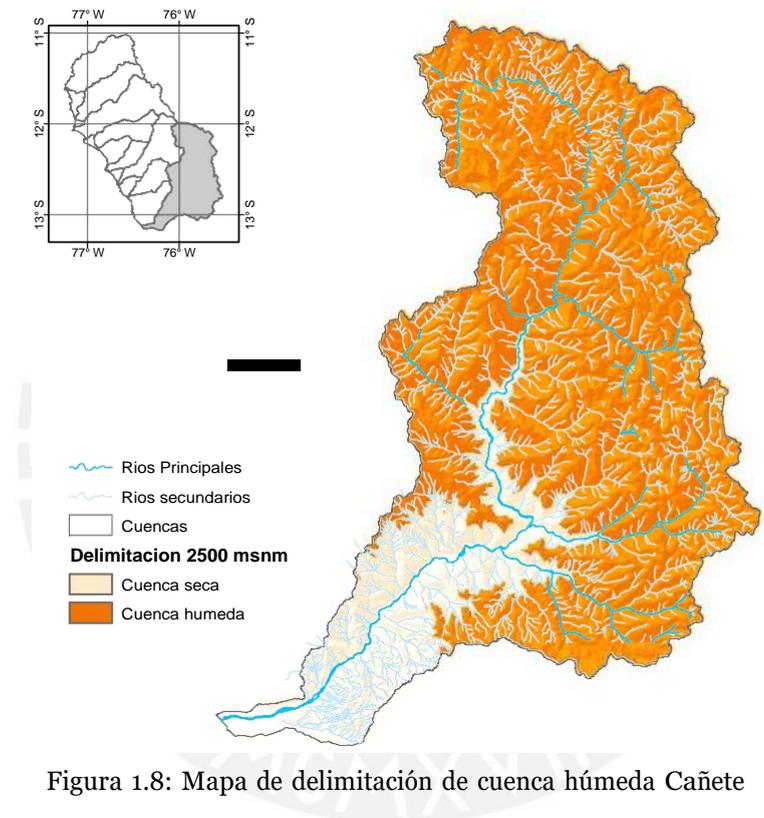


Figura 1.8: Mapa de delimitación de cuenca húmeda Cañete

1.5. Revisión bibliográfica

1.5.1. Análisis de datos pluviométricos

En nuestro medio no siempre es posible disponer de información adecuadamente detallada, o un número de eventos suficiente para efectuar un análisis hidrológico eficiente, la calidad de datos disminuye debido a la secuencia de las mediciones (usualmente a horas fijas cada 24 horas), existe un número insuficiente de estaciones meteorológicas y desafortunadamente se cuenta con escasas estaciones que cuenten con pluviógrafos. En consecuencia, la evaluación de lluvias es muy importante en especial cuando la disponibilidad de información sobre fenómenos derivados de ellas como la escorrentía no existe, es deficiente o necesarios de contrastar la disponibilidad (Chávez, 1994).

1.5.1.1. Método del vector regional (MVR)

El vector regional es un método simple desarrollado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) y orientado al análisis de la información pluviométrica de una región usando los procedimientos de (Hiez,1977) y (Brunet-Moret,1979).

El MVR se basa en la construcción de una estación ficticia y representativa de la zona de estudio en base a la información disponible. Para cada estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice. (>1 año con superávit, <1 año deficitario). A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional, ya que toma en cuenta la información de una región que se supone es climáticamente homogénea (Ochoa,2010).

Una vez elaborado el vector regional, el análisis de la información es enormemente facilitada, así podemos:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación mediante curvas dobles acumuladas con los índices del vector regional.
- Analizar gráficamente y correlacionar los datos de una estación con los índices del vector regional.
- Evaluar los datos faltantes de una estación multiplicando el índice de un año del vector regional por el promedio extendido de la estación sobre el período de estudio.

La determinación de la calidad de una estación, es función de diferentes parámetros calculados; los parámetros más importantes, que dan una buena idea del comportamiento de una estación son:

- La Desviación Standard de los Desvíos (DED), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor fuerte indica desviaciones fuertes;
- Coeficiente de correlación (R) entre la estación y el vector.

Si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona. Con estos conceptos, es posible evaluar datos anuales y mensuales siguiendo un proceso iterativo de cálculo del vector, inspección de resultados separación de estaciones desaprobadas, recálculo del vector, etc. Al término del proceso de crítica, y según el nivel de precisión que se requiera, se obtienen regiones de estaciones con semejante comportamiento multianual. (Espinoza et al.,2005)

1.5.1.2. Completación de datos

Por diversas razones suele faltar datos puntuales en las series o, alguna de estas, no tiene la extensión suficiente y ello obliga a acudir a métodos que permitan determinar, razonablemente, los valores más probables para completar datos faltantes y/o ampliarlos (Chávez, 1994).

Completación por regresión lineal

Se recomienda para la estimación de datos mensuales y anuales en una estación a través de una estación pluviométrica cercana, que cuente con una estadística consistente y observada. Para ello se requiere establecer la regresión lineal y el coeficiente de correlación (R) entre la estación patrón y la estación que tenga carencia de información, mediante una ecuación lineal de dos variables (UNESCO and ROSTLAC,1982).

Completación por razones promedio

Se utiliza para la completación de datos menores a un año, y se define por la siguiente base conceptual. Si en una zona cualquiera, la precipitación normal de una estación X, difiere en más de un 10 % con alguna de las estaciones vecinas, entonces es necesario aplicar la Ecuación 1.1 (Pizarro et al.,2009).

$$P_x = \frac{P_x}{N} \left[\frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN} \right] \quad (1.1)$$

Donde $\overline{P_x}$, \overline{PA} , $\overline{PB} \dots \overline{PN}$ es el promedio normal de las precipitaciones anuales registradas en un período común para las N estaciones y la estación X; y $PA, PB \dots PN$ es la precipitación en las N estaciones durante el período que falta en X.

1.5.2. Datos satelitales

En las últimas décadas el desarrollo científico ha permitido tener acceso a plataformas globales de datos estimados por teledetección satelital, de la cuales podemos destacar las misiones de vigilancia ambiental e hidrológica enfocados en sensores acoplados en satélites que cuantifican y monitorean parámetros climáticos, este nuevo recurso nos permiten tener acceso a información que difícilmente se podría llegar a obtener mediante métodos convencionales.

Este recurso aún no se está aprovechando completamente dado la abundante y rápida producción científica de dichas misiones satelitales, hasta el momento los beneficios son aprovechados principalmente en países desarrollados de Europa y América del norte (Hosain,2015).

La estimación de la precipitación de lluvia desde el espacio está basada en la medición de la cantidad de radiación reflejada y emitida a través de las cimas de las nubes. La mayor parte de la radiación no penetra profundamente en las regiones nubosas que contienen partículas de tamaño similar o superior al de la longitud de onda de la radiación. Así pues, si se exceptúan las longitudes de onda más largas, la mayor parte de la radiación proviene de las regiones superiores de las nubes precipitantes y, por consiguiente, solo es posible relacionarla indirectamente con la lluvia superficial (OMM,2011).

1.5.2.1. Precipitación

TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

Como parte de una misión espacial para monitorear y estudiar lluvias tropicales la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) ponen en órbita en 1997 el satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), el cual es un satélite de baja órbita no polar, concentrada en los trópicos y lleva un radar que transmite en una longitud de microondas activas y radiómetros de microondas con escáner de radiación visible e infrarrojo (OMM2011; Ramos2013).

A partir de datos del satélite TRMM y otros satélites de órbita polar y geoestacionaria surge la base de datos TMPA en la cual se generan dos principales tipos de estimaciones de lluvia: en tiempo real (denominadas RT o Real Time) y estimaciones corregidas en base a datos de pluviómetros (denominada Research). Este último estima varios productos de lluvia por satélite de forma secuencial, uno de ellos es el 3B42, el cual proporciona datos de lluvia en escala espacial de 0.25° con cobertura espacial entre los meridianos 50°N hasta 50°S , cada 3 horas y están disponibles a partir de enero de 1998 (Huffman et al.2007; Quiroz et al.2011).

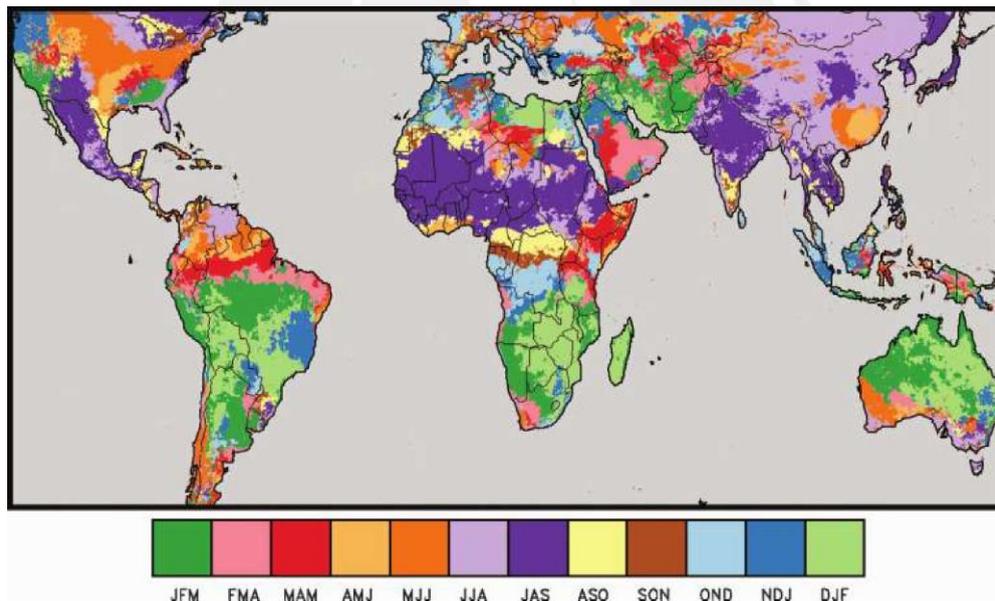


Figura 1.9: Mapa que muestra los trimestres más húmedos globales basados en la CHPCLim que usa la base de datos CHIRPS (Fuente: Funk et al., 2015)

Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)

CHIRPS es una base de datos que mezcla datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrestres. El rango de operación es de 50°S - 50°N (y todas las longitudes), con datos disponibles desde 1981 hasta el presente. Los datos CHIRPS tienen una resolución espacial de 0.05° (aprox. 5km) y su resolución temporal

mínima es de 1 día con posibilidad de agregaciones a mayores intervalos de tiempo. Los datos solo están disponibles para la superficie continental (ELEAF, 2015).

La base de datos CHIRPS fue desarrollado para apoyar a la Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo internacional Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET). Los datos de precipitación son generados principalmente a escala mensual desde la Climate Hazard Precipitation Climatology, CHP Clim, (Figura 1.9), observaciones de satélites geoestacionarios administrados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), datos de observaciones del Centro Climático de Predicción (CPC) y del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) de los Estados Unidos, también incluyen observaciones realizados por TRMM el cual pertenece a la NASA y datos de precipitación observada obtenidos de una gran variedad de fuentes incluidas los servicios meteorológicos nacional y regionales (Funk et al., 2015).

1.5.2.2. Evapotranspiración

Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

El GLDAS es un sistema de asimilación de datos de superficie que fue desarrollado conjuntamente por la NASA, Goddard Space Flight Center (GSFC), NOAA y el National Centers for Environmental Prediction (NCEP), el cual mediante modelos de superficies terrestres múltiples, integra una gran cantidad de datos basados en observación y se ejecuta a nivel mundial a las resoluciones (2.5° a 1 km), habilitado por el Sistema de Información de Suelo, LIS, (Rui and Beaudoin, 2011).

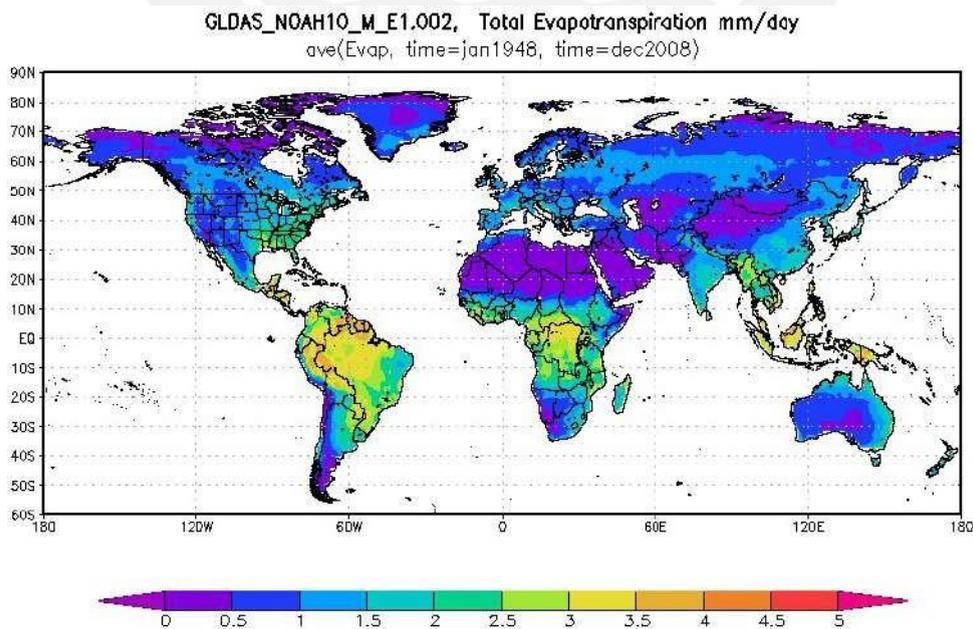


Figura 1.10: Evapotranspiración total promedio diaria en (mm) para el periodo 1948-2008, GLDAS (Fuente: Rui et al., 2012)

GLDAS genera datos terrestres hidrológicos espacial y temporalmente consistentes de calidad controlada, incluyendo evapotranspiración y otras variables que afectan a la evaporación y la transpiración, tales como temperatura, precipitación, humedad, viento, humedad del suelo, flujo de calor, y la radiación solar. La versión GLDAS-1 cuenta con más de 30 años de datos disponibles (1979-presente) y la versión GLDAS-2 (Figura 1.10) con más de 60 años de datos disponibles (1948-2010), manejan múltiples bases de datos como la Princeton Global Meteorological Forcing Dataset, integrándolos con modelos superficiales Land Surface Model (LSM), además de integrar datos de los modelos NOAA, CLM y VIC (Rui et al., 2012).

MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)

MOD16 es parte de proyecto NASA/EOS para estimar la evapotranspiración de la superficie terrestre a nivel global usando datos de variables climáticas provenientes de sensores satelitales. Global Terrestrial Evapotranspiration Data Set (MOD16-ET) es la base de datos estimada usando el algoritmo mejorado propuesto por (Mu et al., 2011) basado en la ecuación de Penman-Monteith (Monteith et al., 1965), empleando datos globales de radiómetros de alta resolución, datos meteorológicos terrestres NCEP/NCAR Reanalysis (NNR) y datos de radiación solar NASA/GEWEX.

MOD16-ET incluye datos a escalas temporales cada 8 días, mensuales y anuales desde 1983 hasta el 2006, mostrando un comportamiento favorable de indicadores como Root Mean Square Error (RMSE) y el coeficiente de correlación (R^2) en comparación con observaciones terrestres en áreas representativas del mundo a resoluciones espaciales de (1° y 8km) (Zhang et al., 2010).

1.5.2.3. Características de las bases de datos

La Tabla 1.2 muestra un resumen de características relevantes de las bases de datos empleadas en la presente investigación.

Tabla 1.2: Características de las bases de datos usadas en el presente estudio

Características básicas	TMPA 3B42	CHIRPS	GLDAS	MOD16
Versión	7	2	2	LSEM
Escala espacial	0.25°	0.25°	0.25°	8 km
Escala temporal	diario	diario	mensual	mensual
Unidades	mm/día	mm/día	kg/(m ² s-1)	mm/mes
Disponible desde	01/98	01/81	01/48	01/83-01/06
Fuente	webIRI	webCHG	webGSFC	webNTSG
Cobertura espacial	50°S-50°N, 0-360° W	50°S-50°N, 0-360° W	-60°S-90°N, 0-360° W	-62.81°S-89.19°N, 0-360° W
Geometría	400 filas x 1440 columnas	401 filas x 1440 columnas	600 filas x 1440 columnas	2091 filas x 4950 columnas
Formato	NetCDF	NetCDF	NetCDF	HDF5

1.5.3. Modelo hidrológico GR2M

El modelo Génie Rural á 2 paramètres Mensuel (GR2M) es un modelo desarrollado por el Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia (CEMAGREF), que propusieron un modelo global, lo más simple posible, para reconstruir los caudales a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Mouelhi, 2003).

De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos el modelo GR2M podría clasificarse en el intermedio entre los modelos teóricos y empíricos, denominados modelos conceptuales los cuales consideran leyes físicas en forma altamente simplificada. De acuerdo a su representación espacial clasifica como un modelo agregado que considera que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub-superficiales y subterráneos.

GR2M es un modelo a escala mensual que transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia.

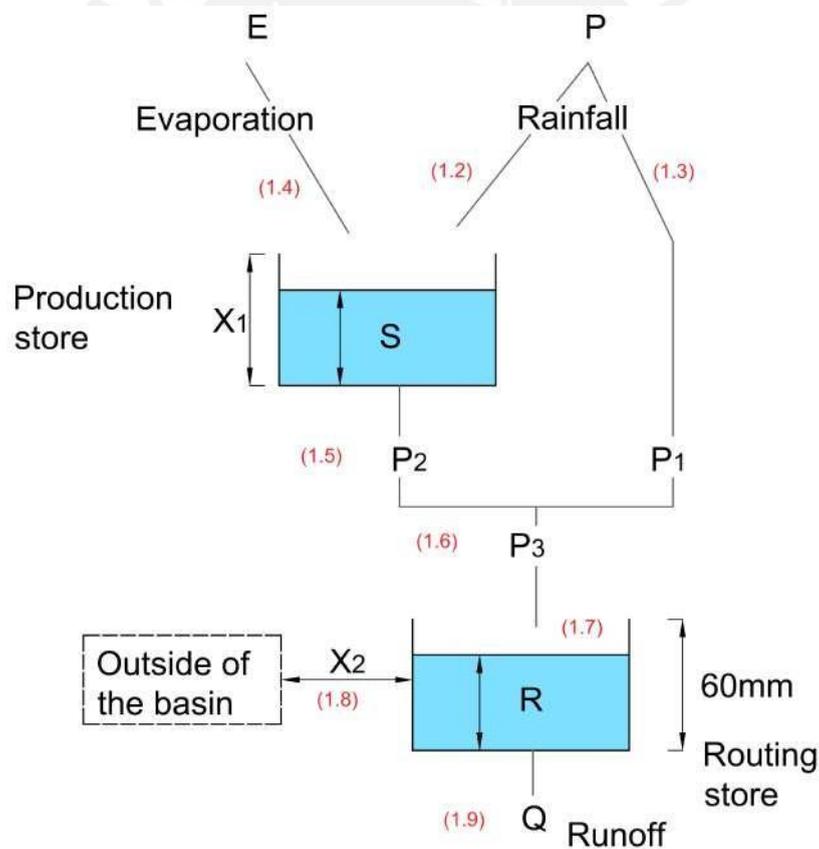


Figura 1.11: Estructura del modelo GR2M (Fuente: Mouelhi, 2003)

Su estructura consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional, la Figura 1.11 muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo.

De acuerdo a este esquema, P es la precipitación media de la cuenca, P_1 es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración actual, P_2 la percolación profunda, S el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es X_1 y la del reservorio gravitacional es asumida como 60mm (Perrin et al.,2007).

1.5.3.1. Función de Producción

De acuerdo a la Figura 1.11, parte de la precipitación es absorbida por el reservorio suelo y otra (P_1) se dirige al reservorio de agua gravitacional. El nuevo volumen de agua en el reservorio suelo (S_1) se calcula con la Ecuación 1.2.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \cdot \varphi}{1 + \varphi \cdot \frac{S}{X_1}} \quad (1.2)$$

Donde X_1 es la capacidad del reservorio suelo, y (φ) se define como $\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$

Asumiendo que no hay pérdidas, el volumen de agua antes de la infiltración debe ser el mismo después de ésta; entonces:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (1.3)$$

En una segunda instancia, el reservorio suelo será afectado por la evapotranspiración, reduciendo su volumen a S_2 . El nuevo volumen se calcula con la Ecuación 1.4.

$$S_2 = \frac{S_1 \cdot (1 - \psi)}{1 + \psi \cdot \left(\frac{1 - S_1}{X_1}\right)} \quad (1.4)$$

Donde ψ se define como $\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$

Parte de este nuevo volumen S_2 será transferido al reservorio de agua gravitacional y el remanente se convertirá en el volumen inicial S para el siguiente período de análisis. El nuevo valor de S será:

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)\right]^{1/3}} \quad (1.5)$$

Luego, el volumen de agua que percola P_2 se estimará como la diferencia entre S_2 y S por lo tanto $P_2 = S_2 - S$.

1.5.3.2. Función de Transferencia

Conocido el volumen de agua que percola, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional P_3 , será:

$$P_3 = P_1 - P_2 \quad (1.6)$$

Debido a que el reservorio de agua gravitacional contaba con un volumen inicial R , su nuevo volumen será:

$$R_1 = P - P_3 \quad (1.7)$$

Sin embargo, debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel sub-superficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor X_2 :

$$R_2 = X_2 \cdot R_1 \quad (1.8)$$

Finalmente el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática, dándonos como resultado el caudal de salida:

$$Q = \frac{R_2}{R_2 + 60} \quad (1.9)$$

El nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como $R = R_2 - Q$. Como puede observarse, todos los volúmenes estimados dependen de dos variables a optimizar:

- X_1 : Capacidad del reservorio suelo en milímetros.
- X_2 : Coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional).

1.5.4. Validación de modelos hidrológicos

La validación tiene por objetivo determinar la bondad del modelo para realizar predicciones en un lugar específico para períodos fuera del período de calibración. La transposición un modelo a condiciones que podrían ser diferentes en el tiempo genera una gran incertidumbre. Es así que para superar esta incertidumbre, (Klemeš,1986) propone un modelo jerárquico debido a que las tareas son ordenadas de acuerdo a su complejidad y las demandas de las pruebas se incrementan en la misma dirección (Cabrera,2012).

Las categorías principales para diferenciar las pruebas de validación son:

- Condiciones estacionarias (condiciones físicas similares al período de calibración).
- Condiciones no estacionarias (condiciones físicas 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:

- Se realiza en la misma cuenca que fue usada para la calibración
- Se realiza en una cuenca diferente a la usada para la calibración.

En ese contexto (Klemeš,1986) propone cuatro pruebas que considera como “mínimas” correspondientes a cada uno de los casos planteados, se muestra a continuación un resumen de las pruebas que se emplearon en el presente estudio.

1.5.4.1. Prueba de muestra dividida (split-sample test)

Aplicable para condiciones estacionarias y validación en una misma cuenca. Se utiliza para completar y extender registros faltantes.

En esta prueba, el registro se divide en dos submuestras de igual longitud, cada una de las cuales es utilizada en el proceso de calibración y la otra en el proceso de validación, viceversa; es decir, se deben realizar dos procesos de calibración – validación intercambiando las submuestras, y los resultados deben ser comparados entre sí: el modelo se acepta solamente si los resultados son similares y los errores se encuentran dentro de un rango aceptable (Klemeš,1986).

1.5.4.2. Prueba de cuenca representativa (proxy basin test)

Aplicable para condiciones estacionarias y validación en cuenca diferente. Se utiliza para transponer geográficamente un modelo, es decir, la simulación de caudales en cuencas sin registros.

Si el caudal en una cuenca no aforada es **C**, se deben seleccionar dos cuencas aforadas **A** y **B** dentro de la región: el modelo debe ser calibrado en la cuenca de **A** y validado en la cuenca **B** y viceversa. Sólo si los dos resultados de la validación son aceptables y similares el modelo tendrá un nivel básico de credibilidad para simular el caudal en la cuenca **C** (Klemeš,1986).

1.5.5. Índices de eficiencia usados

Nash-Sutcliffe (E): El índice E conocido en Hidrología como índice Nash–Sutcliffe (Nash and Sutcliffe,1970), es un estadístico normalizado del error que determina la magnitud relativa del modelo simulado en relación a un modelo de referencia (Ec.1.10) (Krause et al.,2005).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (1.10)$$

(RMSE) y (RRMSE): Los estadísticos Root Mean Square Error (RMSE) (Ec.1.11) y Relative Root Mean Square Error (RRMSE) (Ec.1.12) miden la magnitud del error promedio (Feyen et al.2000;Astorayme2017).

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{n} \quad (1.11)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{n} \cdot \frac{1}{Q^{obs}} \quad (1.12)$$

Sesgo (Bias): El coeficiente Bias (Ec.1.13) indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Laura et al.,2015).

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} \quad (1.13)$$

Capítulo 2

Datos y método

Este capítulo, en la primera sección, muestra una descripción detallada de la información hidrometeorológica que se usó para fines del presente estudio. Dicha información proviene de dos tipos de fuentes tales como estaciones convencionales de medición (estaciones pluviométricas e hidrométricas) y bases de datos con estimaciones satelitales de variables climáticas (lluvia y evapotranspiración). Asimismo, la segunda sección muestra detalladamente el método y procedimiento desde la recolección de información hasta la generación del producto final, es decir, los mapas de caudales máximos.

2.1. Datos

2.1.1. Información hidrometeorológica convencional

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) es la institución encargada de monitorear datos hidrometeorológicos en nuestro país, es así que la mayoría de información procedente de estaciones pluviométricas e hidrométricas usada en el presente estudio fue obtenida de la base de datos de dicha institución (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Características de la información hidrometeorológica convencional

Variable	Fuente	Archivo	Resolución temporal	Unidad
Precipitación acumulada	SENAMHI	xlsx	Diario	mm
Caudal promedio	SENAMHI	xlsx	Diario	m ³ /s

Periodo de estudio: El cuantificar y predecir eventos extremos requiere la mayor longitud de registro posible, es por eso que basándonos en información disponible se eligió la serie de tiempo desde Enero de 1965 hasta marzo del 2010 por ser el periodo histórico con la mayor cantidad de datos (Figura 2.1).

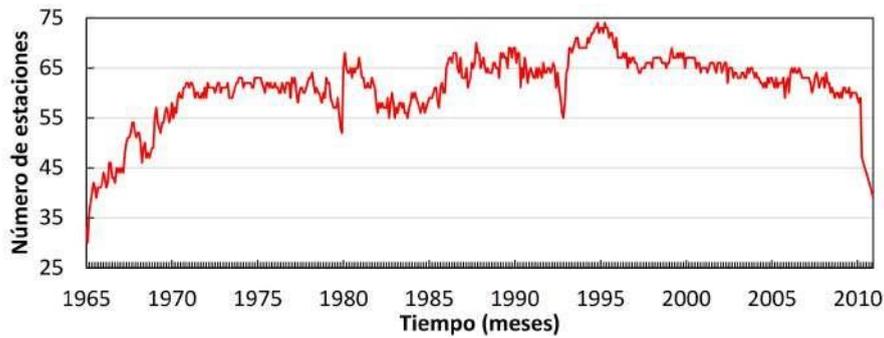


Figura 2.1: Número de estaciones pluviométricas con información mensual (1965-2010)

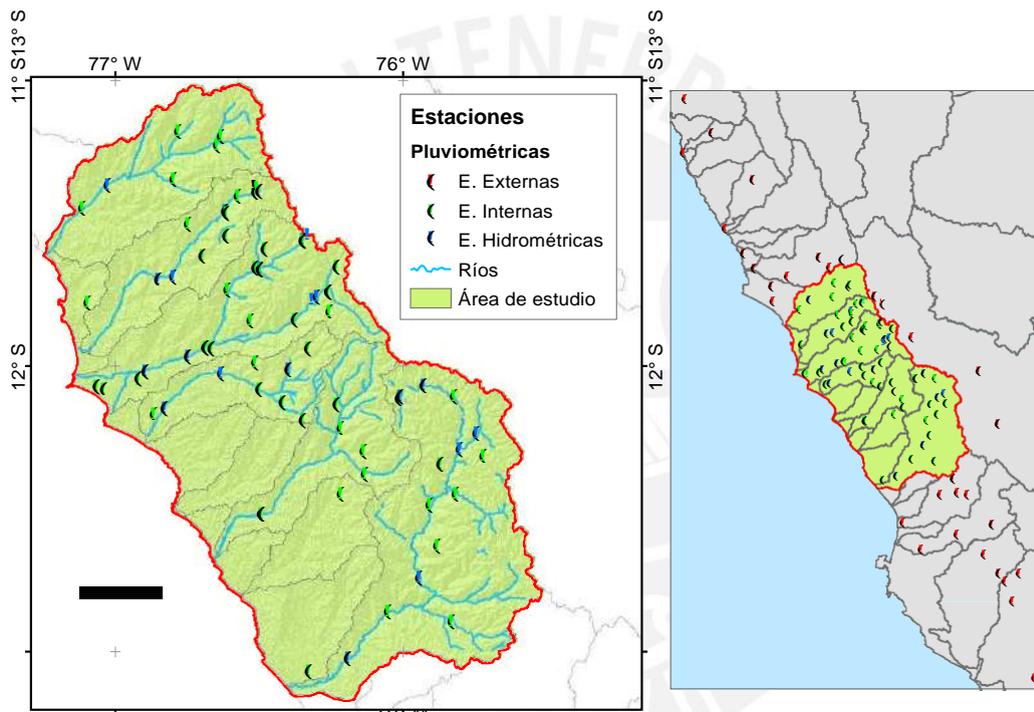


Figura 2.2: Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas

2.1.1.1. Estaciones pluviométricas

Se seleccionaron 117 estaciones pluviométricas en el ámbito del área de estudio, de las cuales 49 se encuentran ubicados al interior de la zona de estudio (Anexo A.1), 35 pertenecen a cuencas vecinas (Anexo A.2) asimismo se descartaron 33 estaciones por presentar longitudes de registros cortos (menores a 15 años).

2.1.1.2. Estaciones hidrométricas

Se seleccionaron registros de 17 estaciones hidrométricas administradas por el SENAMHI y 8 estaciones de otras fuentes (Anexo B.1), de las cuales solo 6 cuentan con registro diarios

de más de 20 años continuos (Anexo ??). La mayor cantidad de estaciones hidrométricas se encuentran en las cuencas Rímac, Chancay, Lurín y Chillón, mientras que las cuencas de Mala y Chancay-Huaral solo cuentan con una estación hidrométrica (Figura2.2).

2.1.2. Información de estimaciones de precipitación

En esta sección se detallan características de las bases de datos con estimaciones satelitales de precipitación para el área de estudio, las cuales se presentaron en la Sección1.5.2.1.

2.1.2.1. TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

Los datos recopilados para el área de estudio con resolución espacial (0.25°) abarcan 63 cuadrantes (7 filas x 9 columnas) (Figura2.3) entre las coordenadas geográficas 11.00° a 13.25° latitud sur y 75.50° y 77.25° longitud oeste, el periodo de tiempo disponible comprende entre Ene/98-Mar/10 (12 años) de datos de precipitación diaria para cada cuadrante, los cuales fueron descargados en formato NetCDF de la biblioteca de datos del International Research Institute for Climate and Society (IRISC).

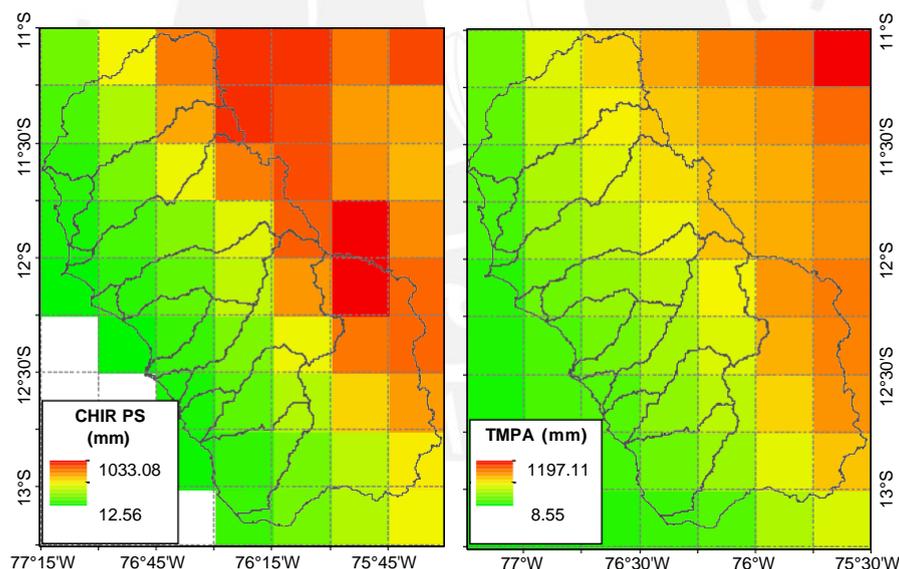


Figura 2.3: Campos de precipitación anual, producto CHIRPS (izquierda), producto TMPA (derecha). Año 2000

2.1.2.2. Climate Hazards InfraRed Precipitation Station (CHIRPS)

Esta base de datos tiene la misma resolución espacial (0.25°) que el producto TMPA es así, que los cuadrantes son los mismos descritos en el punto anterior (Figura2.3), los registros abarcan 30 años entre Ene/81-Mar/10 de datos de precipitación diaria para cada cuadrante los cuales fueron descargados en formato NetCDF de la página web del Climate Hazards Group (CHG).

2.1.3. Información climática – Evapotranspiración

En esta sección se detallan características de las bases de datos con estimaciones de evapotranspiración para el área de estudio, las cuales se presentaron en el inciso (1.5.2.2).

2.1.3.1. MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)

La base de datos MOD16 con resolución espacial 8 km abarca 750 cuadrantes (25 filas x 30 columnas), entre las coordenadas geográficas 11.000° a -13.175° latitud sur y 75.486° y 77.305° longitud oeste (Figura 2.4), los registros abarcan 24 años entre Ene/83-Dic/06 de datos a escala mensual para cada cuadrante los cuales fueron descargados en formato HDF5 de la web del Numerical Terradynamic Simulation Group(NTSG).

2.1.3.2. Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

La base de datos GLDAS en su versión 2 tiene la misma resolución espacial (0.25°) que los productos de precipitación por lo que los cuadrantes son los mismos descritos (Figura 2.4), los registros abarcan 46 años entre Ene/65 - Mar/10 de datos a escala mensual para cada cuadrante, descargados en formato NetCDF de la web del Goddard Space Flight Center (GSFC-NASA).

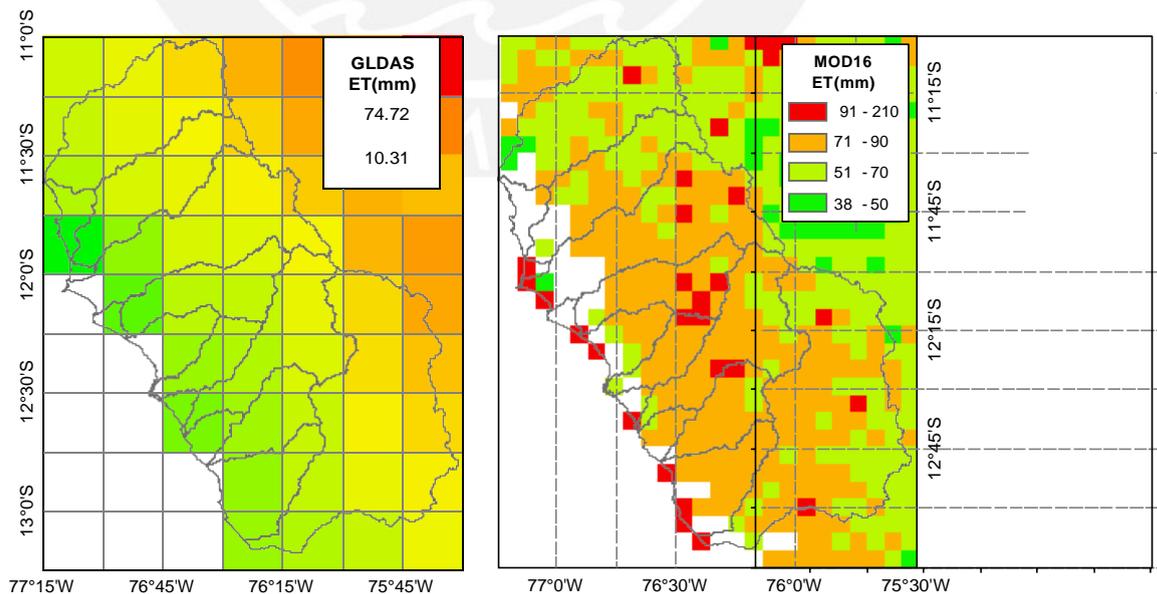


Figura 2.4: Campos de evapotranspiración mensual, producto GLDAS (izquierda), producto MOD16 (derecha). Enero del año 1983

2.2.Método

Debido a la escasez de datos diarios y la existencia de series completas a nivel mensual el método descrito usa una combinación de un modelo mensual precipitación - esorrentía y un método de desagregación de caudales para transformarlos a escala diaria basada en relaciones simples entre valores máximos agrupados a escalas mensual y diaria. Los resultados simulados de caudales máximos fueron examinados y comparados con registros aforados validando así la posibilidad de uso a nivel probabilístico y ajuste a funciones de distribución, dichos resultados fueron plasmados en mapas para diferentes periodos de retorno.

La metodología desarrollada en la tesis se basa en 5 aspectos fundamentales:

2.2.1.Evaluación de información hidrometeorológica

2.2.2.Optimización de información meteorológica

2.2.3.Selección de puntos de análisis

2.2.4.Modelamiento hidrológico

2.2.5.Análisis de caudales máximos

2.2.1. Evaluación de información hidrometeorológica

En esta sección los registros de estaciones hidrométricas y pluviométricas convencionales pasaron por un proceso de evaluación exhaustivo a escalas diaria, mensual y anual con el fin de verificar la confiabilidad de las series de datos, completar registros faltantes, corregir o eliminar datos potenciales anómalos y extender los registros al periodo (1965-2010) elegido para el presente de estudio.

2.2.1.1. Análisis hidrométrico

Se denominó estaciones “índice” al grupo de estaciones hidrométricas representativas por cada cuenca de análisis, según la Sección 2.1.1.2 como mínimo se tiene una estación con registros diarios con más de 20 años continuos por cada cuenca de análisis.

Para el análisis hidrométrico se siguieron los siguientes pasos:

- 1)Análisis exploratorio de datos
- 2)Completación y consistencia de registros hidrométricos
- 3)Naturalización de caudales

Mediante el análisis exploratorio de datos a escala mensual y anual se identificó posibles datos anómalos a través de hidrogramas y el cálculo de parámetros básicos (media, mínimos, máximos, etc.) en cada una de las estaciones índice. Entonces se establecieron grupos de estaciones con comportamiento hidrológico similar, se aplicaron los métodos de

regresión lineal (Sección 1.5.1.2), regresión múltiple (Pizarro et al., 2009) para la completación, corrección y extensión de los registros, Finalmente, para verificar la consistencia y homogeneidad se graficaron las curvas de doble masa (Searcy and Hardison, 1960).

Se debe mencionar que los valores hidrométricos evaluados requirieron estar en su condición natural, este proceso es complejo debido a la gran cantidad de agentes externos (presas de regulación, presas de derivación, irrigaciones) que influyen en el caudal a lo largo de red fluvial, además de la escasez de datos y registros de la operación de dichos agentes. Este proceso se desarrolló tomando como referencia información detallada de los estudios hidrológicos de cada una de las cuencas de análisis desarrollados por instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA).

2.2.1.2. Análisis pluviométrico

Para el análisis pluviométrico se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Evaluación preliminar
- 2) Identificación de registros anómalos
- 3) Evaluación a escala diaria
- 4) Evaluación a escala mensual
- 5) Evaluación a escala anual
- 6) Completación y extensión de los registros

La evaluación preliminar permitió la identificación de posibles valores y periodos de datos anómalos mediante el cálculo de parámetros estadísticos básicos de cada serie, posteriormente se evaluaron las series a escalas diaria para la completación de valores, mensual para el agrupamiento de estaciones con similar comportamiento y anual para establecer regiones pluviométricas. La finalidad de la regionalización pluviométrica fue evaluar la calidad de la información, completar y extender los registros mensuales a través del Método de Vector Regional (Sección 1.5.1.1) para el periodo de lluvia (Diciembre - Abril) y el Método de Razones Promedio (Sección 1.5.1.2) para periodo transición o estiaje (Mayo - Noviembre).

2.2.2. Optimización de información meteorológica

En esta sección se identificó la elevada o débil correlación que existe entre las bases de datos CHIRPS (Sección 2.1.2.2) y TMPA (Sección 2.1.2.1) con los registros de estaciones convencionales. La finalidad es poder emplear uno de estos productos satelitales para completar regiones donde no existan estaciones de lluvia y cubrir en una malla estructurada espacial el área total de estudio.

Antes de emplear dicha información fue necesaria una evaluación y comparación con registros de estaciones convencionales, ya que la información satelital puede estar sujeta a

errores debido a problemas de instrumentación, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas y limitación de la cobertura de los satélites polares (Quiroz et al., 2011).

Se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Comparaciones gráficas
- 2) Verificación y validación
- 3) Completación espacial de la precipitación

Ambas bases de datos tienen la misma resolución espacial 0.25° y diferentes periodos de tiempo disponibles CHIRPS (81-10) y TMPA (98-10) por lo que antes de realizar los pasos mencionados los registros pluviométricos se interpolaron a la misma resolución espacial de los productos satelitales mediante el método de Kriging (Oliver and Webster, 1990) y adecuaron a cada periodo de tiempo para el proceso de comparación, verificación y validación donde se usaron los estadísticos coeficiente de correlación (Murphy, 1995) y la raíz del error medio (Sección 1.5.5).

2.2.3. Selección de puntos de análisis

Teniendo una base de datos de precipitación mensual completa para el periodo de análisis desde 1965 al 2010 (Sección 2.2.1) y uniforme espacialmente (Sección 2.2.2), el siguiente paso fue establecer los puntos de análisis a lo largo de las redes fluviales donde fueron evaluados los caudales máximos. Cada punto de análisis genera una cuenca hidrográfica y esta a su vez esta compuesta por subcuencas de puntos interiores.

Siguiendo un criterio espacial semidistribuido la cuenca fue dividida considerando las estaciones de aforo. Sin embargo la escasa cantidad de estaciones permitió elegir como criterio adicional a la densidad de estaciones pluviométricas para una cobertura espacial óptima de subcuencas y su adecuación al modelo hidrológico.

2.2.4. Modelamiento hidrológico

El objetivo del modelamiento hidrológico fue simular caudales en los puntos establecidos (Sección 2.2.3), al interior de cada cuenca, a partir de las estaciones índice. Para tal efecto fue necesario implementar previamente las variables del modelo a la forma agrupada o agregada, es decir considerando la cuenca homogénea en sus valores.

2.2.4.1. Implementación del modelo hidrológico

El modelo GR2M requiere de las variables precipitación media (P_m) y evapotranspiración media (ET_m) a nivel de cuencas a escala mensual; es decir, un solo valor mensual precipitación y un solo valor mensual de evapotranspiración. Estos valores se estimaron mediante el método de polígonos de Thiessen (Villón, 2011) para cada subcuenca formada por el punto de análisis.

2.2.4.2. Evaluación del modelo hidrológico

Con la finalidad de evaluar la capacidad predictiva del modelo hidrológico GR2M en el área de estudio, se realizaron las 2 pruebas diferentes de calibración y validación para condiciones estacionarias:

[1] La prueba de muestra dividida (Sección1.5.4.1) se emplea para simulaciones de caudal en la misma cuenca. Para el caso en estudio se empleó solo los datos de puntos aforados o estaciones índice de cada cuenca donde se dividió el periodo de estudio en partes iguales para las etapas de calibración y validación, verificando en cada etapa la eficiencia de indicadores estadísticos.

[2] La prueba de cuenca representativa (Sección1.5.4.2) se emplea para simulaciones de caudal en una cuenca diferente. Para el caso de estudio se empleó todo el periodo de estudio para las etapas de calibración y validación, usando las estaciones índice para la calibración y las estaciones disponibles al interior de las cuencas para la validación.

Los estadísticos de eficiencia empleados para la validación de resultados fueron el índice de Nash-Sutcliffe(E), el Relative Root Mean Square Error (RRMSE) y el coeficiente de sesgo (Bias), (Sección1.5.5).

2.2.5. Análisis de caudales máximos

La cuantificación eventos extremos se fundamenta en el manejo de modelos probabilístico, en tal sentido el análisis de frecuencia de valores extremos, para nuestro caso de caudales máximos anuales fue realizado en los puntos seleccionados (Sección2.2.3).

2.2.5.1. Caudales máximos en puntos aforados

En esta sección se ajustaron las series de caudales máximos anuales de las estaciones índice a las funciones de distribución de mejor adecuación, los valores calculados representan el punto de partida para la estimación de caudales máximos en puntos no aforados.

2.2.5.2. Caudales máximos en puntos no aforados

A partir de registros disponibles de caudales diarios y mensuales se efectuó un análisis referido a la naturaleza y características de caudales máximos para el periodo de estudio 1965-2010.

Se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Relación caudal mensual – caudal diario
- 2) Definición del factor de amplificación
- 3) Validación de resultados

Se verificó la alta correlación entre valores máximos de las series diarias y mensuales, entonces se evaluaron los valores máximos adecuándolos directamente en funciones de frecuencia adimensionales (similar al método de la crecida índice [Chereque1989](#)), posteriormente se estableció un factor de amplificación el cual relaciona los caudales promedio de las series máximas diarias y mensual (similar al coeficiente de reducción para un periodo de duración de un día [Bacchi et al.1992](#), [Paoli et al.1998](#)).

La hipótesis principal de la metodología aplicada se basa en asumir que la distribución de caudales promedio mensuales máximos tiene el mismo comportamiento asintótico que la distribución de caudales máximos diarios, lo cual se comprobó en todas las estaciones de aforo disponibles. Este mismo comportamiento asintótico permite que mediante un valor, en este caso el denominado factor de amplificación (F_a), estimado razonablemente a través de la estación índice, se pueda llegar a la misma distribución de caudales máximos diarios.

Establecidos los factores de amplificación y aplicados a transformar las funciones de frecuencia de caudales máximos mensuales para los diferentes periodos de retorno y en cada punto de análisis a largo de la red fluvial, finalmente se procedió a contrastar y validar los resultados con datos observados en subcuencas internas al área de estudio.

2.2.5.3. Generación de mapas

Para completar algunos puntos que forman cuencas mayores a la cuenca aforada por la estación índice se empleó el método de área de drenaje ([Emerson et al.2005](#), [Archfield and Vogel2010](#)). Finalmente en esta sección se plasmaron los resultados en mapas para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Capítulo 3

Resultados y discusión

Este capítulo muestra los resultados y discusión relevantes de la metodología empleada a través de tablas, gráficos, mapas y datos obtenidos del procedimiento de cálculo descrito en la Sección 2.2, siguiendo el mismo esquema de avance hasta la generación de los mapas de caudales máximos.

3.1. Evaluación de información hidrometeorológica

3.1.1. Análisis hidrométrico

Las estaciones denominadas índice (Tabla 3.1) son las únicas con información extensa de caudales diarios además la mayoría está ubicada en el límite de la cuenca húmeda, es decir, recoge información del área que contribuye de forma efectiva a la escorrentía.

Asimismo se tienen disponible registros de estaciones internas con periodos menores a 15 años de datos a escala diaria (Figura 3.1), registros recopilados de estudios principalmente de estaciones administradas por entidades privadas con datos a escala mensual (Anexo B.2) y registros de estaciones externas al área de estudio, todos ellos sirvieron para verificación de la consistencia, completación de datos y validación de caudales simulados.

Tabla 3.1: Estaciones Índice

Estación	Cuenca
Sto. Domingo	Chancay-Huaral
Pte. Magdalena	Chillón
Chosica	Rímac
Manchay	Lurín
La Capilla	Mala
Socsi	Cañete

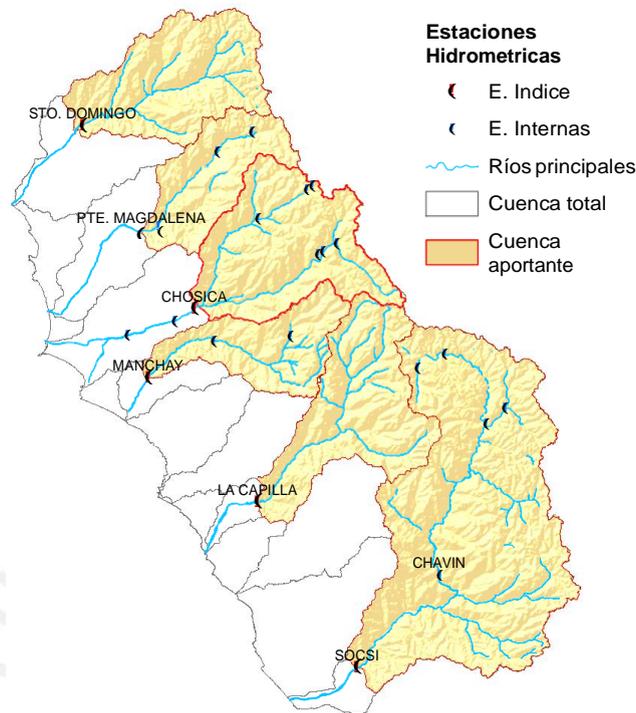


Figura 3.1: Ubicación de estaciones índice en el ámbito de estudio

3.1.1.1. Análisis exploratorio de datos

Se identificaron los parámetros relevantes de los registros diarios procesados a escala mensual en las estaciones índice para el periodo de estudio (Ene/65-Mar/10). Se puede verificar además de la Tabla 3.2 que las áreas de drenaje son directamente proporcionales a los caudales de descarga en todas las estaciones a excepción de las estaciones Pte. Magdalena que tiene un menor área de drenaje que la estación Manchay pero mayor caudal, esto es entendible debido a que la cuenca Chillón tiene una mayor altura promedio que la cuenca Lurín (Tabla 1.1), lo cual implica mayores descargas en cuenca alta.

Tabla 3.2: Principales parámetros de los registros a escala mensual

Estación	Cuenca	Área de drenaje (km ²)	Q _{seg} (m ³ /s)	Q _{medio} (m ³ /s)	Q _{medio} (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Periodo (meses)
Socsi	Cañete	5798.61	52.30	115.08	28.56	332.68	5.53	01/65-03/10
Chosica	Rímac	2300.86	26.21	45.04	19.10	134.80	1.53	01/65-03/10
La Capilla	Mala	2120.01	16.99	44.45	6.70	180.36	0.53	01/65-03/10
Sto. Domingo	Chancay	1989.39	16.03	34.00	9.21	219.40	2.58	01/65-03/10
Pte. Magdalena	Chillón	1252.48	7.12	15.60	3.84	84.91	0.28	01/65-07/99
Manchay	Lurín	1274.51	4.53	10.76	2.06	37.85	0.02	01/72-06/00

Los hidrogramas mensuales verifican el régimen estacional de las descargas, con valores

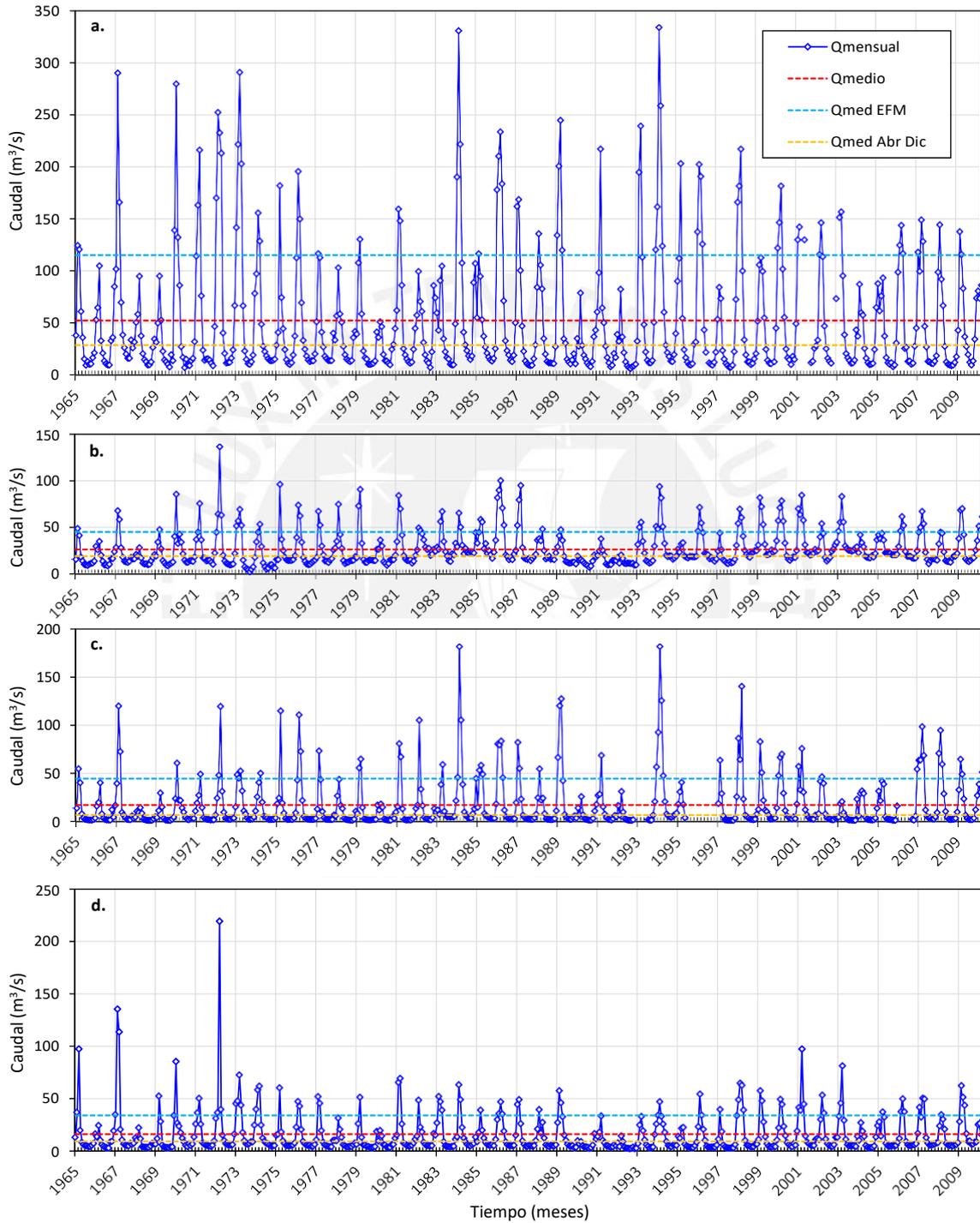


Figura 3.2: Hidrograma de descargas mensuales - (01/1965-03/2010), **a.** E. Sosci (Cañete), **b.** E. Chosica (R´mac), **c.** E. La Capilla (Mala), **d.** E. Sto. Domingo (Chancay Huaral)

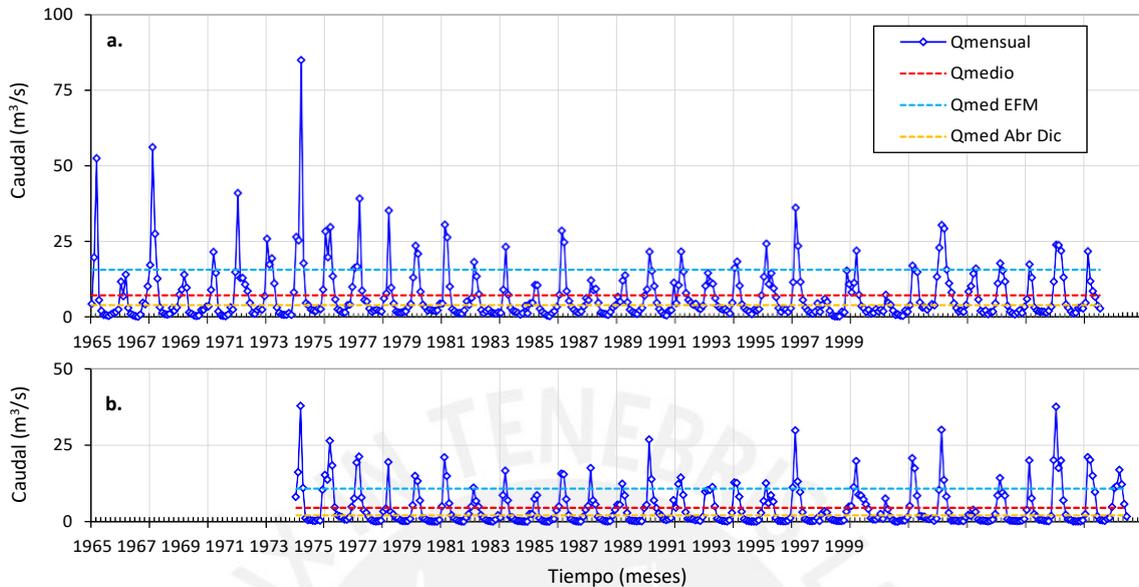


Figura 3.3: Hidrograma de descargas mensuales - (01/1965-12/2000), **a.** E. Pte. Magdalena (Chillón), **b.** E. Manchay (Lurín)

máximos para el periodo de lluvia, principalmente entre los meses de enero, febrero y marzo (EFM), y valores mínimos para el periodo de restante entre abril y diciembre (Figuras 3.2 y 3.3).

Además se identificó algunos eventos extremos por ejemplo en (Mar/72) se observa un pico en todos los hidrogramas, sin embargo para la estación Sto. Domingo este representa un potencial outlier (Figura 3.2 d.). Asimismo, las estaciones Pte. Magdalena y Manchay (Figura 3.3 a. y b.) tienen menores descargas y un periodo de datos disponibles menor en comparación a las demás.

El hidrograma multimensual demuestra la gran diferencia entre los mayores caudales de la estación Socsi (Figura 3.4) con las demás estaciones; sin embargo, el régimen estacional se mantiene.

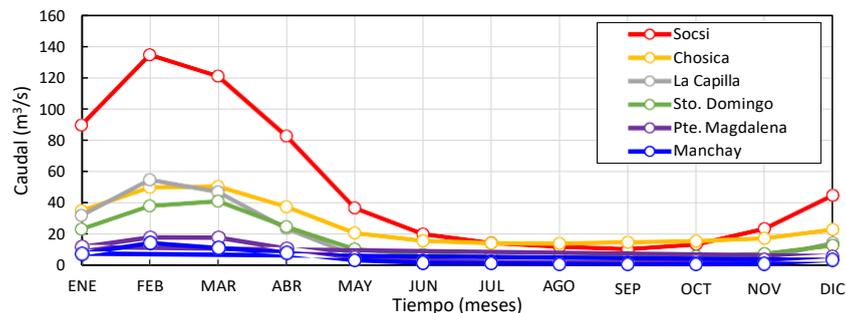


Figura 3.4: Hidrograma de descargas multimensuales – Periodo (1965-2010). Estaciones índice

3.1.1.2. Completación y consistencia de registros hidrométricos

Se evaluaron 4 grupos de estaciones: 2 pertenecientes a una misma cuenca y 2 entre cuencas vecinas según la disponibilidad de los registros, los métodos de regresión lineal (Sección 1.5.1.2) y múltiple (Pizarro et al.,2009) a escala mensual permitieron corregir valores anómalos, completar y extender los registros tal como sigue:

- Para la cuenca Chancay-Huaral la estación Santo Domingo es la única existente, la homogeneidad hidrológica permite agruparla con las estaciones Pte. Magdalena y Obrajillo en la cuenca Chillón (Figura 3.5 a); se extendió el periodo de la estación Pte. Magdalena de (Jul/99) a (Mar/65).
- Para el caso de la estación Chosica se tiene disponible los registros de las estaciones Sheque y Tamboraque en la misma cuenca del río Rímac con registros continuos mensuales para el periodo (1965-2009) (Figura 3.5 b).
- Similar al caso anterior ocurre en la cuenca Cañete donde se agruparon las estaciones Sosci y Chavín (Figura 3.5 c).
- Finalmente la homogeneidad hidrológica permitió agrupar las estaciones La Capilla y Manchay de las cuencas Mala y Lurín respectivamente (Figura 3.5 d). Del análisis se descartó el periodo (2006-2010) para la estación La Capilla, entonces se redujo el periodo de análisis a (1965-2005) debido a que no se tenía registros en ambas estaciones (Figura 3.6).

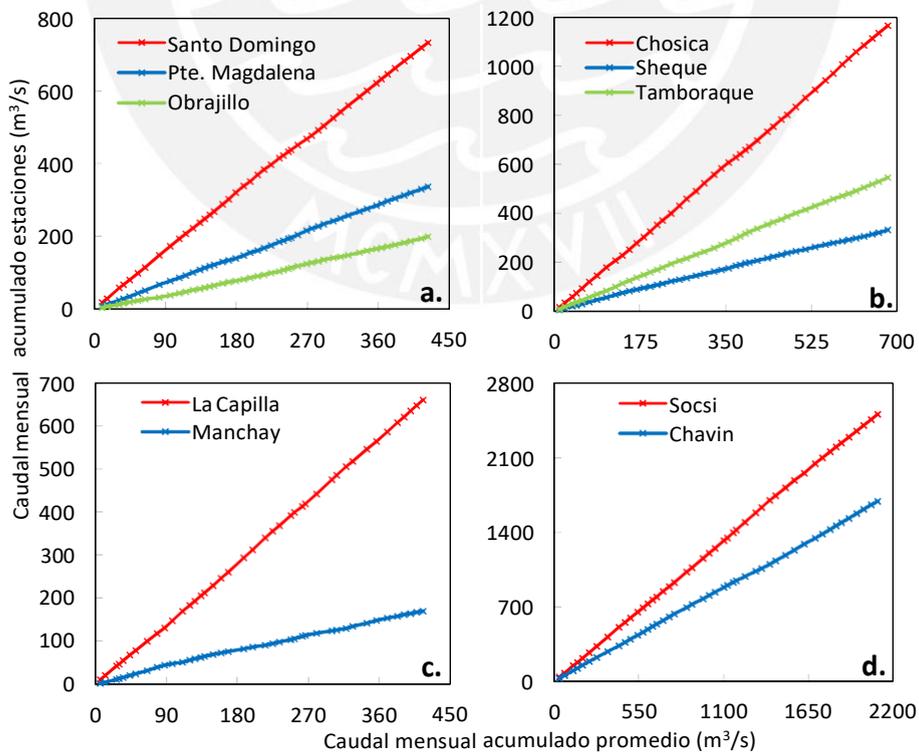


Figura 3.5: Análisis de doble masa en estaciones hidrométricas

Las curvas de doble masa se verifican la consistencia de las series (Figura 3.5), como se puede observar no muestran algún quiebre importante para cada grupo de estaciones consideradas por lo tanto se comprueba que los registros son confiables y homogéneos.

Los hidrogramas de caudales anuales de las estaciones índice en series consistentes verifican un comportamiento hidrológico similar en la región de estudio (Figura 3.6).

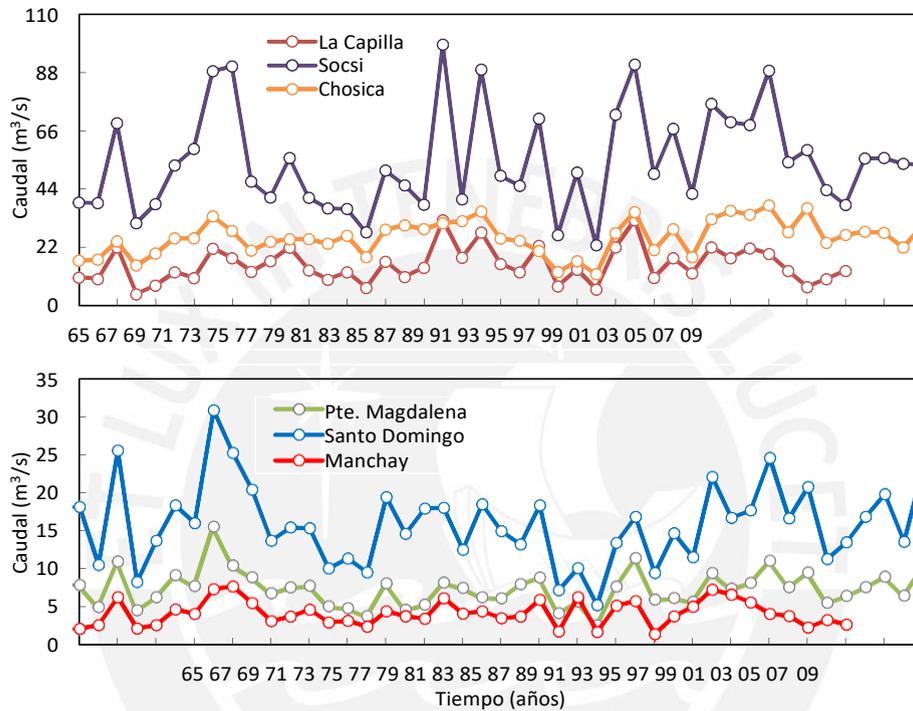


Figura 3.6: Hidrogramas de caudales promedio anuales en estaciones índice: La Capilla, Sosci y Chosica (Superior); Pte. Magdalena, Sto. Domingo y Manchay (inferior)

3.1.1.3. Naturalización de caudales

Cuenca Chancay: Los caudales de la estación Santo Domingo están influenciados por los aportes de lagunas reguladas y recursos hídricos de trasvase que provienen de la cuenca del río Mantaro para ser utilizadas en época de estiaje. Se estima que la operación de los embalses tuvo lugar desde aproximadamente el año 1960 (ONERN,1968). Los caudales retenidos en embalses y de aporte adicional no mostraron un efecto significativo en la variación de registros y valores máximos históricos (variación promedio de 1.2 m³/s en periodo de lluvias), por lo tanto estos podrían omitirse aceptando conservadoramente los registros regulados (ANA,2011).

Cuenca Chillón: El proceso de naturalización de los caudales medios mensuales registrados en la estación Puente Magdalena es bastante complejo debido a que no son exclusivos de la precipitación registrada en la cuenca húmeda, sino también de flujos de agua subsuperficiales que interceptan al río Chillón en diversos puntos entre la Estación

Obrajillo y la estación Puente Magdalena [INRENA2003](#). Además considera el volumen total de lagunas reguladas en cuenca alta con una eficiencia del 43 %, entonces el aporte neto regulado es del orden de 8.2 MMC. Esto representa un caudal de 0.26 m³/s que influye en época de estiaje mientras que para la época de lluvias el efecto de regulación es mínimo; por lo tanto, no se considera para fines de este estudio.

Cuenca Rímac: Las condiciones naturales del río Rímac han sido alteradas, especialmente en los caudales de estiaje que han aumentado por efecto de varias obras de regulación y trasvases efectuadas en la cuenca propia y de la cuenca del Mantaro. Por lo tanto, para el periodo de estudio 1965-2010 las aguas de trasvase de los proyectos Marca son la principal fuente que altera el régimen natural del río, el proceso de naturalización sobre de la estación Chosica se efectuó restando los caudales registrados en la estación Túnel Trasandino ([ANA,2010](#)), cuyo periodo de datos disponible (1973-1997) fue extendido al periodo de estudio y finalmente efectuada la naturalización.

Cuencas Lurín y Mala: Las aguas de los ríos Lurín y Mala para el periodo de estudio (1965-2010) se consideraron como no reguladas, por no contar con obras que almacenen considerables volúmenes de agua. No se encontraron registros de funcionamiento de obras de regulación para el periodo de estudio; por lo tanto para los caudales registrados en las estaciones Manchay y La Capilla no requirieron ser naturalizados.

Cuenca Cañete: El sistema hídrico de la cuenca de la cuenca Cañete cuenta con diferentes obras de regulación la mayoría ubicadas en la parte alta de la cuenca (sobre los 4000 msnm) y entre las más importantes las presas de Paucarcocha, Capillucas y San Juanito las cuales influyen directamente en la regulación río formado por la cuenca Cañete. Las presas nombradas forman parte del funcionamiento del sistema hidrográfico de la central hidroeléctrica el Platanal de propiedad de la empresa CELEPSA. Según el inventario de Presas ([ANA,2015b](#)), estas obras de regulación empezaron operación a partir del año 2010, por lo tanto, las regulaciones no influyen en los registros para la presente investigación por estar fuera del periodo considerado (1965-2010).

3.1.2. Análisis pluviométrico

El parámetro primordial para el modelamiento hidrológico y la simulación de caudales es la precipitación, por lo tanto, es de vital importancia que la información supere las evaluaciones planteadas y sea considerada confiable.

Los registros pluviométricos ([AnexoA](#)) fueron agrupados a escalas diaria, mensual y anual para su evaluación a fin de obtener series homogéneas, confiables y completas.

3.1.2.1. Evaluación Preliminar

Para comprender el comportamiento de la lluvia en la región de estudio se calcularon los parámetros estadísticos básicos: media (\bar{x}), desviación estándar (s), coeficiente de variación ($CV=s/\bar{x}$), máximos, número de vacíos (Anexo C.1). Asimismo, se realizó el análisis exploratorio de datos mediante gráficos y comparaciones.

Para esta etapa se emplearon los paquetes (HydroTSM) Zambrano-Bigiarini(2012) y (zoo) Zeileis and Grothendieck(2005) en el software R. Los parámetros estadísticos mencionados evaluados a escalas mensuales y anuales por cada estación permitieron la identificación de valores anómalos en estaciones las cuales analizamos a continuación.

3.1.2.2. Identificación de registros anómalos

Para la estación Campo Marte se identifica claramente en la serie anual (Figura 3.7) el valor anómalo en el año 1976 el cual fue eliminado por tratarse de un registro diario.

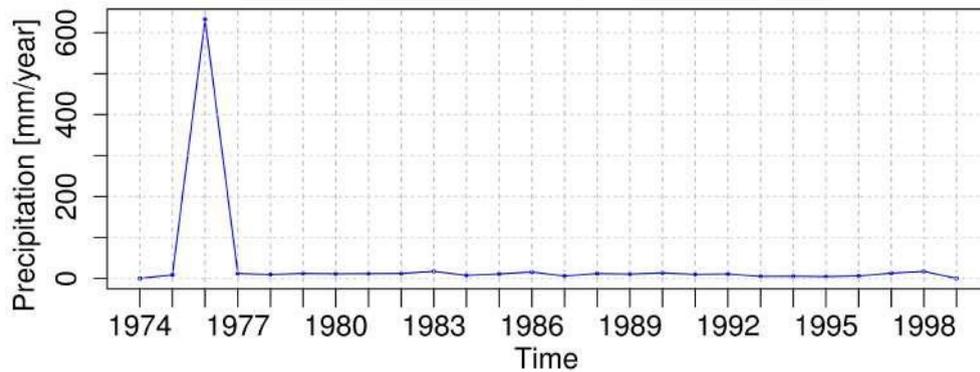


Figura 3.7: Serie de tiempo anual de precipitación - Estación Campo Marte

La serie mensual de la estación Huantan (Figura 3.8) muestra un periodo anómalo (81-89) la cual la evaluamos a escala anual en la Sección 3.1.2.5, comparando su homogeneidad con otras estaciones.

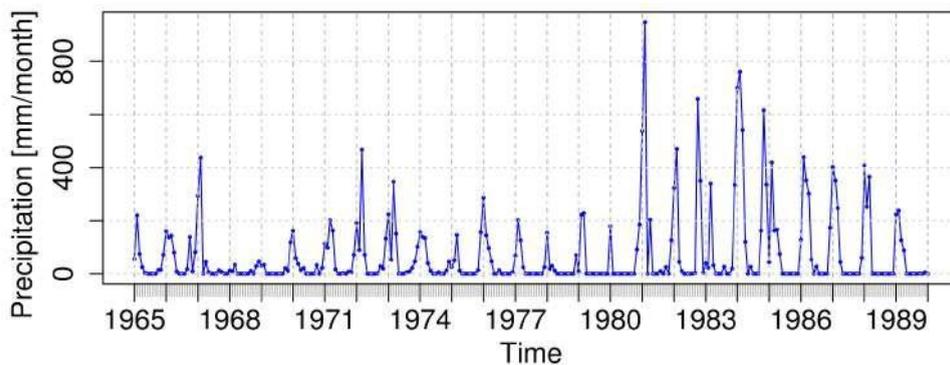


Figura 3.8: Serie de tiempo mensual de precipitación - Estación Huantan

La serie anual de la estación Vilca (Figura 3.9) muestra valores extremos en el año 1967 y 1994 los cuales fueron evaluados regionalmente en la Sección 3.1.2.5.

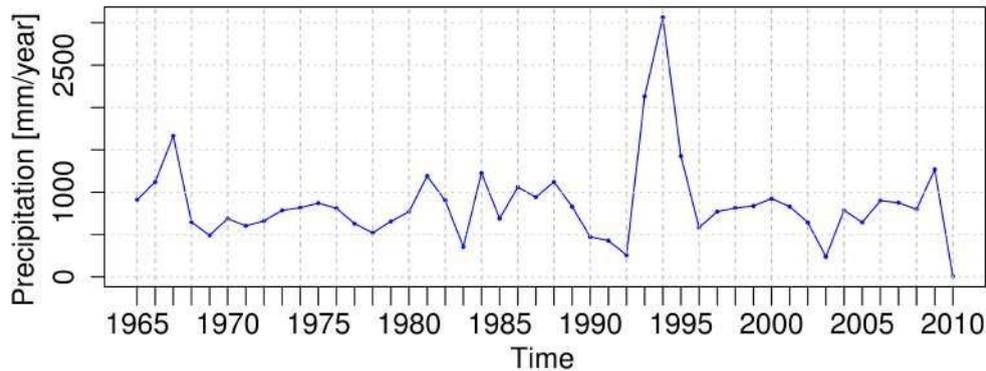


Figura 3.9: Serie de tiempo anual de precipitación - Estación Vilca

3.1.2.3. Evaluación a escala diaria

La mayoría de estaciones presentan varios registros diarios faltantes por cada mes. Entonces, mediante un método simple estimando un promedio general de los datos de cada mes con más de 25 días de registros se completaron los días faltantes (Moritz et al., 2015). Para tal efecto se empleó la función `na.aggregate()` del paquete `zoo` (Zeileis and Grothendieck, 2005). El método es adecuado para este caso ya que los valores del coeficiente de variación (CV) de los registros diarios, en la mayoría de estaciones con presencia de lluvias considerables (cotas mayores a 2500 msnm), no muestran valores altos ($CV_{PROM}=2.57$), los resultados se muestran en el Anexo C.2.

3.1.2.4. Evaluación a escala mensual

La zona de estudio se desarrolla sobre dos regiones climáticas (costa y sierra), las cuales tienen comportamientos pluviométricos típicos que pueden agruparse según sus registros de lluvia, es así que se establecieron tres grupos de estaciones evaluando la variación mensual de la precipitación (promedios multimensuales), lo que permitió identificar preliminarmente grupos de estaciones con comportamiento similar.

Grupo 1: Comprende 8 estaciones en la parte baja de las cuencas (cota menor a 600 msnm), la característica principal de este grupo es la escasez o ausencia de precipitaciones con valores máximos de lluvia promedio mensual de 5 mm durante el periodo (abril - noviembre). Observamos un comportamiento pluvial típico del litoral costero conocido como sub-precipitación (Chávez, 1994), mostrando una especie de inversión del régimen habitual de precipitaciones (Figura 3.10).

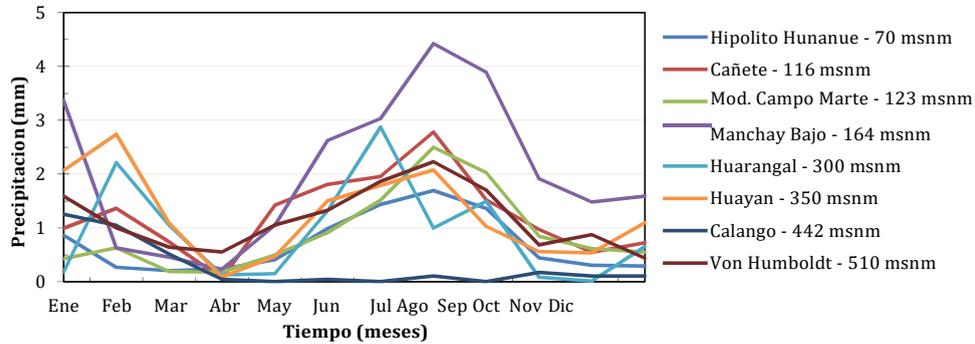


Figura 3.10: Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 1

Grupo 2: Comprende un grupo de 16 estaciones ubicadas entre las cotas 600 y 3000 msnm, observamos un comportamiento uniforme en cuanto a la variación de la precipitación en todas las estaciones, lo que demuestra un carácter estacional de la precipitación en la región a partir de los 600 msnm (Figura 3.11). El periodo de lluvias con mayor magnitud comienza en diciembre y se prolonga hasta marzo, además podemos apreciar un periodo seco con mínima presencia de lluvias que va desde mayo hasta el mes de setiembre.

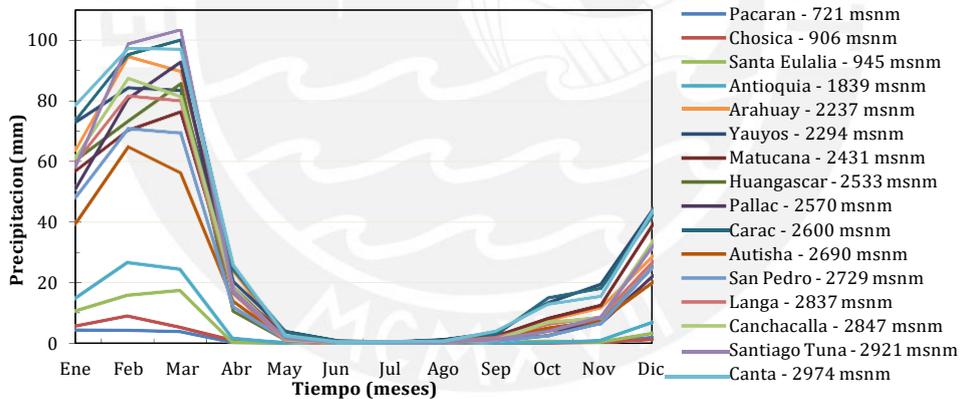


Figura 3.11: Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 2

Podría considerarse un subgrupo de estaciones (Chosica, Pacaran, Santa Eulalia) ubicadas entre las cotas 600 y 1000 msnm donde el valor máximo de lluvia promedio mensual no llega a 20 mm, estaciones a partir de la cota 2000 msnm muestran valores de lluvia promedio máximo (meses enero y febrero) entre 60 y 100 mm.

Grupo 3: Comprende el grupo de 22 estaciones ubicadas por encima de la cota 2700 msnm, la característica de este grupo muestra intensas lluvias durante el periodo (DEFM) con valores máximos promedio mensual entre 80 y 180 mm (Figura 3.12). Se descartó la estación Huantan por presentar valores anómalos en varios meses.

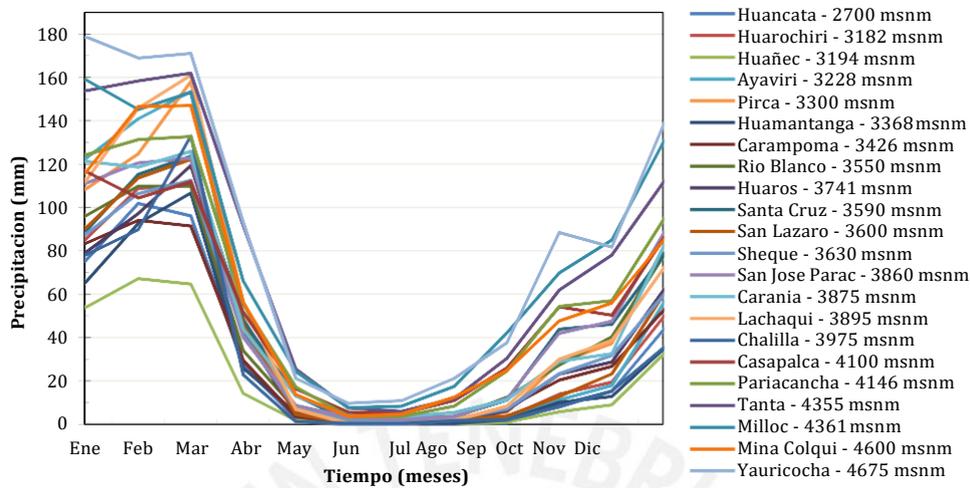


Figura 3.12: Variación mensual de la precipitación - Promedio multimensual Grupo 3

3.1.2.5. Evaluación a escala anual

Una vez comprendido el comportamiento estacional de los registros por cada estación, con el fin analizar la consistencia, facilitar el manejo de datos y completar o extender los registros, se estableció regiones pluviométricas que indican un similar comportamiento, analizando los valores anuales de precipitación por cada estación (Figura 3.13).

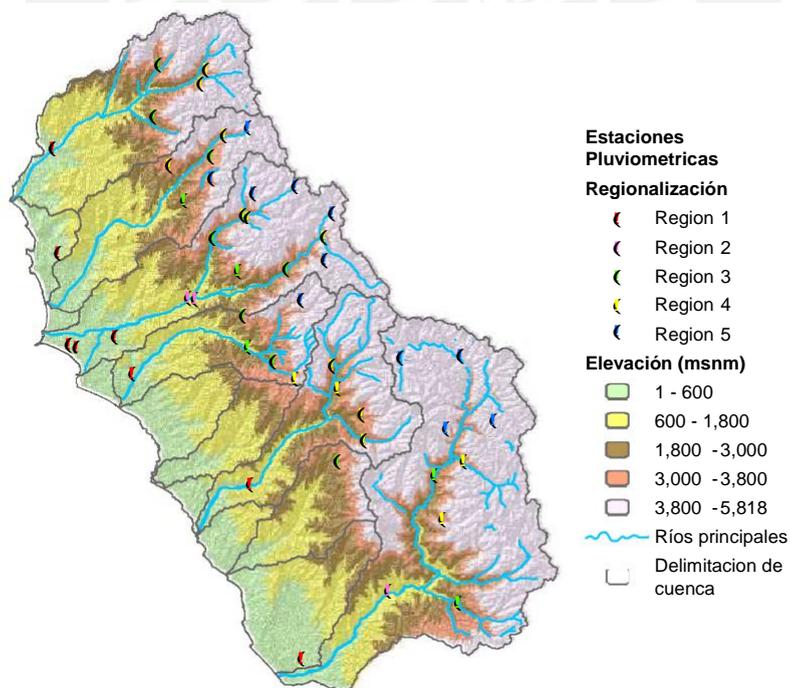


Figura 3.13: Distribución geográfica de estaciones pluviométricas después de la etapa de regionalización

Regionalización de la precipitación

Cada grupo de estaciones de la sección precedente (3.1.2.4) fue evaluado mediante el Método de Vector Regional (MVR) a través el software HYDRACCESS (Vauchel,2005) usando el método de Brunet Moret (Brunet-Moret,1979). Se analizaron los parámetros Desviación Estándar de los Desvíos (DED) y el coeficiente de correlación (R) entre la estación y el vector, los cuales son considerados los parámetros más importantes del MVR en la evaluación de la calidad de una estación respecto al vector.

Se aceptó una región como homogénea cuando la DED presentó valores bajos (menores a 1) y valores altos del coeficiente de correlación (R) (mayores a 0.7), se trata de un proceso iterativo probando agregando y descartando estaciones en cada análisis hasta optimizar los parámetros (DED y R). Además se tomó en cuenta, principalmente para las estaciones externas, las regiones establecidas en (Rau et al.,2017).

Región 1: Corresponde al (Grupo 1) especificado en la Sección3.1.2.4, con precipitaciones anuales promedio menores a 25 mm/año, debido a la ausencia de precipitaciones no es adecuado el uso del MVR en esta región.

Región 2: Corresponde a un subgrupo de estaciones que se desprenden del Grupo 2 de la Sección3.1.2.4integrado por las estaciones Pacaran, Chosica y Santa Eulalia con precipitaciones anuales entre 20 y 50 mm/año. Se verificó el comportamiento de dichas estaciones analizando el MVR para las estaciones del grupo 2, a través de los gráficos acumulados (Figura3.14), se observa claramente que las estaciones Pacaran, Chosica y Santa Eulalia muestran quiebres importantes que demuestra un comportamiento pluviométrico diferente a todo el grupo, asimismo el parámetro DED mostró los más altos valores justamente para dichas estaciones.

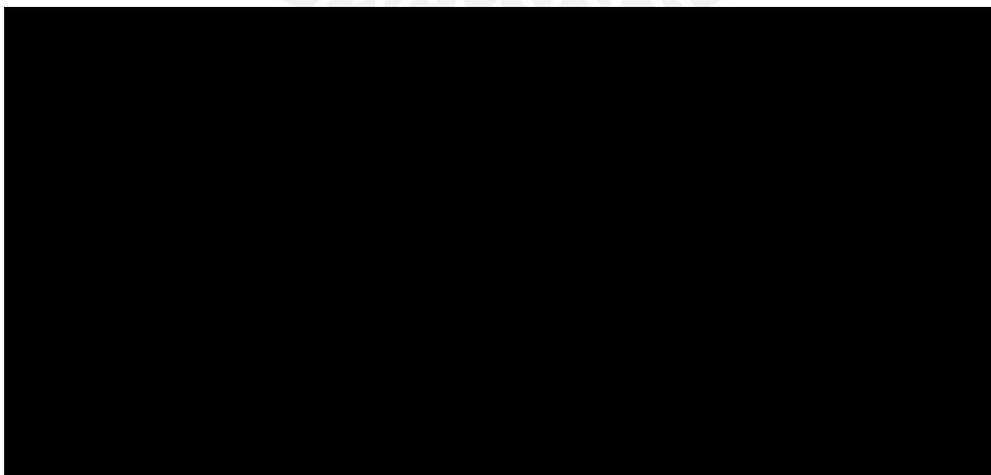


Figura 3.14: Curva de doble masa de los índices de las estaciones y del vector (izq.), estación y (DED) (dcha.). Regiones 2 y 3

Región 3: Corresponde al grupo restante de estaciones evaluadas en la Región 2 ubicadas entre las cotas 1800 y 3000 msnm, con lluvias anuales entre 100 y 400 mm/año.

Región 4: Comprende el grupo de estaciones con lluvias anuales entre 400 y 500 mm/año ubicadas entre las cotas 2700 y 3800 msnm. Se obtuvieron altos valores de correlación entre las estaciones y el vector $R_{PROM}=0.81$ (Figura 3.15).

Se descartó del análisis la estación Pirca con $R=0.52$, además las estaciones Huañec, Huantán y Pirca muestran los valores más altos del parámetro DED que indica periodos con información anómala las mismas que se comprobaron mediante las curvas dobles acumuladas (Figura 3.16). Se decidió dejar de lado la estación Huañec y Pirca mientras que para la estación Huantán se excluyó el periodo (1981-1990).

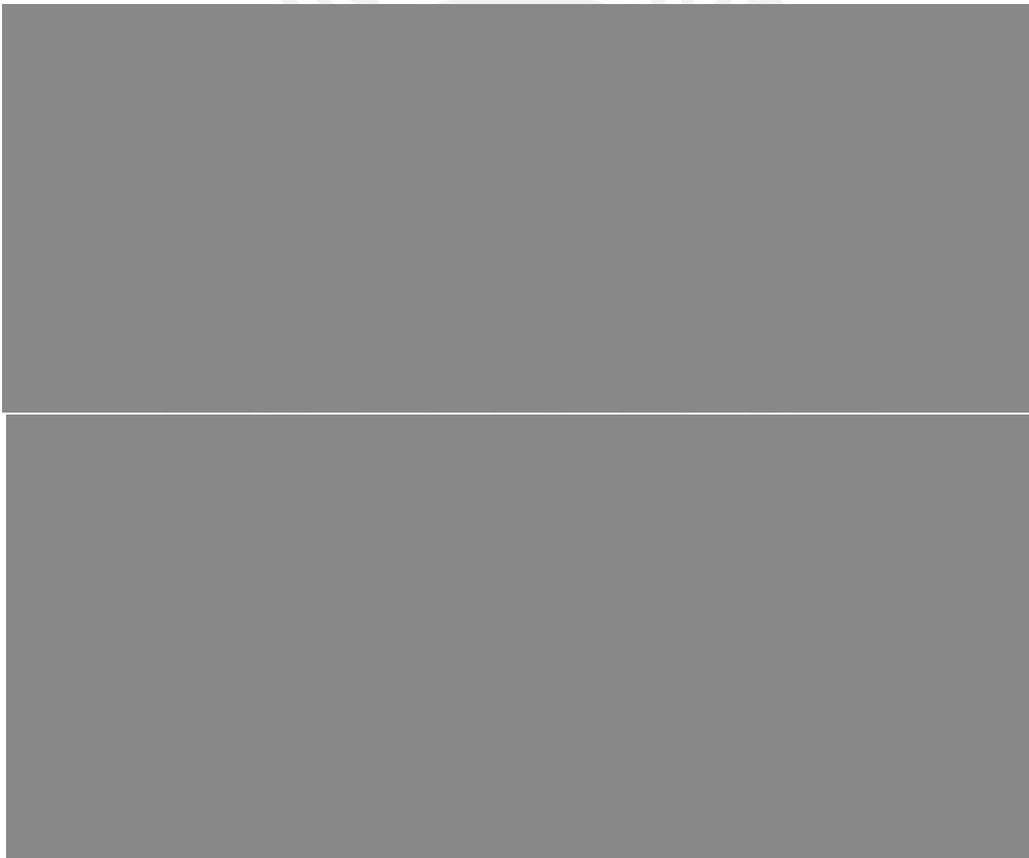


Figura 3.15: Índices anuales del Vector y de las estaciones (izq.), estación y (R) (dcha.). Región 4 (superior), Región 5 (inferior)

Región 5: Comprende estaciones con precipitaciones anuales por encima de 600 mm/año que se encuentran ubicadas a partir de los 3800 msnm. Se observa una región homogénea con valores de correlación promedio $R_{PROM}=0.8$, excluyendo a la estación Vilca que muestra periodos con información potencialmente anómala (Figura 3.15).

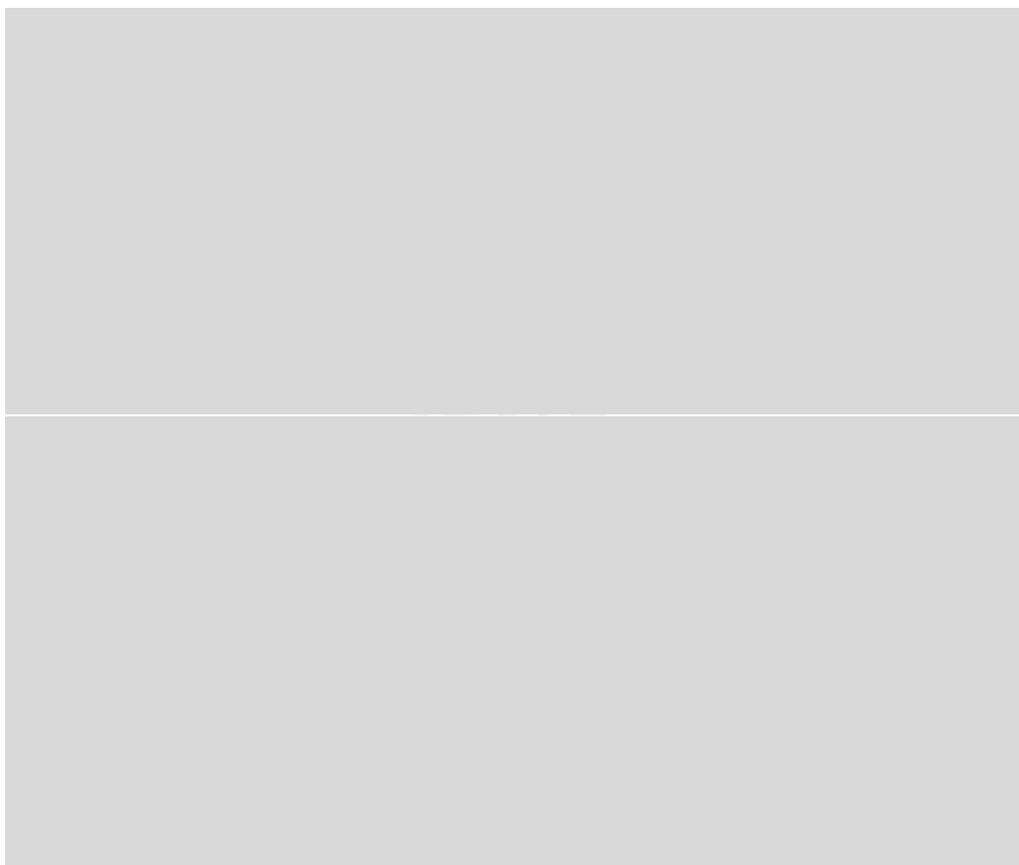


Figura 3.16: Curva de doble masa de los índices de las estaciones y del vector (izq.), estación y (DED) (dcha.). Región 4 (superior), Región 5 (inferior)

Las curvas dobles acumuladas verifican la homogeneidad de esta región (Figura 3.16). Asimismo, se comprueba el elevado valor del parámetro DED en la estación Vilca; por lo tanto, los datos anómalos identificados fueron suprimidos y corregidos.

3.1.2.5.1. Completación y extensión de los registros

Entre la gran cantidad de métodos existentes que permiten completar series de datos a escala mensual, para las regiones 1 y 2 se eligió el Método de Razones Promedio (MRP) (Sección 1.5.1.2). Ante la carencia de datos en estas regiones se usaron estaciones exteriores con similares condiciones (elevación, precipitación mensual y anual), (Anexo A.2).

Los valores mensuales para el periodo de lluvias diciembre-marzo (DEFM) en las regiones 3, 4, 5, por ser prioridades en el presente estudio (presencia de valores extremos), fueron completados por correlación con datos procedentes del MVR aplicado a cada región pluviométrica.

Regiones 1 y 2: Las estaciones exteriores Alcantarilla, Buena Vista, Camay, Copara, Fonagro, Hacienda Bernales, Paramonga, Punta Culebras y Santa Rosa (Anexo A.2)

sirvieron para completar registros en la región 1, así como las estaciones exteriores Andahuasi, Pampa Blanca y Huancano (Anexo A.2) sirvieron para completar registros en la región 2. Las estaciones Lomas de Lachay, Quian, Castrovirreyna y Chamana fueron descartadas por presentar datos anómalos.

Región 3: Evaluando el MVR a escala mensual obtenemos valores altos del coeficiente de correlación R entre las estaciones y el vector, además aceptables valores del parámetro DED (Tabla 3.3) por lo que se completó los registros mensuales para el periodo de lluvias DEFM. La estación Santiago de Tuna quedó fuera de esta región por mostrar valores dispersos de los parámetros de medición.

Para completar los registros faltantes del periodo restante (Abr-Nov) se usó el MRP (Sección 1.5.1.2) para lo cual se emplearon registros de las estaciones externas (Picoy, Acora, Huachos y San Juan Yanac), (Anexo A.2).

Tabla 3.3: Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 3

Estación	Enero		Febrero		Marzo		Diciembre	
	DED	R	DED	R	DED	R	DED	R
Antioquia	0.77	0.82	0.64	0.85	0.80	0.69	1.09	0.63
Arahuay	0.28	0.88	0.27	0.92	0.23	0.89	0.40	0.92
Canchacalla	0.36	0.88	0.40	0.88	0.38	0.81	0.68	0.78
Canta	0.49	0.73	0.32	0.87	0.33	0.81	0.69	0.60
Carac	0.27	0.91	0.26	0.91	0.24	0.90	0.32	0.89
Huangascar	0.46	0.82	0.36	0.85	0.51	0.66	0.72	0.62
Langa	0.40	0.80	0.30	0.88	0.55	0.65	0.50	0.88
Matucana CEA	0.38	0.79	0.42	0.75	0.38	0.71	0.56	0.69
Pallac	0.31	0.90	0.32	0.85	0.31	0.86	0.62	0.82
San Pedro	0.32	0.89	0.31	0.91	0.30	0.83	0.53	0.88
Yauyos	0.39	0.81	0.52	0.62	0.55	0.59	0.62	0.64
Autisha	0.67	0.83	0.50	0.93	1.04	0.86	1.94	0.92
Promedio R	0.84		0.85		0.77		0.77	

Regiones 4 y 5: Estas regiones muestran resultados similares a la región 3 con aceptables valores de los parámetros R y DED (Tablas 3.4 y 3.5). Los registros faltantes del periodo restante (Abr-Nov) fueron completados mediante el MRP (Sección 1.5.1.2) con apoyo de las estaciones externas San Pedro de Huacarpana y Pachamachay.

Tabla 3.4: Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 4

Estación	Enero		Febrero		Marzo		Diciembre	
	DED	R	DED	R	DED	R	DED	R
Huancata	0.37	0.84	0.36	0.86	0.36	0.78	0.56	0.84
Huarochiri	0.37	0.82	0.37	0.84	0.33	0.80	0.44	0.88
Ayaviri	0.41	0.78	0.41	0.64	0.36	0.62	0.42	0.88
Colonia	0.40	0.69	0.38	0.74	0.36	0.71	0.50	0.68
Huamantanga	0.31	0.89	0.29	0.87	0.33	0.80	0.49	0.86
Carampoma	0.29	0.86	0.28	0.88	0.23	0.90	0.33	0.88
Rio Blanco	0.36	0.75	0.34	0.82	0.30	0.82	0.48	0.76
Huaros	0.37	0.80	0.30	0.88	0.34	0.79	0.41	0.79
Santa Cruz	0.31	0.78	0.25	0.88	0.19	0.89	0.47	0.72
San Lazaro	0.44	0.69	0.54	0.62	0.31	0.76	0.54	0.75
Sheque	0.46	0.84	0.53	0.89	0.48	0.80	0.68	0.89
Promedio R	0.80		0.81		0.79		0.81	

Tabla 3.5: Parámetros (R) y (DED) del MVR para los meses de lluvia en la Región 5

Estación	Enero		Febrero		Marzo		Diciembre	
	DED	R	DED	R	DED	R	DED	R
Vilca	0.33	0.67	0.27	0.74	0.37	0.58	0.42	0.64
San Jose de Parac	0.20	0.87	0.18	0.91	0.17	0.86	0.34	0.68
Carania	0.28	0.85	0.33	0.76	0.29	0.67	0.39	0.79
Lachaqui	0.46	0.58	0.35	0.80	0.32	0.74	0.53	0.66
Chalilla	0.56	0.69	0.47	0.70	0.31	0.86	1.65	0.79
Casapalca	0.27	0.76	0.22	0.86	0.24	0.79	0.30	0.77
Pariacancha	0.20	0.85	0.13	0.93	0.18	0.84	0.28	0.82
Tanta	0.31	0.71	0.38	0.63	0.30	0.76	0.33	0.81
Milloc	0.33	0.75	0.28	0.70	0.29	0.79	0.38	0.72
Mina Colqui	0.35	0.69	0.24	0.85	0.24	0.77	0.30	0.85
Yauricocha	0.26	0.80	0.20	0.85	0.17	0.85	0.27	0.83
Promedio R	0.75		0.79		0.77		0.76	

3.2. Optimización de información meteorológica

Tal como se mencionó en la metodología (Sección 2.2.2) los registros pluviométricos procedentes de estaciones convencionales no llegan a cubrir estructuralmente el área de estudio, es por ello que se evaluaron bases de datos pluviométricas con información estimada por satélite (TMPA y CHIRPS), las cuales requieren ser verificadas y validadas, para cubrir los vacíos espaciales a fin de obtener una adecuada densidad de estaciones de precipitación.

3.2.1. Comparaciones gráficas

Con la finalidad de comparar valores de los registros de precipitación directamente (sin interpolar) se estableció la grilla de resolución 0.25° , similar a la resolución de los productos satelitales, al interior de la cuenca (Figura 3.17); posteriormente, se comparó punto por punto cada cuadrante los valores de precipitación anual (Gómez, 2007).

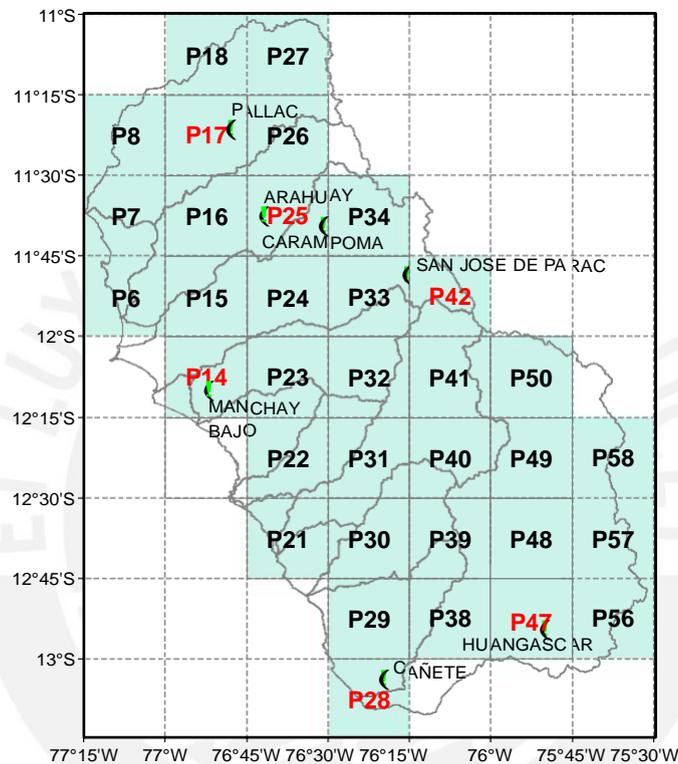


Figura 3.17: Distribución espacial de cuadrantes de resolución (0.25°) en el área de estudio

A continuación se muestra algunos puntos que tienen la influencia de estaciones pluviométricas cercanas con el fin de verificar y comparar valores.

Cuenca baja: Para el cuadrante P14 el cual se encuentra sobre la estación Manchay Bajo (Figura 3.17), se observa una marcada sobreestimación del producto TMPA y en menor forma el producto CHIRPS (Figura 3.18 a.).

Para el cuadrante P28 el cual se encuentra cercano a la estación Cañete (Figura 3.17), al igual que para el cuadrante P14, los productos satelitales sobreestiman la precipitación, el producto TMPA no muestra ninguna correlación con los otros indicadores mientras que para el producto CHIRPS existe una débil correlación (Figura 3.18 b.).

Cuenca media: Para el cuadrante P47 cercano a la estación Huangascar (Figura 3.17), aún existe una ligera sobreestimación de los productos satelitales con mayores valores del producto TMPA, observamos mejores estimaciones (Figura 3.19 a.).

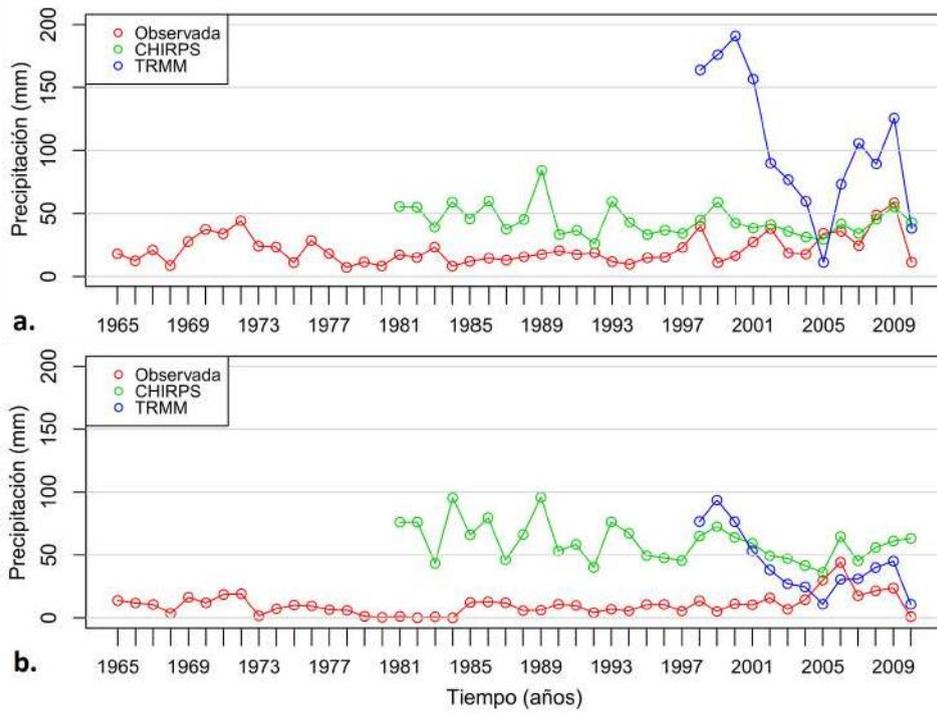


Figura 3.18: Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - **a.** Punto P14, **b.** Punto P28. Cuenca baja

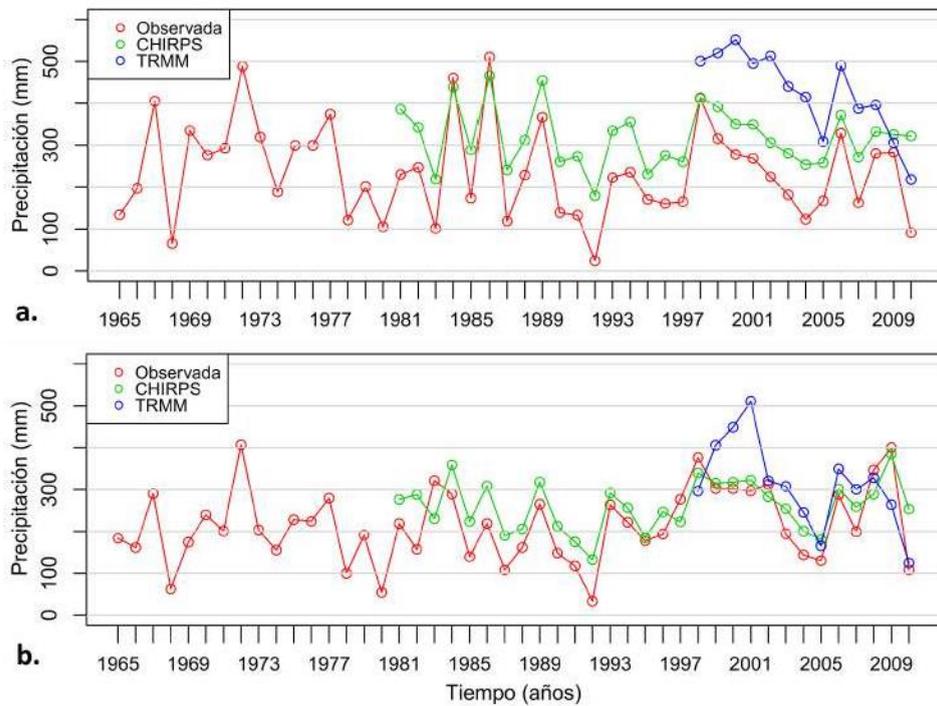


Figura 3.19: Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - **a.** Punto P47, **b.** Punto P17. Cuenca media

Para el cuadrante P17 cercano a la estación Pallac (Figura 3.17), se observa similar comportamiento al cuadrante P47, además, en general en cuenca media existe altas correlaciones y aceptables estimaciones del producto CHIRPS (Figura 3.19 b.).

Cuenca alta: Para el cuadrante P42 influenciado por las estaciones San Jose de Parac y el cuadrante P25 influenciado por las estaciones Arahuay y Carampoma (Figura 3.17), se observa una buena estimación del producto CHIRPS, en cambio subestimaciones del producto TMPA (Figura 3.20).

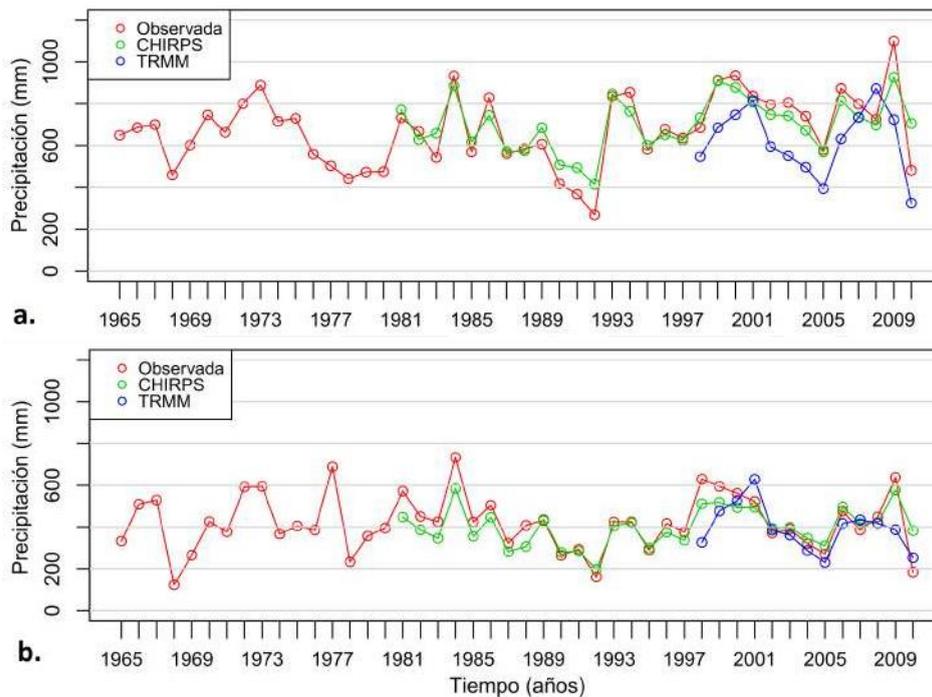


Figura 3.20: Precipitación anual productos TMPA, CHIRPS y observada - a. Punto P42, b. Punto P25. Cuenca alta

En general se tienen mejores estimaciones de lluvia en cuenca media y especialmente en cuenca alta del producto CHIRPS a escala anual, se sabe que el producto CHIRPS es una combinación de estaciones satelitales y convencionales; por lo tanto, es razonable su buen comportamiento para predecir lluvias en cuenca media y alta. Asimismo, se verifica que los productos satelitales no estiman adecuadamente precipitaciones en zonas con ligeras precipitaciones (OMM,2011), como es el caso de la cuenca baja en este estudio.

3.2.2. Verificación y validación

En esta sección se realizó una evaluación cuantitativa a escala mensual donde se consideró como prioridad los meses de Enero, Febrero y Marzo por ser los meses con mayores precipitaciones y más importantes para la cuantificación de eventos extremos.

El periodo de datos disponibles TMPA entre Ene/98 a Mar/10 sirvió como periodo de comparación. Se muestra los valores estimados del coeficiente de correlación (R) entre datos observados y el producto TMPA (Figura 3.21), se observan algunos valores altos de correlación, sin embargo estos no cubren la mayoría de cuadrantes, los valores “0” indican ausencia de lluvias.

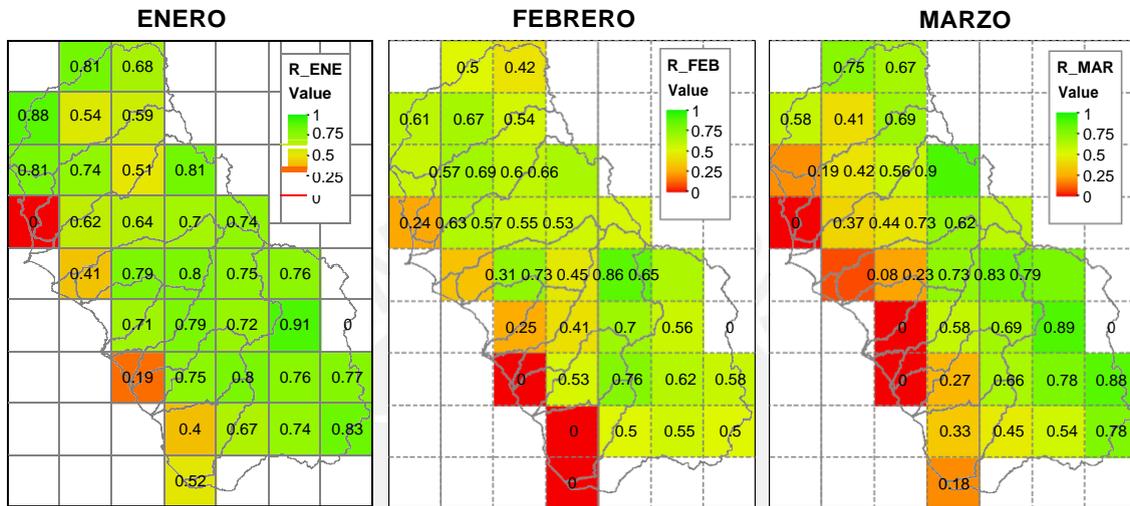


Figura 3.21: Coeficiente de correlación (R) entre datos observados mensuales y TMPA

El periodo de datos disponibles CHIRPS entre Ene/81 a Mar/10 sirvió como periodo de comparación. Se observa una mejor estimación del producto CHIRPS (Figura 3.22) con valores elevados de correlación a partir de cuenca media y alta.

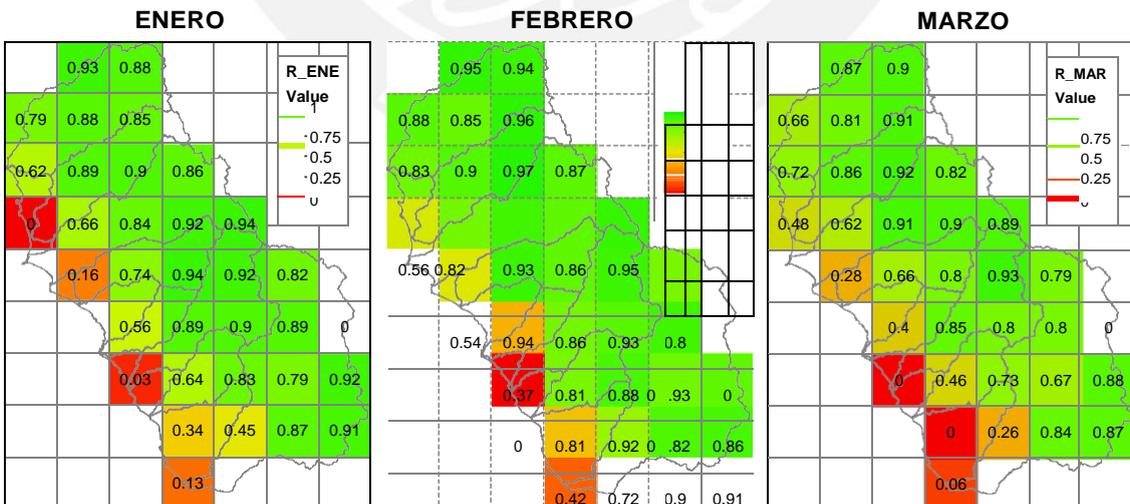


Figura 3.22: Coeficiente de correlación (R) entre datos observados mensuales y CHIRPS

El parámetro (RMSE) evaluado al promedio de los meses EFM (Ene/Feb/Mar) muestra

valores mayores para las comparaciones de datos observados y producto TMPA que las comparaciones con el producto CHIRPS (Figura 3.23).

El producto CHIRPS presentó una mejor eficiencia, tras las evaluaciones gráficas a escala anual y mediante los estadísticos (R) y (RMSE) a escala mensual, que el producto TMPA para estimar precipitación mensual en el área de estudio, por lo tanto estos datos fueron usados en el proceso de completación espacial.

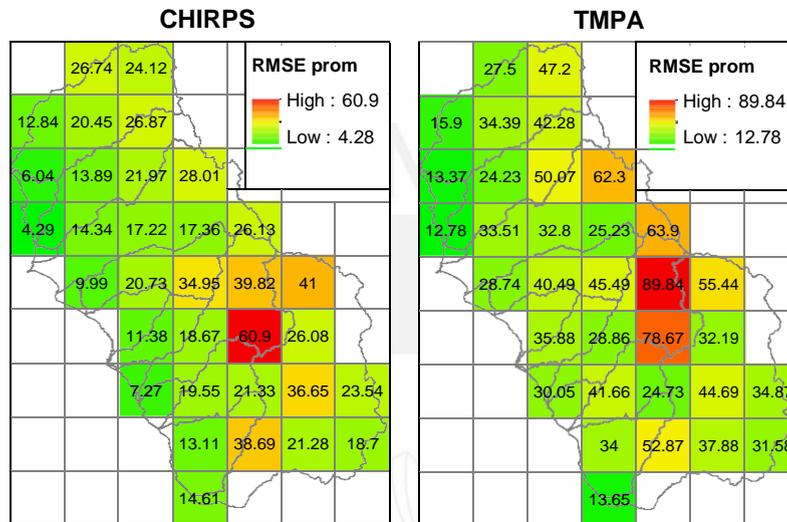


Figura 3.23: RMSE del promedio de los meses EFM entre datos observados y CHIRPS (izquierda); RMSE del promedio de los meses EFM entre datos observados y TMPA (derecha)

3.2.3. Completación espacial de precipitación

El objetivo de esta sección fue obtener una base de datos de precipitación completa espacial y temporalmente para el periodo (1965-2010). Previamente se identificó zonas con alguna o ausencia de estaciones pluviométricas dentro de la grilla de 0.25° (770 km²) y que además pertenezcan a la parte media y alta de las cuencas.

Se identificaron 12 puntos donde se usaron estaciones virtuales CHIRPS para obtener una distribución regular de estaciones dentro del área de estudio (Figura 3.24). Posteriormente mediante la metodología aplicada en estaciones convencionales (Sección 1.5.1.2) se completó mensualmente los registros para el periodo (1965-1981) en las estaciones virtuales.

Influencia de puntos adicionales en la precipitación media de las cuencas

La estimación de la precipitación media de la cuenca mediante el método de polígonos de Thiessen, considera la influencia espacial de las áreas alrededor de cada estación, la Figura 3.25 muestra la mejora en las áreas de influencia de las estaciones consiguiendo una estructuración más uniforme, las cuales serán más relevantes en la evaluación de cuencas de menor extensión.

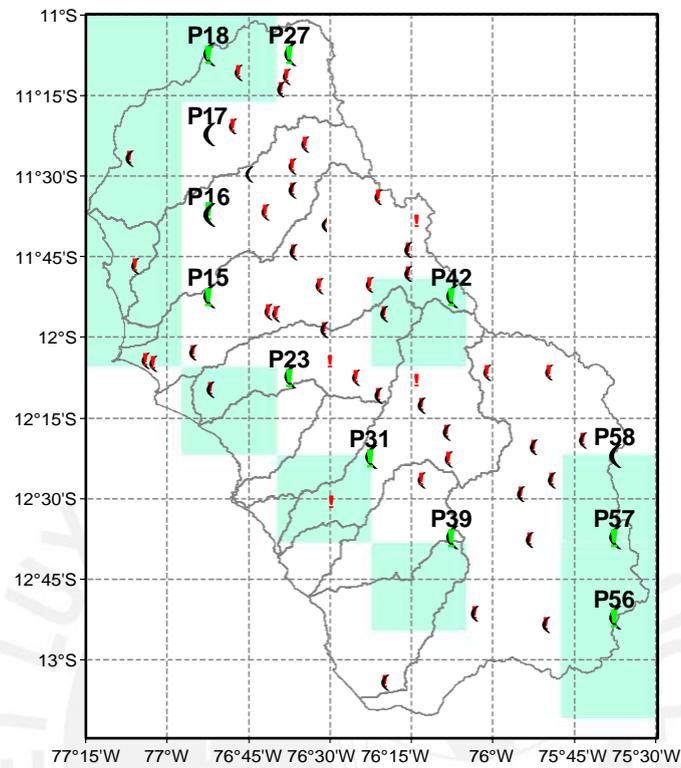


Figura 3.24: Estaciones virtuales adicionales - Área de estudio

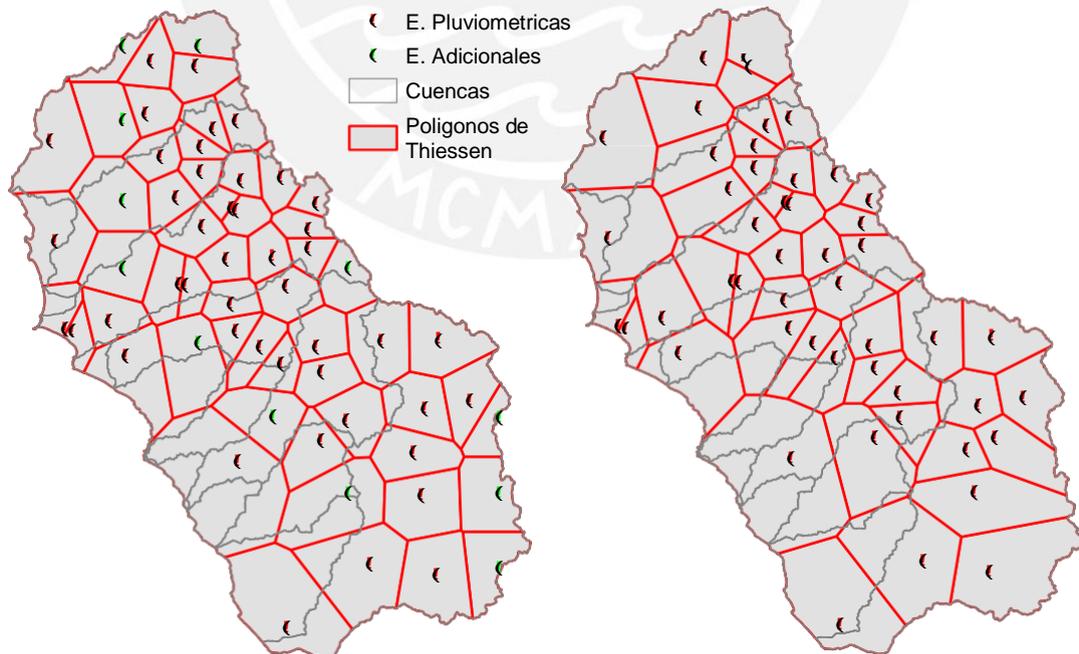


Figura 3.25: Influencia espacial de las estaciones pluviométricas - Polígonos de Thiessen incluyendo estaciones virtuales (izq.), polígonos de Thiessen solo estaciones convencionales (dcha.)

3.3. Selección de puntos de análisis

Optimizada la cobertura espacial de estaciones pluviométricas (Sección3.2.3) la densidad de estaciones pluviométricas para el área de estudio es aproximadamente $300 \text{ km}^2/\text{estación}$; por lo tanto, para subcuencas con superficies mayores a 300 km^2 se supone una buena cobertura espacial y corresponderá a la extensión de subcuenca mínima considerada para los puntos de análisis.

Mediante métodos convencionales a través de software en manejo de modelos digitales de terreno (MDT) se puede establecer las superficies requeridas para la extensión mínima de subcuencas de 300 km^2 además de considerar el grado de ramificación u orden de los ríos.

Cuenca Chancay Huaral: Se establecieron 13 puntos de análisis los cuales generan 13 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección2.2.3, el punto 1 corresponde a la estación Santo Domingo (Estación índice) siendo la única estación con datos disponibles en la cuenca. (Figura3.26).

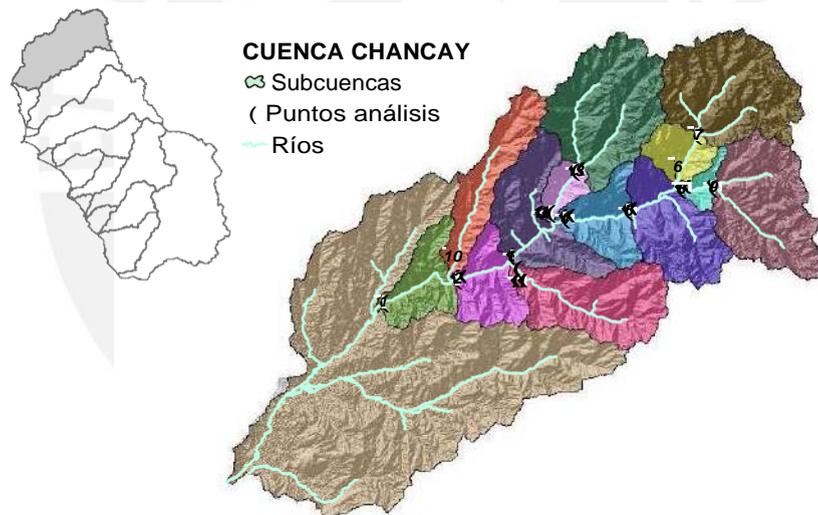


Figura 3.26: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Chancay - Huaral

Cuenca Chillón: Se establecieron 10 puntos de análisis los cuales generan 10 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección2.2.3, el punto 1 corresponde a la estación Puente Magdalena (Estación índice), el punto 8 a la estación Obrajillo y el punto 9 a la estación Pariacancha (Figura3.27).

Cuenca Rímac: Se establecieron 19 puntos de análisis para 18 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección2.2.3, el punto 1 corresponde a la estación Chosica (Estación índice), el punto 13 a la estación Sheque, el punto 12 a la estación Tamboraque, el punto 15 a la estación Río Blanco, punto 16 a la estación Pte. Los Angeles y el punto 18 a la estación Pte. Huachipa (Figura3.28).



Figura 3.27: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Chillón

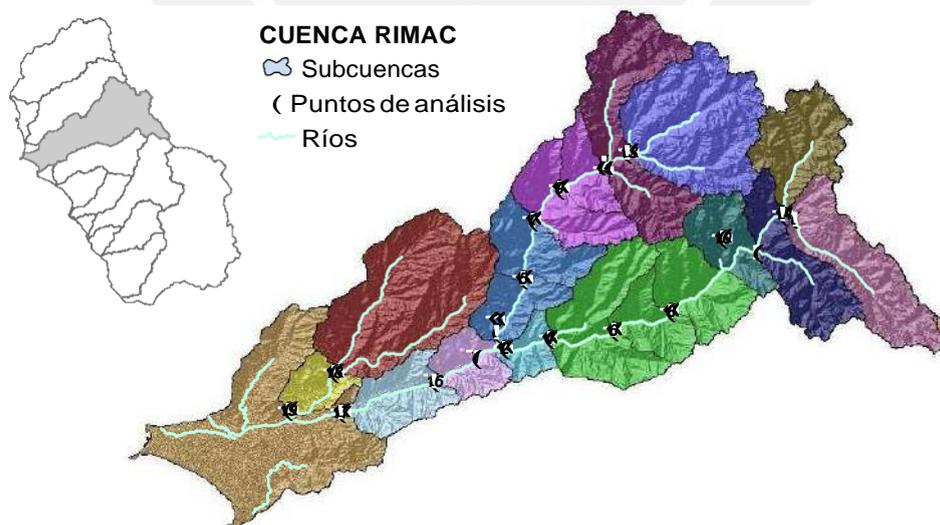


Figura 3.28: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Rímac

Cuenca Lurín: Se establecieron 10 puntos de análisis los cuales generan 10 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección 2.2.3, el punto 1 corresponde a la estación Manchay (Estación índice), el punto 4 a la estación Antapucro, y el punto 10 a la estación San Damián (Figura 3.29).



Figura 3.29: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Lurín

Cuenca Mala: Se establecieron 16 puntos de análisis los cuales generan 16 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección 2.2.3, el punto 1 corresponde a la estación La Capilla (E. índice) siendo la única estación de aforo disponible en la cuenca. (Figura 3.30).

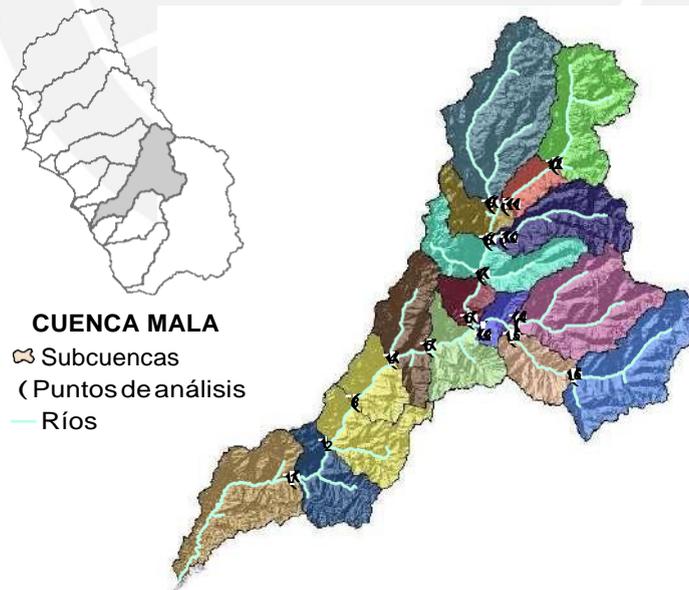


Figura 3.30: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Mala

Cuenca Cañete: Se establecieron 30 puntos de análisis los cuales generan 30 subcuencas según la extensión mínima y características descritas en la Sección 2.2.3, el punto 1

corresponde a la estación Socsi, el punto 7 a la estación Chavín (E. índice), el punto 15 a la estación Tinco y el punto 17 a la estación Aguas Calientes. (Figura 3.31)



Figura 3.31: Puntos y subcuencas de análisis cuenca Cañete

3.4. Modelamiento hidrológico

3.4.1. Implementación del modelo hidrológico

Tal como se describió en la Sección 2.2.4.1 las variables de entrada precipitación media (Pm) y evapotranspiración media (ETm) del modelo se adecuaron para cada punto de análisis.

La Figura 3.32 muestra como ejemplo el proceso de cálculo de (Pm) y (ETm) en subcuencas generadas por los puntos de análisis para el caso de la cuenca Cañete, estos parámetros son necesarios como datos de entrada del modelo hidrológico, el mismo proceso fue desarrollado para todas las cuencas del área de estudio.

Los datos de evapotranspiración (Figura 3.32- b.) media de los productos MOD16-ET (Sección 2.1.3.1) Y GLDAS (Sección 2.1.3.2) se evaluaron directamente en el modelo hidrológico, con una mejor respuesta en la estimación de caudales del producto GLDAS. Por lo tanto, se empleó dicha base de datos en todos los procesos posteriores.

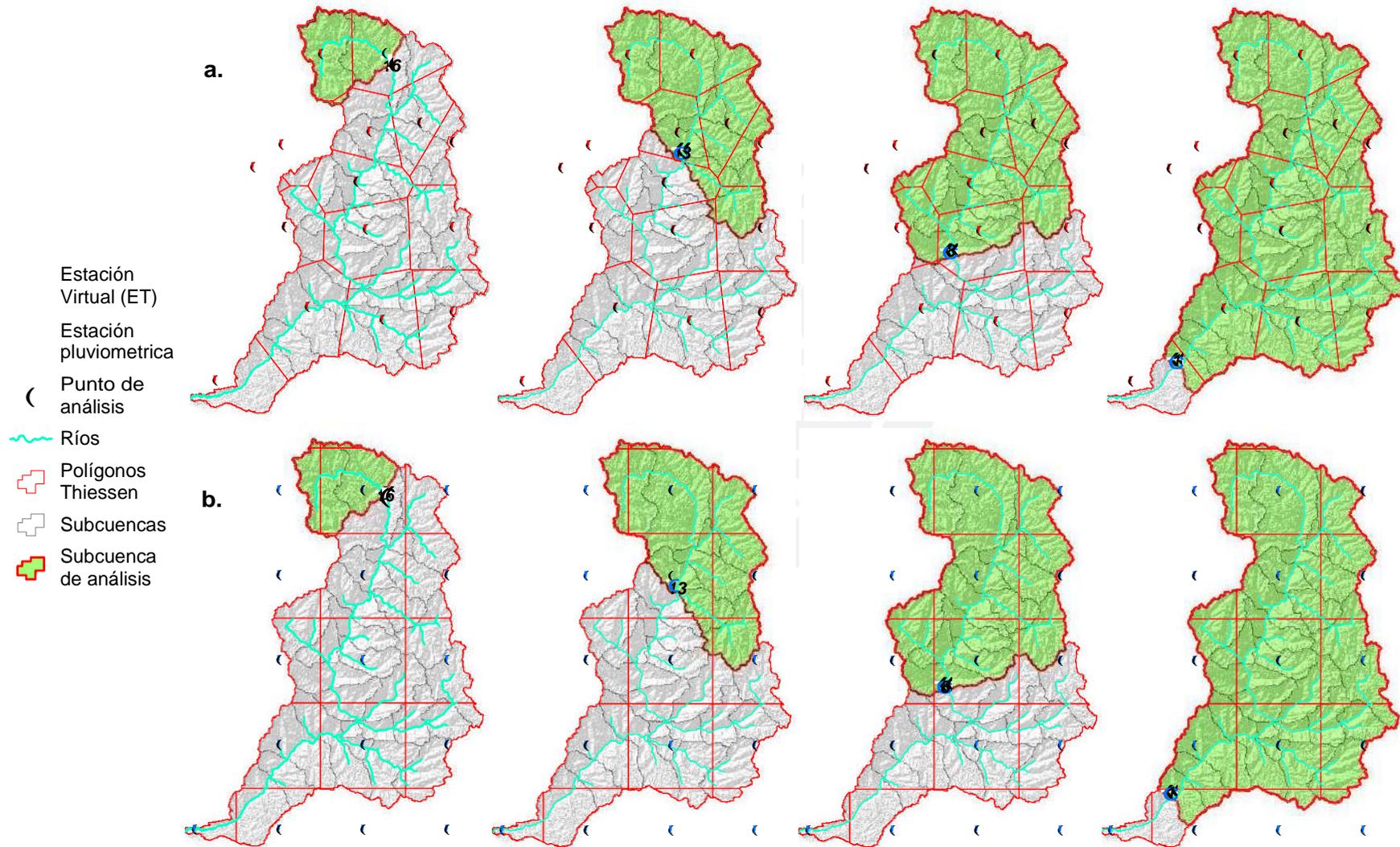


Figura 3.32: **a.** Precipitación media en puntos 1, 8, 13 y 16, **b.** Evapotranspiración (ET) media en puntos 1, 8, 13, 16 - Cuenca Cañete

3.4.2. Evaluación del modelo hidrológico

Mediante los procesos de calibración y validación para condiciones estacionarias se evaluaron las pruebas de Muestra Dividida (Sección 1.5.4.1) y de Cuenca Representativa (Sección 1.5.4.2).

El periodo de calibración consiste en la optimización de los parámetros X_1 y X_2 del modelo GR2M, con la finalidad de ajustar los valores simulados a los observados maximizando el valor del coeficiente del coeficiente de Nash (E). Por su parte la validación consiste en la evaluación del desempeño de los parámetros obtenidos en la etapa de calibración para un periodo de tiempo distinto (Hernández et al., 2013).

3.4.2.1. Prueba de muestra dividida

Se consideró los 46 años del periodo de análisis, el periodo de llenado de tanque de 12 meses (warm-up) y los periodos calibración desde Ene/66 - Dic/87 (264 meses) y validación de Ene/88 - 03/10 (267 meses) con los siguientes resultados.

Estación Santo Domingo - Chancay Huaral

Se observa en la Figura 3.33 una buena aproximación de caudales simulados, en cuanto a los valores máximos existe tendencia a sobreestimaciones (Bias=0.08); asimismo, el modelo representa bien los valores mínimos, los cuales se corroboraron mediante el gráfico de caudales promedio multimensuales (Figura 3.34), las mayores sobreestimaciones se presentan para el mes de marzo.

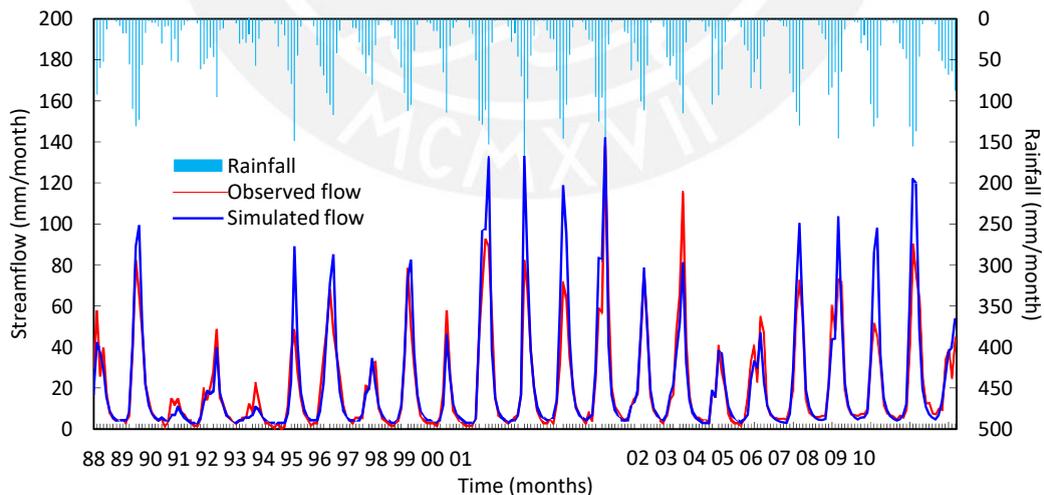


Figura 3.33: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M - Estación Santo Domingo

El valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 87.9 % para la etapa de calibración y 77.5 % para la etapa de validación.

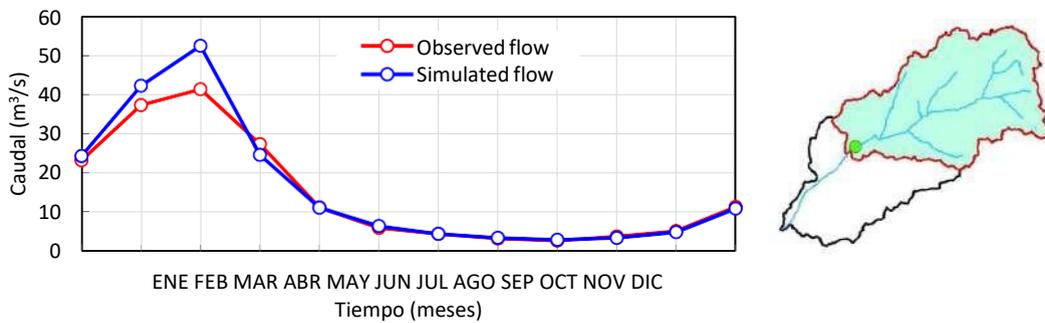


Figura 3.34: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Santo Domingo (derecha)

Estación Puente Magdalena – Chillón

Los resultados de la etapa de validación muestran una buena aproximación con ligera tendencia a la subestimación de valores máximos (Bias=-0.19) y un periodo corto (1998-2000) de sobreestimaciones (Figura 3.35). Los caudales para los periodos de estiaje muestran un mejor comportamiento los cuales se corroboran en el gráfico de caudales promedios multimensuales (Figura 3.36).

Figura 3.35: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Puente Magdalena

El valor del coeficiente de Nash (E) obtenido en la etapa de calibración fue de 71.3 % mientras que para la etapa de validación la eficiencia fue del 68.7%.

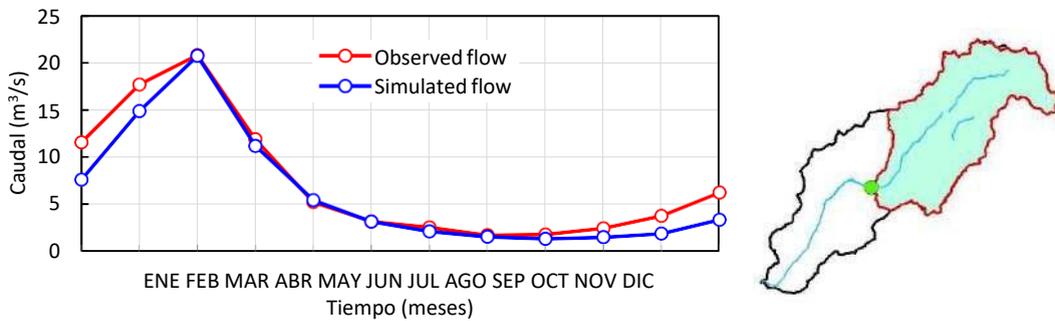


Figura 3.36: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Puesto Magdalena (derecha)

Estación Chosica – Rímac

Se observa un buen comportamiento sin una marcada tendencia a sobreestimaciones o subestimaciones de valores máximos (Bias=0.02), (Figura 3.37); asimismo, para valores mínimos se puede observar una ligera tendencia de subestimación de caudales lo cual puede ser consecuencia de una alteración del régimen natural del río que no fue considerada en el proceso de naturalización.

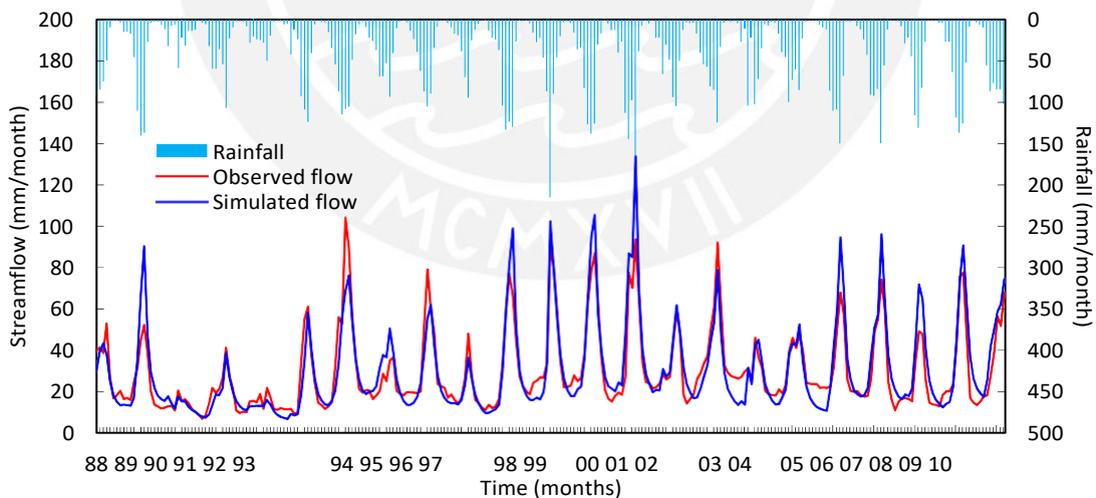


Figura 3.37: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Chosica

El análisis multimensual (Figura 3.38) muestra una buena simulación de caudales para todo el periodo. El valor del coeficiente de Nash (E) obtenido en la etapa de calibración fue de 66.5 % mientras que para la etapa de validación la eficiencia fue del 78.9 %.

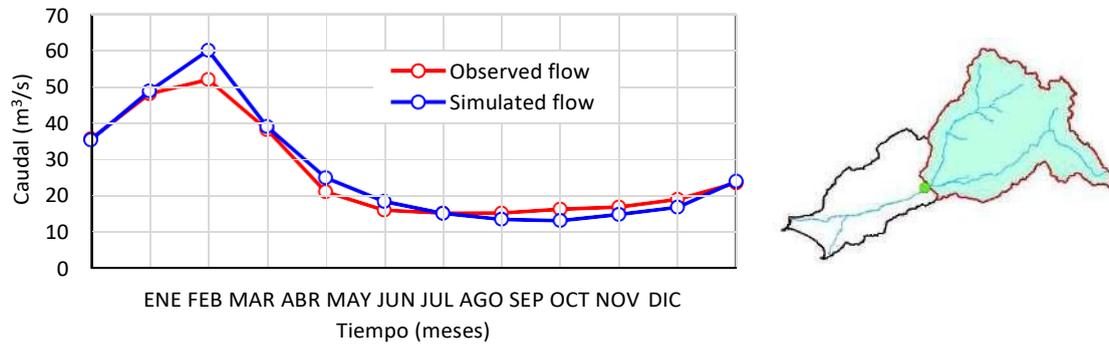


Figura 3.38: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Chosica (derecha)

Estación Manchay – Lurín

Se puede observar que los registros de lluvias no captaron los valores máximos que se presentaron en los años 94 y principalmente el año 98 (evento El Niño), en general los caudales simulados tienden a la subestimación (Bias=-0.45), (Figura 3.39), esto puede ser consecuencia de lluvias intensas a nivel de cuenca media que no fueron captadas por las estaciones ubicadas la mayoría en la parte alta de la cuenca Lurín.

Figura 3.39: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación Manchay

El análisis multimensual (Figura 3.40) verifica la tendencia a las subestimaciones con la mayor diferencia para el mes de abril. El valor del coeficiente de Nash (E) obtenido en la etapa de calibración fue de 75.2 % mientras que para la etapa de validación la eficiencia fue del 64.6 %.

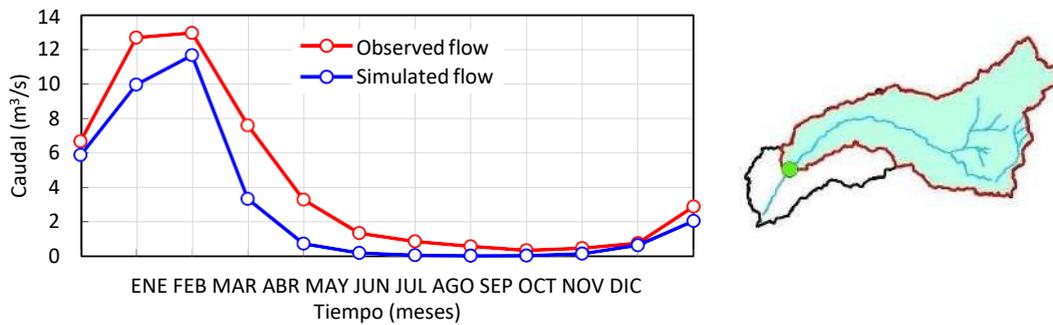


Figura 3.40: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Manchay (derecha)

Estación La Capilla – Mala

Se observa en la Figura 3.41 una buena aproximación de caudales simulados con algunas diferencias importantes puntuales, sin una tendencia definida a sobreestimaciones o subestimaciones (Bias=0.03).

Figura 3.41: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M – Estación La Capilla

Se comprueba el buen comportamiento a través del análisis de caudales promedio mensuales (Figura 3.42). El valor del coeficiente de Nash (E) obtenido en la etapa de calibración fue de 77.7% mientras que para la etapa de validación la eficiencia fue del 72.7%.

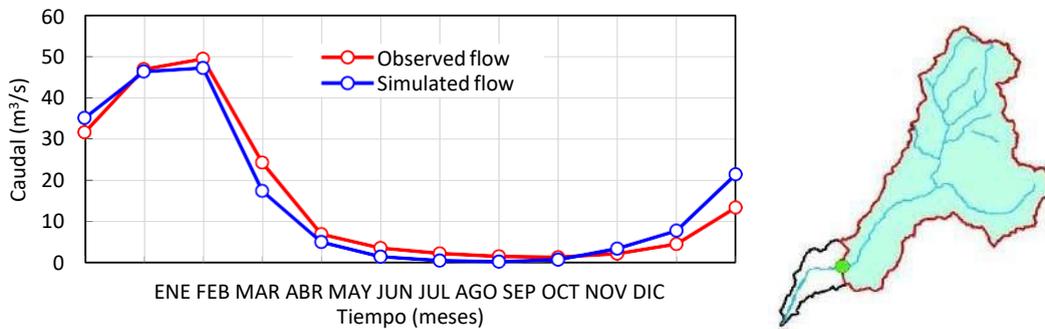


Figura 3.42: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación La Capilla (derecha)

Estación Chavín - Cañete

Para la cuenca Cañete se consideró como estación índice, además de la estación Sosci, a la estación Chavín debido a que se disponía de información mensual amplia (1986-2010) y su cercanía al límite de la cuenca húmeda, asimismo esta presentó mejores resultados como estación índice (etapa de calibración) en la prueba de cuenca representativa que se mostrará posteriormente.

Se observa una aceptable aproximación de caudales simulados para todo el periodo, sin una definida tendencia ($Bias = -0.01$) y error promedio ($RMSE = 0.31$), (Figura 3.43), los cuales se verifican en el gráfico de caudales promedio multimensuales (Figura 3.44).

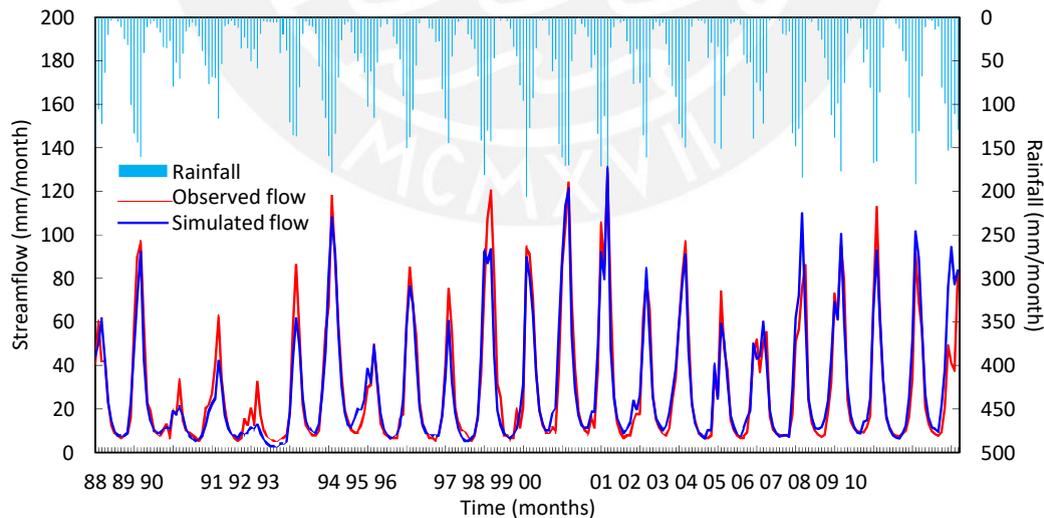


Figura 3.43: Precipitación mensual (superior), Hidrograma simulado y observado de la etapa de validación (inferior). Modelo GR2M - Estación Chavín

El valor del coeficiente de Nash (E) obtenido en la etapa de calibración fue de 78.7% mientras que para la etapa de validación la eficiencia fue del 89.4%.

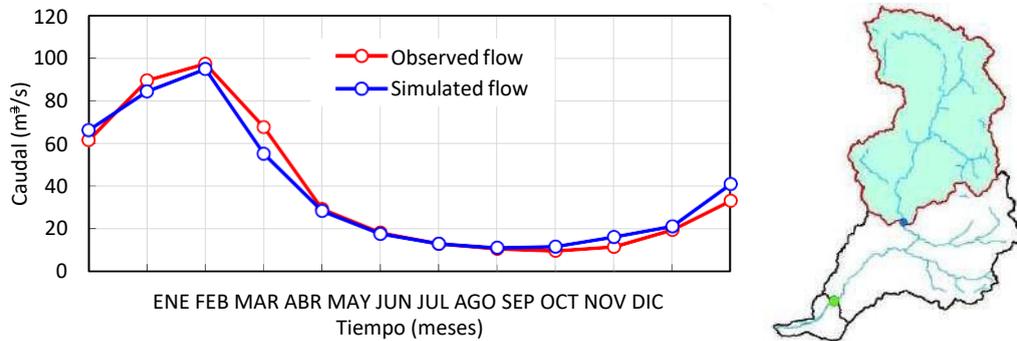


Figura 3.44: Caudales promedio multimensuales observados y simulados, periodo de validación (izquierda); subcuenca controlada por la estación Chavín

3.4.2.2. Prueba de cuenca representativa

Con esta prueba evaluaremos la capacidad del modelo hidrológico para simular caudales mensuales al interior de la cuenca. Los parámetros X1 y X2 del modelo GR2M calibrados en las estaciones índice se trasladaron geográficamente a las subcuencas de análisis las cuales evaluaremos mediante algunas estaciones con registros disponibles.

El periodo de calibración corresponde a los 46 años de periodo de estudio (Ene/65-Mar/10) así mismo el periodo de validación fue el periodo de registros disponibles de cada estación al interior de cada cuenca, con los siguientes resultados.

Estación Tinco - Cañete

Para la estación Tinco ubicada en la parte alta de la cuenca Cañete se tenía disponible 12 años de registros mensuales (Feb/86-Nov/97), podemos observar (Figura 3.45) una aceptable aproximación de caudales simulados con ligera sobreestimación ($Bias=0.08$). Asimismo la figura también muestra el alto grado de correlación entre los valores observados y calculados para los meses de lluvia EFM ($R_{EFM}=0.85$).

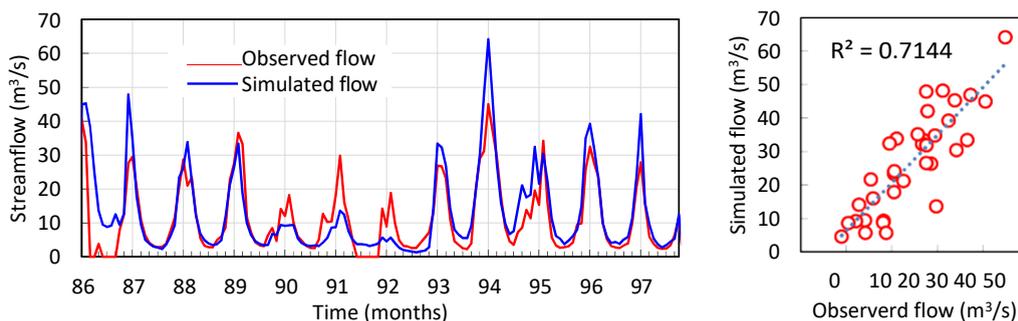


Figura 3.45: Hidrograma mensual simulado y observado de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Feb/86-Nov/97) - Estación Tinco

Se verifica el buen comportamiento de las estimaciones mediante el análisis de caudales promedio multimensual (Figura 3.46). El valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 70.6 % para la etapa de validación, considerado como un ajuste aceptable.

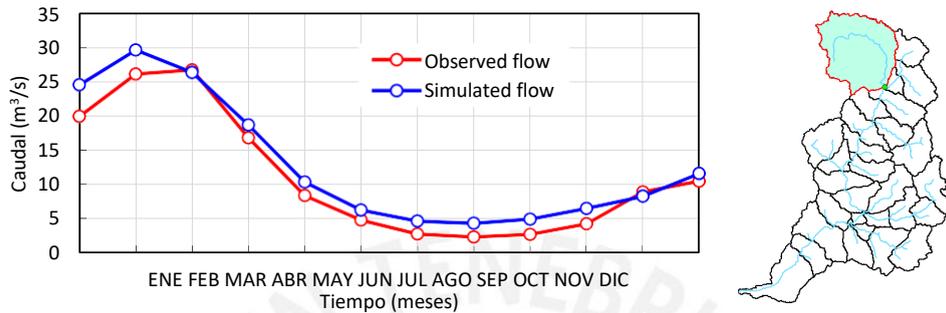


Figura 3.46: Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Tinco (derecha). Cuenca Cañete

Estación Sheque - Rímac

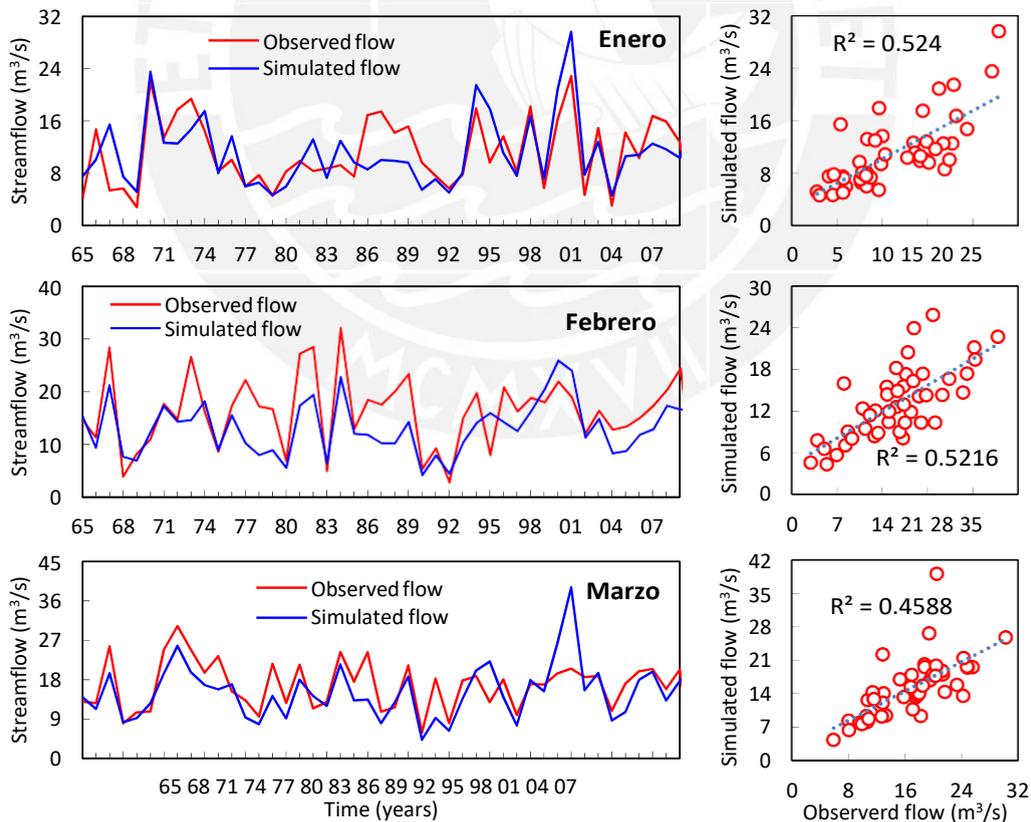


Figura 3.47: Hidrogramas anuales para los meses enero, febrero y marzo de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/65-Dic/09) - Estación Sheque

Para la estación Sheque se tenía un registro mensual amplio (Ene/65-Dic/09) que permitió analizar independientemente los meses de interés, donde se presentan los valores máximos (EFM), con una respuesta eficiente del modelo hidrológico GR2M. Se puede observar (Figura 3.47) una adecuada simulación de caudales con mejor reproducción de variaciones para los meses de enero y marzo ($R_{ENE}=0.72$ y $R_{MAR}=0.67$ respectivamente) y subestimaciones para el mes de febrero ($R_{FEB}=0.72$).

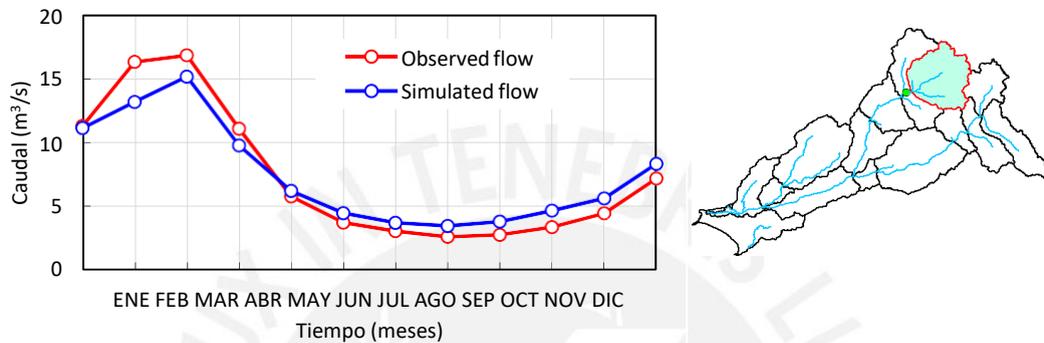


Figura 3.48: Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Sheque (derecha). Cuenca Rímac

El análisis multimensual muestra una ligeras sobreestimaciones para la época de estiaje y subestimaciones para la época de avenidas ($Bias=0.01$) (Figura 3.48), el valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 76.5 % para la etapa de validación, considerado como un ajuste aceptable.

Estación Tamboraque - Rímac

La estación Tamboraque al igual que Sheque se tenía el registro (Ene/65-Dic/09) que permitió analizar independientemente los meses de interés (EFM).

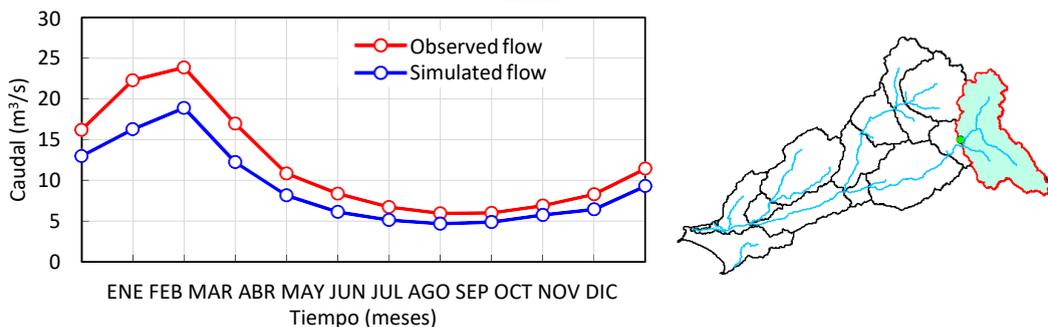


Figura 3.49: Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Tamboraque (derecha). Cuenca Rímac

El análisis promedio multimensual (Figura 3.50) verifica la tendencia a subestimaciones

para todos los meses (Bias=-0.24), el valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 67.6 % para la etapa de validación, considerado como un ajuste aceptable.

Se puede observar en la Figura 3.49 elevadas correlaciones lo cual indica una buena reproducción de las variaciones de caudales ($R_{ENE}=0.80$ y $R_{FEB}=0.81$ y $R_{MAR}=0.84$), sin embargo se observa una tendencia a subestimaciones.

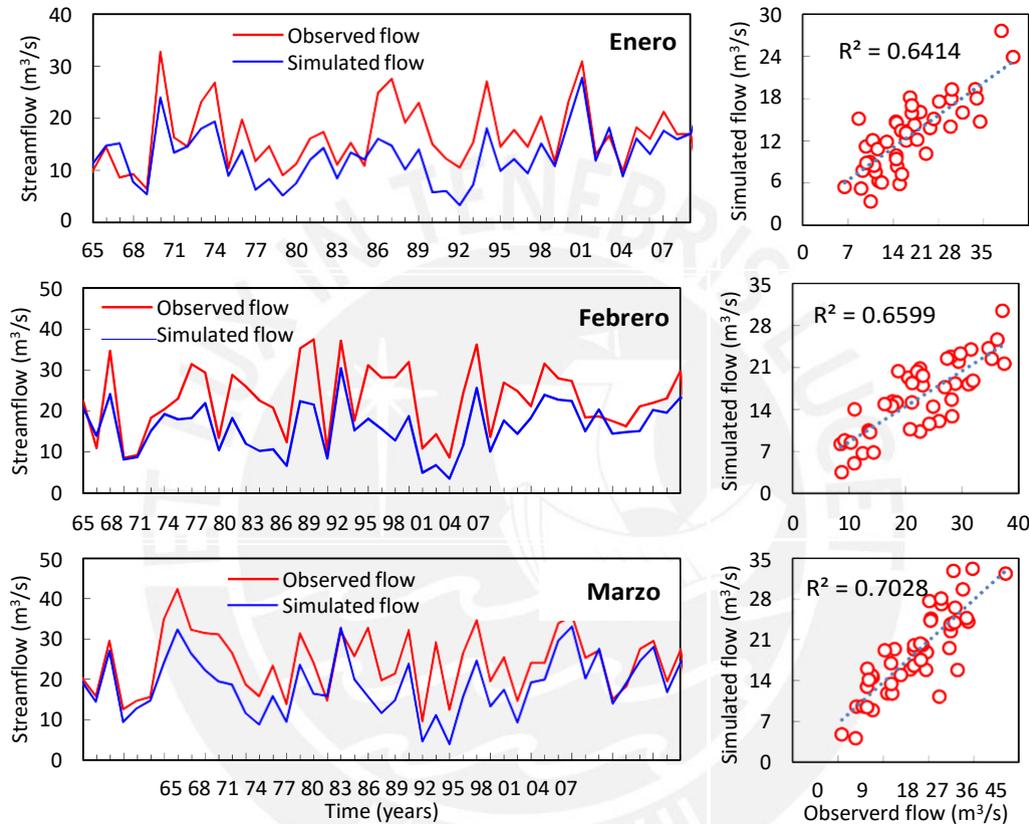


Figura 3.50: Hidrogramas anuales meses enero, febrero y marzo de la etapa de validación (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/65-Dic/09) - Estación Tamboraque

Estación San Damián - Lurín

Para estación San Damián se tenía disponible 5 años de registros mensuales (Ene/69-Dic/73), la Figura 3.51 muestra una buena representación de las variaciones de caudal ($R_{EFM}=0.91$). Sin embargo, existe una tendencia a subestimaciones (Bias=-0.41), esto puede ser consecuencia de la ubicación aguas abajo del límite de cuenca húmeda de la estación índice (E. Manchay) que sirvió para la calibración ya que modifica los parámetros del modelo GR2M simulando caudales menores a los que debería.

El análisis promedio multimensual (Figura 3.52) verifica la subestimación de caudales, el valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 68.3 % para la etapa de validación, considerado como un ajuste bueno.

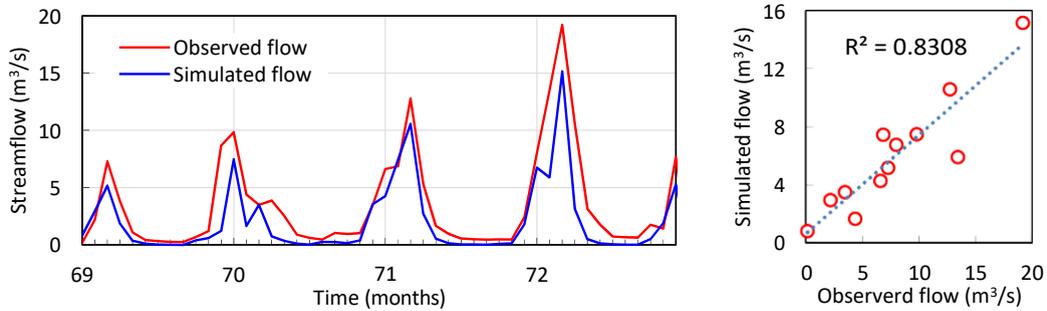


Figura 3.51: Hidrograma mensual generado de la etapa de validación en la subcuenca (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Ene/69-Dic/72) - Estación San Damián

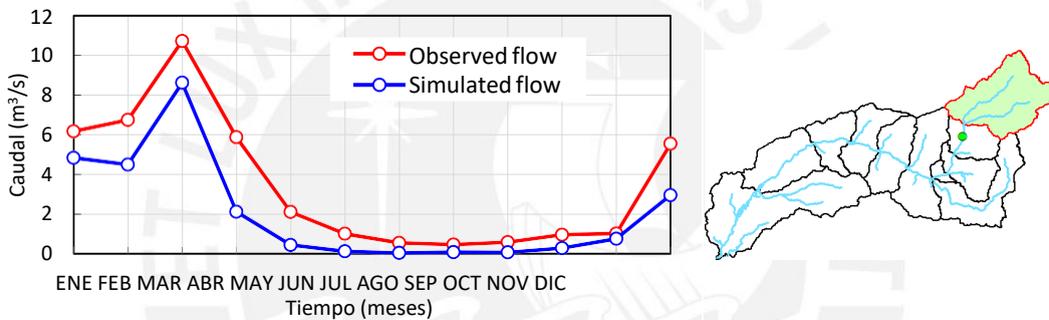


Figura 3.52: Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación San Damián (derecha). Cuenca Lurín

Estación Pariacancha - Chillón

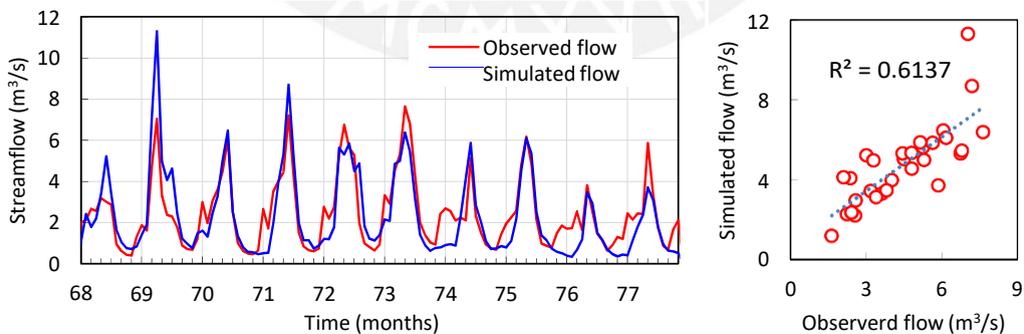


Figura 3.53: Hidrograma mensual generado de la etapa de validación en la subcuenca (izquierda), diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de lluvia (EFM) (derecha). Periodo de validación (Oct/68-Ago/78) - Estación Pariacancha

Para la estación Pariacancha en la cuenca Chillón se tenía disponible 11 años de registros mensuales (Oct/68-Ago/78). La Figura 3.53 muestra una buena representación de los

meses de lluvia (EFM), un valor sobreestimado importante (Ene/70), además el coeficiente de correlación ($R_{EFM}=0.78$) indica un comportamiento similar de las variaciones de caudal.

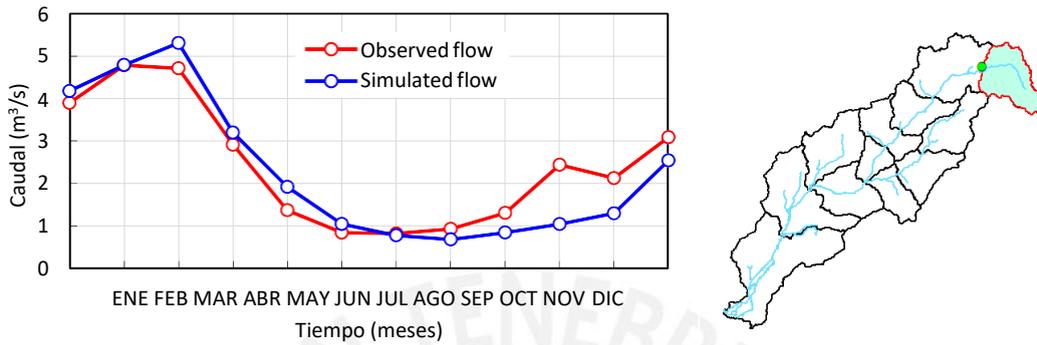


Figura 3.54: Caudales promedio multimensuales observados y simulados periodo de validación (izquierda), subcuenca controlada por la estación Pariacancha (derecha). Cuenca del río Chillón

El gráfico de caudales promedio multimensual (Figura 3.54) muestra en general una ligera tendencia a subestimaciones (Bias=-0.05), además el valor del coeficiente de Nash (E) indica una eficiencia del 62.8 % para la etapa de validación, considerado como un ajuste aceptable.

Resumen de resultados del proceso de calibración y validación

Prueba de muestra dividida

Tabla 3.6: Cuadro resumen de estadísticos de eficiencia de la prueba de muestra dividida

Etapa	Estadístico	Estaciones índice					
		Socsi	Santo Domingo	Puente Magdalena	Chosica	Manchay	La Capilla
Calibración	Nash(E)	78.73	87.86	71.31	66.46	75.24	77.74
	Bias	-0.04	-0.05	-0.10	-0.02	-0.28	-0.04
	RRMSE	0.47	0.46	0.70	0.43	0.72	0.72
Validacion	Nash(E)	89.42	77.47	68.66	78.91	64.62	72.68
	Bias	-0.01	0.08	-0.19	0.02	-0.45	0.03
	RRMSE	0.31	0.52	0.58	0.29	0.88	0.72

Se observa en la Tabla 3.6 en general, para las estaciones índice, la buena representación de caudales, considerados ajustes muy buenos (Molnar, 2011), el error más significativo es de 0.88 en la estación Manchay, el mismo que muestra los estadísticos más desfavorables (E) y (Bias).

Prueba de cuenca representativa

Tabla 3.7: Cuadro resumen de estadísticos de eficiencia de la prueba de cuenca representativa

Etapa	Estadístico	Cuenca				
		Chillón	Cañete	Rímac	Lurín	
	Estación	Pte. Magdalena	Chavin	Chosica	Manchay	
Calibración	Start date	01/1966	01/1966	01/1966	01/1966	
	End date	03/2010	03/2010	03/2010	12/2005	
	Nash(E)	70.73	84.28	72.90	72.10	
	Bias	-0.06	-0.01	-0.02	-0.21	
	RRMSE	0.63	0.39	0.36	0.77	
	Estación	Pariacancha	Tinco	Sheque	Tamboraque	San Damián
Validación	Start date	10/1968	02/1986	01/1965	01/1965	01/1969
	End date	08/1978	11/1997	12/2009	12/2009	12/1972
	Media Obs. (m ³ /s)	2.45	12.18	7.37	12.12	3.47
	Media Sim. (m ³ /s)	2.32	12.95	7.46	9.22	2.07
	R _{EFM}	0.78	0.85	0.72	0.84	0.91
	Nash(E)	62.76	70.57	76.52	67.60	68.31
	Bias	-0.05	0.08	0.01	-0.24	-0.41
	RRMSE	0.43	0.46	0.40	0.36	0.68

Los resultados de la prueba de cuenca representativa, a pesar de la limitada longitud de los registros, muestran una respuesta eficiente en la representación de caudales en estaciones ubicadas en cuenca alta. Los valores del coeficiente E para todos los casos están entre (0.6 - 0.8) considerados como muy buenos (Molnar,2011).

Solo en la cuenca Rímac se verificó estrictamente el procedimiento de la prueba de cuenca representativa (Sección 1.5.4.2) ya que presenta como mínimo 2 estaciones con registros amplios (1965-2009) y se verifica resultados aceptables. Considerada la zona de estudio como una región homogénea y verificado el buen desempeño de los indicadores estadísticos, se aceptaron los caudales simulados los cuales fueron empleados en la siguiente sección.

3.5. Análisis de caudales máximos

Se evaluaron en primer lugar las estaciones índice (puntos aforados) mediante el ajuste de sus valores a las funciones de distribución de mejor adecuación, posteriormente se desarrolló el proceso para estimar valores de caudales máximos en puntos de análisis establecidos en la Sección 3.3 (puntos no aforados).

3.5.1. Caudales máximos en puntos aforados

La mayoría de registros se ajustaron mejor a la distribución de Gumbel (Figuras 3.55 y 3.56), mientras que la estación Puente Magdalena (cuenca Chillón) se ajustó a la distribución Log-Normal (Figura 3.55 b.). A continuación se muestra el ajuste de los valores observados dentro de un intervalo de confianza del 95 % para las estaciones índice y los resultados de caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

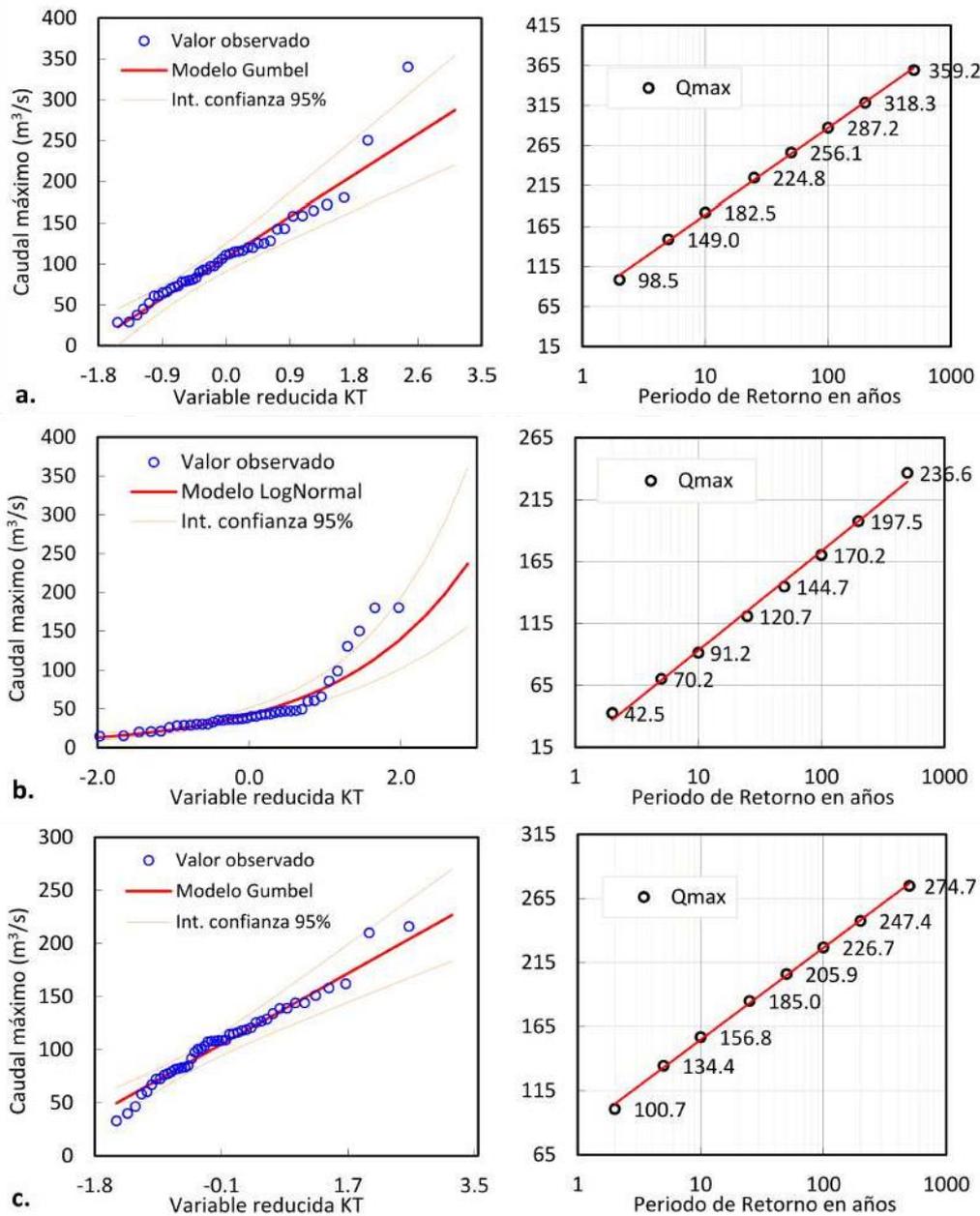


Figura 3.55: Ajuste estadístico de caudales – **a.** E. Sto. Domingo (Gumbel), **b.** E. Pte. Magdalena (Log-Normal), **c.** E. Chosica (Gumbel)

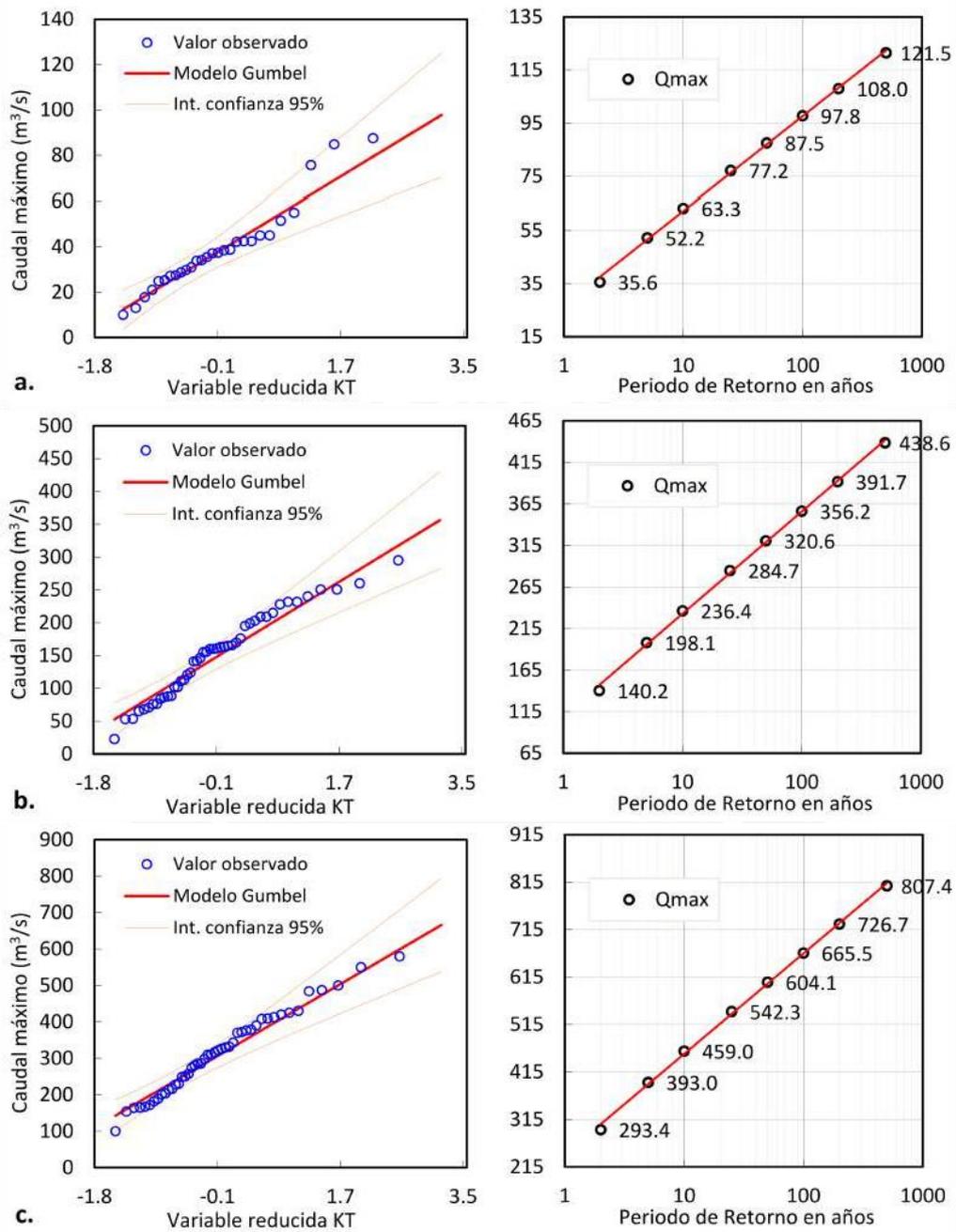


Figura 3.56: Ajuste estadístico de caudales – **a.** E. Manchay (Gumbel), **b.** E. La Capilla (Gumbel), **c.** E. Sosci (Gumbel)

3.5.2. Caudales máximos en puntos no aforados

Se evaluaron relaciones entre los valores máximos mensuales y diarios a escala anual tal como lo descrito en la metodología (Sección 2.2.5).

3.5.2.1. Relación caudal mensual – caudal diario

Es muy probable que el registro máximo diario haya ocurrido en el mes con mayor valor promedio (caudal mensual), este último valor es más sencillo de obtener en series históricas y a partir del modelamiento hidrológico, mientras que los registros máximos diarios son los necesarios para fines de diseño y en el presente estudio. La Figura 3.57 muestra una comparación entre los hidrogramas diarios y mensuales para periodo (1965-1975) para las estaciones índice Pte. Magdalena, Chosica y Sosci del área de estudio.

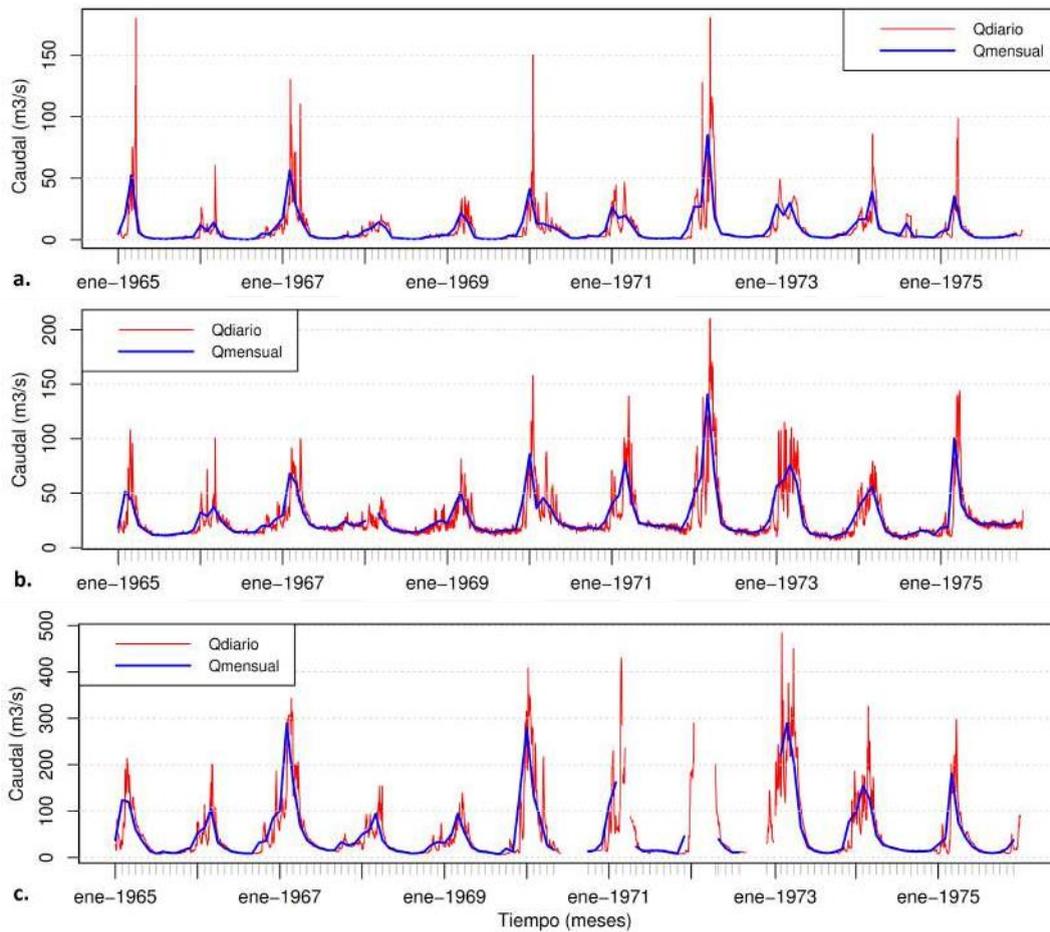


Figura 3.57: Hidrograma diario y mensual, estaciones **a.** Pte. Magdalena (Chillón), **b.** Chosica (Rímac), **c.** Sosci (Cañete), periodo (01/01/1965-31/12/1975)

Mediante simple observación para el hidrograma (Figura 3.57a.), la estación Pte. Magdalena muestra una mayor dispersión entre los valores máximos diarios y mensuales, mientras para los hidrogramas restantes la dispersión es menor. Asimismo, se observa que por la ausencia de lluvias los valores mínimos son muy similares; en cambio los valores máximos muestran una evidente diferencia, pero mantienen una misma tendencia que analizaremos detalladamente en la Figura 3.58 la cual muestra el grado de correlación que existe entre los caudales máximos anuales de las series mensuales y diarias para cada estación índice.

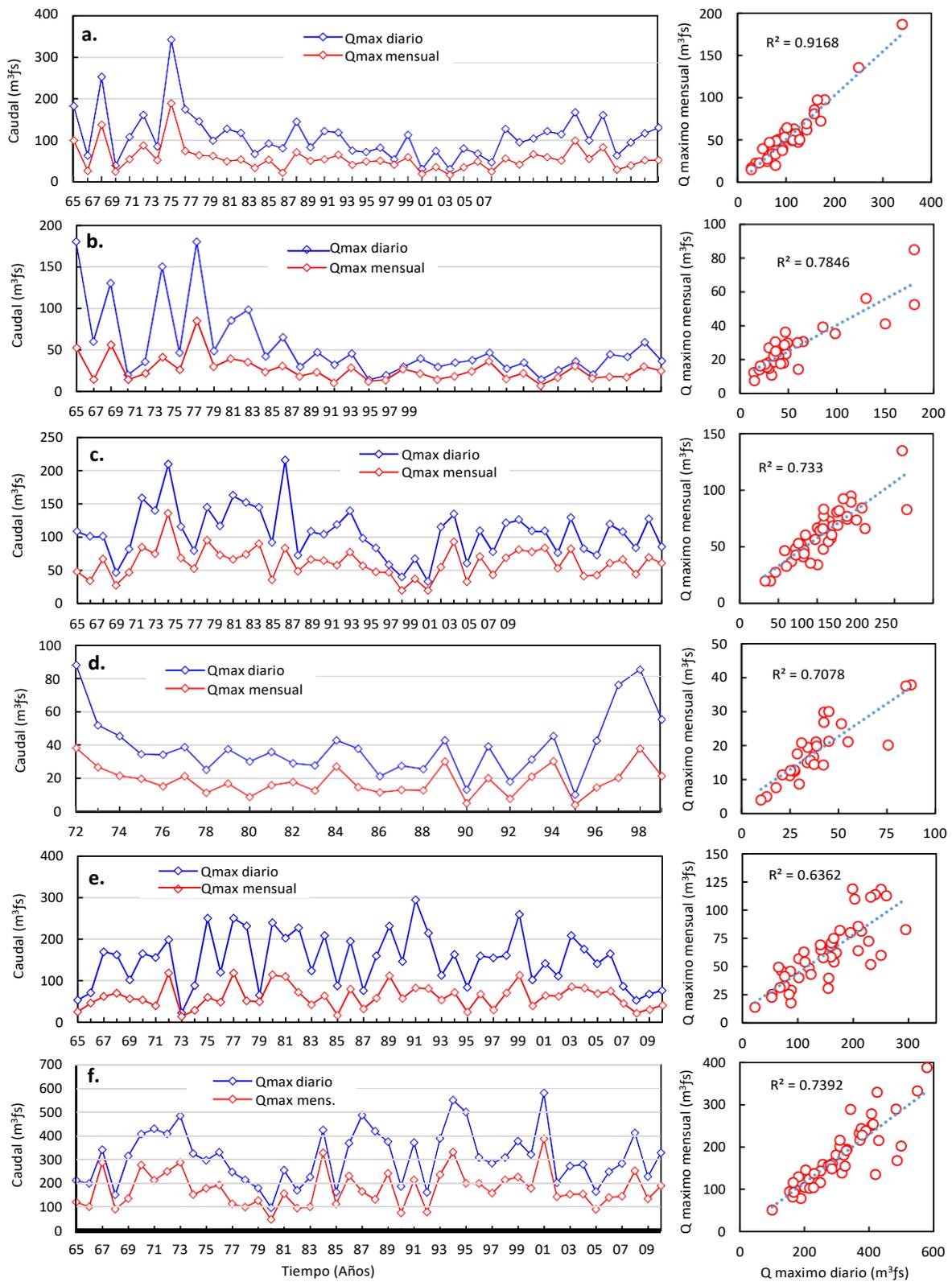


Figura 3.58: Hidrograma de máximos anuales de las series mensuales y diarias - **a.** E. Sto. Domingo, **b.** E. Pte. Magdalena, **c.** E. Chosica, **d.** E. Manchay, **e.** E. La Capilla, **f.** E. Sosci

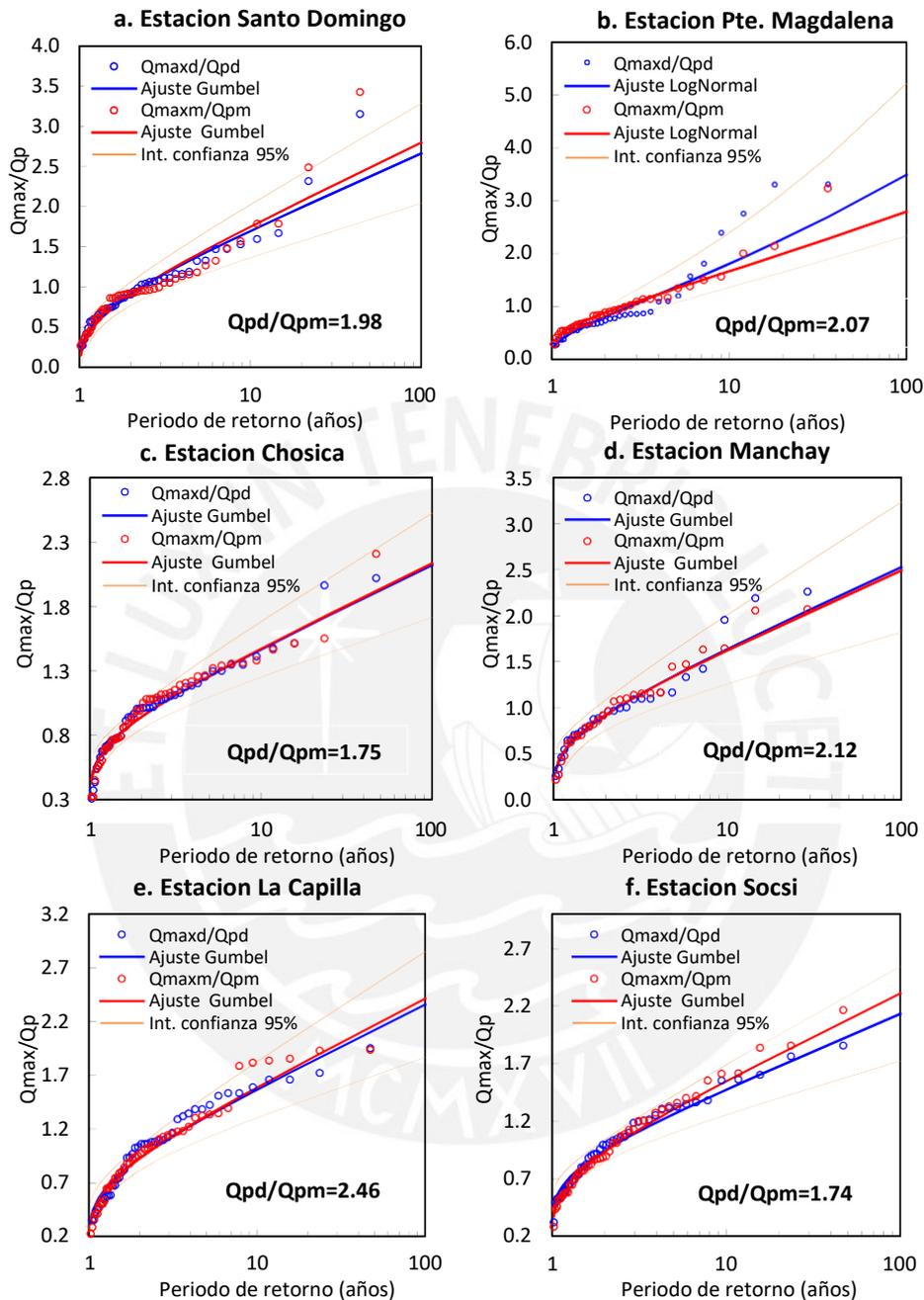


Figura 3.59: Ajuste de frecuencia de la razón entre caudales máximos anuales (Q_{max}) y el promedio de la serie (Q_p) para valores diarios (Q_{maxd}/Q_{pd}) y mensuales (Q_{maxm}/Q_{pm}), estaciones índice

El paralelismo entre los de valores máximos mostrados en los hidrogramas (Figura 3.58) verifican el elevado grado de correlación entre sus valores ($R_{PROM}=0.87$), en ese contexto se evaluaron los mismos parámetros directamente en funciones de frecuencia, a las que mejor se ajustaron, pero de sus valores normalizados (divididos entre el promedio de la serie, $T = 2.33$ años) (Chávez et al., 2014) que se muestran en la Figura 3.59.

Donde la relación **Qpd/Qpm** (Figura 3.59) significa el promedio de la serie de máximos diarios entre promedio de la serie de máximos mensuales.

La conservación del coeficiente de variación $CV (s/\bar{x})$ de las series máximas mostradas (Figura 3.59) permiten un comportamiento similar al ser ajustadas a las funciones de distribución, en algunos casos el comportamiento es idéntico (Figura 3.59, c. Chosica, d. Manchay y e. La Capilla) debido a que sus CV mantienen valores similares. Para las estaciones (a. Sto. Domingo y f. Socsi, Figura 3.59) el CV muestra ligeras variaciones, la diferencia más grande del CV se presenta para la estación (b. Pte. Magdalena, Figura 3.59) que es un comportamiento razonable, ya que esta se ajusta a una función diferente a las demás que es de tipo logarítmica, sin embargo todas se encuentran dentro de los límites de confiabilidad al 95 % de los valores máximos diarios.

El mismo análisis en estaciones hidrométricas al interior del área de estudio aunque disponibles en series de cortas longitudes muestran el mismo comportamiento (mantienen similar valor del CV), por lo tanto el valor relevante para llegar a los valores máximos diarios buscados sería la relación entre los valores promedio máximos **Qpd/Qpm** la misma que analizaremos a continuación.

3.5.2.2. Definición del factor de amplificación

A la relación (Qpd/Qpm) se denominó **factor de amplificación (Fa)** donde: (Qpd) corresponde al promedio de la serie de caudales máximos diarios y (Qpm) corresponde al promedio de la serie de caudales máximos mensuales, ambos para un mismo periodo de análisis (1965-2010).

Se analizaron los valores del factor (Fa) para estaciones en el área de estudio que cuenten con series disponibles de caudales máximos de una longitud por lo menos de 10 años.

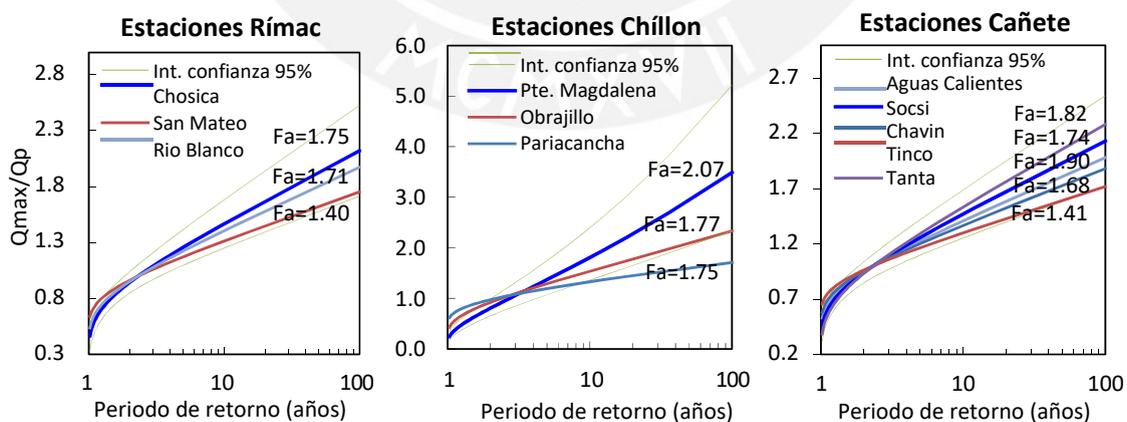


Figura 3.60: Ajuste de frecuencia de caudales máximos diarios dividido entre el promedio de la serie, grupo de estaciones de las cuencas Rímac, Chillón y Cañete

La escasa cantidad de estaciones hidrométricas y la longitud de sus datos limitan cualquier predicción acerca del factor Fa ante la posible regionalización de valores por cuenca, sin

embargo se observa para las estaciones disponibles (Figura 3.60) similares valores de F_a , conservando los valores de la relación Q_{max}/Q_p dentro de los límites de confianza al 95 % hasta probabilidades de ocurrencia de 1 % ($T=100$ años) alrededor de los valores de la estación índice, lo cual es consecuencia de la homogeneidad hidrológica que existe en cada cuenca.

Por lo tanto, el factor (F_a) correspondiente a cada estación permitiría llegar a los cuantiles máximos anuales buscados a partir de los valores máximos mensuales, esto resolvería el problema para estaciones con registros cortos, ya que se cuenta con las simulaciones a escala mensual (resultados del modelamiento ítem 3.3) con resultados fiables. Además se podría solucionar el problema principal que se da en cuencas sin estaciones de aforo, para las cuales solo contamos con los caudales simulados a escala mensual, asumiendo conservadoramente el coeficiente (F_a) de las estaciones índice.

Desde luego todo se basa en la homogeneidad hidrológica de la región en estudio y la similitud del comportamiento hidrológico, es así que se pueden comparar en un mismo gráfico los cuantiles normalizados de caudales máximos diarios anuales en las estaciones índice (Figura 3.61).

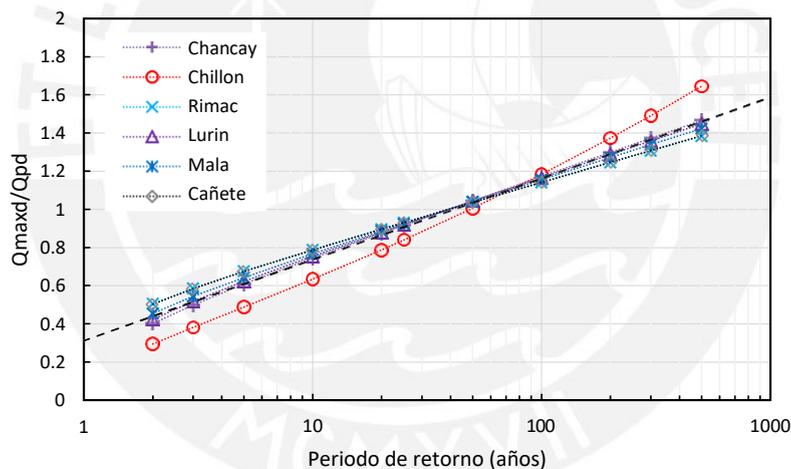


Figura 3.61: Ajuste de frecuencia de caudales máximos diarios divididos entre el promedio de la serie, estaciones índice subregión hidrológica 5a4.

Se observa (Figura 3.61) la similitud de las curvas de ajuste normalizadas para las estaciones índice, con la diferencia más relevante de la estación Pte. Magdalena (Chillón) por su ajuste tipo logarítmico (Figura 3.59, b.), donde la línea recortada representaría el ajuste a partir de la cual se podría determinar la curva regional (León, 2014) para el área de estudio, lo cual no es el objetivo del presente análisis.

3.5.2.3. Validación de resultados

Los resultados mostrados de la etapa de modelamiento hidrológico muestran una aproximación bastante aceptable de los valores máximos mensuales, los mismos que afectados por el factor de amplificación muestran admisibles aproximaciones a los caudales máxi-

mos aforados en estaciones disponibles con información a escala diaria (Figuras 3.62, 3.64, 3.63).

Estaciones - Cuenca Chillón

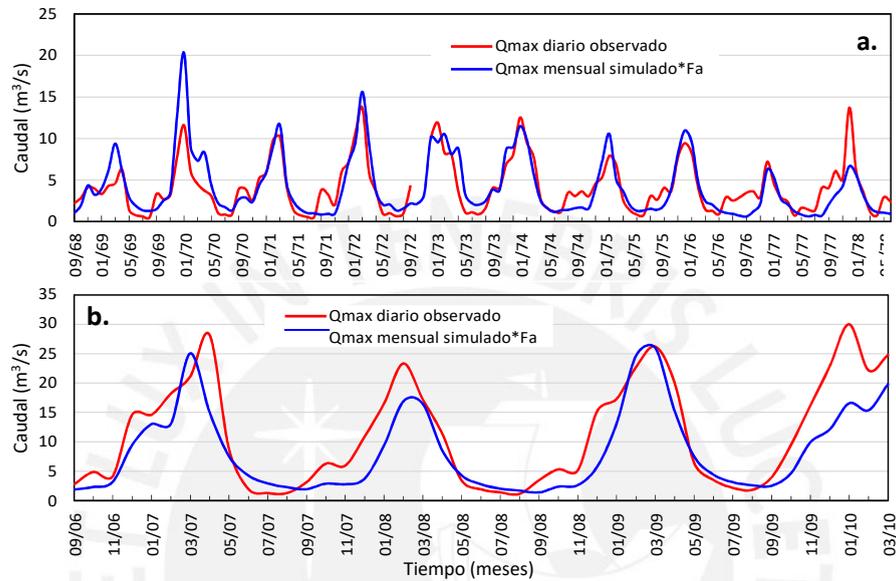


Figura 3.62: Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (Fa) - **a.** E. Pariacancha, **b.** E. Obrajillo. Cuenca Chillón

Estaciones - Cuenca Lurín

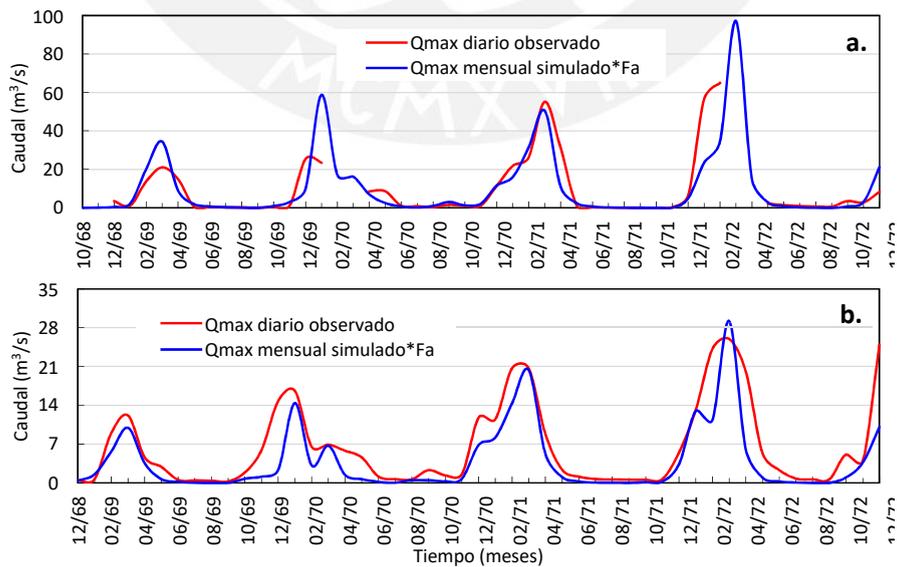


Figura 3.63: Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (Fa) - **a.** E. Antapucro, **b.** E. San Damián. Cuenca Lurín

Estaciones - Cuenca Rímac

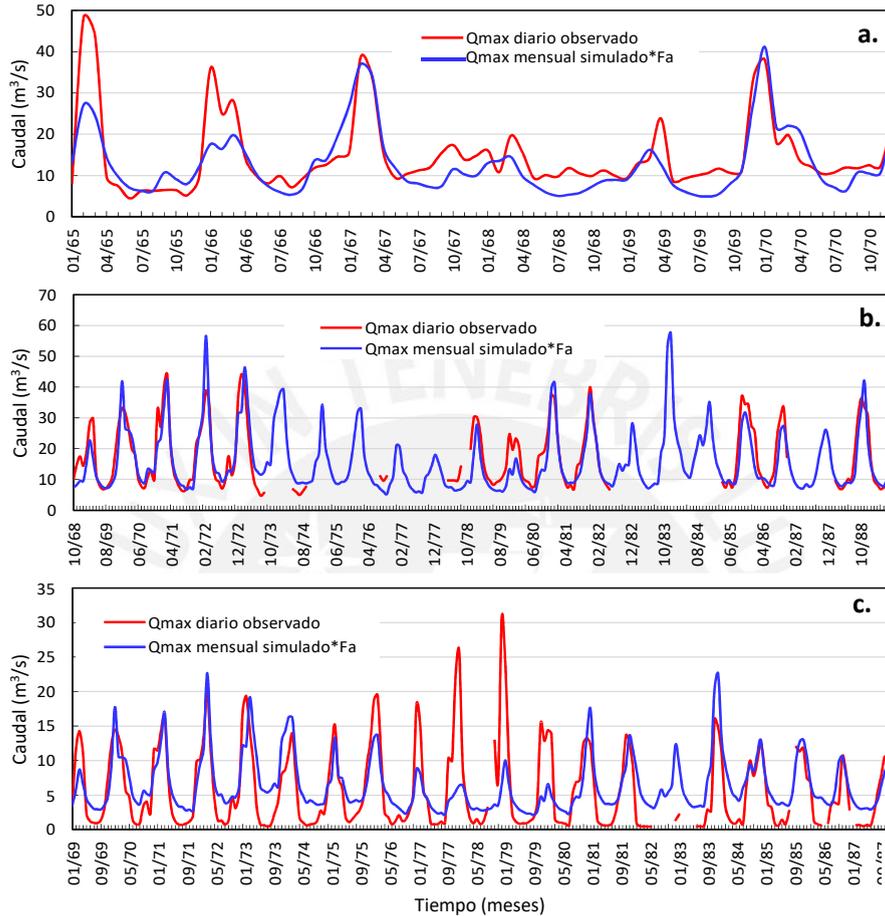


Figura 3.64: Hidrograma de caudales máximos observados frente a caudales mensuales simulados multiplicados por (Fa) - **a.** E. Sheque, **b.** E. San Mateo, **c.** E. Río Blanco. Cuenca Rímac

La corta longitud de las series mostradas serían insuficientes para un análisis de frecuencia de valores extremos con el objetivo de calcular el caudal de diseño de estructuras con altos periodos de retorno (Chereque,1989), sin embargo se verificó con la única estación que cuenta con una longitud de registro más o menos considerable como es la estación Río Blanco con 20 años de registros diarios (Figura3.64c).

Podemos observar, en general, a los periodos húmedos representados correctamente con variaciones promedio menores a 20 % entre los caudales máximos multimensuales simulados y observados, sin embargo para la estación Río Blanco se observa sobreestimaciones mayores al 20 % para el periodo (77-79) (Figura3.64c). Asimismo se observa los periodos de estiaje bien representados en todos los casos con excepción de la estación Río Blanco con sobreestimaciones considerables en todo el periodo de análisis, que podrían ser consecuencia de las regulaciones en cuenca alta que se dan mayormente en periodo de estiaje.

Los caudales máximos anuales observados y simulados para la estación Río Blanco fueron

evaluados para la misma longitud de datos los cuales se ajustaron a la distribución de Gumbel (similar distribución que la estación índice Chosica) (Figura 3.65).

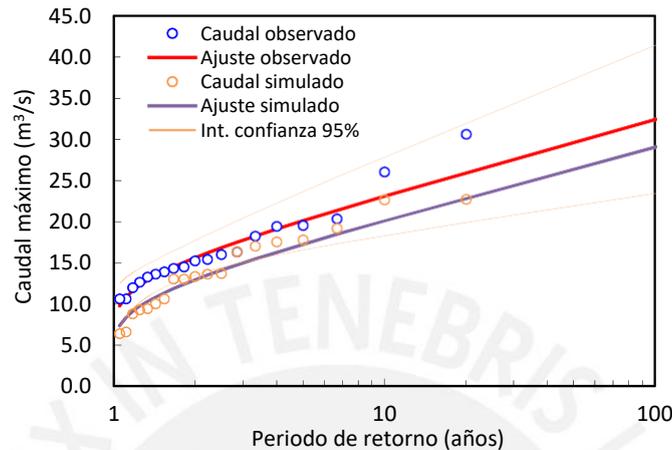


Figura 3.65: Ajuste estadístico de Gumbel, para series observadas y calculadas en la estación Río Blanco, cuenca R' mac

Para este caso el factor (F_a) de la estación Chosica correspondía a 1.75, podemos observar (Figura 3.65), que la tendencia de caudales simulados es similar a la de caudales observados, mientras que el ajuste de los caudales simulados son menores en promedio un 15%. Sin embargo para probabilidades de ocurrencia menores al 25% (mayores a $T=4$ años) muestra que el 95% de las veces los registros simulados definirían a los caudales máximos observados.

3.5.3. Caudales máximos instantáneos

Se tiene escasa o nula información en cuanto a la forma de las crecidas. Se sabe que la información procesada corresponde a valores máximos promedio diario, es decir un promedio de mediciones durante el día. En tanto el diseño de infraestructura hidráulica requiere de caudales máximos instantáneos, por lo tanto es necesaria una transformación de los valores máximos diarios a máximos instantáneos.

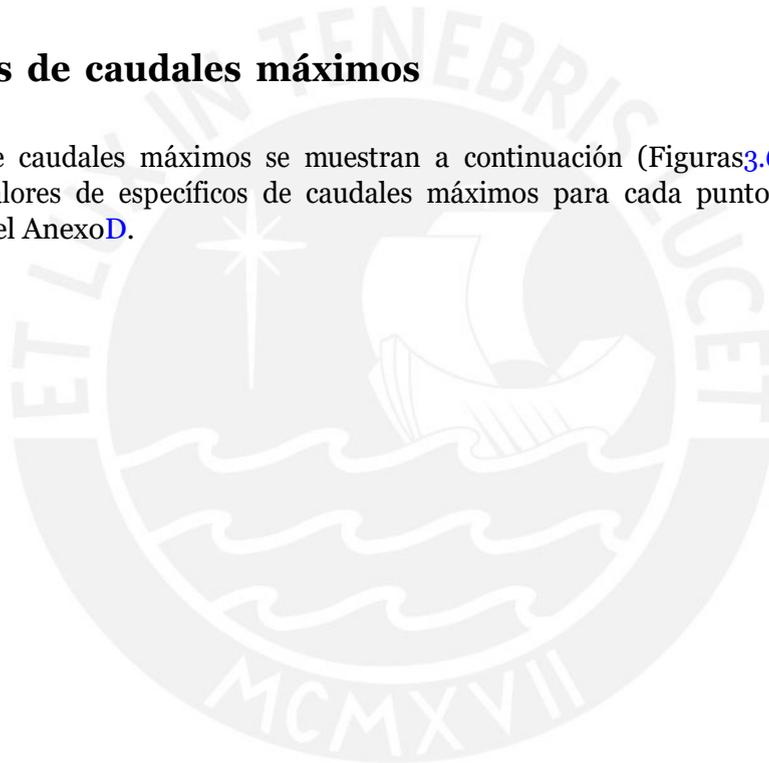
En el estudio hidrológico - meteorológico en la vertiente del pacífico del Perú con fines de evaluación y pronóstico del fenómeno el niño para prevención y mitigación de desastres, impulsado por el Ministerio de Economía y Finanzas (Cadier et al., 1999), se elaboraron curvas envolventes de caudales máximos instantáneos para periodos de retorno de 100, 20 y 10 años. Esta información representa una herramienta para poder evaluar caudales con una relativa confianza y un margen de seguridad de 80%, evaluando datos de caudales máximos históricos y series de caudales instantáneos de la costa del pacífico, por lo que recomiendan los siguientes valores:

Tabla 3.8: Coeficiente caudal pico/caudal diario

Superficie	Valor
Mayor a 3000 km ²	1.2
Entre 1000 y 3000 km ²	1.3
Entre 800 y 1000 km ²	1.4
Entre 600 y 800 km ²	1.6
Entre 400 y 600 km ²	2.0
Entre 400 y 200 km ²	2.5
Menores a 200 km ²	3 - 5

3.6. Mapas de caudales máximos

Los mapas de caudales máximos se muestran a continuación (Figuras 3.66-3.69), así mismo, los valores de específicos de caudales máximos para cada punto de análisis se muestran en el Anexo D.



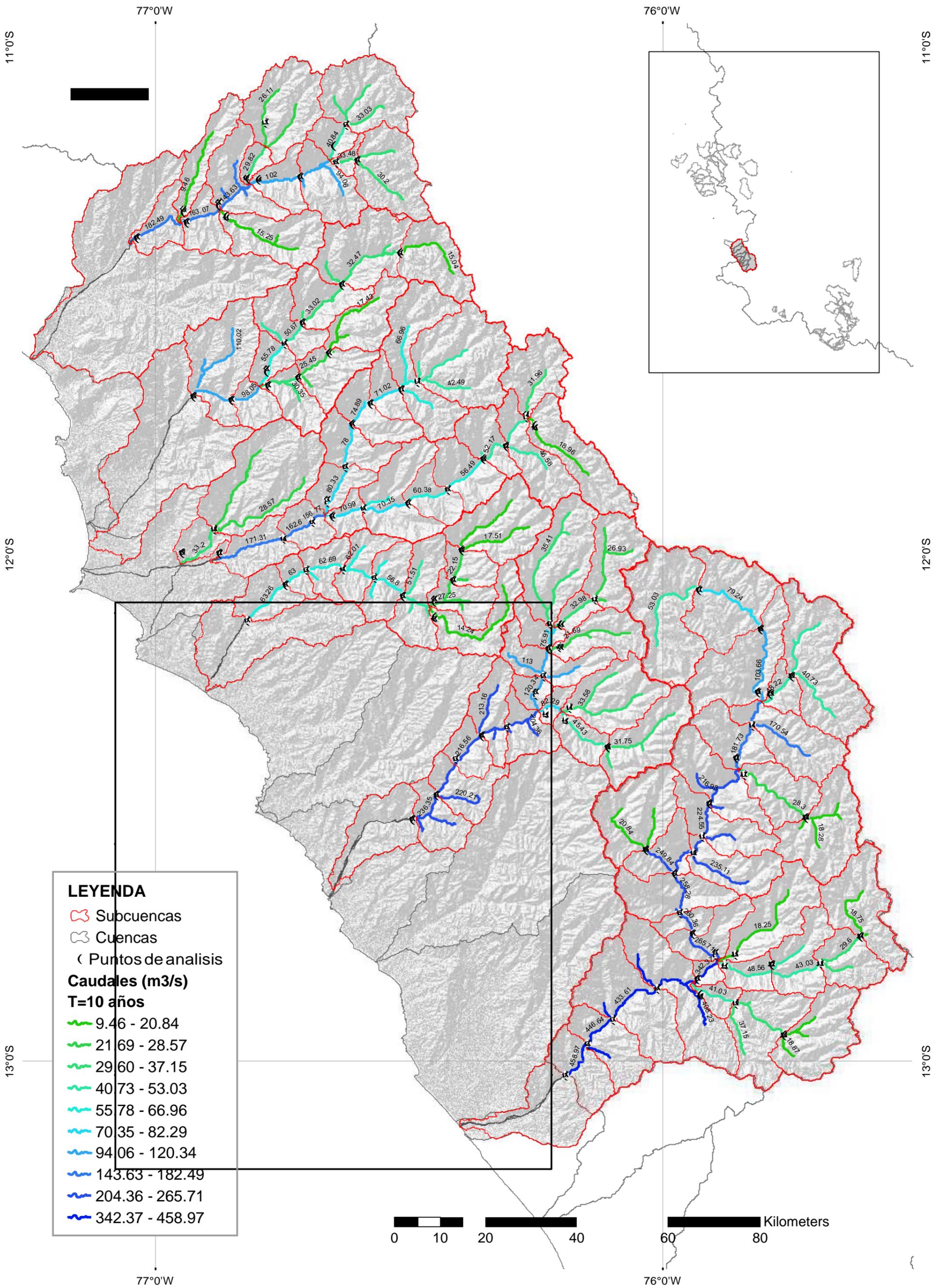


Figura 3.66: Mapa de caudales máximos T=10 años

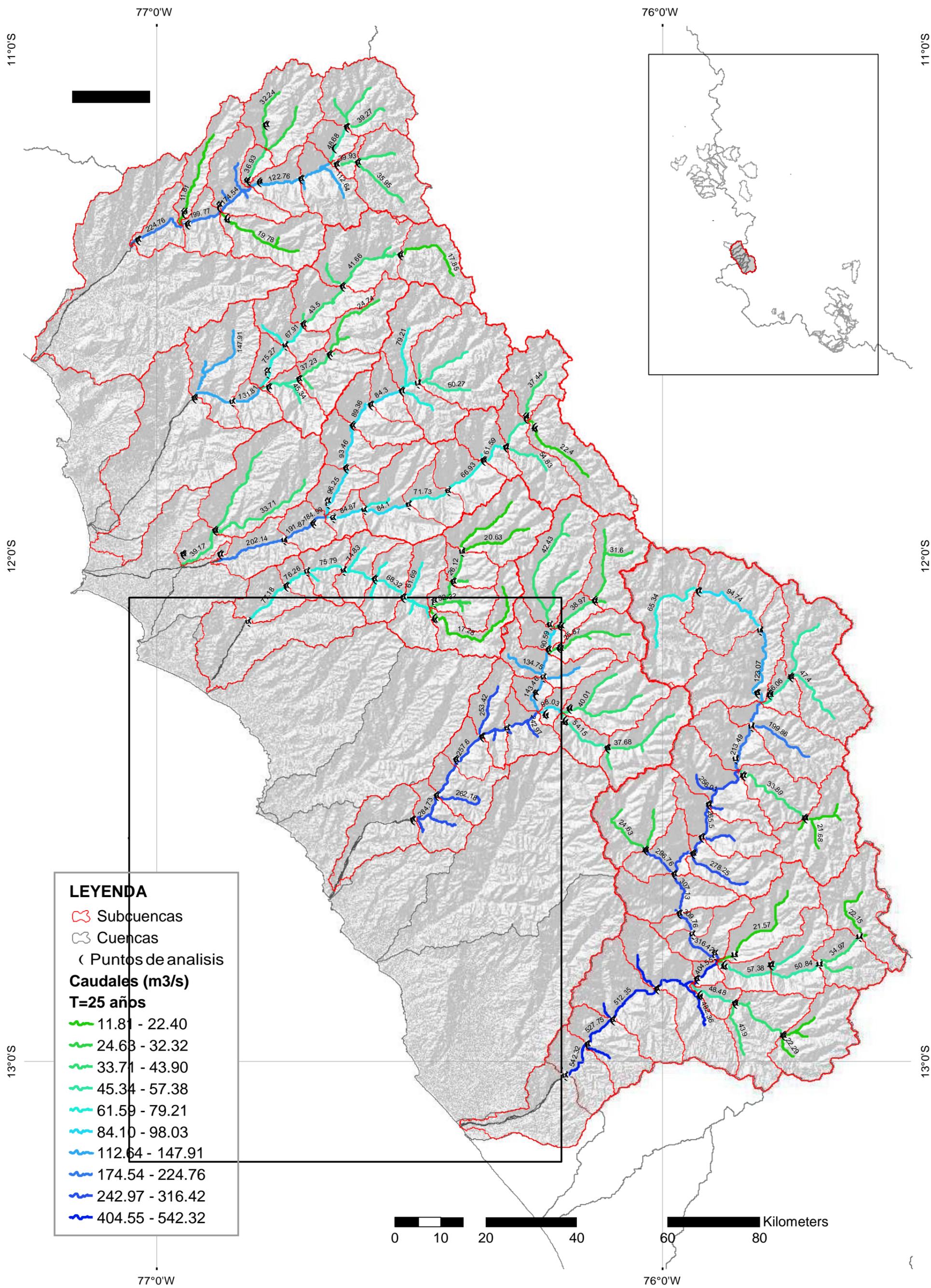


Figura 3.67: Mapa de caudales máximos T=25 años

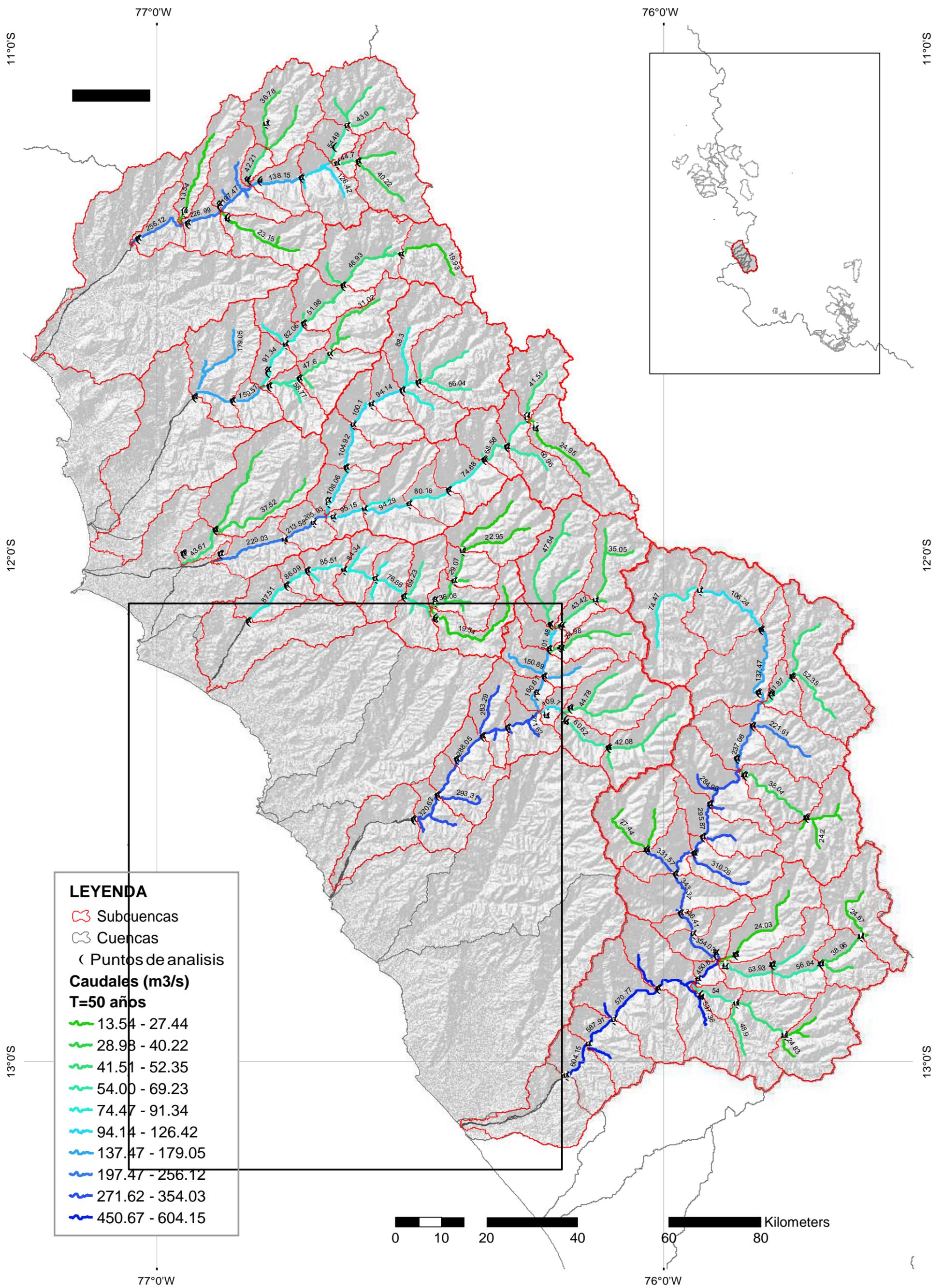


Figura 3.68: Mapa de caudales máximos T=50 años

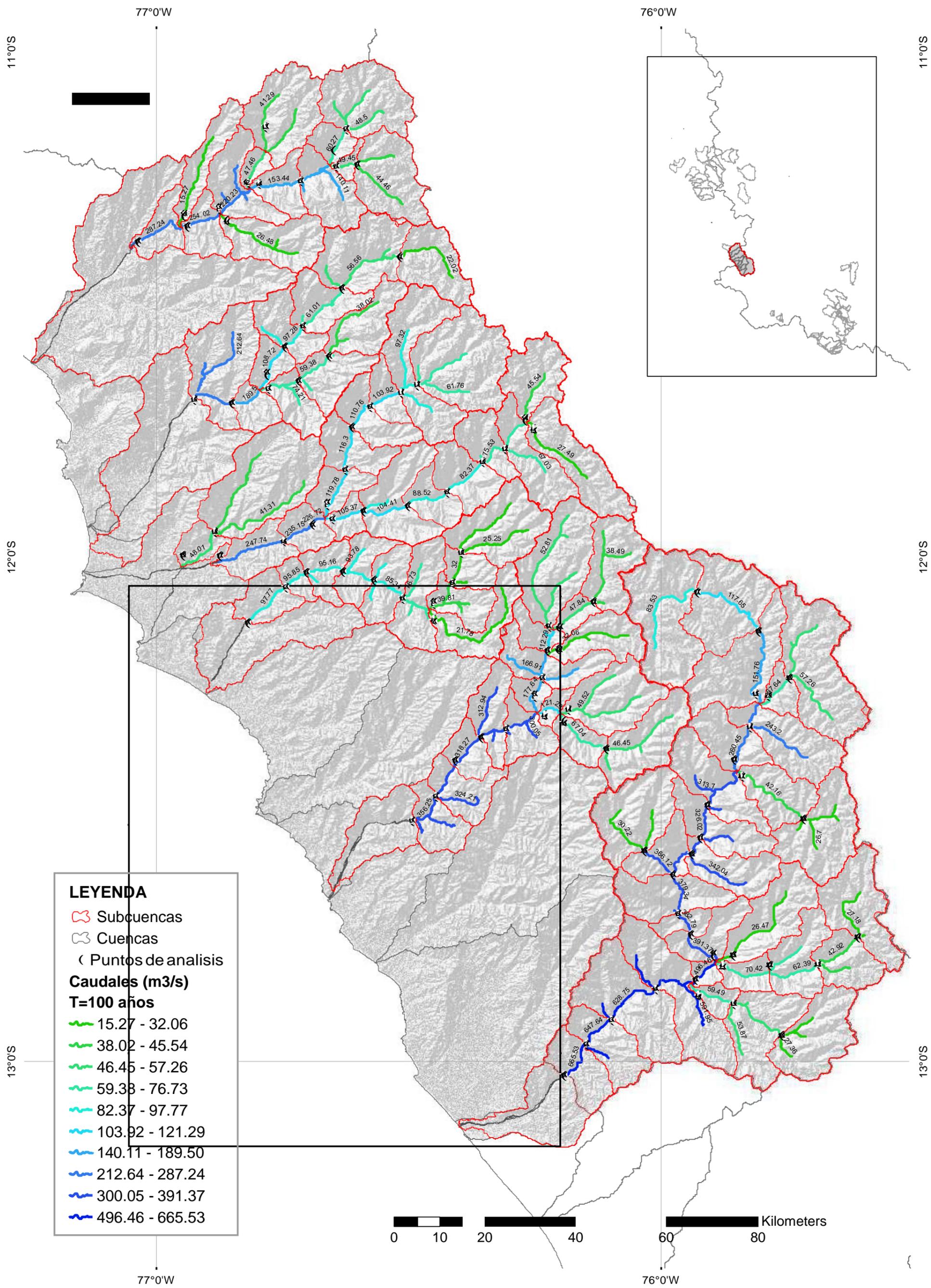


Figura 3.69: Mapa de caudales máximos T=100 años

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Conclusiones

- La evaluación de los registros de estaciones convencionales pluviométricas e hidrométricas mostraron altas correlaciones para el periodo húmedo, esto facilitó la aplicación de métodos adecuados en la verificación de la calidad de la información. Asimismo, permitió realizar satisfactoriamente la optimización de información, simulación de caudales y la estimación de valores extremos.
- Se comprobó que la optimización espacial de registros con información procedente de productos satelitales con estimaciones de precipitación mejora los índices de eficiencia en la adecuación del modelo hidrológico y por ende la capacidad predictiva, esto fue posible para cada caso comparando los datos sin considerar la optimización con los optimizados.
- El análisis del producto TMPA mostró aceptables resultados a escala anual, los cuales se ven disminuidos a escala mensual y una pobre representación a escala diaria. El producto con estimaciones de precipitación satelital CHIRPS mostró un mejor desempeño que el producto TMPA para representar los datos observados a escala mensual, esto fue predecible ya que el producto CHIRPS usa datos observados para sus validaciones, sin embargo, fue necesario su comprobación.
- Los resultados de caudal obtenidos del modelamiento hidrológico en general muestran muy buenas aproximaciones según los estadísticos analizados para todo el periodo de validaciones a escala mensual. Asimismo el análisis específico para los meses de lluvia (EFM) mostró una conservación de las tendencias de sus valores máximos, verificando los elevados valores del coeficiente de correlación (R_{EFM}).
- La evaluación de resultados del modelamiento para la base de datos de evapotranspiración GLDAS mostró un mejor desempeño, comparado con la base de datos MOD16, esto es consecuencia de que la alta resolución espacial del producto MOD16 no sería aplicable para un modelo simple como es el GR2M.
- Se comprobó que la adecuación del modelo hidrológico GR2M es óptima cuando toda la extensión de cuenca aporta al escurrimiento, esto es posible al analizar el

modelo a partir de la cuenca húmeda, por lo tanto los resultados muestran valores razonables para los puntos de análisis al interior de la cuenca húmeda. Por esta razón la estación índice en la cuenca Cañete para fines de modelamiento fue modificada a la estación Chavín la cual mostraba mejor eficiencia en la simulación de caudales.

- La metodología planteada a través del factor de amplificación (Fa) debido al similar comportamiento asintótico de las series máximas diarias y promedio mensuales evaluadas estadísticamente permite estimar caudales máximos satisfactoriamente en subcuencas de menores extensiones no aforadas. La condición para su aplicación es contar con una estación índice ubicada donde toda la extensión de la cuenca aporta al escurrimiento, tal como se da en las cuencas de estudio.
- Los cuantiles de caudales máximos para las cuencas aforadas muestran una similar adecuación a la distribución de Gumbel excepto en la estación Puente Magdalena la cual se asemeja a la distribución Log-Normal. Para cuencas no aforadas solo fue posible comprobar el producto final para la estación Río Blanco con resultados aceptables. Dada las sobreestimaciones y subestimaciones en la etapa de modelamiento se comprobó para las series disponibles que la tendencia de valores máximos diarios y mensuales se conserva, es decir, el coeficiente de variación (CV) de sus series normalizadas no muestran grandes modificaciones.

4.2. Perspectivas y trabajo futuro

La información climática estimada por satélite representa una fuente con potenciales aplicaciones hidrológicas, a medida que se cuente con mayor información terrestre para su validación, esta información puede ser aplicada en la estimación de caudales a través de modelos hidrológicos más sofisticados y a resoluciones óptimas.

La optimización de variables climáticas, principalmente la precipitación, tiene mucho potencial de investigación debido a la relación con el ambiente físico como el suelo, topografía y vegetación, es necesario dejar de lado progresivamente modelos y métodos empíricos (Hrachowitz et al., 2013) y enfocarse en modelos físicos, los cuales están al alcance en mayor medida gracias al desarrollo tecnológico que cada vez hace menos complejo el manejo de bases de datos a mayores escalas espaciales y temporales.

La medición y estimación de caudales extremos es un aspecto fundamental en la ingeniería debido a su aplicación a nivel práctico para el diseño de estructuras hidráulicas y la toma de decisiones en el contexto de la gestión de recursos hídricos, ambientales y manejo de cuencas. Por ello es necesario desarrollar propuestas de estandarización en procesos y procedimientos de cálculo así como pautas de control continuo en el tiempo para la estimación de caudales extremos para cada contexto específico en nuestro país (ubicación, cantidad de información, etc). Esta estandarización permitiría incrementar la calidad y reducir el tiempo de diseño de infraestructura hidráulica.

Anexos

A. Detalle de estaciones pluviométricas

Tabla A.1: Estaciones pluviométricas internas

N°	Estación	Cuenca	Coordenada		Altitud (msnm)	Nro. años
			Longitud	Latitud		
1	Pacaran	Cañete	76° 03' 18"	12° 51' 43"	721	24
2	Huangascar	Cañete	75° 50' 02"	12° 53' 56"	3219	45
3	Yauyos	Cañete	75° 54' 38"	12° 29' 31"	2294	37
4	Huantan	Cañete	75° 49' 01"	12° 27' 01"	3194	22
5	Colonia	Cañete	75° 53' 01"	12° 38' 01"	70	25
6	Vilca	Cañete	75° 49' 35"	12° 06' 54"	3810	43
7	Carania	Cañete	75° 52' 21"	12° 20' 41"	4100	44
8	Tanta	Cañete	76° 01' 01"	12° 07' 01"	4355	44
9	Yauricocha	Cañete	75° 43' 23"	12° 19' 00"	4675	23
10	Huayan	Chancay-Huaral	77° 07' 01"	11° 27' 01"	442	44
11	Carac	Chancay-Huaral	76° 47' 01"	11° 11' 01"	3426	36
12	Pallac	Chancay-Huaral	76° 48' 01"	11° 21' 01"	2570	45
13	Pirca	Chancay-Huaral	76° 39' 01"	11° 14' 01"	3300	43
14	Santa Cruz	Chancay-Huaral	76° 38' 01"	11° 12' 01"	3590	44
15	Arahuay	Chillón	76° 42' 01"	11° 37' 01"	2237	30
16	Canta	Chillón	76° 37' 01"	11° 28' 01"	116	39
17	Huamantanga	Chillón	76° 45' 01"	11° 30' 01"	2700	42
18	Huaros	Chillón	76° 34' 33"	11° 24' 27"	350	45
19	Lachaqui	Chillón	76° 37' 01"	11° 33' 01"	3895	35
20	Pariacancha	Chillón	76° 30' 01"	11° 23' 01"	4146	41
21	Cañete	Int.1375511	76° 19' 51"	13° 04' 30"	2600	35
22	Huarangal	Int.137557	77° 06' 01"	11° 47' 01"	3182	25
23	Manchay Bajo	Lur'in	76° 52' 01"	12° 10' 01"	164	16
24	Antioquia	Lur'in	76° 30' 01"	12° 05' 01"	1839	45
25	Langa	Lur'in	76° 25' 12"	12° 07' 57"	2837	29

Tabla A.1: Estaciones pluviométricas internas - (Continuación)

N°	Estación	Cuenca	Coordenada		Altitud (msnm)	Nro. años
			Longitud	Latitud		
26	Santiago de Tuna	Lurín	76° 31' 01"	11° 59' 01"	2921	44
27	San Lazaro Escom.	Lurín	76° 21' 01"	12° 11' 01"	3600	45
28	Chalilla	Lurín	76° 20' 01"	11° 56' 01"	906	15
29	Calango	Mala	76° 29' 36"	12° 31' 19"	2847	30
30	Huancata	Mala	76° 13' 01"	12° 13' 01"	2533	30
31	Huarochoiri	Mala	76° 14' 01"	12° 08' 01"	3585	40
32	Huañec	Mala	76° 08' 24"	12° 17' 31"	300	44
33	Ayaviri	Mala	76° 08' 01"	12° 23' 01"	3228	40
34	San Pedro de Pilas	Omas	76° 13' 01"	12° 27' 01"	2729	25
35	Hipolito Hunanue	Rímac	77° 04' 00"	12° 04' 00"	3368	21
36	Mod.Campo Marte	Rímac	77° 02' 33"	12° 04' 45"	123	24
37	Von Humboldt	Rímac	76° 55' 18"	12° 03' 01"	510	18
38	Chosica	Rímac	76° 41' 24"	11° 55' 49"	3308	20
39	Santa Eulalia	Rímac	76° 40' 01"	11° 55' 06"	945	43
40	Autisha	Rímac	76° 36' 41"	11° 44' 18"	2690	30
41	Canchacalla	Rímac	76° 31' 54"	11° 50' 42"	2974	22
42	Matucana CEA	Rímac	76° 22' 42"	11° 50' 22"	2431	42
43	Carampoma	Rímac	76° 30' 56"	11° 39' 19"	3875	45
44	Rio Blanco	Rímac	76° 15' 33"	11° 44' 05"	3550	24
45	Sheque	Rímac	76° 29' 56"	11° 40' 01"	3630	21
46	San Jose de Parac	Rímac	76° 15' 30"	11° 48' 03"	3860	35
47	Casapalca	Rímac	76° 14' 01"	11° 38' 54"	3975	21
48	Milloc	Rímac	76° 21' 01"	11° 34' 18"	4361	24
49	Mina Colqui	Rímac	76° 29' 01"	11° 35' 01"	4600	24

Tabla A.2: Estaciones pluviométricas externas

N°	Estación	Cuenca	Coordenada		Altitud (msnm)	Nro. años
			Longitud	Latitud		
1	Lomas De Lachay	Int.137559	77° 22' 01"	11° 22' 01"	300	31
2	Quian	Casma Huarmey	77° 57' 01"	09° 46' 01"	876	18
3	Buena Vista	Casma Huarmey	78° 12' 30"	09° 26' 01"	419	42
4	Punta Culebras	Casma Huarmey	78° 13' 01"	09° 57' 01"	20	21
5	Copara	Grande	74° 53' 27"	14° 58' 30"	586	30
6	Pampa Blanca	Grande	75° 06' 13"	14° 14' 13"	1009	43
7	Chamana	Barranca	77° 33' 31"	10° 12' 27"	1284	27
8	Sj. Castrovirreyna	San Juan	75° 37' 39"	13° 12' 43"	3650	41
9	Paccho	Huaura	76° 56' 01"	10° 57' 01"	3110	44
10	Alcantarilla	Huaura	77° 33' 00"	11° 03' 38"	130	43
11	Camay	Huaura	77° 38' 56"	10° 54' 47"	65	34
12	Paramonga	Huaura	77° 49' 18"	10° 40' 26"	119	30
13	Andahuasi	Huaura	77° 14' 01"	11° 08' 01"	770	27
14	Picoy	Huaura	76° 44' 00"	10° 55' 00"	2990	31
15	Acora	Ica	75° 22' 01"	13° 47' 01"	2114	18
16	Santa Rosa	Int.137559	77° 23' 01"	11° 13' 01"	380	37
17	Cordova	Grande	75° 10' 01"	14° 02' 01"	3170	45
18	Lucanas	Chaparra Acari	74° 13' 12"	14° 37' 12"	3200	44
19	Cerro Condorillo	Chaparra Acari	74° 16' 01"	14° 36' 01"	3256	28
20	Cusicancha	Pisco	75° 17' 47"	13° 30' 14"	3272	42
21	Laramarca	Grande	75° 02' 01"	13° 57' 01"	3350	26
22	Huancalpi	Huancavelica	75° 14' 12"	12° 32' 22"	3450	45
23	Hacienda Bernales	Pisco	75° 57' 59"	13° 44' 28"	305	32
24	Parquin	Huaura	76° 43' 01"	10° 58' 01"	3590	44
25	Huancano	Pisco	75° 37' 16"	13° 36' 04"	1019	32
26	Sj Huirpacancha	Ica	75° 14' 01"	13° 57' 01"	1871	21
27	San Pedro Huac.	San Juan	75° 39' 39"	13° 03' 03"	3740	27
28	San Juan de Jarpa	Mantaro	75° 25' 01"	12° 02' 01"	3920	30
29	Pachamachay	Huaura	76° 50' 01"	11° 03' 01"	4385	22
30	Marcapomacocha	Mantaro	76° 19' 31"	11° 24' 16"	4443	42
31	Fonagro (Chincha)	San Juan	76° 08' 08"	13° 28' 28"	60	20
32	San Juan de Yanac	San Juan	75° 47' 47"	13° 13' 13"	2540	23
33	Huachos	San Juan	75° 32' 00"	13° 13' 14"	2756	29
34	Yantac	Mantaro	76° 24' 01"	11° 20' 01"	4684	41
35	San Cristobal	Mantaro	76° 03' 00"	11° 44' 00"	4700	30

B. Detalle de estaciones Hidrométricas

Tabla B.1: Estaciones Hidrométricas

N°	Estacion	Cuenca	Coordenada		Altitud (msnm)	Fuente
			Longitud	Latitud		
1	La Capilla	Mala	76° 29' 47"	12° 31' 19"	412	SENAMHI
2	Manchay	Lur'ín	76° 49' 46"	12° 08' 31"	229	SENAMHI
3	San Damian	Lur'ín	76° 24' 01"	12° 01' 01"	2842	SENAMHI
4	Antapucro	Lur'ín	76° 38' 00"	12° 02' 00"	1300	SENAMHI
5	Chosica	R'ímac	76° 41' 23"	11° 55' 48"	863	SENAMHI
6	Sheque	R'ímac	76° 29' 55"	11° 39' 30"	3214	SENAMHI
7	Milloc	R'ímac	76° 21' 00"	11° 34' 00"	4320	SENAMHI
8	Pte. los Angeles	R'ímac	76° 45' 00"	11° 58' 00"	850	SENAMHI
9	Rio Blanco	R'ímac	76° 15' 32"	11° 44' 04"	3550	SENAMHI
10	San Mateo	R'ímac	76° 18' 04"	11° 45' 37"	3182	SENAMHI
11	Pte. Huachipa	R'ímac	76° 53' 40"	12° 00' 46"	391	SENAMHI
12	Pte. Magdalena	Chillón	76° 51' 14"	11° 41' 41"	956	SENAMHI
13	Pariacancha	Chillón	76° 31' 00"	11° 23' 35"	3800	SENAMHI
14	Obrajillo	Chillón	76° 37' 20"	11° 27' 11"	2724	SENAMHI
15	Larancocha	Chillón	76° 48' 01"	11° 41' 01"	1290	SENAMHI
16	Sto. Domingo	Chancay-Huaral	77° 01' 42"	11° 22' 12"	629	SENAMHI
17	Socsi	Cañete	76° 11' 40"	13° 01' 42"	312	SENAMHI
18	Chavin	Cañete	75° 56' 48"	12° 44' 48"	1350	ELECTROPERU
19	Tinco de Alis	Cañete	75° 48' 16"	12° 17' 10"	3350	ELECTROPERU
20	Aguas Calientes	Cañete	75° 57' 06"	12° 04' 55"	4180	ELECTROPERU
21	Tanta	Cañete	76° 00' 41"	12° 06' 53"	4278	ELECTROPERU
22	Tomas	Cañete	75° 44' 37"	12° 13' 02"	3542	ELECTROPERU
23	Tamboraque	R'ímac	76° 19' 00"	11° 46' 00"	3200	EDEGEL
24	Sheque	R'ímac	76° 31' 00"	11° 40' 00"	3100	EDEGEL
25	T. Trasandino	R'ímac	76° 20' 00"	11° 33' 00"	4650	EDEGEL

Tabla B.2: Estudios con información hidrométrica y pluviométrica recopilada

Nro	Cuenca	Año	Referencia
1	Chancay - Huaral	2011	ANA(2011)
2	Chancay - Huaral	2001	INRENA(2001)
3	Chancay - Huaral	1999	INRENA(1999a)
4	Chancay - Huaral	1998	INRENA(1998b)
5	Chillon	2003	INRENA(2003)
6	Chillon	1999	INRENA(1999b)
7	Chillon	1998	INRENA(1998a)
8	Rimac	2010	ANA(2010)
11	Lurin	1999	INRENA(1999c)
12	Lurin	1998	INRENA(1999c)
13	Mala	2007	INRENA(2007)
14	Mala	1999	INRENA(1999d)
15	Mala-Omas-Chilca	2015	ANA(2015a)
16	Cañete	2000	INRENA(2000)
17	Cañete	1998	INRENA(1998c)
18	Cañete - Rimac	2001	NIPPON(2001)

C. Resultados - Análisis Pluviométrico

Tabla C.1: Resumen de parámetros estadísticos básicos para el periodo 1965-2010

N°	Estación	Máximo diario mensual (mm)			Acumulado mensual (mm)				Acumulado anual (mm)			
		Media	Máximo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Desviación Estándar	Vacíos		Media	Máximo	Desviación Estándar
								Nro.	%			
1	Hipolito Hunanue	0.43	16.00	1.24	0.74	16.30	1.64	342	61.96	22.75	29.10	8.98
2	Cañete	0.64	19.50	1.47	1.25	23.50	2.19	157	28.44	10.04	25.90	8.05
3	Mod. Campo Marte	2.83	617.00	38.46	3.34	617.20	38.46	295	53.44	53.05	632.20	160.25
4	Manchay Bajo	0.83	16.50	1.50	2.18	28.10	3.94	367	66.49	25.19	54.30	13.86
5	Huarangal	0.47	26.00	2.17	0.90	29.60	3.46	280	50.72	5.83	40.80	12.26
6	Huayan	0.71	36.70	2.38	1.29	39.70	3.18	95	17.21	22.38	62.40	15.72
7	Calango	0.16	4.30	0.59	0.27	12.10	1.15	241	43.66	3.57	17.50	5.49
8	Von Humboldt	0.54	4.60	0.77	1.14	8.49	1.38	354	64.13	14.23	28.30	9.53
9	Pacaran	0.78	20.30	1.93	1.47	30.50	3.81	202	36.59	26.38	41.10	12.59
10	Chosica	1.12	30.70	2.84	1.94	30.70	4.44	353	63.95	22.20	44.00	12.11
11	Santa Eulalia	1.70	30.80	4.39	4.06	110.10	12.36	54	9.78	47.91	162.70	43.61
12	Antioquia	2.28	50.60	5.41	6.39	178.20	17.44	28	5.07	79.66	272.60	57.37
13	Arahuay	5.75	46.50	7.70	27.08	276.30	43.62	203	36.78	326.00	578.20	104.37
14	Yauyos	6.35	33.00	6.96	29.50	295.30	43.90	166	30.07	335.60	597.90	132.48
15	Matucana CEA	5.55	35.20	6.59	24.50	196.80	34.99	70	12.68	296.40	618.40	96.97
16	Huangascar	4.95	70.50	8.00	22.15	366.30	42.96	27	4.89	272.60	647.10	145.65
17	Pallac	5.23	94.10	8.57	22.90	290.20	41.34	21	3.80	268.00	487.60	96.04
18	Carac	6.67	46.80	7.50	31.43	261.30	45.06	131	23.73	374.70	584.90	118.89
19	Autisha	3.96	30.80	5.67	16.91	185.60	29.46	191	34.60	209.60	440.20	96.49
20	San Pedro de Pilas	4.92	44.00	7.12	20.50	166.00	34.29	256	46.38	239.20	434.70	110.22
21	Langa	5.20	46.90	8.00	24.15	411.80	43.75	210	38.04	286.50	730.70	148.70
22	Canchacalla	4.92	46.70	7.44	25.20	341.20	46.34	295	53.44	264.60	550.30	124.66
23	Santiago de Tuna	5.97	33.50	7.07	31.21	297.20	48.71	137	24.82	458.00	836.70	161.54
24	Canta	6.66	89.90	11.16	27.50	345.00	52.33	38	6.88	333.30	726.10	166.94

Tabla C.1: Resumen de parámetros estadísticos básicos para el periodo 1965-2010 - (Continuación)

N°	Estación	Máximo diario mensual (mm)			Acumulado mensual (mm)					Acumulado anual (mm)		
		Media	Máximo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Desviación Estándar	Vacíos		Media	Máximo	Desviación Estándar
							Nro.	%				
25	Huarochiri	5.94	38.60	7.23	33.68	341.10	55.25	128	23.19	402.40	963.20	250.41
26	Huañec	3.09	23.80	4.71	20.51	233.90	38.86	31	5.62	241.00	687.30	172.17
27	Huantan	9.53	55.70	11.79	69.43	699.30	123.30	320	57.97	699.00	1474.00	443.98
28	Ayaviri	8.09	46.20	9.98	45.58	412.20	69.12	92	16.67	532.20	1216.00	228.01
29	Pirca	6.92	43.80	7.16	50.17	366.00	72.58	47	8.51	604.30	1128.00	234.34
30	Huamantanga	6.12	47.50	7.70	32.12	326.10	48.66	167	30.25	366.70	687.00	151.56
31	Carampoma	7.50	33.30	7.67	34.08	210.60	45.38	65	11.78	409.40	748.80	146.01
32	Rio Blanco	7.99	53.00	7.30	42.48	223.90	51.18	277	50.18	481.30	787.40	199.57
33	Santa Cruz	9.24	42.40	7.95	47.65	257.00	54.25	47	8.51	579.20	953.30	146.02
34	Sheque	6.36	24.40	6.06	41.36	280.80	52.88	326	59.06	475.40	866.70	180.09
35	Huaros	7.40	44.40	7.72	38.95	305.80	53.91	20	3.62	441.90	1250.00	207.52
36	Vilca	11.13	55.00	9.60	75.92	597.10	92.91	20	3.62	913.50	3064.00	504.32
37	San Lazaro	7.34	74.00	10.04	39.41	533.50	60.15	47	8.51	482.60	1175.00	206.06
38	San Jose de Parac	9.11	42.00	7.45	51.19	293.30	55.18	170	30.80	582.40	1000.00	174.89
39	Carania	8.18	44.30	6.57	48.87	268.10	59.34	51	9.24	583.60	1033.00	194.59
40	Huancata	5.53	40.30	7.22	31.60	249.60	50.39	202	36.59	384.60	645.30	153.80
41	Lachaqui	8.48	65.00	9.30	50.17	573.70	74.25	202	36.59	549.10	911.50	222.20
42	Chalilla	6.91	39.10	9.34	32.92	255.60	53.15	437	79.17	429.60	725.10	202.19
43	Casapalca	9.50	44.00	7.09	54.06	201.10	50.90	303	54.89	631.90	833.60	151.90
44	Pariacancha	11.18	46.20	8.16	58.99	255.90	57.02	64	11.59	696.50	1067.00	145.28
45	Tanta	11.16	69.20	8.46	74.19	354.90	75.67	33	5.98	874.70	1461.00	293.49
46	Milloc	13.76	54.40	9.76	75.42	378.70	72.35	277	50.18	869.80	1370.00	241.01
47	Mina Colqui	8.17	36.70	6.23	60.05	255.70	63.31	260	47.10	696.00	1098.00	196.92
48	Yauricocha	13.61	60.40	9.30	85.58	335.50	74.24	281	50.91	976.80	1271.00	158.40

Tabla C.2: Resumen valores completados diarios para el periodo 1965-2010

N°	Estación	Elevacion (msnm)	Precipitación diaria (mm)					Precipitación diaria completada (mm)					
			Media	Desviación Estándar	Coef. Variación	Vacíos		Media	Desviación Estándar	Coef. Variación	Vacíos		Días completados
						Nro.	%				Nro.	%	
1	Hipolito Hunanue	70	0.02	0.24	9.86	9226	54.91	0.02	0.24	9.83	9176	54.62	50
2	Cañete	116	0.04	0.31	7.55	3919	23.33	0.04	0.31	7.55	3890	23.15	29
3	Mod. Campo Marte	123	0.10	6.61	65.42	8081	48.10	0.10	6.60	65.47	8048	47.90	33
4	Manchay Bajo	164	0.07	0.36	5.04	11116	66.16	0.07	0.36	5.04	11115	66.16	1
5	Huarangal	300	0.03	0.43	14.15	7620	45.35	0.03	0.43	14.12	7588	45.16	32
6	Huayan	350	0.04	0.45	10.72	689	4.10	0.04	0.45	10.70	600	3.57	89
7	Calango	442	0.01	0.14	14.53	6007	35.75	0.01	0.14	14.47	5959	35.47	48
8	Von Humboldt	510	0.04	0.23	6.05	10161	60.48	0.04	0.23	6.04	10138	60.34	23
9	Pacaran	721	0.05	0.41	9.05	3405	20.27	0.05	0.41	9.05	3308	19.69	97
10	Chosica	906	0.06	0.59	9.24	9595	57.11	0.06	0.59	9.21	9556	56.88	39
11	Santa Eulalia	945	0.13	1.08	8.27	1087	6.47	0.13	1.08	8.27	1066	6.34	21
12	Antioquia	1839	0.21	1.38	6.66	441	2.62	0.21	1.38	6.66	426	2.54	15
13	Arahuay	2237	0.88	2.66	3.00	5804	34.55	0.88	2.66	3.00	5792	34.47	12
14	Yauyos	2294	0.95	2.69	2.82	3372	20.07	0.95	2.68	2.81	3310	19.70	62
15	Matucana CEA	2431	0.81	2.36	2.91	1467	8.73	0.81	2.36	2.91	1442	8.58	25
16	Huangascar	2533	0.73	2.66	3.62	500	2.98	0.73	2.66	3.61	489	2.91	11
17	Pallac	2570	0.76	2.67	3.53	347	2.07	0.76	2.67	3.53	337	2.01	10
18	Carac	2600	1.03	2.82	2.74	3772	22.45	1.03	2.82	2.74	3765	22.41	7
19	Autisha	2690	0.56	1.88	3.38	5805	34.55	0.56	1.88	3.38	5805	34.55	0
20	San Pedro de Pilas	2729	0.67	2.29	3.44	7526	44.79	0.67	2.29	3.44	7517	44.74	9
21	Langa	2837	0.78	2.62	3.36	6040	35.95	0.78	2.62	3.36	6028	35.88	12
22	Canchacalla	2847	0.83	2.67	3.23	8604	51.21	0.83	2.67	3.23	8592	51.14	12
23	Santiago de Tuna	2921	1.03	2.80	2.72	2461	14.65	1.03	2.79	2.71	2405	14.31	56
24	Canta	2974	0.89	3.41	3.82	637	3.79	0.89	3.41	3.82	618	3.68	19

Tabla C.2: Resumen valores completados diarios para el periodo 1965-2010 - (Continuación)

N°	Estación	Elevacion (msnm)	Precipitación diaria (mm)					Precipitación diaria completada (mm)					
			Media	Desviación Estándar	Coef. Variación	Vacíos		Media	Desviación Estándar	Coef. Variación	Vacíos		Días completados
						Nro.	%				Nro.	%	
25	Huarochiri	3182	1.18	3.14	2.65	2252	13.40	1.19	3.14	2.65	2192	13.05	60
26	Huañec	3194	0.68	1.96	2.88	621	3.70	0.68	1.96	2.88	609	3.62	12
27	Huantan	3219	2.69	6.50	2.41	8685	51.69	2.70	6.51	2.41	8649	51.48	36
28	Ayaviri	3228	1.53	3.79	2.48	2247	13.37	1.53	3.79	2.48	2230	13.27	17
29	Pirca	3300	1.65	3.47	2.11	1165	6.93	1.65	3.46	2.11	1156	6.88	9
30	Huamantanga	3368	0.99	2.67	2.68	1527	9.09	0.99	2.66	2.68	1403	8.35	124
31	Carampoma	3426	1.12	3.01	2.69	589	3.51	1.12	3.00	2.68	542	3.23	47
32	Río Blanco	3550	1.40	3.17	2.26	7954	47.34	1.40	3.17	2.26	7939	47.25	15
33	Santa Cruz	3590	1.57	3.46	2.20	792	4.71	1.57	3.45	2.19	768	4.57	24
34	Sheque	3630	1.31	2.82	2.15	9019	53.68	1.31	2.81	2.15	8986	53.48	33
35	Huaros	3585	1.28	3.22	2.52	316	1.88	1.28	3.22	2.52	306	1.82	10
36	Vilca	3810	2.50	5.01	2.01	611	3.64	2.51	4.33	1.73	946	5.63	0
37	San Lazaro	3600	1.31	3.56	2.72	371	2.21	1.31	3.56	2.71	335	1.99	36
38	San Jose de Parac	3860	1.66	3.43	2.06	4230	25.18	1.66	3.43	2.06	4196	24.97	34
39	Carania	3875	1.63	3.43	2.11	601	3.58	1.63	3.43	2.11	569	3.39	32
40	Huancata	2700	1.03	2.79	2.71	5854	34.84	1.03	2.79	2.71	5844	34.78	10
41	Lachaqui	3895	1.85	4.37	2.36	3989	23.74	1.86	4.36	2.34	3916	23.31	73
42	Chalilla	3975	1.08	3.31	3.07	11331	67.44	1.08	3.29	3.06	11264	67.04	67
43	Casapalca	4100	1.77	3.28	1.86	8973	53.41	1.77	3.28	1.85	8965	53.36	8
44	Pariacancha	4146	1.94	3.86	1.99	1655	9.85	1.94	3.86	1.99	1644	9.79	11
45	Tanta	4355	2.47	4.43	1.79	680	4.05	2.47	4.43	1.79	669	3.98	11
46	Milloc	4361	2.48	4.69	1.89	8137	48.43	2.48	4.68	1.89	8127	48.37	10
47	Mina Colqui	4600	1.98	3.40	1.72	7886	46.94	1.98	3.40	1.72	7885	46.93	1
48	Yauricocha	4675	2.82	4.68	1.66	8317	49.50	2.82	4.68	1.66	8309	49.46	8

D. Cuantiles de caudales máximos

Tabla D.1: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Chancay-Huaral

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	98.51	149.04	182.49	224.76	256.12	287.24
2	90.15	134.02	163.07	199.77	226.99	254.02
3	82.21	119.16	143.63	174.54	197.47	220.23
4	60.76	85.57	102.00	122.76	138.15	153.44
5	57.14	79.35	94.06	112.64	126.42	140.11
6	25.26	34.63	40.84	48.68	54.49	60.27
7	20.64	28.10	33.03	39.27	43.90	48.50
8	20.69	28.39	33.48	39.93	44.70	49.45
9	18.77	25.65	30.20	35.95	40.22	44.46
10	4.81	7.61	9.46	11.81	13.54	15.27
11	6.25	11.67	15.25	19.78	23.15	26.48
12	15.68	24.18	29.82	36.93	42.21	47.46
13	13.95	21.27	26.11	32.24	36.78	41.29

Tabla D.2: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Chillón

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	43.70	74.30	98.05	131.81	159.57	189.50
2	24.60	42.11	55.78	75.27	91.34	108.72
3	10.14	20.83	30.35	45.34	58.77	74.21
4	22.77	38.5	50.67	67.91	82.06	97.28
5	9.00	17.82	25.45	37.23	47.60	59.38
6	19.78	32.42	41.99	55.31	66.09	77.57
7	6.70	12.55	17.43	24.74	31.02	38.02
8	16.44	25.70	32.47	41.66	48.93	56.56
9	9.43	12.81	15.04	17.85	19.93	22.02
10	49.04	83.37	110.02	147.91	179.05	212.64

Tabla D.3: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Rimac

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	100.69	134.43	156.77	184.99	205.93	226.72
2	43.44	60.02	70.99	84.87	95.15	105.37
3	48.70	67.74	80.33	96.25	108.06	119.78
4	43.05	59.48	70.35	84.1	94.29	104.41
5	47.29	65.77	78.00	93.46	104.92	116.30
6	37.81	51.39	60.38	71.73	80.16	88.52
7	46.14	63.44	74.89	89.36	100.1	110.76
8	35.75	48.23	56.49	66.93	74.68	82.37
9	44.65	60.52	71.02	84.3	94.14	103.92
10	33.44	44.71	52.17	61.59	68.58	75.53
11	42.62	57.26	66.96	79.21	88.3	97.32
12	30.18	40.05	46.58	54.83	60.96	67.03
13	27.04	36.34	42.49	50.27	56.04	61.76
14	21.07	27.62	31.96	37.44	41.51	45.54
15	12.12	16.23	18.96	22.40	24.95	27.49
16	104.43	139.43	162.6	191.87	213.58	235.15
17	110.03	146.90	171.31	202.14	225.03	247.74
18	18.35	24.50	28.57	33.71	37.52	41.31
19	21.32	28.47	33.20	39.17	43.61	48.01

Tabla D.4: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Lurín

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	35.60	52.24	63.26	77.18	87.51	97.77
2	36.70	52.51	63.00	76.26	86.09	95.85
3	36.67	52.33	62.69	75.79	85.51	95.16
4	36.53	51.86	62.01	74.83	84.34	93.78
5	33.93	47.69	56.80	68.32	76.86	85.34
6	31.29	43.46	51.51	61.69	69.23	76.73
7	8.20	11.84	14.24	17.28	19.54	21.78
8	17.18	23.24	27.25	32.32	36.08	39.81
9	14.26	19.01	22.15	26.12	29.07	32.00
10	11.29	15.03	17.51	20.63	22.95	25.25

Tabla D.5: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Mala

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	140.23	198.06	236.35	284.73	320.62	356.25
2	136.84	187.00	220.21	262.18	293.31	324.21
3	135.01	184.07	216.56	257.60	288.05	318.27
4	133.16	181.29	213.16	253.42	283.29	312.94
5	127.65	173.80	204.36	242.97	271.62	300.05
6	74.39	102.03	120.34	143.46	160.61	177.64
7	69.79	95.79	113.00	134.75	150.89	166.91
8	46.75	64.30	75.91	90.59	101.48	112.29
9	21.46	29.85	35.41	42.43	47.64	52.81
10	13.37	18.37	21.69	25.87	28.98	32.06
11	21.06	28.23	32.98	38.97	43.42	47.84
12	17.67	23.25	26.93	31.60	35.05	38.49
13	51.01	69.83	82.29	98.03	109.70	121.29
14	20.81	28.49	33.58	40.01	44.78	49.52
15	28.11	38.53	45.43	54.15	60.62	67.04
16	19.96	27.05	31.75	37.68	42.08	46.45

Tabla D.6: Cuantiles de caudales máximos estimados - Cuenca Cañete

Punto	Periodo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
1	293.36	393.00	458.97	542.32	604.15	665.53
2	285.48	382.44	446.64	527.75	587.91	647.64
3	277.15	371.28	433.61	512.35	570.77	628.75
4	260.93	349.55	408.23	482.36	537.36	591.95
5	218.83	293.16	342.37	404.55	450.67	496.46
6	164.97	225.58	265.71	316.42	354.03	391.37
7	162.21	221.26	260.36	309.76	346.41	382.79
8	161.23	219.62	258.28	307.13	343.37	379.34
9	156.62	212.71	249.84	296.76	331.57	366.12
10	149.38	200.96	235.11	278.25	310.26	342.04
11	143.20	192.14	224.55	265.50	295.87	326.02
12	139.44	186.09	216.98	256.01	284.96	313.70
13	118.62	156.59	181.73	213.49	237.06	260.45
14	112.30	147.34	170.54	199.86	221.61	243.20
15	65.10	88.30	103.66	123.07	137.47	151.76
16	48.45	66.98	79.24	94.74	106.24	117.65
17	28.57	43.28	53.03	65.34	74.47	83.53
18	26.22	35.13	41.03	48.48	54.00	59.49
19	23.74	31.81	37.15	43.90	48.90	53.87
20	12.06	16.15	18.87	22.29	24.83	27.36
21	31.04	41.58	48.56	57.38	63.93	70.42
22	27.50	36.84	43.03	50.84	56.64	62.39
23	18.92	25.34	29.60	34.97	38.96	42.92
24	11.98	16.05	18.75	22.15	24.67	27.18
25	11.67	15.63	18.25	21.57	24.03	26.47
26	13.32	17.85	20.84	24.63	27.44	30.22
27	17.19	23.88	28.30	33.89	38.04	42.16
28	11.54	15.60	18.28	21.68	24.20	26.70
29	32.66	42.02	48.22	56.06	61.87	67.64
30	27.48	35.45	40.73	47.40	52.35	57.26

Bibliografía

- ANA (2010). Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río rímac. Technical report, Autoridad Nacional del Agua.
- ANA (2011). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río chancay-huaral. Technical report, Autoridad Nacional del Agua.
- ANA (2015a). Evaluación de recursos hídricos en las cuencas mala, omas y chilca. Technical report, Autoridad Nacional del Agua.
- ANA (2015b). Inventario de presas en el Perú. Technical report, Autoridad Nacional del Agua.
- Apacla, R. (2010). Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico. Technical report, ANA.
- Archfield, S. A. and Vogel, R. M. (2010). Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments. *Water Resources Research*, 46(10).
- Astorayme, M. Á. (2017). Configuración de modelos climáticos, hidrológicos e hidráulicos en la cuenca del río rímac, Perú.
- Bacchi, B., Brath, A., and Kottegoda, N. T. (1992). Analysis of the relationships between flood peaks and flood volumes based on crossing properties of river flow processes. *Water Resources Research*, 28(10):2773–2782.
- Brunet-Moret, Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 16(3-4):147–170.
- Cabrera, J. (2012). *Modelos agregados: GR2M*, volume Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil. Lima.
- Cadier, E., Raymond, M., Pouyaud, B., Bozzi, Y., Doron, M., Simon, A., Benites, J., Carrion, D., Cueva, L., and Chavez, M. (1999). El estudio hidrológico - meteorológico en la vertiente del Pacífico del Perú con fines de evaluación y pronóstico del fenómeno El Niño para prevención y mitigación de desastres. Technical report, Ministerio de Economía y Finanzas.

- Casimiro, W. S. L., Labat, D., and Guyot, J. L. (2009). Validación de lluvia utilizando trmm en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico. validation of rainfall using the trmm for two peruvian amazon basins and its inclusion in monthly water balance models. *Revista Peruana Geo-Atmosférica Rpga (1)*, pages 11–19.
- CEDEX (2011). Mapa de caudales máximos. Technical report, Centro de estudios y experimentación de obras públicas.
- Chávez, A. et al. (2014). Aplicación del método de regionalización para la determinación de caudales en el puente carrasquillo.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial.
- Chávez, R. (1994). *Hidrología para Ingenieros*. PUCP - Fondo Editorial.
- ELEAF, F. t. w. (2015). Sensores remotos y bases de datos meteorológicas para seguros climáticos paramétricos-evaluación para américa latina. Technical report, Climate Insurance Fund.
- Emerson, D. G., Vecchia, A. V., and Dahl, A. L. (2005). Evaluation of drainage-area ratio method used to estimate streamflow for the red river of the north basin, north dakota and minnesota. Technical report.
- Espinoza, J. C., Vauchel, P., and Ronchail, J. (2005). El método del vector regional de Índices pluviométricos - manual escrito con motivo del curso taller: Utilización del método del vector regional con hydraccess. senamhi-perú. Technical report, SENAMHI.
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O., and Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(1):47–63.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2:150066.
- Gómez, M. S. (2007). Spatial and temporal rainfall gauge data analysis and validation with trmm microwave radiometer surface rainfall retrievals. ITC.
- Hernández, D. C., Ramírez, G. D., González, M. R., Caciano, R. T., and Avalos, J. E. (2013). Ajuste y validación del modelo hidrológico gr2m en la cuenca alta del río nazas. *Agrofaz*, 13(2).
- Hidalgo (2014). Estudio de tendencias en cuencas hidrográficas del Perú. Master's thesis, Lima.
- Hiez, G. (1977). L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, 14(02):29–173.

- Hossain, F. (14 de octubre del 2015). Data for all: Using satellite observations for social good. <https://eos.org/opinions/data-for-all-using-satellite-observations-for-social-good>.
- Hrachowitz, M., Savenije, H., Blöschl, G., McDonnell, J., Sivapalan, M., Pomeroy, J., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M., Ehret, U., et al. (2013). A decade of predictions in ungauged basins. *Hydrolog. Sci. J., online first, doi*, 10(02626667.2013):1198–1254.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., and Stocker, E. F. (2007). The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpr): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1):38–55.
- IILA, SENAMHI, and UNI (1982). *Estudio de la hidrología del Perú*. Instituto Italo-Latino Americano.
- INRENA (1994). Diagnostico de la calidad de agua en la vertiente del pacífico. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1998a). Sistema de informacion hidrologica (sih) reporte de caudales diarios - estacion hidrometrica pte magdalena. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1998b). Sistema de informacion hidrologica (sih) reporte de caudales diarios - estacion hidrometrica santo domingo. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1998c). Sistema de informacion hidrologica (sih) reporte de caudales diarios - estacion socsi. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1999a). Delimitacion de la faja marginal del rio chancay - huaral. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1999b). Delimitacion de la faja marginal del rio chillón. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1999c). Delimitacion de la faja marginal del rio lurin. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (1999d). Delimitacion de la faja marginal del rio mala. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (2000). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río cañete. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (2001). Evaluacion y ordenamiento de los recursos hidricos de la cuenca chancay - huaral. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- INRENA (2003). Estudio integral de los recursos hídricos de la cuenca del río chillón. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.

- INRENA (2007). Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala. Technical report, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1):13–24.
- Krause, P., Boyle, D., and Båse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97.
- Laura, E. L., Obando, O. G. F., Laura, A. L., and Aragón, J. Q. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite trmm y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 17(2):221–228.
- León, A. (2014). Análisis espacio-temporal de las precipitaciones y caudales durante los eventos El Niño (1982-83 y 1997-98) en la costa norte peruana.
- Molnar, P. (2011). Calibration. watershed modelling, ss 2011. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland*.
- Monteith, J. L. et al. (1965). Evaporation and environment. In *Symp. Soc. Exp. Biol.*, volume 19, page 4.
- Moritz, S., Sardá, A., Bartz-Beielstein, T., Zaefferer, M., and Stork, J. (2015). Comparison of different methods for univariate time series imputation in R. *arXiv preprint arXiv:1510.03924*.
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. PhD thesis, Paris, ENGREF.
- Mu, Q., Zhao, M., and Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8):1781–1800.
- Murphy, A. H. (1995). The coefficients of correlation and determination as measures of performance in forecast verification. *Weather and forecasting*, 10(4):681–688.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290.
- NIPPON, K. (2001). Desarrollo integral de recursos hídricos en la cuenca del río Cañete. Technical report, Agencia de Cooperación Internacional Japon - Pacific Consultants Internacional.
- Ochoa, R. (2010). Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la vertiente del Pacífico - cuencas de la costa sur. Technical report, ANA.
- Oliver, M. A. and Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4(3):313–332.

- OMM (2011). *Guía de prácticas hidrológicas*, volume I - Hidrología – De la medición a la información hidrológica. Ginebra.
- ONERN (1968). Inventario y evaluación de los recursos naturales – cuenca del río chancay-huaral. Technical report, Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.
- Paoli, C. U., Cacik, P. A., and Bolzicco, J. E. (1998). Análisis de riesgo conjunto en la determinación de crecidas de proyecto de regímenes complejos. *Ingeniería del agua*, 5(2).
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (gr). *Rapport, Edition CEMAGREF*.
- Pizarro, R., Ausensi, P., León, L., Aravena, D., Sangüesa, C., and Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del maule, Chile. *Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*, 1(2):172–184.
- Quiroz, K., Collischonn, W., Sven, W., and Lavado, C. (2011). Modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río huallaga. *REVISTA PERUANA GEOATMOSFÉRICA RPGA*, pages 51–62.
- Ramos, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida*. PhD thesis, Universidad Pontificia de Valencia.
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., and Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the peruvian pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1):143–158.
- Rui, H. and Beaudoin, H. (2011). Readme document for global land data assimilation system version 2 (gldas-2) products. *GES DISC*.
- Rui, H., Beaudoin, H. K., Teng, W. L., Vollmer, B., and Rodell, M. (2012). Nasa gldas evapotranspiration data and climatology.
- Searcy, J. K. and Hardison, C. H. (1960). Double-mass curves. Technical report.
- UNESCO and ROSTLAC (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América de sur*. Oficina Regional de Ciencias y Tecnología de la UNESCO para América latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay.
- Vauchel, P. (2005). Hydraccess: Software for management and processing of hydro-meteorological data. <https://www.mpl.ird.fr/hybam/utills/hydraces.htm>.
- Villón, M. (2011). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola. Editorial Villón.
- Yupanqui, R. (2015). Validación de los datos chirps de precipitación para monitoreo de periodos secos y húmedos del Perú. Technical report, SENAMHI.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2012). Hydrotsm: Time series management, analysis and interpolation for hydrological modelling. *R package version 0.3*, 3.

- Zeileis, A. and Grothendieck, G. (2005). zoo:s3 infrastructure for regular and irregular time series. *Journal of Statistical Software*, 14(6):1–27.
- Zhang, K., Kimball, J. S., Nemani, R. R., and Running, S. W. (2010). A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, 46(9).

