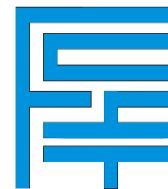




UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA MENSUAL DE LA
CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO HASTA LA ESTACIÓN
HIDROMÉTRICA VIÑA QUEMADA**

Proyecto de Grado, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en
Ingeniería Civil

PRESENTADO POR: SILVA BALDELOMAR JOSE ADRIAN

TUTOR: Ing. Msc. MONTENEGRO TERRAZAS LUIS EDGAR

COCHABAMBA - BOLIVIA

SEMESTRE I- 2019

DEDICATORIA

A Dios por otorgarme el don de la vida y a
mis padres por su inmenso apoyo y
dedicación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mis padres, Aida y Antonio con quienes mi deuda es infinita por apoyarme en todo momento, por ser un excelente ejemplo, los valores que me han inculcado, por su amor incondicional y ser mi fortaleza en todo momento.

Al Ing. MSc. Edgar Montenegro T., por su dedicada orientación, asesoramiento, apoyo incondicional y su amistad brindada a lo largo de la elaboración del presente documento.

Al PhD. Mauricio Villazón por todas sus observaciones, confianza, apoyo y amistad brindada.

A mis hermanos Sergio y Mariana por estar siempre a mi lado, por su cariño y aliento brindado.

A mi novia Amanda por sus motivadoras palabras y sus ánimos dados en todo momento.

A mis amigos con quienes compartí gratos momentos a lo largo de mi formación académica.

FICHA RESUMEN

El propósito del presente estudio es analizar el desempeño de los modelos hidrológicos SWAT, WEAP y CHAC en tres cuencas del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada. En este sentido se calibraron y se realizaron simulaciones con los modelos WEAP y CHAC, con relación al SWAT, se usaron los resultados obtenidos por Callau (2016).

Las cuencas estudiadas son: Talula, Ñujchu y Viña Quemada, que cuentan con superficies de drenaje de 6507, 1586 y 13457 Km². Las dos primeras cuencas aportan a la salida de la cuenca Viña Quemada.

Con relación a los datos hidrometeorológicos, se recopilaron series mensuales de 31 estaciones con datos de precipitación y temperatura. En lo referente a datos de caudal, se usaron los registros con que se contaba a la salida de las tres cuencas estudiadas.

La información cartográfica recopilada de acuerdo a los requerimientos del modelo hidrológico WEAP, corresponde por un lado al uso de suelo, recurriendo en este caso al mapa mundial de cobertura de suelo producido por la Agencia Espacial Europea en 2016. Por otro lado también fue necesario usar el mapa de tipo de suelo de la FAO (2003), ambos mapas fueron procesados en un ambiente SIG e incorporados al modelo.

Debido a que los modelos usados son del tipo concentrado por subcuencas, las variables fueron promediadas para cada una de estas unidades, recurriendo a los polígonos de Thiessen para promediar la precipitación. Para obtener la temperatura promedio, se usaron curvas hipsométricas y una relación del gradiente de temperatura.

Para la modelación con CHAC se usaron los mismos datos de entrada que WEAP y se vincularon sus parámetros a características físicas de la cuenca según la literatura.

La calibración de los modelos corresponde al periodo hidrológico entre los años 1978 a 1985, se realizaron calibraciones manuales, previa realización de análisis de sensibilidad paramétricos, en consecuencia en los procesos de calibración se dio mayor importancia a los parámetros que presentaron mayor sensibilidad. Posteriormente se evaluaron las calibraciones con medidas de bondad de ajuste como el coeficiente de calibración, y la eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE).

La validación de los modelos se realizó en el periodo de 2005 a 2008 y se determinaron las mismas medidas de bondad de ajuste calculadas para las calibraciones. Más adelante se realizaron los balances hídricos superficiales con sus componentes más importantes correspondientes al periodo de 1978 a 2011 para ambos modelos.

Por último se procedió a realizar el análisis de correspondencia de parámetros entre los tres modelos en base a las funciones que desempeñan, las definiciones en la literatura y las experiencias adquiridas al usar los modelos.

Finalmente, se analizó la eficiencia de los tres modelos cuantificando su desempeño con el NSE para las tres cuencas estudiadas, verificando en términos generales que el modelo de mejor desempeño es el SWAT seguido por el WEAP y el CHAC.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I	13
1. ASPECTOS GENERALES	13
1.1. INTRODUCCION	13
1.2. ANTECEDENTES.....	13
1.2.1. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS CON WEAP.....	16
1.2.2. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS CON CHAC.....	17
1.3. JUSTIFICACION	18
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.5. OBJETIVOS	19
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
CAPITULO II	21
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1. BALANCE HIDRICO	21
2.1.1. ECUACION DE BALANCE HIDRICO.....	21
2.2. CICLO HIDROLOGICO	22
2.1.1. PRECIPITACION	23
2.1.2. EVAPOTRANSPIRACION	24
2.1.3. ESCORRENTIA	25
2.1.4. INFILTRACION	25
2.2. MODELOS DE SIMULACION HIDROLOGICA	26
2.2.1. CLASIFICACION DE MODELOS HIDROLOGICOS	26
2.3. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG).....	28
2.3.1. USO DE SIG ORIENTADO A LA MODELACION HIDROLOGICA	29
2.4. CALIBRACION DE MODELOS HIDROLOGICOS.....	29
2.4.1. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE.....	30
2.5. VALIDACION DE MODELOS HIDROLOGICOS	33
2.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS	34
2.7. MODELO HIDROLOGICO DE WEAP	34

2.7.1.	INTRODUCCION A WEAP.....	34
2.7.2.	MODELO DE HUMEDAD DEL SUELO.....	35
2.7.3.	SENSIBILIDAD DE PARAMETROS DE WEAP.....	41
2.8.	MODELO HIDROLOGICO CHAC.....	44
2.8.1.	INTRODUCCION AL CHAC.....	44
2.8.2.	MODELO DE TEMEZ.....	44
2.8.3.	VARIABLES REQUERIDAS Y PARAMETROS DEL MODELO CHAC.....	47
CAPITULO III.....		49
3.	CARACTERIZACIÓN FISICA DE LA CUENCA EN ESTUDIO.....	49
3.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	49
3.2.	SISTEMA HIDROGRÁFICO.....	51
3.3.	TOPOGRAFIA Y MODELO DE ELEVACION DIGITAL (DEM).....	52
3.4.	REPRESENTACION DE LOS TIPOS DE SUELO.....	55
3.5.	REPRESENTACION DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO.....	59
3.6.	CARACTERIZACION DE LAS GRADIENTES DE PENDIENTE.....	62
CAPITULO IV.....		64
4.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	64
4.1.	RECOPIACION Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACION METEOROLOGICA.....	64
4.2.	RECOPIACION Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACION HIDROMETRICA.....	69
4.3.	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS METEOROLOGICOS.....	72
4.3.1.	PRECIPITACION.....	72
4.3.2.	TEMPERATURA.....	75
4.3.3.	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	79
CAPITULO V.....		81
5.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA MODELACION HIDROLÓGICA CON WEAP.....	81
5.1.	INTRODUCCION.....	81
5.2.	CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE WEAP.....	82
5.2.1.	ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS.....	83
5.3.	VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE WEAP.....	93

CAPITULO VI	100
6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELACION HIDROLÓGICA CON CHAC	100
6.1. INTRODUCCION	100
6.2. CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE CHAC	101
6.2.1. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS	102
6.3. VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE CHAC.....	111
CAPITULO VII	117
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
7.1. ANALISIS DE CORESPONDENCIA DE PARAMETROS DE LOS MODELOS CHAC, WEAP Y SWAT	117
7.2. ANALISIS DE DESEMPEÑO DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS CONTINUOS DE CHAC, WEAP Y SWAT.....	119
7.3. CONCLUSIONES	123
7.4. RECOMENDACIONES	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
ANEXO A	
PROCESAMIENTO DE LAS SERIES HIDROMETEOROLOGICAS	
ANEXO B	
GUIA SUPUESTOS CLAVE DE WEAP	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores referenciales del coeficiente de calibración.	31
Tabla 2.2 Rangos referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe. (Molnar, 2011)	33
Tabla 2.3 Valores referenciales de CRH en mm/m. (Soria Céspedes, 2016)	38
Tabla 2.4 Valores referenciales de profundidad radicular.	38
Tabla 2.5 Estimaciones de índices de área foliar LAI. (MMAyA & VRHR, 2016)	40
Tabla 2.6 Estimaciones de Ks para diferentes clases texturales. (DHI, 2009)	40
Tabla 2.7 Sensibilidad del modelo reportada en la literatura. (MMAyA & VRHR, 2016)..	41
Tabla 2.8 Sensibilidad de parámetros según LHUMSS. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	42
Tabla 2.9 Síntesis de variables, ecuaciones y proceso de cálculo del modelo de Témez. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013).....	46
Tabla 3.1 Características físicas de las cuencas de aporte a los sitios de estudio.....	52
Tabla 3.2 Comparación de propiedades entre la base de datos y el mapa con el área extendida por cada tipo de suelo y textura de suelo adoptada. (Callaú Medrano, 2016)	56
Tabla 3.3 Cobertura de suelo según el mapa de ESA y su correspondiente adopción para el siguiente estudio.	59
Tabla 3.4 Clases de gradiente de la pendiente según la FAO y sus respectivas equivalencias adoptadas para el presente estudio.....	62
Tabla 4.1 Distribución de las estaciones de monitoreo respecto a la elevación de la cuenca.	67
Tabla 4.2 Resultados de los rellenos de datos de precipitación realizados por Callaú en HEC4. (Callaú Medrano, 2016).....	68
Tabla 4.3 Resultados de los cálculos estadísticos correspondientes a la evaluación de los rellenos mensuales de precipitación. (Callaú Medrano, 2016)	68
Tabla 4.4 Ubicación de estaciones hidrométricas con registros dentro la cuenca. (Callaú Medrano, 2016).....	69
Tabla 4.5 Estaciones pluviométricas con registros de temperatura usadas para este estudio.	76
Tabla 5.1 División en subcuencas para modelación con WEAP.....	81
Tabla 5.2 Valores calibrados de los parámetros de las cuencas modeladas en WEAP.	89
Tabla 5.3 Desempeño del modelo SM de WEAP para las simulaciones hidrológicas en el periodo de calibración.....	90
Tabla 5.4 Desempeño del modelo SM de WEAP para las simulaciones hidrológicas en el periodo de validación.	93
Tabla 5.5 Síntesis del balance hídrico superficial realizado con WEAP por subcuencas para el periodo (1978-2011).	98
Tabla 5.6 Balance hídrico unidades hidrográficas a nivel anual realizado con WEAP.....	99
Tabla 6.1 Formulario de los términos de error calculados por CHAC. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013)	101

Tabla 6.2 Sensibilidad de parámetros del modelo de Témez de CHAC en la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.	106
Tabla 6.3 Parámetros de calibración y valores iniciales de las cuencas modeladas en CHAC.	107
Tabla 6.4 Desempeño del modelo de CHAC para las simulaciones hidrológicas en el periodo de calibración.	107
Tabla 6.5 Desempeño del modelo de CHAC para las simulaciones hidrológicas en el periodo de validación.	111
Tabla 6.6 Síntesis del balance hídrico superficial realizado con CHAC por subcuencas para el periodo (1978-2011).	115
Tabla 6.7 Balance hídrico unidades hidrográficas a nivel anual realizado con CHAC.	116
Tabla 7.1 Resumen de correspondencia de parámetros de los modelos hidrológicos continuos de SWAT, WEAP y CHAC.	118
Tabla 7.2 Valores de NSE y su interpretación según Molnar para las tres unidades hidrográficas.	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sitios identificados para la implementación de presas dentro la cuenca del río Pilcomayo. (Borelli, 2005).....	15
Figura 1.2 Selección de localidades donde se han realizado proyectos WEAP alrededor del mundo. (Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, & SEI, 2009)	17
Figura 2.1 Representación del balance hidrológico. (Moncada, 2018)	22
Figura 2.2 Representación del Ciclo Hidrológico. (water.usgs.gov/edu/watercycle.html) ..	23
Figura 2.3 Proceso de Evapotranspiración.	24
Figura 2.4 Variación de la infiltración por textura de suelo.	26
Figura 2.5 Representación de los SIG formato Raster y Vector.....	28
Figura 2.6. Esquema del modelo hidrológico SM de WEAP. (Yates, Purkey, Sieber, & Huber-Lee, 2005).....	35
Figura 2.7 Esquema del Modelo de Témez.	45
Figura 3.1 Ubicación de la cuenca alta del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada.	50
Figura 3.2 Esquema de la red de drenaje.	51
Figura 3.3 Limite de la cuenca y red de drenaje del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada.	53
Figura 3.4 Modelo de Elevación digital de la cuenca.	54
Figura 3.5 Tipos de suelo según la FAO existentes en la cuenca.	58
Figura 3.6 Mapa de uso y cobertura de suelo de la cuenca.	61
Figura 3.7 Clasificación de las pendientes adoptadas.....	63
Figura 4.1 Ubicación y distribución espacial de las estaciones meteorológicas e hidrométricas en la región de la cuenca (las estaciones meteorológicas son las usadas por Callaú para el relleno de series de datos).....	66
Figura 4.2 Polígonos de Thiessen definidos para las modelaciones con WEAP y CHAC...74	74
Figura 4.3 Curva hipsométrica de la subcuenca Ñujchu con el promedio de elevaciones de las estaciones que se encuentran próximas o en su interior.	77
Figura 4.4 Relación temperatura - altura para la cuenca estudiada en el presente estudio, realizada a partir de las temperaturas anuales promedio presentadas en la Tabla 4.5.	79
Figura 4.5 Variación de la Evapotranspiración potencial de las tres cuencas modeladas en CHAC en todo el periodo de simulación. a) De agosto de 1976 a julio de 1987 b) De agosto de 1987 a julio de 1999 c) De agosto de 1999 a julio de 2011	80
Figura 5.1 Esquema de modelación en WEAP. Las UH representan las subcuencas consideradas.	82
Figura 5.2 Registros de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas.	83
Figura 5.3 Variación del parámetro RRF y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	84

Figura 5.4 Variación del parámetro K_s o RZC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	85
Figura 5.5 Variación del parámetro SWC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	85
Figura 5.6 Variación del parámetro F o PFD y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	86
Figura 5.7 Variación del parámetro DWC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	86
Figura 5.8 Variación del parámetro Z1 y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	87
Figura 5.9 Variación del parámetro Z2 y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	87
Figura 5.10 Variación del parámetro K_d o DC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017).....	88
Figura 5.11 Coeficientes de escorrentía calculados con caudales observados y simulados con WEAP para las tres unidades hidrográficas. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada	91
Figura 5.12 Caudales observados y simulados por WEAP para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de calibración. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada	93
Figura 5.13 Variación de los coeficientes NSE alcanzados para la calibración con respecto a la validación del modelo de WEAP.	95
Figura 5.14 Caudales observados y simulados para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de validación. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada.....	97
Figura 6.1 Esquema de disposición de subcuencas para modelación en CHAC.	101
Figura 6.2 Opción de CHAC para calibración de parámetros. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013).....	102
Figura 6.3 Variación del parámetro C y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.	104
Figura 6.4 Variación de H_{max} y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.	105
Figura 6.5 Variación de I_{max} y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.	105

Figura 6.6 Variación del coeficiente de descarga del acuífero (α) y su influencia en el caudal promedio multimensual en la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.....	106
Figura 6.7 Coeficientes de escorrentía calculados con caudales observados y simulados con CHAC para las tres unidades hidrográficas. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada	108
Figura 6.8 Caudales observados y simulados por CHAC para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de calibración. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada	110
Figura 6.9 Variación de los coeficientes NSE alcanzados para la calibración con respecto a la validación del modelo realizado en CHAC.	112
Figura 6.10 Caudales observados y simulados para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de validación. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada.....	114
Figura 7.1 Caudales promedio mensuales observados y simulados con los modelos WEAP, CHAC y SWAT correspondientes al periodo de calibración. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada	122

CAPITULO I

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCION

El presente estudio consiste en la modelación hidrológica de paso mensual de una cuenca hidrográfica a gran escala con dos modelos (SM de WEAP y Témez de CHAC) y su posterior comparación con una simulación realizada para la misma cuenca con otro modelo (SWAT). En este contexto se pretende dar pautas acerca de las ventajas de un modelo sobre otro y como asociar los parámetros de cada modelo a las características físicas de la cuenca, además de proporcionar fuentes de información acerca de estas características. El presente trabajo también pretende ser una guía de cómo realizar una modelación hidrológica continua en general y que aspectos deben tomarse en cuenta específicamente a la hora de usar los modelos empleados para el presente estudio.

La modelación hidrológica busca representar los procesos involucrados en el ciclo hidrológico de una cuenca. Siendo Bolivia un país en vías de desarrollo, es una necesidad implementar metodologías que permitan manejar de forma integral las cuencas hidrográficas, para poder gestionar los recursos hídricos de forma óptima y que se aprovechen su potencial al máximo.

1.2. ANTECEDENTES

La cuenca del río Pilcomayo cubre una superficie aproximada de 272 000 km² pertenecientes a Bolivia, Paraguay y Argentina. Es una de las unidades hidrográficas más importantes el país, además de poseer la cuenca con la mayor superficie dentro la cuenca del Plata en Bolivia.

Debido a la sedimentación de importantes volúmenes de material sólido erosionado en la cuenca alta, en 1939 Argentina y Paraguay forman una comisión mixta; a la cual, Bolivia se suma en 1974 en el marco de un Programa del PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) junto al BID (Banco Interamericano de Desarrollo) y OEA (Organización de Estados Americanos). Luego en 1995 los tres países firman una

Declaración Presidencial conformando así la Comisión Trinacional en bien del desarrollo de la cuenca del río Pilcomayo cuyo principal propósito es la realización de estudios que ayuden a la gestión del recurso hídrico.

En el marco de la Comisión Trinacional se realizaron varios estudios que involucran el área de interés del presente trabajo, entre ellos se encuentran:

- EURAGRI, Estudio del río Pilcomayo, 1993.
- Ribstein, P & Peña, J, Estudio para la protección contra las inundaciones de Villamontes (Bolivia), 1993.
- Malbrunot, A. - Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo, 2006.
- IHH, Balance hídrico superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo, 2006.
- IHH, Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de Misión La Paz (Argentina), 2006.
- INA, Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la cuenca alta del río Pilcomayo, 2007.
- LHUMSS, Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la cuenca alta del río Pilcomayo, 2007.

Desde otra perspectiva en 2005, el experto regional Ing. Felipe Borelli, identificó varios sitios aguas arriba de la comunidad Villamontes (ver Figura 1.1), en los cuales se pretendería implementar presas que estarían referidas a cubrir múltiples objetivos. Los criterios utilizados para la identificación de los estos sitios fueron:

- Capacidad de lograr mejoras en las condiciones sociales locales asociadas a las obras.
- Capacidad para permitir programas de desarrollos sustentables.
- Capacidad para reducir estados hídricos extremos.
- Capacidad para almacenar sedimentos.
- Capacidad para generar energía.
- Capacidad de influir en los procesos dinámicos del río en su cuenca baja.

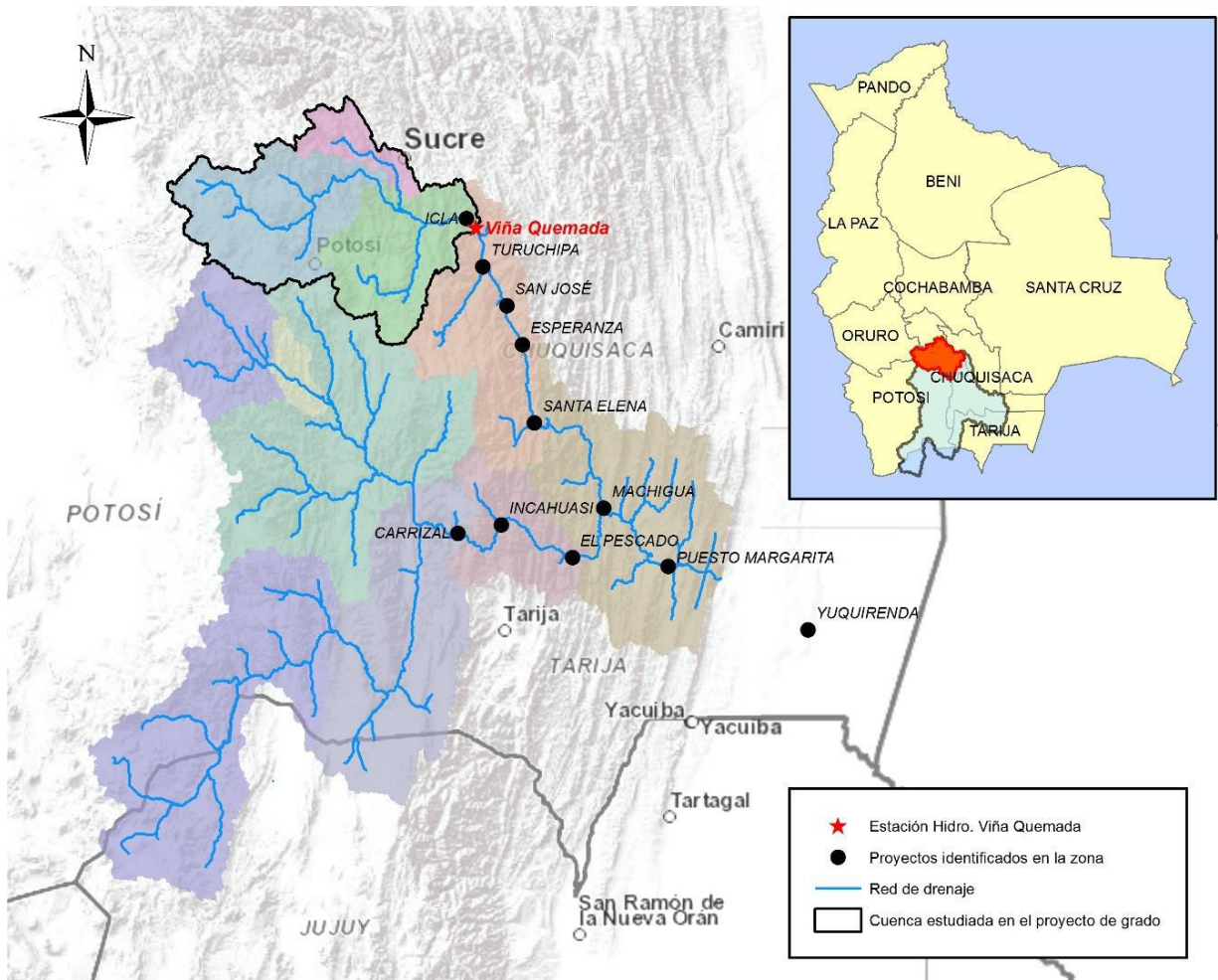


Figura 1.1 Sitios identificados para la implementación de presas dentro la cuenca del río Pilcomayo. (Borelli, 2005)

Actualmente ENDE (Empresa Nacional de Electricidad), sus filiales y subsidiarias como

las empresas Corani S.A. y Valle Hermoso S.A. poseen proyectos en estudio, entre los cuales se encuentra el denominado Proyecto Hidroeléctrico Cuenca del Plata, que, identifica, monitorea y/o evalúa técnicamente, sitios con características favorables para la implementación de centrales hidroeléctricas. De entre estos sitios los más destacados vendrían a ser Icla Carrizales e Incahuasi.

1.2.1. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS CON WEAP

WEAP ha tenido gran acogida en diferentes países alrededor del mundo apoyando estudios que integran la demanda, oferta, calidad del agua y para la realización de balances hídricos tal como se muestra en la Figura 1.2. Por tanto es reconocido como un software para asistir la toma de decisiones, como se muestra a continuación en diferentes aplicaciones del sistema, por nombrar algunos y haciendo énfasis en la diversidad de aplicaciones de la plataforma, tanto a nivel internacional como nacional y local:

- Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pampas. Lima, Perú (ANA, 2010).
- Proyecto Estudios de Cambio Climático con Énfasis en Adaptación. Guatemala, Centro América (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, 2007).
- Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos (Rodríguez, Pabón, Bernal, & Martínez, 2010).
- Simulación y análisis de escenarios para la gestión del recurso hídrico en la cuenca Perkerra usando el modelo WEAP. Distrito de Koibatek, República de Kenia (Akivaga, 2010)
- Variabilidad del flujo de la corriente y severidad de la sequía en la cuenca del río Songhua, noreste de China (Faiz, Liu, Fu, Uzair, Khan, Baig, Li & Cui).
- Integración de restricciones de suministro de agua en simulaciones agrícolas irrigadas de California (Winter, Young, Mehta, Ruane, Azarderakhsh, Davitt, McDonald, Haden & Rosenzweig, 2017).
- Balance hídrico integral para la cuenca del río Ravelo (Soria Céspedes, 2016)

- Balance hídrico superficial de Bolivia 2016 (Ministerio de Medio Ambiente y Agua,

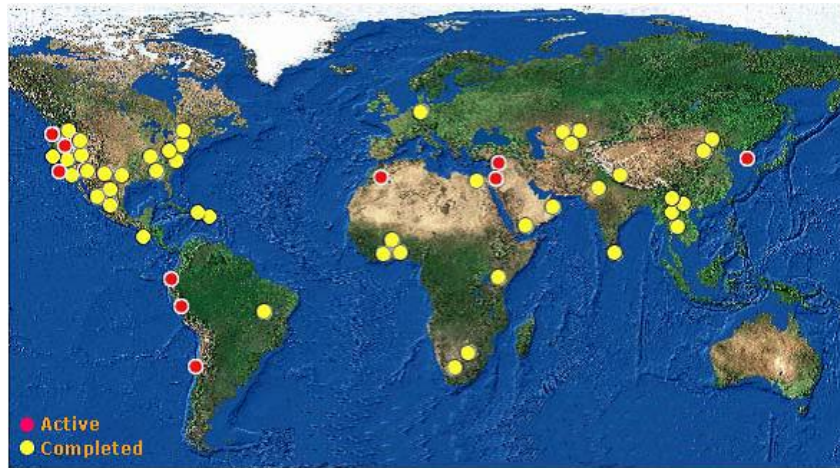


Figura 1.2 Selección de localidades donde se han realizado proyectos WEAP alrededor del mundo. (Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, & SEI, 2009) 2017)

1.2.2. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS CON CHAC

CHAC cuenta con diferentes módulos que permiten el manejo de series temporales, evaluación de recursos hídricos, estimación de caudales máximos mediante el método racional, una herramienta para relleno de datos históricos que es siempre una opción gracias a su versatilidad, y la transformación de los datos de precipitación mensuales en aportaciones mediante la aplicación del modelo de Témez. Este software goza de gran aceptación en el medio, a continuación se cita algunos trabajos realizados con CHAC tanto internacional como nacionalmente en diferentes ámbitos:

- Guía metodológica para la elaboración de mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones (Instituto geológico y minero de España, 2008).
- Modelamiento continuo concentrado de cuatro cuencas hidrográficas en la zona fronteriza ecuatoriana – peruana. Loja, Ecuador (Alvarado González, 2008)
- Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador (SNET, 2003)
- Balance hídrico superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo. La Paz, Bolivia (Molina Carpio & Espinoza Romero, 2006)

- Balance hídrico superficial de Bolivia (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2012)

1.3. JUSTIFICACION

El hombre requiere del agua para satisfacer sus necesidades básicas, por desgracia, esto no siempre es posible y con frecuencia su escasez no permite disponer de la cantidad necesaria, otras veces su exceso ocasiona graves daños materiales, y pérdida de vidas humanas. Por esta razón es muy importante su estudio, comprender el desarrollo de esta, y poder adecuarse a su dinámica para vivir en armonía con ella.

Actualmente Bolivia se encuentra en miras de generar energía hidroeléctrica y la región de interés del presente estudio se encuentra ubicada estratégicamente para su aprovechamiento hidroeléctrico, por ejemplo los Proyectos Hidroeléctricos Icla y Carrizales. Cabe destacar también que las comunidades aledañas requieren gestionar el recurso hídrico para fines agrícolas y de consumo humano.

Un instrumento fundamental para la gestión integral del recurso hídrico es la planificación hidrológica para obtener un mejor aprovechamiento de los recursos de una cuenca o sistema de cuencas, tratando de mitigar los efectos adversos de las sequías hidrológicas y de las crecidas que inevitablemente se presentan en tales sistemas debido a su naturaleza variable a lo largo del tiempo y del espacio.

Por otra parte en el medio surge siempre una constante cuestión que modelo usar a la hora de representar una unidad hidrográfica. En este sentido el presente estudio busca establecer pautas para responder esta interrogante además de proponer nociones sobre los requerimientos de cada modelo.

Por lo mencionado anteriormente el presente estudio propone proveer elementos técnicos para apoyar el diseño de soluciones que tiendan a satisfacer las demandas nacionales de manera informada y confiable mediante el uso de análisis estadísticos, sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos (WEAP y CHAC).

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es necesario efectuar un estudio sistemático en las cuencas a gran escala implementando técnicas y procedimientos que faciliten entender el comportamiento de estos sistemas utilizando modelos hidrológicos apropiados para su simulación debido a que las cuencas hidrográficas a gran escala poseen un sistema hidrológico bastante complejo.

En nuestro país, existen regiones donde la red de monitoreo no presenta una buena distribución tanto espacial como altitudinal (Villazón, et al., 2013), en consecuencia la disponibilidad de datos en ciertas regiones es escasa.

Por otro lado, los eventos hidrológicos ocurridos en cuencas de gran tamaño, no presentan un comportamiento uniforme en toda su área, un conocimiento pobre de las características de estos sistemas genera incertidumbres en la prevención y mitigación de daños por riesgos naturales y por ende, en la proyección de obras civiles.

Lo mencionado anteriormente es reflejado en las características de la cuenca que se pretende estudiar, su red de monitoreo tiene ciertas limitaciones, existen zonas que por distintos motivos como: poca accesibilidad, falta de personal capacitado para el manejo y mantenimiento de estaciones de medición, entre otros, posee pocas o ninguna estación hidrométrica, meteorológica y/o pluviométrica. Esto puede originar una inefectiva caracterización del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Es importante destacar de igual manera que los proyectos hidroeléctricos que el país pretende encarar próximamente requieren de datos para su correcta planificación y ejecución.

Por otro lado el presente estudio pretende ser una referencia acerca de las ventajas de un modelo hidrológico sobre otro y cómo funcionan estos independientemente. Se busca brindar una herramienta útil a la hora de decidir la el modelo con el cual se va a trabajar.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el desempeño de los modelos WEAP, CHAC y SWAT, en la determinación del potencial hídrico de la cuenca del río Pilcomayo, hasta el punto de salida de tres subcuencas en las estaciones hidrométricas: Ñujchu, Talula y Viña Quemada.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar cuáles son los procesos hidrológicos que intervienen, de que parámetros dependen y la relación existente entre ellos y su uso en los modelos hidrológicos.
- Recopilar la información hidrometeorológica y cartográfica necesaria para la cuenca de estudio.
- Revisar, depurar, y procesar la información hidrometeorológica recopilada haciendo uso de análisis y herramientas estadísticas.
- Revisar, depurar y procesar la información geofísica y cartográfica recopilada aplicando herramientas de sistema de información geográfica.
- Efectuar la calibración y validación de los modelos hidrológicos mensuales continuos de WEAP y CHAC empleando herramientas estadísticas.
- Desarrollar una metodología de apoyo al uso del modelo hidrológico de WEAP, orientado a la modelación hidrológica.

CAPITULO II

2.MARCO TEÓRICO

2.1. BALANCE HIDRICO

Se encarga de cuantificar el ciclo del agua en una determinada zona (ladera, cuenca, región, país, etc.) durante un período de tiempo previamente establecido (diario, mensual, anual, etc).

El Balance Hídrico constituye la base para cuantificar la oferta hídrica, teniéndose como resultado el régimen de caudales en su punto de salida, a través del análisis y procesamiento de la información básica disponible: información y datos climatológicos e hidrológicos, evolución del ciclo hidrológico y sus componentes, demanda, componentes de la geografía física como la cartografía temática, topografía, suelos, geología, uso del suelo, delimitación de cuencas y demografía.

El concepto de Balance Hídrico, que ampliamente se usó en hidrología, puede causar alguna confusión al suponer que la precipitación es igual a la suma de la escorrentía y la evaporación; ya que en muchos casos sucede que las cuencas no tienen un ciclo exclusivo de su entorno, es por ello que el término Ciclo Hidrológico tome el sentido de distribución y movimiento del agua en diferentes fases, bajo y sobre la superficie de la tierra.

2.1.1. ECUACION DE BALANCE HIDRICO

Se basa en el principio de la conservación de la masa y se puede expresar como se ve a continuación (Figura 2.1), tanto en su forma algebraica como en los procesos hidrológicos que implica:

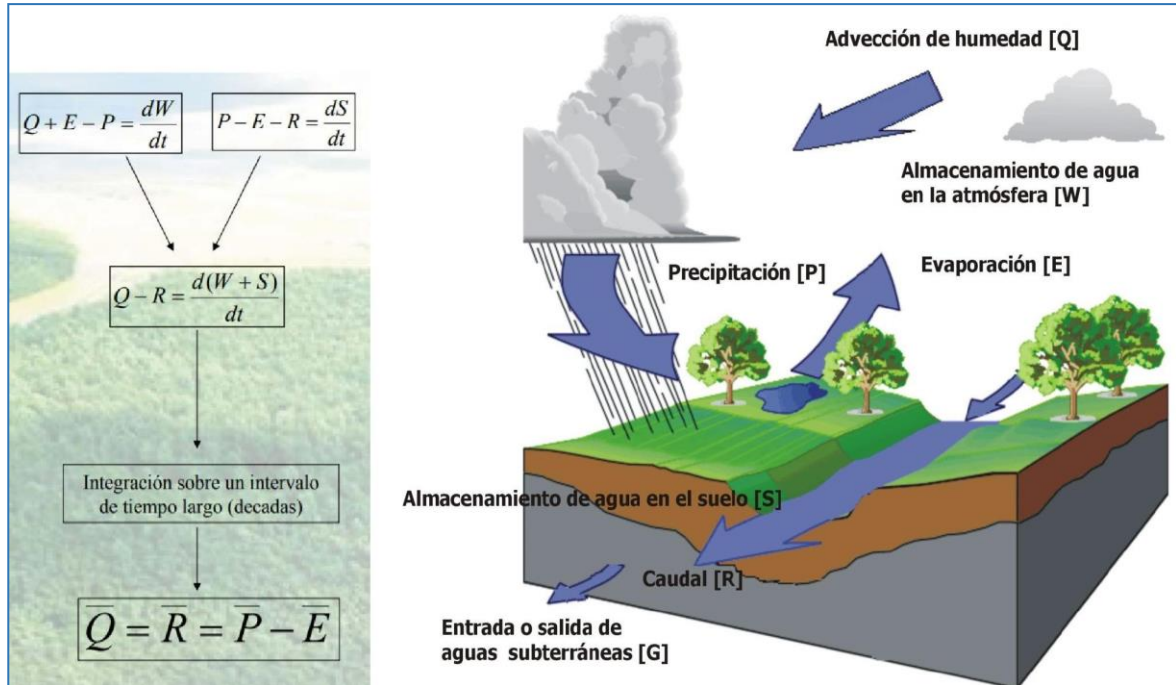


Figura 2.1 Representación del balance hidrológico. (Moncada, 2018)

2.2. CICLO HIDROLOGICO

Se trata del movimiento que tiene el agua continuo y cíclico a lo largo de nuestro planeta. El ciclo hidrológico (ver Figura 2.2) es el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). Este flujo de agua se produce por dos causas principales: la energía Solar y la gravedad. El agua de la Tierra que constituye la hidrosfera se distribuye en tres reservorios principales: los océanos, los continentes y la atmósfera, entre los cuales existe una circulación continua denominada el ciclo del agua o ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico inicia con la evaporación del agua desde la superficie de los océanos. La condensación se da a medida que el agua evaporada se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua, formando así las nubes. Luego, caen por su propio peso dando origen a la precipitación. Si en la atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia.



Figura 2.2 Representación del Ciclo Hidrológico. (water.usgs.gov/edu/watercycle.html)

Una porción del agua precipitada será aprovechada por los seres vivos; otra se convertirá en escorrentía al recorrer el terreno hasta llegar a un río, un lago u océano. Otra porción de agua se infiltrará a través del suelo, formando acuíferos o capas de agua subterránea, conocidas como capas freáticas. De estas capas, a veces, el agua brota en la superficie en forma de fuente, formando arroyos o ríos. Tarde o temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación (Chow, 1994).

A continuación se describen con mayor detalle las fases del ciclo hidrológico que poseen más relevancia en la modelación hidrológica en general:

2.1.1. PRECIPITACION

Es toda forma de humedad que se origina en las nubes, producto de la condensación de partículas, las cuales colisionan formando gotas de mayor tamaño y lo suficientemente pesadas como para precipitarse por gravedad llegando hasta la superficie terrestre. La precipitación incluye la lluvia, nieve, granizo y nevisca.

2.1.2. EVAPOTRANSPIRACION

Es la combinación de dos procesos independientes por los cuales se pierde agua, la evaporación del agua de la superficie del suelo y la transpiración del cultivo, consecuentemente, todos los factores que intervienen en los dos procesos antes mencionados, influirán en la evapotranspiración (Figura 2.3).

- **Evaporación:** Proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor, a partir de superficies de agua libre como océanos, lagos y ríos, de zonas pantanosas, del suelo, y de la vegetación húmeda.
- **Transpiración:** Proceso por el cual el agua de la vegetación a través de las hojas de las plantas pasa a la atmósfera en forma de vapor. Naturalmente esta agua tomada

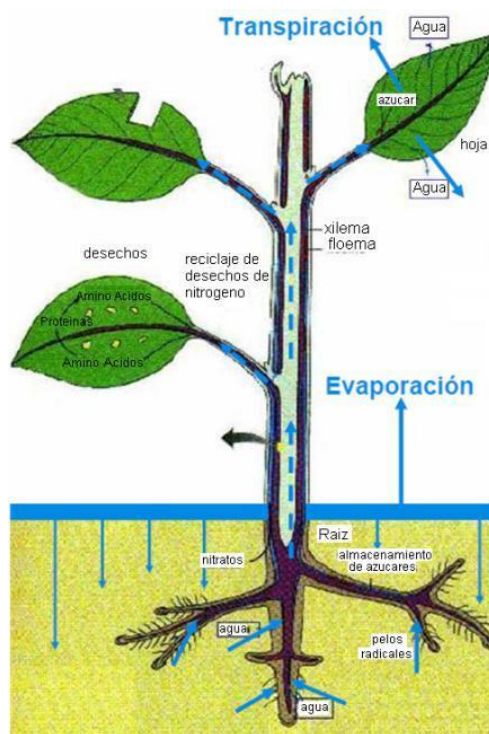


Figura 2.3 Proceso de Evapotranspiración.

por las plantas es, del suelo. (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009)

2.1.3. ESCORRENTIA

La escorrentía es el agua excedente de las precipitaciones, que circula sobre el suelo o a través del mismo y llega a los cauces superficiales. Cuanto mayor es el mayor grado de conservación, la escorrentía es menor, la capacidad de almacenamiento de agua aumenta.

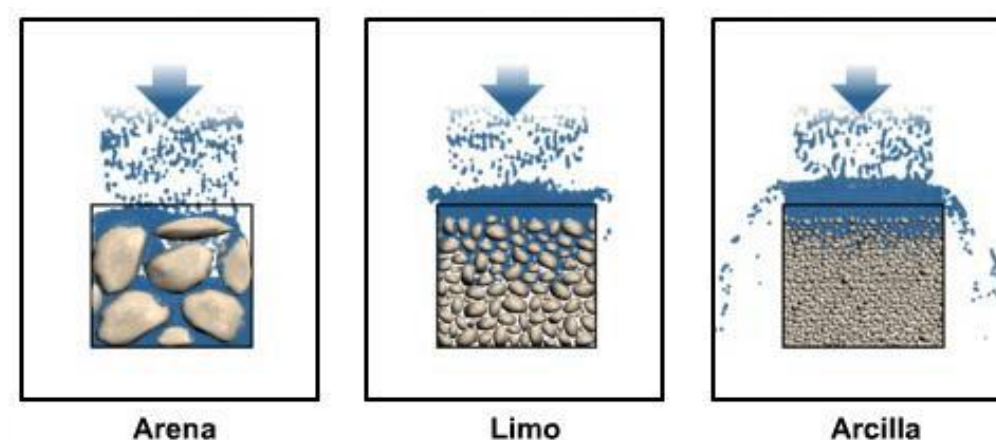
Cuando los suelos tienen una capacidad de infiltración menor que la intensidad de las lluvias y se saturan, se origina de inmediato una escorrentía superficial por falta de infiltración. La escorrentía depende de las siguientes características físicas de la región de estudio:

- Cobertura de la tierra
- Tipo de suelo
- Área de drenaje
- Topografía
- Almacenamientos (lagos, presas)

2.1.4. INFILTRACION

Se trata de la porción de precipitación que se penetra el suelo a través de los poros y fisuras de la superficie del terreno o las rocas, relleno de agua el medio poroso. Esto es posible gracias a la acción de las fuerzas de gravedad y capilaridad.

Parte del agua que se infiltra, permanece en las capas más superficiales del suelo y puede volver a entrar a un curso de agua debido a que se filtra hacia el mismo. Otra parte del agua



puede percolarse a mayor profundidad, recargando así los acuíferos subterráneos.

Figura 2.4 Variación de la infiltración por textura de suelo.

2.2. MODELOS DE SIMULACION HIDROLOGICA

En el campo de la hidrología, al igual que en otras ramas de la ciencia, el auge experimentado por los modelos matemáticos en los últimos años ha sido muy importante. Con la modelación de los sistemas hidrológicos se persigue una identificación de estos a través de un modelo matemático, con el propósito de analizar el funcionamiento de los sistemas y mejorar la visión de los mismos.

Los modelos son simplificaciones, o abstracciones de la realidad con la intención de poder comprenderla. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan entradas y salidas (Chow, 1994).

2.2.1. CLASIFICACION DE MODELOS HIDROLOGICOS

Los modelación hidrológica se clasifica en dos grandes especies: física y abstracta. Los modelos físicos se caracterizan por ser palpables, es decir que se realizan con objetos reales, en consecuencia poseen una escala y similitud al sistema real que representan. En los modelos abstractos, en cambio, el sistema real está representado por expresiones analíticas, ecuaciones y modelos matemáticos que buscan simbolizar los fenómenos hidrológicos mediante variables y parámetros.

2.2.1.1. TIPOS DE MODELOS HIDROLOGICOS MATEMATICOS

Según Víctor M. Ponce (1989), un modelo hidrológico matemático consiste en varios componentes, cada uno describe cierta fase o fases del ciclo hidrológico, estos modelos pueden ser determinísticos o probabilísticos, lineal o no lineal, invariable o variable en el tiempo, global o distribuido, continuo o discreto, analítico o numérico, evento guiado o proceso continuo.

- **Modelos determinísticos:** Son formulados siguiendo fórmulas de física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables, parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos, dichos modelos implican una relación causa-efecto entre los

valores de los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones

- **Modelos probabilísticos:** Se formulan siguiendo las leyes de la probabilidad, pueden ser de dos tipos: estadísticos y estocásticos, los primeros, tratan con ejemplos observados, mientras que los otros, con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales, por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas.
- **Modelos conceptuales:** Son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sea en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso de estos modelos en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos.
- **Modelos paramétricos:** Se trata de los más simples de todas las propuestas de modelado. Como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros.
- **Modelos distribuidos:** Son modelos en los cuales se permite que los parámetros varíen espacialmente dentro de la cuenca, esto permite el cálculo no sólo de la respuesta de toda la cuenca sino también la respuesta de las subcuencas individuales. El mayor detalle con el que pueden hacerse las simulaciones en un modelo distribuido rinde mejor computacionalmente que un modelo global. Por otra parte para que los resultados del modelado distribuido sean significativos, la calidad y la cantidad de datos disponibles deben ser proporcionados con gran nivel de detalle.

- **Modelos semi-distribuidos:** Se caracterizan por dividir a la cuenca analizada en elementos mucho más pequeños para su análisis, pueden discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico en base a características físicas de la cuenca estudiada y analizar cada una de ellas en forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos.

2.3. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG)

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos diseñados para ejecutarse coordinada y lógicamente con el objetivo de capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos para satisfacer múltiples propósitos, principalmente el gestionamiento de datos espaciales.

En este contexto, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos. Los SIG actualmente constituyen un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas, incluyendo la relacionada con los estudios hidrológicos (Romay Bartolini, 2006).

En función de la forma de representar el espacio de la que hacen uso podemos clasificar los SIGs en dos grandes modelos o formatos: vectorial y raster (ver Figura 2.5). La mayoría de los elementos que existen en la naturaleza pueden ser representados mediante formas

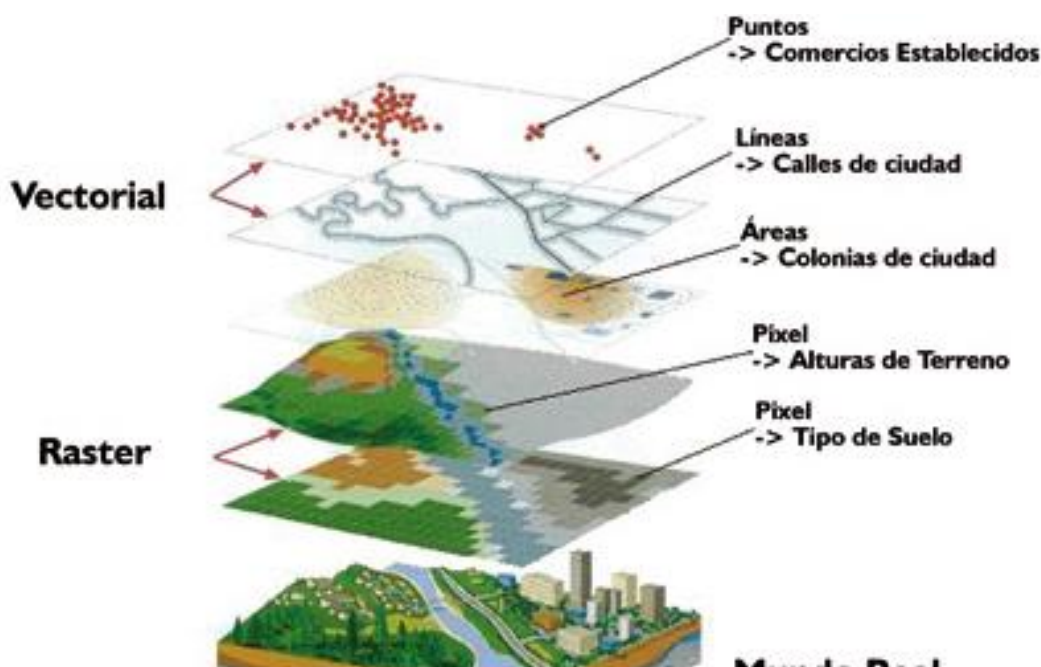


Figura 2.5 Representación de los SIG formato Raster y Vector.

geométricas como ser puntos, líneas o polígonos, a esto se los conoce como formato vector.

De la misma forma se puede representar la realidad mediante celdillas con información, denominados raster. Estos últimos son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarios en fenómenos no discretos. Evidentemente ambos formatos son formas intuitivas y versátiles de ilustrar el espacio, que ayudan a comprender mejor los elementos objeto de estudio según su naturaleza.

2.3.1. USO DE SIG ORIENTADO A LA MODELACION HIDROLOGICA

Los SIG, desde su misma creación, han marcado una pauta fundamental a seguir en cualquier disciplina relacionada con el manejo de información espacial, la hidrología entre ellas, por lo que su papel en la evolución de la parte de la hidrología es, sin duda alguna, de vital importancia. La manera en que las aplicaciones más actuales se acercan a esa pauta y se hacen partícipes de los conceptos SIG dentro de sus propias características, define formas diversas de entender la relación entre la cartografía digital, el análisis hidrológico y la utilización de métodos computacionales, (Olaya Ferrero , 2004).

Un modelo hidrológico requiere bastante información para representar las características físicas e hidrológicas de una cuenca. La utilización de un SIG en un proceso de modelación hidrológica tiene como propósito facilitar la adquisición y preparación de datos espaciales y posteriormente la presentación y despliegue de resultados (Romay Bartolini, 2006).

2.4. CALIBRACION DE MODELOS HIDROLOGICOS

El propósito de la modelación hidrológica es simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Lamentablemente, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, aun no se ha concebido un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración.

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. El proceso de calibración se centrará en minimizar las diferencias entre datos observados y datos simulados, usando un criterio de exactitud basado en el ajuste de parámetros

como medio de calibración. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una función objetivo.

El proceso de calibración puede realizarse de dos formas:

- **Prueba y error:** Es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje pero es lento y subjetivo
- **Automática:** Consiste en optimizar los valores de los parámetros usando técnicas numéricas. A diferencia del método anteriormente nombrado, éste es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo.

En la práctica, se sugiere aplicar el primer método para conseguir una primera aproximación para posteriormente optimizarla (Cabrera , Calibracion de modelos hidrológicos, 2015).

2.4.1. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE

La bondad de ajuste de un modelo describe lo bien que se ajusta un conjunto de datos simulados a los datos observados. Las medidas de bondad en general resumen la discrepancia entre los valores observados simulados, en resumen mide que tan bueno es la calibración y por ende el desempeño del modelo en el caso de estudio.

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un criterio de exactitud, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes medidas de bondad de ajuste. Subsiguientemente se describen las medidas de bondad de ajuste más famosas y naturalmente más eficaces del medio:

2.4.1.1. COEFICIENTE DE CALIBRACION (R)

Llamado correlación estadística, en estadística; es una medida que expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en caso de la calibración hidrológica, son los caudales observados y los caudales simulados. Se formula como:

$$r = \frac{\sigma_{obs,sim}}{\sqrt{\sigma_{obs}\sigma_{sim}}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{obs,sim} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) \quad (2.2)$$

$$\sigma_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (2.3)$$

$$\sigma_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \quad (2.4)$$

Dónde:

r = Coeficiente de calibracion

$\sigma_{obs,sim}$ = Covarianza sin sesgo entre caudales observados y simulados

σ_{obs} = Varianza sin sesgo de los caudales observados

σ_{sim} = Varianza sin sesgo de los caudales simulados

n = Numero de datos simulados

Q_i = Caudal observado

$Q_{sim,i}$ = Caudal simulado

\bar{Q} = Promedio caudales observados

\bar{Q}_{sim} = Promedio Caudales simulados

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre $0 < r < 1$: a mayor valor de r , mejor ajuste (Tabla 2.1). El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas (Cabrera , Calibracion de modelos hidrológicos, 2015).

Tabla 2.1 Valores referenciales del coeficiente de calibración.

Valor de r	Fuerza de relación
------------	--------------------

1 a 0.5	Fuerte
0.5 a 0.3	Moderada
0.3 a 0.1	Débil
0.1 a 0	Ninguna o muy débil

2.4.1.2. EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFFE (NSE)

La eficiencia o criterio de Nash-Sutcliffe describe la precisión predictiva de diferentes modelos, siempre que haya datos observados para comparar los resultados del modelo. Es un hecho que la eficiencia de Nash-Sutcliffe ha sido reportada en la literatura científica para simulaciones de modelos hidrológicos y por ende es uno de los más utilizados en el campo de la hidrología. Se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \tag{2.5}$$

Dónde:

NSE = Eficiencia de Nash – Sutcliffe

n = Numero de datos simulados

Q_i = Caudal observado

Q_{sim,i} = Caudal simulado

Q̄ = Promedio caudales observados

La eficiencia de Nash-Sutcliffe puede variar de -∞ a 1. Una eficiencia de 1 corresponde a una combinación perfecta de caudal modelado con los datos observados. Los rangos para tomar decisiones respecto a este criterio se encuentran resumidos en la Tabla 2.2, extraída del artículo científico denominado Calibracion de modelos hidrológicos, redactada por Cabrera en 2015 y quien cita a Molnar.

Valor de NSE	Ajuste
Menor a 0.2	Insuficiente

Tabla 2.2 Rangos <i>criterio de Nash-2011)</i>	0.2 – 0.4	Satisfactorio	<i>referenciales del Sutcliffe. (Molnar,</i>
	0.4 – 0.6	Bueno	
	0.6 – 0.8	Muy bueno	
	Mayor a 0.8	Excelente	

2.4.1.3. RAIZ DEL ERROR CUADRATICO MEDIO (ECM)

En estadística, el error cuadrático medio (ECM o RMSE por sus siglas en inglés) mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. Dicho de otro modo permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados y se formula con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}} \tag{2.6}$$

Dónde:

RMSE = Raiz del error cuadratico medio

n = Numero de datos simulados

Q_i = Caudal observado

Q_{sim} = Caudal simulado

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito positivo. El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

2.5. VALIDACION DE MODELOS HIDROLOGICOS

El uso de la modelación hidrológica como herramienta para “pronosticar” caudales para un período de tiempo futuro, debe garantizar que el modelo que funciona actualmente se ajustará también para el escenario futuro. Por tal motivo se hace necesario complementar el proceso de calibración ya desarrollado con un proceso de validación (Cabrera, Validacion de modelos hidrológicos, 2015).

Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. De esta manera, se dice que

un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables.

2.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS

Es el suceso por el cual se busca determinar que parámetros del modelo, al ser sus valores alterados originan cambios significativos en los caudales simulados, vale decir que el modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo. Este tipo de análisis es un complemento necesario para el ejercicio del modelado, especialmente porque provee información sobre el nivel de certeza (o no) para asegurar los resultados del modelado. (Callaú Medrano, 2016)

Generalmente el análisis de sensibilidad se realiza a través de la “perturbación de parámetros”, es decir, se varía un parámetro del modelo mientras el resto permanecen constantes, de modo que las variaciones sufridas en las variables de estado reflejan la sensibilidad de la solución al parámetro modificado (Chapra, 1997). De este modo son identificados los parámetros sensibles, los cuales tendrán mayor importancia en la calibración; en tanto aquellos parámetros poco sensibles quedaran relegados a un rol secundario.

2.7. MODELO HIDROLOGICO DE WEAP

2.7.1. INTRODUCCION A WEAP

Water Evaluation and Planning System (WEAP) es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desarrollada por el Stockholm Environment Institute (SEI). WEAP apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta).

WEAP emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima,

condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible. A diferencia de otros modelos de recursos hídricos típicos basados en modelación hidrológica externa, WEAP es un modelo forzado por variables climáticas (Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, & SEI, 2009).

WEAP cuenta con un modelo hidrológico semi distribuido llamado Escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo), o Soil Moisture (SM) por sus siglas en inglés, el cual es el modelo empleado para la modelación del presente documento y cuyo procedimiento de cálculo es descrito a continuación.

2.7.2. MODELO DE HUMEDAD DEL SUELO

El modelo de Humedad del Suelo (SM), es un método uni-dimesional que divide la cuenca de estudio en subcuencas denominadas Catchments. Cada Catchment es representado en dos baldes de suelo con un esquema de contabilidad basado en funciones empíricas. En el balde superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interfluo y variación en la húmeda del suelo y en el tanque inferior simula caudal base, variación en la húmeda del suelo y percolación. El modelo se basa en un balance hídrico y requiere la inserción de datos climáticos, uso y textura del suelo para asignar valores a los parámetros.

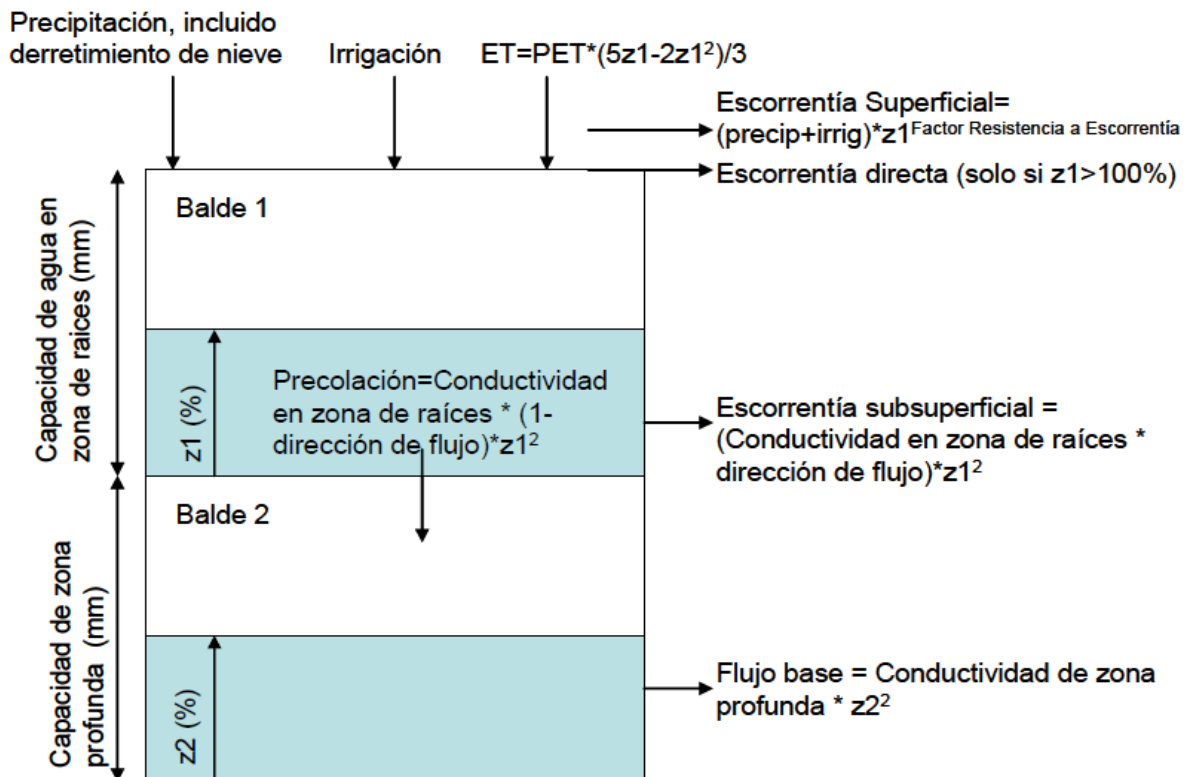


Figura 2.6. Esquema del modelo hidrológico SM de WEAP. (Yates, Purkey, Sieber, & Huber-Lee, 2005)

Una unidad hidrográfica, N, puede ser dividida entre fracciones de área j representando diferentes usos de suelo y tipos (Chow, 1994) de suelo, y el balance hídrico se calcula para cada fracción de área. El clima se asume uniforme dentro de cada unidad hidrográfica y el balance para el balde 1 se estima como:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)K_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRFj} - f_j K_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) K_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2.7)$$

Donde:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = \text{Cambio en la humedad de suelo}$$

$$P_e(t) = \text{Precipitación efectiva}$$

$$PET(t)K_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) = \text{Evapotranspiración}$$

$$P_e(t)z_{1,j}^{RRFj} = \text{Escorrentía superficial}$$

$$f_j K_{s,j} z_{1,j}^2 = \text{Interflujo}$$

$$(1 - f_j) K_{s,j} z_{1,j}^2 = \text{Percolación}$$

El balde 2 es representado por la siguiente ecuación:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = (1 - f_j) K_{s,j} z_{1,j}^2 - K_{d,j} z_{2,j}^2 \quad (2.8)$$

Donde:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = \text{Cambio en la humedad de suelo}$$

$$(1 - f_j) K_{s,j} z_{1,j}^2 = \text{Percolación}$$

$$K_{d,j} z_{2,j}^2 = \text{Flujo base}$$

2.7.2.1. PARAMETROS DEL MODELO

Las variables y parámetros del modelo son los siguientes:

- **Coefficiente de cultivo (Kc):** Las diferencias en evaporación y transpiración del cultivo de referencia con respecto a un cultivo en particular, son integradas en un factor conocido como coeficiente de cultivo (Kc) (Comision Naconal de Riego de Chile, 2017). Se sugiere considerar coeficientes distintos para las coberturas y para los cultivos. Para coberturas, los valores se obtienen por trabajo de campo o mediante valores referenciales de la literatura (Allen, Pereira , Raes, & Smith, 2006). Por otro lado, es factible considerar que el Kc para cobertura vegetal nativa es invariable en el año. Para el caso de los cultivos, los Kc tienen variabilidad mensual (estacional). Su estimación es a través de técnicas de teledetección
- **Capacidad de agua del suelo SWC (Soil Water Capacity):** Es la capacidad de retención de agua de la capa superior del suelo en milímetros (mm). Se estima directamente a partir de la profundidad máxima en la zona de raíces. Alternativamente se obtiene al asociar el parámetro con el almacenamiento potencial de agua en el suelo o agua disponible en la zona radicular del suelo [mm] (Soria Céspedes, 2016). En último caso, SWC se calcula como el producto entre la profundidad radicular [m] y la capacidad de retención de humedad del suelo CRH; estos factores se estiman a partir de valores referenciales de la literatura o mediciones en campo (MMAyA & VRHR, 2016).

Tabla 2.3 Valores referenciales de CRH en mm/m. (Soria Céspedes, 2016)

Textura del suelo	CRH (Contenido de piedra y grava entre 5-15%)
Arcilla	120
Franco	140
Limo	120
Arena	70
Arena francosa	90
Arcilla arenosa	90
Franco arcillo arenoso	130
Franco arenoso	120
Arcilla limosa	130
Franco Arcillo limoso	140
Franco limoso	150
Franco arcilloso	120

Tabla 2.4 Valores referenciales de profundidad radicular.

Cobertura	Profundidad máxima de raíces en m
Agricultura	1.2
Bosque	1.7
Pradera	1.4
Humedal	1.4
Urbano	1.2
Matorral	1.5
Otro/Sin Vegetación	1.2
Agua	1.6
Hielo/Nieve	1

- **Capacidad de Agua del suelo Profundo DWC (Deep Water Capacity):** Es la capacidad efectiva de retención de agua del suelo inferior o profundo en milímetros (mm). Normalmente se considera un valor único para cada subcuenca por qué no depende del tipo de uso del suelo. El valor se ignora cuando el sitio de la demanda recarga el acuífero local. Se infiere por calibración del modelo, debido a que su estimación es compleja a través de información física (Yates , Purkey, Sieber, Hubber-Lee, & Galbraith, 2005)
- **Conductividad hidráulica del suelo profundo Kd (Deep conductivity):** Es la tasa de conducción de agua del suelo profundo (longitud/tiempo) en condiciones saturadas, cuando el almacenamiento relativo z_2 es 100%. Este parámetro controla la descarga de agua subterránea o caudal base. El caudal base aumenta a medida que este parámetro aumenta. (Gonzales Tomanyi, 2016)
- **Factor de resistencia al escurrimiento RRF (Runoff Resistance Factor):** Se utiliza para controlar el escurrimiento superficial directo y que está relacionado con el índice de superficie de hojas y la pendiente del terreno. Su valor podrá estar entre 0.1 y 10. Valores altos implican tasas bajas de escorrentía y viceversa. El valor de este parámetro puede variar en función del uso del suelo (Gonzales Tomanyi, 2016). El RRF se lo relaciona teóricamente con el Índice de área foliar (LAI) (Yates, Purkey, Sieber, & Huber-Lee, 2005). A continuación la tabla 2.5 provee valores estimados.

Cobertura	RRF	LAI	Método
Agricultura	7	3.62-4.22	Experiencia
Bosque	5	9	$LAI^{0.7}$
Pradera	2	2.5	$LAI^{0.7}$
Humedal	4	6.34	$LAI^{0.7}$
Urbano	0.5	8	Experiencia
Matorral	2	2.08	Experiencia
Otro/Sin vegetación	1	1.31	$LAI^{0.7}$
Agua	1		Experiencia

Hielo/Nieve	1	Experiencia
-------------	---	-------------

Tabla 2.5 Estimaciones de índices de área foliar LAI. (MMAyA & VRHR, 2016)

- **Conductividad hidráulica de la zona radicular Ks (Root Zone Conductivity):**

Se refiere a la tasa de conducción de agua del suelo superficial (longitud/tiempo) en condiciones saturadas, cuando el almacenamiento relativo z_1 es 100%. Este parámetro controla la velocidad en que el agua es entregada al depósito inferior (suelo profundo) y a la superficie por interflujo; su valor varía de acuerdo al uso del suelo (Gonzales Tomanyi, 2016). Se estima a través de valores referenciales de la literatura (DHI, 2009). En su interpretación, la literatura sugiere que al realizar el análisis en paso mensual, las unidades físicas del parámetro mm por mes implican que la unidad de mm por día se promedia. Esta observación es fundamental al aplicar el modelo, debido a la alta sensibilidad a este parámetro. Tal observación aplica también a la conductividad saturada para la zona profunda (Soria Céspedes, 2016).

Tabla 2.6 Estimaciones de Ks para diferentes clases texturales. (DHI, 2009)

Textura del suelo	Ks (cm/min)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
Arena	0.505	1.056	0.2800
Arena francosa	0.712	1.318	0.0180
Franco arenoso	0.166	0.299	0.0115
Franco	0.049	0.042	0.0035
Franco limoso	0.019	0.043	0.0045
Franco arcillo arenoso	0.045	0.082	0.0163
Franco arcilloso	0.027	0.064	0.0007
Franco arcillo limoso	0.013	0.020	0.0010
Arcilla arenosa	0.021	0.043	0.0050
Arcilla limosa	0.015	0.039	0.0009

Arcilla	0.010	0.020	0.0024
---------	-------	-------	--------

- **Dirección preferencial de flujo F (Preferred Flow Direction):** Es un factor que define la proporción en que el agua del suelo superficial es entregada al suelo profundo y a la superficie por interflujo. Depende de la cobertura del suelo. Varía entre 0 y 1 (1 para flujo 100% horizontal, a 0 para flujo 100% vertical). Los valores se estiman al inicio de las simulaciones y los valores finales se definen por calibración (Gonzales Tomanyi, 2016).
- **Z1:** Almacenamiento relativo en el depósito superior expresado como porcentaje de la capacidad de la zona racinaria.
- **Z2:** Almacenamiento relativo en el depósito profundo expresado como porcentaje de la capacidad del suelo profundo.

2.7.3. SENSIBILIDAD DE PARAMETROS DE WEAP

Seguidamente se muestran tablas resumen de la sensibilidad que se espera al realizar variaciones a los valores de los parámetros del modelo. La primera (Tabla 2.7) es una recopilación de estudios anteriores para el balance hídrico nacional de 2016. La segunda (Tabla 2.8) muestra el resumen de un estudio realizado por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS) que exhibe el análisis realizado para tres diferentes cuencas representativas de nuestro país, tanto para época seca como época húmeda. En ambos se clasifican tres niveles de sensibilidad: alta, media y baja:

Tabla 2.7 Sensibilidad del modelo reportada en la literatura. (MMAyA & VRHR, 2016)

Parámetro	Sensibilidad reportada en la literatura		
	(Ingol Blanco, 2009)	(Gonzales Tomanyi, 2016)	(Soria Céspedes, 2016)
SWC [mm]	Media	Media	Media
DWC [mm]	Alta	Media	Alta
Kc	Alta	Media	Media
RRF	Alta	Media	Media-baja
Ks [mm/mes]	Media	Media	Media

Kd [mm/mes]	Media	Media	Media
F	Media	Media	Baja
Z ₁	Baja	Media	Baja
Z ₂	Baja	Media	Baja

Tabla 2.8 Sensibilidad de parámetros según LHUMSS. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

Parámetro	Cuencas Amazónicas (El Sena)		Cuencas Amazónicas (Puerto Junín)		Cuenca Altiplano (Llave)		Cuenca Pilcomayo (Talula)	
	E. Húmeda	E. Seca	E. Húmeda	E. Seca	E. Húmeda	E. Seca	E. Húmeda	E. Seca
	RRF	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Media - Baja	Alta
SWC	Baja	Media	Media	Baja	Alta	Baja	Media	Baja
Ks	Baja	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Media	Media
F	Baja	Baja	Media	Media	Media	Baja	Media	Baja
DC	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
DWC	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Z1	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Z2	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

2.7.3.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

El modelo de Humedad del Suelo (SM), usa la versión modificada del método de Penman-Monteith para estimar la ETP para un cultivo o hierva de altura 0.12 m con una resistencia superficial de 69 s/m, y se define de la siguiente manera (Maidment, 1993):

$$E_{rc} = \frac{\Delta}{\Delta - \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta - \gamma^*} \frac{900}{T + 275} U_2 D \quad (2.9)$$

Donde:

E_{rc} = Evapotranspiración de referencia, $mm\ dia^{-1}$

R_n = Intercambio de radiación neta para la cobertura de cultivo, $mm\ dia^{-1}$

G = Flujo de calor del suelo medido o estimado, $mm\ dia^{-1}$

T = Temperatura media del aire, $^{\circ}C$

U_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$

D = Déficit de presión de vapor, kPa

Δ = Pendiente de la curva de la presión de vapor, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$

γ = Constante psicométrica, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$

$\gamma^* = \gamma(1 + 0.33 U_2)$

Como se evidencia en la ecuación anterior para el cálculo de la evapotranspiración de referencia son necesarias las siguientes variables: temperatura media del aire [$^{\circ}C$], humedad relativa media [%], velocidad del viento [$m\ s^{-1}$], fracción de nubes, y latitud. Las variables climáticas deben ser ajustadas a una altura de 2 m (Allen, Pereira , Raes, & Smith, 2006).

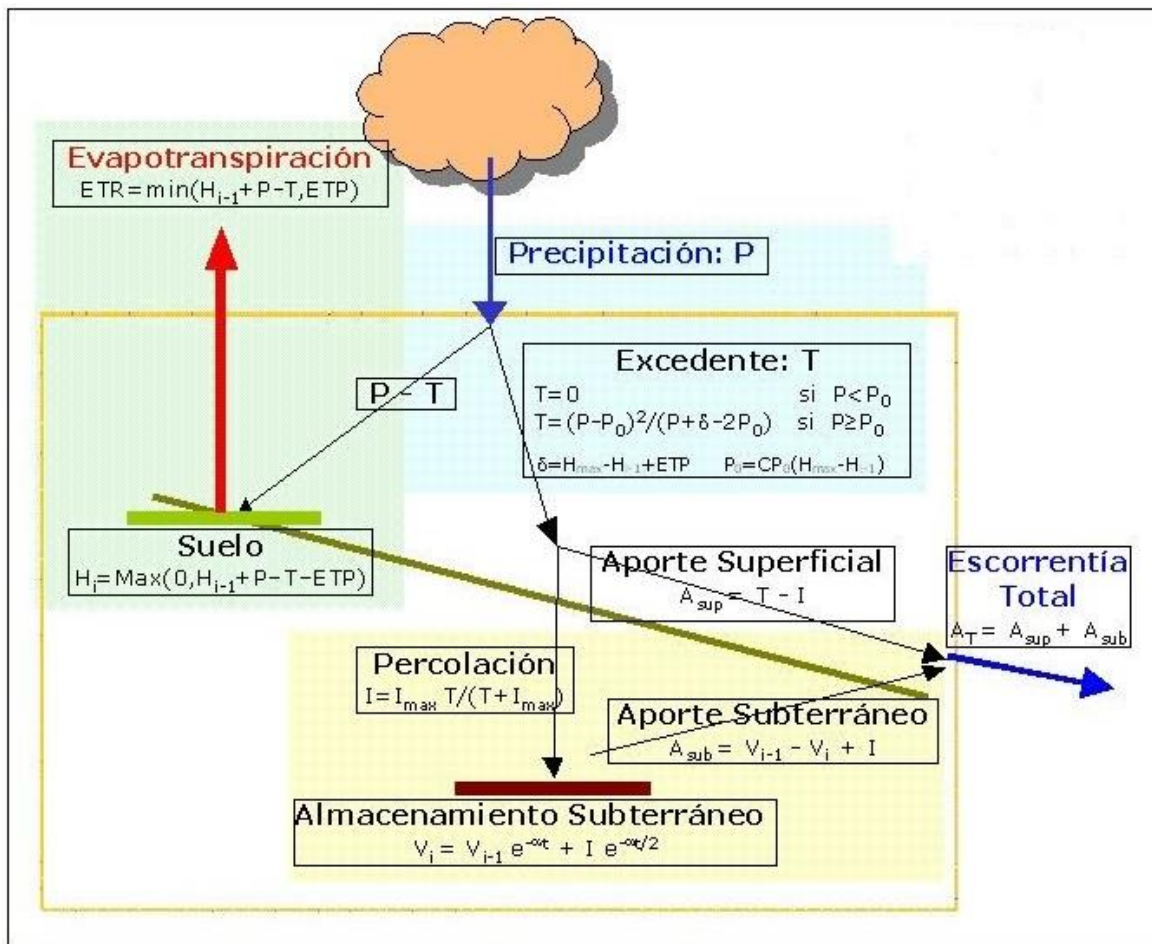
2.8. MODELO HIDROLOGICO CHAC

2.8.1. INTRODUCCION AL CHAC

El modelo matemático de balance de cuenca denominado CHAC (Calculo Hidrometeorológico de Aportes y Crecidas) ha sido desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. CHAC aplica el modelo de Témez para transformar precipitación en escorrentía. Témez es un modelo conceptual, agregado de paso mensual y simulación continua.

2.8.2. MODELO DE TEMEZ

Creado en 1977, Témez se basa en el principio de continuidad y simula los principales procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico considerando dos almacenamientos: suelo/zona no saturada y acuífero/zona saturada (). En la zona no saturada, la lluvia se almacena en forma de humedad y en ella, dependiendo del estado de humedad, de la capacidad máxima de almacenamiento y de la evapotranspiración potencial se origina un excedente que pasa a la zona saturada. Este excedente consta de dos componentes: la escorrentía superficial y la infiltración que se almacena en el acuífero (Estrela, 1997). La Tabla 2.9 resume las variables utilizadas por el modelo, sus unidades y



las ecuaciones que rigen los diferentes subprocesos.

Figura 2.7 Esquema del Modelo de Témez.

Tabla 2.9 Síntesis de variables, ecuaciones y proceso de cálculo del modelo de Témez. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013)

Siendo:	<p>P_0: Umbral de escorrentía. mm $H_{máx}$: Parámetro de humedad máxima. mm/mes C: Parámetro de excedente. $I_{máx}$: Parámetro de infiltración máxima. mm/mes α: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días⁻¹ K: Parámetro coeficiente de uso de suelo medio sobre ETP P_i: Precipitación; mes (i). mm H_{i-1}: Humedad antecedente; mes (i-1). mm EP_i: Evapotranspiración potencial, afectada por el coeficiente de usos de suelo; mes (i). mm ER_i: Evapotranspiración real; mes (i). mm T_i: Excedente; mes (i). mm V_i: Volumen almacenado; mes (i). mm I_i: Infiltración; mes (i). mm A_{SUP_i}: Escorrentía superficial; mes (i). mm A_{SUB_i}: Escorrentía subterránea; mes (i). mm Q_i: Caudal subterráneo; mes (i). m³/s A_{TOT_i}: Escorrentía total; mes (i). mm</p>
Umbral de escorrentía, P_o	$P_o = C \cdot (H_{máx} - H_{i-1})$
Excedente, T_i	$P_i \leq P_o \Rightarrow T_i = 0$ $P_i > P_o \Rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2P_o}$ siendo $\delta = H_{máx} - H_{i-1} + EP_i$
Balance de agua en el suelo, H_i	$H_i = Max(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$
Evapotranspiración real, ER_i	$ER_i = min(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$
Infiltración, I_i	$I_i = I_{máx} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{máx}}$
Aportación superficial, A_{SUP_i}	$A_{SUP_i} = T_i - I_i$
Caudal drenado por el acuífero, Q_i	$Q_i = \alpha \cdot V_i$ $Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t} + \alpha \cdot R_i \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot t}{2}}$
Aportación subterránea, A_{SUB_i}	$A_{SUB_i} = V_{i-1} - V_i + R_i \cdot t$
Aportación total, A_{TOT_i}	$A_{TOT_i} = A_{SUP_i} + A_{SUB_i}$
VARIANTES DEL MODELO	
Siendo	<p>Parámetro número de días con precipitación Dos ramas de descarga del acuífero α_1: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días⁻¹ α_2: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días⁻¹ Parámetros reparto de recarga. Tanto por uno</p>

2.8.3. VARIABLES REQUERIDAS Y PARAMETROS DEL MODELO CHAC

La información de entrada que requiere el modelo puede clasificarse en cuatro tipos:

2.8.3.1. Series Mensuales

La precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y escorrentía (caudal) se deben introducir como series mensuales. Cada subcuenca tiene una sola serie de cada variable, lo que corresponde a un modelo agregado.

2.8.3.2. Datos Generales

CHAC también requiere de la inserción de datos generales son: el área de la cuenca, el número de días de lluvia tipo por mes y el coeficiente ETP o de uso del suelo. El número de días lluvias tipo es el valor promedio del número de días del mes que presentan precipitación en la cuenca. En la forma actual del modelo, es un valor constante para todos los meses del año.

2.8.3.3. Valores Iniciales

Corresponden al caudal subterráneo y la humedad del suelo (contenido de agua) correspondientes al primer mes del periodo de simulación. En caso de no existir valores medidos, deberán asumirse valores sujetos a corrección posterior.

2.8.3.4. Parámetros de Calibración

La ubicación de estos parámetros en la indica en que subproceso tiene más influencia cada uno de ellos. A continuación se los describe por separado.

- **Parámetro C:** Empleado para calcular el valor límite P_o de la precipitación por encima del cual habrá excedente de agua para la escorrentía e infiltración. Si $C=0$ entonces el valor de $P_o=0$, por lo que toda lluvia, aún de pequeña magnitud, producirá escorrentía a la salida de la cuenca. P_o depende tanto de C como del contenido de agua en el suelo en el mes anterior como se observa en la tabla 2. Este parámetro es adimensional y su rango usual es de 0 a 1. Valores típicos están en el rango de 0.1 a 0.4.

- **Humedad máxima (Hmax):** Es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y zona no saturada en mm, incluyendo el almacenamiento superficial y en la vegetación. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración, por lo que un valor más grande de Hmax implica en principio una disminución del volumen de escorrentía. Este valor puede obtenerse en base a información cartográfica, combinando un mapa de suelos o fisiografía con un mapa de vegetación, usando la metodología descrita por Zonisig (2000).
- **Infiltración máxima (Imax):** Se define como la capacidad de infiltración en el mes, en mm. Imax determina la división del excedente T en escorrentía superficial y recarga al acuífero. Varios autores proponen estimar Imax a partir de las características hidrogeológicas de la cuenca. Se ha asociado también con el Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS), pero con la limitación de que el CN está asociado a la infiltración en el suelo superficial, por lo que el uso del CN para estimar I max sólo puede tomarse como referencia preliminar.
- **Coefficiente de descarga del acuífero (α):** Es la inversa de la constante de recesión k ($\alpha=1/k$) expresada en (1/días). Se puede obtener de los registros hidrométricos de la época de estiaje o por calibración. A es más grande en cuencas pequeñas o con acuíferos poco importantes. La bibliografía (DHI, 2000) indica valores α en el rango de 0.005 a 0.1 (Molina Carpio & Espinoza Romero, 2006).

CAPITULO III

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CUENCA EN ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Plata, considerada como la segunda cuenca más grande del mundo, tiene una extensión aproximada de 3 200 000 km² abarcando territorios de los países de Argentina, Bolivia, Brasil, Uruguay y Paraguay. En Bolivia la cuenca del Plata tiene como principales afluentes los ríos Pilcomayo y Bermejo, que a su vez son alimentados por aportes provenientes de áreas contenidas en los departamentos de Potosí, Chuquisaca, Tarija, Oruro y Santa Cruz cubriendo un área aproximada de 214 242 km². El siguiente estudio correspondiente a la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada, perteneciente a la macrocuenca de La Plata conformada por causas importantes como ser: el río Pilcomayo y Bermejo.

La zona de estudio abarca la parte alta de la cuenca del río Pilcomayo, a partir de sus nacientes en la Cordillera Oriental ubicada en el departamento de Oruro hasta la estación hidrométrica Viña Quemada. El río principal de la cuenca (río Pilcomayo), recorre la misma desde sus nacientes en la Cordillera de los Frailes y Cordillera de los Azanaques a más de 5000 metros de altura, límite Oeste y Noroeste de la cuenca, hasta el límite natural que conforma la Cordillera de Mandinga en la parte este de la cuenca en el departamento de Chuquisaca. La extensión total de la cuenca es de 13456.65 km² que abarca parte de los departamentos de Chuquisaca y Potosí en su mayoría y en menor parte de Oruro.

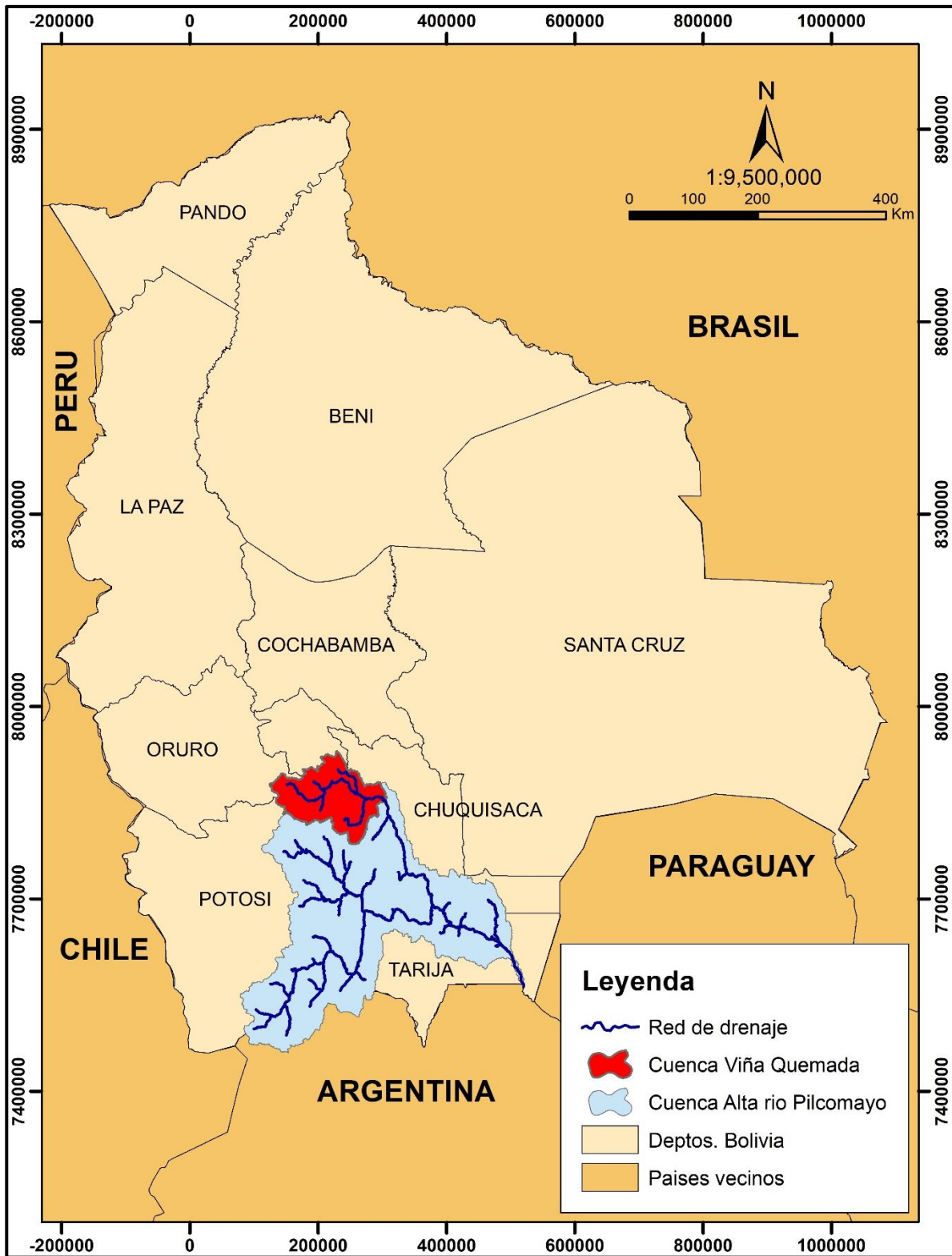


Figura 3.1 Ubicación de la cuenca alta del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada.

3.2. SISTEMA HIDROGRÁFICO

La cuenca, ubicada geográficamente se encuentra entre los paralelos 66°34'30'' - 64°49'30'' de Longitud Oeste y 18°12' - 20°01'12'' de Latitud Sud, ocupando parte los departamentos de Oruro, Potosí y Chuquisaca (ver Figura 3.3). Esta red drena zonas de clima semiárido hasta subhúmedo y seco en algunos lugares. La dinámica natural del río Pilcomayo está dominada por la estacionalidad del clima, con alternancia de estaciones secas y húmedas que causan una gran variabilidad de los caudales.

El punto de salida de la cuenca en estudio corresponde a la estación hidrométrica Viña Quemada, localizada en el departamento de Chuquisaca. Dicha estación posee extensos y consistentes registros de monitoreo de aforo de caudales líquidos, sólidos y registros de lecturas de reglas limnimétricas realizados en el río Pilcomayo (Callaú Medrano, 2016). Seguidamente en la Figura 3.2 se aprecia un esquema de la red de drenaje con sus principales afluentes, sus estaciones hidrométricas con sus años de registro de datos disponibles y superficies de aporte:

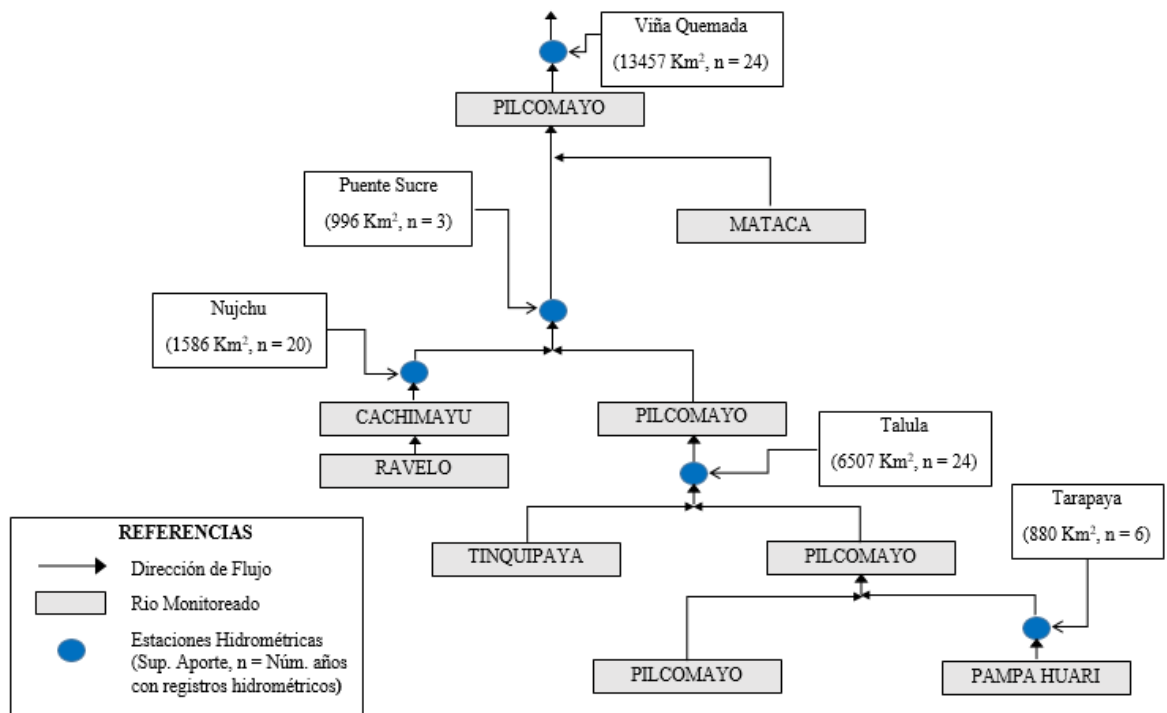


Figura 3.2 Esquema de la red de drenaje.

El tramo de estudio del río principal de la cuenca (Río Pilcomayo) en términos hidráulicos, abarca aproximadamente 260 Km de longitud ubicados entre las coordenadas (151230.497, 787785.955; 304359.314, 7853072.486). El Pilcomayo, en el tramo de estudio posee aportes de cuatro principales ríos: Pampa Huari, Tinquipaya, Cachimayo y Mataka (de aguas arriba hacia aguas abajo), los cuales están monitoreados por estaciones hidrométricas, una ilustración al respecto se presenta en la Figura 3.3.

El presente estudio se realizó con el registro de datos de las tres estaciones hidrométricas que contaban con la mayor cantidad de datos (Talula, Ñujchu y Viña Quemada). A continuación se presenta un resumen (Tabla 3.1) con las características físicas más importantes de las cuencas de estudio hasta sus respectivas estaciones hidrométricas:

Tabla 3.1 Características físicas de las cuencas de aporte a los sitios de estudio.

Estación Hidrométrica	Localización		Superficie de aporte [Km ²]	Altitud Promedio (msnm)	Pendiente Promedio [m/m]
	Latitud	Longitud			
Talula	-19.12	-65.45	6507.41	4053.70	26.12
Ñujchu	-19.21	-65.29	1586.29	3370.83	33.74
Viña Quemada	-19.40	-64.86	13456.65	3299.61	29.23

3.3. TOPOGRAFIA Y MODELO DE ELEVACION DIGITAL (DEM)

La parte alta de la cuenca está conformada por serranías medias, planicies, y montañas altas, medias y bajas. La parte media se extiende por montañas medias y altas, serranías medias, una pequeña parte de la zona media y sud de esta unidad hidrográfica presenta suelos con alto potencial erosivo. Por último la parte baja está constituida casi en su totalidad por serranías altas con disección fuerte.

Los datos de elevación digital se extrajeron de la página web de HydroSHEDS, los cuales se basan en datos de elevación de alta resolución obtenidos durante un vuelo del Transbordador espacial para la Misión de Topografía de Radar de Lanzadera de la NASA (SRTM). Para este estudio la resolución espacial del DEM, es de 15 arco segundos equivalentes a 500 metros por pixel (ver Figura 3.4)..

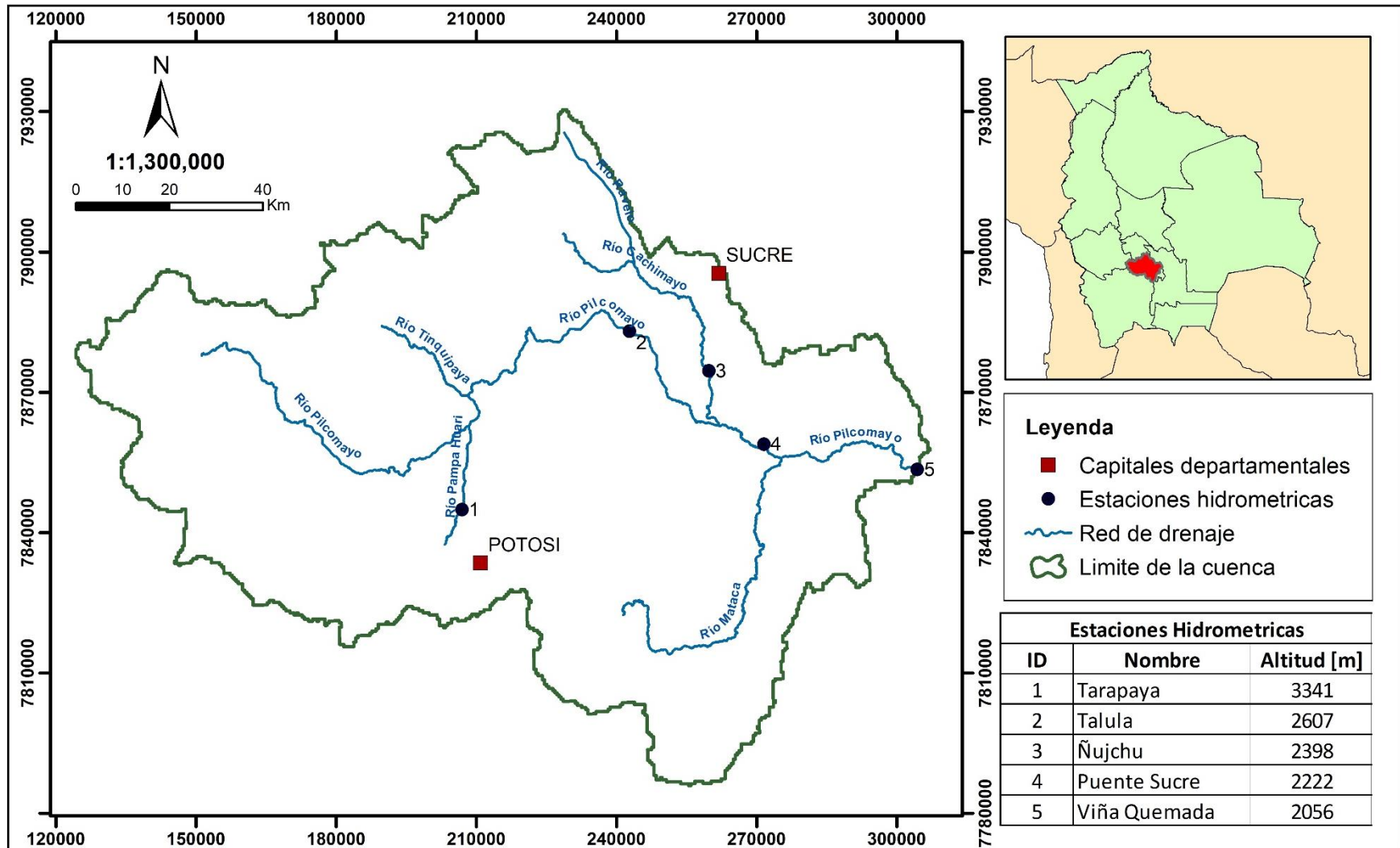


Figura 3.3 Limite de la cuenca y red de drenaje del rio Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada.

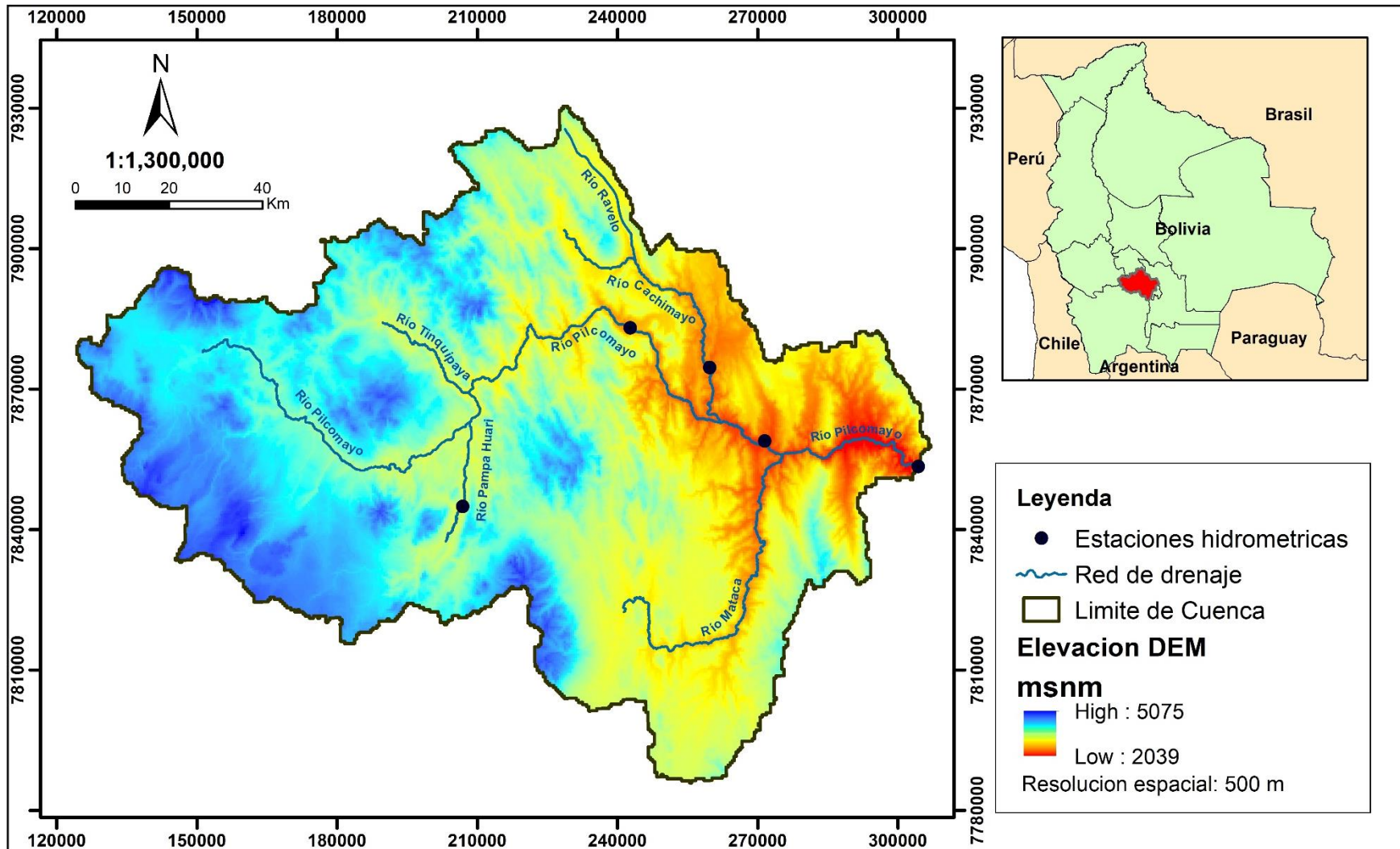


Figura 3.4 Modelo de Elevación digital de la cuenca.

3.4. REPRESENTACION DE LOS TIPOS DE SUELO

La caracterización de los tipos de suelos existentes en la cuenca fue realizada a partir del mapa de tipo de suelos de la Organización de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), (obtenido del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia), cuya clasificación fue realizada en base a la metodología desarrollada por la misma organización. En la cuenca encontramos los siguientes tipos de suelo (Callaú Medrano, 2016):

- **Bk2-b:** Referido a suelos Cambisoles cálcicos, este tipo de suelos suelen tener cambios de color, estructura y/o consistencia resultantes de la meteorización, presentan un fuerte acumulación de carbonato cálcico, ocupa aproximadamente el 12% de la superficie de la cuenca, específicamente en la parte baja de la misma, presenta un o más de las propiedades siguientes: concentraciones de cal blanda pulverulenta en los 125 cm superiores, son calcáreos al menos entre los 20 y los 50 cm superiores, carecen de propiedades vérticas (característica de suelos arcillosos con grietas y cuñas); carecen de propiedades hidromórficas en los 100 cm superiores y carecen de horizonte permanentemente helado en los 200 cm superiores.
- **I-Tv-c:** Representa suelos Litosoles y Andosoles vítricos, los primeros en mayor proporción que los subsiguientes, presentan roca dura a muy poca profundidad y son formados a partir de mariales ricos en vidrio volcánico que por lo común presentan un horizonte superficial de color oscuro, se extienden aproximadamente el 41% de la superficie de la cuenca ocupando casi toda la parte Oeste, Noroeste, Sud y Sudoeste (regiones montañosas), la profundidad de este tipo de suelos está limitada por un estrato de roca coherente dura y continua, carecen de consistencia untuosa (comportamiento muy extraño a la presión: cambia por presión del estado sólido plástico a estado licuado) y/o tienen una textura más gruesa que la franco-limosa, según el promedio ponderado para todos los horizontes hasta los 100 cm superiores.
- **I-c:** Suelos Litosoles que presentan roca muy dura a poca profundidad, representan aproximadamente el 30% de la superficie de la cuenca y en general se encuentran adyacentes a los descritos en el punto anterior, tienen la característica de presentar

suelos cuya profundidad está limitada por un estrato de roca coherente dura y continua en los 10 cm superiores.

- **Lc6-c:** Suelos de tipo Luvisoles crómicos, se encuentran en la región central de la parte alta de la cuenca extendiéndose alrededor del 11% se su superficie, contiene una red iluvial estratificada de arcillas, los aumentos de contenido de arcillas se producen en una distancia vertical de 30 cm o menos, carece de horizonte cálcico y de propiedades hidromórficas en los 50 cm superiores.
- **GL:** Proviene de la palabra Glacial, representan los picos más altos de la cuenca conformando aproximadamente el 4% de la cuenca estudiada.

Conforme al mapa, se obtuvo una base de datos externa adquirida del modelo MWSWAT, disponible en la página web oficial del modelo SWAT, esta base de datos externa incluye datos de las mismas propiedades comprendidas en base de datos del SWAT y además cuenta con una base de datos con información de las principales propiedades físicas y químicas del suelo. Para este estudio en particular se extrajo la información de textura del suelo. A continuación se presenta un resumen (Tabla 3.2) con las unidades de tipo de suelo según la FAO y su extracción de textura de suelo basado en la base de datos anteriormente mencionada y comparada con los metadatos extraídos del mapa, además del mapa de tipo de suelo correspondiente a la cuenca de estudio (Figura 3.5):

Tabla 3.2 Comparación de propiedades entre la base de datos y el mapa con el área extendida por cada tipo de suelo y textura de suelo adoptada. (Callaú Medrano, 2016)

Tipo de suelo FAO	% Arena		% Limo		% Arcilla		Textura de suelo adoptada	Área [km ²]	Área %
	Mapa	Base de datos	Mapa	Base de datos	Mapa	Base de datos			
I-c-5548	45	40	31	37	24	23	Franco Arcillo Arenoso	4084.4	30.24
I-Tv-c-5542	50	42	38	42	12	16		5649.7	41.9
Lc6-c-5587	49	42	22	27	29	30		1449.4	10.77
Bk2-b-5414	44	40	31	39	25	21		1710.5	12.73

Cap. 3 Descripción y Caracterización Física de La Cuenca de Estudio

GL-6998	-	70	-	25	-	5	Glaciar	562.6	4.35
TOTAL								13456.65	100

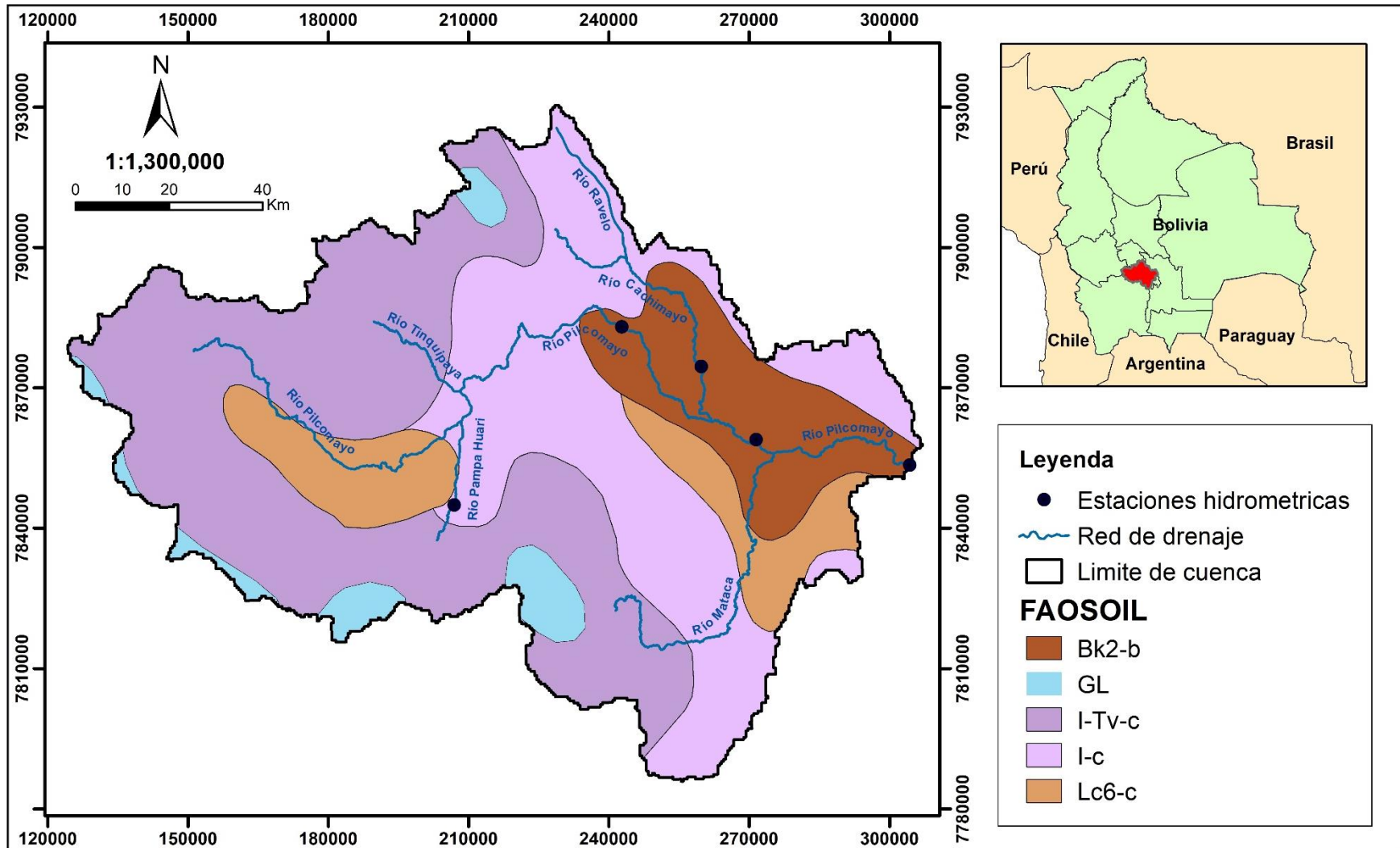


Figura 3.5 Tipos de suelo según la FAO existentes en la cuenca.

3.5. REPRESENTACION DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO

La topología de cobertura de suelo se realizó a partir del mapa mundial de cubierta de suelo obtenida del sitio web de la Agencia Espacial Europea (ESA) , el cual fue definida en el Sistema de Clasificación de Cobertura Vegetal (LCSS) desarrollado por la Administración de Alimentación y Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas (UN). Este producto se encuentra en formato tif y su resolución es de 300 m por 300 m de pixel aproximadamente. Otra característica útil de UN-LCCS es que está diseñado para realizar una clasificación jerárquica ajustable para describir las clases de Cobertura Vegetal. El resultado de la clasificación para este estudio cuenta con 22 clases principales y 10 sub-clases disponibles.

Para el propósito del presente proyecto se realizó una clasificación en la que se agruparon las 22 clases de ESA: La clasificación resultante tiene 9 clases: agricultura (agriculture), bosque (forest), herbácea (grassland), humedales (wetland), matorrales (shurbland), vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (other/bare), cuerpos de agua (water), nieve/glaciar (snow/ice), y centros poblados/urbano (settlement). Los arbustos, vegetación escasa, zonas desnudas y agua se unen en una clase general ‘otra’. A continuación se presenta un cuadro Tabla 3.3 que muestra el resultado de la clasificación anteriormente mencionada con su respectivo valor correspondiente al mapa de uso de suelo presentado más adelante (Figura 3.6):

Tabla 3.3 Cobertura de suelo según el mapa de ESA y su correspondiente adopción para el siguiente estudio.

Valor en mapa (Figura 3.6)	Cobertura de Suelo (ESA)	Agrupación para el presente estudio	Área [Km2]	Área %
0	Sin Datos	Otra	0	0
10	Suelo agrícola, de secano	Agricultura	223.34	1.66
11	Cubierta herbácea		17.71	0.13
12	Bosque o arbusto		0	0
20	Suelo agrícolas regadas o post-inundaciones		0	0
30	Mosaico agrícola (> 50%) / vegetación natural (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (<50%)		18.18	0.14
40	Mosaico vegetación natural (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (> 50%) / agrícola (<50%)	Otra	113.8	0.85

Cap. 3 Descripción y Caracterización Física de La Cuenca de Estudio

50	Bosque de Iatifoliadas perennifolia (> 15%)		4.73	0.04
60	Bosque de Iatifoliadas caducifolio (> 15%)		0.46	0.003
61	Bosque de Iatifoliadas caducifolio, cerrado (> 40%)		0.93	0.01
62	Bosque de Iatifoliadas caducifolio, abierto (15-40%)		0	0
70	Bosque de coníferas perennifolia (>15%)	Bosque	0	0
71	Bosque de coníferas perennifolia, cerrada (>40%)		0	0
72	Bosque de coníferas perennifolia, abierta (15-40%)		0	0
80	Bosque de coníferas caducifolio (>15%)		0	0
81	Bosque de coníferas caducifolio, cerrada (>40%)		0	0
82	Bosque de coníferas caducifolio, abierta (15-40%)		0	0
90	Bosque mixto (de hoja ancha y de hoja afilada)		0	0
100	Mosaico árboles y matorral (>50%)/Herbácea (<50%)	Pradera	145.15	1.08
110	Mosaico Herbácea (>50%)/árboles y matorral (<50%)		377.58	2.8
120	Matorral		2166.03	16.08
121	Matorral perennifolio	Matorral	0	0
122	Matorral caducifolio		0	0
130	Pastizales	Pradera	4772.69	35.45
140	Líquenes y musgos		0	0
150	Vegetación escasa (árbol/matorral/herbácea) (<15%)		3485.1	25.88
151	Bosque escaso (<15%)	Otra	0	0
152	Matorral escaso (<15%)		0	0
153	Herbácea escasa (<15%)		249.49	1.85
160	Bosque inundado, fresco o agua salina		0	0
170	Bosque inundado, agua salina	Humedales	0	0
180	Matorral o herbácea inundado, agua dulce / salina		0.46	0.003
190	Asentamiento humano	Urbano	26.43	0.2
200	Suelo desnudo		1857.27	13.79
201	Suelo desnudo consolidados	Otra	0	0
202	Suelo desnudo no-consolidados		0	0
210	Cuerpos de agua	Agua	5.94	0.04
220	Nieve y hielo permanente	Hielo/Nieve	0	0
TOTAL			13456.65	100

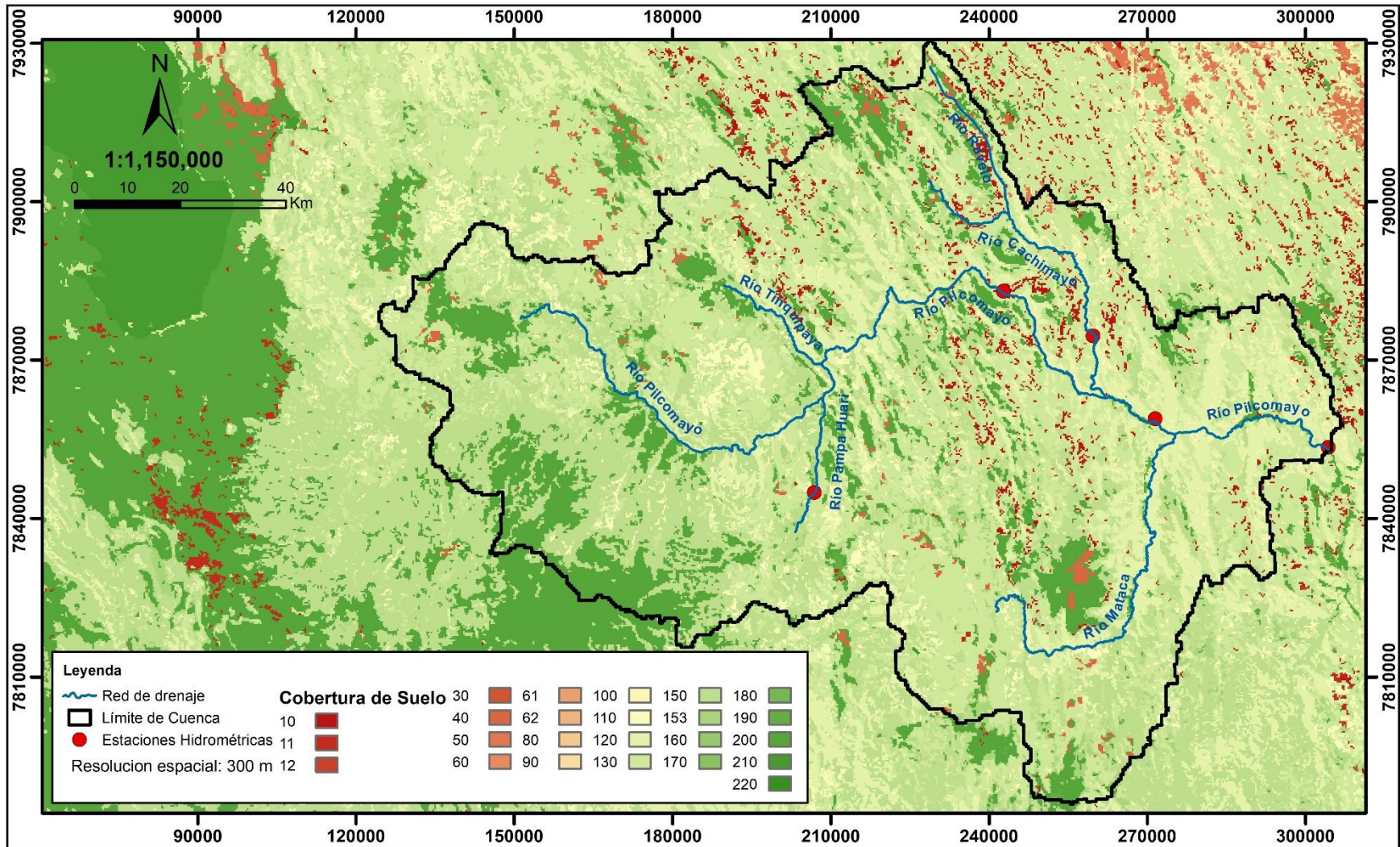


Figura 3.6 Mapa de uso y cobertura de suelo de la cuenca.

3.6. CARACTERIZACION DE LAS GRADIENTES DE PENDIENTE

Para la representación de las pendientes se adoptaron 4 clases de pendiente: llanura (0-1%), pendiente baja (1-5%) pendiente moderada (5-30%) y pendiente escarpada (>30%). Estas 4 clasificaciones son agrupaciones de la clasificación presentada en el documento de la FAO: Guía para la descripción de suelos, publicado en el 2009.

A continuación la Tabla 3.4 presenta la con la clasificación de pendientes de la FAO y su equivalencia adoptada para el presente estudio:

Tabla 3.4 Clases de gradiente de la pendiente según la FAO y sus respectivas equivalencias adoptadas para el presente estudio.

Según FAO			Agrupación adoptada	
Clase	Descripción	Rango %	Descripción adoptada para el presente estudio	Rango %
1	Plano	0-0.2	Llanura	0-1
2	Nivel	0.2-0.5		
3	Cercano al nivel	0.5-1		
4	Muy ligeramente inclinado	1-2	Pendiente baja	1-5
5	Ligeramente inclinado	2-5		
6	Inclinado	5-10		
7	Fuertemente Inclinado	10-15	Pendiente moderada	5-30
8	Moderadamente escarpado	15-30		
9	Escarpado	30-60	Pendiente escarpada	>30
10	Muy escarpado	>60		

Seguidamente en la Figura 3.7 se puede apreciar el mapa de caracterización de pendientes de la cuenca, con la clasificación adoptada mencionada anteriormente:

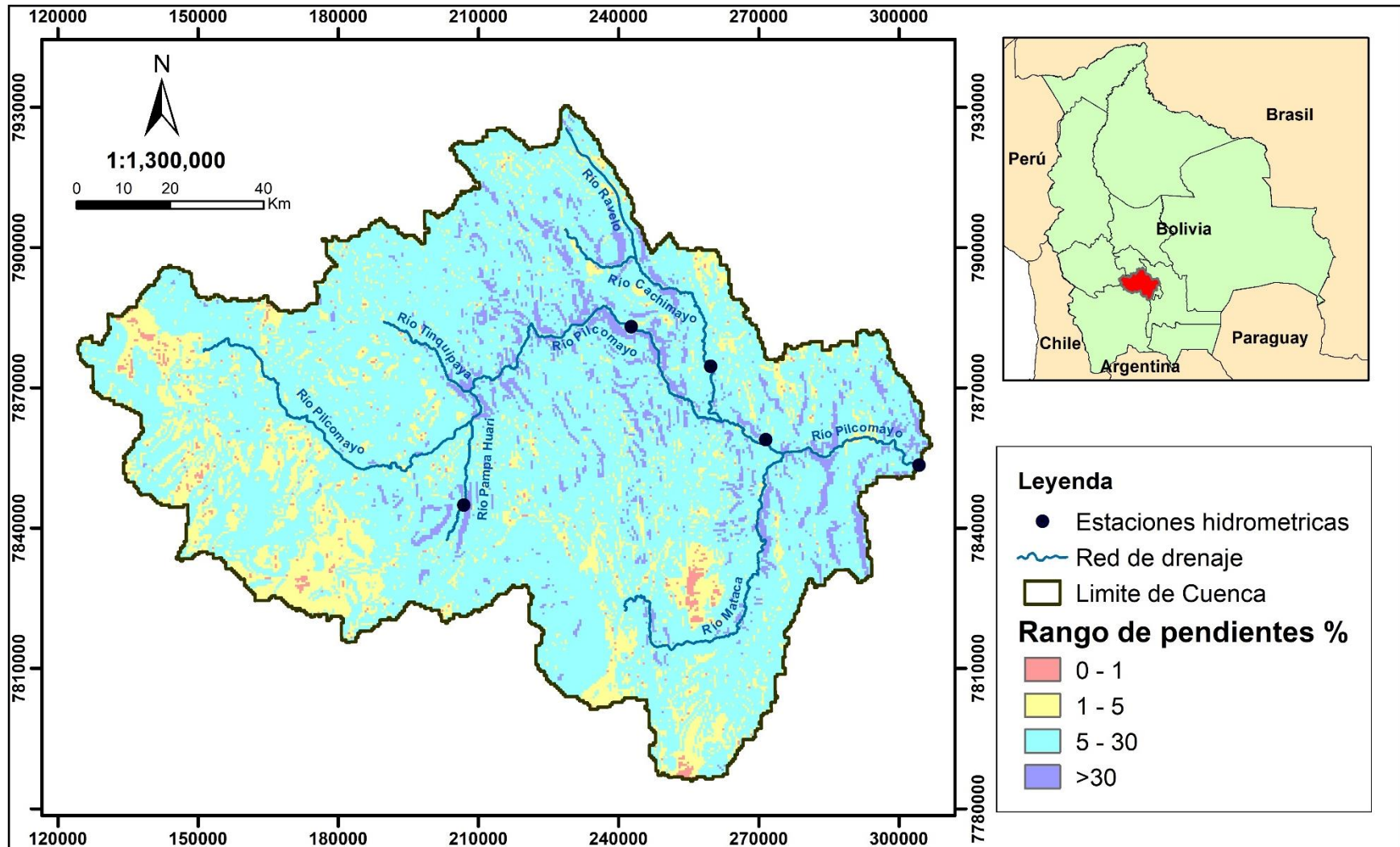


Figura 3.7 Clasificación de las pendientes adoptadas.

CAPITULO IV

4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

4.1. RECOPIACION Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACION METEOROLOGICA

Los datos meteorológicos correspondientes a precipitación y temperatura usados en el siguiente proyecto son los generados por un trabajo similar realizado por Callaú Medrano en 2016. (Cuantificación Del Potencial Hídrico De Una Cuenca A Gran Escala – Aplicación A La Cuenca Del Río Pilcomayo Hasta La Estación Hidrométrica Viña Quemada). Esto con el propósito de cumplir con el objetivo general del presente estudio, que es evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos SWAT, WEAP y CHAC, en el contexto de que es ideal usar los mismos datos de entrada en la comparación de modelos.

Callaú en 2016 realizó una modelación hidrológica a nivel diario (Cuantificación Del Potencial Hídrico De Una Cuenca A Gran Escala – Aplicación A La Cuenca Del Río Pilcomayo Hasta La Estación Hidrométrica Viña Quemada), de la misma cuenca estudiada en el presente trabajo, en el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT). En su proyecto Callaú seleccionó 64 estaciones meteorológicas (administradas por SENAMHI y los aeropuertos por AASANA), que se encuentra dentro y alrededor de la cuenca. Dichas estaciones contaban con registros de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar y evaporación. De estas 64 estaciones, las 64 cuentan con registros de precipitación y 31 con registros de temperatura, y en su mayoría con una buena cantidad de registro de datos en el periodo de simulación (1976-2011).

Las ilustraciones presentadas a continuación (Figura 4.1 y Tabla 4.1) muestran la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas por Callaú en su relleno de datos.

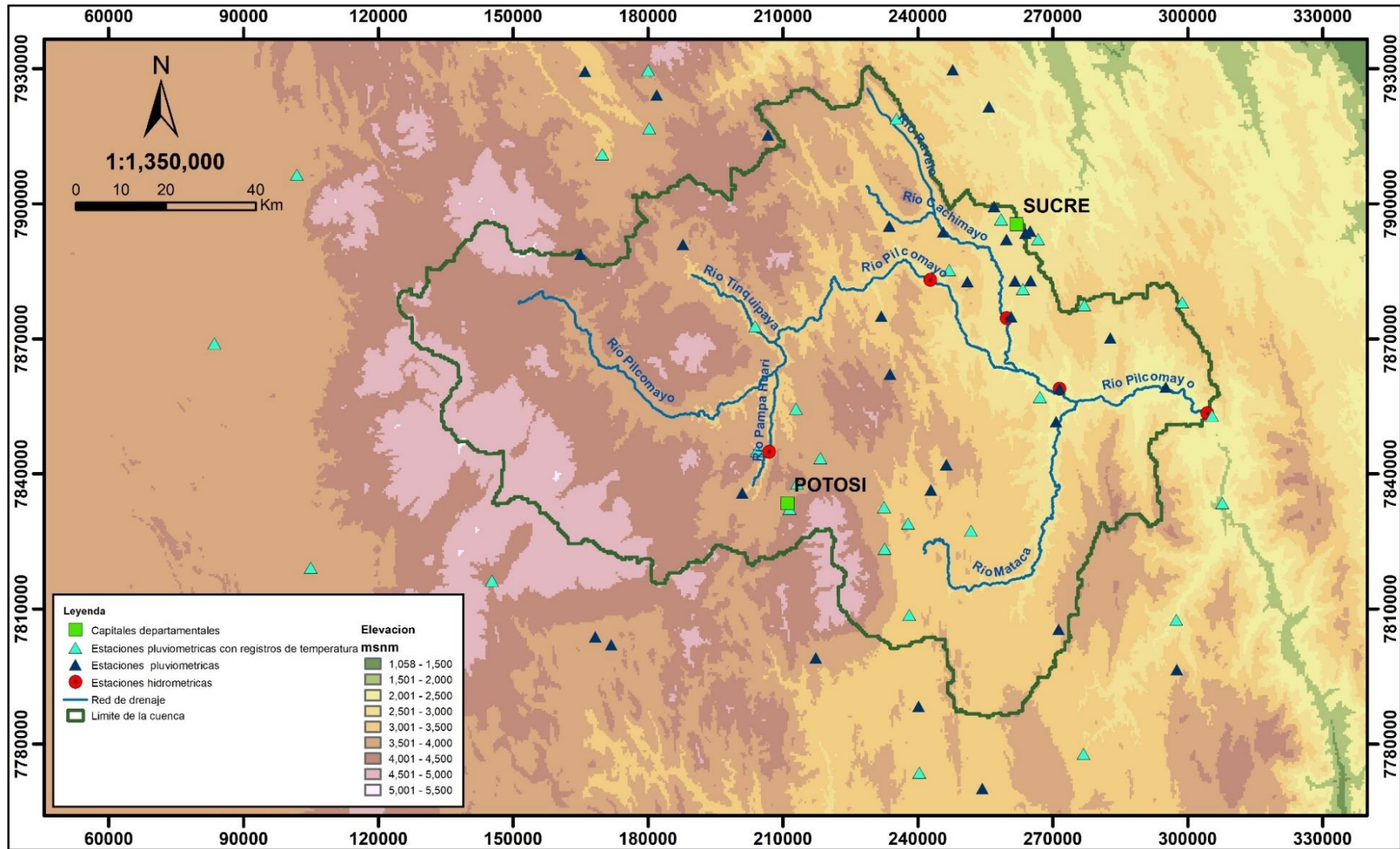


Figura 4.1 Ubicación y distribución espacial de las estaciones meteorológicas e hidrométricas en la región de la cuenca (las estaciones meteorológicas son las usadas por Callaú para el relleno de series de datos).

Intervalo de Elevación (m.s.n.m.)	Área (km ²)			Número de Estaciones Pluv. y de Temp.	Densidad estaciones por cada 100 km ²	Número de estaciones Pluv.	Densidad estaciones por cada 100 km ²
	Abs.	% Cuenca	% Acum.				
2039-2500	380.81	2.83	2.83	3	0.79	11	2.89
2501-3000	1532.01	11.38	14.21	5	0.33	9	0.59
3001-3500	3655.52	27.17	41.38	12	0.33	24	0.66
3501-4000	3515.82	26.13	67.51	8	0.23	17	0.48
4001-4500	3202.09	23.80	91.30	3	0.09	3	0.09
4501-5075	1170.40	8.70	100	0	0	0	0
TOTAL	13456.65	100		31	0.23	64	0.47

Tabla 4.1 Distribución de las estaciones de monitoreo respecto a la elevación de la cuenca.

La ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas y su disponibilidad de datos se encuentran en el Anexo A del presente documento.

Para la precipitación y temperatura Callaú relleno los datos disponibles de los registros anteriormente mencionados a nivel mensual y procedió a desagregar estos para adquirir datos a nivel diario. Para el relleno de datos utilizó la técnica de regresión lineal múltiple, realizado con el programa HEC4 (desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos). Los datos rellenos de precipitación fueron evaluados en base a la extracción aleatoria de 24 meses de datos, una por año diferente y para distintas estaciones analizadas, los rellenos realizados para esos 24 meses son completados y comparados con los datos observados.

Seguidamente se presentan tablas extraídas del trabajo de Callaú (Tabla 4.2 y Tabla 4.3) con las estaciones usadas para la evaluación de las series simuladas y los coeficientes de bondad de ajuste que avalan dichas series simuladas.

Tabla 4.2 Resultados de los rellenos de datos de precipitación realizados por Callaú en HEC4.

Estación	Fecha	Valor obs.	Valor sim. HEC 4	Estación	Fecha	Valor obs.	Valor sim. HEC 4
Challapata	nov-77	68.7	55	Punilla	abr-88	20.2	8
Cuchu Ingenio	mar-78	40.7	67	Kespillajta	oct-90	25.7	18
Ravelo	mar-79	174.4	212	Potosí Aeropuerto	nov-91	44	61
Quila Quila	abr-80	20.2	25	Sucre Aeropuerto	sep-92	19	4
Quillacas	feb-81	74	114	Pojpo	mar-93	97	88
Potolo	ene-82	40.4	52	Chaquilla	ene-94	51.4	71
Betanzos	feb-83	65.4	41	Sucre SENAMHI	nov-96	57.7	52
Challviri	dic-84	70.1	92	Chico Chico	oct-97	17.3	0
Chinoli	abr-85	80.3	62	Reloj	nov-98	85.4	83
Maragua	feb-86	136.7	128	Potosí Los Pinos	ene-00	117.8	148
Chaqui	mar-87	135.9	123	Cachimayu	mar-01	81.6	114
Talula	dic-88	99.5	98	El cortijo	ene-02	81	57

(Callaú Medrano, 2016)

Tabla 4.3 Resultados de los cálculos estadísticos correspondientes a la evaluación de los rellenos mensuales de precipitación.
(Callaú Medrano, 2016)

Coefficientes de bondad de ajuste	HEC4
MAE (Error Medio Cuadrático)	17.3
NSE (Eficiencia de Nash-Sutcliffe)	0.75
R (Coeficiente de calibracion)	0.84

Como puede observarse en la Tabla 4.3 los coeficientes de bondad de ajuste, poseen un grado aceptable de precisión. Más adelante Callaú sometió las series de precipitación simuladas a pruebas que miden la homogeneidad de series de datos, siendo estos: Prueba estadística de t de Student y Prueba estadística de Cramer, ambas pruebas demostraron la consistencia de las series, de esta manera se garantiza la confiabilidad y calidad de las series de precipitación y temperatura usadas para el presente proyecto (Callaú Medrano, 2016).

En lo referente a datos de precipitación si bien Callaú usó las 64 estaciones para rellenar los datos faltantes, tan solo 34 contaban con registros confiables (más del 50%), entonces para su modelación Callaú alimentó su modelo con los datos de estas 34 estaciones, más otras 7 estaciones que se encontraban en una posición geográfica cercana a los centroides de las subcuencas definidas por el. Para el presente estudio se usaron los registros de estas 41 estaciones pluviométricas al igual que Callaú en su respectivo estudio.

En lo concerniente a datos de velocidad de viento, humedad relativa y fracción de nubosidad se usaron las mismas series de datos que en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia de 2017.

4.2. RECOPIACION Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACION HIDROMETRICA

La cuenca estudiada cuenta con 5 estaciones hidrométricas con registros en su interior, de las cuales se presentan su ubicación geográfica en la Figura 4.1 y sus datos más importantes en la Tabla 4.4 presentada a continuación:

Tabla 4.4 Ubicación de estaciones hidrométricas con registros dentro la cuenca. (Callaú Medrano, 2016)

Estación	Río	X (m)	Y (m)	Altura (msnm)	Administración
Tarapaya	Río Pampa Huari	206904	7844963	3341	SENAMHI - Po
Viña Quemada	Río Pilcomayo	304327	7853501	2056	SENAMHI - Ch
Puente Sucre	Río Pilcomayo	271493	7858945	2222	SENAMHI - Ch
Ñujchu	Río Cachimayo	259721	7874620	2398	SENAMHI - Ch

Talula	Río Pilcomayo	242729	7883095	2607	SENAMHI - Ch
--------	---------------	--------	---------	------	--------------

En lo referente a la información hidrométrica, también se usaron los datos generados por el proyecto de Callaú realizado en 2016 (Cuantificación Del Potencial Hídrico De Una Cuenca A Gran Escala – Aplicación A La Cuenca Del Río Pilcomayo Hasta La Estación Hidrométrica Viña Quemada). De las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca, 4 cuentan con registros de lecturas de regla limnimétrica y batimetrías a nivel diario siendo estas: Viña Quemada, Ñujchu, Talula y Tarapaya, por lo que es posible determinar de estas sus series de caudales. A continuación se presenta una descripción de estas estaciones extraída del trabajo de Callaú:

- **Viña Quemada.-** Escogida como la salida de la cuenca estudiada, sus registros de lecturas de regla limnimétrica y aforos realizados disponibles en este estudio son desde el 5/12/1977 hasta 21/03/2008, durante este periodo existen meses sin registros de datos, sin embargo el más relevante es desde 14/10/1998 al 30/09/2005 en el cual no se realizó ningún trabajo de medición en la estación, respecto a batimetrías realizadas en la estación, durante el periodo de análisis, se cuenta con 14 levantamientos batimétricos.
- **Ñujchu.-** Ubicada sobre el río Cachimayo a aproximadamente 12 km de la confluencia de este con el río Pilcomayo, presenta registros de regla limnimétrica desde 10/08/1973 al 31/05/2008, los aforos ejecutados se encuentran en el periodo: Agosto de 1973 a Mayo de 2008, al igual que la estación Viña Quemada, el periodo de 1999 a 2005 no existe ningún registro realizado, existen 12 levantamientos batimétricos disponibles en esta estación.
- **Talula.-** Instalada sobre el río Pilcomayo a aproximadamente 28 km de la confluencia de este con el río Cachimayo, la disponibilidad de sus registros de lecturas limnimétricas corresponden al periodo 1/06/1975 – 31/05/2008, los aforos, al periodo Enero de 1975 a Mayo de 2008; desde el año 1999 al 2005 no existe ninguna lectura de variables pluviométricas, hasta Enero del año 2004 existen 12 levantamientos batimétricos en la sección transversal característica de la estación de medición.

- **Tarapaya.-** Ubicada sobre el río Pampa Huari, se encuentra a aproximadamente a 18 km de la confluencia de este con el río Pilcomayo, las lecturas limnimétricas corresponden al periodo 1/02/1990 - 31/12/2010, los aforos al periodo Noviembre de 2005 a Octubre de 2010 y no se cuenta con ningún dato de levantamientos batimétricos.

De estas cuatro estaciones, Callaú realizó un análisis exploratorio efectuada a los registros de datos hidrométricos, en el cual identificó periodos donde las series de datos existían registros inconsistentes (descalibración en la series de datos, identificación de datos dudosos e identificación de periodos sin registro realizado). Posteriormente realizó gráficas de lecturas limnimétricas y aforos de caudales líquidos, ambas en función del tiempo, en los cuales pueden apreciarse cambios rotundos en las variables analizadas, atribuidas a posibles cambios morfológicos del río, alteración de la posición de la regla limnimétrica utilizada para las mediciones, modificación de la metodología de medición de variable, entre otros.

Seguidamente Callaú procedió con la obtención de caudales líquidos, elaborada en base a las series de aforos líquidos, a las lecturas limnimétricas de cada estación y a la aplicación de la ecuación de ajuste de potencia:

$$Q = a(H - S_o)^b \quad (4.1)$$

Donde Q es el caudal obtenido para el nivel de agua, H , S_o , a y b son constantes determinadas mediante lecturas de reglas limnimétricas observadas y registros de descarga. El valor de S_o es el nivel de agua que corresponde a un caudal cero (0) en la corriente, es un parámetro hipotético y no puede ser medido (Villazón Gomez, 2011).

Seguidamente Callaú realizó las curvas de descarga y sus respectivas calibraciones para las 4 estaciones: Viña Quemada presenta 45 curvas, Talula 41 curvas, Ñujchu 51 curvas y Tarapaya 2 curvas, esta última tiene dicha cantidad de curvas debido al corto periodo monitoreado, tanto en lo referente a aforos como a registros de lecturas limnimétricas. Luego de obtenidas las series de caudales medios diarios, Callaú procedió a la verificación de estas con las curvas de descarga calibradas.

Para el presente proyecto las series de caudales usadas fueron las correspondientes a Talula, Ñujchu y Viña Quemada (por presentar mayor cantidad de datos en el periodo de simulación). Estas series diarias extraídas del trabajo de Callaú fueron agregadas para convertirlas a series mensuales.

Para obtener mayor información acerca de los datos hidrométricos y relleno de datos meteorológicos se recomienda ver el trabajo realizado por Callaú (Callaú Medrano, 2016).

4.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS METEOROLOGICOS

4.3.1. PRECIPITACION

Para los datos de precipitación, se usaron las series de 38 de las 41 estaciones pluviométricas mencionadas en el punto 4.1, las estaciones de Quillacas, Rio Mulato y Alamos fueron excluidas porque pese a que se tomaron en cuenta en la definición de los polígonos de Thiessen, no presentaron una superficie incidente en la cuenca. Estas series a nivel diario fueron agregadas para contar con series a nivel mensual.

Posteriormente para la obtención de precipitaciones promedio se recurrió al método de polígonos de Thiessen tanto para la modelación con WEAP como para la modelación con CHAC. Este método consiste en atribuir un factor de peso a los totales de precipitación en cada estación proporcionales al área de influencia de cada uno. Las áreas de influencia están determinadas por las líneas rectas, equidistantes entre cada par de estaciones contiguas, interceptadas entre sí (Bautista Condori & La Fuente Pillco, 2014). Una vez que se tiene los polígonos de Thiessen se puede aplicar la siguiente expresión para calcular la precipitación media de la cuenca:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i * P_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.2)$$

Donde:

\bar{P} = Precipitación promedio de la cuenca

n = Numero de estaciones pluviométricas

P_i = Precipitación en el pluviómetro más cercano en mm

A_i = Área de influencia correspondiente a cada estación

Subsiguientemente se expone en un mapa (Figura 4.2) la delimitación de las subcuencas y definición de los polígonos de Thiessen, posteriormente se describe cómo fueron adaptadas estas definiciones en las modelaciones con WEP y CHAC:

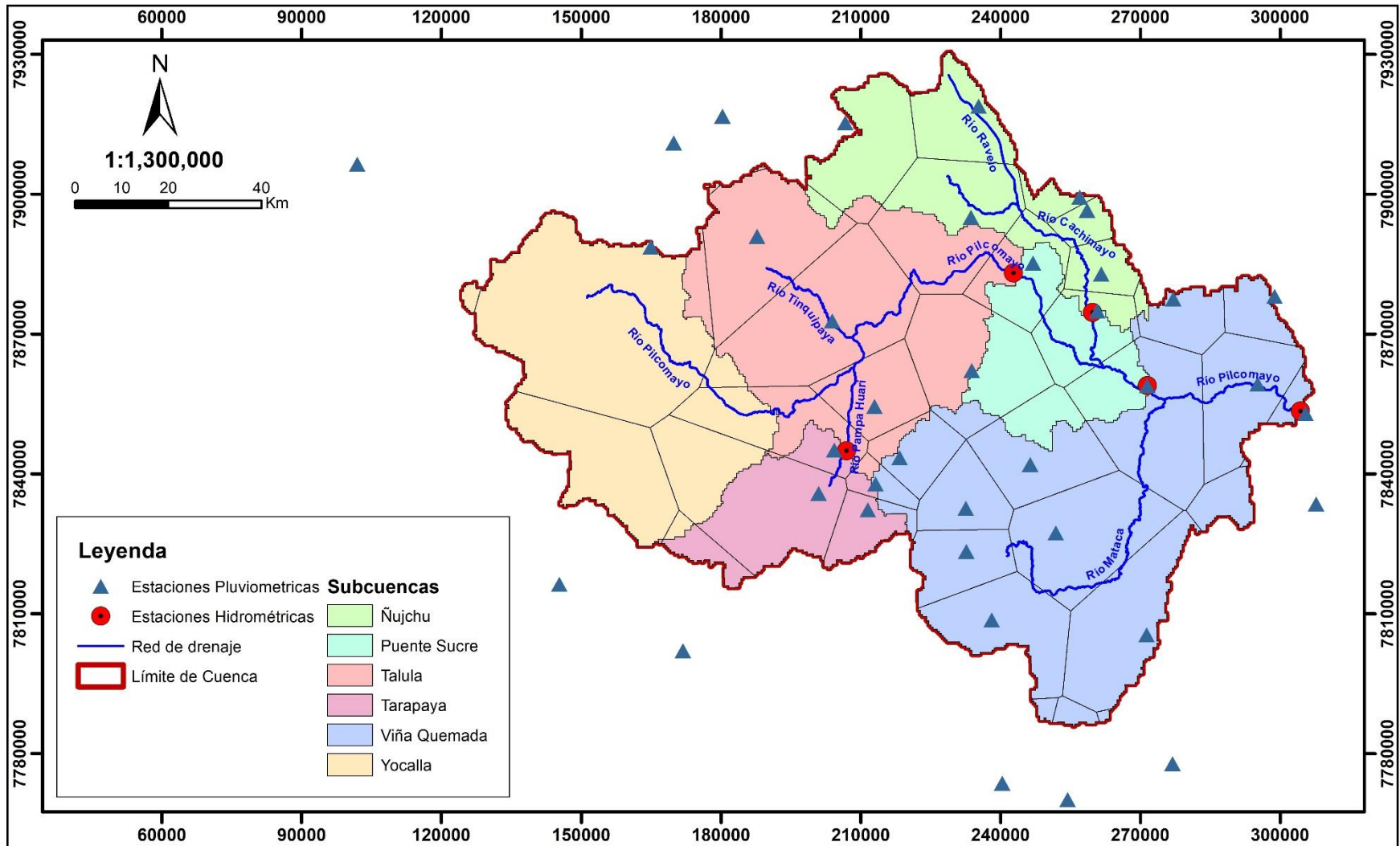


Figura 4.2 Polígonos de Thiessen definidos para las modelaciones con WEAP y CHAC.

4.3.1.1. PRECIPITACION PROMEDIO PARA MODELACION CON WEAP

Para la modelación con WEAP se dividió la cuenca en 6 subcuencas o unidades hidrográficas, definidas según la clasificación Pfafstetter. Más adelante se determinó una precipitación promedio (mediante el método de polígonos de Thiessen) para cada una de estas subcuencas. Estas 6 subcuencas fueron denominadas: Yocalla, Tarapaya, Talula, Ñujchu, Puente Sucre y Viña Quemada (ver Figura 4.2).

4.3.1.2. PRECIPITACION PROMEDIO PARA MODELACION CON CHAC

Con respecto a los datos de precipitación para la modelación con CHAC, se calculó la precipitación promedio (mediante el método de polígonos de Thiessen) para tres cuencas (ver Figura 4.2), esto en función a que son tres las estaciones hidrométricas que sirvieron como puntos de calibración. Estas cuencas son:

- **Cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula:** Abarca las subcuencas de Yocalla, Tarapaya y Talula definidas para la modelación en WEAP.
- **Cuenca del río Cachimayu hasta la estación hidrométrica Ñujchu:** Que es la misma subcuenca denominada Ñujchu para la modelación con WEAP.
- **Cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada:** Es toda la cuenca estudiada en el presente estudio (comprende las seis subcuencas consideradas para la modelación con WEAP).

4.3.2. TEMPERATURA

Para los datos de temperatura se utilizaron los datos de 19 de las 31 estaciones generados por el trabajo de Callaú, estas 19 estaciones fueron seleccionadas porque se encontraban geográficamente dentro o cerca de la cuenca. Dichas series fueron extraídas a nivel diario y como temperatura máxima promedio y temperatura mínima promedio por lo que se procedió promediarlas y agregarlas para adquirir datos de temperatura media a nivel mensual.

La Tabla 4.5 muestra las estaciones meteorológicas usadas para la obtención de temperaturas promedio para cada subcuenca:

Tabla 4.5 Estaciones pluviométricas con registros de temperatura usadas para este estudio.

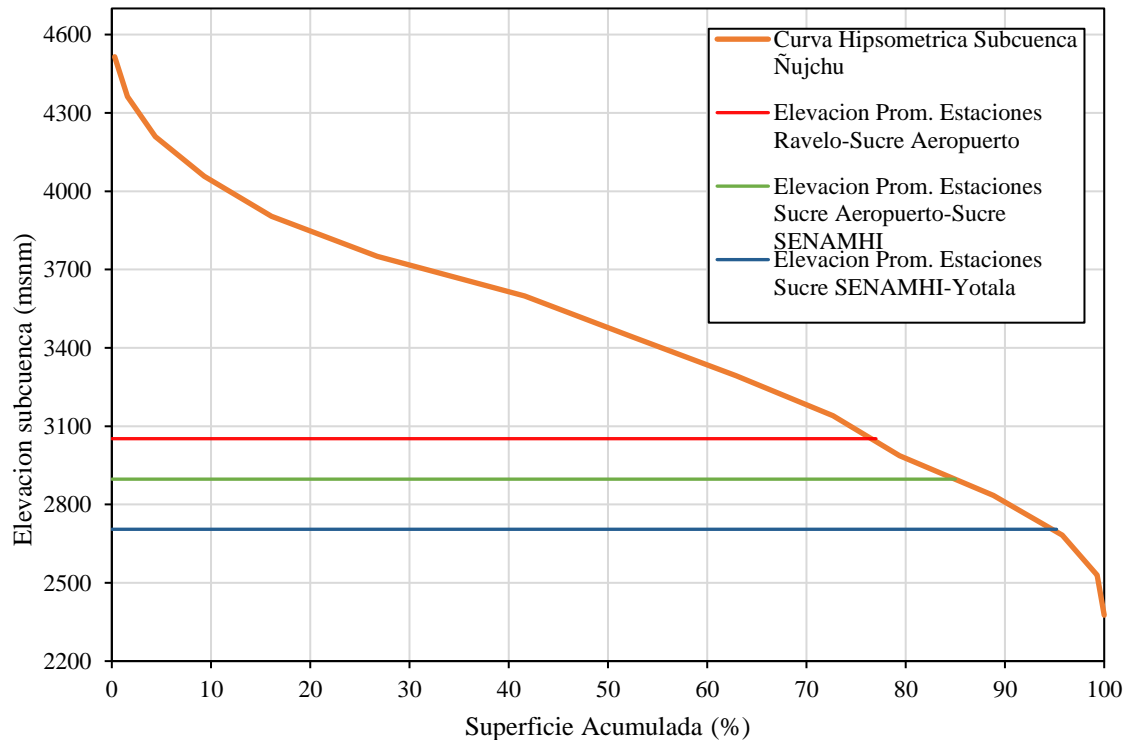
Subcuenca	Estación	Depto	Elevación (msnm)	Localización		Temperatura Prom. Anual [°C]
				Latitud	Longitud	
Viña Quemada	Samasa	Potosí	3650	-19.48	-65.68	11.83
	Potosí Aeropuerto	Potosí	4100	-19.53	-65.73	9.59
	Chaqui	Potosí	3550	-19.58	-65.55	11.51
	Challviri	Potosí	3370	-19.62	-65.50	8.95
	Chico Chico	Potosí	3625	-19.67	-65.55	11.65
	Puna	Potosí	3420	-19.80	-65.50	12.28
	Chinoli	Potosí	3450	-19.63	-65.37	11.9
	Alcantari	Chuquisaca	3100	-19.18	-65.12	13.65
	Tarabuco	Chuquisaca	3284	-19.18	-64.91	12.68
	Viña Quemada	Chuquisaca	2030	-19.41	-64.85	22.89
Ñujchu	Ravelo	Potosí	3200	-18.80	-65.51	12
	Sucre Aeropuerto	Chuquisaca	2904	-19.01	-65.29	14.59
	Yotala	Chuquisaca	2520	-19.15	-65.25	16.69
	Sucre SENAMHI	Chuquisaca	2890	-19.05	-65.22	16.32
Pte. Sucre	Talula	Chuquisaca	2859	-19.11	-65.41	16.27
Talula	Tinquipaya	Potosí	3200	-19.22	-65.82	13.19
	Yocalla	Potosí	3450	-19.38	-65.73	12.65
Tarapaya	Tarapaya	Potosí	3340	-19.47	-65.82	13.81
	Potosí Los Pinos	Potosí	3950	-19.58	-65.75	9.11
Yocalla						

Al igual que la precipitación era necesario tener una temperatura promedio para cada subcuenca. Para la obtención de series de temperatura media promedio de cada subcuenca se procedió a realizar dos metodologías descritas a continuación:

- a) **Curvas Hipsométricas:** Esta metodología fue aplicada a las subcuencas: Tarapaya, Talula, Ñujchu y Viña Quemada, denominada así porque consiste en extraer las curvas hipsométricas (elevación en [m] vs superficie acumulada en %) para cada subcuenca. Se partió del principio de que la temperatura varía en función a la elevación del terreno y que predomina en un rango de superficie variable, esta última variación estaría en función al número de estaciones con que se cuenten.

Primero se identificó las estaciones dentro o cerca de cada subcuenca y se ordenó estas de mayor a menor elevación, se calcularon promedios de elevaciones (obteniendo un promedio por cada dos estaciones), con estos promedios de elevación se ingresó a las curvas hipsométricas y se extrajeron datos de superficie acumulada. Por último estas fueron expresadas en decimales y por ser estas cifras referentes a superficies acumuladas se restaron de 1, estos datos obtenidos vendrían a ser las superficies que están bajo cada estación y fueron usadas como ponderadores de peso (similar al método de polígonos de Thiessen) para cada estación.

En la Tabla 4.5 (presentada anteriormente) se expone que estaciones fueron tomadas en cuenta para el análisis de cada subcuenca. Más adelante se presenta la curva hipsométrica para la subcuenca de Ñujchu en la Figura 4.3. En el Anexo A se presentan las curvas hipsométricas de las subcuencas de Talula, Tarapaya y Viña



Quemada

Figura 4.3 Curva hipsométrica de la subcuenca Ñujchu con el promedio de elevaciones de las estaciones que se encuentran próximas o en su interior.

b) Gradiente de temperatura: Metodología empleada para el procesamiento de serie de temperatura de las subcuencas restantes (Yocalla y Puente Sucre). Consiste en hallar un gradiente de temperatura con la altura (Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, & SEI, 2009). Para este propósito se determinó la Temperatura promedio anual de las 19 estaciones seleccionadas dentro la cuenca (ver Tabla 4.5) y con la elevación correspondiente a cada estación se ajustó a una recta obteniendo así el delta de temperatura equivalente a 0.6°C por cada 100 m ($0.0062^{\circ}\text{C}/\text{m}$).

El motivo para recurrir a esta metodología es la poca o nula existencia de estaciones dentro las subcuencas. La subcuenca de Yocalla no cuenta con estación alguna en su interior y la subcuenca Puente Sucre con tan solo la estación de Talula. En estos términos se escogió para la subcuenca de Yocalla la estación de Tinquipaya (por su cercanía geográfica). Por último se estimó la altura promedio de las dos subcuencas. La diferencia de estos promedios y las elevaciones correspondientes a la estación representativa de cada una de las dos subcuencas fue multiplicada por el gradiente de temperatura obteniéndose un valor de temperatura en $^{\circ}\text{C}$, el cuál fue restado (por ser menor la elevación de la estación representativa que la altura promedio de la subcuenca en ambos casos) de las series de temperaturas medias de las estaciones representativas.

A continuación se muestra la Figura 4.4, que expone la relación temperatura - altura de la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada, y el gradiente de temperatura con la altura estimado para la cuenca:

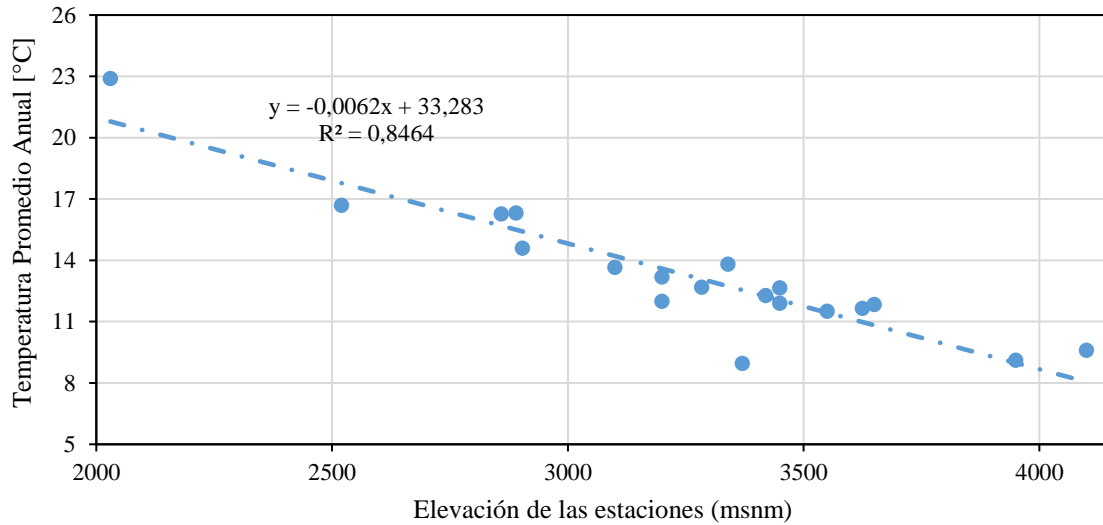


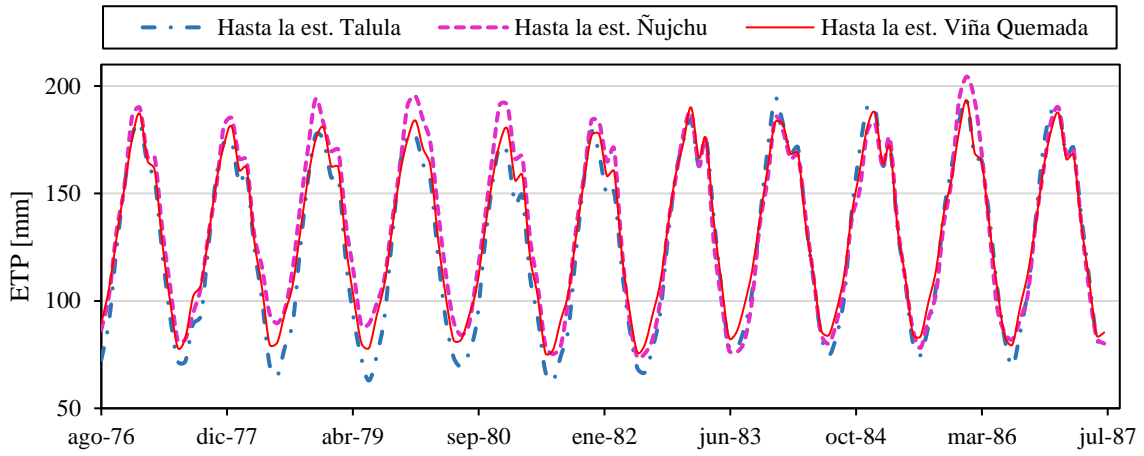
Figura 4.4 Relación temperatura - altura para la cuenca estudiada en el presente estudio, realizada a partir de las temperaturas anuales promedio presentadas en la Tabla 4.5.

4.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración se calculó en WEAP, obteniendo así seis series de ETP (una serie por cada subcuenca simulada). Estas mismas series fueron promediadas para la modelación con CHAC, el promedio de estas series se realizó asignando factores de peso de acuerdo al área de influencia de cada subcuenca. WEAP utiliza el método de la FAO 56 para estimar la evapotranspiración potencial (ETP), que es una modificación del método de Penman Monteith, cuyo procedimiento de cálculo ya fue descrito en el punto 2.7.2.1 del presente documento.

Para el cálculo de la ETP WEAP requiere de los datos de temperatura media, humedad relativa, velocidad de viento, y fracción de nubosidad. Todos estos parámetros excepto los de temperatura (cuyo procesamiento ya fue explicado en el punto 4.3.2) se cargaron al modelo de forma cíclica, es decir que se cargaron 12 valores representativos correspondientes a cada mes del año y estos fueron repetidos cíclicamente para cada año del periodo de simulación.

La Figura 4.5 expone la evapotranspiración potencial estimada para las cuencas simuladas con CHAC en el periodo de agosto de 1976 a julio de 2011. Las series de evapotranspiraciones potenciales calculadas para las subcuencas simuladas con WEAP se encuentran en el Anexo A.

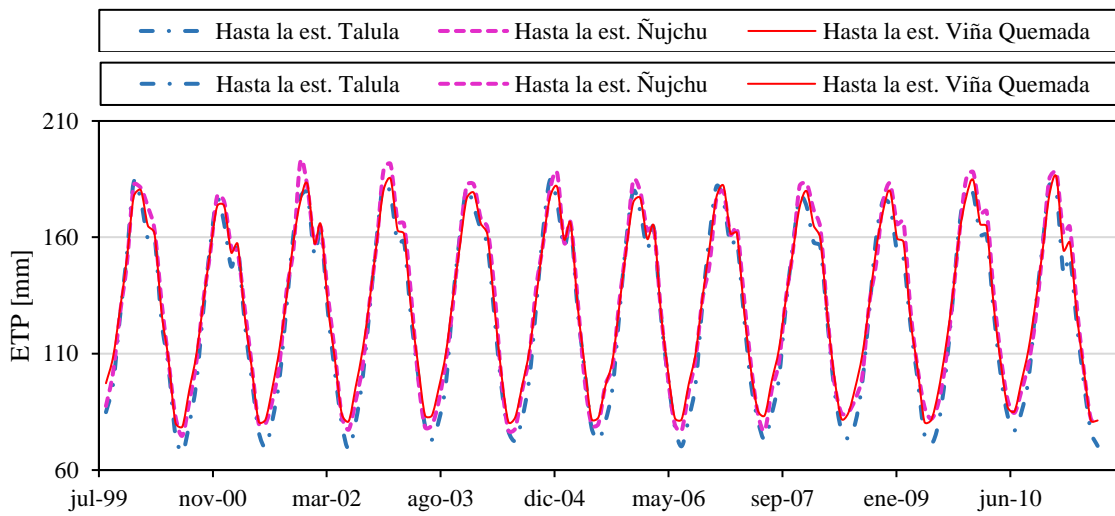


a)

b)

c)

Figura 4.5 Variación de la Evapotranspiración potencial de las tres cuencas modeladas en CHAC en todo el periodo de simulación. a) De agosto de 1976 a julio de 1987 b) De agosto de 1987 a julio de 1999 c) De agosto de 1999 a julio de 2011



CAPITULO V

5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA MODELACION HIDROLÓGICA CON WEAP

5.1. INTRODUCCION

Para la modelación con WEAP se definieron 6 subcuencas como ya se había mencionado anteriormente. Cada una de estas subcuencas son denominadas “catchments” en el modelo. La simulación se realizó con el modelo hidrológico SM de WEAP, cuyo procedimiento de cálculo es descrito en el punto 2.7.2 del presente documento. Los valores asignados inicialmente a los parámetros del modelo fueron asignados según la textura y uso de suelo asociada a cada parámetro, estas asociaciones son presentadas para cada parámetro en formato de tablas en el punto 2.7.2.2. El uso y tipo de suelo presentes en la cuenca son descritas en la sección 3.4 y 3.5 respectivamente del presente documento.

A continuación se presentan ilustraciones (Figura 5.1 y Tabla 5.1) de la modelación realizada en WEAP con sus respectivas características físicas y meteorológicas:

Tabla 5.1 División en subcuencas para modelación con WEAP.

Subcuenca	Area de aporte [Km ²]	Precipitación prom. Anual [mm]	Temperatura prom. Anual [°C]
Yocalla	2703.79	36.81	6.25
Talula	2923.76	41.94	12.70
Tarapaya	879.86	31.84	9.42
Ñujchu	1586.29	52.33	13.03
Puente Sucre	996.15	47.31	14.86
Viña Quemada	4366.80	40.37	12.44
TOTAL	13456.65		

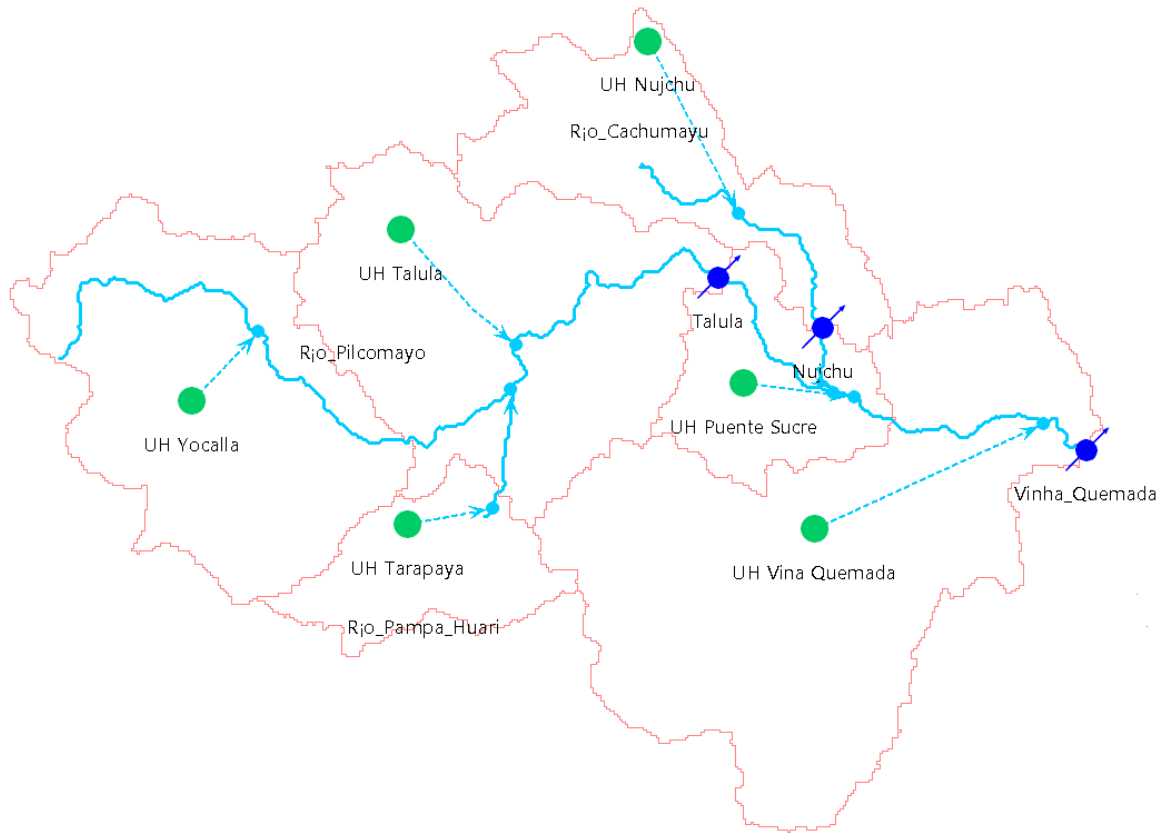


Figura 5.1 Esquema de modelación en WEAP. Las UH representan las subcuencas consideradas.

5.2. CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE WEAP

En cumplimiento del objetivo general del presente estudio que es evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos continuos el periodo de calibración definido fue el mismo que Callaú considero para su modelación con SWAT en su trabajo (Callaú Medrano, 2016). La calibración fue realizada en tres puntos concernientes a las estaciones hidrométricas de Ñujchu, Talula y Viña Quemada. El periodo de calibración definido es de agosto de 1978 a julio de 1985 y el periodo de validación corresponde de octubre de 2005 a marzo de 2008.

La calibración fue realizada de forma manual con la herramienta Supuestos Clave del modelo de WEAP, esta función nos permite cambiar simultáneamente todos los parámetros de todos los catchments del modelo y facilita la tarea de la asignación de valores iniciales, también es útil para tener una modelación homogénea. Una guía de cómo usar esta herramienta se encuentra en el Anexo B.

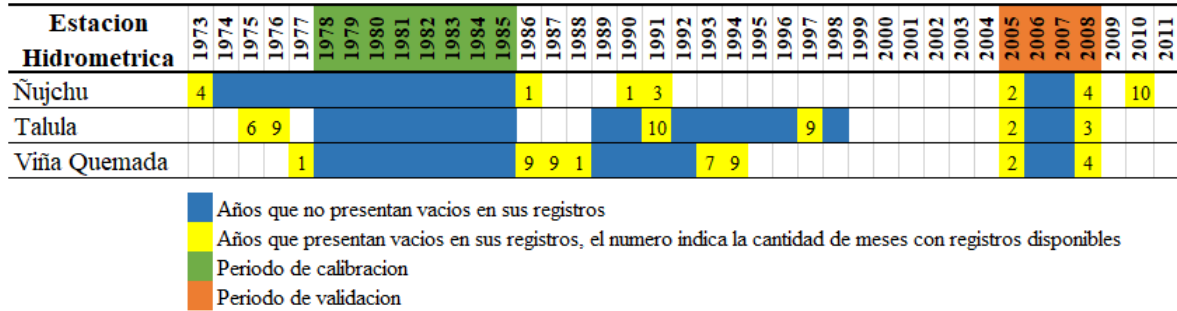


Figura 5.2 Registros de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas.

La Figura 5.2 muestra los periodos con información hidrométrica disponible en el periodo de simulación así como los periodos definidos para la calibración y validación de los modelos realizados en el presente estudio.

La calibración del modelo fue realizada de forma manual dando mayor importancia a los parámetros más sensibles reportados en la literatura (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017) (Soria Céspedes, 2016) y con la ayuda de la herramienta CaliTool (Villazón, 2010) la cual calcula distintitos coeficientes estadísticos que cuantifican la eficiencia de los caudales simulados con relación a los caudales observados.

5.2.1. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS

Siendo un procedimiento fundamental en la calibración, puesto que nos permite establecer el grado de incidencia de los parámetros de un modelo sobre este mismo, el análisis presentado a continuación es el realizado por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS) para el Balance Hídrico Superficial Nacional (BHSN) de 2017. Dicho estudio explora la sensibilidad de los parámetros del modelo para subcuencas representativas de las macrocuencas de Bolivia (Amazónica, Altiplánica y de La Plata). Para la macrocuenca de La Plata en particular la subcuenca representativa corresponde a Talula, siendo esta una unidad hidrográfica que también se encuentra en la región estudiada son sus análisis los presentados en la presente sección.

Para el análisis paramétrico mencionado anteriormente LUMSS realizó variaciones de los valores de cada parámetro y según su incidencia en hidrogramas de caudales multimensuales fueron clasificados como alta, media y baja sensibilidad en época húmeda y época seca.

Según el análisis de sensibilidad realizado por el LHUMSS los parámetros más sensibles del modelo SM de WEAP son: RRF, SWC, Ks y F, presentando sensibilidades de medias a altas en época húmeda y época seca (ver Tabla 2.8). Seguidamente se muestran los análisis de sensibilidad de todos los parámetros en hidrogramas multimensuales promedios.

El Factor de resistencia al escurrimiento (RRF) resultó ser altamente sensible en época húmeda tal como se observa en la Figura 5.3, RRF reproduce efectivamente los picos. En época seca presenta una sensibilidad de media a baja, esto era de esperarse puesto que el

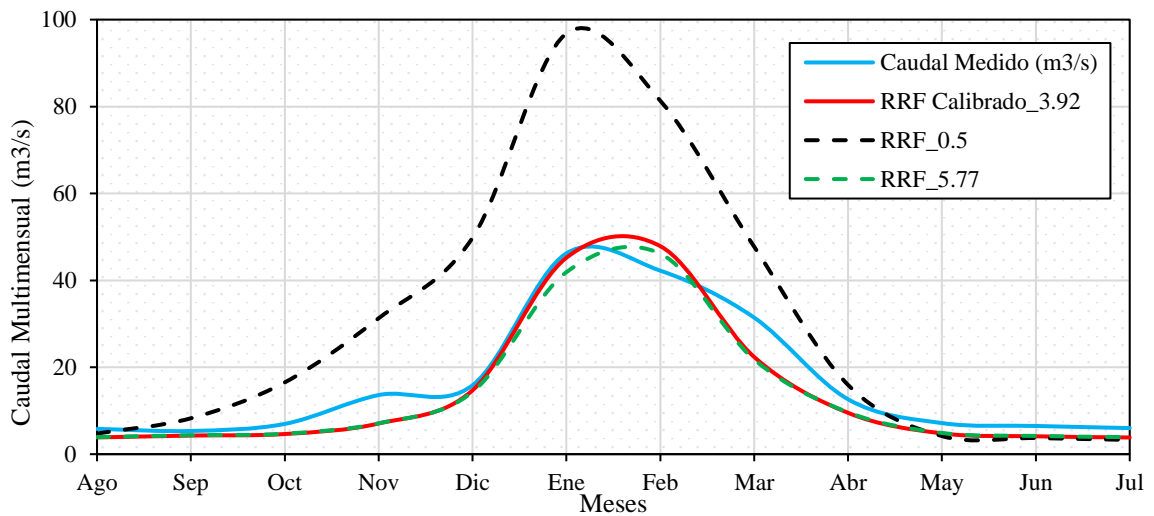


Figura 5.3 Variación del parámetro RRF y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

parámetro controla la respuesta de la escorrentía superficial (Soria Céspedes, 2016).

Soil Water Capacity (SWC) es el parámetro responsable de asignar la retención de agua de la capa superficial de suelo. El análisis muestra una sensibilidad media en época húmeda y baja en época seca tal como se aprecia en la Figura 5.5. Según Soria la incorrecta estimación de sus valores ocasiona problemas de convergencia en el cálculo del contenido de humedad en el suelo (Soria Céspedes, 2016)

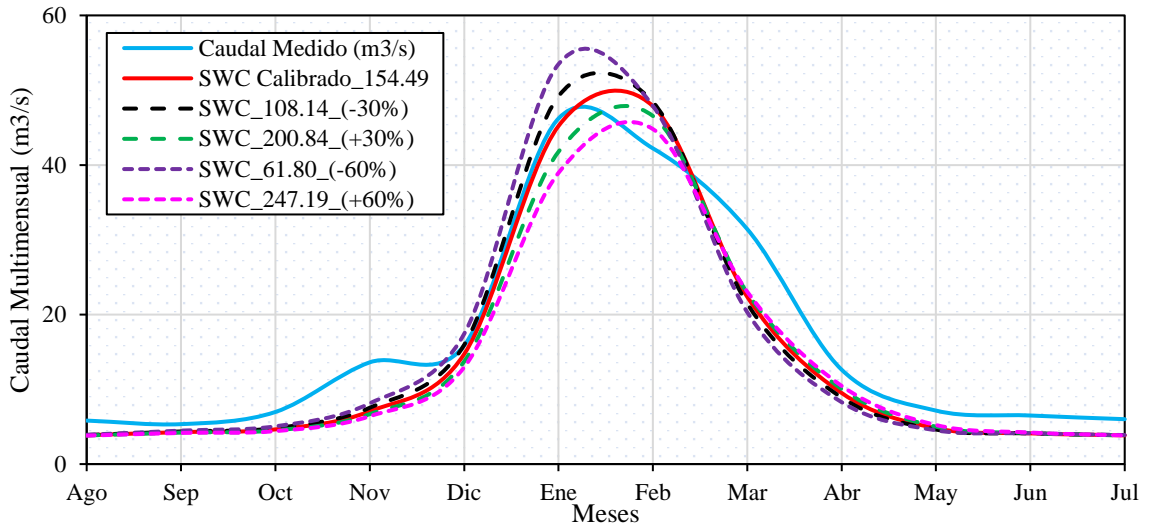


Figura 5.5 Variación del parámetro SWC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

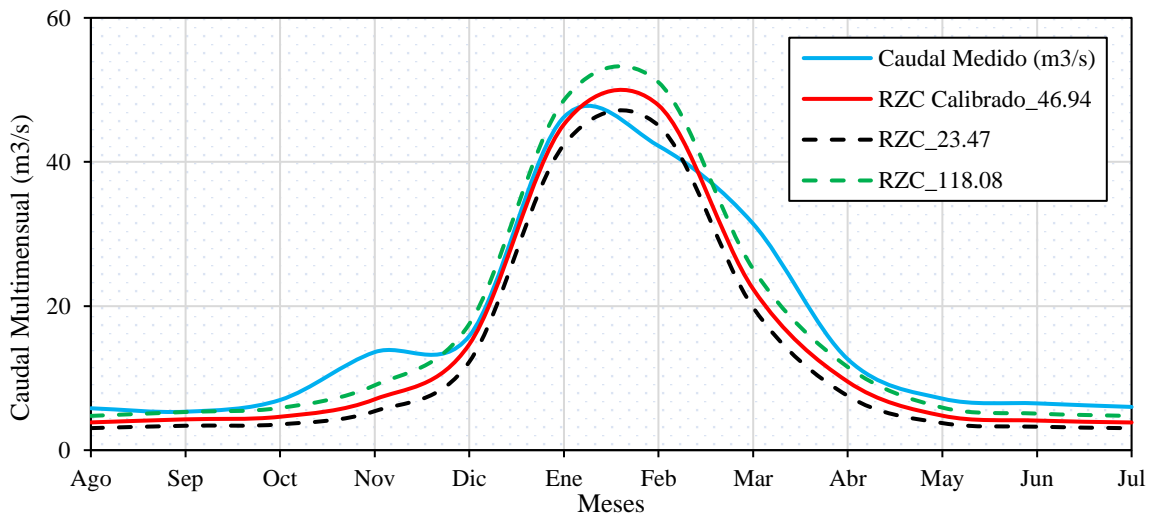


Figura 5.4 Variación del parámetro K_s o RZC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

La conductividad hidráulica en la zona radicular (RZC por sus siglas en inglés)

denominado K_s para el presente estudio, siendo el responsable de controlar la velocidad en que el agua es entregada al depósito inferior (suelo profundo) y a la superficie por interflujo, se esperaría una sensibilidad media o alta tomando en cuenta que también desempeña el papel de conductividad hidráulica y esto fue corroborado al presentar una sensibilidad media tanto para época seca como húmeda tal como se aprecia a continuación en la Figura 5.4:

El parámetro F (Dirección Preferencial de Flujo o PFD por sus siglas en inglés) presenta baja sensibilidad en época seca y mediana sensibilidad en época húmeda. Dicho análisis

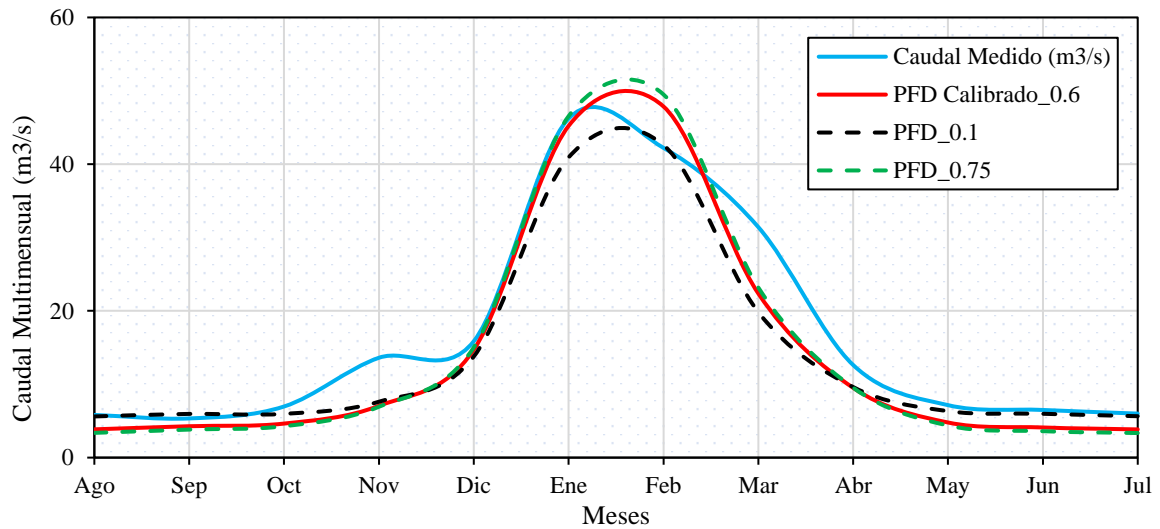


Figura 5.6 Variación del parámetro F o PFD y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

puede apreciarse en la Figura 5.6 mostrada a continuación.

A continuación se presentan los parámetros cuya sensibilidad en el modelo es baja tanto

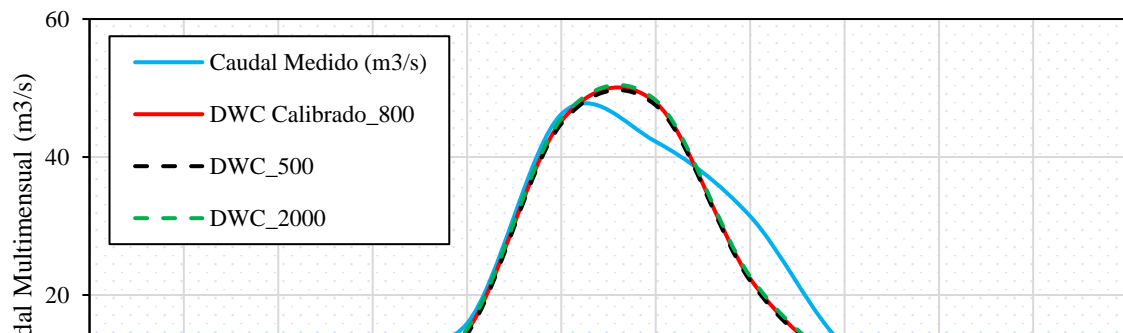


Figura 5.7 Variación del parámetro DWC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

para época seca como húmeda.

La sensibilidad de los parámetros Z1 y Z2 se muestran en la Figura 5.8 y Figura 5.9. Z1 y Z2 son la humedad inicial en porcentaje del balde superior e inferior del modelo respectivamente, estos parámetros también podrían considerarse como condiciones de borde o valores iniciales por su denominación. Como puede observarse presentan una baja

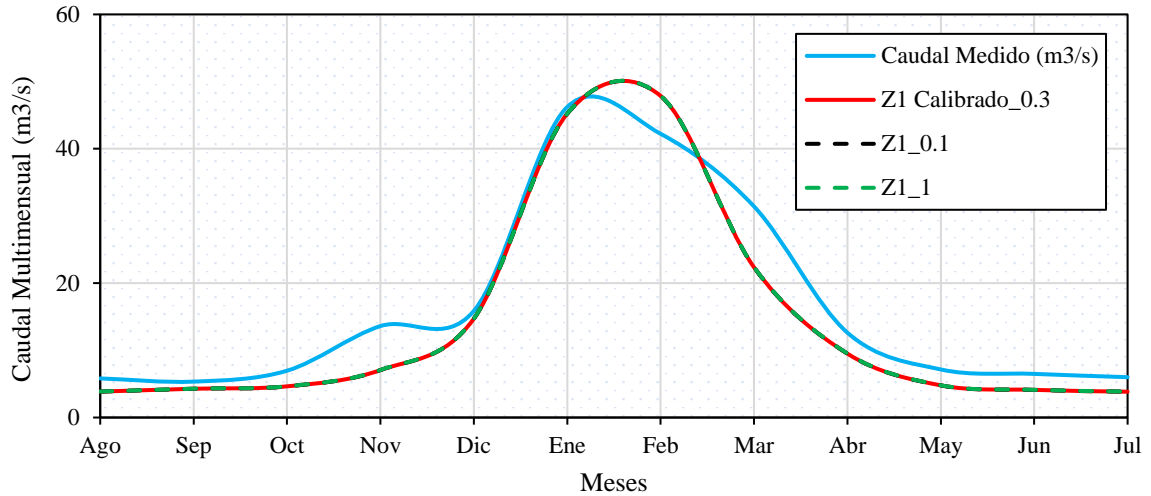


Figura 5.8 Variación del parámetro Z1 y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

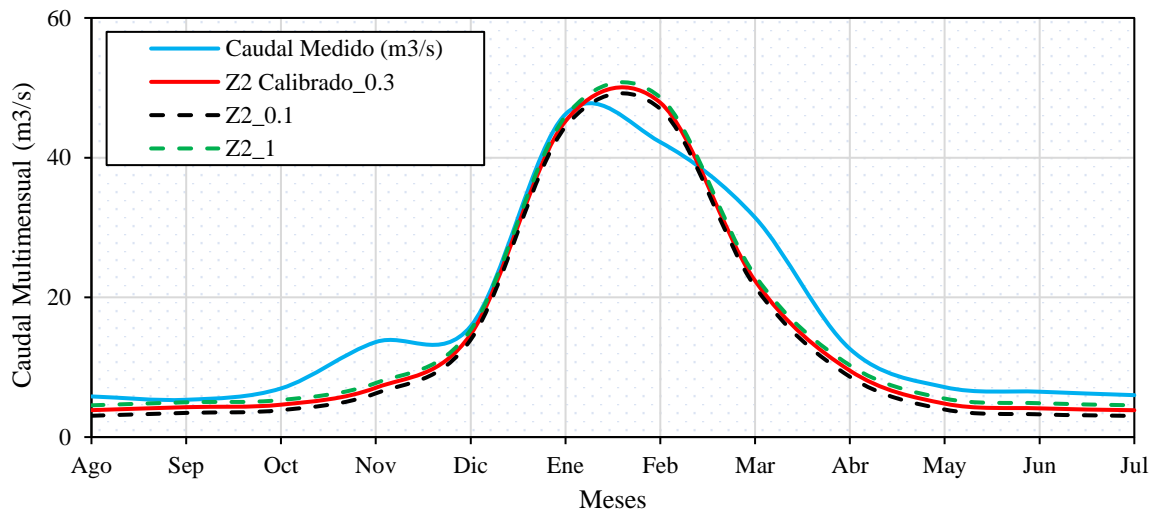


Figura 5.9 Variación del parámetro Z2 y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

o nula sensibilidad.

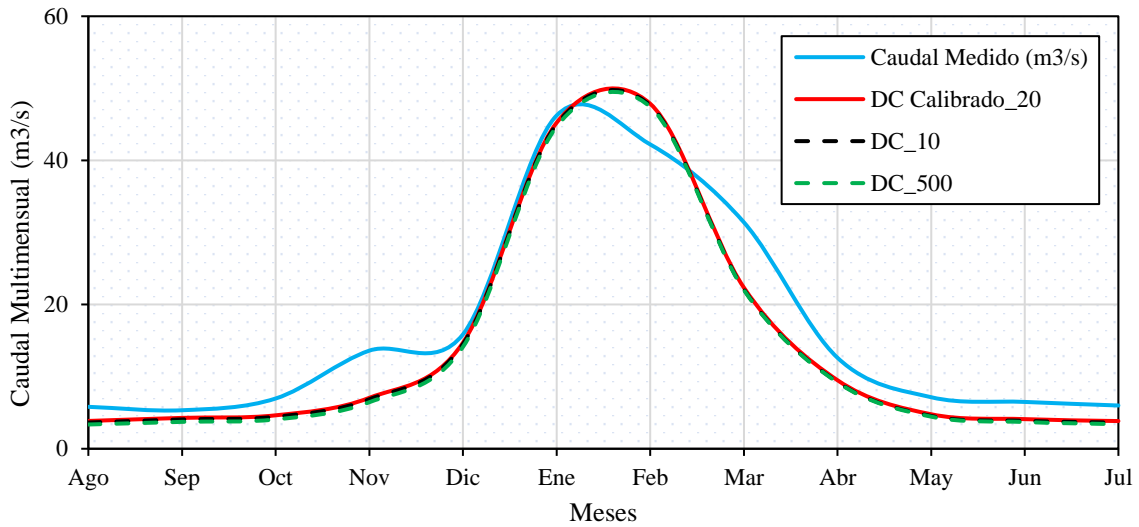


Figura 5.10 Variación del parámetro K_d o DC y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación Talula realizado para el BHSN. (Montenegro Terrazas, Muñoz Claros, & MMAyA, 2017)

Un resumen de la sensibilidad de parámetros del modelo SM de WEAP puede encontrarse en la sección 2.7.3 (ver Tabla 2.7) para diferentes cuencas de nuestro país. La Tabla 5.2 presenta los valores calibrados de los parámetros adoptados para la modelación por subcuencas, la calibración fue realizada en base a los valores referenciales de la literatura y dando mayor importancia a los parámetros cuya sensibilidad fue calificada como alta o media. Cabe mencionar que en algunos casos para un mismo parámetro existen varios valores según las características físicas de la cuenca por áreas, se optó por realizar la modelación de esta forma aprovechando que el modelo permite introducir de esta forma los parámetros y así tener una mejor caracterización.

Tabla 5.2 Valores calibrados de los parámetros de las cuencas modeladas en WEAP.

Parámetro	Combinación tipo y uso de suelo asociado	Talula	Viña Quemada	Puente Sucre	Ñujchu	Yocalla	Tarapaya
Kc	Definido para toda la cuenca	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
	Suelo Desnudo Agricultura	99.8	60		140.4	99.8	99.8
	Franco Arcillo Arenoso Agricultura	99.8	60	60	140.4	99.8	99.8
	Franco Arenoso Agricultura		60	60	140.4		
	Suelo Desnudo Bosque		60		198.9		
	Franco Arcillo Arenoso Bosque		60	60	198.9	141.4	141.4
	Franco Arenoso Bosque	141.4	60	60	198.9		
	Suelo Desnudo Pradera	116.5	60		163.8	116.5	116.5
	Franco Arcillo Arenoso Pradera	116.5	60	60	163.8	116.5	116.5
	Franco Arenoso Pradera		60	60	151.2		
	Suelo Desnudo Humedales						
Swc [mm]	Franco Arcillo Arenoso Humedales		60				
	Franco Arenoso Humedales			60			
	Suelo Desnudo Urbano				140.4		
	Franco Arcillo Arenoso Urbano	99.8	60		140.4		99.8
	Franco Arenoso Urbano		60	60			
	Suelo Desnudo Matorral	124.8	60		140.4		124.8
	Franco Arcillo Arenoso Matorral	124.8	60	60	175.5	124.8	124.8
	Franco Arenoso Matorral		60	60	162		
	Suelo Desnudo Otro/Sin vegetación	99.8	60		175.5	99.8	99.8
	Franco Arcillo Arenoso Otro/Sin vegetación	99.8	60	60	117	99.8	99.8
	Franco Arenoso Otro/Sin vegetación		60	60	108		
Dwc [mm]	Suelo Desnudo Agua						
	Franco Arcillo Arenoso Agua	133.1	60			133.1	133.1
	Franco Arenoso Agua		60				
RRF [---]	Definido para toda la cuenca	200	200	200	300	200	200
	Agricultura	1.6	0.1	0.1	4.2	1.6	1.6
	Bosque	0.8	0.1	0.1	3	0.8	0.8
	Pradera	1.6	0.1	0.1	1.2	1.6	1.6
	Humedal		0.1	0.1			
	Urbano	1.6	0.1	0.1	0.3		1.6
	Matorral	0.4	0.1	0.1	1.2	0.4	0.4
	Otro/Sin vegetación	1.6	0.1	0.1	0.6	1.6	1.6
	Agua	0.4	0.1			0.4	0.4
	Hielo/Nieve		0.1		1.6	1.6	1.6
	ks [mm/día/mes]	Suelo desnudo	150	150	150	150	150
Franco Arcillo Arenoso		150	150	150	150	150	150
kd [mm/día/mes]	Franco Arenoso	150	150	150	150	150	150
	Definido para toda la cuenca	500	500	500	500	500	500
f [---]	Definido para toda la cuenca	0	0.15	0.15	0.15	0	0
Z1 inicial [%]	Definido para toda la cuenca	30	30	30	30	30	30
Z2 inicial [%]	Definido para toda la cuenca	30	30	30	30	30	30

5.2.1.1. EVALUACION DE LA CALIBRACION MEDIANTE COEFICIENTES DE BONDAD DE AJUSTE

Con el propósito de medir el rendimiento del modelo se recurrió al cálculo de coeficientes estadísticos que proporcionan una idea del desempeño del modelo al cuantificar el grado de aproximación entre caudales observados y simulados. Dichos coeficientes son los típicos encontrados en la literatura (NSE, RMSE y R), estos fueron determinados con la herramienta CaliTool (Villazón, 2010). La descripción y referencias de los criterios NSE, RMSE y R se encuentran en el punto 2.4.1 del presente documento. La Tabla 5.3 presenta los valores de dichas medidas para las tres unidades hidrográficas. El periodo de validación del modelo corresponde a los años hidrológicos de 1978 a 1985.

Tabla 5.3 Desempeño del modelo SM de WEAP para las simulaciones hidrológicas en el periodo

Medida de bondad de ajuste	Cuenca hidrográfica		
	Ñujchu	Talula	Viña Quemada
NSE (Eficiencia de Nash–Sutcliffe)	0.679	0.836	0.553
RMSE (Raíz de error cuadrático medio)	9.15	13.55	86.20
R (Coeficiente de calibración)	0.875	0.927	0.822

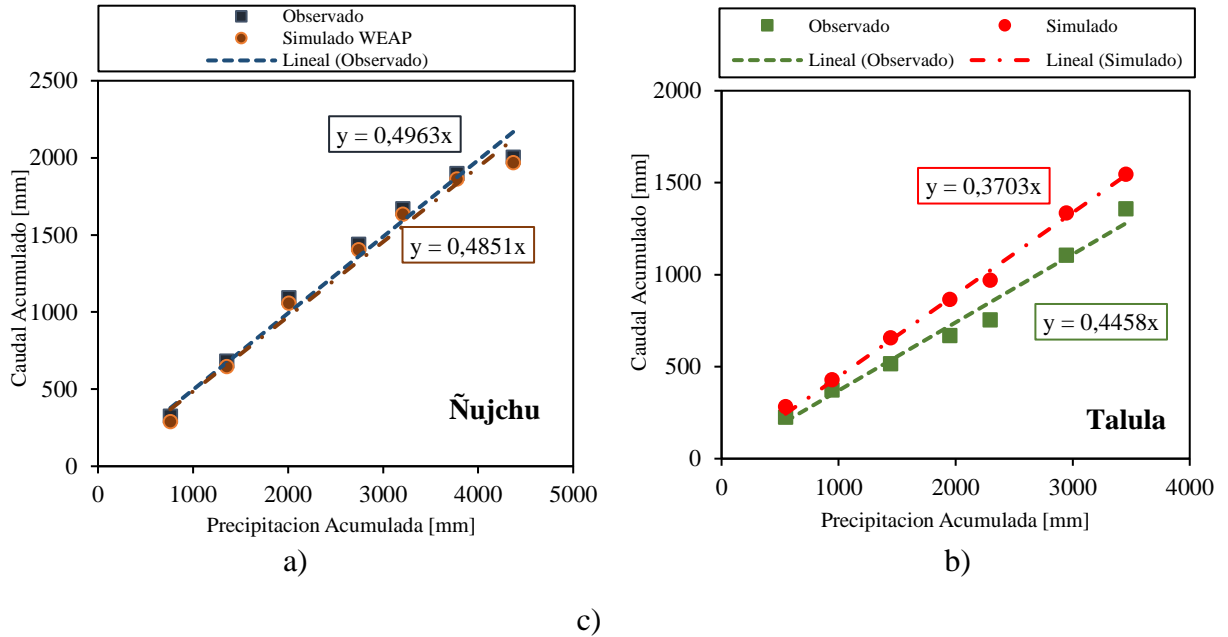
de calibración.

Las simulaciones y calibraciones realizadas para la estación hidrométrica Ñujchu en el modelo hidrológico de WEAP según Molnar es calificada como muy buena al estar cercanos a 0.7. Para la estación de Talula al superar el orden de 0.8 el NSE corresponde a una modelación excelente. Por ultimo para Viña Quemada la calibración es calificada como buena y considerada aceptable (ver Tabla 2.2) (Molnar, 2011).

5.2.1.2. COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

El coeficiente de escorrentía se define como la relación entre lámina de escurrimiento y precipitación. Este fue estimado para los tres puntos de salida (Ñujchu, Talula y Viña Quemada). El coeficiente de escorrentía se calculó con la precipitación acumulada en milímetros versus los caudales acumulados a nivel anual en milímetros también (lámina de agua) tanto simulado como observado con el objetivo de ver su variación entre sí para cada

cuenca. La Figura 5.11 presenta la variación de los coeficientes de escorrentía para cada una de las cuencas simuladas de sus caudales simulados con respecto de sus caudales observados



Como se puede observar en la Figura 5.11 los coeficientes de escorrentía encontrados para cada unidad hidrográfica presentan valores muy similares, por ende cabe mencionar que esta similitud respalda la calidad de la simulación realizada en WEAP así como también la consistencia de los datos de precipitación.

La Figura 5.12 muestra la variación de los caudales simulados y observados en función del tiempo en el periodo de calibración (agosto de 1978 a julio de 1985). Como se observa para las tres cuencas hidrográficas existe una buena representación del caudal base. En cuanto a los picos para la cuenca de Ñujchu se ve una subestimación en la mayoría de los picos, con errores

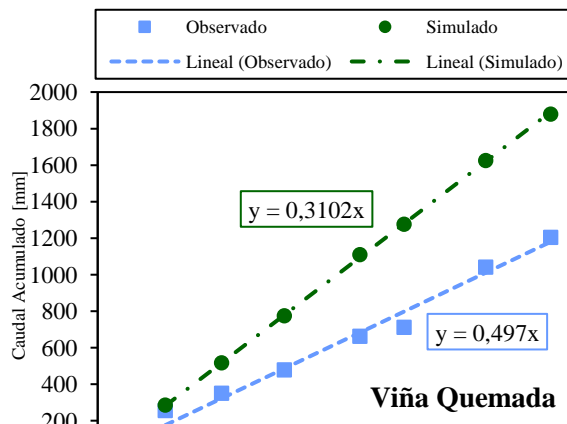
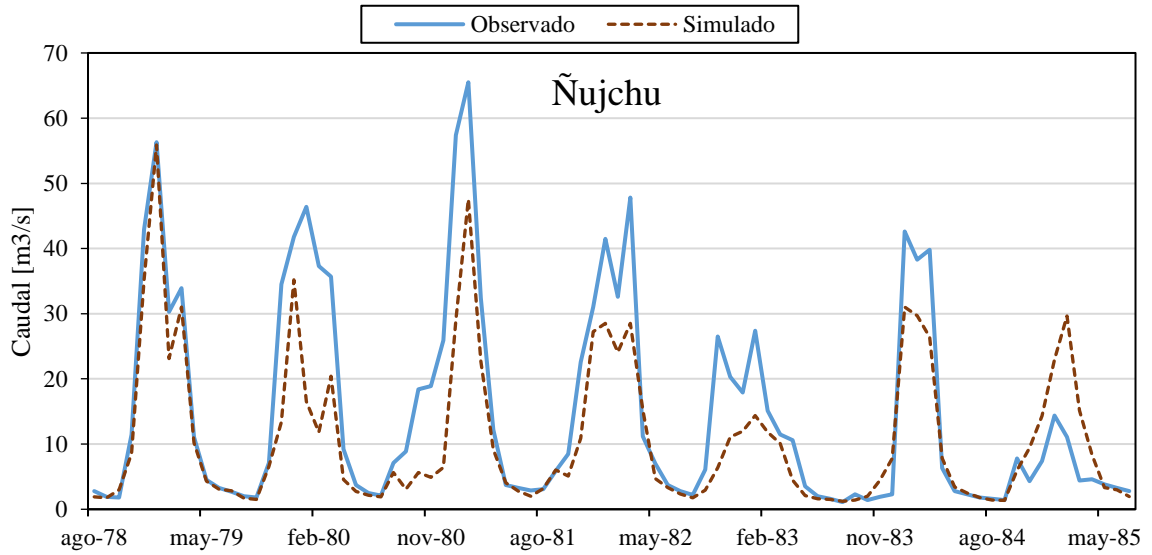


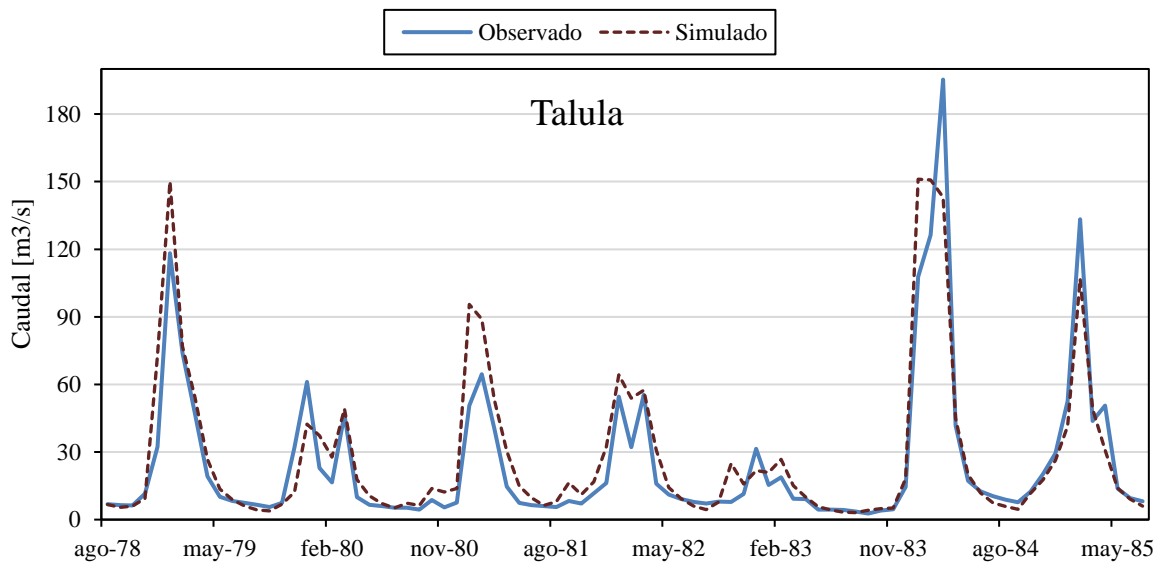
Figura 5.11 Coeficientes de escorrentía calculados con caudales observados y simulados con WEAP para las tres unidades hidrográficas. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada

aceptables. Más en la cuenca de Talula predominan la sobrestimación de escorrentía, presentando también un par de subestimaciones despreciables. En la cuenca de Viña Quemada en la época húmeda del año hidrológico 78/79 se ve una gran subestimación, esto se atribuye a los datos elevados de caudal con los que se cuenta.



a)

b)



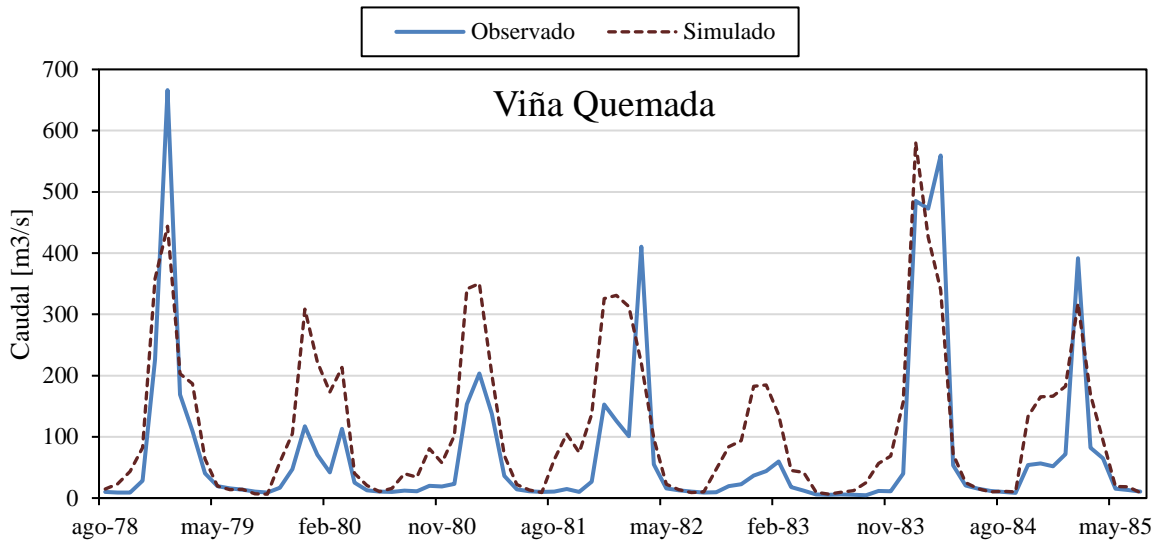


Figura 5.12 Caudales observados y simulados por WEAP para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de calibración. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada

c)

5.3. VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE WEAP

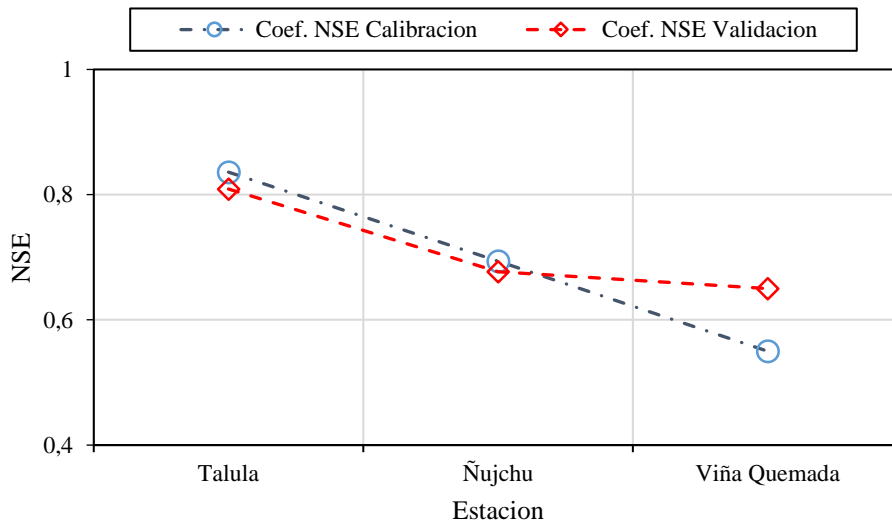
El periodo de validación corresponde a octubre de 2005 a marzo de 2008 y es el periodo con mayor cantidad de datos hidrométricos después del periodo de calibración son los que se cuenta para las tres estaciones como se aprecia en la Figura 5.2. Al igual que la calibración se calcularon medidas de bondad de ajuste (NSE, RMSE y R) que nos permiten medir la eficiencia de la modelación. La Tabla 5.4 presenta un resumen de dichos coeficientes para la modelación en WEAP de las tres cuencas estudiadas.

Tabla 5.4 Desempeño del modelo SM de WEAP para las simulaciones hidrológicas en el periodo de validación.

Medida de bondad de ajuste	Cuenca hidrográfica		
	Ñujchu	Talula	Viña Quemada
NSE (Eficiencia de Nash–Sutcliffe)	0.667	0.809	0.65
RMSE (Raíz de error cuadrático medio)	12.96	18.41	123.49
R (Coeficiente de calibración)	0.823	0.909	0.831

Siendo el coeficiente de NSE considerado el parámetro de mejor valoración del desempeño de series simuladas respecto de series observadas, es debido mencionar que en el periodo de validación las tres cuencas obtuvieron resultados razonablemente aceptables clasificados como bueno, muy bueno y excelente para Viña Quemada, Ñujchu y Talula respectivamente. Estos valores avalan las simulaciones realizadas en el modelo hidrológico de WEAP.

La Figura 5.13 exhibe la variación del coeficiente NSE para las tres cuencas del periodo de validación con respecto al de calibración.



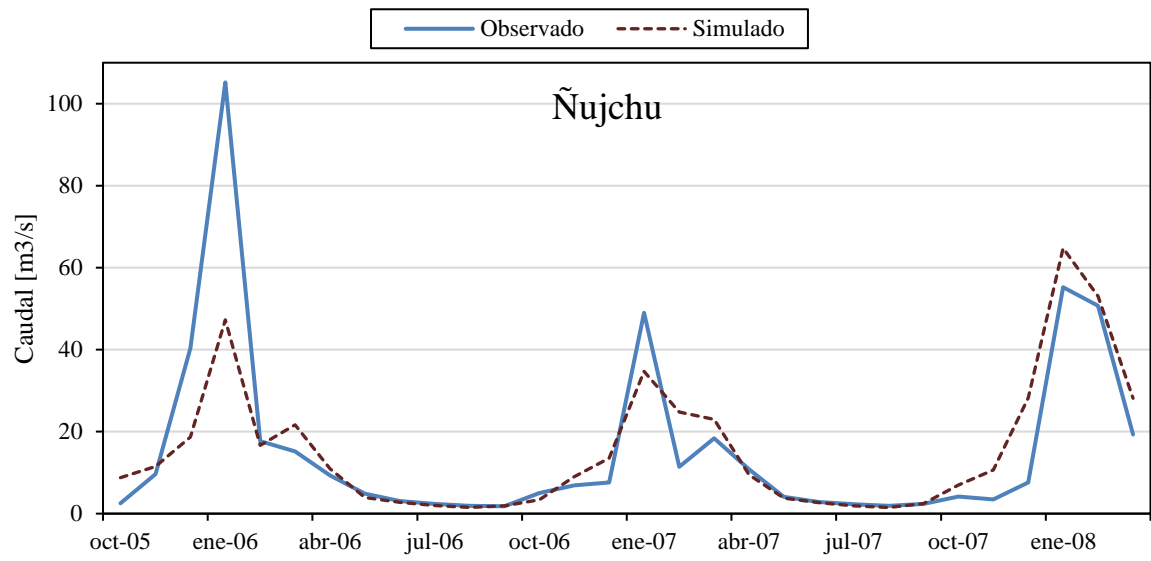
En la Figura 5.13 se distingue modificación de los coeficientes NSE obtenidos para la cuenca de Talula y Ñujchu en la época de calibración y validación. En el caso de Talula y Ñujchu los NSE determinados presenta una mínima variación entres sus respectivos periodos de calibración y validación, siendo catalogados como excelentes para Talula y muy buenos para Ñujchu según Molnar (Molnar, 2011). Sin embargo la estación Viña Quemada existe una mayor variación, el valor de su coeficiente NSE incremento debido a que en el periodo de validación existieron caudales extremos (picos) que fueron mejor reproducidos en la serie simulada con relación al periodo de calibración

A continuación en la Figura 5.14 son presentadas las series de caudales simulados y

Figura 5.13 Variación de los coeficientes NSE alcanzados para la calibración con respecto a la validación del modelo de WEAP.

observados correspondientes al periodo de validación (octubre de 2005 a marzo de 2008), se aprecia que existe un buen ajuste entre la serie observada y la simulada, especialmente en las estaciones Talula y Ñujchu (gráficas b) y c) de la Figura 5.14). Viña Quemada (gráfica a) de la Figura 5.14), al contrario presenta mayor discrepancia entre sus caudales observados y simulados, sobre todo en los picos, debido a los bajos registros de precipitación para esas épocas.

La Tabla 5.5 muestra los resultados de la modelación realizada con WEAP en forma de valores medios mensuales del periodo agosto de 1978 a julio de 2011, de las variables indicadas para las tres unidades hidrográficas estudiadas en el presente proyecto (Ñujchu, Talula y Viña Quemada).



a)

b)

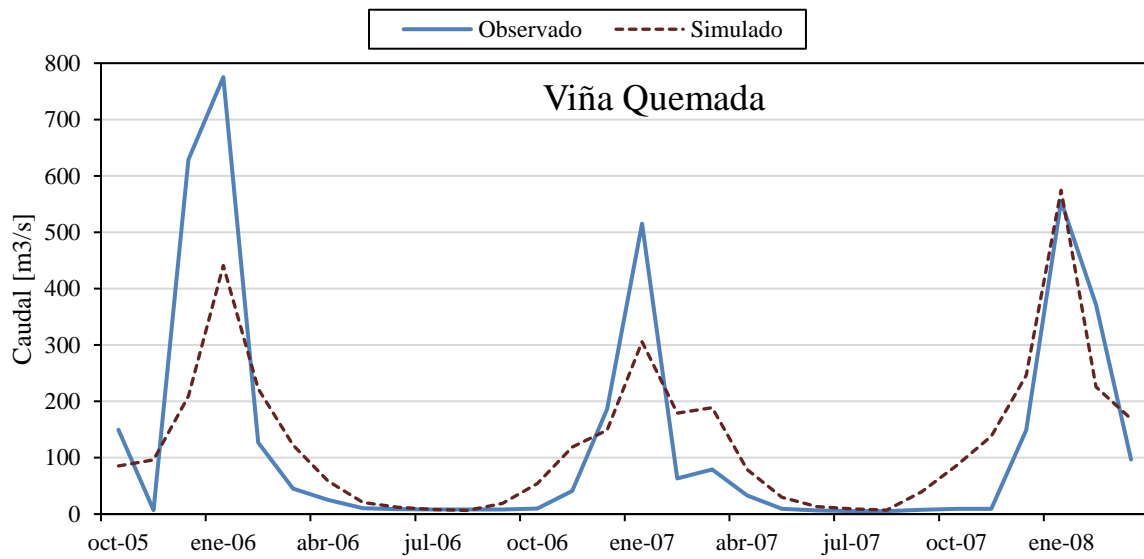
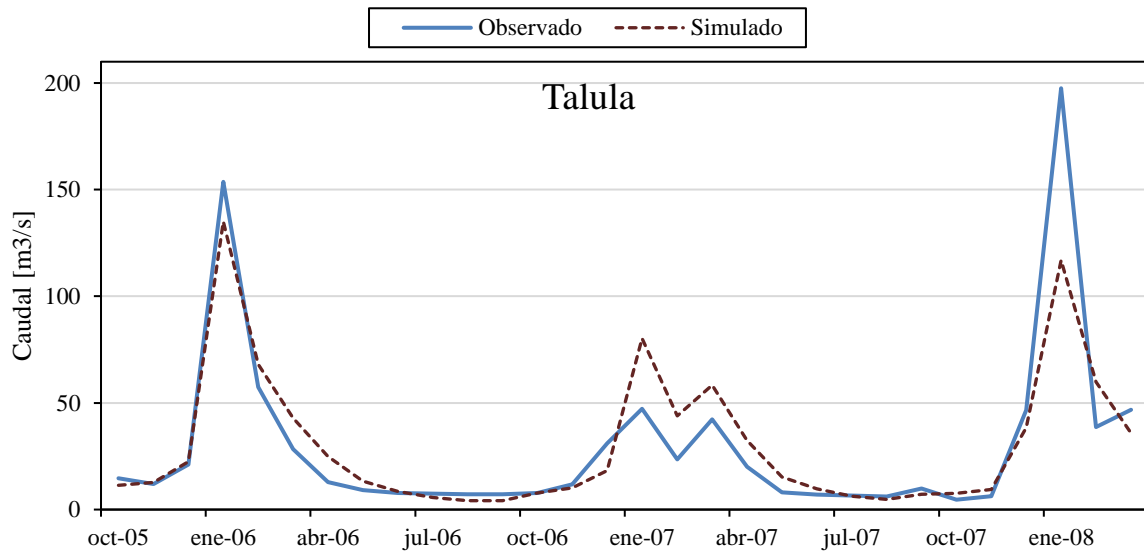


Figura 5.14 Caudales observados y simulados para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de validación. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada

c)

Tabla 5.5 Síntesis del balance hídrico superficial realizado con WEAP por subcuencas para el periodo (1978-2011).

Estación	Río	Área [km ²]	Variable	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	MEDIA	TOTAL ANUAL
Ñujchu	Cachimayu	1586.29	Precipitación [mm]	6.0	20.2	44.0	58.1	105.2	144.9	109.0	96.3	26.9	2.3	1.1	2.8	51.4	616.9
			Escorrentía [mm]	3.0	4.4	9.3	13.9	31.1	51.8	41.6	35.6	13.1	5.8	4.1	3.2	18.1	216.9
			ETR [mm]	85.4	10.1	24.8	38.1	59.3	76.0	67.4	62.0	34.2	13.0	4.5	2.9	39.8	477.7
			ETP [mm]	89.9	105.5	133.5	155.8	183.5	186.4	167.5	167.1	132.7	104.5	83.0	79.2	132.4	1588.6
			Q WEAP [m ³ /s]	1.8	2.7	5.5	8.5	18.4	30.7	27.0	21.1	8.0	3.5	2.5	1.9	11.0	
Talula	Pilcomayo	6507.4	Precipitación [mm]	5.6	13.5	26.5	37.5	68.9	122.1	81.0	74.7	22.3	1.6	1.1	1.0	38.0	455.6
			Escorrentía [mm]	3.0	3.3	5.3	8.2	17.4	47.8	38.7	35.0	16.2	8.3	5.3	3.6	16.0	192.0
			ETR [mm]	3.1	8.4	19.0	28.3	45.2	67.2	56.7	52.5	29.1	10.1	2.8	1.4	27.0	323.7
			ETP [mm]	97.2	109.2	135.6	149.8	161.7	158.8	139.4	142.6	119.7	103.8	87.7	86.2	124.3	1491.7
			Q WEAP [m ³ /s]	4.6	5.2	8.0	12.9	26.4	72.3	64.3	52.9	25.3	12.6	8.2	5.5	24.8	
Viña Quemada	Pilcomayo	13456.7	Precipitación [mm]	5.7	14.7	31.5	45.1	81.5	124.0	87.5	74.1	22.4	2.1	1.0	1.3	40.9	490.9
			Escorrentía [mm]	2.9	5.6	12.6	19.3	36.7	58.4	44.3	35.3	12.7	4.0	2.4	1.9	19.7	236.1
			ETR [mm]	3.2	8.8	20.6	32.7	52.2	72.9	61.9	54.5	28.3	9.8	2.8	1.6	29.1	349.5
			ETP [mm]	96.2	111.0	134.1	157.2	177.3	183.5	163.0	163.4	129.5	105.9	82.9	82.4	132.2	1586.5
			Q WEAP [m ³ /s]	14.5	29.1	63.1	100.0	184.4	293.3	244.7	177.3	66.1	20.1	12.6	9.5	101.2	

En la Tabla 5.5 se observa que la época húmeda corresponde al mes de enero, siendo este por ende el que presenta la escorrentía máxima. También se aprecia que en junio y julio se presentan las escorrentías mínimas. Los resultados de la modelación con WEAP muestran que durante el periodo agosto de 1978 a julio de 2011 la lámina promedio anual de escurrimiento en cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada es de 236 milímetros equivalente a un caudal específico de 7.52 litros por kilómetro cuadrado.

En la Tabla 5.6 se observa los valores interanuales obtenidos de la modelación con WEAP para las tres cuencas estudiadas, se presenta para cada una de ellas los componentes del balance, siendo estos precipitación, escurrimiento, evapotranspiración en milímetros, el caudal medio anual simulado, el caudal específico y el coeficiente de escorrentía.

Tabla 5.6 Balance hídrico unidades hidrográficas a nivel anual realizado con WEAP.

Unidad Hidrográfica	Área [km ²]	Medias interanuales (Periodo 1978-2011)						
		Precip. [mm]	Escurr. [mm]	ETR [mm]	Coef. Esc. [mm/mm]	ETP [mm]	Q WEAP [m ³ /s]	Qesp [ls-1/km ²]
Ñujchu	1586.29	616.86	216.89	477.71	0.35	1588.61	10.96	6.91
Talula	6507.40	455.63	192.05	323.71	0.42	1491.74	24.84	3.82
Viña Quemada	13456.65	490.90	236.12	349.47	0.48	1586.54	101.24	7.52

Es notoria la relación que guardan los coeficientes de escorrentía calculados en la Tabla 5.6 con relación a los calculados en la sección 5.2.1.2, lo cual es ponderable. Conforme a las evaluaciones realizadas a la serie de caudales obtenidos se considera que la modelación realizada con el modelo hidrológico de WEAP presenta resultados precisos.

CAPITULO VI

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELACION HIDROLÓGICA CON CHAC

6.1. INTRODUCCION

Para la simulación con CHAC se usó su módulo denominado cálculo de aportaciones, el cual adopta la metodología de Témez y cuyo procedimiento de cálculo ya fue explicado en el punto 2.8.2 del presente documento. Los valores iniciales de los parámetros de calibración de CHAC H_{max} e I_{max} fueron adoptados de los mapas temáticos (almacenamiento potencial de suelo y número de curva) presentados por Molina y Espinoza en su trabajo presentado en 2006 (Balance hídrico superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo). Las modelaciones se realizaron con una sola rama de descarga teniendo así un solo parámetro de coeficiente de descarga. Cabe mencionar de igual forma que no se tomó en cuenta para la calibración el parámetro denominado Coeficiente ETP o K_c con el objeto de no alterar las series de evapotranspiración potencial, siendo este igual a 1 para las tres modelaciones.

Para las modelaciones con CHAC fueron consideradas tres cuencas, las cuales se definieron hasta las estaciones hidrométricas de Talula, Ñujchu y Viña Quemada. La Figura 6.1 muestra el esquema de disposición de subcuencas. El subíndice p (área A_p o longitud L_p) indica el valor parcial correspondiente a la subcuenca o intercuenca, mientras que el subíndice a indica el valor acumulado hasta el respectivo punto de control hidrométrico.

El periodo de calibración fue definido de agosto de 1978 a julio de 1985, y el periodo de validación corresponde de marzo de 2005 a octubre de 2010 al igual que la modelación con WEAP.

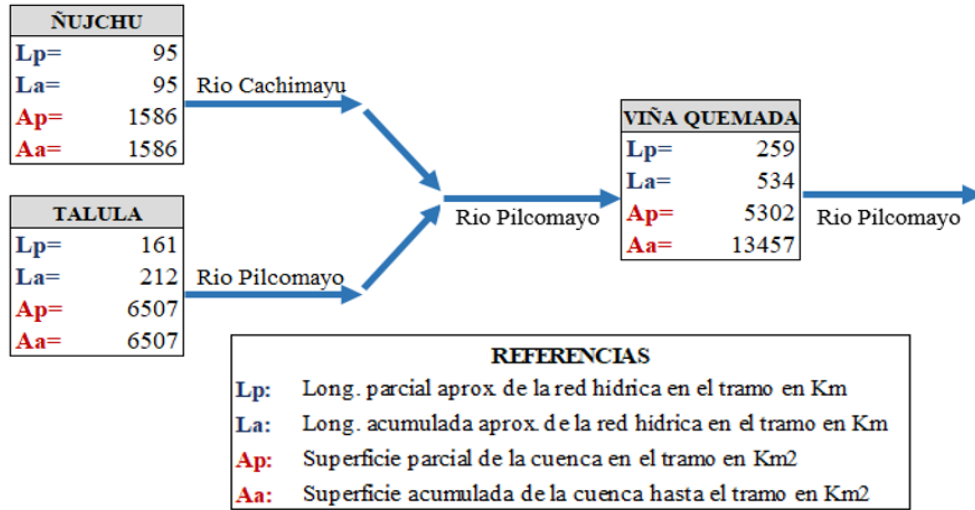


Figura 6.1 Esquema de disposición de subcuencas para modelación en CHAC.

6.2. CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE CHAC

Las modelaciones realizadas con CHAC fueron calibradas de forma manual con ayuda del mismo CHAC en primera instancia y la herramienta CaliTool (Villazón, 2010). CHAC proporciona una alternativa de calibración visual que consiste en mostrar los hidrogramas de caudales promedios mensuales simulados y observados en una ventana dinámica con errores calculados por el modelo. A continuación se presenta la Figura 6.2 que muestra la interfaz de la ventana dinámica de CHAC con sus componentes explicados. La Tabla 6.1

Tabla 6.1 Formulario de los términos de error calculados por CHAC. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013)

Términos de error	
<p>Error medio relativo: Para cuadrar volúmenes medios</p>	$emr = \frac{1}{n} \sum_{i \in \text{meses}} \frac{Q_{sim_i} - Q_{reg_i}}{Q_{reg}}$
<p>Error cuadrático-estandarizado medio, relativo al caudal medio registrado: Índice del ajuste en caudales altos</p>	$esmr = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in \text{meses}} \left(\frac{Q_{sim_i} - Q_{reg_i}}{Q_{reg}} \right)^2}$
<p>Error cuadrático-estandarizado medio, relativo a cada caudal registrado: Índice del ajuste en caudales bajos</p>	$esmrI = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in \text{meses}} \left(\frac{Q_{sim_i} - Q_{reg_i}}{Q_{reg_i}} \right)^2}$

describe los términos de errores que CHAC calcula y la formulación para su obtención:

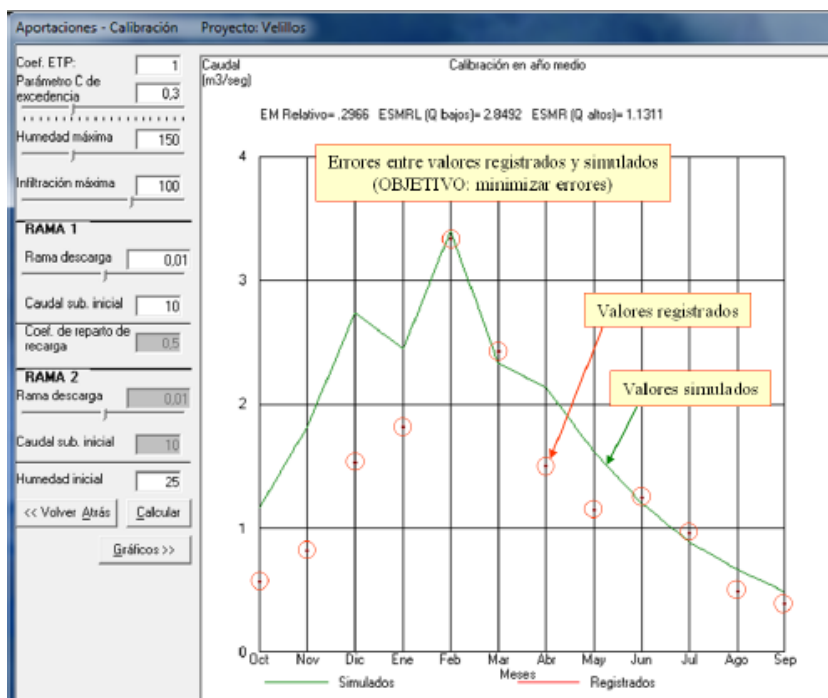


Figura 6.2 Opción de CHAC para calibración de parámetros. (CEDEX & Ministerio de Fomento, 2013)

6.2.1. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS

Con el propósito de identificar la sensibilidad o grado de sensibilidad de los parámetros que intervienen en el cálculo de escorrentía del modelo de Témez, se procedió a realizar el análisis de sensibilidad de estos. Los parámetros de calibración de CHAC son cuatro y son descritos en el punto 2.8.3 del presente documento. El análisis de sensibilidad paramétrico fue llevado a cabo para el modelo continuo de CHAC relativo a los valores calibrados de la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

Al ser tan solo cuatro los parámetros de calibración, es de considerar que los cuatro parámetros sean sensibles, esto se corroboró al realizar dicho análisis paramétrico. Se optó por realizar el análisis con hidrogramas de caudales promedio multimensuales, esto por su versatilidad y facilidad de interpretación, seguidamente son presentados dichos hidrogramas. La Figura 6.3 muestra el análisis de sensibilidad realizado para el parámetro C, cuya función es calcular el valor límite de la precipitación por encima del cual existirá

remanente de agua que posteriormente se escurrirá o se infiltrará, como se observa C es poco sensible en época seca y medio sensible en época húmeda.

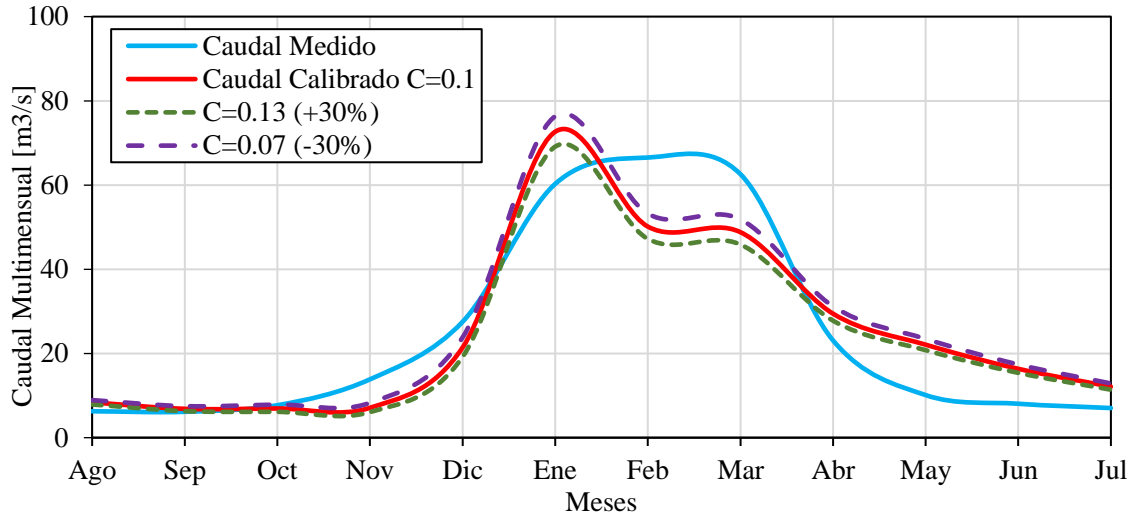
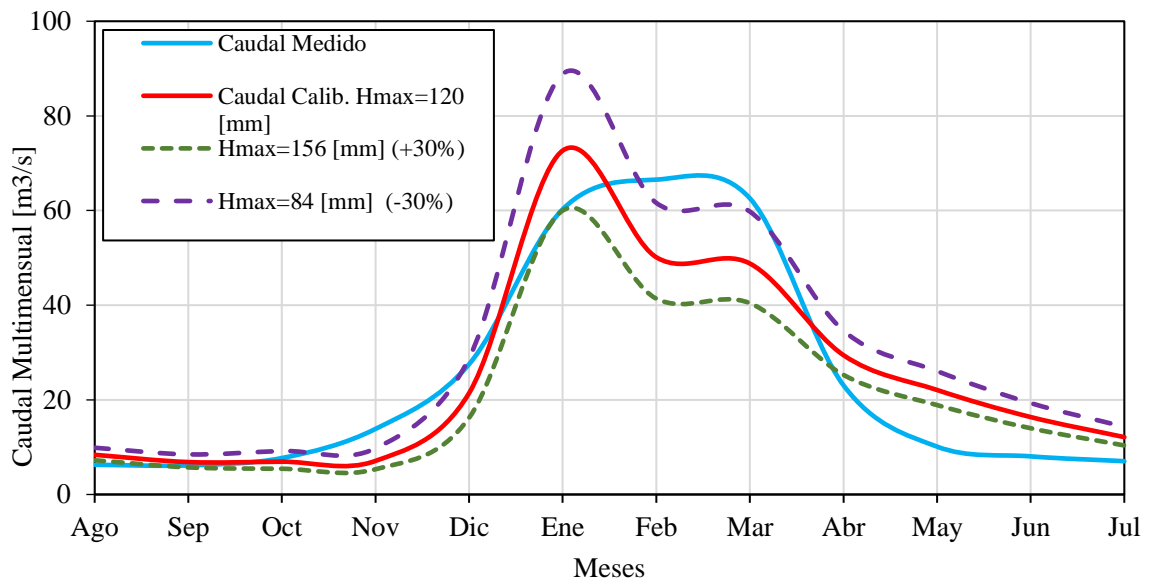


Figura 6.3 Variación del parámetro C y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.



El parámetro responsable de la representación de la capacidad de almacenamiento de agua

en el suelo es el Hmax (Humedad máxima), cuyo valor está asociado notoriamente a las características del suelo, como estas juegan un papel importante en el balance hídrico ya que intervienen en los procesos de infiltración y percolación directamente, es de esperarse que el parámetro sea altamente sensible. Esto se comprobó ya que el parámetro es altamente sensible en época húmeda y medianamente sensible en época seca como puede apreciarse en la Figura 6.4 presentada a continuación.

Figura 6.4 Variación de Hmax y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

Imax (Infiltración máxima por mes), que es el parámetro que controla la infiltración y la percolación, al estar relacionado con dichos procesos es de suponer que la variación de Imax en el modelo afecte de forma significativa a los valores calculados de escorrentía, lo cual no sucede al grado que se esperaba como se muestra en la Figura 6.5. Imax es

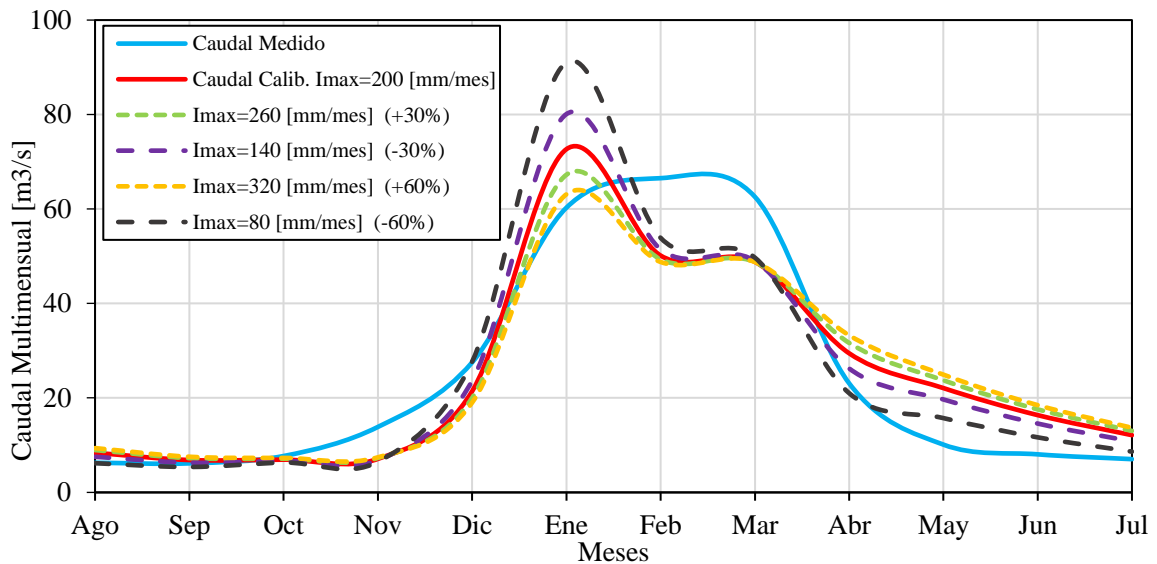


Figura 6.5 Variación de Imax y su influencia en el caudal promedio multimensual para la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

medianamente sensible tanto en época seca como húmeda.

El coeficiente de descarga del acuífero (parámetro α) es medianamente sensible en época seca y húmeda tal como se puede apreciar en la Figura 6.6. El valor calibrado de α es 0.01

como se esperaba, puesto que la literatura sugiere valores pequeños para cuencas grandes como es el caso de la cuenca de estudio.

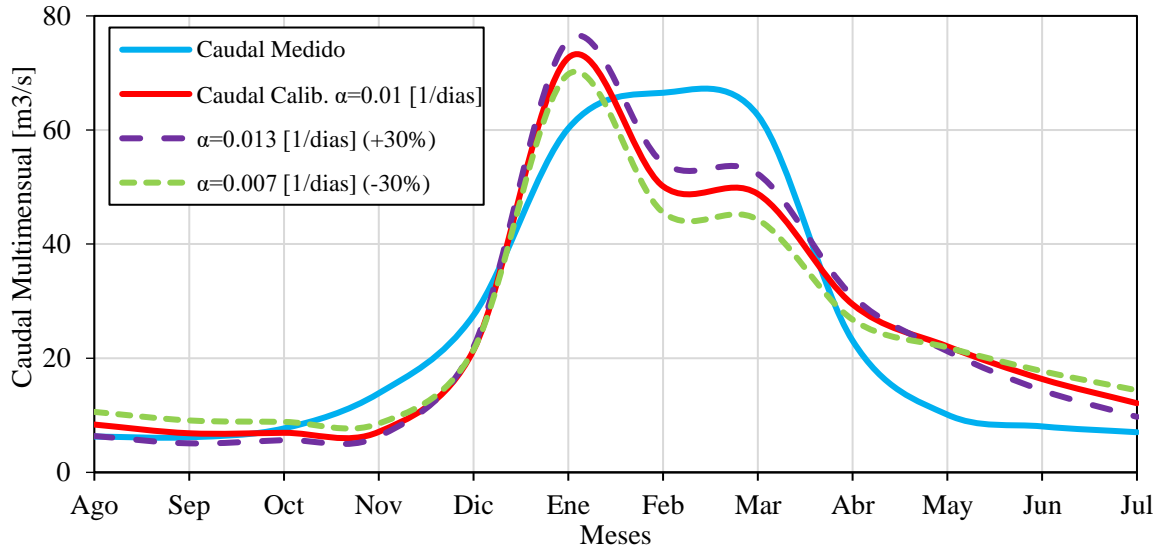


Figura 6.6 Variación del coeficiente de descarga del acuífero (α) y su influencia en el caudal promedio multimensual en la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

La Tabla 6.2 muestra un resumen de la sensibilidad de los parámetros del modelo de Témez para época húmeda y para época seca en tres niveles de sensibilidad: alta, media y baja. La Tabla 6.3 contiene una descripción de los valores utilizados para las modelaciones en CHAC, esto incluye los datos iniciales de cada cuenca y los valores de los parámetros de calibración adoptados, es importante destacar que todos los valores calibrados adoptados para los parámetros de la simulación se encuentran dentro los rangos posibles definidos por el desarrollador del modelo (Témez) para cada uno de ellos.

Tabla 6.2 Sensibilidad de parámetros del modelo de Témez de CHAC en la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

Parámetros	Unidad	Época húmeda	Época Seca
Parámetro C de excedencia (C)	[--]	Media	Baja
Capacidad máxima de agua en el suelo (H max)	[mm]	Alta	Media
Capacidad máxima de infiltración (I max)	[mm/mes]	Media	Media

Coefficiente de descarga del acuífero (α)	[1/días]	Media	Media
--	----------	-------	-------

Tabla 6.3 Parámetros de calibración y valores iniciales de las cuencas modeladas en CHAC.

Cuenca- Estación Hidrométrica	Datos Generales		Valores iniciales		Parámetros de calibración			
	Área [Km ²]	Días lluvia por mes	Caudal Sub. Inicial [m ³ /s]	Hum. inicial [%]	C	Hmax [mm]	I _{max} [mm/ mes]	α
Ñujchu	1647.74	11	4.7	0	0.15	55	70	0.05
Talula	6507.41	12	5.5	0	0.1	120	200	0.01
Viña Quemada	13456.65	11	3.7	0	0.1	100	65	0.01

6.2.1.1. EVALUACION DE LA CALIBRACION MEDIANTE COEFICIENTES DE BONDAD DE AJUSTE

A fin de cuantificar el error y verificar el grado de aproximación entre las series de caudales simuladas y observadas se realizaron los cálculos de los criterios de NSE, RMSE y R, con la ayuda de la herramienta CaliTool (Villazón, 2010) y los errores calculados por el mismo CHAC mencionados anteriormente en el punto 6.2 (ver Tabla 6.1). La descripción y referencias de los criterios NSE, RMSE y R se encuentran en el punto 2.4.1 del presente documento. La Tabla 6.4 presenta los valores de dichas medidas para las tres cuencas. El periodo de calibración del modelo es el mismo que en el caso de la modelación con WEAP correspondiente a los años hidrológicos de 1978 a 1985 (ver Figura 5.2).

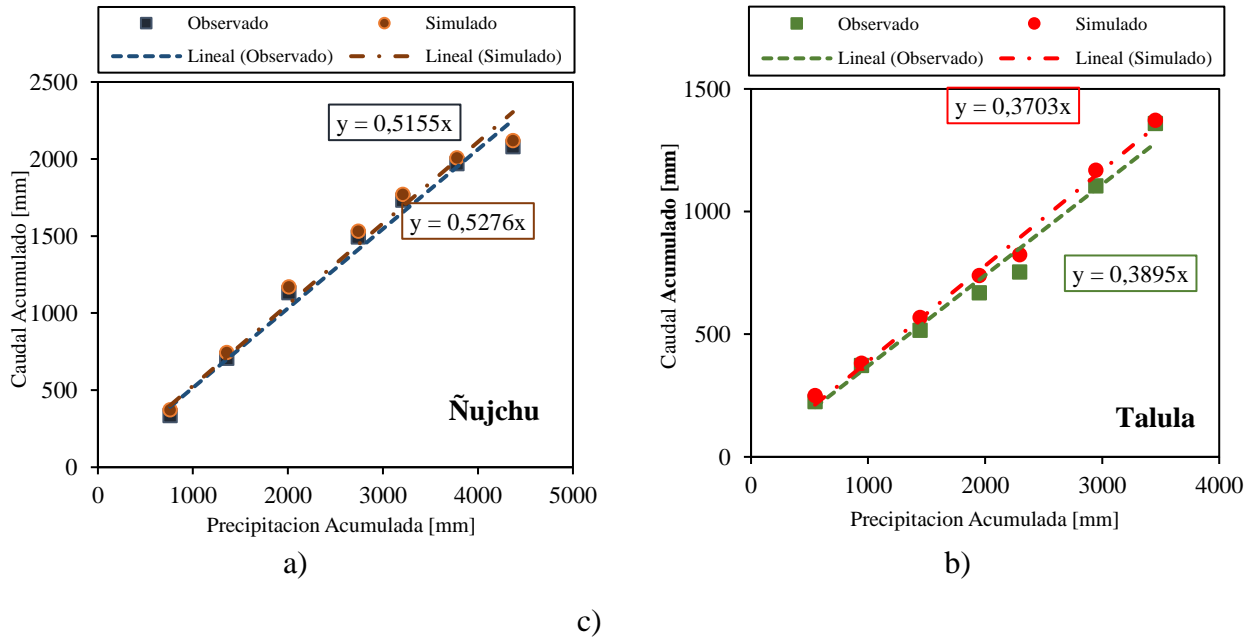
Tabla 6.4 Desempeño del modelo de CHAC para las simulaciones hidrológicas en el periodo de calibración.

Medida de bondad de ajuste	Cuenca hidrográfica		
	Ñujchu	Talula	Viña Quemada
NSE (Eficiencia de Nash–Sutcliffe)	0.695	0.787	0.766
RMSE (Raíz de error cuadrático medio)	8.92	15.41	62.42
R (Coeficiente de calibración)	0.845	0.888	0.877
EMR (Error medio relativo)	0.109	0.103	0.045
ESMR (Índice del ajuste en caudales altos)	0.597	0.618	0.85
ESMRL (Índice del ajuste en caudales bajos)	0.729	0.655	0.814

El rendimiento del modelo de CHAC en las cuencas hidrográficas simuladas en términos de NSE fue muy bueno (ver Tabla 2.2) para las tres estaciones hidrométricas. Considerando que los valores obtenidos están en el orden de 0.7 la simulación es calificada como precisa.

6.2.1.2. COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

Al igual que en la modelación con WEAP el coeficiente de escorrentía fue estimado para los tres puntos de salida. Fue calculado con la precipitación acumulada versus lámina de agua tanto simulada como observada con el objetivo de ver su variación entre sí para cada cuenca.



La Figura 6.7 presenta la variación de los coeficientes de escorrentía para cada una de las cuencas simuladas de sus caudales simulados con CHAC con respecto de sus caudales observados, es destacable la coherencia de estos coeficientes (calculados con los caudales

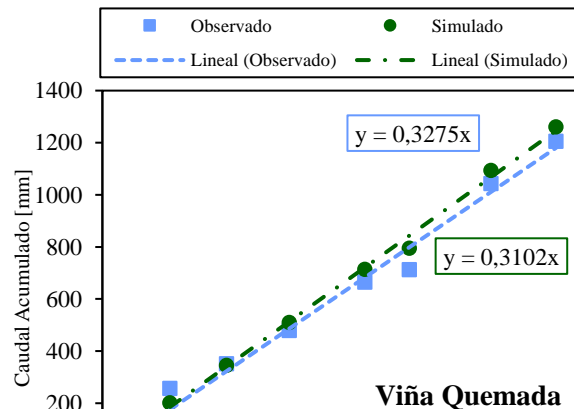
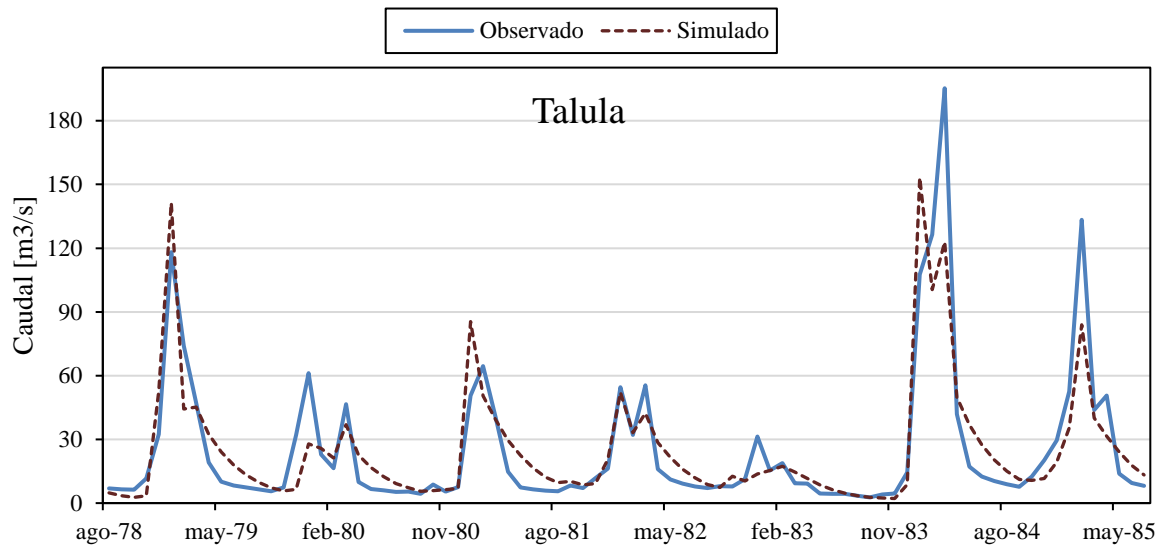
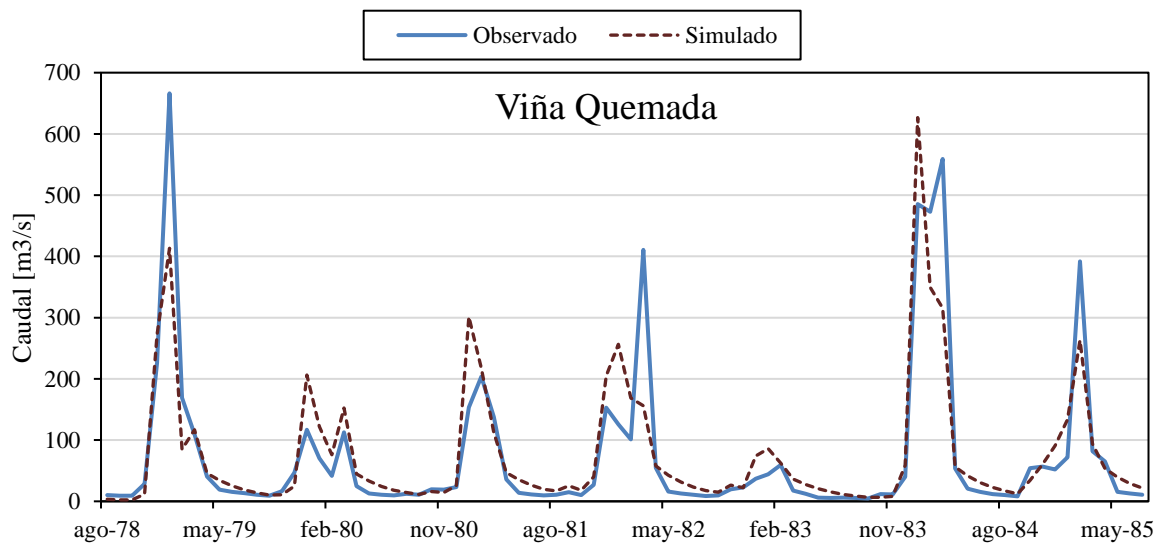


Figura 6.7 Coeficientes de escorrentía calculados con caudales observados y simulados con CHAC para las tres unidades hidrográficas. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada



b)

c)



6.3. VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO DE CHAC

El periodo de validación es el mismo que en el caso de la modelación con WEAP, es decir de octubre de 2005 a marzo de 2008 (ver Figura 5.2). De igual forma que en el periodo de calibración se evaluó el periodo de validación con los mismos coeficientes de bondad de ajuste calculados por el mismo CHAC y el CaliTool (Villazon, 2010). Dichos parámetros nos permiten evaluar el rendimiento del modelo en términos de errores, correlación y eficiencia de forma confiable y fidedigna. La Tabla 6.5 presenta un resumen de estos parámetros para las cuencas hidrográficas definidas para el presente estudio.

Tabla 6.5 Desempeño del modelo de CHAC para las simulaciones hidrológicas en el periodo de validación.

Medida de bondad de ajuste	Cuenca hidrográfica		
	Ñujchu	Talula	Viña Quemada
NSE (Eficiencia de Nash–Sutcliffe)	0.704	0.764	0.568
RMSE (Raiz de error cuadrático medio)	12.22	20.47	137.26
R (Coeficiente de calibración)	0.855	0.894	0.824
EMR (Error medio relativo)	0.182	0.107	0.359
ESMR (Índice del ajuste en caudales altos)	0.768	0.681	1.041
ESMRL (Índice del ajuste en caudales bajos)	1.168	0.650	1.249

Conceptuando el coeficiente de NSE como el más representativo cuantificando la eficiencia de la serie simulada obtenida respecto de la serie simulada, es destacable que dicho parámetro en el periodo de validación presenta según Molnar valores clasificados (ver Tabla 2.2) como muy buenos para Ñujchu y Talula y buenos para Viña Quemada (Molnar, 2011). Dichos valores avalan las simulaciones realizadas en CHAC, considerando la simplicidad y los límites del modelo.

La Figura 6.9 muestra la variación existente entre los coeficientes NSE obtenidos para el periodo de calibración y validación del modelo para las tres cuencas.

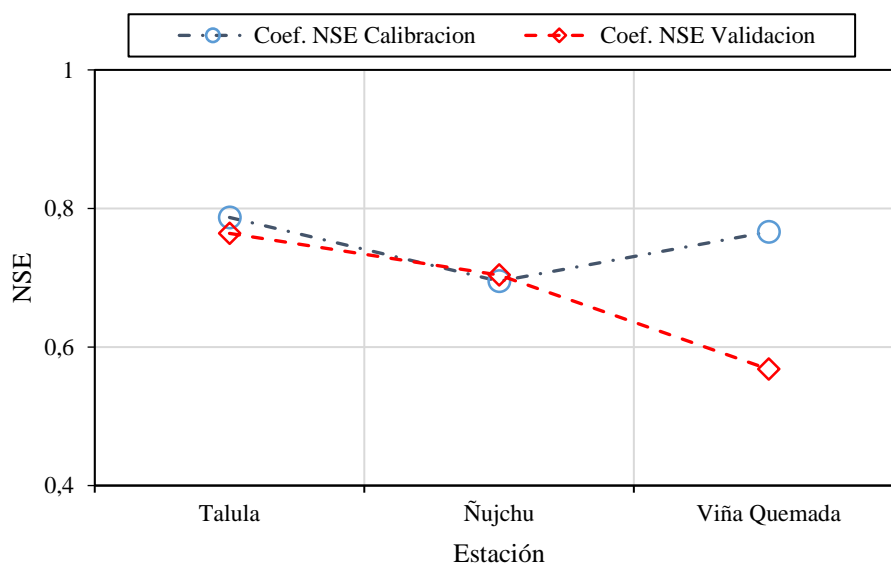


Figura 6.9 Variación de los coeficientes NSE alcanzados para la calibración con respecto a la validación del modelo realizado en CHAC.

Como se aprecia en la Figura 6.9 los coeficientes NSE obtenidos para la cuenca de Talula y Ñujchu son casi iguales, sin embargo la estación Viña Quemada existe una mayor variación. La cuenca de Talula presenta una pequeña disminución del NSE en la época de validación con respecto a la de calibración, sin embargo ambas son catalogadas como muy buenas según Molnar. En el caso de la cuenca de Ñujchu el valor de NSE es cercano a 0.7 tanto para calibración como para validación. Para la macrocuenca de Viña Quemada, el valor del coeficiente NSE se redujo debido a que en el periodo de validación existieron caudales extremos (picos) que no fueron reproducidos en la serie simulada.

A continuación son presentadas las series de caudales simuladas y observadas correspondientes al periodo de validación (octubre de 2005 a marzo de 2008), se aprecia que existe un buen ajuste entre la serie observada y la simulada, especialmente en las estaciones Talula y Ñujchu (gráficas b y c de la Figura 6.10). Viña Quemada (gráfica a de la Figura 6.10), al contrario presenta mayor discrepancia entre sus caudales observados y simulados, sobre todo en los picos, debido a los bajos registros de precipitación para esas épocas.

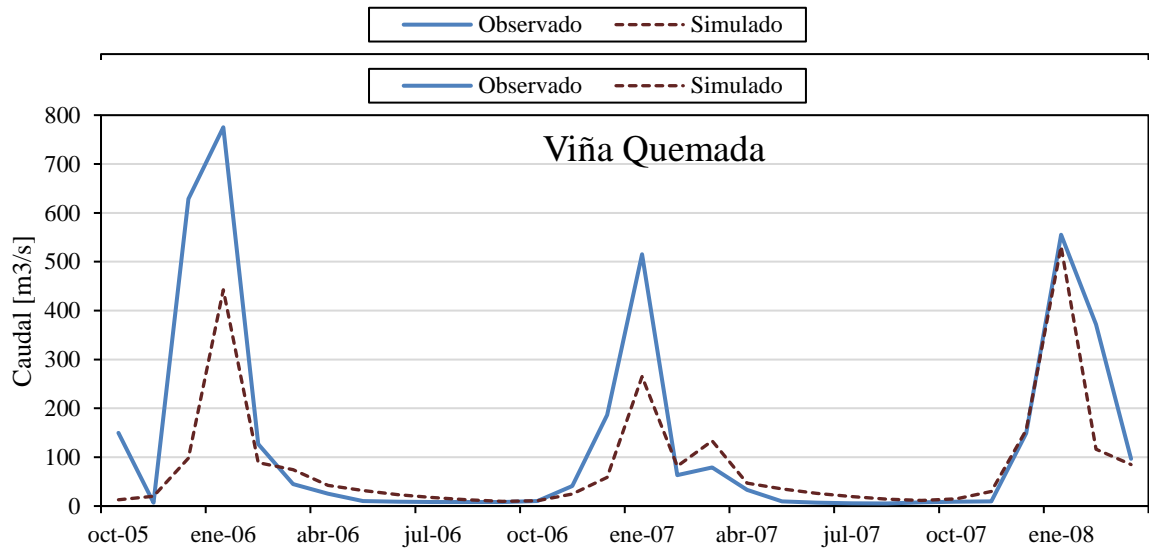
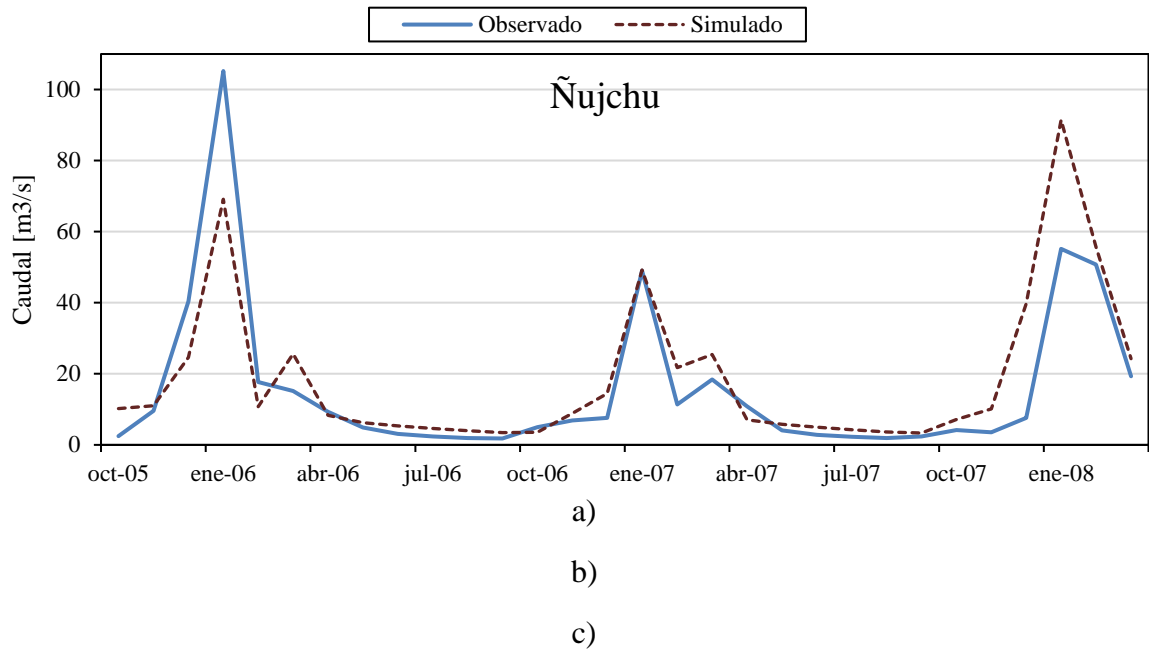


Figura 6.10 Caudales observados y simulados para cada una de las unidades hidrográficas analizadas en el periodo de validación. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada

Tabla 6.6 Síntesis del balance hídrico superficial realizado con CHAC por subcuencas para el periodo (1978-2011).

Estación	Río	Área [km ²]	Variable	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	MEDIA	TOTAL ANUAL
Ñujchu	Cachimayu	1586.29	Precipitación [mm]	6.0	20.2	44.0	58.1	105.2	144.9	109.0	96.3	26.9	2.3	1.1	2.8	51.4	616.9
			Escorrentía [mm]	5.9	6.0	9.4	13.0	39.6	68.0	40.8	36.9	10.6	8.9	7.4	6.6	21.1	253.3
			ETR [mm]	5.4	17.1	32.9	40.7	58.1	68.5	58.8	55.4	22.9	2.4	1.2	2.8	30.5	366.1
			ETP [mm]	89.9	105.5	133.5	155.8	183.5	186.4	167.5	167.1	132.7	104.5	83.0	79.2	132.4	1588.6
			Q CHAC [m ³ /s]	3.5	3.7	5.6	8.0	23.4	40.3	26.6	21.9	6.5	5.3	4.5	3.9	12.8	
Talula	Pilcomayo	6507.4	Precipitación [mm]	5.6	13.5	26.5	37.5	68.9	122.1	81.0	74.7	22.3	1.6	1.1	1.0	38.0	455.6
			Escorrentía [mm]	5.5	4.1	3.9	4.9	11.7	43.5	26.3	28.4	17.3	13.4	9.6	7.3	14.7	175.9
			ETR [mm]	5.6	14.0	25.2	32.5	52.9	77.8	58.8	56.1	21.5	1.6	1.1	1.0	29.0	348.2
			ETP [mm]	97.2	109.2	135.6	149.8	161.7	158.8	139.4	142.6	119.7	103.8	87.7	86.2	124.3	1491.7
			Q CHAC [m ³ /s]	8.4	6.5	5.9	7.6	17.7	65.8	43.8	43.0	27.0	20.2	15.0	11.1	22.7	
Viña Quemada	Pilcomayo	13456.7	Precipitación [mm]	5.7	14.7	31.5	45.1	81.5	124.0	87.5	74.1	22.4	2.1	1.0	1.3	40.9	490.9
			Escorrentía [mm]	2.7	2.2	2.8	5.0	19.2	48.3	26.0	23.4	8.7	6.6	4.7	3.6	12.8	153.1
			ETR [mm]	5.6	14.4	28.4	37.5	55.2	65.4	55.4	52.0	22.9	2.1	1.1	1.3	28.4	341.3
			ETP [mm]	96.2	111.0	134.1	157.2	177.3	183.5	163.0	163.4	129.5	105.9	82.9	82.4	132.2	1586.5
			Q CHAC [m ³ /s]	13.8	11.4	13.8	25.7	96.3	242.5	143.7	117.6	45.0	33.1	24.5	18.1	65.5	

La Tabla 6.6 muestra los resultados de la modelación realizada con CHAC en forma de valores medios mensuales del periodo agosto de 1978 a julio de 2011, de las variables indicadas para las tres unidades hidrográficas estudiadas en el presente proyecto (Ñujchu, Talula y Viña Quemada). En ella se observa correspondencia a la simulación realizada con WEAP (ver Tabla 5.6), ya que sus valores guardan estrecha relación. Según la modelación en CHAC durante el periodo de agosto de 1978 a julio de 2011 la lámina promedio anual de escurrimiento en cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada es de 153 milímetros equivalente a un caudal específico de 4.86 litros por kilómetro cuadrado.

En la Tabla 6.7 se observa los valores interanuales obtenidos de la modelación con CHAC para las tres cuencas estudiadas, se presenta para cada una de ellas los componentes del balance, siendo estos precipitación, escurrimiento, evapotranspiración en milímetros, el caudal medio anual simulado, el caudal específico y el coeficiente de escorrentía.

Tabla 6.7 Balance hídrico unidades hidrográficas a nivel anual realizado con CHAC.

Unidad Hidrográfica	Área [km ²]	Medias interanuales (Periodo 1978-2011)						
		Precip. [mm]	Escurr. [mm]	ETR [mm]	Coef. Esc. [mm/mm]	ETP [mm]	Q CHAC [m ³ /s]	Qesp [l/s-km ²]
Ñujchu	1586.29	616.86	257.75	366.11	0.42	1588.61	12.98	8.18
Talula	6507.40	455.63	175.90	348.17	0.39	1491.74	22.66	3.48
Viña Quemada	13456.65	490.90	153.10	341.30	0.31	1586.54	65.46	4.86

Es notoria la relación que guardan los coeficientes de escorrentía calculados en la Tabla 6.7 con relación a los calculados en la sección 6.2.1.2, lo cual es ponderable. Conforme a las evaluaciones realizadas a la serie de caudales obtenidos se considera que la modelación realizada con el modelo hidrológico de CHAC presenta buenos resultados.

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. ANALISIS DE CORESPONDENCIA DE PARAMETROS DE LOS MODELOS CHAC, WEAP Y SWAT

Con el objetivo de complementar el análisis de desempeño de los modelos CHAC, WEAP y SWAT se procedió a realizar el análisis de correspondencia de parámetros. Dicho análisis paramétrico fue desarrollado en base a las definiciones de los parámetros de cada modelo, sus asociaciones a las características físicas de la cuenca y la función que desempeñan en su respectivo modelo.

En la Tabla 7.1 se puede apreciar la correspondencia de los parámetros de los modelos. Los parámetros que se encuentran situados en la misma fila fueron considerados equivalentes o que desempeñan una función parecida en sus respectivos modelos, en la primera columna se describe la razón de la equivalencia o el nexo existente entre los parámetros.

El parámetro K_c de WEAP al ser considerado como un factor de corrección que interviene en el cálculo de la evapotranspiración real al igual que el coeficiente ETP de CHAC, de la misma manera el parámetro ESCO de SWAT corresponde al factor de compensación para la evaporación del suelo según su definición. La equivalencia entre estos tres parámetros es más evidente al ser los tres adimensionales y presentar rangos de valores casi iguales.

CN2 de SWAT corresponde al número de curva (CN) de SCS por definición, según Molina y Espinoza un valor inicial del parámetro I_{max} de CHAC puede ser el CN del suelo, es ahí donde reside la equivalencia de estos dos parámetros. Es destacable también que los valores calibrados de I_{max} del presente estudio fueron muy próximos a los valores iniciales asignados al parámetro correspondiente al CN del suelo.

Siendo la capacidad de almacenamiento de agua del suelo un factor necesario en la modelación hidrológica continua, es preponderante mencionar que cada uno de los modelos posee uno dos parámetros (WEAP) para representar este factor. Para el SWAT viene a ser el SOL_AWC, en el CHAC el Hmax y para WEAP son dos SWC y Dw por la naturaleza del modelo que consiste en dividir el suelo en dos capas denominadas baldes teniendo un parámetro para cada uno de estos.

La constante de recesión en SWAT viene a ser el parámetro denominado ALPHA_BF y en CHAC el parámetro α es la inversa de esta constante, WEAP no cuenta con un parámetro que controle esta función en su modelo.

Para definir la conductividad hidráulica los tres modelos cuentan con parámetros, por parte de SWAT son el SOL_K y el CH_K, de WEAP son Ks y Kd y para CHAC vendría a ser el I_{max} que a pesar de estar relacionado también con el CN no deja de ser el responsable de definir la infiltración y es notorio que su unidad corresponde a velocidad.

Tabla 7.1 Resumen de correspondencia de parámetros de los modelos hidrológicos continuos de SWAT, WEAP y CHAC.

Relación entre parámetros	SWAT			WEAP			CHAC		
	Parámetro	Unidad	Rango	Parámetro	Unidad	Rango	Parámetro	Unidad	Rango
Coefficiente de cultivo	ESCO	[---]	0.01-1	Kc	[---]	0.01-1.2	Coef. ETP	[---]	0.01-1
Numero de curva SCS	CN2	[---]	\pm 10% ⁽¹⁾				I _{max}	[mm/mes]	1-1000
Contenido de agua en el suelo	SOL_AWC	[mm/mm]	\pm 20% ⁽¹⁾	SWC	[mm]	50-1000	H _{max}	[mm]	0-500
				Dw	[mm]	200-1000			
Constante de recesión	ALPHA_BF	[días]					α	[1/días]	0.00-1
Conductividad hidráulica	SOL_K	[mm/h]	\pm 10% ⁽¹⁾	Ks	[mm/mes]	5-1000	I _{max}	[mm/mes]	1-1000
	CH_K2	[mm/h]	0.01-150	Kd	[mm/mes]	5-1001			

⁽¹⁾ La fracción mostrada no indica el rango ya que estos parámetros varían según el tipo de suelo; indica la variabilidad admisible en este tipo de parámetros.

7.2. ANALISIS DE DESEMPEÑO DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS CONTINUOS DE CHAC, WEAP Y SWAT

En cumplimiento con el objetivo general del presente trabajo se realizó el análisis de desempeño de los modelos hidrológicos de SWAT, WEAP y CHAC a nivel mensual con aplicación a la cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada y las cuencas que esta comprende con registro hidrométricos (Talula, Ñujchu). En este sentido para analizar el rendimiento de los modelos WEAP y CHAC se usaron los resultados hallados en el presente proyecto naturalmente, en cuanto a los datos de SWAT se usaron los generados por el trabajo denominado Cuantificación Del Potencial Hídrico De Una Cuenca A Gran Escala – Aplicación A La Cuenca Del Río Pilcomayo Hasta La Estación Hidrométrica Viña Quemada (Callaú Medrano, 2016), el cual se trata de una modelación hidrológica a nivel diario realizada por las mismas cuencas que en el presente estudio. Dado que dicho trabajo consiste en una modelación a nivel diario se procedió a agregar las series de caudales obtenidas por Callau para contar con caudales a nivel mensual.

El análisis de desempeño fue realizado en términos del coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), esto por la confiabilidad que brinda dicho parámetro expresando el grado de aproximación entre una serie simulada respecto de una serie observada.

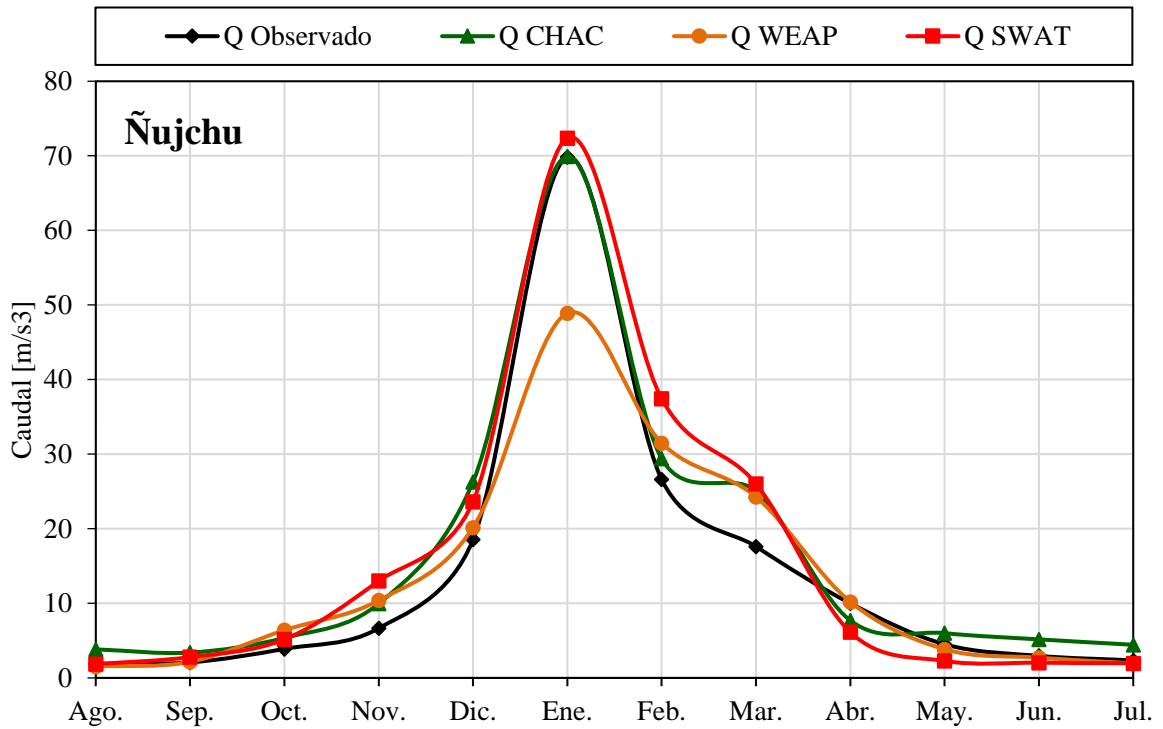
En este sentido la Tabla 7.2 muestra los NSE obtenidos para los periodos de calibración y validación correspondientes de las tres cuencas estudiadas en los tres modelos analizados. Los NSE presentan una calificación en base al rango de su desempeño conforme a la Tabla 2.2 (Molnar, 2011)

Tabla 7.2 Valores de NSE y su interpretación según Molnar para las tres unidades hidrográficas.

Unidad Hidrográfica	Modelo	Calibración NSE		Validación NSE	
Ñujchu	SWAT	0.796	Muy bueno	0.794	Muy bueno
	WEAP	0.694	Muy bueno	0.677	Muy bueno
	CHAC	0.695	Muy bueno	0.704	Muy bueno
Talula	SWAT	0.809	Excelente	0.898	Excelente
	WEAP	0.836	Excelente	0.809	Excelente
	CHAC	0.787	Muy bueno	0.764	Muy bueno
Viña Quemada	SWAT	0.871	Excelente	0.977	Excelente
	WEAP	0.55	Bueno	0.65	Muy bueno
	CHAC	0.766	Muy bueno	0.568	Bueno

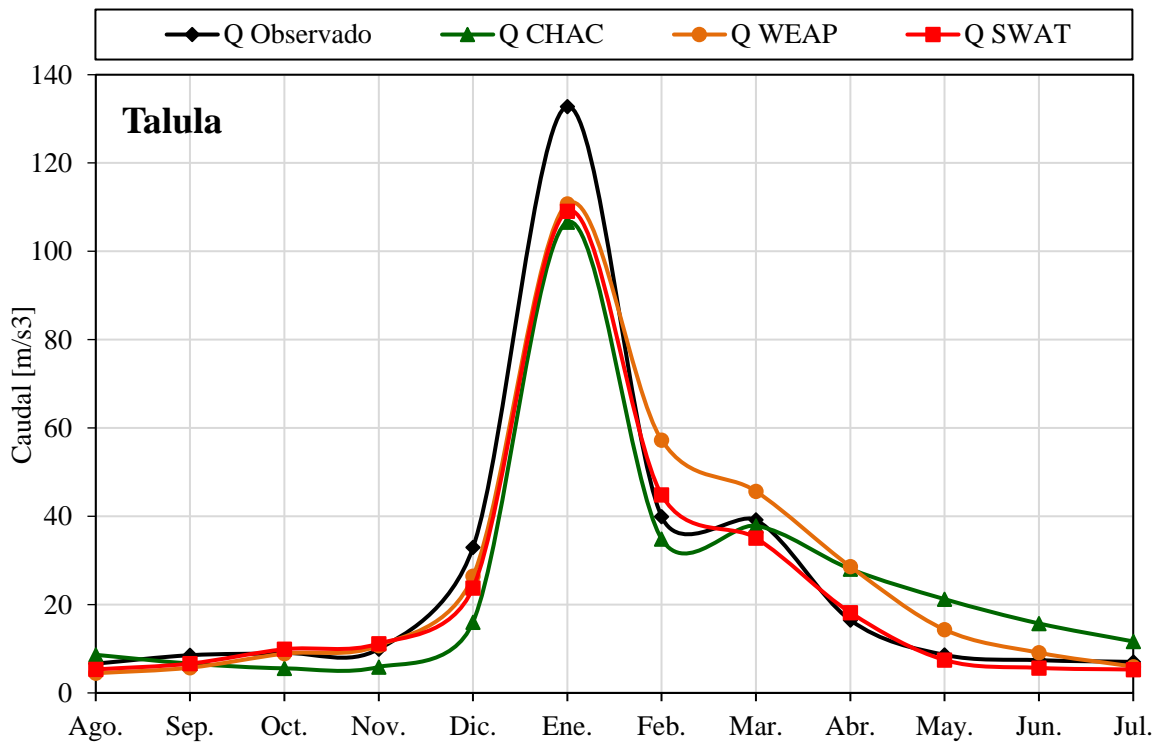
Como se observa en la Tabla 7.2 SWAT presenta los valores más altos de NSE en las tres cuencas y tanto en el periodo de calibración como en el de validación siendo calificados con excelentes y muy buenos al estar por encima de 0.78

A continuación se presentan ilustraciones del promedio mensual de caudales simulados con los tres modelos evaluados en la para las tres unidades hidrográficas, también se observa el promedio mensual de los caudales observados. En estas ilustraciones se pueden apreciar la variación de los promedios mensuales simulados respecto de los observados y su alternancia entre sí. Los promedios de estos hidrogramas corresponden al periodo de calibración.



a)

b)



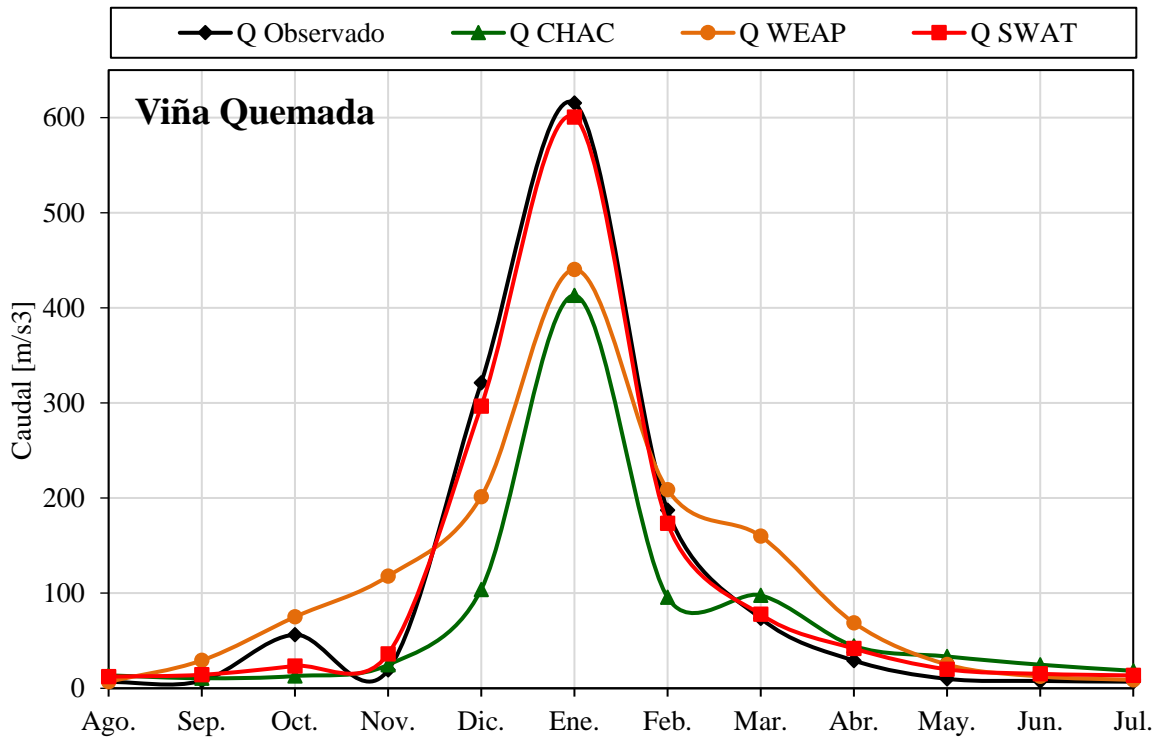


Figura 7.1 Caudales promedio mensuales observados y simulados con los modelos WEAP, CHAC y SWAT correspondientes al periodo de calibración. a) Ñujchu b) Talula c) Viña Quemada

c)

Como se puede observar en los hidrogramas presentados en la Figura 7.1 los tres modelos presentan semejanzas entre sí para las tres cuencas. Sin embargo es notable que el mejor modelo es SWAT. Luego entre WEAP y CHAC existe un desempeño similar, esto se atribuye a la simplicidad de ambos modelos.

7.3. CONCLUSIONES

- Los SIG son una herramienta necesaria e indispensable para la modelación hidrológica, es muy útil el desarrollo de modelos cuya interfaz sea compatible con los SIG y ofrezca un ambiente amigable con estos, como es el caso de WEAP y SWAT que logran el cometido de facilitar la modelación.
- El DEM usado para la realización del presente estudio fue adquirido de la página web de HydroSHEEDS y tiene una resolución aproximada de 500 metros. Se optó por usar este producto debido a que es de aquí que WEAP descarga los modelos de elevación digital para el proceso de delimitación de la cuenca. Si bien esta fuente cuenta con modelos cuya resolución es más fina (90 metros) se optó por usar el modelo de 500 metros debido a la resolución del mapa de tipo de suelo que es de 500 metros. No obstante considerando el tamaño de la cuenca este aspecto no es relevante y la resolución utilizada es considerada aceptable.
- El procesamiento de los datos meteorológicos es un suceso que requiere especial atención. Para el propósito del presente estudio se usaron los datos meteorológicos rellenos por Callaú (2016). De la misma forma los datos hidrométricos fueron los generados por Callaú a partir de lecturas de reglas limnimétricas y batimetrías. Debido a los resultados obtenidos en el presente estudio, es destacable mencionar que la calidad de los datos hidrometeorológicos fue comprobada.
- En cuanto al procesamiento de la información hidrometeorológica de la cuenca, se aplicaron metodologías que fueron utilizadas y evaluadas en otros estudios. Tal es el caso del método de polígonos de Thiessen, el cual resulta ser efectivo para obtener una precipitación promedio a partir de mediciones puntuales. Por otra parte este método fue adaptado para la obtención de temperaturas medias areales haciendo uso de las curvas hipsométricas de las subcuencas. Este análisis también arrojó valores razonables de temperatura para las subcuencas. Por otra parte se realizó el cálculo del gradiente de temperatura para las subcuencas que contaban con pocas estaciones en su interior. El gradiente estimado es igual a 0.6°C por cada 100 m, un valor típico considerando el clima y la zona donde se encuentra la cuenca.
- La evapotranspiración potencial fue estimada por el método de la FAO Penman – Monteith, el cual es considerado uno de los mejores métodos según la literatura.

Aunque las variables de velocidad del viento, humedad relativa y fracción de nubosidad fueron cargadas como promedios mensuales los valores de evapotranspiración potencial obtenidos pese a que son altos son considerados precisos y fueron corroborados con los registros de algunas de las estaciones cuyos registros son considerados los más confiables como es el caso de Sucre Aeropuerto.

- La caracterización física de la cuenca fue realizada en base a los requerimientos del modelo hidrológico de WEAP. Vale decir que se realizó el cruce entre el mapa de uso y tipo de suelo y con la información adjunta de estos mapas se procedió a realizar una reclasificación para poder conseguir una asociación de los parámetros del modelo a las características físicas de la cuenca. Es importante mencionar que se este procedimiento nos permite tener más de un valor para un solo parámetro, y que se eligió este procedimiento para tener una modelación más exacta. Realizadas las evaluaciones se concluye que esta metodología brinda buenos resultados.
- El análisis de sensibilidad de parámetros constituye un estudio importante en el proceso de calibración, puesto que permite optimizar dicho proceso al identificar a los parámetros más sensibles, los cuales en consecuencia deben ser los de mayor importancia en el proceso de calibración.
- Las series de caudales simuladas presentan buenos coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe para los periodos de calibración y validación del modelo, la mayoría de ellos supera los 0.7 o se encuentran cercanos al 0.6, para ambas modelaciones (WEAP y CHAC), en consecuencia los valores de dichos coeficientes son aceptables. Se puede atribuir a la poca cantidad de estaciones pluviométricas y a la calidad de las mismas, las diferencias en la estimación de eventos extremos.
- El modelo hidrológico de mejor desempeño para representar los caudales mensuales a la salida de la cuenca Talula es el SWAT, seguido por los modelos WEAP y el CHAC. Para las cuencas de Ñujchu y Viña Quemada el modelo de mejor rendimiento es también el SWAT, sin embargo a este le sigue el CHAC y por último el SM de WEAP.
- El SWAT requiere una mayor cantidad de datos de entrada, sin embargo cuenta con bases de datos bastante extensas que ayudan a adoptar algunos parámetros desde

que se cuente con mapas de uso y tipo de suelo de la cuenca, este último es más difícil de obtener.

- El modelo WEAP busca asociar valores de sus parámetros a características físicas de la cuenca, sin embargo estos valores son una primera aproximación ya que necesariamente los valores de los parámetros son modificados en la etapa de ajuste y verificación del modelo.
- El CHAC es uno de los modelos más simples en términos de introducción de datos, sus parámetros también pueden ser vinculados a características físicas de la cuenca, sin embargo son una primera aproximación y son modificados en la etapa de la calibración

7.4. RECOMENDACIONES

- Se recomienda abordar los procedimientos considerados como necesarios en cualquier estudio hidrológico, siendo estos, la descripción y caracterización física de la cuenca estudiada, el procesamiento y evaluación de la información hidrometeorológica, la modelación hidrológica de la cuenca y la comprensión de los procesos hidrológicos involucrados.
- La sensibilidad de los parámetros varía de una cuenca a otra puesto que los parámetros son dependientes de las características físicas de las unidades hidrográficas, en consecuencia es importante realizar dicho análisis para cada estudio en particular.
- Se recomienda realizar una evaluación de la clasificación de uso y tipo de suelo a adoptarse en futuras modelaciones hidrológicas realizadas en el SM de WEAP, en función de la superficie de la cuenca.
- Debido a que la mayor parte de la información meteorológica se encuentra en la zona media y baja de la cuenca, se recomienda incluir otro tipo de información (imágenes satelitales TRMM o la grilla de GMET por ejemplo) que permita mejorar la distribución espacial de los eventos de precipitación en regiones de la cuenca que presentan poca o ninguna información meteorológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Bautista Condori, R., & La Fuente Pillco, R. S. (2014). *Desarrollo del modelo hidráulico y escenarios hidrológicos en el marco del plan director de la cuenca del río Rocha*. Cochabamba.
- Borelli, F. (2005). *Evaluación de sitios de embalse - Aspectos hidrológicos*.
- Cabrera, J. (2015). *Calibración de modelos hidrológicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería Civil.
- Cabrera, J. (2015). *Validación de modelos hidrológicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería Civil.
- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233*. Cochabamba: Trabajo dirigido por adscripción Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS.
- Callaú Medrano, S. (2016). *Cuantificación Del Potencial Hídrico De Una Cuenca A Gran Escala – Aplicación A La Cuenca Del Río Pilcomayo Hasta La Estación Hidrométrica Viña Quemada*.
- CEDEX, C. d., & Ministerio de Fomento, E. (2013). *CHAC. Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas Manual CHAC*. Madrid.
- Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, & SEI. (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Santiago; Boston.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Comision Nacional de Riego de Chile. (2017). *Boletín Coeficiente de cultivo*. Santiago.
- DHI. (2009). *MIKE 11 Un sistema de modelación para ríos y canales*. Hørsholm: DHI Water & Environment (DHI).
- Estrela, T. (1997). *Formulación teórica del modelo Témez*. Madrid: Publicaciones del CEDEX 18 p.
- Gonzales Tomanyi, A. (2016). *Productos 3 y 4 - Propuesta metodológica de balance hídrico de oferta y demanda en microcuencas (~100 km²) y aplicación en las cuencas Panamá-Uchuchajra del municipio de Aiquile y Pojo-Challhuani del municipio de Pojo*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA).

- Ingol Blanco, E. M. (2009). *Hydrological model for the Conchos river basin: calibration and validation*. Austin: Center for Research in Water Resources.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua, M. (2012). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia*. La Paz.
- MMAyA, M. (2017). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia 1980/1981 - 2015/2016*. La Paz.
- MMAyA, M. d., & VRHR, V. d. (2016). *Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales*. La Paz: 4-1-877-16 P.O.
- Molina Carpio, J., & Espinoza Romero, D. (2006). *Balance hídrico superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo*. La Paz.
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling*. Zürich: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Moncada, A. M. (2018). *Modelación estratégica del río Rocha- Programa de capacitación intensiva Version 2.0*. Cochabamba: SEI.
- Montenegro Terrazas, E., Muñoz Claros, J., & MMAyA. (2017). *Balance hídrico Superficial de Bolivia-Análisis de sensibilidad de parámetros SM de WEAP*. Cochabamba: LHUMSS.
- Olaya Ferrero , V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall College Div.
- Refsgaard, J., & Knudsen, J. (1996). *Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models*. Water Resources Research.
- Romay Bartolini, J. M. (2006). *Aplicación de Sistemas de Información Geográfica en la modelación hidrológica e hidráulica del río Rocha*. Cochabamba.
- Soria Céspedes, F. (2016). *Balance hídrico integral para la cuenca del río Ravelo*. La Paz.
- Villazón Gomez, M. (2011). *Modelling and conceptualization of hydrology and river hydraulics in flood conditions, for Belgian and Bolivian basins*. Leuven.
- Yates , D., Purkey, D., Sieber, J., Hubber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005). *A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation*. Water International.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., & Huber-Lee, A. (2005). *A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 1, model characteristics*. Water International.

ZONISIG. (2000). *Zonificación Agroecológica y Socioeconómica, departamentos de Chuquisaca, Potosí y Tarija.*

ANEXO A

PROCESAMIENTO DE LAS SERIES HIDROMETEOROLOGICAS

A.1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas usadas para el relleno de datos.

ID	Estación	Depto.	Lat.	Long.	Elevación (m.s.n.m.)	Precip (mm)	Temp max (°C)	Temp min (°C)
1	Challapata (Tacagua)	Oruro	-18.9	-66.78	3733	X	X	X
2	Quillacas	Oruro	-19.23	-66.96	3724	X	X	X
3	Cruce Ventilla	Oruro	-19.07	-66.18	3560	X		
4	Actara	Potosí	-19.05	-65.97	3440	X		
5	Tinquipaya	Potosí	-19.22	-65.82	3200	X	X	X
6	Ayoma	Potosí	-18.87	-66.13	3700	X	X	X
7	Macha	Potosí	-18.82	-66.03	3480	X	X	X
8	Pocoata	Potosí	-18.7	-66.17	3360	X	X	X
9	Colquechaca Pti	Potosí	-18.7	-66.03	4170	X	X	X
10	Ocuri	Potosí	-18.83	-65.78	3980	X	X	X
11	La Palca Pti	Potosí	-18.75	-66.02	3600	X		
12	Alamos	Chuquisaca	-18.71	-65.39	3042	X		
13	Ravelo	Potosí	-18.8	-65.51	3200	X	X	X
14	Potolo	Chuquisaca	-19.02	-65.53	3080	X		
15	Tacobamba	Potosí	-19.2	-65.55	3080	X		
16	Colavi	Potosí	-19.32	-65.53	3850	X		
17	Yocalla	Potosí	-19.38	-65.73	3450	X	X	X
18	Samasa	Potosí	-19.48	-65.68	3650	X	X	X
19	Santa Lucia Pti	Potosí	-19.55	-65.85	3509	X		
20	Tarapaya	Potosí	-19.47	-65.82	3340	X	X	X
21	Potosí Aeropuerto	Potosí	-19.53	-65.73	4100	X	X	X
22	Yura	Potosí	-19.72	-66.38	4360	X	X	X
23	Rio Mulato	Potosí	-19.68	-66.77	3815	X	X	X
24	Taro	Potosí	-19.83	-66.17	3750	X		
25	Chaquilla	Potosí	-19.85	-66.13	3760	X	X	X
26	Potosí Los Pinos	Potosí	-19.58	-65.75	3950	X	X	X
27	Chaqui	Potosí	-19.58	-65.55	3550	X	X	X
28	Challviri	Potosí	-19.62	-65.5	3370	X	X	X
29	Cuchu Ingenio	Potosí	-19.88	-65.7	3700	X		
30	Chico Chico	Potosí	-19.67	-65.55	3625	X	X	X
31	Puna	Potosí	-19.8	-65.5	3420	X	X	X
32	Vilacaya	Potosí	-19.98	-65.48	3230	X	X	X
33	Vitichi	Potosí	-20.12	-65.48	3020	X	X	X

A.1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas usadas para el relleno de datos (continuación).

ID	Estación	Depto.	Lat.	Long.	Elevación (m.s.n.m.)	Precip (mm)	Temp max (°C)	Temp min (°C)
34	Keluyo (Esqueri)	Potosí	-19.83	-65.18	3400	X		
35	Otavi H	Potosí	-20.15	-65.35	3380	X	X	X
36	San Lucas	Chuquisaca	-20.08	-65.13	3055	X	X	X
37	Chinoli	Potosí	-19.63	-65.37	3450	X	X	X
38	Kespillajta	Potosí	-19.5	-65.42	3325	X		
39	Quila Quila	Chuquisaca	-19.13	-65.37	3526	X		
40	Betanzos	Potosí	-19.55	-65.45	3320	X		
41	Maragua H	Chuquisaca	-19.03	-65.42	3040	X		
42	Talula Tako Tako	Chuquisaca	-19.11	-65.41	2859	X	X	X
43	Punilla	Chuquisaca	-18.98	-65.31	3300	X		
44	Sucre Aeropuerto	Chuquisaca	-19.01	-65.29	2904	X	X	X
45	Pojpo H	Chuquisaca	-18.78	-65.32	2400	X		
46	Tullma H	Chuquisaca	-19.05	-65.28	2580	X		
47	Sucre SENAMHI	Chuquisaca	-19.05	-65.22	2890	X	X	X
48	El Reloj	Chuquisaca	-19.04	-65.24	2840	X		
49	La Madona	Chuquisaca	-19.03	-65.23	2840	X		
50	Cachimayu	Chuquisaca	-19.13	-65.27	2400	X		
51	El Cortijo	Chuquisaca	-19.13	-65.23	2040	X		
52	Yotala	Chuquisaca	-19.15	-65.25	2520	X	X	X
53	Ñucchu	Chuquisaca	-19.2	-65.28	2398	X		
54	Alcantari	Chuquisaca	-19.18	-65.12	3100	X	X	X
55	Escana	Chuquisaca	-19.25	-65.07	2700	X		
56	Casin	Potosí	-19.37	-65.22	2645	X	X	X
57	Millares H	Potosí	-19.42	-65.18	2300	X		
58	Puente Sucre	Chuquisaca	-19.35	-65.18	2200	X		
59	Tarabuco	Chuquisaca	-19.18	-64.91	3284	X	X	X
60	La Mendoza	Chuquisaca	-19.35	-64.95	2080	X		
61	Oronkota Ptí	Potosí	-19.58	-64.83	2050	X	X	X
62	Turuchipa	Potosí	-19.82	-64.93	2360	X	X	X
63	Viña Quemada	Chuquisaca	-19.41	-64.85	2030	X	X	X
64	Presto	Chuquisaca	-19.92	-64.93	2460	X		

ID_ST	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	% faltantes
1		11									9	10	8									4				2					10	9	7	6	0,41		
2	7		11	11			11							5							11			8			11					11			3	0,35	
3														8	8	1	9	7	6	8				3	6	8	2				3			11	10	5	0,75
4	7							11	11				10						2											3				3	8	5	0,42
5	6		11													11		11		5			11												3	0,06	
6	7																	2											5				10		3	0,35	
7	7											10			10						6							2								0,31	
8							8		6	10																	2	7			11					0,79	
9	8			8			8	2		9	11																										0,84
10	2								11	2	10														11	2	10										0,75
11				1								11																									0,67
12	1						8	8							11														3							0,32	
13											7			9				5	11																3	0,13	
14	2																												10						3	0,29	
15	2																						11	6	8			7			3				9	5	0,83
16	7																11														1			3	6	6	0,42
17		11			11				10						10	11					7														3	0,05	
18																					4			11					8						4	0,44	
19	9									10	6																										0,53
20	8		10	11										3	11						9														6	0,26	
21			7	11				11			8	7	11				11				6	11														0,19	
22			5	11		11			3									10	4																		0,76
23								5			11	7	8					10		9				2		11									1	0,35	
24																												7				10					0,85
25	8										8		6	11						4						1			3			3		10	5	0,23	
26																					6																0,02
27							10	11					11								6							1							6	0,29	
28											6										3																0,56
29	1			10																																	0,53
30															7				11	5					11										10	0,48	
31			10					9													8					6	10					11	6	10		7	0,09
32	2			4	10		11																														0,88

 Años que no presentan vacíos en su registro
 Años que presentan vacíos en su registro, el número indica la cantidad de meses del respectivo año con registros disponibles

A.2. Disponibilidad de datos precipitación para el periodo 1976-2011.

A.2.a Disponibilidad de datos precipitación para el periodo 1976-2011 (continuación).

ID_ST	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	% fuentes	
33	10	11	11	9															4					2			8								7	0,13		
34	2	11												10				2																			0,67	
35	7																	8		5							2		4							0,24		
36																																					0,37	
37			3	11							11									9													11		3	0,12		
38																	4																				0,45	
39	3																	4																			0,54	
40	5	10												8			10																				0,70	
41	10																	5																			0,52	
42																																				3	0,02	
43	2													11																						3	0,05	
44																																					0,00	
45											11							5																			0,60	
46	5										11																										0,74	
47																			3																		0,38	
48																			3																	4	0,54	
49			2							3				11		7																1	1			0,64		
50			3				7	8	8		5		11					4																		3	0,22	
51																																					0,75	
52																																					0,81	
53														10			11												2	4						3	0,16	
54																																					0,63	
55																	7	2			11	8	9	11				3								0,76		
56																									2											9	0,68	
57				1															5																		0,60	
58																																	2		3	7	3	0,15
59											10	6	6																								3	0,06
60											8		6						5	11												3	11		3	8	0,43	
61	5			6	11					2																		5									0,57	
62	10							10	10																												0,55	
63			1									11	9					8		8	11																3	0,11
64																																						0,55

■ Años que no presentan vacíos en su registro
■ Años que presentan vacíos en su registro, el número indica la cantidad de meses del respectivo año con registros disponibles

ID_ST	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	% faltantes
1									8	2	9	8									4				2				10		9	7	5		0,45		
2																			11			9			11	X			11	11		3				0,61	
5	6		11													11		11		5		11												3		0,06	
6																													3		10			3		0,85	
7								11			10		10							5				11			2									0,54	
9	8		8				7	3	10																												0,84
13	11			11	11						7			9	5	11		5	10												11	11		3		0,15	
17					11				10					10							7													3		0,05	
18																					4		11					8						4		0,44	
20													3	11							9															0,34	
21			8	11		7		11	11	3	7		8				11				6	11														0,56	
22						11		3								4		10	4																	0,84	
23								4			11	7	8					10		9			2		11											0,36	
26																					6															0,02	
27									11												6						1						3		0,35		
28																						4							5						0,81		
30														8					11	5			11					5				10			0,50		
31			10					9												8					6	9				11	6	10		7		0,13	
33	10		11		1	9						6																						5		0,47	
36																									11										3		0,55
37			3	11							11										9										11			11		0,10	
42	11						11			11	11																							3		0,03	
44																																				0,00	
47																				6			7										11		0,73		
52																																				0,81	
54																	3	11																		0,81	
56																								2												0,67	
59									10					8		8																		3		0,11	
61																												6								0,77	
62	10		10		10	10																														0,77	
63						11					11	9			8																					0,77	

Años que no presentan vacíos en su registro
 Años que presentan vacíos en su registro, el número indica la cantidad de meses del respectivo año con registros disponibles

A.2.b. Disponibilidad de datos de temperatura máxima para el periodo 1976-2011.

A.3.a. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Talula.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	23.0	41.0	11.9	34.0	64.5	59.7	153.6	115.5	21.9	0.6	0.0	0.7	526.4
1977/1978	13.9	23.4	53.2	89.5	162.6	148.1	133.0	88.4	57.3	0.6	0.0	3.5	773.4
1978/1979	18.8	7.8	23.6	36.3	176.2	192.5	94.1	80.8	22.4	0.8	0.2	3.2	656.8
1979/1980	0.2	3.4	38.6	49.6	118.9	66.3	58.0	109.0	2.7	3.5	1.0	3.8	455.0
1980/1981	29.3	11.6	53.4	32.8	47.6	179.2	123.4	67.1	31.7	2.3	0.0	0.0	578.5
1981/1982	28.6	37.1	19.1	48.2	88.7	127.3	86.8	107.5	39.7	0.1	0.0	0.0	583.0
1982/1983	0.9	25.4	86.0	42.5	65.7	44.7	67.8	17.8	13.3	0.5	0.2	4.3	369.1
1983/1984	9.3	13.8	15.4	23.4	81.0	239.4	198.2	168.1	25.2	0.6	0.3	0.1	774.8
1984/1985	9.3	4.0	50.2	61.0	77.2	93.7	162.1	65.8	46.4	2.5	1.3	0.5	574.0
1985/1986	10.3	17.0	16.4	169.8	168.8	86.1	102.5	129.9	16.7	0.4	0.3	0.8	719.1
1986/1987	1.2	5.9	21.0	37.3	120.7	168.7	33.1	42.4	9.3	3.1	5.9	3.9	452.5
1987/1988	2.1	4.1	26.5	21.5	57.4	104.1	69.2	181.3	49.8	2.0	1.6	0.1	519.7
1988/1989	0.1	19.0	16.4	16.0	79.8	97.8	57.1	65.1	75.5	0.4	0.4	0.1	427.7
1989/1990	0.0	3.7	6.9	29.1	64.7	120.8	66.5	24.6	23.6	2.0	8.1	0.0	350.0
1990/1991	11.7	3.5	57.4	83.3	61.8	91.8	78.5	81.2	27.8	0.1	0.2	0.0	497.4
1991/1992	1.1	4.4	26.7	39.5	65.0	185.3	85.6	55.1	14.5	0.4	5.8	3.7	487.0
1992/1993	7.3	0.5	39.5	64.9	98.5	165.4	52.1	98.4	22.0	1.7	0.0	0.0	550.3
1993/1994	7.4	14.9	25.6	48.2	61.4	85.0	64.2	68.0	11.4	1.9	0.0	5.3	393.4
1994/1995	0.0	6.9	24.5	56.8	50.2	120.0	67.7	84.5	14.0	1.2	0.1	0.0	426.1
1995/1996	1.0	13.3	18.4	23.9	63.6	111.8	47.4	59.3	23.4	4.8	1.7	0.1	368.7
1996/1997	30.1	5.9	13.7	69.4	112.5	158.7	177.3	88.5	29.6	2.9	0.5	0.0	689.2
1997/1998	7.5	36.5	25.2	54.2	45.6	63.1	73.5	58.0	29.3	0.3	1.4	0.2	394.8
1998/1999	2.7	3.2	55.8	85.0	33.1	64.1	129.9	96.4	15.9	8.2	0.1	1.8	496.2
1999/2000	0.4	22.9	52.9	18.9	44.7	163.3	82.6	51.3	11.8	0.8	0.1	0.0	449.9
2000/2001	0.5	2.7	19.0	14.8	154.3	258.6	165.7	76.5	11.8	0.2	0.3	0.3	704.8
2001/2002	8.1	24.7	17.8	24.1	65.5	80.4	81.5	42.5	20.4	1.4	3.8	4.5	374.6
2002/2003	0.1	4.5	28.5	63.5	25.9	99.5	80.1	57.0	10.2	2.7	0.0	2.8	374.7
2003/2004	1.1	9.8	9.3	6.1	77.9	101.8	76.5	80.4	18.6	0.2	1.1	2.8	385.6
2004/2005	3.4	8.7	13.2	10.9	40.0	89.2	74.3	40.1	19.6	0.2	0.0	0.0	299.8
2005/2006	0.0	33.2	37.1	42.0	74.0	195.0	78.8	45.6	18.7	7.8	0.0	0.0	532.3
2006/2007	0.5	12.6	22.2	34.4	65.9	163.8	49.9	81.5	38.1	3.5	0.3	0.2	472.9
2007/2008	4.8	22.4	24.4	33.4	110.7	192.6	70.6	55.0	11.6	0.0	0.1	0.3	526.1
2008/2009	1.1	2.6	29.5	18.7	84.8	183.9	143.0	86.5	33.7	5.3	0.0	0.5	589.5
2009/2010	0.0	4.3	4.0	44.9	87.3	103.7	96.5	49.1	17.5	8.9	0.0	2.4	418.8
2010/2011	2.1	1.7	29.2	5.2	41.4	49.2	218.7	118.2	25.1	2.6	0.1	0.7	494.2

A.3.b. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Yocalla.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	34.5	39.7	21.0	36.6	52.1	68.2	101.7	72.2	37.8	0.1	0.0	0.0	464.0
1977/1978	0.3	41.4	52.1	47.7	99.2	125.5	100.1	71.6	42.2	0.7	0.0	1.5	582.2
1978/1979	2.1	17.4	12.1	40.7	76.3	187.9	35.8	72.8	20.9	0.0	0.0	1.2	467.3
1979/1980	0.0	20.1	11.1	45.0	66.7	89.1	39.0	71.7	26.1	0.4	2.8	3.5	375.6
1980/1981	21.5	23.1	21.0	45.4	32.6	136.8	73.8	74.6	31.0	0.1	0.0	0.0	460.0
1981/1982	27.0	49.8	16.5	50.9	73.0	111.2	52.5	66.6	28.4	0.2	0.0	0.0	476.0
1982/1983	0.0	40.8	42.8	8.3	55.1	74.4	50.9	64.0	22.3	0.0	0.0	2.7	361.3
1983/1984	4.3	31.1	36.3	20.0	49.5	166.9	91.2	145.5	8.0	0.0	0.0	0.0	552.9
1984/1985	6.7	13.4	34.1	30.0	67.9	98.1	120.1	64.4	22.1	0.0	0.1	0.0	456.9
1985/1986	1.1	25.7	27.0	58.8	82.7	111.8	82.0	123.4	9.2	0.0	0.0	0.0	521.8
1986/1987	0.0	22.1	47.0	19.6	81.1	145.7	76.1	59.2	40.6	0.0	5.0	1.1	497.6
1987/1988	27.9	28.3	67.4	48.1	39.6	86.3	75.8	204.9	21.7	0.5	0.6	0.0	601.2
1988/1989	0.1	24.4	10.1	8.5	85.8	55.0	63.4	54.3	23.9	0.0	0.6	0.0	326.1
1989/1990	0.0	19.0	28.8	48.8	43.7	120.2	36.8	37.4	24.5	0.2	2.6	0.0	362.1
1990/1991	1.1	5.7	23.5	54.3	69.8	105.0	75.6	89.3	14.7	0.0	0.0	0.5	439.4
1991/1992	0.2	6.7	10.5	33.1	53.6	176.2	41.2	39.3	19.8	0.0	3.3	3.1	386.8
1992/1993	2.8	0.5	7.2	56.0	41.9	138.4	23.1	108.1	26.1	0.8	0.2	0.0	405.1
1993/1994	20.0	12.7	9.1	45.7	48.8	103.7	59.9	65.8	12.3	1.8	0.0	0.0	379.7
1994/1995	0.0	11.6	2.3	53.1	61.8	101.1	53.6	78.5	23.0	0.6	2.8	0.0	388.4
1995/1996	1.7	37.1	44.9	16.1	58.1	122.9	55.3	47.5	24.4	5.4	0.0	0.0	413.3
1996/1997	34.0	29.6	37.6	36.6	84.1	96.2	95.1	98.0	19.4	0.2	1.7	0.0	532.5
1997/1998	15.1	30.2	28.1	21.0	15.5	62.8	84.1	39.6	19.3	0.0	10.0	2.8	328.6
1998/1999	0.6	4.0	27.4	60.5	29.3	78.0	79.5	116.2	14.8	0.5	1.7	2.8	415.1
1999/2000	0.0	32.1	54.2	8.7	47.9	167.5	33.8	60.2	34.8	0.0	0.0	0.0	439.2
2000/2001	0.0	12.1	31.2	26.6	62.9	210.1	87.1	70.7	25.2	1.2	0.0	0.0	526.9
2001/2002	12.0	28.4	36.5	16.1	54.5	80.8	105.8	58.5	28.9	2.9	1.0	2.2	427.7
2002/2003	0.0	3.7	15.2	51.4	9.5	163.2	43.7	83.7	14.7	1.4	0.0	3.6	390.1
2003/2004	0.6	7.1	9.6	11.4	77.9	112.4	90.7	79.8	10.9	0.0	2.3	1.5	404.3
2004/2005	0.7	9.8	28.4	13.9	27.3	94.9	103.2	66.8	20.2	0.0	0.0	0.0	365.2
2005/2006	0.0	18.9	30.0	36.2	64.3	196.9	45.4	84.8	27.5	4.6	0.0	0.0	508.7
2006/2007	6.6	13.5	45.0	37.4	53.5	111.9	66.9	110.7	32.7	1.3	0.8	0.9	481.3
2007/2008	5.9	34.3	23.7	28.1	70.2	121.4	59.9	41.4	29.4	0.0	2.8	0.0	417.1
2008/2009	4.2	6.8	15.0	10.3	78.5	182.8	61.6	60.0	34.1	0.6	0.0	1.0	455.0
2009/2010	0.0	10.6	5.4	43.1	92.7	132.7	82.2	58.0	41.0	9.6	0.0	0.7	476.1
2010/2011	0.6	6.0	25.8	18.5	34.6	71.8	154.5	88.1	9.1	9.0	0.0	0.0	417.9

A.3.c. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Tarapaya.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	1.5	22.4	1.0	20.0	45.7	47.2	104.2	84.6	14.1	0.1	0.0	0.0	340.7
1977/1978	0.0	16.5	28.5	55.2	150.5	104.1	85.8	83.9	36.1	1.0	0.0	0.1	561.6
1978/1979	7.2	1.7	10.8	28.4	110.3	142.4	51.9	59.9	12.2	0.0	0.0	0.6	425.2
1979/1980	0.0	0.9	11.5	10.5	90.4	43.5	32.7	76.4	1.3	1.9	0.0	2.8	272.0
1980/1981	12.3	4.0	41.1	18.6	30.7	103.0	80.4	56.8	24.4	0.0	0.0	0.0	371.3
1981/1982	16.3	46.1	19.2	24.8	54.5	72.7	40.9	64.8	3.6	0.2	0.0	0.0	343.0
1982/1983	0.2	21.0	21.7	38.9	46.8	28.9	34.7	6.4	3.8	0.0	0.0	2.0	204.3
1983/1984	6.7	5.1	11.1	18.3	50.9	171.9	128.8	132.9	12.1	0.7	0.2	0.0	538.5
1984/1985	13.9	9.3	51.2	48.9	61.4	78.8	104.7	43.9	49.5	0.2	0.6	0.0	462.4
1985/1986	4.6	8.9	10.9	47.2	97.5	62.0	79.0	59.1	6.4	0.1	0.1	0.0	375.7
1986/1987	0.0	1.5	20.6	20.4	107.4	63.2	35.3	75.9	7.0	0.0	15.9	6.1	353.3
1987/1988	0.0	2.7	58.4	45.2	21.1	75.1	51.0	110.7	48.1	0.4	0.7	0.0	413.3
1988/1989	0.1	18.8	9.6	19.4	79.7	58.8	34.6	49.9	60.8	0.0	0.2	0.1	332.0
1989/1990	0.0	1.0	9.5	29.4	41.4	101.0	53.5	20.1	17.9	0.3	6.7	0.0	280.9
1990/1991	3.3	0.0	39.0	59.3	71.0	129.7	75.5	57.5	22.6	0.0	0.0	0.0	457.8
1991/1992	0.5	1.3	25.9	40.7	32.8	111.6	88.6	28.4	3.4	0.0	9.6	2.2	345.0
1992/1993	1.1	0.0	26.1	46.7	51.7	117.1	20.9	60.8	34.4	0.0	0.9	0.0	359.8
1993/1994	10.6	11.2	23.1	21.4	85.0	67.2	20.8	48.6	1.9	0.4	0.0	0.0	290.1
1994/1995	0.0	4.6	5.3	23.7	59.1	90.6	31.2	82.8	5.5	1.6	0.0	0.0	304.3
1995/1996	0.0	10.0	8.0	18.9	54.7	84.1	46.4	19.2	14.0	0.7	0.0	0.0	256.1
1996/1997	21.9	9.6	19.4	40.7	98.9	164.2	102.9	79.5	44.0	0.0	0.0	0.0	581.1
1997/1998	1.9	32.7	4.3	22.1	23.7	43.6	51.0	18.9	12.3	0.0	0.8	0.0	211.3
1998/1999	2.1	0.0	75.4	63.1	34.5	57.6	60.3	113.4	18.4	0.0	0.0	0.1	424.9
1999/2000	0.0	27.5	44.3	19.6	40.3	148.5	45.1	34.1	18.3	0.0	0.0	0.0	377.8
2000/2001	0.1	0.4	19.0	16.3	70.5	199.5	123.6	88.2	11.1	0.0	0.0	0.0	528.7
2001/2002	5.4	12.1	9.6	25.1	51.9	84.1	65.5	32.8	16.8	1.9	4.2	0.9	310.2
2002/2003	0.0	0.8	40.2	29.9	17.8	63.3	50.5	24.9	4.6	1.4	0.0	5.9	239.4
2003/2004	2.9	7.3	8.6	12.5	115.8	83.8	70.2	26.1	5.1	0.0	0.0	2.4	334.7
2004/2005	3.8	4.3	1.6	6.6	39.0	135.4	87.0	30.0	19.0	0.0	0.0	0.0	326.6
2005/2006	0.0	31.7	64.8	40.1	36.4	167.0	38.7	55.6	42.0	1.9	0.0	0.0	478.2
2006/2007	0.0	5.0	48.8	33.3	40.5	138.9	55.1	93.6	16.9	0.3	0.0	0.4	432.7
2007/2008	0.5	16.2	20.0	32.8	87.1	159.2	44.5	30.6	4.3	0.0	0.0	0.0	395.2
2008/2009	0.8	0.4	37.1	26.6	90.0	127.0	133.3	110.0	22.3	1.5	0.0	0.0	548.9
2009/2010	0.0	1.8	1.8	36.7	83.2	157.8	87.8	50.4	13.9	1.2	0.0	0.3	434.9
2010/2011	1.2	4.3	44.9	16.6	49.6	66.2	184.6	121.8	2.8	4.9	0.0	0.3	497.0

A.3.d. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Puente Sucre.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	32.6	37.9	24.6	25.2	70.4	78.3	145.1	91.7	5.3	0.2	0.0	2.6	513.8
1977/1978	9.0	42.6	49.7	79.7	119.1	122.2	198.0	125.7	32.3	0.0	0.0	0.9	779.2
1978/1979	10.2	10.1	22.4	57.9	175.1	233.5	64.2	84.7	9.4	2.2	0.3	6.0	675.9
1979/1980	0.3	0.3	48.9	92.4	187.9	121.6	79.4	140.5	17.9	7.2	1.3	7.2	704.8
1980/1981	35.5	15.3	55.5	39.0	72.5	186.5	166.1	111.5	27.1	8.8	0.0	0.0	717.9
1981/1982	42.8	60.7	49.3	110.8	180.1	189.0	155.1	149.1	42.2	2.1	0.0	0.0	981.4
1982/1983	1.9	36.3	38.3	63.7	85.0	58.2	71.6	15.0	25.9	1.1	0.2	3.1	400.2
1983/1984	7.7	4.1	24.6	29.1	120.2	321.2	185.5	150.7	14.3	1.2	0.6	0.0	859.1
1984/1985	3.4	2.8	67.9	84.9	94.5	91.8	118.7	34.6	19.0	2.7	7.0	0.6	527.9
1985/1986	12.6	44.1	20.2	112.0	132.7	73.9	77.0	86.9	21.4	1.3	4.2	4.0	590.3
1986/1987	3.4	18.7	25.6	42.9	103.6	118.7	53.9	54.3	33.2	5.4	8.0	1.6	469.4
1987/1988	0.2	10.0	66.1	46.5	47.9	83.3	66.4	176.6	45.7	9.9	0.0	0.0	552.5
1988/1989	0.0	18.0	30.3	27.2	85.1	76.3	46.2	58.9	95.1	0.2	0.8	0.1	438.2
1989/1990	0.0	4.0	20.1	30.8	96.0	107.4	90.4	22.3	16.7	11.2	5.2	0.0	403.9
1990/1991	8.0	10.4	38.5	46.4	55.0	135.6	65.2	63.9	41.0	0.0	0.4	0.0	464.2
1991/1992	0.0	3.8	13.8	47.0	65.4	189.9	68.0	47.5	8.3	0.9	2.9	2.5	450.1
1992/1993	3.4	0.5	47.6	33.9	101.3	131.1	84.4	115.1	13.7	2.6	0.2	0.0	533.9
1993/1994	11.2	36.2	22.2	41.7	78.5	131.5	113.9	59.1	11.6	8.4	0.3	0.0	514.5
1994/1995	0.0	20.4	38.0	45.5	78.3	147.8	79.3	80.6	4.1	5.2	0.0	0.0	499.2
1995/1996	8.4	8.6	16.6	36.4	77.6	119.7	80.7	39.6	23.3	3.1	3.7	0.0	417.8
1996/1997	37.3	6.1	17.4	86.8	152.1	170.7	179.0	162.4	43.8	1.0	1.2	0.0	857.8
1997/1998	3.9	99.4	37.6	43.9	35.7	74.2	72.0	51.8	25.0	0.8	0.4	0.0	444.7
1998/1999	3.0	12.9	70.8	58.4	47.7	64.4	65.9	114.1	20.8	1.5	0.1	7.3	466.8
1999/2000	2.8	28.7	51.5	35.5	45.2	143.0	86.2	72.1	11.2	1.0	0.2	0.0	477.5
2000/2001	10.3	8.8	30.9	49.9	119.9	254.3	178.5	62.2	23.7	4.7	0.5	0.4	744.0
2001/2002	10.9	14.9	38.8	29.4	80.3	67.8	90.0	38.1	47.6	5.8	1.4	3.8	428.7
2002/2003	2.5	6.9	71.5	52.6	32.8	80.3	79.8	65.9	8.3	13.8	1.9	5.2	421.4
2003/2004	0.7	24.8	26.6	16.2	88.8	123.9	87.0	63.5	39.4	0.3	2.3	1.0	474.5
2004/2005	1.7	12.9	32.5	42.7	78.7	79.2	86.3	35.8	31.8	0.5	0.0	0.0	402.1
2005/2006	0.0	32.0	60.8	41.0	126.5	203.7	113.3	51.8	22.7	1.9	0.0	0.0	653.7
2006/2007	0.2	15.1	33.9	35.0	43.5	161.9	72.0	110.4	30.1	9.5	0.6	0.0	512.3
2007/2008	1.8	28.7	61.9	53.7	129.0	291.9	86.5	68.7	18.7	0.0	0.0	0.0	740.8
2008/2009	1.0	4.8	37.1	27.9	103.6	276.2	151.4	110.6	31.9	4.0	0.0	0.4	748.8
2009/2010	1.9	4.3	9.4	91.6	84.3	93.9	141.4	40.2	5.7	9.5	0.1	6.5	489.0
2010/2011	0.3	3.7	25.1	26.5	55.3	64.4	202.9	85.4	24.0	1.6	0.4	1.0	490.5

A.3.e. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Viña Quemada.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	23.0	34.6	15.9	36.6	71.4	91.7	100.3	93.7	8.7	0.2	0.7	1.4	478.0
1977/1978	1.9	34.7	39.5	83.0	127.9	78.0	128.2	109.0	23.2	2.2	0.0	0.4	628.1
1978/1979	3.2	11.5	24.5	38.6	151.9	128.1	59.4	62.1	19.4	0.1	0.8	3.4	503.0
1979/1980	0.5	0.6	27.9	42.0	135.0	103.6	80.9	80.8	10.2	4.6	0.5	6.5	492.9
1980/1981	15.1	17.4	38.1	23.9	51.0	126.0	110.7	73.7	18.0	0.3	0.0	0.0	474.2
1981/1982	33.7	50.3	36.2	59.4	161.6	138.7	126.3	70.7	30.6	1.6	0.0	0.0	709.2
1982/1983	3.0	22.0	35.2	38.7	98.5	104.7	55.2	13.9	17.3	0.8	0.1	3.8	393.0
1983/1984	5.1	16.1	36.5	40.8	76.9	223.2	131.7	97.0	11.5	0.3	0.1	0.0	639.2
1984/1985	2.7	3.0	77.5	85.5	77.9	73.9	100.9	75.2	38.7	0.4	3.9	0.3	539.9
1985/1986	8.8	44.8	17.4	81.0	80.9	91.2	85.6	80.4	13.1	1.0	2.0	0.1	506.2
1986/1987	0.0	10.3	24.5	38.1	91.8	93.4	60.2	61.6	19.1	0.1	6.9	1.3	407.2
1987/1988	0.0	6.8	54.1	60.6	42.3	91.4	78.5	139.0	31.8	1.5	0.0	0.3	506.6
1988/1989	0.3	12.8	17.8	26.0	97.7	87.0	54.3	66.6	83.3	0.9	0.1	0.4	447.2
1989/1990	2.5	2.0	18.6	45.8	114.8	116.3	82.6	31.4	16.9	9.2	4.0	0.4	444.6
1990/1991	7.6	2.8	51.1	58.9	82.0	119.6	82.7	71.4	31.0	0.3	0.0	0.0	507.4
1991/1992	0.5	9.5	34.6	61.1	53.4	166.9	87.8	46.0	6.9	0.1	6.2	1.9	474.9
1992/1993	0.6	0.9	45.1	69.8	113.6	122.8	85.7	79.5	8.5	2.6	0.0	0.0	529.2
1993/1994	31.7	21.3	50.9	40.4	91.4	103.8	85.4	37.7	12.8	9.0	0.5	0.0	484.7
1994/1995	0.0	16.9	21.0	64.2	93.7	118.3	62.8	55.4	3.4	4.1	0.0	0.0	439.8
1995/1996	5.6	4.4	16.5	47.5	103.5	114.1	65.9	60.3	19.9	4.5	0.2	0.0	442.5
1996/1997	24.3	7.9	26.6	58.2	127.8	150.9	148.7	91.0	44.6	0.7	0.1	3.5	684.3
1997/1998	2.6	48.6	27.3	53.0	64.5	71.5	68.1	43.7	17.1	0.0	0.3	0.0	396.8
1998/1999	1.5	5.6	39.1	76.9	41.1	73.4	76.9	117.2	22.0	0.1	0.1	2.0	455.9
1999/2000	1.3	17.1	60.9	32.0	51.0	137.0	79.0	86.4	6.5	0.2	0.0	0.0	471.5
2000/2001	3.1	7.8	28.4	37.8	110.2	148.7	130.2	66.8	14.5	3.7	0.3	1.3	552.7
2001/2002	7.1	15.2	15.9	35.1	71.1	65.0	65.5	36.7	26.2	4.3	1.4	3.8	347.1
2002/2003	2.3	11.2	49.3	43.6	35.2	78.8	79.8	60.7	5.4	2.8	1.2	6.0	376.3
2003/2004	1.5	8.3	13.4	27.3	101.1	81.3	98.7	42.2	21.3	0.8	0.1	1.9	397.8
2004/2005	3.5	4.4	11.0	42.0	55.6	89.3	77.6	34.9	16.3	0.2	0.0	0.0	334.8
2005/2006	0.0	18.3	39.5	48.0	102.9	151.1	71.3	35.9	13.6	2.1	0.0	0.0	482.6
2006/2007	0.4	8.4	28.7	69.9	83.6	112.0	63.3	60.6	23.2	7.0	0.0	0.9	457.9
2007/2008	0.2	18.8	44.5	79.0	110.0	226.1	63.2	68.2	17.5	0.0	0.0	0.0	627.5
2008/2009	7.3	14.3	34.9	46.2	107.5	146.4	93.4	68.6	20.4	6.0	0.0	0.0	544.9
2009/2010	1.4	3.5	12.0	74.4	108.3	76.0	95.4	33.2	9.9	1.9	0.3	2.8	419.1
2010/2011	3.0	3.6	23.5	19.4	52.6	77.8	133.8	57.9	12.1	4.2	0.0	0.0	388.0

A.3.f. Precipitación promedio en milímetros para modelación con WEAP subcuenca Ñujchu y para modelación con CHAC cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Ñujchu.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	7.1	36.3	21.7	52.5	66.2	93.1	159.3	158.5	12.0	2.0	0.0	0.6	609.2
1977/1978	14.6	39.9	78.7	110.5	165.4	137.8	126.5	135.9	46.3	0.4	0.1	0.0	855.9
1978/1979	3.7	8.2	28.9	66.7	176.1	214.8	79.6	136.6	29.0	0.7	1.4	15.0	760.7
1979/1980	0.3	3.8	58.9	82.6	169.3	80.8	61.8	110.6	8.2	3.7	4.0	9.4	593.4
1980/1981	44.9	15.8	44.4	35.9	53.0	157.4	175.5	92.9	30.6	4.0	0.0	0.0	654.3
1981/1982	26.7	40.9	33.6	72.4	141.6	131.5	98.8	128.1	57.5	1.1	0.0	0.0	732.1
1982/1983	0.9	25.6	49.4	71.1	75.0	87.3	62.3	62.6	20.5	3.1	1.2	7.6	466.8
1983/1984	5.2	11.0	21.1	41.6	64.1	160.9	124.3	117.9	23.5	0.3	0.0	0.2	569.9
1984/1985	0.9	6.9	55.3	62.8	89.5	122.4	124.1	71.7	37.5	4.2	11.7	3.7	590.6
1985/1986	8.9	44.6	63.6	58.1	147.5	94.6	111.2	90.5	24.6	0.2	0.7	2.3	646.8
1986/1987	3.1	16.3	30.0	35.8	71.4	156.6	73.9	69.6	29.2	6.9	1.6	1.8	496.3
1987/1988	1.4	7.2	49.0	40.1	70.0	142.0	105.1	156.2	18.7	6.8	6.4	2.5	605.3
1988/1989	0.0	27.2	42.7	39.2	81.5	108.4	98.5	71.3	38.0	0.9	0.2	0.6	508.6
1989/1990	0.5	5.2	16.3	90.8	223.6	167.2	86.1	78.5	26.9	4.7	1.1	0.7	701.6
1990/1991	11.8	8.1	64.4	74.9	82.9	81.8	81.0	96.1	24.2	3.7	0.0	0.0	529.0
1991/1992	1.8	28.4	34.3	73.9	76.6	254.2	150.0	83.1	6.4	0.0	4.7	9.4	722.6
1992/1993	9.1	11.7	63.0	70.4	160.4	181.9	95.8	113.8	29.2	1.5	0.0	0.0	737.0
1993/1994	15.3	60.1	58.6	64.5	128.5	133.4	109.8	78.8	22.6	1.6	0.0	11.0	684.2
1994/1995	0.2	28.5	49.1	36.4	61.0	174.0	110.8	91.9	14.8	0.8	0.0	0.0	567.5
1995/1996	16.6	24.8	24.1	29.3	61.2	126.1	63.0	73.1	23.4	0.7	1.8	0.1	444.4
1996/1997	22.1	19.9	24.7	80.5	141.9	183.2	150.2	133.2	20.9	0.4	0.0	0.7	777.6
1997/1998	1.1	73.7	45.9	57.1	34.9	69.9	91.7	84.6	22.8	0.0	0.1	0.8	482.7
1998/1999	0.3	12.9	75.2	80.9	71.3	70.5	92.6	144.4	11.2	0.8	0.0	2.6	562.9
1999/2000	0.7	20.0	42.3	29.9	64.9	202.7	64.1	117.4	7.4	0.7	1.0	0.0	551.2
2000/2001	5.6	11.5	31.5	38.0	107.8	175.9	131.1	93.7	34.3	1.4	0.3	0.7	631.7
2001/2002	2.1	27.3	36.4	68.2	121.3	92.6	95.6	111.6	47.2	2.7	0.2	2.8	607.9
2002/2003	0.2	5.7	81.3	62.6	68.1	112.8	71.8	60.6	12.6	7.0	0.0	1.5	484.3
2003/2004	0.4	17.6	14.1	31.5	143.7	145.7	109.1	61.7	47.5	2.0	0.0	2.9	576.3
2004/2005	10.5	14.2	30.4	68.8	103.5	112.6	149.9	57.7	37.5	0.0	0.0	0.0	585.1
2005/2006	0.4	27.8	64.9	70.1	107.3	199.8	58.3	106.3	42.4	1.8	0.0	0.0	679.0
2006/2007	0.5	15.0	31.6	65.5	85.9	165.3	98.7	106.0	34.2	2.7	0.0	0.1	605.4
2007/2008	1.1	22.7	55.7	67.8	145.6	242.7	174.0	102.6	32.3	3.7	0.0	1.1	849.3
2008/2009	1.0	15.5	73.0	49.9	134.1	181.2	156.0	129.0	29.8	4.7	0.0	5.7	780.1
2009/2010	0.0	9.7	23.2	63.0	123.2	154.7	139.3	52.7	19.0	3.1	0.4	5.7	594.0
2010/2011	0.1	0.1	34.9	35.5	85.7	95.9	201.7	94.6	23.7	0.4	0.3	5.0	577.8

A.3.g. Precipitación promedio en milímetros para modelación con CHAC cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Talula.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	24.9	37.9	14.2	33.2	56.8	61.6	125.4	93.3	27.4	0.3	0.0	0.3	475.4
1977/1978	6.4	29.9	49.4	67.5	134.6	132.7	112.9	80.8	48.2	0.7	0.0	2.2	665.3
1978/1979	10.3	11.0	17.1	37.1	125.8	183.8	64.2	74.7	20.4	0.4	0.1	2.0	546.7
1979/1980	0.1	10.0	23.5	42.4	93.4	72.7	46.7	89.1	12.2	2.0	1.6	3.5	397.3
1980/1981	23.8	15.4	38.3	36.1	39.1	151.3	97.0	68.8	30.5	1.1	0.0	0.0	501.3
1981/1982	26.3	43.6	18.0	46.2	77.5	113.2	66.3	84.7	30.1	0.1	0.0	0.0	506.1
1982/1983	0.4	31.2	59.4	27.8	58.7	54.9	56.3	35.4	15.7	0.2	0.1	3.4	343.6
1983/1984	6.9	19.8	23.5	21.3	63.8	200.1	144.4	154.0	16.3	0.4	0.1	0.0	650.6
1984/1985	8.8	8.6	43.7	46.5	71.2	93.5	136.9	62.3	36.7	1.1	0.7	0.2	510.2
1985/1986	5.7	19.5	20.1	107.1	123.4	93.5	90.8	117.6	12.2	0.2	0.2	0.4	590.7
1986/1987	0.6	12.0	31.8	27.6	102.5	144.9	51.3	53.9	22.0	1.4	6.9	3.1	457.8
1987/1988	12.5	13.9	47.8	35.8	45.1	92.8	69.5	181.5	37.9	1.2	1.1	0.0	539.2
1988/1989	0.1	21.2	12.9	13.3	82.3	74.7	56.7	58.6	52.1	0.2	0.5	0.0	372.5
1989/1990	0.0	9.7	16.4	37.4	52.8	117.9	52.4	29.3	23.2	1.0	5.6	0.0	345.7
1990/1991	6.2	3.9	40.8	68.0	66.3	102.4	76.9	81.4	21.6	0.1	0.1	0.2	468.0
1991/1992	0.6	4.9	19.8	37.0	55.9	171.6	67.5	44.9	15.2	0.2	5.3	3.2	426.2
1992/1993	4.6	0.4	24.3	58.8	68.7	147.6	35.8	97.4	25.4	1.1	0.2	0.0	464.2
1993/1994	13.0	13.5	18.4	43.5	59.4	90.3	56.6	64.5	10.5	1.6	0.0	2.4	373.8
1994/1995	0.0	8.6	12.7	50.8	56.2	108.2	56.9	81.8	16.6	1.0	1.2	0.0	394.0
1995/1996	1.2	22.7	28.0	20.0	60.1	112.7	50.5	49.0	22.5	4.5	0.8	0.0	372.0
1996/1997	30.6	16.3	24.4	51.9	98.9	133.5	133.1	91.2	27.3	1.4	0.9	0.0	609.5
1997/1998	9.9	33.4	23.6	36.1	30.1	60.3	74.9	45.1	22.8	0.2	4.9	1.3	342.5
1998/1999	1.7	3.1	46.6	71.8	31.7	69.0	99.6	106.9	15.8	3.9	0.7	2.0	452.9
1999/2000	0.2	27.3	52.3	14.7	45.4	163.0	57.3	52.7	22.2	0.4	0.1	0.0	435.7
2000/2001	0.3	6.3	24.1	19.9	105.0	230.4	127.4	75.7	17.3	0.6	0.1	0.1	607.1
2001/2002	9.4	24.5	24.4	20.9	59.1	81.0	89.4	47.9	23.5	2.1	2.7	3.1	388.0
2002/2003	0.0	3.7	24.6	53.9	18.0	121.0	60.9	63.8	11.3	2.0	0.0	3.5	362.8
2003/2004	1.1	8.3	9.3	9.2	83.0	103.8	81.6	72.8	13.6	0.1	1.5	2.2	386.5
2004/2005	2.3	8.6	17.9	11.6	34.6	97.8	88.1	49.8	19.7	0.1	0.0	0.0	330.6
2005/2006	0.0	27.0	37.9	39.3	64.9	192.0	59.5	63.2	25.5	5.7	0.0	0.0	515.1
2006/2007	3.0	11.9	35.3	35.5	57.3	138.9	57.6	95.3	33.0	2.2	0.5	0.5	470.9
2007/2008	4.7	26.5	23.5	31.2	90.7	158.5	62.6	46.1	18.0	0.0	1.2	0.1	463.1
2008/2009	2.3	4.0	24.5	16.2	82.9	175.8	107.9	78.7	32.4	2.8	0.0	0.7	528.2
2009/2010	0.0	6.6	4.3	43.1	89.0	123.1	89.4	53.0	26.8	8.2	0.0	1.4	444.8
2010/2011	1.3	3.8	29.9	12.2	39.7	60.9	187.4	106.2	15.4	5.6	0.0	0.3	462.9

A.3.h. Precipitación promedio en milímetros para modelación con CHAC cuenca del río Pilcomayo hasta la estación hidrométrica Viña Quemada.

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM ANUAL
1976/1977	22.7	36.7	16.4	36.0	63.6	76.3	122.7	101.0	17.9	0.5	0.2	0.9	494.9
1977/1978	6.1	33.6	49.7	78.5	134.9	114.8	125.8	99.8	38.7	1.1	0.0	1.3	684.1
1978/1979	7.2	10.8	21.3	42.6	143.8	173.0	64.4	78.6	20.3	0.5	0.5	4.3	567.3
1979/1980	0.3	5.5	31.0	50.7	122.8	87.3	62.0	92.8	11.5	3.4	1.5	5.5	474.2
1980/1981	24.3	16.1	40.2	32.3	47.1	146.4	115.8	76.4	26.2	1.7	0.0	0.0	526.6
1981/1982	30.0	46.7	28.1	58.3	119.9	129.2	96.2	90.1	34.4	0.9	0.0	0.0	633.8
1982/1983	1.4	27.9	48.8	38.3	74.2	73.8	57.0	29.1	17.5	0.8	0.3	4.0	373.1
1983/1984	6.2	16.4	27.5	30.6	72.3	226.0	150.8	139.2	15.5	0.4	0.1	0.0	684.9
1984/1985	5.5	6.1	57.8	70.5	79.4	91.9	127.6	65.5	36.2	1.4	3.5	0.7	546.0
1985/1986	7.6	32.5	24.3	93.2	113.1	91.5	90.5	100.1	14.6	0.6	1.1	0.8	569.9
1986/1987	0.9	12.5	28.7	33.1	95.4	127.6	57.0	58.3	22.7	1.9	6.3	2.2	446.8
1987/1988	6.2	10.5	51.4	45.2	47.3	97.4	76.4	164.4	34.2	2.6	1.3	0.4	537.4
1988/1989	0.1	19.0	19.3	21.5	87.4	82.8	60.0	62.7	63.7	0.5	0.4	0.2	417.7
1989/1990	0.9	6.2	17.4	45.9	96.3	122.4	69.0	35.3	21.1	4.8	4.5	0.2	424.1
1990/1991	7.4	4.6	46.7	64.3	72.5	108.0	78.4	78.6	26.4	0.6	0.1	0.1	487.7
1991/1992	0.7	9.1	25.9	49.9	58.2	181.1	83.8	50.0	11.0	0.2	5.3	3.5	478.7
1992/1993	3.7	1.9	37.3	61.9	96.5	142.4	62.7	94.8	19.5	1.7	0.1	0.0	522.6
1993/1994	19.2	23.2	34.0	44.8	79.4	102.8	76.4	57.1	12.8	4.5	0.2	2.5	456.8
1994/1995	0.0	14.5	21.6	53.1	70.6	122.1	66.8	74.3	11.2	2.3	0.6	0.0	437.1
1995/1996	5.0	16.0	23.0	31.2	75.6	115.3	59.2	54.8	21.9	4.0	0.9	0.0	406.8
1996/1997	28.0	13.2	24.6	59.9	117.3	147.8	143.6	101.4	33.4	1.0	0.6	1.2	672.0
1997/1998	6.1	48.0	28.5	44.6	42.3	66.1	74.5	49.8	21.1	0.1	2.5	0.7	384.2
1998/1999	1.6	5.8	49.3	73.6	40.6	70.3	88.9	115.2	17.6	2.1	0.4	2.5	467.9
1999/2000	0.8	23.3	53.8	23.7	49.5	157.8	67.3	72.7	14.6	0.4	0.2	0.0	464.0
2000/2001	2.6	7.6	26.9	30.1	108.1	199.3	132.5	73.9	18.8	2.0	0.2	0.6	602.5
2001/2002	7.9	21.1	24.2	31.7	71.9	76.2	82.4	51.0	28.9	3.1	1.9	3.3	403.7
2002/2003	1.0	6.6	42.8	51.5	30.6	103.3	69.7	62.6	9.3	3.7	0.5	4.2	385.9
2003/2004	1.1	10.6	12.5	18.2	96.5	102.9	90.8	60.9	22.0	0.5	0.9	2.1	419.0
2004/2005	3.6	8.2	18.2	30.5	52.8	95.4	91.8	44.9	21.6	0.2	0.0	0.0	367.2
2005/2006	0.0	24.7	43.3	45.9	86.8	180.5	67.2	58.6	23.4	3.8	0.0	0.0	534.2
2006/2007	1.6	11.4	32.6	50.2	68.2	135.0	65.4	86.4	29.7	4.3	0.3	0.5	485.6
2007/2008	2.6	23.7	37.0	52.7	106.3	200.2	77.7	61.6	19.6	0.4	0.6	0.2	582.5
2008/2009	3.7	8.8	34.5	30.8	98.4	174.3	112.1	83.7	28.1	4.2	0.0	1.0	579.6
2009/2010	0.6	5.8	9.4	59.2	99.0	109.4	101.1	45.6	18.8	5.6	0.1	2.8	457.3
2010/2011	1.6	3.3	28.1	18.4	50.5	70.8	172.9	87.6	16.0	4.2	0.1	0.8	454.2

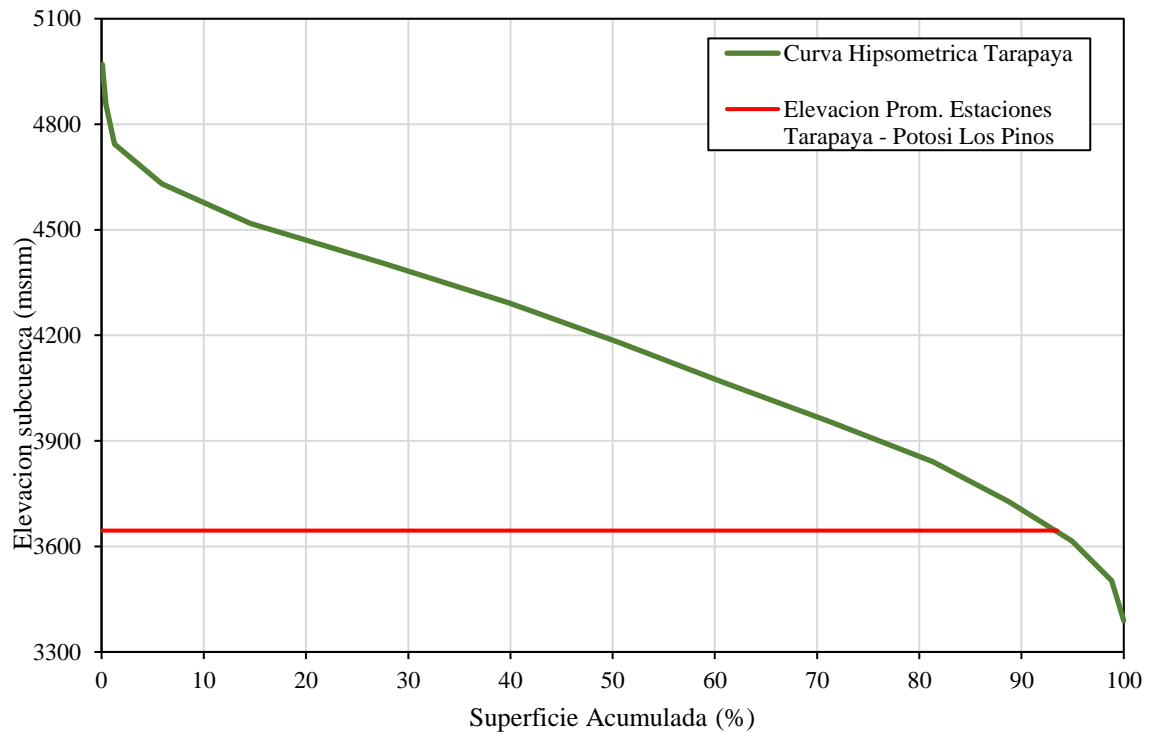
A.4.a. Ponderadores Thiessen para cálculo de precipitación promedio para modelación con WEAP.

Estación	Ponderadores Thiessen por Subcuencas (decimales)					
	Talula	Puente Sucre	Viña Quemada	Tarapaya	Yocalla	Ñujchu
Challapata (Tacagua)	0.113				0.006	
Cruce Ventilla	0.027				0.565	
Actara	0.223				0.001	0.02
Tinquipaya	0.291				0.019	
Ayoma	0.001					
Macha	0.001					
Ocuri	0.01					0.26
Ravelo						0.2
Potolo	0.111					0.22
Colavi		0.252	0.014			
Yocalla	0.106		0.001			
Samasa	0.016		0.039			
Santa Lucia Pti	0.001			0.585	0.113	
Tarapaya	0.065			0.106	0.071	
Potosí Aeropuerto	0.006		0.011	0.028		
Yura				0.002	0.217	
Chaquilla				0.101	0.008	
Potosí Los Pinos			0.006	0.178		
Chaqui			0.055			
Chico Chico			0.062			
Puna			0.102			
Vitichi			0.004			
Keluyo (Esqueri)			0.132			
Otavi H			0.009			
San Lucas			0.001			
Chinoli			0.145			
Kespillajta		0.132	0.081			
Talula Tako Tako	0.029	0.185				0.048
Punilla						0.04
Sucre Aeropuerto						0.057
Cachimayu						0.092
Ñucchu		0.241	0.002			0.046
Alcantari			0.043			0.017
Puente Sucre		0.19	0.122			
Tarabuco			0.032			
La Mendoza			0.099			
Oronkota			0.028			
Viña Quemada			0.012			
TOTAL	1	1	1	1	1	1

A.4.b. Ponderadores Thiessen para cálculo de precipitación promedio para modelación con CHAC.

Estación	Ponderadores Thiessen por Subcuencas (decimales)		
	Hasta la estación hidrométrica Talula	Hasta la estación hidrométrica Ñujchu	Hasta la estación hidrométrica Viña Quemada
Challapata (Tacagua)	0.003		0.001
Cruce Ventilla	0.248		0.12
Actara	0.1	0.02	0.051
Tinquipaya	0.138		0.065
Ayoma	0.001		0.001
Macha	0.001		0.001
Ocuri	0.005	0.26	0.031
Ravelo		0.2	0.024
Potolo	0.05	0.22	0.05
Colavi	0.051		0.048
Yocalla	0.048		0.023
Samasa	0.007		0.016
Santa Lucia Pti	0.125		0.061
Tarapaya	0.073		0.035
Potosí Aeropuerto	0.006		0.007
Yura	0.09		0.044
Chaquilla	0.017		0.008
Potosí Los Pinos	0.024		0.014
Chaqui			0.019
Chico Chico			0.02
Puna			0.033
Vitichi			0.001
Keluyo (Esqueri)			0.043
Otavi H			0.003
San Lucas			0.001
Chinoli			0.047
Kespillajta			0.036
Talula Tako Tako	0.013	0.048	0.026
Punilla		0.04	0.005
Sucre Aeropuerto		0.057	0.007
Cachimayu		0.092	0.011
Ñucchu		0.046	0.024
Alcantari		0.017	0.015
Puente Sucre			0.054
Tarabuco			0.01
La Mendoza			0.032
Oronkota			0.009
Viña Quemada			0.004
TOTAL	1	1	1

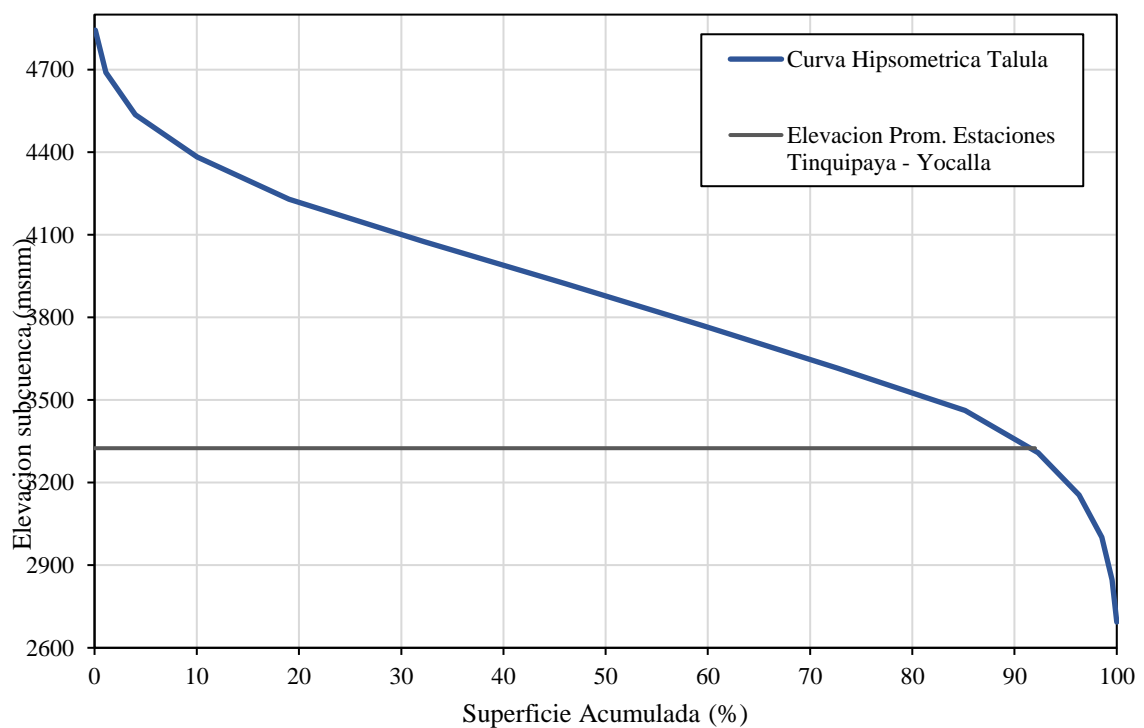
A.5. Curvas Hipsométricas de las subcuencas del modelo de WEAP con el promedio de elevaciones de las estaciones en su interior, para cálculo promedio de temperatura.

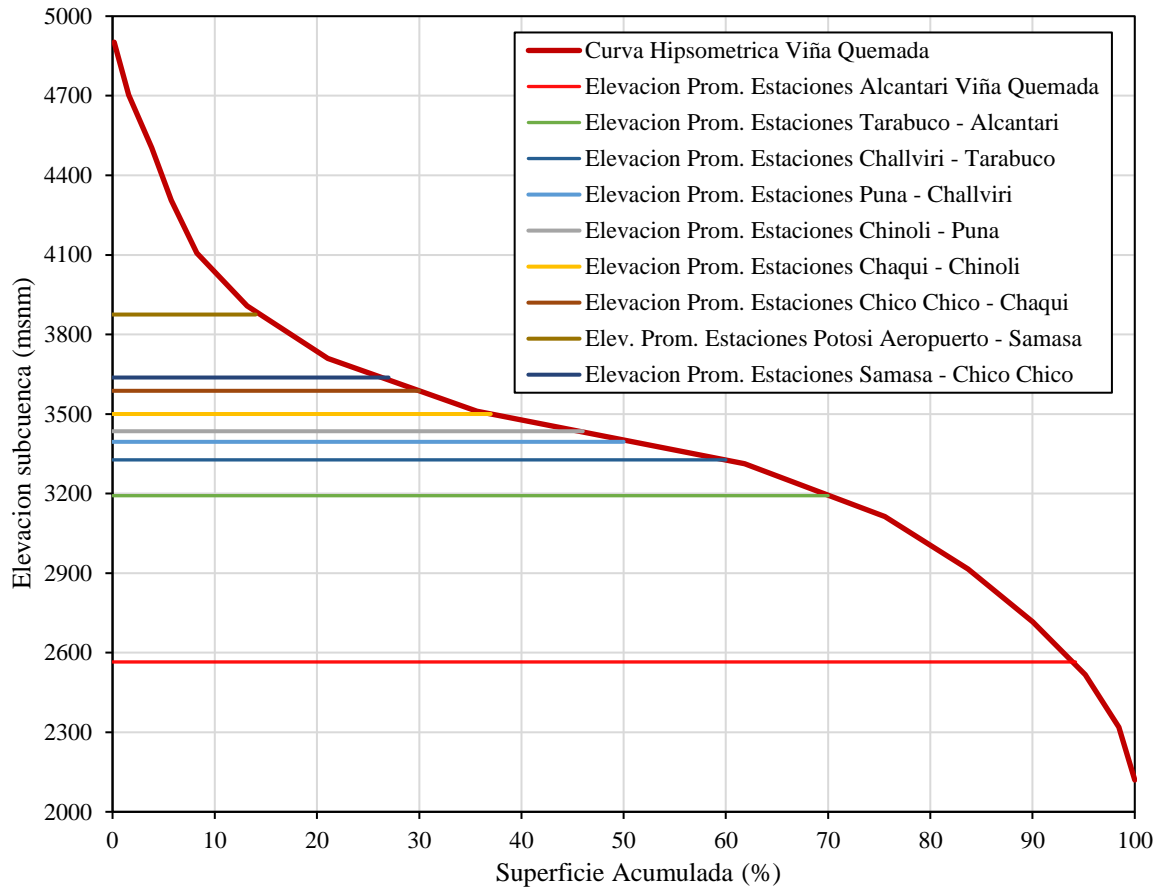


a) Subcuenca Tarapaya

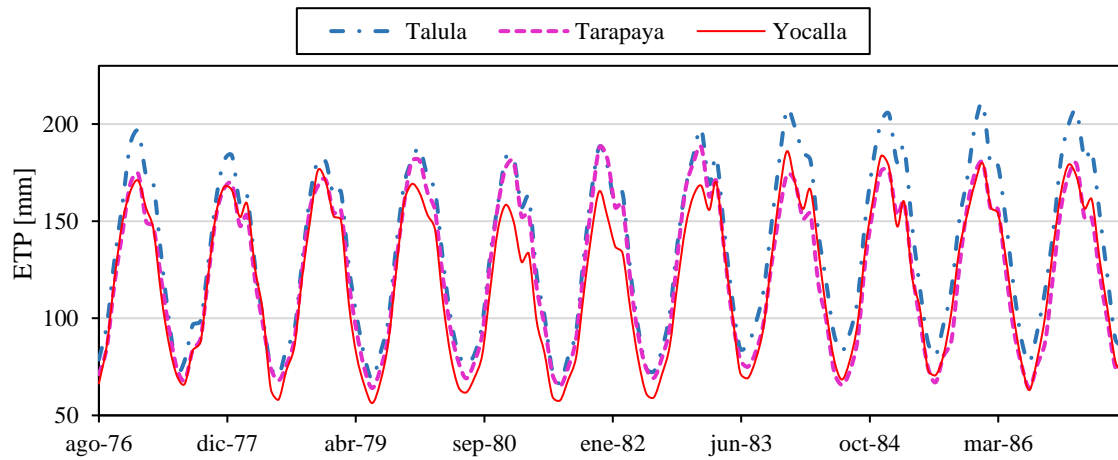
b) Subcuenca Talula

c) Subcuenca Viña Quemada

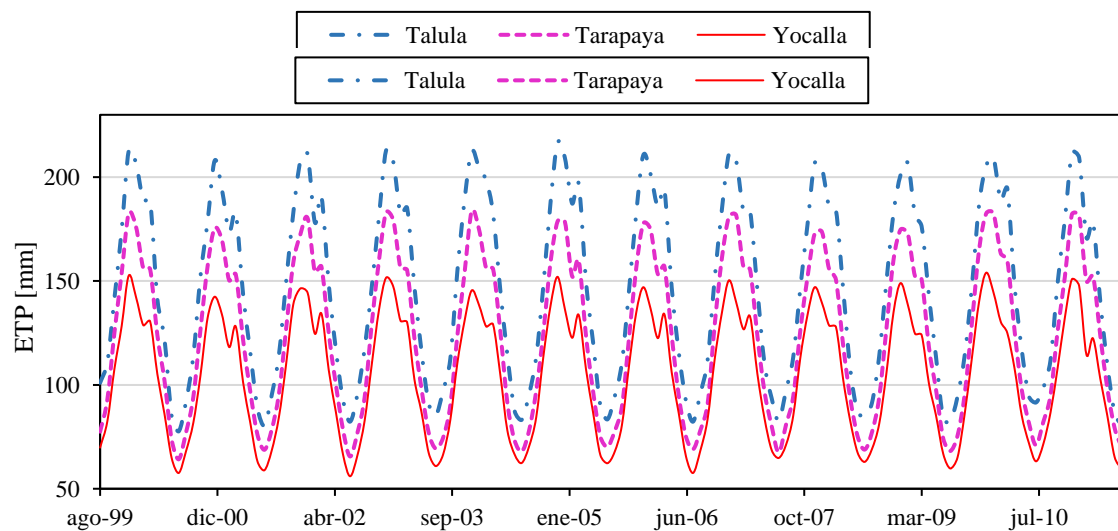




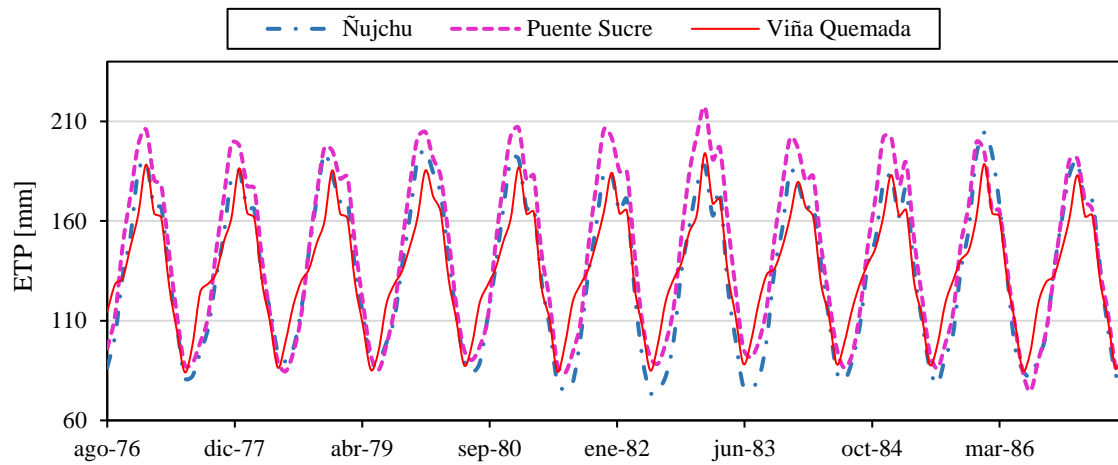
A.6.a Variación de la Evapotranspiración potencial de las subcuencas Talula, Tarapaya y Yocalla modeladas en WEAP en todo el periodo de simulación.



- a) Periodo agosto de 1976 a julio de 1987
- b) Periodo agosto de 1987 a julio de 1999
- b) Periodo agosto de 1999 a julio de 2011



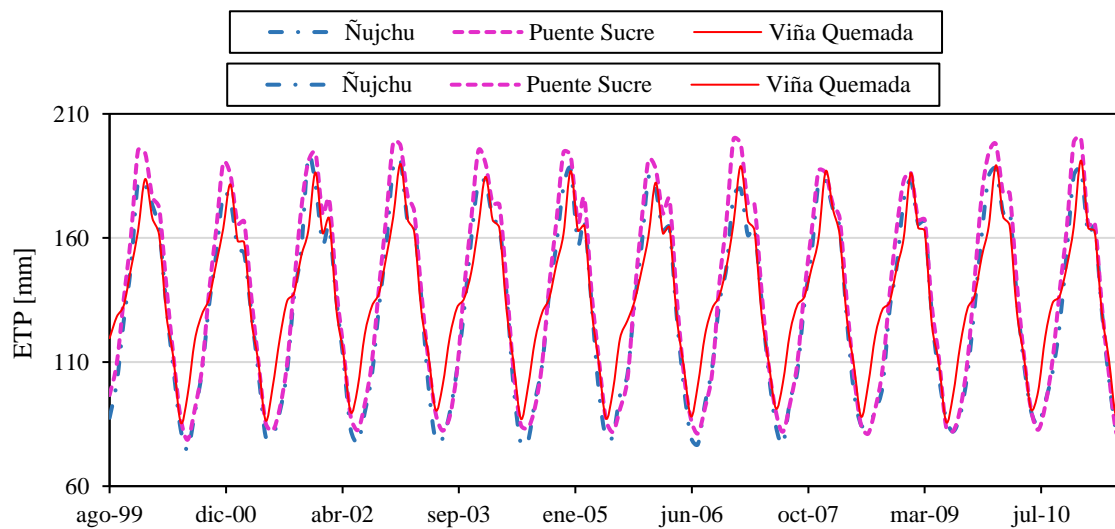
A.6.b Variación de la Evapotranspiración potencial de las subcuencas Ñujchu, Puente Sucre y Viña Quemada modeladas en WEAP en todo el periodo de simulación.



a) Periodo agosto de 1976 a julio de 1987

b) Periodo agosto de 1987 a julio de 1999

b) Periodo agosto de 1999 a julio de 2011



ANEXO B

GUIA SUPUESTOS CLAVE DE WEAP

B.1. Definición de la herramienta Supuestos Clave (Key Assumptions).

Supuestos Clave (Key Assumptions en inglés) de WEAP es una herramienta que permite anexar parámetros y variables dentro el modelo para que estos cambien simultáneamente, también sirve como un creador de funciones dentro del modelo. Es bastante útil en el proceso de calibración puesto que permite al modelador cambiar los parámetros de varios catchments paralelamente, en esta guía se pondrá a disposición una serie de pasos para realizar esta última tarea en particular, y para el modelo SM de WEAP ya que es la aplicación más frecuente de esta herramienta.

B.2. Parámetros de WEAP y su dependencia.

Los parámetros de WEAP varían según el uso, tipo de suelo, pendiente entre otras características físicas. En una cuenca se encuentran más de una de estas características por esto es conveniente tener más de un valor para un mismo parámetro, sobre todo para grandes cuencas. La figura

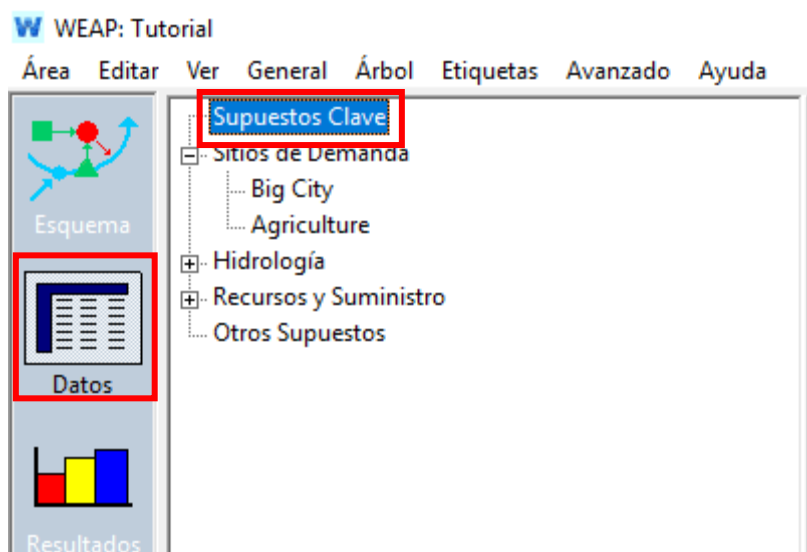
Tanque 1	<p>Kc Coeficiente de Cultivo.</p> <p>RRF Factor de Resistencia a la Escorrentía.</p> <p>SWC Capacidad de Agua del Suelo.</p> <p>Z1 Z1 Inicial</p> <p>F Dirección Preferencial del Flujo</p> <p>Ks Conductividad de la Zona Radicular</p>	<p>En WEAP se debe asignar un parametro a cada clasificacion</p> <p>Cobertura de la tierra</p> <p>Cobertura de la Tierra - Suelo</p> <p>Cobertura de la Tierra - Geomorfologia</p>
Tanque 2	<p>Z2 Z2 Inicial</p> <p>Kd Conductividad Profunda</p> <p>DWC Capacidad Agua Profunda</p>	<p>En WEAP se asiga un unico parametro por catchment</p>

presentada a continuación muestra la dependencia de los parámetros de WEAP.

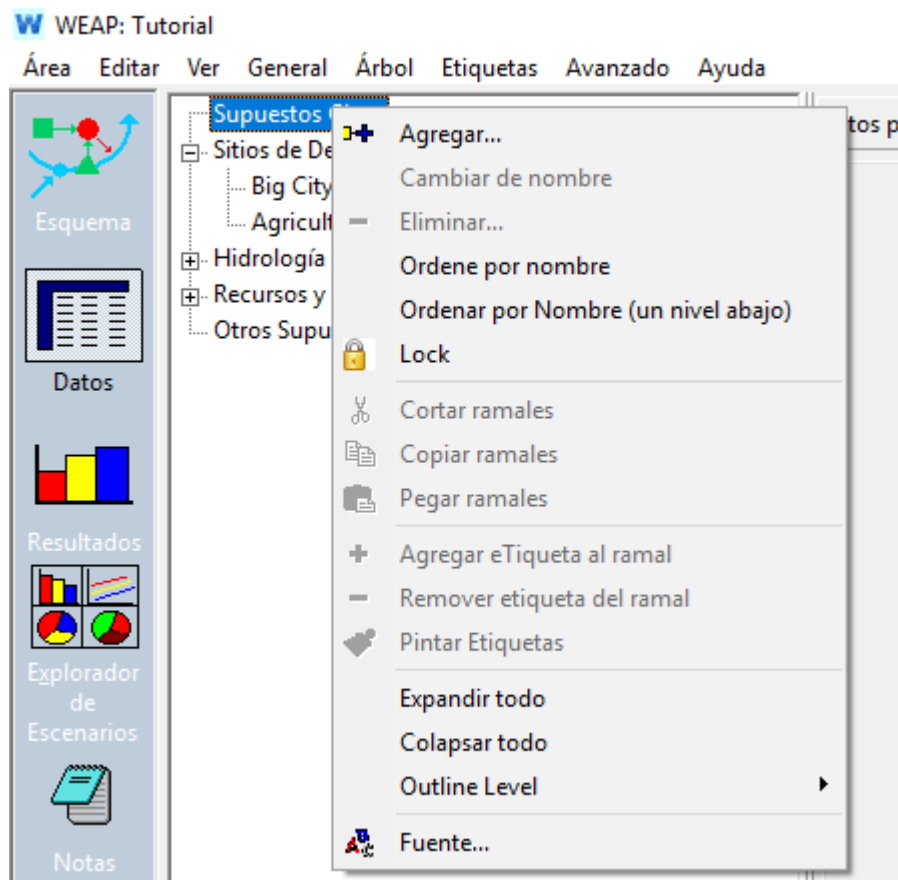
Todos estos factores pueden incluirse dentro de Supuestos Clave para luego asociarlos con su respectivo parámetro. Como se puede observar para algunos parámetros es conveniente crear categorías para representar su dependencia por el uso, tipo de suelo, etc. Es destacable que la clasificación de la dependencia de parámetros que se adopte para la modelación es decisión del modelador, cada modelo es diferente.

B.3. Interfaz y estructura de la herramienta Supuestos Clave.

La herramienta se encuentra en la pestaña “Datos” del modelo. A continuación se presenta una ilustración del icono de la pestaña “Datos” y el menú que se despliega al seleccionarla, en ella se observa el apartado supuesto clave:

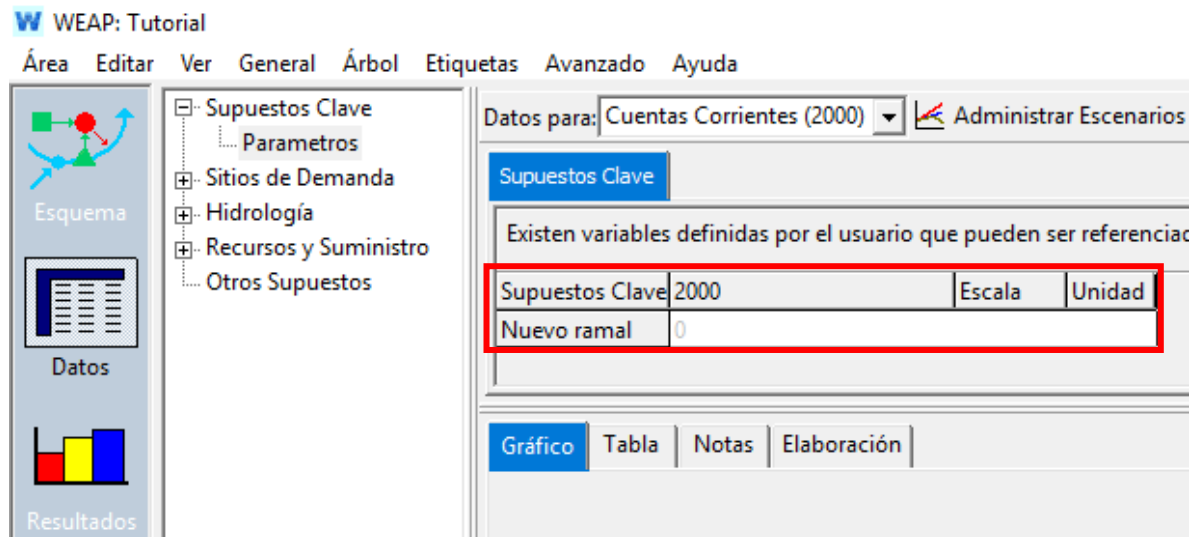


Estando en el apartado de la herramienta se procede a realizar la creación de forma manual de un Supuesto Clave. Para este propósito se hace click derecho sobre el botón “Supuestos Clave” y



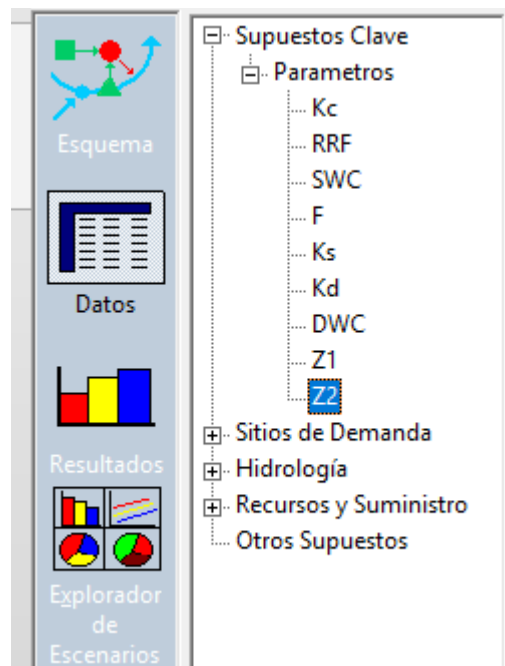
seleccionamos “Agregar...” tal como se muestra a continuación

Posteriormente aparecerá el ramal recientemente creado listo para insertar el nombre que se desee darle. Para este ejemplo se pondrá el nombre “Parámetros”, luego se habilitara la ventana para



ingresar los datos del nuevo ramal creado tal como se ve a continuación:

Como se puede observar en la parte enmarcada con rojo es donde se ingresara la información de la vinculación que se desee realizar, simplemente basta con escribir el valor o el comando o función haciendo click en el editor de texto (parte blanca), cabe destacar que los datos de escala unidad no son determinantes, pues estos aspectos serán definidos desde donde se haga la vinculación. También es posible agregar nuevos ramales dentro los ramales, de ahí su nombre, esto es posible haciendo click izquierdo sobre el ramal creado y seleccionando “Agregar...”, igual que el paso anterior. Seguidamente se muestra una ilustración con todos los parámetros del modelo creados en



el ramal “Parámetros”, a manera de ejemplo.

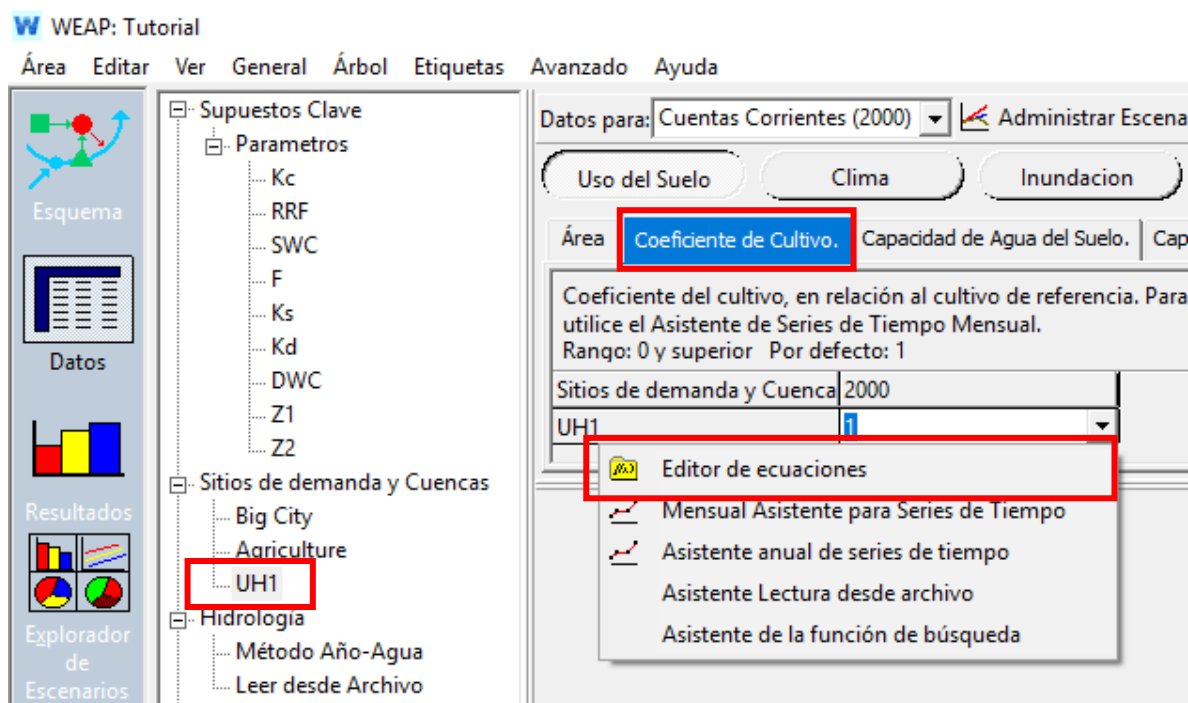
Es importante mencionar que de la misma forma en que se agregan ramales es posible eliminarlos haciendo click izquierdo en el elemento que se desea eliminar y seleccionando “Eliminar”.

B.4 Estructura y vinculación.

La vinculación de los parámetros con los ramales creados puede realizarse de dos formas:

- Escribiendo el código
- Seleccionando la ruta hacia el ramal que se desea vincular

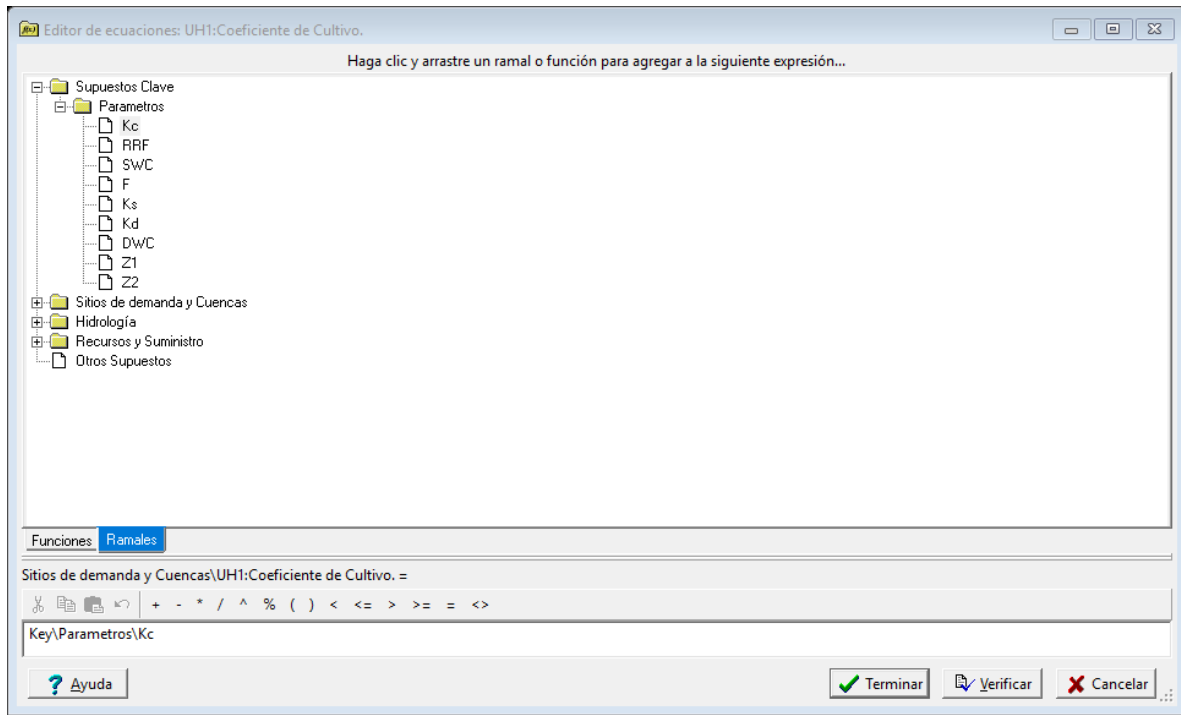
A continuación se presenta un ejemplo de cómo realizar la vinculación. Primero se debe acceder a la unidad hidrológica que se desea vincular desde la pestaña datos, para este ejemplo esta unidad será la denominada “Big City” del modelo “Tutorial” que se descarga junto con el programa. Con este objetivo seleccionamos “Sitios de demanda y cuencas” y luego UH 1 (una unidad que se creó para realizar este ejemplo) ya en este apartado se entra “Coeficiente de cultivo”, luego click en el



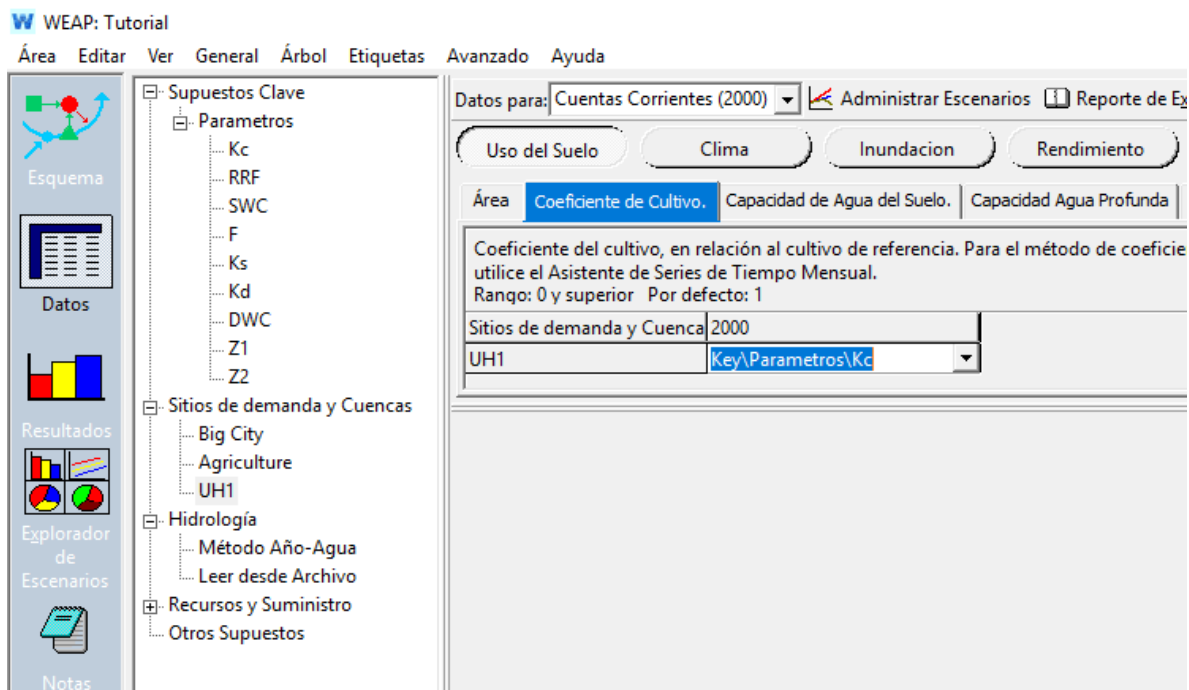
editor de texto y se selecciona Editor de ecuaciones tal como se aprecia a continuación:

Hecho se abrirá la ventana denominada “Editor de ecuaciones”, aquí es donde se realizan las vinculaciones de la siguiente forma: se despliega la ruta y se arrastra al editor de texto. Para el presente ejemplo se vinculara el Coeficiente de cultivo con el ramal Kc que se encuentra a su vez en el ramal “Parámetros”, en este sentido se desplegara el ramal “Supuestos clave” luego el ramal “Parámetros” (haciendo click sobre el signo más que se encuentra a la derecha del ramal) y

haciendo click sobre el ramal “Kc” y arrastrándolo hasta el editor de texto como se muestra a continuación:



Como se puede observar en el editor de texto aparece el código de la vinculación y su estructura automáticamente. Nótese que la función “Key” sirve para llamar a los supuestos clave, luego “\” sirve para separar ramales. Finalmente se hace click en “Terminar”, con este paso se concluye el proceso de vinculación y para este ejemplo debería quedar de la siguiente forma, este proceso debe realizarse para todos los parámetros.



B.5. Creación automatizada mediante uso de Scripts

WEAP permite usar Scripts para realizar tareas. Particularmente en algunos casos el proceso de creación de ramales resulta tedioso por implicar la creación de varias categorías para un solo parámetro, este proceso resulta engorroso teniendo en cuenta que se cuenta con nueve parámetros. Los Scripts nos permiten realizar esta tarea de manera más fácil y rápida.

Para poder programar un Scrip es necesario conocer los comandos que se deben introducir para que WEAP se ejecute con éxito. Los Scrips que se pretendan ejecutar con WEAP deben encontrarse en la misma carpeta del proyecto de WEAP en el que se pretende usar. El Scrip debe estar en formato .vbs para ello es requerido tener instalado el Visual Basic Studio, software donde se puede manipular este tipo de archivos.

A continuación se muestra el código y la estructura de un Scrip que sirve para poder crear ramales de forma automatizada y se describe la metodología para poder ejecutar dicho Scrip. Cabe mencionar que este Scrip fue el utilizado para desarrollar el presente estudio:

```

1 C = "Parametros" : SET P = WEAP.Branch("\Key\"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
2 C = "DWC" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
3 C = "F" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
4 C = "Llanura" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\F"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
5 C = "Pendiente baja" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\F"): SET NewBranch =
6 P.AddChild(C)
7 C = "Pendiente escarpada" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\F"): SET NewBranch =
8 P.AddChild(C)
9 C = "Pendiente moderada" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\F"): SET NewBranch =
10 P.AddChild(C)
11 C = "Ks" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
12 C = "NoSoil" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Ks"): SET NewBranch = P.AddChild(C)
13 C = "SANDY CLAY LOAM" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Ks"): SET NewBranch =

```

```

P.AddChild(C)
11 C = "SANDY LOAM" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Ks") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
12 C = "Kd" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
13 C = "RRF" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
14 C = "Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
15 C = "Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
16 C = "Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
17 C = "Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
18 C = "Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
19 C = "Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
20 C = "Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
21 C = "Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
22 C = "Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\RRF") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
23 C = "SWC" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
24 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch
25 = P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
26 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
27 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
28 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
29 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
30 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
31 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
32 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
33 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
34 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
35 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
36 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch
37 = P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
38 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
39 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
40 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
41 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
42 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch
43 = P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
44 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
45 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
46 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM_Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
47 P.AddChild(C)
C = "NoSoil_Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
48 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM_Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
49 P.AddChild(C)

```

```

C = "SANDY LOAM_Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\SWC") : SET NewBranch =
50 P.AddChild(C)
C = "Z2" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
C = "Vinha_Quemada" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch =
52 P.AddChild(C)
C = "Pte_Sucre" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
53 C = "Nujchu" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
54 C = "Yocalla" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
55 C = "Tarapaya" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
56 C = "Talula" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z2") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
57 C = "Kc" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
58 C = "Z1" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
59 C = "Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
60 C = "Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
61 C = "Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
62 C = "Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
63 C = "Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
64 C = "Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
65 C = "Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
66 C = "Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
67 C = "Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Parametros\Z1") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
68 C = "Pendiente" : SET P = WEAP.Branch("\Key") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
69 C = "Llanura" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Pendiente") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
70 C = "Pendiente baja" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Pendiente") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
71 C = "Pendiente escarpada" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Pendiente") : SET NewBranch =
P.AddChild(C)
C = "Pendiente moderada" : SET P = WEAP.Branch("\Key\Pendiente") : SET NewBranch =
73 P.AddChild(C)
C = "VariablesSWC" : SET P = WEAP.Branch("\Key") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
C = "CoberturaTierra" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC") : SET NewBranch =
75 P.AddChild(C)
C = "Agriculture" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
76 P.AddChild(C)
C = "Forest" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
77 P.AddChild(C)
C = "Grassland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
78 P.AddChild(C)
C = "Wetland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
79 P.AddChild(C)
C = "Settlement" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
80 P.AddChild(C)
C = "Shrubland" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
81 P.AddChild(C)
C = "Other_Bare" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
82 P.AddChild(C)
C = "Water" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
83 P.AddChild(C)
C = "Ice_Snow" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\CoberturaTierra") : SET NewBranch =
84 P.AddChild(C)
C = "Textura" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC") : SET NewBranch = P.AddChild(C)
C = "NoSoil" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\Textura") : SET NewBranch =
86 P.AddChild(C)
C = "SANDY CLAY LOAM" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\Textura") : SET NewBranch =
87 P.AddChild(C)
C = "SANDY LOAM" : SET P = WEAP.Branch("\Key\VariablesSWC\Textura") : SET NewBranch =
88 P.AddChild(C)
89 WEAP.Branch("Key\Parametros\DWC").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=800
WEAP.Branch("Key\Parametros\F\Llanura").Variables("Nivel de Actividad
90 Anual").Expression="Key\Pendiente\Llanura"
WEAP.Branch("Key\Parametros\F\Pendiente baja").Variables("Nivel de Actividad
91 Anual").Expression="Key\Pendiente\Pendiente baja"
WEAP.Branch("Key\Parametros\F\Pendiente escarpada").Variables("Nivel de Actividad
92 Anual").Expression="Key\Pendiente\Pendiente escarpada"
93 WEAP.Branch("Key\Parametros\F\Pendiente moderada").Variables("Nivel de Actividad

```

```

    Anual").Expression="Key\Pendiente\Pendiente moderada"
94 WEAP.Branch("Key\Parametros\Ks\NoSoil").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=0
WEAP.Branch("Key\Parametros\Ks\SANDY CLAY LOAM").Variables("Nivel de Actividad
95 Anual").Expression=648
WEAP.Branch("Key\Parametros\Ks\SANDY LOAM").Variables("Nivel de Actividad
96 Anual").Expression=2390.4
97 WEAP.Branch("Key\Parametros\Kd").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=20
WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
98 Anual").Expression=7
99 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Forest").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=5
100 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Grassland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=2
101 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Wetland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=4
WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Settlement").Variables("Nivel de Actividad
102 Anual").Expression=0.5
103 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Shrubland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=2
WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
104 Anual").Expression=1
105 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Water").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=1
106 WEAP.Branch("Key\Parametros\RRF\Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=1
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Agriculture*Key\VariablesSWC\Textura\NoSo
107 il"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Agriculture*Key\VariablesSWC\Textura\SAND
108 Y CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Agriculture*Key\VariablesSWC\Textura\SAND
109 Y LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Forest").Variables("Nivel de Actividad
110 Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Forest*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Forest").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Forest*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
111 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Forest").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Forest*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
112 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Grassland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Grassland*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil
113 "
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Grassland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Grassland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
114 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Grassland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Grassland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
115 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Wetland").Variables("Nivel de Actividad
116 Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Wetland*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Wetland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Wetland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
117 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Wetland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Wetland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
118 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Settlement").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Settlement*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoi
119 l"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Settlement").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Settlement*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
120 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Settlement").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Settlement*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
121 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Shrubland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Shrubland*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil
122 "
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Shrubland").Variables("Nivel de Actividad
123 Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Shrubland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY

```

```

CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM Shrubland").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Shrubland*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
124 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Other_Bare*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoi
125 l"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Other_Bare*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
126 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Other_Bare*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
127 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Water").Variables("Nivel de Actividad
128 Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Water*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Water").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Water*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY CLAY
129 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Water").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Water*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
130 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\NoSoil_Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad
131 Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Ice_Snow*Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY CLAY LOAM_Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Ice_Snow*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
132 CLAY LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\SWC\SANDY LOAM_Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad
Anual").Expression="Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Ice_Snow*Key\VariablesSWC\Textura\SANDY
133 LOAM"
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Vinha_Quemada").Variables("Nivel de Actividad
134 Anual").Expression=28.75
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Pte_Sucre").Variables("Nivel de Actividad
135 Anual").Expression=27.18
136 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Nujchu").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=70
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Yocalla").Variables("Nivel de Actividad
137 Anual").Expression=28.16
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Tarapaya").Variables("Nivel de Actividad
138 Anual").Expression=27.18
139 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z2\Talula").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=29.45
140 WEAP.Branch("Key\Parametros\Kc").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=1.15
141 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
142 Anual").Expression=30
143 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Forest").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
144 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Grassland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
145 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Wetland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Settlement").Variables("Nivel de Actividad
146 Anual").Expression=30
147 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Shrubland").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
148 Anual").Expression=30
149 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Water").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
150 WEAP.Branch("Key\Parametros\Z1\Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=30
151 WEAP.Branch("Key\Pendiente\Llanura").Variables("Nivel de Actividad Anual").Expression=1
WEAP.Branch("Key\Pendiente\Pendiente baja").Variables("Nivel de Actividad
152 Anual").Expression=0.15
WEAP.Branch("Key\Pendiente\Pendiente escarpada").Variables("Nivel de Actividad
153 Anual").Expression=0.5
WEAP.Branch("Key\Pendiente\Pendiente moderada").Variables("Nivel de Actividad
154 Anual").Expression=0.7
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Agriculture").Variables("Nivel de Actividad
155 Anual").Expression=1.2
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Forest").Variables("Nivel de Actividad
156 Anual").Expression=1.7
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Grassland").Variables("Nivel de Actividad
157 Anual").Expression=1.4

```

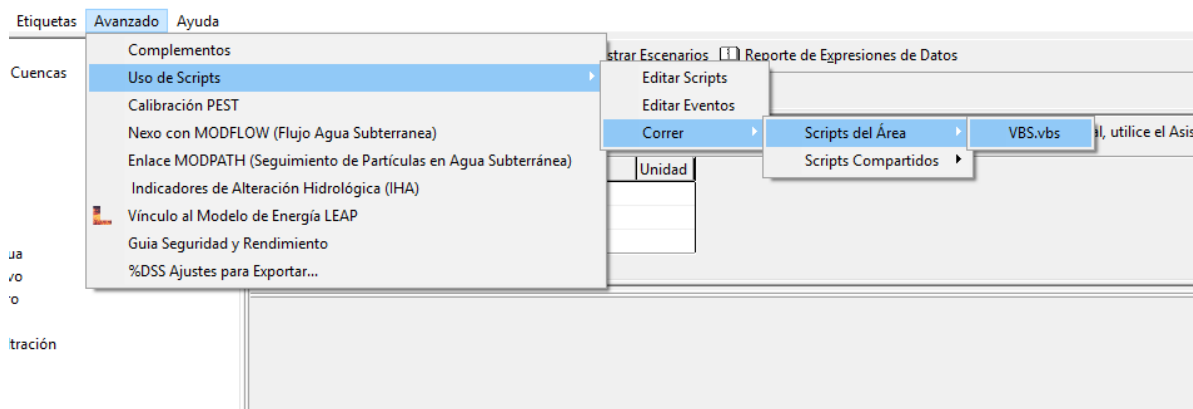
```

WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Wetland").Variables("Nivel de Actividad
158 Anual").Expression=1.4
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Settlement").Variables("Nivel de Actividad
159 Anual").Expression=1.2
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Shrubland").Variables("Nivel de Actividad
160 Anual").Expression=1.5
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Other_Bare").Variables("Nivel de Actividad
161 Anual").Expression=1.2
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Water").Variables("Nivel de Actividad
162 Anual").Expression=1.6
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\CoberturaTierra\Ice_Snow").Variables("Nivel de Actividad
163 Anual").Expression=1
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\Textura\NoSoil").Variables("Nivel de Actividad
164 Anual").Expression=120
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\Textura\SANDY CLAY LOAM").Variables("Nivel de Actividad
165 Anual").Expression=130
WEAP.Branch("Key\VariablesSWC\Textura\SANDY LOAM").Variables("Nivel de Actividad
166 Anual").Expression=120

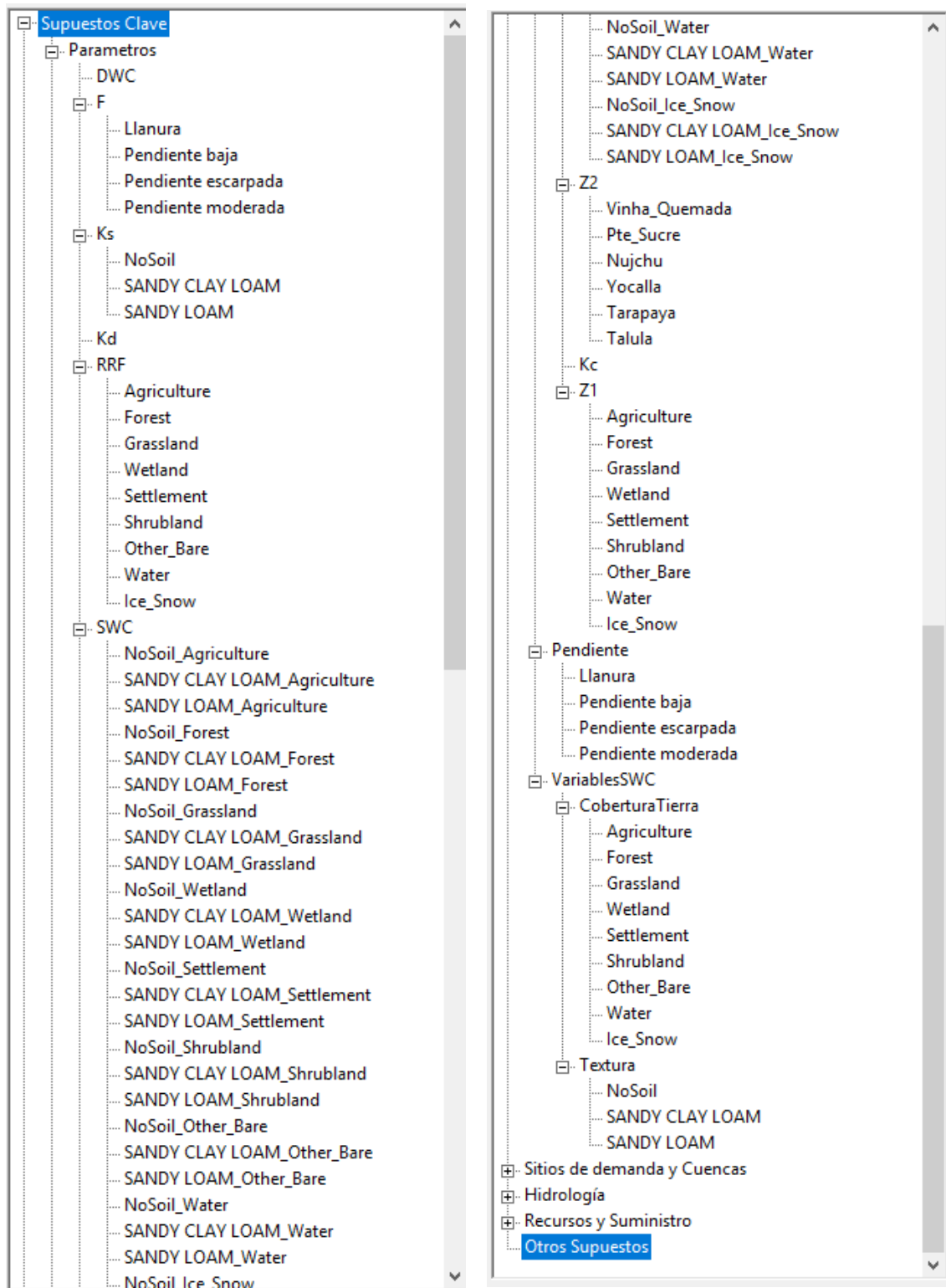
```

Como se puede observar se trata de 166 líneas de código que cuentan con comandos, la nomenclatura usada para las categorías físicas de cada parámetro, los nombres asignados a las cuencas (por tener un solo valor de algunos parámetros para toda la cuenca) y los valores iniciales asignados a dichas categorías.

Para poder ejecutar el Scrip primero el archivo .vbs debe encontrarse en la misma carpeta que el proyecto de WEAP, luego ya en el programa se debe ir a la pestaña “Avanzado” que se encuentra en la parte superior luego seleccionar “Uso de Scripts”, “Correr” y por ultimo “Scripts de área” en este punto seleccionamos el archivo y empezara a ejecutarse, como se muestra seguidamente:



Una vez terminado el proceso de ejecución la estructura de los ramales de “Supuestos Calve” debería quedar de esta forma

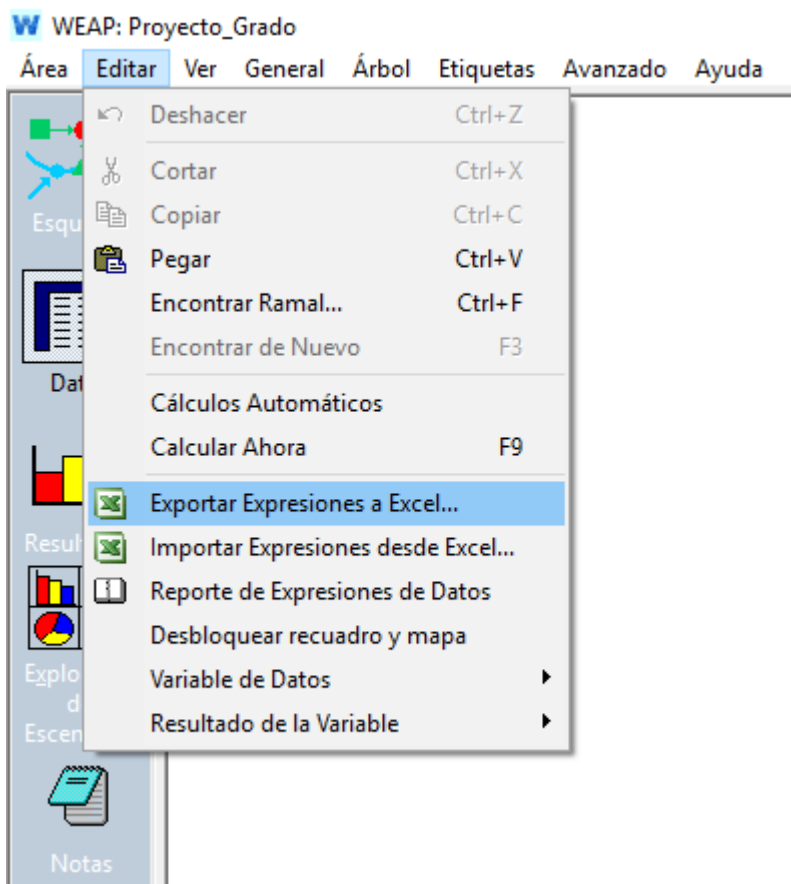


B.6. Vinculación mediante uso de la interacción EXCEL WEAP

Al igual que el proceso de creación de ramales o supuestos clave el proceso de vinculación resulta tedioso, es por eso que WEAP ofrece la posibilidad de exportar los datos de la modelación a Excel, modificarlos en dicho paquete y exportarlos a WEAP. Excel permite ser muy útil porque ofrece funciones como concatenar, filtrar que permiten desarrollar esta tarea más fácilmente. Es destacable que esta función de WEAP tiene múltiples aplicaciones.

A continuación se describe un ejemplo de cómo importar datos a Excel, modificarlos e importar a WEAP para el parámetro RRF.

Primero se debe realizar manualmente una asignación como se explicó en el punto B.4, esto con el propósito de conocer la estructura de la función que se copiara en Excel, como el RRF depende del uso de suelo es conveniente realizar manualmente la asignación para cada categoría de este. Luego se debe ir a “Sitios de demanda y Cuencas” seguidamente se hace click sobre la pestaña “Editar”, en el menú que se despliega se selecciona la opción “Exportar Expresiones a Excel...” tal como se ve en la siguiente figura:



Se abrirá una ventana en la debemos seleccionar lo que se desea exportar a Excel, para el caso de este ejemplo se exportara de la siguiente manera:

Exportar a Excel

Exportar a

Nuevo libro de trabajo

Nueva Hoja de Cálculo en "Hoja1"

Ramales

En curso y abajo

Todo

Variables

Área

Todo

Escenarios

Cuentas Corrientes

Todo

Exportar filas para expresiones en blanco

Exportar expresiones heredadas

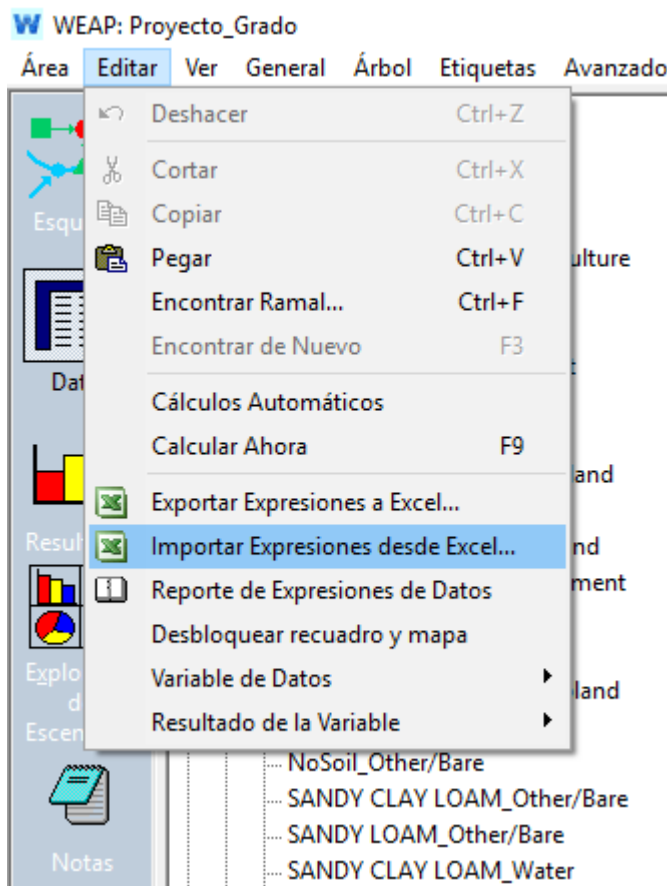
Auto_filtrado en Excel

[? Ayuda](#)

Siempre es recomendable exportar a un nuevo libro de trabajo, así no existen confusiones con libros anteriores que se puedan haber ya modificado. En “Ramales” se elige la opción en curso y abajo para que se exporte la información de todas las cuencas, en variables se elige “Todo” con el propósito de que se exporten todos los parámetros. Se mostrara en pantalla una ventana que indica el estado de carga de la información a Excel posteriormente se abrirá Excel con la información importada. La estructura que presenta este Libro de Excel se presenta a continuación:

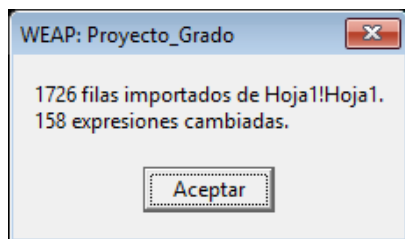
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Variable	Escenario	Unidad	Expresión
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Capacidad Agua Profunda		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Conductividad Profunda		Cuentas Corrientes	mm/Mes
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Z2 Inicial		Cuentas Corrientes	%
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Precipitación		Cuentas Corrientes	mm/Mes
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Temperatura		Cuentas Corrientes	C
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Humedad		Cuentas Corrientes	%
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Viento		Cuentas Corrientes	m/s
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Fracción de Nubosidad.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Latitud		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Punto de congelación		Cuentas Corrientes	C
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Punto de fusión		Cuentas Corrientes	C
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Limite Inferior del Albedo.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Limite Superior del Albedo.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Datos de Albedo.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Nieve Inicial.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Medidor de Acumulación de Nieve.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Costo de Capital		Cuentas Corrientes	\$
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Costos Variables de O y M		Cuentas Corrientes	\$/m3
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Costos Fijos de O y M		Cuentas Corrientes	\$
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Beneficios Variables		Cuentas Corrientes	\$/m3
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada		Beneficios Fijos		Cuentas Corrientes	\$
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Área		Cuentas Corrientes	km*2
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Coefficiente de Cultivo.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Capacidad de Agua del Suelo.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Factor de Resistencia a la Escorrentía.		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Conductividad de la Zona Radicular		Cuentas Corrientes	mm/Mes
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Dirección Preferencial del Flujo		Cuentas Corrientes	
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Z1 Inicial		Cuentas Corrientes	%
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Profundidad Mínima.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Profundidad Máxima.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Profundidad Objetivo		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Descarga del Requerimiento.		Cuentas Corrientes	mm
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Fraccion de la Inundacion Recibida		Cuentas Corrientes	%
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Fraccion de Retorno de la Inundacion		Cuentas Corrientes	%
Sitios de demanda y Cuencas	Vinha_Quemada	NoSoil_Agriculture	Cuentas Volumen Area Elevaciones		Cuentas Corrientes	

Una vez exportada la información a Excel se procede a la vinculación de los ramales siguiendo la estructura presentada. Si bien este proceso puede resultar algo tedioso es más rápido que realizarlo en WEAP gracias a las funciones que ofrece Excel. Es importante mencionar que las filas 1, 2 y 3 no deben modificarse, de lo contrario WEAP no reconocerá el archivo al momento de importar la información. Una vez realizados todos los cambios se procede a importar la información a WEAP para ello se debe mantener el Libro de Excel abierto y desde WEAP se hace click sobre la pestaña “Editar”, en el menú que se despliega se selecciona la opción “Importar Expresiones desde



Excel...” tal como se ve en la siguiente figura:

Se cargaran los datos modificados y finalmente saldrá la siguiente ventana informando la cantidad



de datos modificados:

Es recomendable revisar en WEAP que las modificaciones se hayan realizado correctamente.