



# BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO



## INFORME FINAL

Jorge Molina Carpio  
Daniel Espinoza Romero

Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA

LA PAZ - BOLIVIA

Marzo de 2006



Proyecto de gestión  
Integrada y Plan  
Maestro de la Cuenca  
del Río Pilcomayo  
**BIBLIOTECA**



HH 233

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 OBJETIVOS Y METAS .....	2
<b>2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>3</b>
2.1 EL MEDIO FÍSICO .....	3
2.2 HIDROGRAFÍA .....	6
2.3 GEOLOGÍA .....	8
2.4 DIVISIÓN EN SUBCUENCAS Y MORFOMETRÍA .....	10
<b>3. BALANCE HÍDRICO DE CUENCA</b> .....	<b>15</b>
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS .....	15
3.2 METODOLOGÍA .....	16
3.2 EL MODELO DE TÉMEZ .....	19
3.3 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....	22
3.4 PERIODO CONSIDERADO PARA EL BALANCE HÍDRICO .....	29
<b>4. ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN</b> .....	<b>31</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN REGIONAL .....	31
4.2 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA .....	32
4.3 ANÁLISIS DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	38
4.3.1 <i>Análisis de consistencia, homogenización y regionalización de la precipitación</i> .....	38
4.3.2 <i>Relleno y reconstitución estadística de datos pluviométricos</i> .....	46
4.4 EVALUACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN .....	50
<b>5. EVAPOTRANSPIRACIÓN</b> .....	<b>53</b>
5.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL .....	53
5.1.1 <i>Evaporación en tanque</i> .....	53
5.1.2 <i>Métodos indirectos</i> .....	54
5.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS .....	57
5.2.1 <i>Temperatura media ambiente</i> .....	57
5.2.2 <i>Humedad relativa</i> .....	61
5.2.3 <i>Vientos</i> .....	63
5.2.4 <i>Radiación e insolación</i> .....	65
5.3 CÁLCULO DE LA ETP CON EL MÉTODO DE PENMAN .....	66
5.4 EVALUACIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL .....	70
<b>6. MODELACIÓN</b> .....	<b>73</b>
6.1 ESCORRENTÍA .....	73
6.2 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA .....	77
6.2.1 <i>Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo</i> .....	77
6.2.2 <i>Capacidad de infiltración</i> .....	84
6.3 CALIBRACIÓN .....	87
6.3.1 <i>Conceptos básicos</i> .....	87
6.3.2 <i>Resultados</i> .....	91
6.3 SIMULACIÓN .....	101
6.4.1 <i>Simulación en subcuencas aforadas</i> .....	101
6.4.2 <i>Simulación en subcuencas no aforadas</i> .....	102
6.4.3 <i>Simulación en el punto de control Machigua</i> .....	105
<b>7. SINTESIS DEL BALANCE HÍDRICO</b> .....	<b>106</b>

7.1	BALANCE HIDRICO CONSOLIDADO.....	106
7.2	BALANCE HIDRICO EN SUBCUENCAS NO AFORADAS.....	116
7.2.1	<i>Balance hidrico en Machigua.....</i>	<i>120</i>
7.3	COROLARIO.....	122
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>		<b>124</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>125</b>
ANEXO 1 .....		126
ANEXO 2 .....		128

## LISTA DE FIGURAS

- 2.1: Cuenca del río Pilcomayo
  - 2.2: Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 2.3: Relieve y altitud de la Cuenca Alta del Pilcomayo, Coordenadas UTM, PSAD 56, Zona 20
  - 2.4: Red hidrográfica "Cuenca Alta Del Río Pilcomayo"
  - 2.5: Mapa geológico de la Cuenca Alta según la litología
  - 2.6: Subcuencas y estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del Pilcomayo
- 
- 3.1: Ciclo hidrológico
  - 3.2: Esquema metodológico del Balance Hídrico Microregional
  - 3.3: Principio de continuidad en el modelo de Témez
  - 3.4: Ubicación y tipo de estaciones meteorológicas
  - 3.5: Número de estaciones pluviométricas en funcionamiento por año
- 
- 4.1: Dirección de los vientos alisios en enero
  - 4.2: Ubicación de estaciones pluviométricas
  - 4.3: Ventana de entrada al Vector regional en Hydraccess
  - 4.4: Índices anuales del Vector y de las estaciones – Grupo 2, Datos originales
  - 4.5: Índices anuales del Vector y de las estaciones – Grupo 2, Datos reconstituidos
  - 4.6: Isoyetas anuales en la Cuenca Alta del río Pilcomayo, periodo 1970-2000
  - 4.7: Ventana de resultados del módulo Spatial de Hydraccess
  - 4.8: Precipitación media mensual y anual por subcuenca
- 
- 5.1: Perfiles térmicos - Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 5.2: Mapa de temperatura media anual - Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 5.3: ETP Penman vs Evaporación en tanque – Estación Sucre
  - 5.4: ETP Penman vs Evaporación en tanque – Villamontes y región del Chaco
  - 5.5: Estaciones usadas en el cálculo de ETP
  - 5.6: Mapa de isolíneas de ETP y ubicación de estaciones, periodo 1970-2000 Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 5.7: ETP media mensual y anual por subcuencas en (mm), periodo 1970-2000
- 
- 6.1: Diagrama de barras de caudales observados
  - 6.2: Caudal medio mensual por estación en [m<sup>3</sup>/s] Cuenca Alta del Río Pilcomayo (Datos observados)
  - 6.3: Caudal medio mensual por estación en [m<sup>3</sup>/s] Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)
  - 6.4: Proceso de cálculo de la capacidad de retención de humedad (CRH)
  - 6.5: Capacidad de retención de humedad (CRH) en [mm/m] en la Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 6.6: Mapa generalizado de vegetación - Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 6.7: Mapa de profundidad radicular (m) en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo
  - 6.8: Almacenamiento potencial del suelo Hmax en (mm), Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 6.9: Número de curva CN - Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 6.10: Interfaz gráfica en WINDOWS del modelo CHAC del CEDEX

- 6.11: Ventana de datos de entrada del modelo CHAC
- 6.12: Ventana de calibración del modelo CHAC
- 6.13: Ventana de visualización de gráficos de calibración
- 6.14: Caudales simulados y registrados en Talula, 1975-86
- 6.15: Hidrogramas y limnigramas en Talula, 1982-85
- 6.16: Caudales simulados y registrados en Talula, 1990-98
- 6.17: Caudales simulados y registrados en intercuenca Viña Quemada, 1989-98
- 6.18: Caudales simulados y registrados en subcuenca San Pedro, 1975-1984
- 6.19: Caudales simulados y registrados para la intercuenca Villamontes, 1977-87
- 6.20: Hidrograma simulado y limnigramas observados en la estación Yocalla
- 6.21: Hidrograma simulado y limnigramas observados en la estación Tarapaya

- 7.1: Esquema de disposición de subcuencas
- 7.2: Componentes principales del balance hídrico por subcuencas
- 7.3: Coeficiente de escurrimiento por subcuencas
- 7.4: Caudal específico (litros/seg-km<sup>2</sup>) por subcuencas
- 7.5: Componentes del balance hídrico en subcuencas no aforadas
- 7.6: Coeficiente de escurrimiento de subcuencas no aforadas
- 7.7: Caudal específico (litros/seg-km<sup>2</sup>) en subcuencas no aforadas
- 7.8: Ubicación y componentes del balance hídrico de la intercuenca Machigua

## LISTA DE TABLAS

- 2.1: Parámetros morfométricos de la Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 3.1: Síntesis de variables y ecuaciones del modelo de Témez
  - 3.2: Estaciones meteorológicas del Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo
  - 3.3: Estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo
  
- 4.1: Diagrama de barras de registros pluviométricos
- 4.2 Grupos regionales de precipitación en la Cuenca Alta del río Pilcomayo
- 4.3: Precipitación media mensual y anual (mm) en la Cuenca del río Pilcomayo
- 4.4: Precipitación media mensual y anual por subcuenca
  
- 5.1: Evaporación media en tanque, a nivel mensual y anual (mm) Cuenca Alta del Río Pilcomayo
- 5.2: Evaporación media anual en tanque[ mm ]
- 5.3: Radiación Solar  $R_o$  en el límite superior de la atmósfera ( $\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}$ )
- 5.4: Medias mensuales de la duración astronómica del día N (horas)
- 5.5: Albedo  $\alpha$  en función al tipo de suelo
- 5.6: Temperatura media ambiente mensual y anual en ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 5.7: Temperatura media anual en ( $^{\circ}\text{C}$ ) en estaciones de apoyo
- 5.8: Humedad relativa media mensual y anual (%), Cuenca Alta del río Pilcomayo
- 5.9: Humedad relativa media anual en (%)
- 5.10: Velocidad media del viento, mensual y anual en (m/s) Cuenca Alta del río Pilcomayo
- 5.11: Velocidad media anual del viento en (m/s) - Estaciones de apoyo
- 5.12: Insolación mensual y anual media ( $\text{hr}_{\text{sol}}/\text{día}$ ), Cuenca Alta del río Pilcomayo
- 5.13: Insolación mensual y anual media ( $\text{hr}_{\text{sol}}/\text{día}$ ) en estaciones de apoyo
- 5.14: Planilla electrónica de cálculo de ETP - Método de Penman
- 5.15: Evapotranspiración potencial media mensual y anual (mm), método de Penman, Cuenca Alta del río Pilcomayo
- 5.16: Evapotranspiración potencial anual (mm), método de Penman Estaciones meteorológicas de apoyo
- 5.17: ETP media mensual y anual por subcuencas en (mm), periodo 1970-2000 Cuenca Alta del río Pilcomayo
  
- 6.1: Caudal medio mensual y anual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)
- 6.2: Lámina de escurrimiento media (mm) para cuencas de aporte a estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo, (Datos observados)
- 6.3: Lámina de escurrimiento media (mm) para subcuencas e intercuencas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)
- 6.4: Valores de la capacidad de retención de humedad (CRH) por metro de suelo en relación a la pedregosidad y la textura
- 6.5: Profundidad máxima de raíces por tipo de cobertura vegetal y uso de la tierra (escala 1:250.000)
- 6.6: Tipo de cobertura vegetal en la Cuenca Alta
- 6.7: Infiltración máxima en la cuenca del río Turia

- 6.8: Asignación del grupo hidrológico de suelo
  - 6.9: Parámetros de calibración por subcuencas - Cuenca Alta del Río Pilcomayo
  - 6.10: Errores de calibración después de extracción selectiva de datos observados - Cuenca Alta del Río Pilcomayo
  - 6.11: Parámetros de calibración en las macrocuencas Chillcara y Misión La Paz
  - 6.12: Caudal medio mensual y anual ( $m^3/s$ ) en subcuencas aforadas, periodo 1970-2000 (Datos simulados)
  - 6.13: Parámetros adoptados para simulación en subcuencas no aforadas
  - 6.14: Caudal medio mensual y anual ( $m^3/s$ ) en subcuencas no aforadas (Datos simulados)
  - 6.15: Parámetros adoptados para simulación de intercuenca Machigua
- 
- 7.1: Síntesis del Balance Hídrico superficial por subcuencas, Periodo 1970-2000 Cuenca Alta del Río Pilcomayo
  - 7.2: Balance hídrico de subcuencas a nivel anual
  - 7.3: Balance hídrico superficial en subcuencas no aforadas
  - 7.4: Balance hídrico de subcuencas no aforadas a nivel anual
  - 7.5: Balance hídrico de intercuenca Machigua a nivel anual
  - 7.6: Balance hídrico superficial en Machigua

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 ANTECEDENTES

El Balance Hídrico Superficial de Bolivia fue ejecutado en el marco de un convenio interinstitucional entre el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM, actualmente IRD), el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés (IHH-UMSA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) y el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (PHI/UNESCO).

Este proyecto fue el primer balance hídrico que abarcó todo el territorio boliviano. Se consideraron ocho grandes cuencas hidrográficas. La publicación final y síntesis del proyecto fue coeditada en 1992 por ORSTOM y la UNESCO. El Balance Hídrico Superficial de Bolivia brinda información con carácter macroregional de los tres términos principales del balance: precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial, a nivel medio anual, en base a datos plurianuales de 1968-82, periodo seleccionado ante todo por la disponibilidad conjunta de información de la red administrada por el SENAMHI. Se aplicó la metodología propuesta en la Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur (1982).

El Balance Hídrico es un documento de referencia importante cuando se desean considerar variables hidrológicas a nivel de macrocuencas, por lo que ha sido y es utilizado en estudios relacionados a la planificación de los recursos hídricos del país. Sin embargo, en 2001 las instituciones miembros del CONAPHI (Comité Nacional del Programa Hidrológico Internacional) identificaron la necesidad de iniciar una segunda fase que incluyese tres cambios significativos: análisis a nivel mensual, mayor discretización espacial (subcuencas) y ampliación del periodo de estudio. Se espera de esta manera definir la oferta de agua y ampliar el conocimiento del régimen hidrológico de las cuencas bolivianas, brindando información esencial para el aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos del país.

Esta nueva fase, que se denominó Balance Hídrico Microregional de Bolivia, quedó bajo responsabilidad de las mismas instituciones que habían llevado a cabo el primer Balance. Después de una primera etapa en que se desarrolló la metodología del estudio y se aplicó a una cuenca piloto, se dio inicio a la etapa operativa en tres de las once grandes cuencas en que se había subdividido el país: las de los ríos Beni y Mamoré y la del lago Titicaca.

Por su parte, el Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo inició sus actividades en el marco del Convenio de Financiación n° ASR/B7-3100/99/136 entre la Comunidad Europea y la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del río Pilcomayo. Tiene como uno de sus objetivos específicos "Profundizar los conocimientos sobre las características hidrológicas y ambientales de la cuenca, y definir las condiciones para una utilización racional de los recursos hídricos y de los suelos de la cuenca". Una de las actividades relacionadas con el mencionado objetivo y que está prevista en el Plan Operativo Anual enmendado 2, es la actividad A.1.2, Balance Hídrico, relacionada con la actualización de los Balances Hídricos de la cuenca.

El CONAPHI planificó iniciar el Balance Hídrico de esta cuenca el año 2004, lo que coincidió con las actividades previstas por el Proyecto. Bajo estas condiciones, se suscribió un Convenio de cooperación técnica. La primera actividad a realizar en el marco de este convenio es el Balance Hídrico de la Cuenca del río Pilcomayo. Se decidió realizar primero el Balance de la Cuenca Alta del río, aguas arriba de Misión La Paz.

## **1.2 OBJETIVOS Y METAS**

El objetivo general es la evaluación de los recursos hídricos de la cuenca alta del río Pilcomayo por medio del Balance hídrico de cuenca.

Los objetivos específicos son:

- Actualizar el Balance Hídrico de la cuenca, mejorando la resolución temporal hasta el nivel mensual y la discretización espacial hasta el nivel de subcuenca.
- Establecer la base de información para toda la cuenca alta en términos de los tres componentes principales del balance: precipitación, evapotranspiración y escurrimiento.
- Extender el periodo del Balance Hídrico existente.

Los objetivos se traducirán en el logro de los siguientes resultados:

- Base de datos meteorológicos con series mensuales completas de las principales variables climatológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, etc.) que cubra toda la cuenca alta del río Pilcomayo, hasta la estación hidrométrica de Misión La Paz en territorio argentino.
- Base de datos hidrológicos con series de caudales mensuales para cada una de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca alta, de al menos 15 años de duración.
- Base de datos geográficos que incluya toda la cartografía temática, la ubicación de estaciones de medición y resultados.
- Modelo precipitación-escurrimiento calibrado y validado, que permita la extensión de las series de caudales de todas las subcuencas con información incompleta.
- Mapas temáticos digitales e impresos que muestren gráficamente los resultados principales: isolíneas de variables climáticas, mapas de coeficientes de escorrentía y caudales específicos, etc.
- Informe con los resultados por subcuencas y la síntesis para toda la cuenca alta del río Pilcomayo.

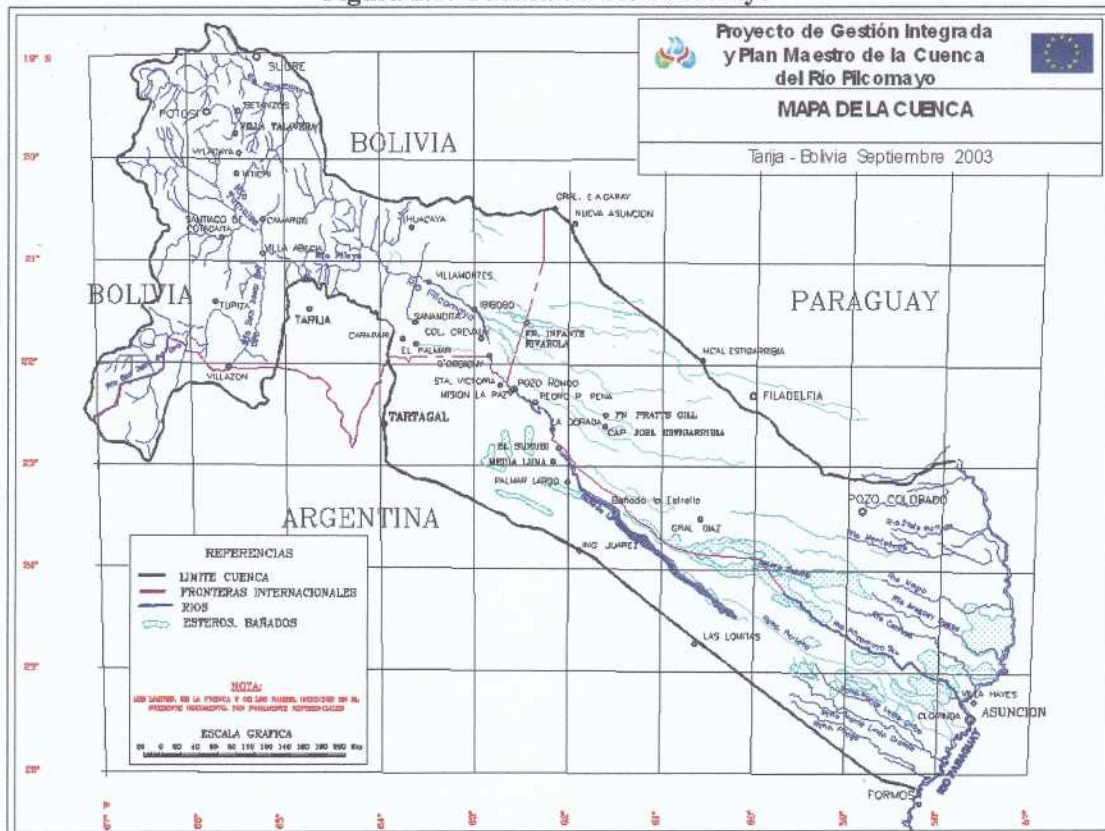
## Capítulo 2

## CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

## 2.1 EL MEDIO FÍSICO

La cuenca del río Pilcomayo cubre una área estimada de 272 000 km<sup>2</sup>, que se extiende sobre los territorios nacionales de Argentina, Bolivia y Paraguay (figura 2.1). Forma parte del sistema fluvial de la cuenca del Plata. Las nacientes del río se encuentran en la Cordillera de los Frailes en Bolivia, a más de 5,000 metros de altura y su área de influencia limita al este con el río Paraguay se encuentra próxima a la ciudad de Asunción. La cuenca incluye una gran variedad de climas, desde el de alta montaña hasta el de las zonas subandinas y el Chaco, en parte seco y en parte húmedo. Solamente la cuenca alta, situada casi enteramente en territorio boliviano, puede ser definida según los criterios usualmente admitidos (Proyecto Pilcomayo, 2003). El área de estudio corresponde a este sector.

Figura 2.1: Cuenca del río Pilcomayo



La Cuenca Alta del río Pilcomayo se encuentra ubicada entre las coordenadas 18° 42' y 22° 55' de latitud sur y 62° 20' y 67° 05' de longitud oeste. Limita al norte con la cuenca del Río

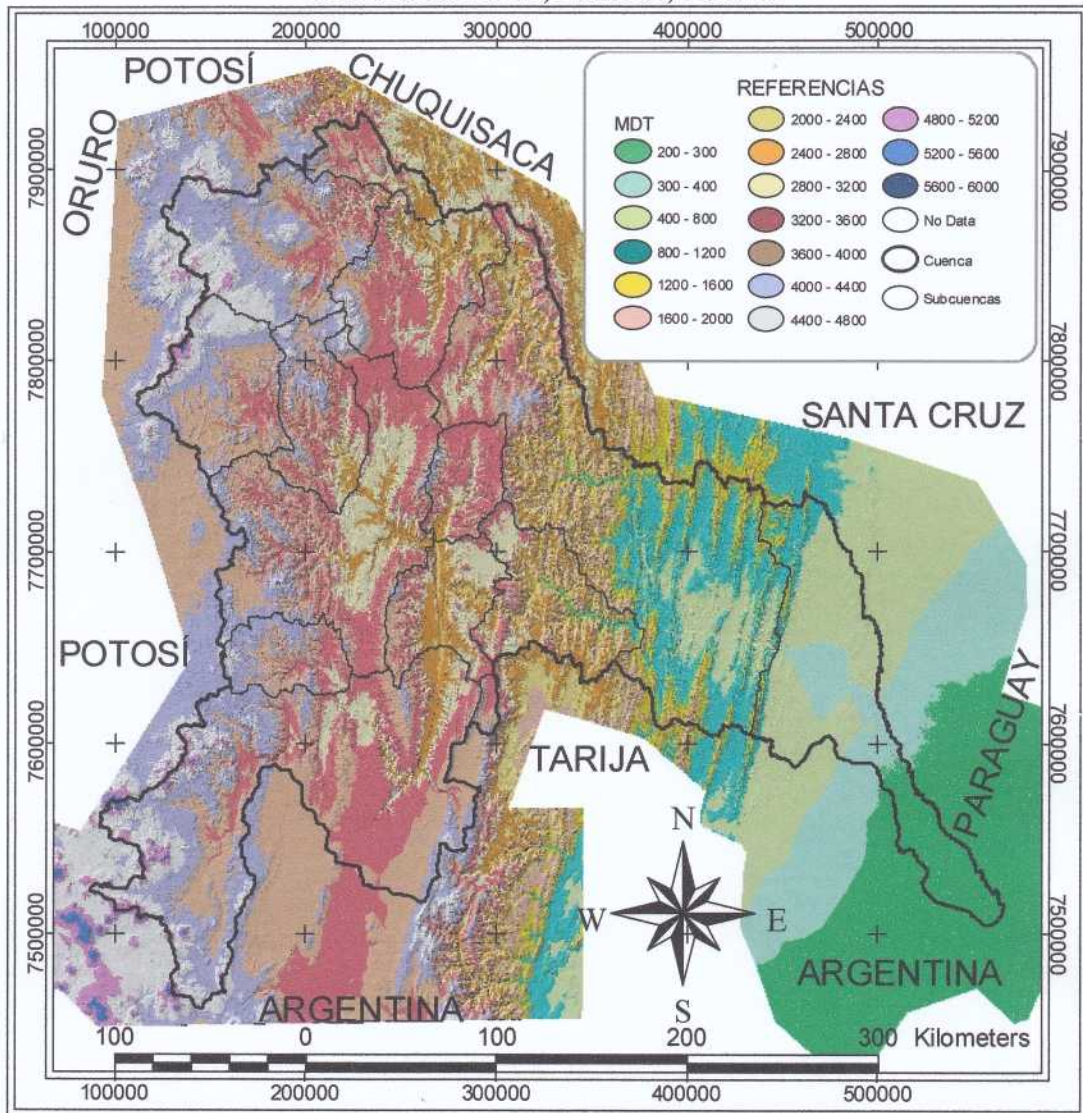
Grande, al Oeste con la cuenca endorreica del Altiplano, al sur con la cuenca del río Bermejo (Tarija), al Este con las cuencas de los ríos Parapetí y Paraguay (sistema del Chaco). La cuenca alta se extiende sobre los departamentos bolivianos de Oruro, Potosí, Chuquisaca y Tarija (Ver figura 2.2) y un área relativamente pequeña de la República Argentina. Cubre una superficie de 80710 km<sup>2</sup> hasta Villamontes y 89600 km<sup>2</sup> hasta Misión La Paz.

**Figura 2.2: Cuenca Alta del río Pilcomayo**



El relieve (ver figura 2.3, elaborada en base al modelo digital de elevaciones) está constituido por la cordillera de Los Andes al oeste, el Subandino y la llanura del Chaco al este. Morfológicamente la cadena andina presenta tres zonas: la Cordillera Occidental sector meridional, donde nace el río San Juan, la Cordillera Oriental Central y la Sur. El Subandino se halla constituido por un conjunto de paisajes, tales como, serranías, colinas, piedemontes y terrazas aluviales. Puntualmente está formada por un conjunto de serranías de dirección predominante Norte-Sur, adyacentes por su sector Este a la cordillera oriental y por valles intermontanos. Al este de la serranía del Aguaragüe, la última del Subandino, se extiende la llanura del Chaco, que presenta un declive hacia el sureste. La cuenca se extiende desde más de 5500 msnm hasta 392 msnm en la ciudad de Villamontes, donde se terminan las serranías del Subandino.

**Figura 2.3: Relieve y altitud de la Cuenca Alta del Pilcomayo**  
**Coordenadas UTM, PSAD 56, Zona 20**



Fuente: Elaboración propia

Debido a la orografía, el clima de la región varía de semiárido (sector oeste) hasta subhúmedo y subhúmedo seco en el resto de la cuenca. Las precipitaciones anuales varían entre 300 mm/año en el suroeste, hasta valores por encima de 1000 mm/año al este de la cuenca (ver capítulo 4). El régimen hidrológico está caracterizado por una estación seca de mayo a octubre y una estación húmeda de diciembre a marzo. Noviembre y abril se consideran meses de transición.

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. Se combinan características regionales semiáridas con materiales muy erosionables en la alta cuenca, en tanto la cuenca baja presenta una pendiente muy reducida, con tendencia a la sedimentación. La producción de sedimentos, que provoca concentraciones muy altas, es básicamente producto de estos fenómenos naturales que se explican por el carácter geológicamente joven de esta región. Además, la lixiviación natural de rocas presentes en la alta cuenca causa una contaminación importante de los ríos (Proyecto Pilcomayo, 2003).

## 2.2 HIDROGRAFÍA

La figura 2.4 muestra la red hidrográfica de la cuenca en coordenadas UTM, zona 20. El río Pilcomayo nace en la Cordillera de los Frailes, a 4600 msnm, en territorio de la provincia Avaroa del departamento de Oruro. En sus nacientes (66°20'W y 19°20'S) recibe el nombre de Jachcha Jokho, que cambia luego a Kollpa Jahuira. Más abajo recibe sucesivamente los nombres de Aguas Calientes, Cachimayu y a partir de la confluencia con el río Chillahua, ya en el departamento de Potosí, el de Pilcomayo. El río toma un rumbo predominante este al inicio. Cruza la localidad de Yocalla-Potosí (3380 msnm) a los 55 km de recorrido y por la estación hidrométrica de Talula a los 140 km. En este punto el río toma una dirección sureste que se mantiene hasta Misión La Paz. El río cruza Puente Méndez a 184 km de sus nacientes e Icla a los 234 km y una altitud de 2010 msnm. Hasta este punto los principales tributarios son los ríos Tinguipaya y Ravelo-Cachimayu por la margen izquierda y Tarapaya y Mataka por la derecha. El río continúa por 215 km hasta la confluencia con el río Pilaya, su tributario más importante. En este tramo recibe a los ríos Turuchipa y Ajchilla/Santa Elena.

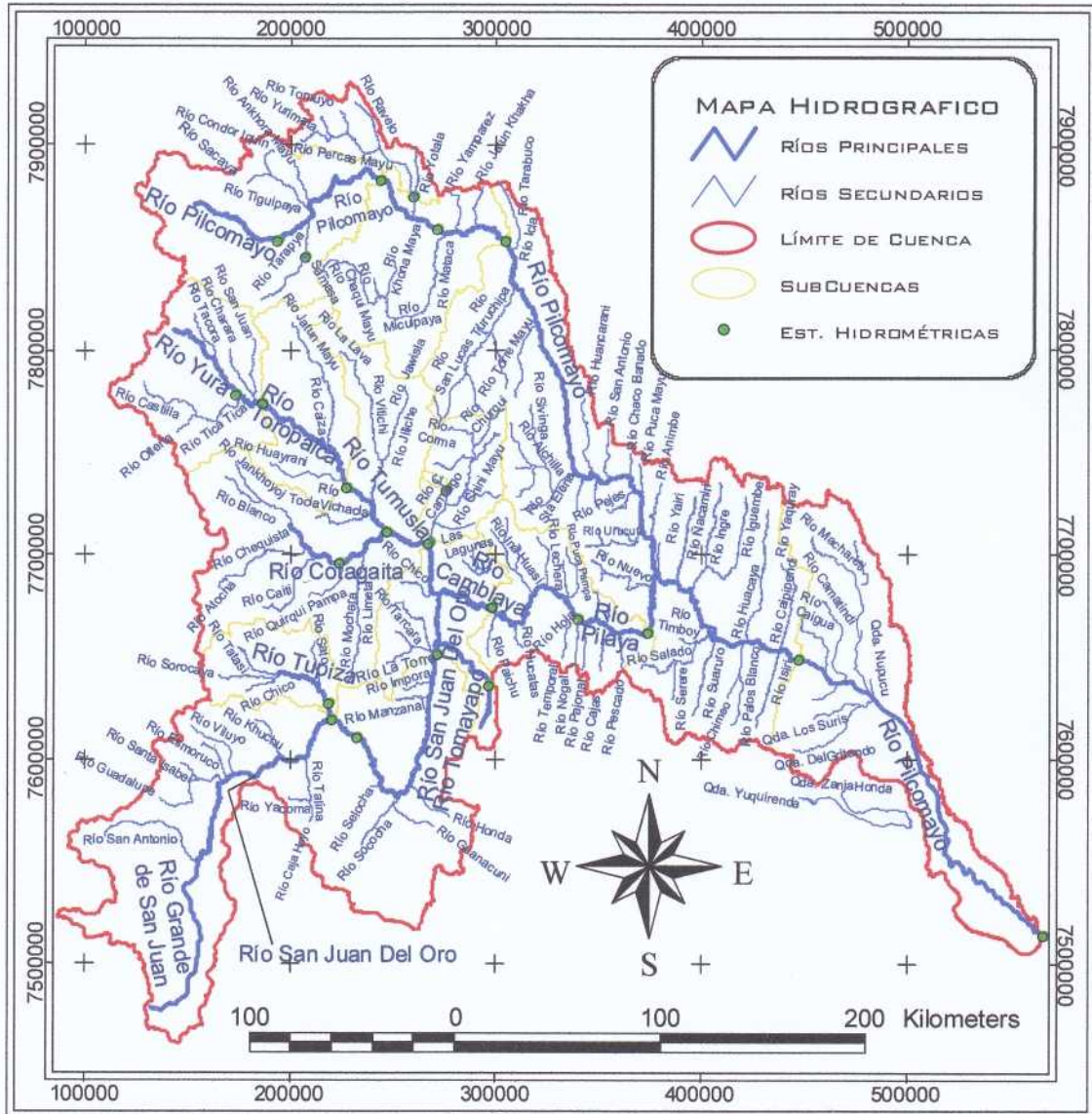
El río Camblaya-Pilaya se forma por la unión de los ríos San Juan del Oro y Tumusla. El primero recibe las aguas de varios afluentes provenientes de las Cordilleras de Lípez y Chichas, y el río Tumusla recibe las aguas provenientes de la Cordillera de los Frailes y Chichas. El río San Juan del Oro, que se denomina Grande de San Juan aguas arriba de la confluencia con el río San Antonio, tiene como tributarios importantes a los ríos Tupiza y Tomayapu. Por su parte, el río Tumusla, que aguas arriba recibe los nombres de Yura y Toropalca, tiene como principal tributario al río Cotagaita.

La mayor parte del tramo Camblaya-Pilaya, de 217 km de longitud, transcurre encañonado. Por su parte, el río San Juan del Oro, que nace a 4050 msnm en la provincia de Jujuy Argentina, tiene una longitud total de 400 km. El río Tumusla mide 234 km desde sus nacientes. Por tanto, siguiendo el curso más largo, el río Pilaya tiene una longitud de 617 km.

Desde la confluencia con el río Pilaya hasta Villamontes, el río Pilcomayo recorre 126 km, con lo que la longitud desde sus nacientes hasta esa localidad es de 575 km. En este tramo, recibe algunos afluentes, como el Ingre y el Ñacamiri, que le aportan agua de uno de los sectores más húmedos de toda la cuenca. En Villamontes (390 msnm) el río abandona la última serranía del Subandino e ingresa a la llanura chaqueña. La pendiente disminuye, la sedimentación del lecho se acelera y un cono de deyección se forma a partir del puesto militar de Ibibobo. El río cruza la localidad de La Vertiente a 355 msnm (+29 km), Palo Marcado a 330 msnm (+19 km), Ibibobo a 310 msnm (+20 km), Creveaux a 295 msnm (+35 km), D'Orbigny a 281 msnm (+24 km), Esmeralda a 265 msnm (+40 km), donde se encuentra el

hito trinacional, hasta llegar a Misión La Paz (+43 km) a 230 msnm, punto de control de toda la Cuenca Alta. La longitud acumulada del tramo Villamontes-Misión La Paz es de 210 Km.

Figura 2.4: Red hidrográfica de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo



Fuente: Elaboración propia

El río no tiene tributarios importantes en la llanura chaqueña y pierde parte de sus aguas por infiltración y evaporación en los paleo-cauces del cono, alimentando acuíferos que parecen tener un gradiente sureste. En resumen, el río Pilcomayo recorre 785 km desde sus nacientes hasta el punto de control en Misión La Paz.

El río continúa su flujo en la misma dirección unos 600 km, sirviendo de límite nacional entre las Repúblicas de Argentina (Provincia Formosa) y Paraguay (Provincias Boquerón y Presidente Hayes), hasta llegar a Clorinda (Paraguay, cerca de Asunción), que es el punto de confluencia con el río Paraguay.

### 2.3 GEOLOGÍA

La Cuenca en estudio tiene sus nacientes en las estructuras de la Cordillera Oriental, que ha estado sujeta a diversos efectos geodinámicos. Gran parte de la cuenca esta constituida por materiales muy erosionables: en la región Subandina principalmente arcillas, areniscas, arcillitas y limonitas y en las serranías del este de la cuenca por depósitos aluviales, fluvio-lacustres y coluviales (gravas, arenas, limos, arcillas, calizas y tills). Esta geología implica un transporte sólido importante en toda la cuenca, sedimentación o erosión importante del lecho de los ríos de la cuenca y por tanto, frecuentes cambios de sección (IGM, 2001).

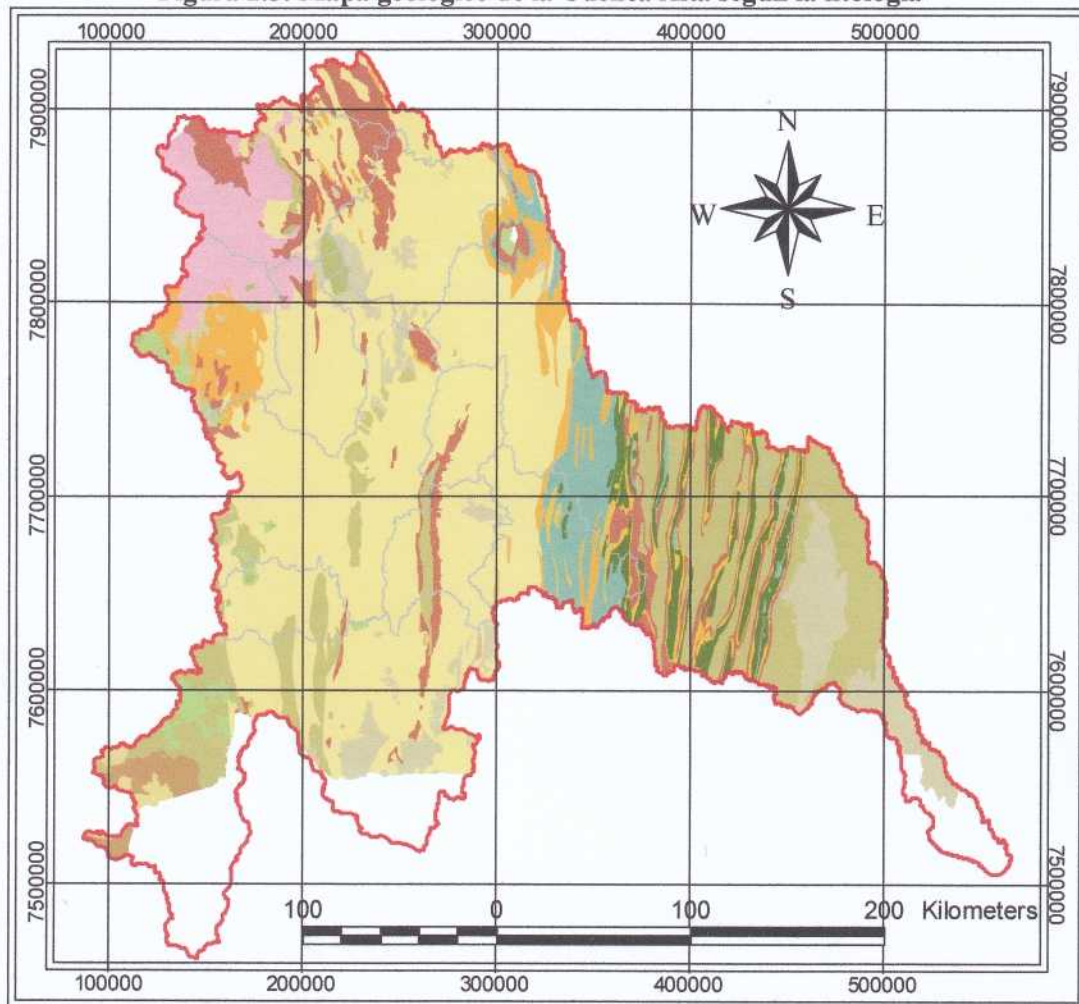
La profundización/incisión del lecho del río principal y muchos afluentes indica un estado juvenil dentro del ciclo de erosión, creando formas abruptas, fuertes pendientes y abundante carga gruesa. Sólo en limitados espacios, donde el curso del río adquiere una gradiente baja, se encuentran llanuras aluviales, abanicos aluviales y depósitos lacustres formados por la deposición de los sedimentos fluviales.

La figura 2.5 muestra la litología de la Cuenca Alta según Zonisig (2001). Según la estructura hidrogeológica y capacidad de infiltración/percolación, existen tres tipos básicos:

- Terrenos permeables constituidos por arena y grava sueltas.
- Terrenos semipermeables formados por arena, limo y arcilla poco consolidados como la llanura chaco-beniana
- Terrenos impermeables constituidos por afloramientos de rocas macizas ya sean de origen ígneo, sedimentario o metamórfico como es la Cordillera Oriental

El sector de la Cordillera Oriental, donde nace el río Pilcomayo (parte alta), presenta una estructura impermeable y semi-impermeable, que causa que el escurrimiento superficial sea mayor que la infiltración y que los valles estén expuestos a inundaciones. Sin embargo, los eventos tectónicos que afectaron a la región, la deformaron, plegaron y fracturaron intensamente, y han dado origen a una permeabilidad secundaria, que facilita, en cierto modo, la circulación de aguas subterráneas y su afloramiento respectivo. Como consecuencia de ello, la disminución de los caudales de manantiales es sensible en los años menos lluviosos. Se deduce que las zonas potenciales de aguas subterráneas en la Cordillera Oriental son reducidas. En la zona de Nor y Sur Chichas se distinguen manantiales que afloran de rocas ordovícicas, cretácicas y terciarias. En la región de Ravelo afloran aguas de calidad aceptable, las mismas después se unen y forman el río Ravelo que es el principal abastecedor de agua potable a la ciudad de Sucre. También en la cuenca de Culpina se presentan acuíferos confinados, con capas gravo-arenosos de buen rendimiento.

Figura 2.5: Mapa geológico de la Cuenca Alta según la litología



REFERENCIAS	
<b>Litología</b>	
Arenisca, arcillita, caliza, yeso, marga arenosa, limolita, Lava	Ignimbrita riodacítica
Arenisca, caliza, marga, yeso y conglomerado	Lava andesítica, dacítica, toba y brecha
Arenisca, conglomerado, lutita, marga, arcillita y limolita	Lava Andesítica, dacítica, toba y brecha, Ignimbrita riodacítica
Arenisca, lutita, Limolita Conglomerado, arenisca arcófica y cuarcita	Lutita, arenisca y limolita
Depósito aluvial, fluvioacustre, coluvial, glacial, fluvial, eólico, etc.	Lutita, limolita, cuarcita y arenisca
Diamictita, esquisto verde, cuarcita, lutita y arenisca, limolita	Lutita, limolita, diamictita, arenisca conglomerado
Estrato volcanes (andecita, dacita)	Límite de cuenca
Granodiorita y granito	Límite de subcuencas

Fuente: Zonisig (2001)

El sector Sur tiene la misma estructura pero con una franja permeable a lo largo de los cursos de los ríos San Juan del Oro y Chico de Camargo, que va desde Tojo hasta Camargo aproximadamente. En general, los acuíferos son libres y en algunos casos, muy próximos a la superficie. Sobre los lineamientos paleozoicos de menor extensión, se sobreponen sedimentos mesozoicos y terciarios con permeabilidades relativas un poco más altas.

Por último la parte baja (llanura Chaco-Beniana) tiende a ser semi-impermeable a permeable y se caracteriza por tener una mayor continuidad y homogeneidad en las estructuras del subsuelo. Como consecuencia, la disposición de las curvas izopiédicas permiten determinar que el curso de los flujos subterráneos tenga como base el sudeste de la cuenca chaqueña, donde cerca a la frontera con el Paraguay, la red de drenaje prácticamente ha desaparecido. Sin embargo, los rendimientos de los pozos subterráneos son moderados, debido a la limitada recarga a los acuíferos, que sólo reciben tres cursos de agua de poco caudal desde el Aguarañe (los ríos Machareti, Tiguiya y Camatindi) y a la precipitación media anual de 400 a 800 mm. Como consecuencia, el nivel estático fluctuante es continuo y muy profundo, que en algunos casos llega hasta los 230 m, y está estrechamente relacionado con la cercanía o lejanía del abanico aluvial de río Pilcomayo.

#### **2.4 DIVISIÓN EN SUBCUENCAS Y MORFOMETRIA**

Con apoyo de extensiones ArcView y un modelo digital de elevaciones elaborado para el presente estudio, se delimitaron las subcuencas en función de las estaciones hidrométricas que disponían de datos de caudal. La figura 2.6 muestra las subcuencas y las estaciones hidrométricas, incluyendo varias que no disponen de datos de caudal. Las estaciones más importantes se describen a continuación:

**SALTO LEÓN.** Con control fluviométrico sobre el río Yura. Ubicada a 3160 msnm, al sureste de la localidad de Yura y al suroeste de la localidad Chahu Ingenio y a unos 4 km aguas abajo de la desembocadura sobre el río Yura de los ríos Charara y San Juan.

**TUMUSLA.** Con control fluviométrico sobre el río Tumusla. Recibe el aporte de la cuenca Salto León y de las cuencas de los ríos Caiza, Huayrani y otros. Ubicada junto a la población de Tumusla, a 2580 msnm y a 18 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Vitichi sobre el río Tumusla.

**PALCA GRANDE.** Con control fluviométrico sobre el río Tumusla. Recibe el aporte de las cuencas Salto León, Tumusla y de las cuencas de los ríos Vitichi, Cotagaita y otros. Ubicada junto a la localidad de Palca Grande a 2345 msnm, medio kilómetro aguas arriba del punto de desembocadura del río Chico de Camargo sobre el río Tumusla y al sur de la población de Camargo y norte de la población de Villa Abecia.

**SAN PEDRO.** Con control fluviométrico sobre el río Chico de Camargo. Ubicada cerca de la localidad Palca Grande a 2340 msnm, 1.6 Km aguas arriba del punto de desembocadura del río Chico de Camargo sobre el río Tumusla y a unos 2 km aguas abajo del punto de desembocadura de la quebrada de Uturngo sobre el Río Chico de Camargo.

TUPIZA. Con control fluviométrico sobre el río Tupiza. Ubicada cerca de la localidad de Tupiza a 2960 msnm, a unos 10 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Tupiza en el río San Juan del Oro.

EL PUENTE. Con control fluviométrico sobre el río San Juan del Oro. Recibe el aporte de las cuencas de los ríos Grande de San Juan, San Antonio (Esmoruco), Guadalupe, Esmoruco, Viluyo, Talina, Tupiza, Sococha, Guananguni, Honda, Manzanal, Impora y otros. Ubicada junto a la localidad El Puente a 2320 msnm, al sur de la localidad de Las Carreras y a unos 7 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Tomayapo sobre el río San Juan del Oro.

EL MOLINO. Con control fluviométrico sobre el río Tomayapo. Ubicada cerca de la localidad de El Molino Tomayapo a 3300 msnm y a unos 41 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Tomayapo en el río San Juan del Oro.

CHILLCARA. Con control fluviométrico sobre el río Camblaya. Recibe el aporte de todas las cuencas anteriores y las de los ríos Tarcara, Chico y otros. Ubicada a 2090 msnm al este de la población de Villa Abecia, al sur de la Estancia La Cabrería y al norte de la estancia Las Animas, a unos 4.5 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Paichu sobre el río Camblaya.

SAN JOSECITO. Con control fluviométrico sobre el río Pilaya. Recibe el aporte de todas las cuencas anteriormente descritas, además de las cuencas de los ríos Huacata, Inca Huasi, Lechera, Arenales, Temporal, Nogal, Cajas, Pescado, San Simón, Manzanal y otros. Ubicada a 835 msnm al norte de la localidad El Huyco y oeste de la localidad de Timboy y a unos 15 Km. aguas abajo del punto de desembocadura del río Pescado sobre el río Pilaya.

TALULA. Con control fluviométrico sobre el río Pilcomayo. Ubicada cerca de la localidad de Talula a 2.570 msnm y a 32 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Cachimayu en el río Pilcomayo.

NUJCHU. Con control fluviométrico sobre el río Ravelo/Cachimayu. Ubicada junto a la localidad de Nujchu a 2400 msnm a unos 16 km aguas arriba del punto de desembocadura del río Ravelo en el río Pilcomayo.

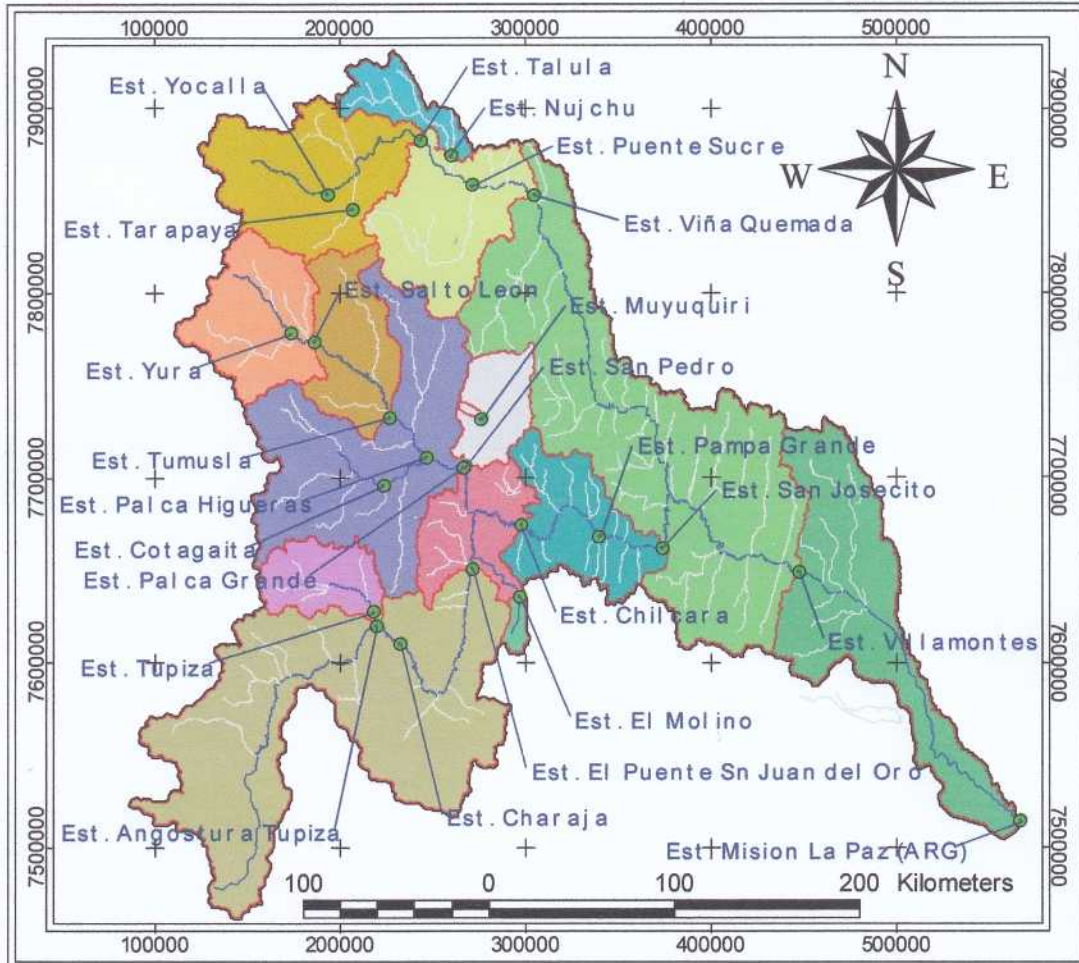
VIÑA QUEMADA. Con control fluviométrico sobre el río Pilcomayo. Recibe el aporte de las cuencas Talula, Nujchu y de la cuenca del río Mataka. Ubicada a 2020 msnm al sureste de la localidad de La Mendoza, a unos 7 km aguas arriba de la confluencia del río Icla.

VILLAMONTES. Con control fluviométrico ubicado sobre el río Pilcomayo. Recibe el aporte de todas las cuencas descritas anteriormente y las de las cuencas de los ríos Icla, Turuchipa, Torremayu, Ajchilla, Chaco Banado, Puca Mayu, Animbe, Yairi, Ñacamiri, Ingre, Timboy, Saururo, Palos Blancos, Huacaya, Isiri, Caipipendi y otros. Ubicada junto a la población de Villamontes a 390 msnm, justamente a la salida de la serranía Aguarague y a unos 12 km aguas abajo de la desembocadura de los ríos Isiri y Caipipendi en el río Pilcomayo.

MISIÓN LA PAZ. Con control fluviométrico sobre el río Pilcomayo. Es el punto de control de toda la cuenca alta. Además de las anteriores, recibe el aporte de las cuencas de los ríos

Ihuiraru, Camatindi, Macharetí y otros. Administrada por la institución competente de Argentina.

Figura 2.6: Subcuencas y estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del Pilcomayo



La tabla 2.1 muestra los principales parámetros morfométricos de las subcuencas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo, empezando con el área de aporte y perímetro. La superficie total de la cuenca hasta Villamontes es de 80711 km<sup>2</sup> y hasta Misión La Paz es de 89595 km<sup>2</sup>. Se observa que la pendiente de las zonas altas de las cuencas de los ríos Pilcomayo y San Juan del Oro (controladas por las estaciones de Talula y El Puente), es más moderada que la de las subcuencas que aportan a esos mismos ríos aguas abajo. Para el conjunto de la Cuenca Alta hasta Villamontes, la pendiente es relativamente uniforme.

La pendiente media del curso principal se obtuvo siguiendo el curso más largo. Nuevamente destaca el tramo superior del río San Juan del Oro como el de pendiente más moderada. La pendiente media del río Pilcomayo hasta Villamontes es de 0.72%. El índice de compacidad más próximo a 1 de las subcuencas de la parte alta indica una respuesta hidrológica más rápida y por tanto, crecidas de mayor magnitud relativa. Este índice tiende a aumentar en dirección aguas abajo hasta alcanzar 2.3 en Villamontes y 2.8 en Misión La Paz.

La densidad de drenaje y la longitud de flujo de superficie, si bien son parámetros cuyo valor depende de la escala de los mapas utilizados, permiten al menos una comparación entre subcuencas trabajadas con la misma escala. Dos subcuencas pequeñas, las de Muyuquiri y El Molino, destacan por su alta densidad de drenaje y por tanto corta longitud de flujo superficial. Por el contrario, la parte alta de los ríos Tumusla y San Juan del Oro presentan una densidad de drenaje relativamente baja.

Tabla 2.1: Parámetros morfométricos de la Cuenca Alta del río Pilcomayo

Nº	Sub Cuenca (Est. Hidrométr.)	Río	Área i [ Km <sup>2</sup> ]	Área [ Km <sup>2</sup> ]	Perim. [ Km ]	L <sub>LR</sub> [ Km ]	S <sub>MC</sub> [ % ]	S <sub>MCP</sub> (%)		Ic	Rectáng. Equiv (km)		F	Dd [ Km/Km <sup>2</sup> ]	L <sub>FS</sub> [ Km ]	Re [ Km ]	Cotas [m]	
								Parcial	Total		Lmax	Lmin					Min	Max
1	Nujchu	Chaquimayu	1608	1608	295	64	27.7	1.24	1.24	2.1	136.8	11.8	0.39	0.28	1.77	0.70	2394	4581
2	Talula	Pilcomayo	6493	6493	490	120	22.1	1.02	1.02	1.7	216.8	30.0	0.45	0.09	5.68	0.76	2562	5194
3	Viña Quemada	Pilcomayo	5348	13449	762	182	24.6	0.65	0.95	1.9	344.6	39.0	0.41	0.14	3.56	0.72	2019	5194
4	Muyuquiri	Lique Mayu	63	63	37	15	36.8	2.59	2.59	1.3	14.4	4.4	0.28	0.34	1.47	0.60	3130	4630
5	San Pedro	C.Camargo	2108	2108	238	77	27.8	1.26	1.26	1.5	98.3	21.4	0.36	0.41	1.23	0.68	2332	4762
6	Salto Leon	Yura	4455	4455	358	75	19.9	1.53	1.53	1.5	151.0	29.5	0.79	0.09	5.49	1.00	3154	5450
7	Tumusla	Tumusla	3662	8117	523	128	25.3	0.82	1.15	1.6	227.6	35.7	0.50	0.10	5.06	0.79	2580	5450
8	Palca Grande	Tumusla	10496	18613	953	176	26.4	0.35	0.88	1.8	395.0	47.1	0.60	0.10	5.07	0.88	2320	5490
9	El Molino	Tomayapo	297	297	83	31	23.2	1.00	1.00	1.4	32.8	9.0	0.30	0.23	2.15	0.62	3311	4612
10	Tupiza	Tupiza	2262	2262	271	66	25.1	1.43	1.43	1.6	117.3	19.3	0.52	0.09	5.84	0.81	2958	4839
11	La Angostura	Tupiza	48	2311	284	64	25.1	0.90	1.36	1.7	124.6	18.5	0.57	0.09	5.70	0.85	2882	4839
12	El Puente	SnJuan Oro	17396	19707	1019	220	19.2	0.42	0.57	2.0	471.5	41.8	0.41	0.10	4.81	0.72	2321	5914
13	Chillcara	Camblaya	3155	43880	1683	261	23.3	0.30	0.69	2.3	792.4	55.4	0.65	0.13	3.93	0.91	2067	5914
14	San Josecito	Pilaya	4250	48130	1825	289	24.7	1.08	0.74	2.3	863.6	55.7	0.58	0.14	3.45	0.86	800	5914
15	VillaMontes	Pilcomayo	19131	80711	2383	397	28.6	0.48	0.72	2.3	1129.1	71.5	0.51	0.19	2.59	0.81	380	5914
16	Misión La Paz	Pilcomayo	8884	89595	2927	574	26.3	0.07	0.64	2.8	1411.2	63.5	0.27	0.19	2.57	0.59	230	5914

Fuente: Elaboración propia

**Capítulo 3****BALANCE HÍDRICO DE CUENCA****3.1 CONCEPTOS BÁSICOS**

Se entiende por Balance Hídrico de cuenca a la evaluación de las entradas y salidas de agua en un hidrosistema natural llamado cuenca hidrográfica. El balance hídrico tiene su fundamento en el principio de conservación de la masa y se expresa en la ecuación simplificada del balance, que equivale a decir que la precipitación es igual a la escorrentía más la evapotranspiración real, más un término de discrepancia:

$$\langle \bar{P} \rangle = \langle \bar{Q} \rangle + \langle \bar{ET} \rangle + \eta \quad (3.1)$$

Donde:

- $\langle \bar{P} \rangle$  = Precipitación media del periodo y área
- $\langle \bar{Q} \rangle$  = Caudal medio del periodo y área
- $\langle \bar{ET} \rangle$  = Evapotranspiración media del periodo y área
- $\eta$  = Término de discrepancia

El símbolo  $\langle \rangle$  indica promedio espacial horizontal y la barra promedio temporal.

Puesto que las mediciones de cada uno de los parámetros que intervienen en el balance se efectúan en forma separada y por diferentes medios de observación, es que surgen errores sistemáticos. Estos errores se traducen en el término de discrepancia, el cual no es más que un indicador de la calidad con que cada uno de los componentes se ajusta a la ecuación del balance. Valores bajos de  $\eta$  solamente indican que los términos del balance tienden a compensarse.

Puede considerarse al Balance Hídrico como una representación y evaluación cuantitativa de los componentes del ciclo del agua o ciclo hidrológico (figura 3.1), a nivel de cuenca. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El ciclo hidrológico sirve también para hacer resaltar las fases básicas de interés para el hidrólogo: precipitación, evaporación y transpiración, flujo superficial y subterráneo. Por medio del Balance se puede lograr un conocimiento cualitativo y cuantitativo del ciclo hidrológico y de las interrelaciones entre fases. También es de interés la frecuencia con que pueden presentarse los casos extremos del ciclo, pues esta es la base del análisis económico, que es, o debe ser, el determinante final de todos los proyectos hidráulicos. (Ven Te Chow, Maidment David R., Mays Larry W, 1998)

El paso de tiempo (anual o mensual) usado en el Balance influye en la ecuación y metodología. Una forma más general de la ecuación es la siguiente:

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - ET - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S - \eta = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

P	=	Precipitación
Q <sub>sl</sub>	=	Entrada de agua superficial a la cuenca o cuerpo de agua
Q <sub>ul</sub>	=	Entrada de agua subterránea a la cuenca o cuerpo de agua
E	=	Evaporación
ET	=	Evapotranspiración
Q <sub>so</sub>	=	Salida de agua superficial
Q <sub>uo</sub>	=	Salida de agua subterránea
ΔS	=	Variación del almacenamiento de agua en la cuenca
η	=	Término residual de discrepancia, error de medición o estimación

La ecuación 3.2 evalúa por separado el flujo superficial y subterráneo y considera variación del almacenamiento en la cuenca, lo que es indispensable para balances de paso mensual. Las unidades de la ecuación pueden ser expresadas en altura media de agua sobre la cuenca o cuerpo de agua (mm), como volumen de agua (hm<sup>3</sup>) o en forma de flujo (m<sup>3</sup>/s). Se puede expandir el término ΔS para obtener una ecuación aún más detallada:

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - ET - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta M - \Delta G - \Delta S_L - \Delta S_{CH} - \Delta S_{GL} - \Delta S_{SN} - \eta = 0 \quad (3.3)$$

Donde:

ΔM	=	Variación del almacenamiento de humedad en el suelo y zona saturada
ΔG	=	Variación del almacenamiento en acuíferos
ΔS <sub>L</sub>	=	Variación del almacenamiento en lagos y embalses
ΔS <sub>CH</sub>	=	Variación del almacenamiento en cursos de agua
ΔS <sub>GL</sub>	=	Variación del almacenamiento en glaciares
ΔS <sub>SN</sub>	=	Variación del almacenamiento en cobertura de nieve

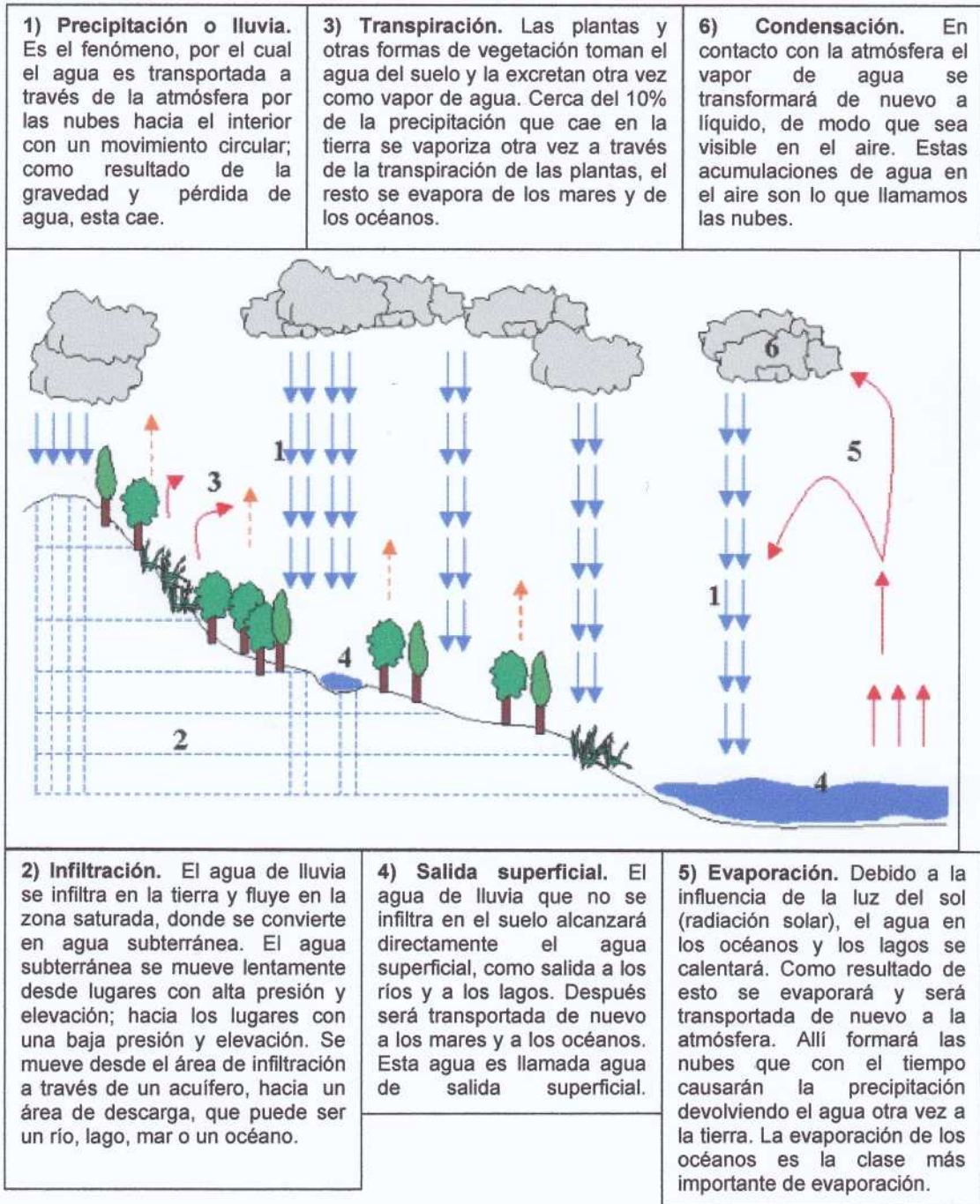
### 3.2 METODOLOGÍA

Existen diversos tipos de balance hídrico y métodos asociados. Por ejemplo el balance hídrico puntual o *balance agrológico* es la base para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos. Por medio del *balance aerológico* se busca determinar el contenido de agua en la atmósfera y su dinámica. Las expresiones del balance hídrico en la atmósfera, que surgen de la conservación de la masa, pueden variar según los procesos físicos a ser estudiados. La forma que convendrá tratar es la que contiene como residuo a la diferencia entre la evaporación y la precipitación promediadas en un periodo de tiempo dado y sobre una superficie dada.

El *balance isotópico* usa el comportamiento isotópico del vapor de agua al moverse a través de las diversas fases del ciclo hidrológico. Por el proceso de evaporación el agua del suelo se enriquece del isótopo <sup>18</sup>O respecto del agua de precipitación. Por otra parte el vapor de condensación será más rico en <sup>18</sup>O respecto que el vapor original. De esta forma, el vapor residual, después de un proceso de condensación, se empobrecerá en <sup>18</sup>O. Si este proceso se repite por etapas, el vapor residual cada vez tendrá una composición isotópica menor que la

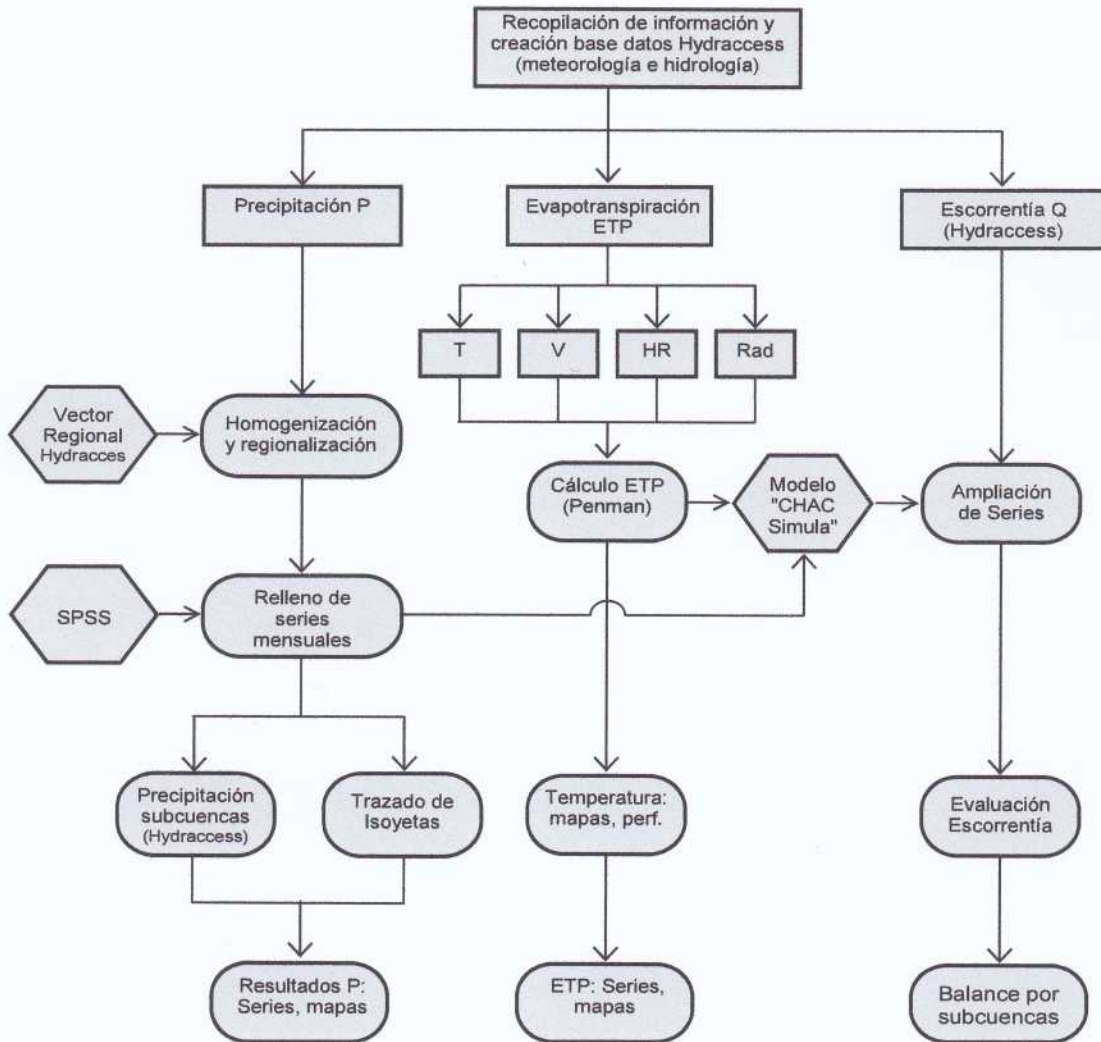
anterior y así sucesivamente. De esta forma la concentración isotópica de la precipitación irá disminuyendo a medida que se desenvuelve el proceso.

**Figura 3.1: Ciclo hidrológico**



La metodología utilizada para el presente estudio corresponde a la del balance hídrico superficial de cuenca de paso mensual. Fue desarrollada durante la primera fase del proyecto Balance Hídrico Microregional de Bolivia y aplicada inicialmente a una cuenca piloto. La figura 3.2 muestra esa metodología, que corresponde al objetivo de obtener series mensuales de las principales componentes del balance: precipitación, evapotranspiración real y escurrimiento.

Figura 3.2: Esquema metodológico del Balance Hídrico Microregional



Existen aspectos de la metodología que pueden considerarse básicos. En primer lugar, la evaluación por separado de la precipitación, la evapotranspiración potencial (ETP) y el escurrimiento. Esto permite obtener resultados para cada componente, como series mensuales y mapas (con apoyo de un SIG). En segundo lugar, la necesidad de evaluar la calidad y

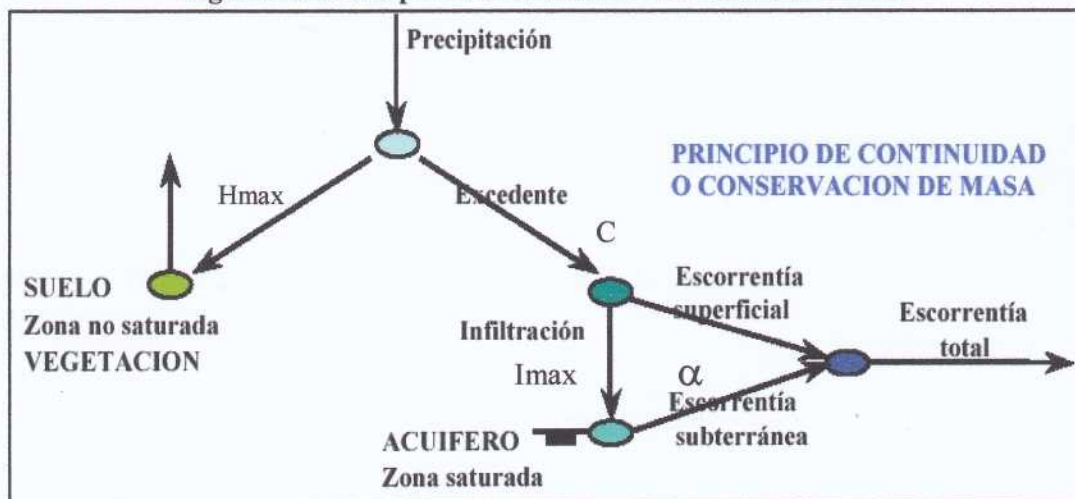
consistencia de la información, mediante métodos como el Vector Regional. En tercer lugar, el uso de un modelo matemático de balance (CHAC Simula), al que se le asignó dos objetivos específicos: a) Completar y ampliar las series mensuales de caudal; b) Obtener una mejor comprensión del funcionamiento hidrológico de la cuenca. El modelo tiene la gran ventaja de extraer el máximo de información de los datos disponibles, permitiendo estimar el escurrimiento en sitios donde no existen registros hidrométricos o existen lagunas en las series medidas. Es necesario, entre otras cosas, porque al utilizarse un paso mensual, se debe considerar el almacenamiento temporal en diversos reservorios (ver ecuaciones 3.2 y 3.3), para los que generalmente no se dispone de datos medidos. Además, mediante el modelo se determina la evapotranspiración real (ETR). En el siguiente subcapítulo se describen sus principales características.

Después de la evaluación por componentes y la aplicación del modelo, se obtiene el balance hídrico por subcuencas. Posteriormente se obtiene el balance hídrico consolidado por cuenca, bajo el criterio de que los valores obtenidos para una cuenca deberán presentar total correspondencia en su magnitud con el de las subcuencas componentes. Las discrepancias deberán ser analizadas y explicadas.

### 3.2 EL MODELO DE TÉMEZ

El modelo matemático de balance de cuenca CHAC-Simula aplica el modelo de Témez (Témez, 1977 citado en CEDEX, 2004). Se trata de un modelo conceptual, agregado, de simulación continua, de pocos parámetros, de paso mensual, que aplica 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. (Figura 3.3). Ha sido utilizado para elaborar el Plan Nacional de Aguas de Portugal y, en su versión distribuida (SIMPA), en el Plan Hidrológico de España (Libro Blanco).

Figura 3.3: Principio de continuidad en el modelo de Témez



Fuente: Cedex (2004)

**Tabla 3.1: Síntesis de variables y ecuaciones del modelo de Témez**

Siendo:	<p><math>P_0</math>: Umbral de escorrentía. mm  <math>H_{max}</math>: Parámetro de humedad máxima. mm/mes  <math>C</math>: Parámetro de excedente.  <math>I_{max}</math>: Parámetro de infiltración máxima. mm/mes  <math>\alpha</math>: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup>  <math>K</math>: Parámetro coeficiente de uso de suelo medio sobre ETP  <math>P_i</math>: Precipitación: mes (i). mm  <math>H_{i-1}</math>: Humedad antecedente: mes (i-1). mm  <math>EP_i</math>: Evapotranspiración potencial, afectada por el coeficiente de usos de suelo: mes (i). mm  <math>ER_i</math>: Evapotranspiración real: mes (i). mm  <math>T_i</math>: Excedente: mes (i). mm  <math>V_i</math>: Volumen almacenado: mes (i). mm  <math>I_i</math>: Infiltración: mes (i). mm  <math>A_{SUP_i}</math>: Escorrentía superficial: mes (i). mm  <math>A_{SUB_i}</math>: Escorrentía subterránea: mes (i). mm  <math>Q_i</math>: Caudal subterráneo: mes (i). m<sup>3</sup>/s  <math>A_{TOT_i}</math>: Escorrentía total: mes (i). mm</p>
Umbral de escorrentía, $P_0$	$P_0 = C \cdot (H_{max} - H_{i-1})$
Excedente, $T_i$	$P_i \leq P_0 \Rightarrow T_i = 0$ $P_i > P_0 \Rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i + \delta - 2P_0}$ siendo $\delta = H_{max} - H_{i-1} + EP_i$
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, $I_i$	$I_i = I_{max} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{max}}$
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, $A_{TOT_i}$	$A_{TOT_i} = A_{SUP_i} + A_{SUB_i}$
<b>VARIANTES DEL MODELO</b>	
Siendo	<p>Parámetro número de días con precipitación                  Dos ramas de descarga del acuífero  <math>\alpha_1</math>: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup>  <math>\alpha_2</math>: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup>                  Parámetros reparto de recarga. Tanto por uno</p>

Fuente: Manual del CHAC (Cedex, 2004)

La tabla 3.1 resume las variables utilizadas por el modelo, sus unidades y las ecuaciones que rigen los diferentes subprocesos. La información de entrada que requiere el modelo puede clasificarse en cuatro tipos: Series mensuales, datos generales, valores iniciales y parámetros de calibración. 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. Esto significa que los valores de precipitación y ETP han resultado de un cálculo espacial de ambas variables, en base a métodos como el de polígonos de Thiessen, distancia inversa o Krigging. En la versión del modelo de Témez que se desarrolló y utilizó en el IHH hasta el 2004 (IHH-SIMULA) cada serie usaba un archivo, pero en la versión CHAC las tres series pueden incluirse en un solo archivo.

Los 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. Por experiencia, se recomienda usar el promedio de días de lluvia por mes de la estación húmeda. El coeficiente ETP es un coeficiente de corrección de la evapotranspiración potencial. El valor por defecto es 1, si los valores ingresados en la serie correspondiente a dicha variable climatológica fueron calculados mediante el método que mejor se ajuste a la región y uso del suelo.

Los datos iniciales son el caudal subterráneo y la humedad del suelo (contenido de agua) correspondientes al primer mes del periodo de simulación. Si no existen valores medidos, deberán asumirse valores sujetos a corrección posterior. El uso del año hidrológico en la modelación presenta una ventaja importante relacionada a este aspecto, ya que en cuencas subhúmedas o semiáridas, como es el caso del Pilcomayo, es muy razonable asumir el valor 0 para la humedad inicial.

Los cuatro parámetros de calibración son el parámetro C de excedencia, la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo  $H_{max}$ , la capacidad máxima de infiltración  $I_{max}$  y el coeficiente de descarga del acuífero  $\alpha$ . La ubicación de estos parámetros en la figura 3.3 indica en que subproceso tiene más influencia cada uno de ellos. Se los describe a continuación por separado.

#### *Parámetro C*

Se usa 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 es 0 el valor de  $P_o=0$ , por lo que toda lluvia, aún de pequeña magnitud, producirá escorrentía a la salida de la cuenca. Como se puede observar en la tabla 3.2,  $P_o$  depende tanto de C como del contenido de agua en el suelo en el mes anterior. 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.

#### *H<sub>max</sub>*

Es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y zona no saturada en mm, incluyendo el almacenamiento superficial (charcos y depresiones) y en la vegetación. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración, por lo que un valor más grande de  $H_{max}$  implica en principio una disminución del volumen de escorrentía. Este valor se puede obtener en base a información cartográfica, combinando un mapa de suelos o fisiografía con un mapa de vegetación, usando la metodología descrita por Zonisig (2000).

*Imax*

Se define como la infiltración máxima posible o capacidad de infiltración en el mes, en mm. Este parámetro determina la división del excedente T en escorrentía superficial y recarga al acuífero, por lo que un nombre más adecuado sería el de percolación máxima. 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, 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 *Imax* sólo puede tomarse como referencia preliminar.

*Coefficiente de descarga del acuífero  $\alpha$* 

Es la inversa de la constante de recesión  $k$  ( $\alpha=1/k$ ) expresada en (1/días). Resulta de considerar al acuífero un embalse lineal, lo que lleva a ecuaciones del tipo de la 3.4 para el caudal  $Q$  drenado por el acuífero en el intervalo  $i-1$  a  $i$ . Se puede obtener de los registros hidrométricos de la época de estiaje o por calibración.  $\alpha$  es más grande en cuencas pequeñas o con acuíferos poco importantes. La bibliografía (DHI, 2000) indica valores  $\alpha$  en el rango de 0.005 a 0.1.

$$Q_i = Q_{i-1} * e^{-\Delta t/k} = Q_{i-1} * e^{-\alpha \Delta t} \quad (3.4)$$

Con el objeto de disminuir el número de parámetros de calibración, explotar al máximo la información cartográfica disponible y tener la posibilidad de extender la modelación a subcuencas no aforadas, los parámetros *Hmax* e *Imax* se determinaron por medio de la base de datos y mapas temáticos elaborados por Zonisig (2000) para los tres departamentos bolivianos de Potosí, Chuquisaca y Tarija, que cubren más del 90% de la superficie de la Cuenca Alta del río Pilcomayo. Este proceso y los mapas resultantes se describen en detalle en el capítulo 6. Durante el proceso de calibración, esos parámetros se mantienen dentro de un estrecho rango alrededor de los valores así obtenidos y la calibración se limita a los parámetros  $C$  y  $\alpha$ , lo que tiene ventajas adicionales de orden práctico.

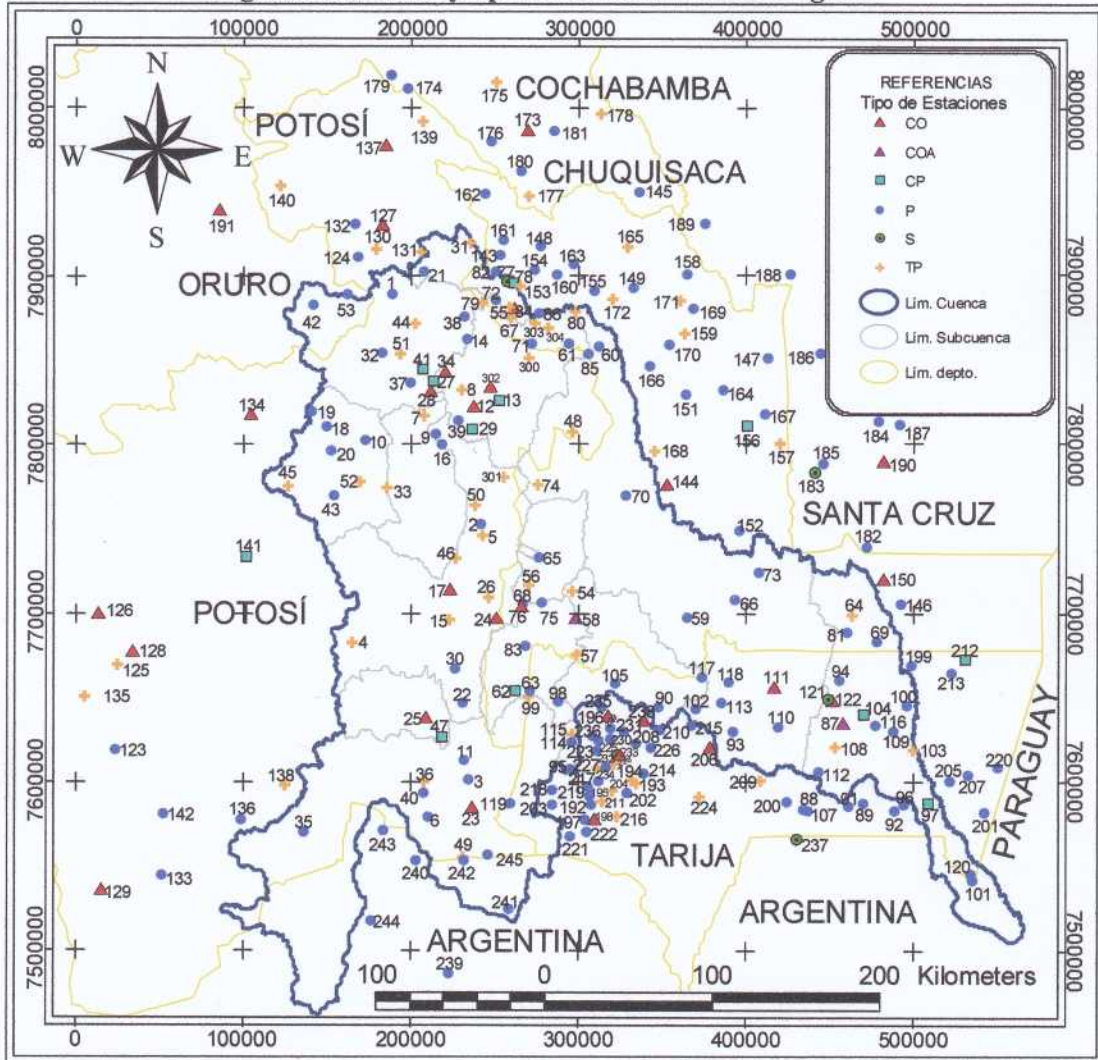
**3.3 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA**

La figura 3.4 muestra la ubicación geográfica y tipo de las estaciones meteorológicas utilizadas en el Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo. La tabla 3.2 contiene la lista de esas estaciones, su ubicación política, subcuenca a la que pertenecen, coordenadas geográficas, altitud, tipo de estación y las variables cuyos registros están en la base de datos. Se ha agrupado las estaciones entre aquellas que están dentro de la cuenca y las de apoyo situadas fuera de ella. Se tiene un total de 245 estaciones meteorológicas que quedaron después del análisis de datos pluviométricos (capítulo 4), que obligó a eliminar 28 de las 273 estaciones iniciales. La gran mayoría de las estaciones son de SENAMHI, pero existen algunas al sureste de la cuenca que fueron manejadas por el proyecto CABAS y proporcionadas por el Proyecto Pilcomayo.

La ubicación (coordenadas geográficas) de la figura 3.4 y tabla 3.2 es la mejor a la que se pudo llegar después de verificar y eventualmente corregir las coordenadas proporcionadas por

SENAMHI. Este proceso se realizó con ayuda de cartas geográficas escala 1:250,000. Un cierto número de estaciones no se pudo ubicar en las cartas, por lo que su ubicación está sujeta a verificación posterior. Es recomendable tener lecturas con GPS de todas las estaciones, tanto en funcionamiento como fuera de servicio. Los datos de las 245 estaciones más las 5 auxiliares se encuentran en la base de datos Hydraccess que fue creada para el presente estudio.

Fig. 3.4: Ubicación y tipo de estaciones meteorológicas



(Fuente: Elaboración Propia en base a datos de SENAMHI y CABAS)

**Tabla 3.2: Estaciones meteorológicas del Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo**

Nº	Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Precip	Temp M <sup>3</sup>	% HRM	Viento	Hr. Sol	Evap
					NORTH	EAST										
1	Ajtara	Potosi	T. Frias	PMY	7888889	188425	19.0692 S	65.9605 W	3440	P	P					
2	Ampa Ampa	Potosi	M. Omiste	TML	7752477	241676	20.3082 S	65.4738 W	2600	P	P					
3	Arenales	Potosi	M. Omiste	SJO	7600236	234023	21.6814 S	65.5704 W	3472	P	P					
4	Atocha	Potosi	S-Chichas	COT	7682171	165617	20.9307 S	66.2147 W	3654	TP	P	T				
5	Calcha	Potosi	N-Chichas	TML	7746268	242743	20.3644 S	65.4645 W	2850	TP	P	T	%H	V		
6	Chagua	Potosi	M. Omiste	SJO	7578337	210256	21.8753 S	65.8038 W	3400	P	P					
7	Chalvirí	Potosi	T.Frias	TML	7817627	208341	19.7154 S	65.7824 W	4515	TP	P	T				
8	Chaqui	Potosi	C. Saavedra	PMY	7832645	230801	19.5830 S	65.5661 W	3550	TP	P	T	%H	V		
9	Chaquilla (represa)	Potosi	Quijarro	TML	7805589	214213	19.8283 S	65.7297 W	3760	P	P					
10	Chaquilla	Potosi	Quijarro	TML	7801669	170890	19.8534 S	66.1421 W	4138	P	P					
11	Charaja	Potosi	Sud Chichas	SJO	7611576	231937	21.5787 S	65.5888 W	3420	P	P					
12	Chico Chico	Potosi	C.Saavedra	PMY	7822601	237004	19.6745 S	65.5084 W	3480	CO	P	T	%H	V		Ev
13	Chinoli	Potosi	C. Saavedra	PMY	7825972	252570	19.6461 S	65.3596 W	3450	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
14	Colaví	Potosi	C. Saavedra	PMY	7862094	233313	19.3174 S	65.5380 W	3630	P	P					
15	Cotagaita	Potosi	N-Chichas	COT	7696159	223939	20.8141 S	65.6523 W	2690	TP	P	T		V		
16	Cucho Ingenio	Potosi	Linares	TML	7798004	217932	19.8776 S	65.6937 W	3700	P	P					
17	Escara	Potosi	N-Chichas	TML	7714050	222768	20.6524 S	65.6607 W	2870	CO	P	T	%H	V		
18	Killpani	Potosi	Quijarro	YUR	7809959	149599	19.7750 S	66.3435 W	4000	P	P					
19	Lago Toro	Potosi	Quijarro	YUR	7819457	140382	19.6876 S	66.4296 W	4100	P	P					
20	Landara	Potosi	Quijarro	YUR	7795754	152500	19.9036 S	66.3186 W	3850	P	P					
21	Maragua (Chayanta)	Potosi	Chayanta	PMY	7902034	207421	18.9533 S	65.7782 W	3650	P	P					
22	Mochara	Potosi	Sud Chichas	SJO	7646332	231035	21.2649 S	65.5919 W	3240	P	P					
23	Mojo	Potosi	M. Omiste	SJO	7584330	236080	21.8252 S	65.5531 W	3460	CO	P	T	%H	V		
24	Mosoj Llajta	Potosi	Nor Chichas	TML	7696792	250811	20.8121 S	65.3942 W	2800	CO	P	T	%H	V		
25	Oploca	Potosi	S-Chichas	TUP	7638321	209209	21.3338 S	65.8034 W	3121	CO	P	T	%H	V		
26	Palca Higueras	Potosi	N-Cinti	TML	7721128	256229	20.5931 S	65.3388 W	2550	TP	P	T	%H	V		
27	Potosi Aasana	Potosi	T. Frias	PMY	7837731	213317	19.5346 S	65.7319 W	4100	CP	P	T	%H	V		
28	Potosi Senamhi	Potosi	T. Frias	PMY	7831898	211311	19.5870 S	65.7519 W	3860	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
29	Puna (Villa Talavera)	Potosi	Linares	PMY	7809530	236846	19.7925 S	65.5118 W	3290	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
30	Ramadas	Potosi	N-Chichas	TML	7666404	226428	21.0830 S	65.6331 W	3220	P	P					
31	Ravelo	Potosi	Chayanta	RAV	7919726	235765	18.7974 S	65.5069 W	3200	TP	P	T				
32	Salinas de Yocalla	Potosi	T. Frias	PMY	7854208	182703	19.3813 S	66.0206 W	3510	P	P					
33	Salto Leon	Potosi	Quijarro	TML	7774222	186083	20.1036 S	66.0019 W	3200	TP	P	T		V*		
34	Samasa	Potosi	T. Frias	PMY	7843414	220358	19.4843 S	65.6640 W	3650	CO	P	T	%H	V		
35	San Antonio Esmor.	Potosi	Sud Lipez	SJO	7569412	136417	21.9420 S	66.5193 W	3690	P	P					
36	San Jose Pampa G.	Potosi	S-Chichas	SJO	7599168	208345	21.6870 S	65.8186 W	3000	TP	P	T	%H	V		
37	Santa Lucia	Potosi	T.Frias	PMY	7835708	199457	19.5508 S	65.8641 W	3509	P	P					
38	Tacobamba	Potosi	C. Saavedra	PMY	7875446	231811	19.1967 S	65.5505 W	3080	P	P					
39	Talacocha	Potosi	Linares	PMY	7814152	227550	19.7495 S	65.5998 W	4450	P	P					
40	Talina	Potosi	S-Chichas	SJO	7582159	207755	21.7501 S	65.8255 W	3200	P	P					
41	Tarapaya	Potosi	T. Frias	PMY	7844606	206803	19.4716 S	65.7928 W	3340	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
42	Thola Palca	Potosi	T. Frias	PMY	7882350	141646	19.1205 S	66.4057 W	4300	P	P					
43	Tica Tica	Potosi	Quijarro	TML	7769448	153540	20.1411 S	66.3136 W	3890	P	P					
44	Tinguipaya	Potosi	T. Frias	PMY	7872011	203272	19.2237 S	65.8222 W	3200	TP	P	T		V		
45	Tomave	Potosi	Quijarro	TML	7775158	126766	20.0846 S	66.5682 W	3920	TP	P	T	%H	V		
46	Turnusla	Potosi	N-Chichas	TML	7732641	227196	20.4852 S	65.6154 W	2580	TP	P	T	%H	V		
47	Tupiza	Potosi	S-Chichas	TUP	7626642	218226	21.4406 S	65.7185 W	2952	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
48	Turuchipa	Potosi	Linares	PMY	7807421	296348	19.8186 S	64.9444 W	2360	TP	P	T		V		
49	Villazón	Potosi	M. Omiste	SJO	7555254	231528	22.0870 S	65.6019 W	3443	TP	P	T		V		
50	Vitichi	Potosi	N-Chichas	TML	7763871	238905	20.2050 S	65.4986 W	3020	TP	P	T	%H	V		
51	Yocalla	Potosi	T. Frias	PMY	7853616	194509	19.3884 S	65.9084 W	3420	TP	P	T		V		
52	Yura	Potosi	Quijarro	YUR	7777733	173305	20.0698 S	66.1233 W	3375	TP	P	T	%H	V		
53	Cruce Ventilla	Oruro	Avaroa	PMY	7888766	162019	19.0661 S	66.2112 W	3675	P	P					
54	Arpeja Alta (Incahuasi)	Chuq.	N-Cinti	PLY	7712563	297022	20.6753 S	64.9486 W	3190	TP	P	T	%H	V		
55	Cachimayu	Chuq.	Oropeza	RAV	7881303	258864	19.1472 S	65.2926 W	2400	TP	P	T	%H	V		
56	Camargo	Chuq.	N-Cinti	TML	7716609	270459	20.6357 S	65.2029 W	2440	TP	P	T	%H	V		
57	Chilcar (Cinti)	Chuq.	S-Cinti	PLY	7674207	298150	21.0218 S	64.9422 W	2242	TP	P	T		V		Ev
58	Culpina	Chuq.	S-Cinti	PLY	7696644	297719	20.8192 S	64.9437 W	3150	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev

Nº	Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Precip	Temp M/A	% HRM	Viento	Hr. Sol	Evap
					NORTH	EAST										
59	El Palmar	Chuq.	Sud Cinti	PMY	7696819	364138	20.8236 S	64.3056 W	1190	P	P					
60	Icía	Chuq.	Oropeza	PMY	7857734	312106	19.3657 S	64.7889 W	2252	P	P					
61	La Mendoza	Chuq.	Yamparaez	PMY	7859596	294330	19.3471 S	64.9579 W	2080	P	P					
62	La Torre	Chuq.	N-Cinti	SJO	7654294	261962	21.1973 S	65.2930 W	2420	CP	P	T	%H	V	Hr.	
63	Las Carreras	Chuq.	S-Cinti	SJO	7653109	270720	21.2091 S	65.2088 W	2360	P	P					
64	Machareti	Chuq.	L. Calvo	PMY	7698534	463265	20.8128 S	63.3530 W	660	TP	P	T	%H	V		
65	Muyquiri	Chuq.	N-Cinti	TML	7732747	275894	20.4907 S	65.1488 W	3120	P	P					
66	Ñacamiri	Chuq.	L. Calvo	PMY	7707511	393126	20.7289 S	64.0265 W	860	P	P					
67	Ñujchu	Chuq.	Oropeza	RAV	7875098	260514	19.2034 S	65.2777 W	2398	TP	P	T		V		
68	Paica Grande	Chuq.	N-Cinti	TML	7704841	266817	20.7416 S	65.2394 W	2342	P	P					
69	Palemo	Chuq.	L. Calvo	PMY	7682486	477481	20.9580 S	63.2166 W	385	P	P					
70	Pirhuani	Chuq.	N-Cinti	PMY	7769031	327845	20.1684 S	64.6473 W	2100	P	P					
71	Puente Sucre	Chuq.	Oropeza	PMY	7859281	271774	19.3476 S	65.1726 W	2222	P	P					
72	Quila Quila	Chuq.	Oropeza	PMY	7884977	250265	19.1130 S	65.3739 W	2526	P	P					
73	Rosario del Ingre	Chuq.	H. Siles	PMY	7723675	407377	20.5837 S	63.8887 W	820	P	P					
74	San Lucas	Chuq.	N-Cinti	PMY	7776333	276479	20.0972 S	65.1377 W	3000	TP	P	T	%H	V		
75	San Pedro	Chuq.	N-Cinti	TML	7752588	320802	20.3163 S	64.7163 W	2200	P	P					
76	San Roque	Chuq.	N-Cinti	TML	7773286	341771	20.1312 S	64.5138 W	2550	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
77	Sucre Assana	Chuq.	Oropeza	PMY	7896894	257131	19.0062 S	65.3071 W	2903	S	P	T	%H	V	Hr.	Ev
78	Sucre Senamhi	Chuq.	Oropeza	PMY	7895384	261220	19.0203 S	65.2685 W	2890	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
79	Talula / Taco	Chuq.	Oropeza	PMY	7884033	243337	19.1240 S	65.4413 W	2700	TP	P	T	%H	V		Ev
80	Tarabuco	Chuq.	Yamparaez	PMY	7878243	298411	19.1791 S	64.9171 W	3284	TP	P	T	%H	V		
81	Tiguipa	Chuq.	L. Calvo	PMY	7687632	460139	20.9112 S	63.3833 W	550	P	P					
82	Tulma	Chuq.	Oropeza	PMY	7902397	251829	18.9559 S	65.3568 W	2580	P	P					
83	Villa Abecia	Chuq.	S-Cinti	TML	7679535	267935	20.9702 S	65.2321 W	2200	P	P					
84	Villa Carmen / Yotala	Chuq.	Oropeza	PMY	7880512	261041	19.1546 S	65.2720 W	2511	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
85	Viña Quemada	Chuq.	Yamparaez	PMY	7852539	305263	19.4120 S	64.8546 W	2030	P	P					
86	Yamparaez	Chuq.	Yamparaez	PMY	7877384	275929	19.1845 S	65.1309 W	3100	P	P					
87	Aguaraycito	Tarija	G-Chaco	PMY	7634618	457293	21.3901 S	63.4120 W	400	CO	P	T				
88	Aguayrenda	Tarija	G-Chaco	PMY	7582868	434271	21.8570 S	63.6361 W	1060	P	P					
89	Algarobillas	Tarija	G-Chaco	PMY	7585823	470097	21.8313 S	63.2894 W	480	P	P					
90	Alto de Cajas	Tarija	Mendez	PLY	7643652	347731	21.3026 S	64.4680 W	2980	P	P					
91	Bagual	Tarija	G-Chaco	PMY	7584688	460596	21.8413 S	63.3813 W	490	P	P					
92	Barro Blanco	Tarija	G.Chaco	PMY	7581355	488292	21.8718 S	63.1133 W	382	P	P					
93	Berety	Tarija	O'Connor	PMY	7628714	392525	21.4408 S	64.0372 W	1170	P	P					
94	Caigua	Tarija	G.Chaco	PMY	7659318	455427	21.1669 S	63.4294 W	490	P	P					
95	Campanario	Tarija	Mendez	SJO	7606836	294898	21.6332 S	64.9831 W	3400	P	P					
96	Canto del Monte	Tarija	G.Chaco	PMY	7585327	494136	21.8360 S	63.0567 W	330	P	P					
97	Crevaux	Tarija	G.Chaco	PMY	7587119	508739	21.8198 S	62.9154 W	302	CP	P	T	%H			
98	El Molino(Tomayapo)	Tarija	Mendez	SJO	7646934	287833	21.2670 S	65.0448 W	3200	P	P					
99	El Puente	Tarija	Mendez	SJO	7650629	271190	21.2316 S	65.2046 W	2345	TP	P	T	%H	V		
100	El Veinticuatro	Tarija	G.Chaco	PMY	7644571	496117	21.3007 S	63.0374 W	500	P	P					
101	Esmeralda	Tarija	G-Chaco	PMY	7541054	535143	22.2356 S	62.6590 W	260	P	P					
102	El Huayco	Tarija	O'Connor	PMY	7642303	370326	21.3166 S	64.2503 W	1515	P	P					
103	Ibibobo PMA	Tarija	G-Chaco	PMY	7618484	500548	21.5364 S	62.9947 W	364	TP	P	T	%H			
104	La Vertiente	Tarija	G-Chaco	PMY	7639629	470398	21.3451 S	63.2855 W	348	CP	P	T	%H			
105	Leon Cancha	Tarija	Mendez	PLY	7657504	322089	21.1752 S	64.7137 W	2600	P	P					
106	Ñoquera	Tarija	Avilez	SJO	7607405	279467	21.6229 S	65.1306 W	3300	P	P					
107	Palmar Chico	Tarija	G-Chaco	PMY	7581533	437150	21.8691 S	63.6083 W	614	P	P					
108	Palmar Grande	Tarija	G-Chaco	PMY	7619628	454188	21.5255 S	63.4424 W	467	TP	P	T	%H	Hr.	Ev	
109	Palo Marcado	Tarija	G.Chaco	PMY	7628744	487803	21.4437 S	63.1177 W	382	P	P					
110	Palos Blancos	Tarija	G-Chaco	PMY	7632071	419115	21.4118 S	63.7804 W	720	P	P					
111	Puesto Margarita	Tarija	G-Chaco	PMY	7656148	417052	21.1942 S	63.7991 W	485	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
112	Sachapera	Tarija	G-Chaco	PMY	7604983	443312	21.6575 S	63.5479 W	610	P	P					
113	Saladito Norte	Tarija	O'Connor	PMY	7645966	385455	21.2845 S	64.1042 W	840	P	P					
114	Sama Iscayachi	Tarija	Mendez	SJO	7623019	296045	21.4838 S	64.9886 W	3440	P	P					
115	San Antonio (Iscaj)	Tarija	Mendez	SJO	7627985	296426	21.4390 S	64.9643 W	3440	TP	P	T		V		Ev
116	San Bernardo	Tarija	G.Chaco	PMY	7632730	477206	21.4076 S	63.2199 W	400	P	P					
117	San Josesito	Tarija	O'Connor	PLY	7680698	373780	21.1506 S	64.2156 W	850	P	P					
118	Timboy	Tarija	O'Connor	PMY	7658341	389516	21.1730 S	64.0643 W	760	P	P					

N°	Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Precip M	Temp M	%HRM	Viento	Hr. Sol	Evap
					NORTH	EAST										
119	Tojo	Tarija	Avilés	SJO	7565913	259409	21.8143 S	65.3273 W	2700	P	P					
120	Tuscal P.M.A.	Tarija	G.Chaco	PMY	7544397	534202	22.2054 S	62.6682 W	266	P	P					
121	Villa Montes Assana	Tarija	G.Chaco	PMY	7649393	449112	21.2565 S	63.4905 W	500	S	P	T	%H	V		
122	Villa Montes Senarri	Tarija	G.Chaco	PMY	7647502	451034	21.2769 S	63.4735 W	340	CO	P	T	%H	V		Ev
Estaciones de Apoyo fuera de los límites de la cuenca en estudio																
123	Alota	Potosí	Badivieso	SUY	7618421	23179	21.4736 S	67.5680 W	3609	P	P					
124	Ayoma	Potosí	Chayanta	GRA	7911000	166110	18.8664 S	66.1466 W	3472	P	P					
125	Calcha de Lipéz	Potosí	Nor Lipéz	SUY	7666752	25043	21.0208 S	67.5670 W	3670	TP	P	T		V		
126	Cocher' K'	Potosí	Nor Lipéz	SUY	7699860	13683	20.7367 S	67.6682 W	3780	CO	P	T	%H	V		
127	Colquechaca	Potosí	Chayanta	GRA	7930512	182666	18.6926 S	66.0061 W	4170	CO	P	T	%H	V		
128	Júlica	Potosí	Nor Lipéz	SUY	7676803	34119	20.9494 S	67.4778 W	3665	CO	P	T	%H	V		
129	Laguna Colorada	Potosí	Chayanta	GRA	7535255	15045	22.2203 S	67.7017 W	4278	CO	P	T	%H	V		
130	Maccha	Potosí	Chayanta	GRA	7916321	180111	18.8203 S	66.0350 W	3480	TP	P	T	%H	V		
131	Ouri	Potosí	Chayanta	GRA	7914523	206366	18.8404 S	66.7864 W	3980	TP	P	T				
132	Pocoata	Potosí	Chayanta	GRA	7930277	166328	18.6922 S	66.1632 W	3360	P	P					
133	Queñena Chico	Potosí	Sud Lipéz	SUY	7543731	50987	22.1536 S	67.3517 W	4200	P	P					
134	Río Mujatos	Potosí	Ujijarro	DPC	7818100	104254	19.6930 S	66.7738 W	3815	CO	P	T	%H	V		
135	San Agustín	Potosí	Badivieso	SUY	7660778	5922	21.1776 S	67.7566 W	3675	TP	P	T				
136	San Antonio de Lipéz	Potosí	Sud Lipéz	SUY	7576534	99005	21.8697 S	66.8791 W	4500	P	P					
137	San Pedro de B. Vista	Potosí	Charcas	GRA	7979009	185086	18.2643 S	65.9781 W	2743	CO	P	T	%H	V	Hr.	
138	San Pablo de Lipéz	Potosí	Sud Lipéz	SUY	7597448	125516	21.6670 S	66.6183 W	4230	TP	P	T				
139	Toro Toro	Potosí	Charcas	GRA	7992080	207778	18.1404 S	65.7617 W	2700	TP	P	T				
140	Unala	Potosí	Bustillos	GRA	7954223	123120	18.4688 S	66.5978 W	3600	TP	P	T	%H	V		Ev
141	Uyuni	Potosí	Ujijarro	SUY	7733674	101514	20.4536 S	66.8183 W	3695	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
142	Zonguera	Potosí	Nor Lipéz	SUY	7579998	51895	21.8271 S	67.3330 W	4073	P	P					
143	Alamos	Chuq.	Oropeza	GRA	7911959	263324	18.8697 S	65.3414 W	2600	P	P					
144	Azurduy	Chuq.	Azurduy	ITZ	7776818	352506	20.1019 S	64.4108 W	2600	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
145	Buena Vista	Chuq.	Oropeza	GRA	7949203	335660	18.5414 S	64.5571 W	2580	P	P					
146	Carandabí	Chuq.	L. Calvo	PMY	7705177	492258	20.7531 S	63.0744 W	1575	P	P					
147	Cumandayí	Chuq.	L. Calvo	GRA	7650607	412361	19.4370 S	63.8349 W	1020	P	P					
148	Chuqi Chuqi	Chuq.	Oropeza	GRA	7918684	276724	18.8281 S	65.1188 W	1775	P	P					
149	El Rodeo	Chuq.	Zudañez	GRA	7892476	332386	19.0536 S	64.5929 W	2000	P	P					
150	El Salvador	Chuq.	L. Calvo	PMY	7720130	481731	20.6179 S	63.1753 W	670	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
151	El Villar	Chuq.	Torrina	ITZ	7829274	363418	19.6270 S	64.3026 W	2080	P	P					
152	La Galería	Chuq.	H.Siles	ITZ	7748325	395743	20.3604 S	63.9689 W	1148	P	P					
153	La Macdonia	Chuq.	Oropeza	GRA	7893500	284930	19.0378 S	65.2335 W	2840	TP	P	T	%H	V		
154	La Palma	Chuq.	Oropeza	GRA	7902962	273321	18.9632 S	65.1527 W	1982	P	P					
155	Lamboyo	Chuq.	Yamparaz	GRA	7890219	308810	19.0720 S	64.8171 W	2560	P	P					
156	Monteagudo	Chuq.	H. Siles	ITZ	7810685	400607	19.7972 S	63.9489 W	1230	CP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
157	Muyupampa (Iboperend)	Chuq.	Luis Calvo	ITZ	7800685	421179	19.8866 S	63.7530 W	1130	TP	P	T				
158	Nuevo Mundo	Chuq.	B. Boeto	GRA	7900119	364748	18.9670 S	64.2849 W	2220	P	P					
159	Pedilla	Chuq.	Torrina	GRA	7865060	363254	19.3037 S	64.3015 W	2102	TP	P	T				
160	Pojota	Chuq.	Zudañez	GRA	7900638	287044	18.9757 S	65.0227 W	2300	P	P					
161	Pojpo	Chuq.	Oropeza	GRA	7920721	254948	18.7908 S	65.3249 W	2400	P	P					
162	Poroma	Chuq.	Oropeza	GRA	7948794	244018	18.5360 S	65.4249 W	2300	P	P					
163	Presio	Chuq.	Zudañez	GRA	7906649	266587	18.9224 S	64.9515 W	2460	P	P					
164	Pte. Pacheco (Río Azar)	Chuq.	H.Siles	GRA	7831259	366217	19.6105 S	64.0850 W	1035	P	P					
165	Redención Pampa	Chuq.	Zudañez	GRA	7917513	328339	18.8272 S	64.6196 W	2460	TP	P	T	%H	V		
166	Sopachuy	Chuq.	Torrina	ITZ	7845569	342523	19.4782 S	64.5004 W	2100	P	P					
167	Taponillas	Chuq.	Luis Calvo	ITZ	7817399	410777	18.7370 S	63.8515 W	1120	P	P					
168	Tarvita	Chuq.	Azurduy	ITZ	7796159	345888	19.9249 S	64.4725 W	2420	TP	P	T	%H	V		
169	Urriolagota	Chuq.	B.Boeto	GRA	7879655	368402	19.1703 S	64.2515 W	1980	P	P					
170	Villa Alcázar	Chuq.	Torrina	GRA	7858344	354061	19.3637 S	64.3865 W	2080	P	P					
171	Villa Serrano	Chuq.	Oropeza	GRA	7885291	360850	19.1207 S	64.3230 W	2160	TP	P	T	%H	V		
172	Zudañez	Chuq.	Zudañez	GRA	7886012	320392	19.1110 S	64.7074 W	2510	TP	P	T	%H	V		Ev
173	Aquila	Cocha	Carrero	GRA	7966712	269474	18.1984 S	65.1786 W	2250	CO	P	T	%H	V		
174	La Vifa	Cocha	E.Arae	GRA	8010780	197970	17.9703 S	65.8516 W	2025	P	P					
175	Mizque (Maira)	Cocha	Mizque	GRA	8015212	250911	17.9370 S	65.3516 W	2035	TP	P	T				
176	Molinos Río Caine	Cocha	Mizque	GRA	7979703	247417	18.2572 S	65.3888 W	1800	TP	P	T				
177	Puente Ace	Cocha	Carrero	GRA	7947999	271251	18.5463 S	65.1672 W	1550	TP	P	T				

Nº	Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Precip	Temp M/A	% HRM	Viento	Hr. Sol	Evap
					NORTH	EAST										
178	Pte Taperas (Río Mizqui)	Cocha	Campero	GRA	7996596	313321	18.1114 S	64.7643 W	1400	TP	P					
179	Quirina	Cocha	E.Aroe	GRA	8018915	187967	17.8955 S	65.9447 W	2700	P	P					
180	Quiroga	Cocha	Campero	GRA	7961685	265868	18.4221 S	65.2166 W	1880	P	P					
181	Villa grandao	Cocha	Campero	GRA	7985533	284682	18.2119 S	65.0375 W	2200	P	P					
182	Boyube	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7738955	471951	20.4477 S	63.2689 W	800	P	P					
183	Carniri Aasana	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7783426	441013	20.0485 S	63.5655 W	810	S	P	T	%H	V		
184	Charagua	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7812503	478823	19.7831 S	63.2022 W	735	P	P					
185	Choreti	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7787969	445870	20.0042 S	63.5175 W	878	P	P					
186	Gutierrez	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7852543	444128	19.4206 S	63.5322 W	925	P	P					
187	Itaguazurenda	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7811386	490882	19.7933 S	63.0871 W	690	P	P					
188	Masicuri	Sta Cruz	Vallegrande	GRA	7900465	426159	18.9870 S	63.7015 W	400	P	P					
189	Pucara	Sta Cruz	Vallegrande	GRA	7931011	375220	18.7085 S	64.1835 W	2540	P	P					
190	San Antonio	Sta Cruz	Cordillera	ITZ	7789650	481622	19.9897 S	63.1757 W	600	CO	P	T				
191	Pazña	Oruro	Poopo	DPC	7939234	86113	18.5971 S	66.9206 W	3740	CO	P	T				Ev
192	Alizos	Tarija	Avilez	BER	7585359	307007	21.8251 S	64.8672 W	2040	P	P					
193	Angostura	Tarija	Avilez	BER	7598247	334702	21.7116 S	64.5980 W	1680	TP	P	T	%H	V		
194	Calamuchita	Tarija	Avilez	BER	7600035	332206	21.6952 S	64.6220 W	1680	TP	P	T	%H			
195	Calderilla	Tarija	Avilez	BER	7590229	306790	21.7811 S	64.8687 W	3950	P	P					
196	Canasmoro	Tarija	Mendez	BER	7639061	317692	21.3413 S	64.7580 W	2080	CO	P	T	%H	V		Ev
197	Canchas Mayu	Tarija	Avilez	BER	7576622	303557	21.9036 S	64.9016 W	1120	P	P					
198	Cañas	Tarija	Aroe	BER	7577680	309198	21.8947 S	64.8469 W	2030	CO	P	T		V		Ev
199	Capiroenda	Tarija	G-Chaco	PMY	7668339	498418	21.0860 S	63.0152 W	701	P	P					
200	Carapari	Tarija	G-Chaco	PMY	7586754	424081	21.8215 S	63.7346 W	830	P	P					
201	Carossi	Tarija	G.Chaco	PMY	7580507	542411	21.8790 S	62.5895 W	286	P	P					
202	Colon Sud	Tarija	Avilez	BER	7592740	328434	21.7607 S	64.6592 W	2000	P	P					
203	Copacabana	Tarija	Avilez	TAX	7584872	284060	21.8269 S	65.0892 W	3200	P	P					
204	Chocloca	Tarija	Avilez	BER	7594155	320758	21.7471 S	64.7332 W	1800	TP	P	T	%H	V		Ev
205	El Azucar	Tarija	G.Chaco	PMY	7599890	521703	21.7043 S	62.7902 W	286	P	P					
206	Entre Ríos	Tarija	O'Connor	BER	7619914	378034	21.5193 S	64.1776 W	1230	CO	P	T	%H	V	Hr.	Ev
207	Est. La Esperanza	Tarija	G.Chaco	PMY	7603200	532293	21.6742 S	62.6879 W	285	P	P					
208	Gamoneda	Tarija	Cercado	BER	7621590	333959	21.5007 S	64.6029 W	2150	P	P					
209	Itau	Tarija	Gran chaco	BER	7600621	409119	21.6955 S	63.8786 W	950	TP	P	T				
210	Junacas	Tarija	Cercado	BER	7629462	348903	21.4309 S	64.4580 W	2300	P	P					
211	Juntas	Tarija	Avilez	BER	7587546	314281	21.8062 S	64.7966 W	1900	TP	P	T	%H			
212	Los Galpones	Tarija	G.Chaco	PMY	7672421	530513	21.0488 S	62.7063 W	365	CO	P	T				
213	Los Mistoles	Tarija	G.Chaco	PMY	7664216	522820	21.1231 S	62.7803 W	378	P	P					
214	Ladera Centro	Tarija	Cercado	BER	7604276	338991	21.6575 S	64.5560 W	2080	P	P					
215	Narvaez	Tarija	O'Connor	BER	7632553	367486	21.4044 S	64.2784 W	1800	P	P					
216	Padcaya	Tarija	Aroe	BER	7578945	323148	21.8848 S	64.7118 W	2010	TP	P	T	%H	V		
217	Pampa Redonda	Tarija	Cercado	BER	7599708	311648	21.6961 S	64.8207 W	1950	P	P					
218	Pasajes	Tarija	Avilez	TAX	7593959	284413	21.7449 S	65.0846 W	3660	P	P					
219	Pinos Sud	Tarija	Cercado	BER	7598337	306033	21.7304 S	64.8754 W	2100	P	P					
220	Pozo el Tigre P.M.A.	Tarija	G.Chaco	PMY	7607270	550195	21.6404 S	62.5164 W	289	P	P					
221	Rejera	Tarija	Aroe	BER	7566281	295169	21.9961 S	64.9841 W	3000	P	P					
222	Rincon Cañas	Tarija	Aroe	BER	7569367	304867	21.9693 S	64.8898 W	2280	P	P					
223	Rincon Victoria	Tarija	Mendez	BER	7617675	310591	21.5337 S	64.8288 W	2200	P	P					
224	Salinas	Tarija	O'Connor	BER	7590293	372482	21.7865 S	64.2335 W	1060	TP	P	T				
225	Sama Cumbre	Tarija	Mendez	BER	7623915	311617	21.4775 S	64.8182 W	3820	P	P					
226	San Agustín	Tarija	Cercado	BER	7619011	343429	21.5248 S	64.5117 W	2210	P	P					
227	San Andres	Tarija	Cercado	BER	7607810	311864	21.6229 S	64.8177 W	1900	TP	P	T	%H			Ev
228	San Jacinto	Tarija	Cercado	BER	7610061	322133	21.6036 S	64.7183 W	1850	TP	P	T	%H	V		Ev
229	San Lorenzo	Tarija	Mendez	BER	7630912	318690	21.4150 S	64.7492 W	1900	P	P					
230	San Mateo	Tarija	Cercado	BER	7624554	319138	21.4725 S	64.7456 W	1900	P	P					
231	San Pedro de Buena Vis	Tarija	Cercado	BER	7628674	327145	21.4360 S	64.6679 W	2200	P	P					
232	Tarija Aasana	Tarija	Cercado	BER	7615846	323441	21.5515 S	64.7050 W	1855	S	P	T	%H	V		Ev
233	Tarija Senamhi	Tarija	Cercado	BER	7616467	323027	21.5459 S	64.7089 W	1860	TP	P	T	%H	V	Hr.	Ev
234	Tolomosa (Grande)	Tarija	Cercado	BER	7607693	316256	21.6244 S	64.7753 W	1900	P	P					
235	Tomatas Grandes	Tarija	Mendez	BER	7642884	313628	21.3065 S	64.7967 W	2150	P	P					
236	Tucumillas	Tarija	Mendez	BER	7626198	308581	21.4565 S	64.8473 W	2583	P	P					

N°	Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Precip	Temp M A	% HRM	Viento	Hr. Sol	Evap
					NORTH	EAST										
237	Yacuiba	Tarija	G-Chaco	PMY	7565807	430156	22.0109 S	63.6767 W	644	S	P	T	%H	V		
238	Yesera Norte	Tarija	Cercado	BER	7636074	339134	21.3703 S	64.5516 W	2200	CO	P	T	%H			
239	Abra Pampa	ARG-J	Jujuy	RIN	7485692	222803	22.7167 S	65.7000 W	3484	P	P					
240	Cieneguillas	ARG-J	Jujuy	RIN	7551814	202683	22.1167 S	65.8833 W	3682	P	P					
241	Condor	ARG-J	Jujuy	SJO	7523225	258191	22.3833 S	65.3500 W	3850	P	P					
242	La Quiaca	ARG-J	Jujuy	SJO	7552341	231930	22.1167 S	65.6000 W	3442	P	P					
243	Santa Catalina	ARG-J	Jujuy	RIN	7569911	183385	21.9500 S	66.0667 W	3802	P	P					
244	Rinconada	ARG-J	Jujuy	RIN	7516177	175884	22.4333 S	66.1500 W	3950	P	P					
245	Yavi	ARG-J	Jujuy	SJO	7554416	245661	22.1000 S	65.4667 W	3500	P	P					
300	Millares	Potosí	C. Saavedra	PMY	7851212	271000	19.4201 S	65.1808 W	2300	TP	P	T		V		
301	Otavi	Potosí	Linares	TML	7781454	256021	20.0482 S	65.3325 W	3380	TP	P	T		V		
302	Mojo Torillo	Potosí	C. Saavedra	PMY	7834756	247044	19.5658 S	65.4110 W	3360	CO	P	T	%H	V		
303	Alcantari	Chuq.	Yamparez	PMY	7871812	274874	19.2345 S	65.1415 W	3100	TP	P	T		V		Ev
304	Escana	Chuq.	Yamparez	PMY	7869587	282211	19.2554 S	65.0720 W	2630	TP	P	T	%H	V		Ev

## Referencias:

BER	Río Bermejo	ITZ	Río Itenez	RAV	Río Ravelo	TAX	Lago Taxara
CBY	Río Camblaya	LMY	Río Lique Mayu	RIN	Laguna Rinconada	TML	Río Tumusla
COT	Río Cotagaita	PLY	Río Pilaya	SJO	Río San Juan Del Oro	TOM	Río Tomayapo
GRA	Río Grande	PMY	Río Pilcomayo	SUY	Salar de Uyuni	TUP	Río Tupiza
DPC	Río Desaguadero, lago Poopo, Salar de Coipasa	TAR	Río Tarapaya	YUR	Río Yura		

Fuente: Elaboración propia, con datos SENAMHI

La tabla 3.3 muestra las estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo, su ubicación política, subcuenca a la que pertenecen, coordenadas geográficas, cota altitudinal, y variables de medición. Se hace notar que las estaciones de la tabla que cuentan solamente con lecturas limnimétricas (cotas), no pudieron ser procesadas para obtener las series de caudal. Sin embargo la información limnimétrica de esas estaciones es útil en la etapa de generación de caudales mediante el modelo. Una descripción completa de las estaciones hidrométricas y su tratamiento se encuentra en el informe respectivo (Aguilar, Malbrunot y Vauchel, 2005).

Tabla 3.3: Estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo

Estación	Dpto.	Prov.	Cuenca del río	PSAD 56 UTM 20 S		Latitud Sur	Longitud Oeste	Cota [msnm]	TIPO	Lectura Afijos	Lectura Cotas	Curva Calibración
				NORTH	EAST							
LA ANGOSTURA	Potosí	Sud Chichas	TUP	7619632	220345	21.5076 S	65.7008 S	2890	HDM	LA	LC	C.C.
CHARAJA	Potosí	Sud Chichas	SJO	7610527	232862	21.5917 S	65.5815 S	3420	HDM	—	LC	—
CHILCARA	Chuq.	Sud Cinti	CBY	7673894	298501	21.0281 S	64.9404 S	3242	HDM	LA	LC	C.C.
COTAGAITA	Potosí	Nor Chichas	COT	7695733	223878	20.8213 S	65.6544 S	2664	HDM	—	LC	—
EL MOLINO	Tarija	Mendez	TOM	7635805	296839	21.3719 S	64.9609 S	3200	HDM	LA	LC	C.C.
EL PUENTE	Tarija	Mendez	SJO	7651142	270923	21.2303 S	65.2086 S	2248	HDM	LA	LC	C.C.
MUYUQUIRI	Chuq.	Nor Cinti	LMY	7731349	276166	20.5067 S	65.1478 S	3120	HDM	LA	LC	C.C.
NUJCHU	Chuq.	Oropeza	RAV	7874489	260301	19.2123 S	65.2813 S	2398	HDM	LA	LC	C.C.
PALCA GRANDE	Chuq.	Nor Cinti	TML	7705000	266782	20.7435 S	65.2412 S	2356	HDM	LA	LC	C.C.
PALCA HIGUERAS	Potosí	Nor Chichas	TML	7711046	246871	20.6863 S	65.4315 S	2440	HDM	—	LC	—
PAMPA GRANDE	Tarija	Mendez	PLY	7668310	340091	21.0826 S	64.5408 S	1000	HDM	LA	LC	C.C.
PUENTE SUCRE	Chuq.	Oropeza	PMY	7858753	271816	19.3557 S	65.1737 S	2222	HDM	LA	LC	C.C.
SALTO LEON	Potosí	Quijano	YUR	7774283	186321	20.1065 S	66.0011 S	3658	HDM	LA	LC	C.C.
SAN JOSECITO	Tarija	O'Connor	PLY	7661842	373648	21.1437 S	64.2183 S	1821	HDM	LA	LC	C.C.
SAN PEDRO	Chuq.	Nor Cinti	CAM	7706147	268013	20.7333 S	65.2293 S	2338	HDM	LA	LC	C.C.
TALULA	Chuq.	Oropeza	PMY	7882892	243793	19.1344 S	65.4371 S	2607	HDM	LA	LC	C.C.
TARAPAYA	Potosí	Tomas Frías	TAR	7845402	207117	19.4679 S	65.7912 S	3341	HDM	—	LC	—
TUMUSLA	Potosí	Nor Chichas	TML	7732948	227281	20.4859 S	65.6180 S	2605	HDM	LA	LC	C.C.
TUPIZA	Potosí	Sud Chichas	TUP	7627271	218622	21.4384 S	65.7161 S	2977	HDM	LA	LC	C.C.
VILLAMONTES	Tarija	Gran Chaco	PMY	7649134	448046	21.2621 S	63.5023 S	392	HDM	LA	LC	C.C.
VINA QUEMADA	Chuq.	Zudañez	PMY	7853510	304806	19.4065 S	64.8603 S	2056	HDM	LA	LC	C.C.
YOCALLA	Potosí	Tomas Frías	PMY	7853303	193677	19.3945 S	65.9178 S	3350	HDM	—	LC	—
YURA	Potosí	Quijano	YUR	7778211	173740	20.0690 S	66.1206 S	3336	HDM	—	LC	—
MISIÓN LA PAZ	Arg-S	Salta	PMY	7513909	566983	22.4833 S	62.5604 S	230	HDM	—	LC	—

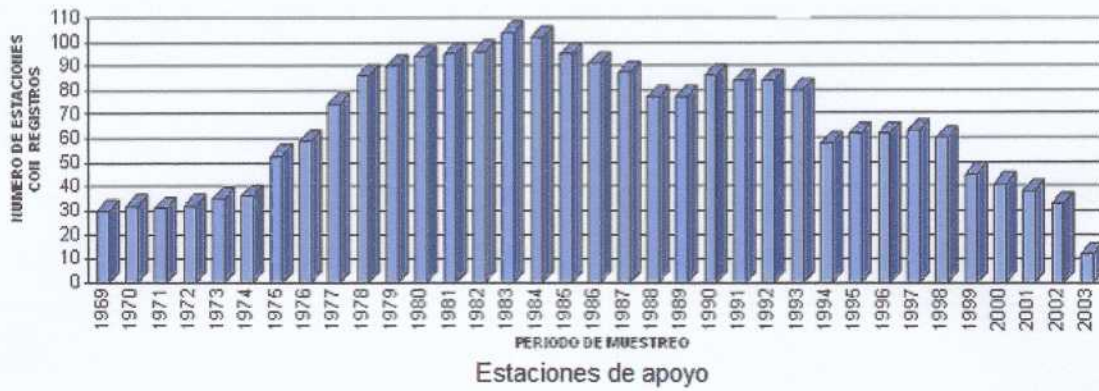
### 3.4 PERIODO CONSIDERADO PARA EL BALANCE HÍDRICO

Durante la primera fase del proyecto del Balance Hídrico Microregional de Bolivia, se definió que el periodo de análisis sería el comprendido entre los años 1970 y 2000, lo que tomó en cuenta la disponibilidad de datos en la red meteorológica del SENAMHI. La figura 3.5 muestra el número de estaciones pluviométricas en funcionamiento en la Cuenca Alta del río Pilcomayo entre 1969 y 2003. El gráfico superior muestra las estaciones situadas dentro de la cuenca y el inferior las estaciones de apoyo. En ambos casos se observa que se contó con el mayor número de estaciones meteorológicas durante el periodo comprendido entre 1977 y 1994. Después de 1994 la red meteorológica de SENAMHI sufrió un rápido deterioro. Todo lo anterior debe ser tomado en cuenta al analizar y utilizar los resultados del Balance hídrico de la cuenca.

**Figura 3.5: Número de estaciones pluviométricas en funcionamiento por año**



Estaciones dentro de la cuenca



Estaciones de apoyo

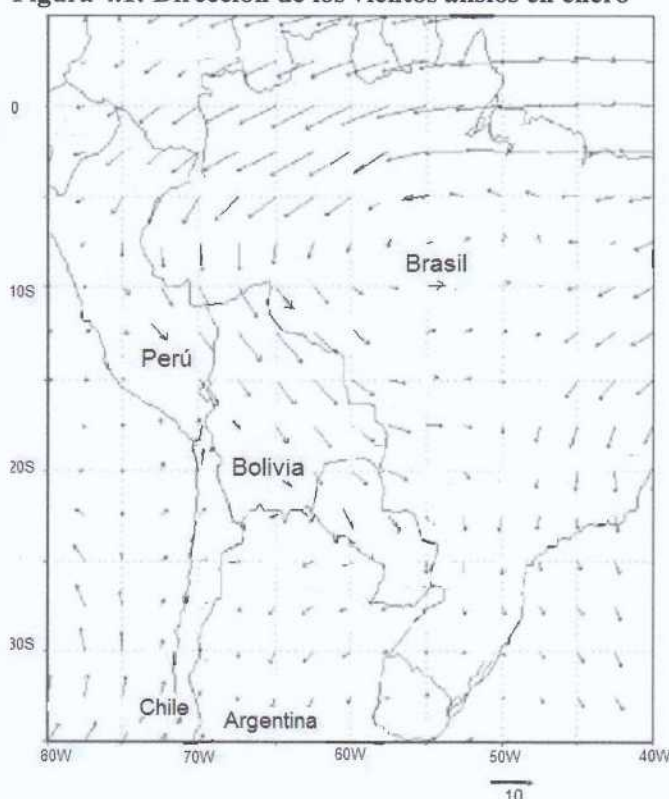
## Capítulo 4

### ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN REGIONAL

La precipitación es el parámetro de entrada al Balance Hídrico de cuenca. El régimen hidrológico está ante todo determinado por la variación en tiempo y espacio de la precipitación, que a su vez está fuertemente influenciada por la circulación atmosférica, tanto global como regional, que se describe brevemente a continuación.

**Figura 4.1: Dirección de los vientos alisios en enero**



El continente sudamericano se encuentra bajo la influencia de los sistemas de alta presión (anticiclones) del Atlántico, del Pacífico Sur y del Caribe. Entre los dos primeros se forma una zona de baja presión cerca del Ecuador, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que sigue el movimiento aparente del Sol. La diferencia de presiones combinada con la rotación de la tierra se combinan para producir los vientos alisios, que traen la mayor parte de la humedad y las lluvias desde el este (Amazonía y Atlántico). La cordillera de Los Andes actúa como una barrera y desvía los alisios de baja altitud (ver figura 4.1), por lo que las regiones situadas al oeste de la cadena montañosa, como el Altiplano y algunos valles interandinos (entre los que se cuenta la mayor parte de la cuenca del río Pilcomayo),

reciben mucha menos lluvia que la planicie amazónica y los valles nororientales.

La ZCIT se desplaza durante el año, situándose más o menos en el lugar que recibe más radiación solar. Durante el verano austral, la ZCIT oscila sobre la Amazonía boliviana, donde su notable inflexión hacia el Sur extiende ampliamente las bajas presiones tropicales. Al mismo tiempo se forma sobre el Altiplano a gran altitud (la troposfera), un sistema de alta presión, conocido como la Alta de Bolivia. Tiene lugar entonces la estación lluviosa.

Durante el invierno austral, la ZCIT alcanza las Antillas y los anticiclones meridionales retornan a sus latitudes más septentrionales. Es la estación seca, caracterizada por una mayor

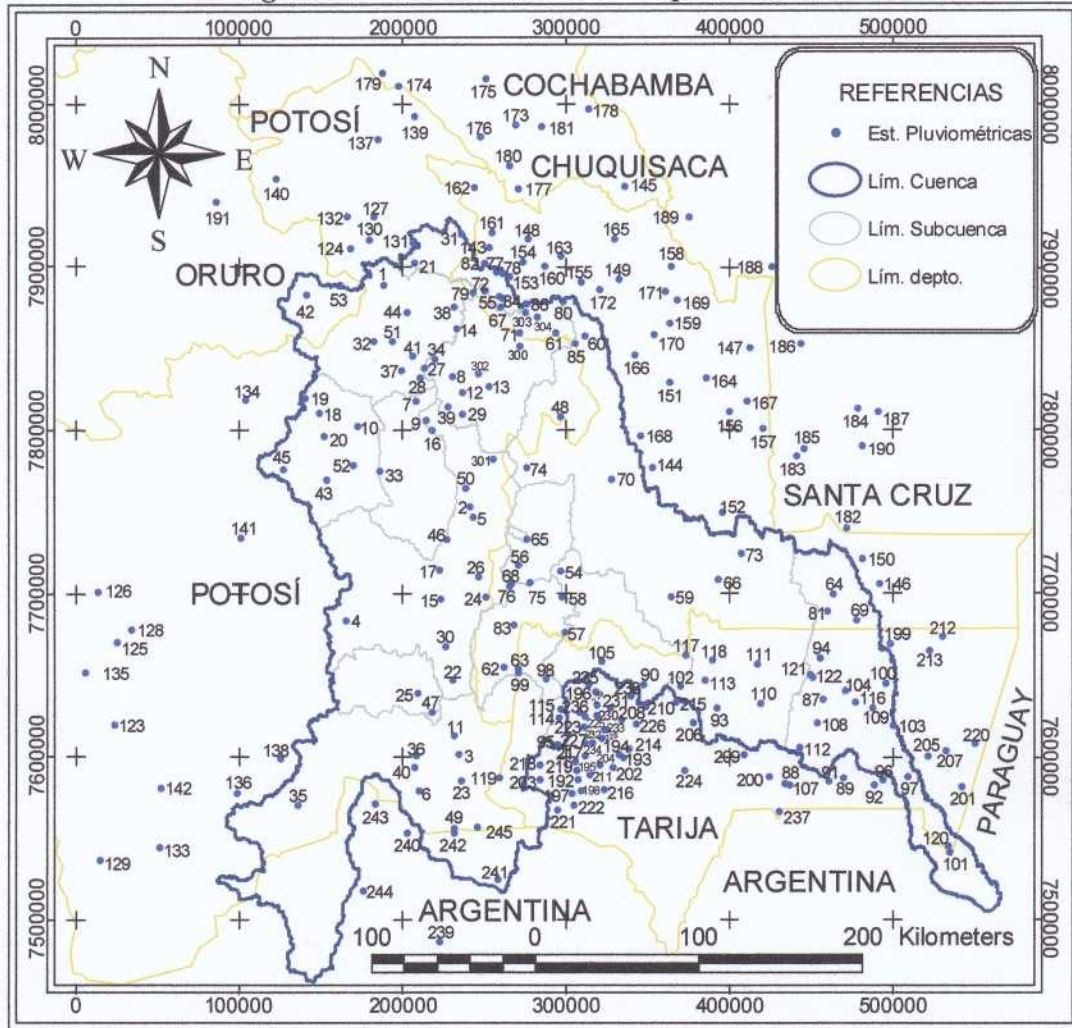
estabilidad del aire y una menor disponibilidad de vapor de agua. Durante esta época en la región de estudio predominan vientos del oeste, muy secos (sin vapor precipitable). Estas condiciones son ocasionalmente interrumpidas por la irrupción de frentes fríos provenientes del sur, que provocan nevadas y lluvias invernales.

Como consecuencia, la región muestra un ciclo estacional muy marcado. En coincidencia con el movimiento de la ZCIT hacia el sur, más del 60% de la precipitación se produce durante el verano austral, de diciembre a marzo, cuando prevalece el flujo de aire húmedo proveniente de la Amazonía. La mayor parte de la precipitación cae en forma de intensas tormentas convectivas.

#### **4.2 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA**

La figura 4.2 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas usadas en el Balance de la cuenca. Los números de estación de la figura 4.2 corresponden a los de la tabla 3.2. La tabla 4.1 es el diagrama de barras de los registros pluviométricos de esas estaciones, para el periodo 1969-2003. Se observa que hay una cantidad importante de años incompletos.

Figura 4.2: Ubicación de estaciones pluviométricas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1: Diagrama de barras de registros pluviométricos

Estación	Ciudad	TIPO	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	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		
Ajtara	PMY	P				11	11			8		11						11	11		10					9													
Ampa Ampa	TML	P												3												4													
Arenales	SJO	P												9			11	11			11					7													
Atocha	TML	TP																5											9		9	8							
Calcha	TML	TP												9		9	11							11				9		10	8								
Chagua	SJO	P													11										10	7													
Challviri	PMY	P																11		9						R	R	7		9	8								
Chaqui	PMY	TP												10	11			11										9		9									
Chaquilla (represa)	TML	P																10			11	7																	
Chaquilla	TML	P					6	R		8																													
Charaja	SJO	P												8						9	6			11															
Chico Chico	PMY	CO																				8							9	10	8								
Chinoli	PMY	CO																																					
Colavi	PMY	P	6							8							11	11																					
Cotagaita	COT	TP				8	9	10	R	11						9	11			11	11																		
Cucho Ingenio	TML	P												10																									
Escara	TML	CO												8																							9		
Kilpani	YUR	P	11					6																															
Lago Toro	YUR	P	11					5																															
Landara	YUR	P						6																															
Maragua (Chayanta)	PMY	P						5	R	8				R			11										7												
Mochara	SJO	P													9							8	8	10															
Mojo	SJO	CO																		9																			
Mosoj Llajta	TML	CO																						10				11		9	8								
Oploca	TUP	CO																11																					
Palca Higuera	TML	TP								8				11					11		8	9	11					7		9	8								
Potosi Aeropuerto	PMY	CP												8	11		10	11			8	8	11			11	R		8	11									
Potosi Senamhi	PMY	CO																																					
Puna (Villa Talavera)	PMY	CP												10			9																			7	9		
Ramadas	TML	P												8									8																
Ravelo	RAV	TP				11	11						6	11			11			6	R	R	8		11		7	10											
Salinas de Yocalla	PMY	P						8	R	R	R	5	11		11																								
Saito Leon	TML	TP			8		11	8	9													5																	
Samasa	PMY	CO																						5					9										
San Antonio Esmor.	SJO	P																																					
San Jose Pampa G.	SJO	TP		11											11																								
Santa Lucia	PMY	P						6	R	8												10	8																
Tacobamba	PMY	P						10	R	R	5																												
Talacocha	PMY	P												7	R	R	11																						
Talina	SJO	P													1		11	10				R	R	8															
Tarapaya	PMY	CP												8		10	11						3															8	
Thola Palca	PMY	P						7	5																														
Tica Tica	TML	P						7										8	11	10																			
Tinquipaya	PMY	TP						5	R	7		11														11			8		10	8							
Tomave	TP																		10	6	6	8																	
Tumusia	TML	TP						7	11																					8		8	8						
Tupiza	SJO	CP	7																				10	R	11	9													
Turuchipa	PMY	TP																																					
Villazón	SJO	TP						10		R	R	8	11		8																								
Vitichi	TML	TP																																					
Yocalla	PMY	TP																																					
Yura	TML	TP																																					
Cruce ventana	PMY	P	11		11			7	R	8	R	8																											
Arpaja Alta (Incahuasi)	PLY	TP																																					
Cachimayu	RAV	TP																																					
Camargo	TML	TP								6		8																											
Chilcar (Cinti)	PLY	TP																																					
Culpina	PLY	CP																																					
El Palmar	PMY	P	3																																				
Icía	PMY	P																																					
La Mendoza	PMY	P																																					
La Torre	SJO	CP																																					
Las Carreras	SJO	P																																					

Estación	Cuenca	TIPO	1968	1970	1971	1972	1973	1974	1975	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		
Machareti	PMY	TP																		7			11						5	R	5		11	1		6			
Muyuquiri	TML	P					5													8	8																		
Nacamiri	PMY	P						3			10								7	6	R	R	R	10											7				
Nucchu	RAV	TP					8	10												R	R	R	10			10													
Palca Grande	TML	P																9	R	7				R	R		9												
Palermo	PMY	P																			7	11	R			11													
Pirhuani	PMY	P									8																												
Puente Sucre	PMY	P					10				11																												
Quila Quila	PMY	P						6	R	6																													
Rosario del Ingre	PMY	P							3	R									11	R																			
San Lucas	PMY	TP						4										10	10		7	11																	
San Pedro	TML	P					7														5	10	7	9	R	R													
San Roque	TML	CO																			7	8	R	R	R														
Sucre Aasana	PMY	S																																					
Sucre Senamhi	PMY	CP																																					
Talua / Taco Taco	PMY	TP							8	8																													
Tarabuco	PMY	TP																																					
Tiguipa	PMY	P																																					
Tullma	PMY	P						5	R	R	8																												
Villa Abecia	TML	P							8	7	R	R	7																										
Villa Carmen/ Yotala	PMY	CO							10																														
Víña Quemada	PMY	P																																					
Yamparacéz	PMY	P							10																														
Aguaraycito	PMY	CO																																					
Alto de Cajas	PLY	P																																					
Berety	PMY	P																																					
Caigua	PMY	P																																					
Campanario	SJO	P																																					
Crevaux	PMY	CP																																					
El Molino(Tomayapo)	SJO	P																																					
El Puente	SJO	TP																																					
El Veinticuatro	PMY	P																																					
Esmeralda	PMY	P																																					
Huayco	PMY	P																																					
Ibibobo PMA	PMY	TP																																					
La Vertiente	PMY	CP																																					
Leon Cancha	PLY	P																																					
Noquera	SJO	P																																					
Palmar Grande	PMY	TP																																					
Palo Mercado	PMY	P																																					
Palos Blancos	PMY	P																																					
Puesto Margarita	PMY	CO																																					
Sachapera	PMY	P																																					
Saladito Norte	PMY	P																																					
Sama Iscayachi	SJO	P																																					
San Antonio (Iscay)	SJO	TP																																					
San Bernardo	PMY	P																																					
San Josesifto	PLY	P																																					
Timboy	PMY	P																																					
Tqjo	SJO	P																																					
Tuscal P.M.A.	PMY	P																																					
VillaMontes Aasana	PMY	S																																					
VillaMontes Senamhi	PMY	CO																																					
Condor	SJO	P																																					
La Quiaca	SJO	P																																					
Yavi	SJO	P																																					

Estaciones de apoyo fuera de los limites de la cuenca en estudio

Arida	SUY	P																																					
Ayoma	GRA	P																																					
Calcha de Lipetz	SUY	TP																																					
Colcha" K"	SUY	CO																																					
Coquechaca	GRA	CO																																					

Estación	Cuenca	TIPO	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	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	
Julaca	SUY	CO						11											11																			
Laguna Colorada	SUY	CO																																			11	
Macha	GRA	TP						7	R	8																			11		9	8						
Ocuri	GRA	TP					11	6	R	6								11	6	10																		
Pocoata	GRA	P						5					4	10		11	10																					
Quetena Chico	SUY	P																		9				10						11	10	9						
Río Mulatos	DPC	CO														9	10	11	11																	9		
San Agustin	SUY	TP																										9										
San Antonio Lipez	SUY	P										7																										
San Pedro B. Vista	GRA	CO		7																																		
San Pablo Lipez	SUY	TP									8						11													9		9	8					
Toro Toro	GRA	TP	8	7	8			8	R	R	7	8	11	11	10				11																	8		
Uncia	GRA	TP	8				7	10	8	R	5					11																						
Uyuni	SUY	CP										11	8																				10	8				
Zoniquera	SUY	P																8	11																			
Alamos	GRA	P	11						11	R	R						8	9	R																			
Azurduy	ITZ	CO	7			4															10		9	10											11	7		
Buena Vista	GRA	TP								7	11											4	7					9										
Carandaiti	PMY	P																																				
Cumandayti	GRA	P								3	R	3			10							11	11														4	
Chuqui Chuqui	PMY	P						6	R	11																				R	11							
El Rodeo	GRA	P											10																									
El Salvador	PMY	CO									8	R	8	7		9	R	R	R	4							7	R	5						8	9		
El Villar	ITZ	P	6					11	7				10																									
La Galeria	ITZ	P							9			11	9																									
La Madona	GRA	TP																			6	11		11														
La Palma	GRA	P				6																																
Lamboyo	GRA	P								6		11																										
Monteagudo	ITZ	CP		11	8								11																									9
Muyupampa (Iboperend)	ITZ	TP																																				
Nuevo Mundo	GRA	P	5					6	6																													
Padilla	GRA	TP																																				
Pajcha	GRA	P									6	R	R																									
Pojpo	GRA	P								8																												
Poroma	GRA	P				10		8	8	11																												
Presto	GRA	P								11	11	8	R																									
Pte Pacheco (Rio Azero)	GRA	P				11	8																															
Redención Pampa	GRA	TP																																				
Sopachuy	ITZ	P																																				
Taperillas	ITZ	P																																				
Tarvita	ITZ	TP	3					9		11																												7
Urriolagoita	GRA	P									7																											
Villa Alcala	GRA	P									7																											
Villa Serrano	GRA	TP						11	9																													
Zudanez	GRA	TP							8																													5
Aiquile	GRA	CO		11		8	R																															8
La Viña	GRA	P								11	11																											
Mizque (Maira)	GRA	TP															9	9																				
Molinos Rio Caine	GRA	TP						8	10																													
Puente Arce	GRA	TP																																				2
Pte Taperas (Rio Azero)	GRA	TP																																				
Quiriria	GRA	TP																																				
QUIROGA	GRA	P																																				
Villa Granado	GRA	P																																				
Boyube	ITZ	P																																				7
Camiri Aasana	ITZ	S																																				
Charagua	ITZ	P																																				
Choreti	ITZ	P																																				
Gutierrez	ITZ	P																																				11
Itaguazurenda	ITZ	P																																				
Masicuri	GRA	P																																				
Pucara	GRA	P																																				
San Antonio	ITZ	CO																																				
Pazña	DPC	CO																																				

Estación	Cuenca	TIPO	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	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
Aguayrenda	PMY	P													8			6																			
Algarrobillas	PMY	P									4						6	7				5		R	8			11			5						
Alizos	BER	P									5																										
Angostura	BER	TP								8								8	R																		
Bagual	PMY	P																																			
Barro Blanco	PMY	P																																			
Calamuchita	BER	TP								9																											
Calderilla	BER	P	11																																		
Canasmoro	BER	CO								9																											
Canchas Mayu	BER	P								9																											
Canto del Monte	PMY	P																																			
Cañas	BER	CO									9																										
Capirenda	PMY	P								7	7				11		8																				
Carapari	PMY	P								7																											
Carossi	PMY	P																																			
Colon Sud	BER	P									6																										
Copacabana	TAX	P	8																																		
Chocloca	BER	TP																																			
El Azucar	PMY	P																																			
Entre Ríos	BER	CO																																			
Est. La Esperanza	PMY	P																																			
Gamoneda	BER	P																																			
Itau	BER	TP																																			
Junecas	BER	P																																			
Juntas	BER	P																																			
Ladera Centro	BER	P																																			
Los Galpones	PMY	CP																																			
Los Mistoles	PMY	P																																			
Narvaez	BER	P																																			
Padcaya	BER	TP																																			
Palmar Chico	PMY	P																																			
Pampa Redonda	BER	P	11																																		
Pasajes	TAX	P																																			
Pinos Sud	BER	P																																			
Pozo el Tigre P.M.A.	PMY	P																																			
Rejera	BER	P																																			
Rincon Cañas	BER	P																																			
Rincon Victoria	BER	P																																			
Salinas	BER	P																																			
Sama Cumbre	BER	P																																			
San Agustín	BER	P																																			
San Andres	BER	P																																			
San Jacinto	BER	TP																																			
San Lorenzo	BER	P																																			
San Mateo	BER	P																																			
San Pedro de Buena	BER	P																																			
Tarija "AASANA"	BER	S																																			
Tarija SENAMHI	BER	TP																																			
Tolmosa (Grande)	BER	P																																			
Tomatas Grandes	BER	P																																			
Tucumillas	BER	P																																			
Yacuiba Aasana	PMY	S																																			
Yesera Norte	BER	CO																																			
Abra Pampa	RIN	P																																			
Cieneguillas	RIN	P																																			
Santa Catalina	RIN	P																																			
Rinconada	RIN	P																																			

Referencias :

- Años completos de registros de la estación meteorológica
- Año de Instalación y puesta en marcha de la estación meteorológica
- Año de cierre y clausura de la estación meteorológica
- Años completos sin registros de la estación meteorológica
- 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 Número de meses, en años con lagunas (sin datos mensuales)
- R Años completos sin datos, que podría ser rellenados para mantener la continuidad

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 ANALISIS DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACION

Según UNESCO-ROSTLAC (1982), los errores en la medición de la precipitación se pueden agrupar en dos tipos básicos:

- error en la medida puntual
- error en la evaluación espacial

Una gran parte de los posibles errores son intrínsecos a la medición y por tanto inevitables. Ese es el caso de los errores debidos al instrumento de medición y al efecto aerodinámico en las trayectorias de las partículas causado por el instrumento, que caen en el primer tipo, junto con los errores debido a la operación y ubicación. En forma general, el error en la estimación de la precipitación espacial (por ejemplo una subcuenca), se puede descomponer en:

$$\Delta PC = \Delta P + \Delta PG + \Delta PF$$

Donde:

$\Delta PC$	=	Error en la evaluación de la precipitación espacial
$\Delta P$	=	Error en la medida de la precipitación puntual
$\Delta PG$	=	Error por no ser suficientemente representativa la precipitación puntual de la zona que representa, que puede ser muy grande si la densidad de la red es muy pequeña
$\Delta PF$	=	Error en la precipitación de las zonas altas de montaña donde no hay instrumentos y es necesario estimarla a partir de extrapolaciones de lo que ocurre en las zonas más bajas (perfil pluviométrico)

Para obtener la mejor estimación posible de la precipitación espacial por subcuenca, se siguió la metodología descrita en la figura 3.2, que se puede sintetizar en tres etapas:

- Análisis de consistencia, homogenización y regionalización de la precipitación
- Relleno de series mensuales mediante correlación
- Estimación de la precipitación espacial por cuencas y subcuencas

A continuación se describe cada una de esas etapas, que comprende a su vez varios subprocesos. Paralelamente se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en cada etapa.

#### 4.3.1 Análisis de consistencia, homogenización y regionalización de la precipitación

Esta etapa es la que define la calidad de los datos y su consistencia. Los resultados que se obtienen al concluir la etapa es la identificación de las estaciones con datos consistentes y confiables y de los grupos regionales que presentan un comportamiento homogéneo. La principal herramienta utilizada para esta etapa es el vector regional.

**Vector regional**

Basado en los mismos principios del método de la curva doble acumulada, el método del Vector Regional crea un vector de índices anuales de precipitación en base a una serie cronológica de precipitaciones anuales ficticias, correspondientes a una estación igualmente ficticia. El vector de índices toma en cuenta los efectos de la tendencia de las series, y los pseudo-ciclos de la zona o región climática que afectan a cada una de las estaciones, verificando de esta manera la homogeneidad temporal de las series. El vector de índices anuales verifica igualmente la homogeneidad espacial de series observadas en las estaciones pertenecientes a la misma zona climática.

El cálculo de los índices de precipitación se basa en una matriz de observaciones compuesta de los registros de precipitación anual de  $\mu$  estaciones con  $n$  años de registros con observaciones faltantes a ciertas estaciones en ciertos años. Para cada estación se calcula una media que cubre el juego de datos del período de estudio, y para todos los años, se calcula un índice que será superior a 1 cuando el año sea húmedo e inferior a 1 cuando el año sea deficitario. El Vector Regional (VR) toma en cuenta la información de una región que supuestamente es homogénea climáticamente (comportamiento temporal similar). El Vector Regional fue desarrollado y convertido en código de programación por investigadores del Institut du Recherche pour Development (IRD) de Francia. Recientemente (2004), fue incorporado al Hydraccess (figura 4.3).

**Figura 4.3: Ventana de entrada al Vector regional en Hydraccess**

**Vector Regional de índices anuales**

**Parámetros del archivo multi-estaciones**

Nombre [C:\Hydraccess\Temp\grupos REg Coereg VR\gr 17 anual.xls] Líneas = 42

Año Inicio 1969 Número de Estaciones 15

Año Final 2002 Número de Años 34

Tipo de Datos **Valores Anuales** Mes de trabajo 01 - Enero

**Parámetros del procesamiento**

Año Inicio trabajo 1977 Número mínimo de estaciones por año 3

Año Final trabajo 2000 Número mínimo de años por estación 3

Brunet Moret --> Desvío límite inferior 0.80 Producir estas tablas:

Desvío límite superior 1.25  Desvíos Índices / Vector

Hiez --> Valor mes seco 5  Coeficientes Índices / Vector

Rieles de dobles masas

**Parámetros de la estimación**

calcular los valores con un desvío aleatorio entre -2 DED y +2 DED DED

guardar los valores observados con desvíos entre -2 DED y +2 DED 0.15

Estación  Algarrobillas

Captor  Lluvias 333 valores

Captor de salida  valores

Leer un Archivo multi-estaciones  Detalles de la Estación Mapa del Año  Desvíos  Medias Completar el captor de salida

Estaciones	Años
P_Algarrobilla-MPm1_(r)	1977
P_Bagual-MPm1_(mm)	1978
P_Barro_Blanco-MPm1_	1979
P_Canto_Monte-MPm1_	1980
P_Carossi-MPm1_(mm)	1981
P_Creveaux-MPm1_(m	1982
P_El_Azucar-MPm1_(m	1983
P_Esmeralda-MPm1_(r	1984
P_Ibibobo-MPm1_(mm)	1985
P_La_Esperanza-MPm1_	1986
P_La_Vertiente-MPm1_	1987
P_San_Bernardo-MPm1_	1988
P_Tuscal-MPm1_(mm)	1989
P_Yacuiba-MPm1_(mm)	1991
P_Pozo_Tigre-MPm1_(r	1992
	1993
	1994
	1995
	1996
	1997
	1998
	1999
	2000

Una vez estimado el VR por grupo la crítica de los datos se facilita grandemente, porque se puede entonces:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación y su pertenencia al grupo regional, mediante diversos parámetros estadísticos (i.e. coeficiente de correlación, error relativo, desviación Standard) proporcionados por el programa del VR.
- Comparar gráficamente el comportamiento de las estaciones dentro de un grupo y entre grupos, trazando, entre otras cosas, el vector regional del grupo, de las estaciones que lo componen, así como curvas doble acumuladas. Esto permite identificar rápidamente quiebres y datos anómalos.

La calidad del vector regional depende de la calidad de los datos de la entrada, aunque los algoritmos usados intentan minimizar la influencia de los datos erróneos. El vector calcula a la salida "la contaminación" por los errores que existen en los datos origen. Si se eliminan los datos incoherentes y se corrigen gradualmente los errores más evidentes en los datos de entrada, se llegará a un vector regional de buena calidad.

Cuando el VR es de calidad buena, se lo podría usar para reconstituir datos faltantes (lagunas), multiplicando el índice regional de un año por el valor medio de la precipitación en esa estación durante el período de estudio. Una opción del programa incluso permite agregar datos reconstituidos con un desvío, con valores arrastrados de lanzamientos aleatorios en función a una ley de Gauss, lo que evita disminuir la varianza de los juegos de valores reconstituidos. Sin embargo para una reconstitución fina de datos perdidos en una estación, es preferible usar la correlación con las estaciones más cercanas obtenida sobre periodos comunes.

Antes de aplicar el programa se requiere del análisis crítico de la información existente, entendiéndose por esto a la detección y exclusión de la matriz de aquellos datos incoherentes o no posibles, es decir que contengan errores groseros. A continuación y con carácter preliminar, se forman "grupos regionales" grandes de estaciones pluviométricas, tomando en cuenta su cercanía, características físicas y topográficas, etc. En la ventana de entrada (figura 4.3) se definen también varios parámetros de cálculo, como el número mínimo de estaciones por año y años por estación, el método (Brunet Moret o Hiez), los límites de confianza, etc.

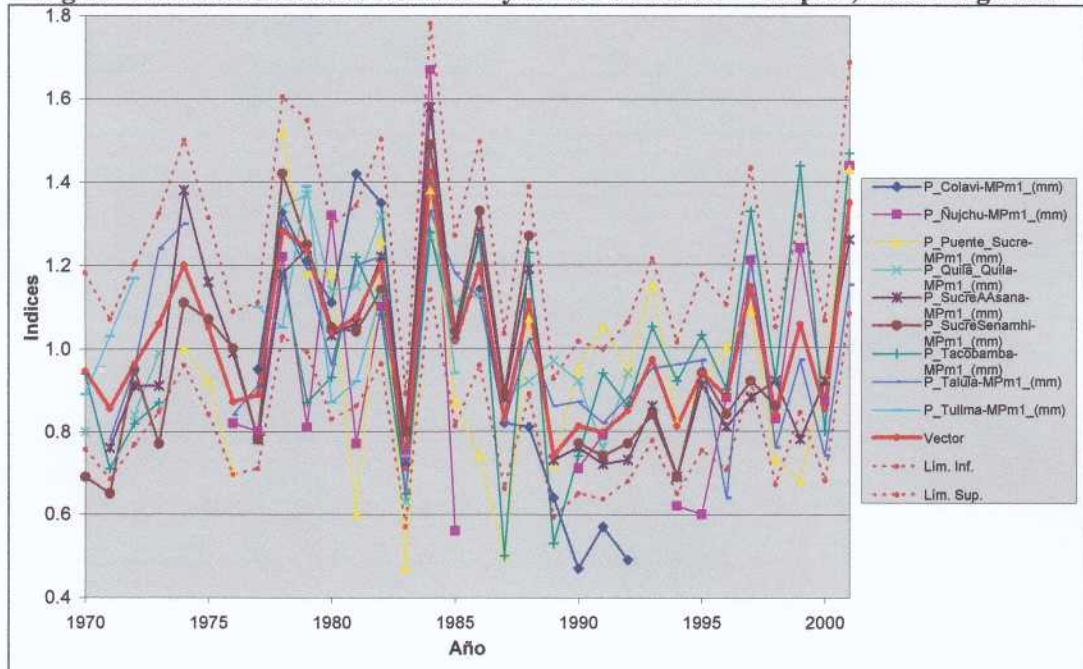
La salida del programa contiene varios parámetros que evalúan la calidad de los resultados. Se usaron principalmente los siguientes:

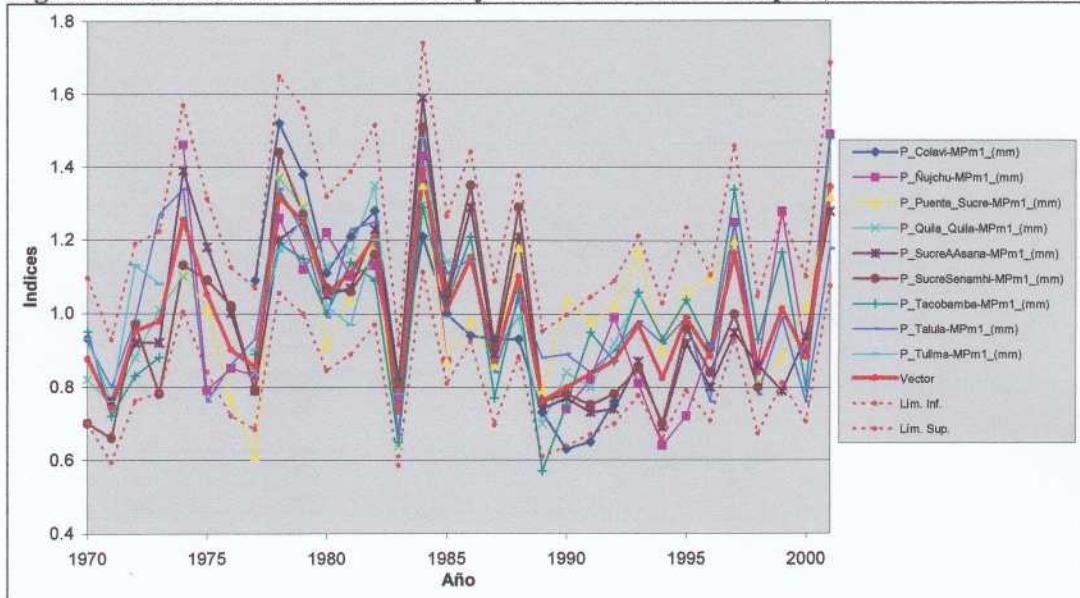
- El coeficiente de correlación "r" del índice con las estaciones ( $>0.70$ )
- El valor de las desviaciones (que se deben mantener dentro de un margen de tolerancia)
- Los límites de confianza dentro de los que se deben mantener las series interanuales del índice del vector

El análisis de los resultados lleva a disminuir el tamaño del grupo regional, identificar estaciones cuyos datos son inconsistentes y en caso extremo, eliminar aquellas estaciones con bajo coeficiente de correlación y alta desviación. En una etapa posterior, los datos reconstituidos en estaciones pertenecientes a un mismo grupo regional, deben mantener un comportamiento similar al de los datos originales, por lo cual es aconsejable aplicar el VR a

los juegos de datos reconstituidos de cada grupo regional original. Como ejemplo, la figura 4.4 muestra los índices del vector regional y de las estaciones del grupo 2 para los datos originales, así como los límites inferior y superior del intervalo de confianza. La figura 4.5 muestra, para el mismo grupo, los índices de los datos reconstituidos, es decir corregidos y rellenados en la forma descrita en 4.3.2.

**Figura 4.4: Índices anuales del Vector y de las estaciones – Grupo 2, Datos originales**



**Figura 4.5: Índices anuales del Vector y de las estaciones – Grupo 2, Datos reconstituidos**

El análisis descrito, aplicado a los registros de las estaciones usadas en el presente estudio, permitió definir 21 grupos regionales con estaciones dentro de la cuenca y en algunos casos con estaciones de apoyo. Se caracterizaron también 12 grupos regionales solamente con estaciones de apoyo fuera de la cuenca. Los resultados de los grupos regionales pertenecientes a la cuenca en estudio, se muestran en la tabla 4.2. Estos resultados son producto del “VR” de índices anuales para el periodo 1970-2001, calculados respecto al año hidrológico adoptado: septiembre-agosto. Para el presente estudio, algunas estaciones pertenecientes al sistema del río Pilcomayo están clasificadas como estación de apoyo por no estar dentro del límite de la Cuenca Alta.

La tabla 4.2 contiene información útil para otras actividades del estudio. Por ejemplo, la columna de precipitación media observada en mm corresponde al valor medio (Brunet Moret) de la precipitación para los años de registro (columna No años). En cambio, la columna de precipitación media calculada corresponde a la estimada con el promedio de los años donde pudo evaluarse el vector regional del grupo. Es este último valor el que se usó para elaborar el mapa de isoyetas. La diferencia entre el valor observado y el calculado para estaciones con registros para todo el periodo, como Sucre y Potosí, da una idea adicional de la homogeneidad del grupo regional. Idealmente esa diferencia debería ser nula o muy próxima a cero.

Las estaciones y grupos regionales de la tabla 4.2 son los que quedaron después de pasar el filtro que representan los parámetros de calidad descritos anteriormente. Se hizo todo lo posible por conservar el mayor número de estaciones. Bajo este criterio se han mantenido también estaciones con coeficientes de correlación del vector inferiores a 0.7 y, en algún caso, se han identificado y formado grupos regionales con relativamente pocas estaciones. Se observa también que hay algunas estaciones que forman parte de más de un grupo regional.

Tabla 4.2: Grupos regionales de precipitación en la Cuenca Alta del río Pilcomayo

	Nº	Estación	Nº Años	Precipitación Media		Media Desvíos	D.E Desvíos	Correl. / Vector "r"	Categ. Est.	Obs.
				Observada	Calculada					
Grupo 1	1	Ajtara	21	483.4	482.5	-0.018	0.112	0.908	E C E	
	2	Ayoma	22	456.7	445.8	0.005	0.088	0.878	E A	
	3	CruceVentilla	26	520.9	525.2	-0.004	0.138	0.759	E C E	
	4	Salinas Yocalla	8	388.8	366.6	0.011	0.109	0.949	E C E	
	5	Ihola Palca	17	370.0	352.7	0.018	0.109	0.809	E C E	
	6	Inguipaya	29	549.9	550.9	-0.002	0.117	0.851	E C E	
	7	Yocalla	26	388.9	396.5	-0.008	0.103	0.915	E C E	
Grupo 2	1	Colavi	17	623.1	619.5	-0.006	0.138	0.829	E C E	
	2	Nujchu	23	547.3	542.2	-0.014	0.135	0.848	E C E	
	3	Puente Sucre	28	553.4	543.6	0.002	0.125	0.789	E C E	
	4	Quila Quila	22	622.7	618.6	0.002	0.076	0.934	E C E	
	5	Sucre AAsana	31	680.7	687.6	-0.014	0.102	0.896	E C E	
	6	Sucre Senamhi	29	662.2	678.5	-0.015	0.102	0.905	E C E	
	7	Iacobamba	28	568.1	574.5	-0.004	0.096	0.885	E C E	
	8	Ialula	31	602.9	599.8	0.005	0.102	0.856	E C E	
	9	Tullma	13	689.9	656.7	0.014	0.089	0.903	E C E	
Grupo 3	1	Ajtara	21	478.4	488.2	-0.011	0.087	0.964	E C E	
	2	Colquechaca	15	557.2	535.7	0.004	0.110	0.816	E A	
	3	Macha	30	394.0	397.0	-0.008	0.119	0.837	E A	
	4	Ocuri	15	712.1	678.5	0.000	0.132	0.746	E A	
	5	Pocoata	10	498.1	497.1	-0.038	0.155	0.808	E A	
	6	Iacobamba	28	549.0	565.5	-0.020	0.130	0.775	E C E	
Grupo 4	1	Chaquilla Represa	10	439.9	438.2	-0.016	0.188	0.862	E C E	
	2	Chaqui	17	517.5	494.1	0.039	0.141	0.757	E C E	
	3	Chico Chico	12	680.3	723.7	-0.030	0.121	0.868	E C E	
	4	Chinoli	31	439.4	441.0	-0.004	0.145	0.737	E C E	
	5	Puna	31	440.7	445.4	-0.010	0.100	0.906	E C E	
	6	San Lucas	27	506.3	506.7	-0.006	0.104	0.887	E C E	
	7	Ialacochoa	12	500.6	495.5	-0.006	0.139	0.825	E C E	
	8	Iuruchipa	26	450.0	450.1	-0.007	0.144	0.825	E C E	
Grupo 5	1	Challviri	14	524.7	486.9	0.012	0.135	0.820	E C E	
	2	Cucholingeno	17	362.7	368.2	-0.029	0.123	0.924	E C E	
	3	Potosi Aasana	22	353.4	343.5	-0.004	0.104	0.932	E C E	
	4	Potosi Senamhi	31	393.6	396.0	-0.006	0.123	0.868	E C E	
	5	Salinas Yocalla	8	390.4	403.9	0.012	0.076	0.939	E C E	
	6	Samasa	10	344.5	348.2	0.020	0.102	0.881	E C E	
	7	Santa Lucia	22	360.7	367.5	-0.012	0.116	0.892	E C E	
	8	Irapaya	17	366.3	362.6	-0.005	0.124	0.888	E C E	
	9	Yocalla	26	393.1	382.8	0.019	0.124	0.890	E C E	
Grupo 6	1	Aguayarcito	10	724.5	783.7	0.015	0.092	0.943	E C E	
	2	Aguayrenda	16	1184.8	1111.8	0.005	0.110	0.843	E C E	
	3	Carapari	19	1020.3	989.0	0.005	0.142	0.806	E A	
	4	Itau	22	979.1	979.8	0.000	0.095	0.924	E A	
	5	Palmar Chico	24	1086.4	1057.7	0.001	0.123	0.825	E C E	
	6	Palmar Grande	24	792.2	760.8	0.015	0.132	0.802	E C E	
	7	Sachapera	24	1005.2	993.7	-0.015	0.118	0.897	E C E	
	8	Yacuiba	30	1204.0	1291.5	-0.057	0.161	0.897	E A	
Grupo 7	1	Aguayarcito	10	724.5	785.2	-0.011	0.110	0.910	E C E	
	2	Cagua	17	1123.4	1040.8	-0.011	0.094	0.932	E C E	
	3	El 24	5	641.7	675.6	-0.044	0.171	0.918	E C E	
	4	Ibibobo	6	445.5	492.3	0.071	0.133	0.864	E C E	
	5	La Vertiente	19	816.6	780.1	0.005	0.092	0.884	E C E	
	6	Palo Mercado	5	502.3	485.9	0.040	0.112	0.847	E C E	
	7	Palos Blanco	26	666.6	688.4	-0.032	0.151	0.802	E C E	
	8	San Bernardo	6	575.3	558.8	0.008	0.085	0.995	E C E	
	9	VillaMontes Aasana	14	850.7	821.2	-0.027	0.132	0.912	E C E	
	10	VillaMontes Senamhi	27	877.0	881.9	-0.006	0.084	0.934	E C E	
Grupo 8	1	Alto Cajas	10	533.4	482.0	0.015	0.126	0.834	E C E	
	2	Berety	14	747.5	727.0	-0.001	0.095	0.814	E C E	
	3	El Huayco	8	1287.4	1148.9	-0.002	0.069	0.959	E C E	
	4	Entre Rios	26	1072.0	1088.3	-0.015	0.135	0.823	E A	
	5	Junacas	24	533.2	534.9	-0.011	0.145	0.786	E A	
	6	Narvaez	23	1154.6	1145.9	-0.001	0.085	0.886	E A	
	7	Huerto Margarita	7	501.0	464.5	0.065	0.105	0.757	E C E	
	8	Saladito Norte	8	901.6	831.0	-0.017	0.104	0.906	E C E	
	9	Salinas	15	1333.7	1347.5	-0.017	0.122	0.864	E A	
	10	San Josecito	17	907.9	894.9	-0.009	0.115	0.852	E C E	
	11	Imboy	13	664.9	641.8	-0.004	0.154	0.655	E C E	*
	12	Yesera Norte	21	653.9	638.0	0.006	0.086	0.876	E A	

Nº	Estación	Nº Años	Precipitación Media		Media Desvíos	D.E Desvíos	Correl. / Vector "r"	Categ. Est.	Obs.	
			Observada	Calculada						
Grupo 9	1	Atócha	15	229.0	257.5	-0.022	0.139	0.789	E. C. E.	
	2	Chagua	11	275.5	284.4	0.013	0.134	0.837	E. C. E.	
	3	Oploca	15	349.5	303.9	0.015	0.095	0.960	E. C. E.	
	4	San Antonio Esmoruco	12	314.6	308.3	0.025	0.111	0.901	E. C. E.	
	5	San Antonio Lipez	14	314.1	316.9	-0.020	0.093	0.984	E. A.	
	6	San Jose Pampa Grande	10	348.4	310.4	-0.036	0.140	0.947	E. C. E.	
	7	San Pablo Lipez	24	256.6	254.3	-0.008	0.108	0.944	E. A.	
	8	Talina	16	314.5	333.7	-0.017	0.144	0.860	E. C. E.	
	9	Lupiza	27	298.2	298.0	-0.011	0.084	0.968	E. C. E.	
	10	Villazon	28	349.7	350.3	-0.002	0.110	0.917	E. C. E.	
Grupo 10	1	Calderillas	18	1090.7	1138.9	-0.024	0.101	0.868	E. A.	*
	2	Campanario	13	357.3	350.0	0.003	0.142	0.622	E. C. E.	
	3	CanasMoro	26	619.3	610.8	-0.004	0.090	0.840	E. A.	
	4	Canchas Mayu	18	945.6	924.0	-0.001	0.076	0.866	E. A.	
	5	Copacabana	23	337.1	344.4	-0.015	0.137	0.706	E. A.	
	6	El Molino	7	577.9	579.9	-0.022	0.123	0.911	E. C. E.	
	7	Mochara	13	289.4	282.8	0.000	0.137	0.794	E. C. E.	
	8	Noquera	5	365.9	343.2	0.044	0.100	0.818	E. C. E.	
	9	PampaRedonda	23	895.5	904.8	-0.005	0.080	0.890	E. A.	
	10	Rejara	8	972.1	965.2	-0.022	0.109	0.897	E. A.	
	11	San Andres	26	1042.9	1028.2	-0.008	0.073	0.890	E. A.	
	12	Tomatas G	10	741.2	703.9	0.000	0.064	0.948	E. A.	
	13	Lucumillas	24	749.1	739.6	-0.022	0.125	0.725	E. A.	
Grupo 11	1	Chaquilla	31	281.4	280.5	0.003	0.112	0.921	E. C. E.	
	2	Killpani	5	375.2	290.3	0.015	0.108	0.873	E. C. E.	
	3	Lago Iora	5	420.2	327.8	0.005	0.083	0.952	E. C. E.	
	4	Landara	5	358.3	274.7	0.027	0.074	0.978	E. C. E.	
	5	Rio Mulatos	20	188.0	198.4	0.018	0.146	0.895	E. A.	
	6	Salto Leon	16	280.7	252.9	0.015	0.151	0.844	E. C. E.	
	7	Tica Tica	15	269.2	258.8	-0.024	0.123	0.958	E. C. E.	
	8	Tomave	11	337.7	314.8	-0.050	0.154	0.955	E. C. E.	
	9	Uyuni	27	179.6	192.8	-0.015	0.108	0.932	E. A.	
	10	Yura	9	235.3	255.5	0.018	0.130	0.835	E. C. E.	
Grupo 12	1	Ampa Ampa	13	324.9	306.8	0.034	0.124	0.911	E. C. E.	
	2	Calcha	21	279.3	295.9	-0.030	0.128	0.939	E. C. E.	
	3	Camargo	11	320.4	282.4	0.038	0.139	0.895	E. C. E.	
	4	Cotagaita	13	297.9	270.7	0.000	0.131	0.894	E. C. E.	
	5	Escara	22	267.5	276.7	-0.004	0.147	0.854	E. C. E.	
	6	Mosoj Lijta	11	295.9	311.6	0.017	0.146	0.822	E. C. E.	
	7	Muyuquiri	27	422.2	424.1	-0.004	0.131	0.890	E. C. E.	
	8	Paica Higuera	24	326.3	327.6	-0.006	0.127	0.921	E. C. E.	
	9	Ramadas	22	312.2	315.9	-0.019	0.152	0.910	E. C. E.	
	10	Iumusla	24	336.2	329.1	0.017	0.121	0.899	E. C. E.	
	11	Vitichi	24	367.5	381.8	-0.038	0.124	0.922	E. C. E.	
Grupo 13	1	Charaja	13	266.3	256.7	-0.010	0.144	0.849	E. C. E.	
	2	Chilcar	15	199.8	189.1	0.019	0.110	0.877	E. C. E.	
	3	La Torre	21	355.0	346.9	0.000	0.102	0.871	E. C. E.	
	4	Las Carreras	19	260.4	262.1	-0.004	0.121	0.808	E. C. E.	
	5	Leon Canchas	12	430.8	409.4	0.014	0.129	0.883	E. C. E.	
	6	Mojo	30	320.2	317.2	0.009	0.113	0.892	E. C. E.	
	7	Pasajes	9	290.5	291.7	0.011	0.095	0.665	E. A.	*
	8	Tojo	20	308.9	311.6	-0.009	0.099	0.932	E. C. E.	
	9	Villa Abecia	25	260.4	262.8	-0.009	0.121	0.892	E. C. E.	
	10	Arenales	13	281.7	287.1	-0.066	0.171	0.846	E. C. E.	
	11	El Puente	24	313.0	307.8	0.012	0.137	0.790	E. C. E.	
Grupo 14	1	Cachimayu	22	526.2	521.2	0.004	0.130	0.824	E. C. E.	
	2	Icla	27	386.6	378.9	0.021	0.099	0.857	E. C. E.	
	3	La Madona	14	623.4	647.3	-0.030	0.141	0.816	E. A.	
	4	La Mendoza	16	396.0	392.4	0.000	0.137	0.734	E. C. E.	
	5	Pajcha	11	549.9	558.5	-0.021	0.124	0.908	E. A.	
	6	Tarabuco	25	567.2	586.2	-0.023	0.134	0.815	E. C. E.	
	7	Villa Alcala	18	724.9	728.5	0.003	0.101	0.797	E. A.	
	8	Viña Quemada	23	449.0	452.4	-0.004	0.151	0.769	E. C. E.	
	9	Yampare	22	507.2	511.6	0.001	0.126	0.775	E. C. E.	
	10	Yotala	31	523.3	530.1	-0.013	0.135	0.837	E. C. E.	
	11	Zudanez	31	565.6	577.9	-0.021	0.116	0.846	E. A.	

	N°	Estación	N° Años	Precipitación Media		Media Desvíos	D.E. Desvíos	Correl. / Vector "r"	Categ. Est.	Obs.
				Observada	Calculada					
Grupo 15	1	Arpaja Alta	16	465.6	461.9	0.017	0.113	0.902	E.C.E.	
	2	Camargo	11	311.4	293.6	0.005	0.089	0.958	E.C.E.	
	3	Culpina	25	285.5	288.6	-0.010	0.111	0.848	E.C.E.	
	4	Muyuquiri	27	421.8	434.2	-0.032	0.129	0.910	E.C.E.	
	5	Palca Grande	8	343.8	334.8	0.003	0.088	0.962	E.C.E.	
	6	San Pedro	17	323.7	311.9	0.006	0.117	0.836	E.C.E.	
	7	San Roque	20	292.7	294.1	-0.009	0.126	0.897	E.C.E.	
Grupo 16	1	Boyuibé	22	617.6	648.7	-0.046	0.147	0.902	E.A.	
	2	Capirenda	12	648.6	661.8	-0.016	0.155	0.664	E.A.	*
	3	Carandayti	19	530.3	536.6	-0.038	0.153	0.920	E.A.	.
	4	El Palmar	6	1350.5	1294.9	0.001	0.109	0.716	E.C.E.	
	5	El Salvador	18	696.2	708.5	0.004	0.132	0.705	E.A.	
	6	La Galeria	23	864.0	849.8	0.000	0.141	0.752	E.A.	
	7	Los Galpones	5	683.1	640.2	0.026	0.074	0.945	E.A.	
	8	Palermo	5	420.9	390.8	0.036	0.131	0.953	E.C.E.	
	9	Macharety	13	701.8	803.9	-0.021	0.144	0.663	E.C.E.	*
	10	Nacamiri	18	1008.5	993.4	-0.033	0.175	0.689	E.C.E.	*
	11	Kosario Ingre	22	986.7	1032.0	-0.030	0.160	0.723	E.C.E.	.
	12	Iguipa	5	999.1	963.6	-0.004	0.109	0.959	E.C.E.	
Grupo 17	1	Algarrobillá	22	739.7	742.3	-0.009	0.139	0.843	E.C.E.	
	2	Bagual	6	710.8	815.9	-0.078	0.162	0.957	E.C.E.	.
	3	Barro Blanco	6	771.0	819.0	-0.008	0.087	0.950	E.C.E.	
	4	Canto Monte	6	587.9	661.7	-0.060	0.180	0.774	E.C.E.	.
	5	Carossi	6	538.9	565.8	0.004	0.169	0.833	E.A.	.
	6	Creveaux	5	584.8	575.7	0.057	0.133	0.849	E.C.E.	
	7	El Azucar	7	568.8	589.4	-0.013	0.145	0.834	E.A.	
	8	Esmeralda	6	608.8	588.1	0.007	0.111	0.882	E.C.E.	
	9	Ibibobo	6	478.5	527.5	0.030	0.075	0.948	E.C.E.	
	10	La Esperanza	6	468.5	481.2	0.025	0.072	0.936	E.A.	
	11	La Vertiente	19	815.5	818.6	-0.005	0.150	0.715	E.C.E.	
	12	San Bernardo	6	575.3	562.2	-0.051	0.146	0.939	E.C.E.	
	13	Iuscal	6	541.5	584.0	-0.022	0.139	0.809	E.C.E.	
	14	Yacuiba	30	1231.1	1332.5	-0.076	0.199	0.776	E.A.	.
	15	Pozo Igre	6	478.6	468.7	0.072	0.149	0.746	E.A.	
Grupo 18	1	La Palma	25	541.4	536.2	0.012	0.117	0.864	E.A.	
	2	Lamboyo	23	571.9	592.0	-0.018	0.141	0.834	E.A.	
	3	Maragua	22	581.2	563.2	-0.010	0.154	0.720	E.C.E.	.
	4	Pajcha	11	549.9	540.4	-0.008	0.130	0.864	E.A.	
	5	Pojpo	12	758.7	693.3	0.009	0.077	0.934	E.A.	
	6	Poroma	25	765.9	786.1	-0.029	0.125	0.909	E.A.	
	7	Presto	29	379.0	382.8	-0.010	0.147	0.855	E.A.	
	8	Ravelo	25	786.2	806.6	-0.025	0.121	0.883	E.C.E.	
	9	Iullima	13	689.9	627.3	0.009	0.111	0.840	E.C.E.	
Grupo 19	1	Azurduy	30	728.5	734.3	-0.008	0.120	0.834	E.A.	
	2	El Villar	29	587.1	591.8	-0.005	0.105	0.903	E.A.	
	3	Hrhuaní	21	979.8	1057.2	-0.006	0.119	0.762	E.C.E.	
	4	Iarvita	29	803.2	805.1	-0.002	0.110	0.866	E.A.	
Grupo 20	1	Pampa Redonda	23	914.5	893.5	0.027	0.117	0.790	E.A.	
	2	Pinos Sud	30	1087.3	1105.9	-0.017	0.119	0.817	E.A.	
	3	Rincon Victor	10	1094.8	1025.4	-0.001	0.110	0.851	E.A.	
	4	Sama Cumbre	19	766.4	825.6	-0.041	0.137	0.874	E.A.	
	5	Sama Iscayach	15	414.4	404.7	0.008	0.143	0.807	E.C.E.	
	6	San Andres	26	1042.9	1029.5	0.013	0.095	0.837	E.A.	
	7	San Antonio Iscayachi	11	367.3	341.4	0.029	0.135	0.882	E.C.E.	
	8	Iucumillas	24	749.1	735.7	0.006	0.104	0.824	E.A.	
Grupo 21	1	Abra Pampa	21	354.1	357.7	-0.010	0.151	0.809	E.A.	
	2	Cieneguillas	15	389.8	397.3	-0.025	0.127	0.931	E.A.	
	3	Condor arg	19	414.1	410.6	0.002	0.158	0.735	E.A.	
	4	La Quiaca	21	295.2	294.4	0.003	0.145	0.792	E.C.E.	
	5	Rinconada	17	440.7	437.0	0.002	0.162	0.775	E.A.	
	6	Santa Catalina	16	397.0	399.9	-0.014	0.144	0.847	E.A.	
	7	Villazón	28	347.1	342.7	0.013	0.195	0.662	E.C.E.	*
	8	Yavi	10	251.2	215.9	0.066	0.108	0.935	E.C.E.	

\* Estación con factor de correlación menor a 0,7, conservada por su periodo de registro y/o ubicación geográfica

· Estación que presenta un desvío alto, conservada por su periodo de registro y/o ubicación geográfica.

E.C.E.: Estación dentro de Cuenca Alta

E.A.: Estación de apoyo

### 4.3.2 Relleno y reconstitución estadística de datos pluviométricos

Los registros pluviométricos frecuentemente muestran “lagunas” (periodos sin datos). Para obtener una base de uso común y no perder la información de un año debido a que se tengan algunos meses sin registro, es conveniente completar registros mensuales mediante relleno. Existen diversos procedimientos y criterios para realizar el relleno, entre los que se mencionan el uso de la media mensual histórica de la estación y el de la distancia inversa. Para el presente estudio se ha utilizado la correlación múltiple entre estaciones que en lo posible, pertenezcan al mismo grupo regional. Por consideraciones prácticas, en los casos de grupos con un número importante de estaciones, el relleno de una serie de datos de una estación cualquiera se realizará tomando en cuenta a las estaciones geográficamente más cercanas, siempre y cuando esas estaciones tengan consistencia aceptable (según el vector regional). Los criterios de relleno son los siguientes:

- El relleno se realiza entre estaciones pertenecientes al mismo grupo regional. En caso de que esto no sea posible, se deberá realizar un cuidadoso análisis para usar estaciones de otro grupo.
- Se podrá rellenar registros faltantes siempre que los mismos no superen periodos continuos de 6 meses.
- Las nuevas series rellenadas y/o ampliadas deberán seguir el comportamiento original, lo que será comprobado mediante la teoría de decisiones y/o el Vector Regional, donde el comportamiento de los vectores de la serie rellenada deberá seguir el de la serie original.

Para una mejor aplicación del método se vio por conveniente dividir al año en tres estaciones, de acuerdo al comportamiento de la región de estudio:

- Época húmeda: Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo
- Época seca: Mayo, Junio, Julio, Agosto
- Época de transición: Abril, Septiembre, Octubre

Varios programas estadísticos incluyen a la regresión múltiple entre sus herramientas y tienen además diversos parámetros que permiten evaluar la bondad de ajuste, como el coeficiente de regresión ( $r^2$ ), de regresión corregida ( $r^2$  correg), error típico de la estimación y el estadístico F que indica si existe relación lineal significativa entre la variable dependiente y el conjunto de variables independientes. El valor 0.00 indica un máximo nivel significativo de una serie de datos (de una estación) en la regresión. Para el presente estudio se utilizó el módulo de regresión múltiple del programa SPSS-Statistical Product and Service Solutions versión 11.5.1. Por criterio y experiencia, se aplicó la regresión lineal con imposición en el origen, es decir que la ecuación no tiene término independiente:

$$Y = \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n$$

La tabla 4.3 presenta valores medios mensuales y anuales de precipitación para el periodo 1970-2000 en 127 estaciones. Estos valores fueron obtenidos en base a las series corregidas,

rellenadas y validadas según los pasos anteriores. Las estaciones de la tabla 4.3 son por tanto importantes por su comportamiento homogéneo y longitud de registro y servirán de base para cálculos posteriores.

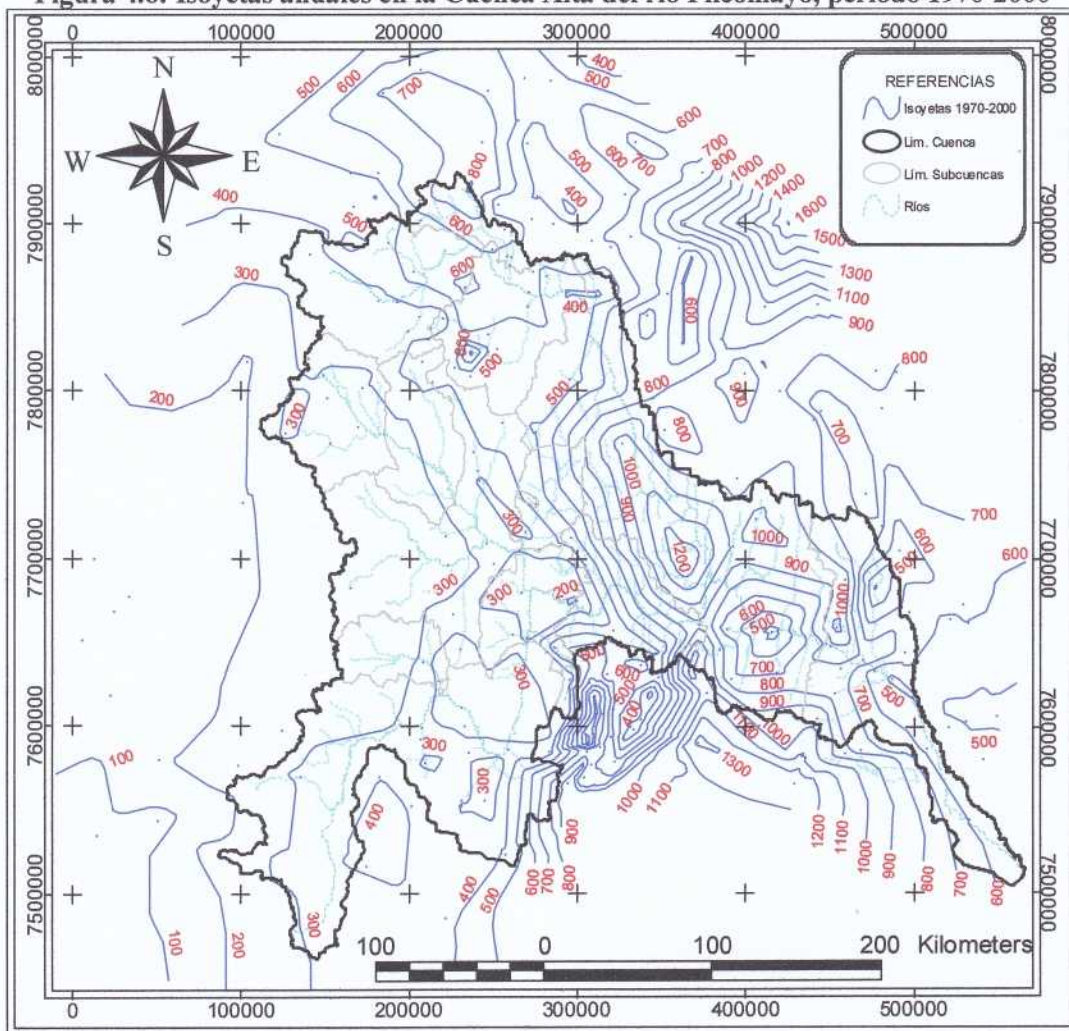
**Tabla 4.3: Precipitación media mensual y anual (mm) en la Cuenca del río Pilcomayo**

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Ajtara	100.0	83.6	76.5	22.3	15	10	0.5	5.6	10.1	23.0	41.7	86.9	482.5
Ampa Ampa	74.7	58.8	43.0	17.8	4.2	11	0.5	3.5	7.9	18.2	26.1	51.1	306.8
Arenales	74.8	57.8	44.1	6.4	0.0	0.0	0.4	2.0	3.8	11.3	26.7	59.8	287.1
Atocha	81.0	55.4	31.2	5.1	0.1	0.4	0.1	1.8	3.3	5.6	21.1	52.4	257.5
Calcha	80.9	55.4	51.2	7.0	0.2	0.6	0.3	3.2	4.6	15.2	27.1	50.1	295.9
Chagua	78.2	63.1	31.9	11.3	0.0	0.0	0.0	1.8	1.3	9.4	29.3	58.1	284.4
Challviri	100.9	86.0	83.8	26.1	4.8	4.0	0.7	5.4	9.7	44.2	49.9	71.4	486.9
Chaqui	123.8	77.9	71.9	26.9	0.8	11	0.5	5.5	11.6	37.4	54.9	81.6	494.1
Chaquilla	84.2	59.6	41.3	5.5	1.2	0.7	0.2	2.7	4.6	6.4	22.9	51.4	280.5
Chaquilla Represa	96.9	77.3	62.4	29.7	1.0	12.1	6.4	4.9	6.0	29.9	54.4	57.3	438.2
Charaja	78.8	50.0	35.9	4.7	0.3	0.0	0.0	0.4	2.2	13.7	21.8	49.0	256.7
Chico Chico	173.2	111.6	107.0	36.2	3.7	3.0	0.0	6.8	18.5	58.9	60.2	144.7	723.7
Chinolí	102.2	71.4	62.9	16.7	2.9	2.0	0.8	6.2	8.9	30.5	39.5	77.2	441.0
Colavi	135.6	108.5	96.0	30.2	2.4	2.3	1.3	10.6	17.1	34.6	63.5	117.4	619.5
Cotagaita	63.2	67.3	34.0	9.6	0.9	0.3	0.0	0.6	0.5	1.6	19.3	73.4	270.7
Chinolí	102.2	71.4	62.9	16.7	2.9	2.0	0.8	6.2	8.9	30.5	39.5	77.2	441.0
Colavi	135.6	108.5	96.0	30.2	2.4	2.3	1.3	10.6	17.1	34.6	63.5	117.4	619.5
Cotagaita	63.2	67.3	34.0	9.6	0.9	0.3	0.0	0.6	0.5	1.6	19.3	73.4	270.7
Cucho Ingenio	113.2	71.8	50.1	20.9	0.9	2.1	1.2	2.8	2.4	9.6	27.5	65.8	368.2
Escara	84.9	43.0	52.5	6.4	0.1	0.2	0.1	2.6	3.6	8.2	22.6	52.6	276.7
Killpani	97.5	91.1	21.2	5.6	0.4	0.6	0.1	0.7	4.7	1.4	24.1	43.0	290.3
Lago Toro	109.3	78.9	42.4	14.4	2.1	1.4	0.3	2.5	5.9	2.9	15.1	52.8	327.8
Landara	99.0	70.7	26.2	5.7	3.0	0.3	0.0	1.2	1.8	1.7	15.0	50.1	274.7
Maragua	146.1	101.1	83.2	31.0	4.0	3.8	1.0	7.4	13.9	34.0	47.0	90.8	563.2
Mochara	84.7	55.6	43.2	8.3	0.2	0.6	0.6	0.7	3.4	18.1	25.1	42.4	282.8
Mojo	76.0	50.6	44.0	6.8	1.0	0.5	0.1	1.0	3.6	13.0	25.7	55.5	317.2
Mosoj Llaña	113.1	61.4	50.8	5.6	0.0	0.0	0.0	2.0	4.8	9.0	15.3	49.7	311.6
Oploca	96.5	69.1	38.1	6.4	0.5	1.6	0.0	0.7	2.5	8.4	21.7	58.5	303.9
Palca Higuera	84.3	55.1	56.1	7.5	1.1	0.2	0.2	3.0	5.2	13.4	31.8	69.8	327.6
Potosí Aasana	83.8	54.6	50.4	18.0	2.6	1.6	1.3	4.6	11.2	20.5	34.4	60.5	343.5
Potosí Senamhi	95.4	68.3	63.9	18.8	0.8	1.2	0.4	4.7	9.5	25.3	35.1	72.6	396.0
Puna (Villa Talavera)	103.0	73.9	75.3	27.1	0.7	1.7	0.3	5.4	12.7	29.8	38.1	77.5	445.4
Ramadas	90.5	58.8	53.3	7.6	0.0	0.1	0.0	1.2	1.7	6.3	29.0	67.5	315.9
Ravelo	117.6	114.5	118.0	32.3	3.8	2.7	1.5	10.4	24.6	56.8	71.6	133.2	806.6
Salinas de Yocalla	107.4	70.5	47.7	12.4	2.7	0.3	0.8	5.5	8.1	12.5	20.8	78.1	366.6
Salto Leon	71.3	59.3	37.2	4.7	1.7	0.5	0.5	3.1	5.3	7.1	21.8	40.6	252.9
Samasa	86.5	69.2	51.6	21.4	0.7	1.6	0.3	4.4	7.2	22.9	34.0	48.5	348.2
San Antonio Esmoruco	91.6	76.8	55.5	12.6	0.1	0.4	0.2	1.3	2.5	1.6	12.5	53.2	308.3
San Jose Pampa Grande	92.5	63.2	44.0	6.5	0.0	0.7	0.0	0.3	2.2	8.3	19.3	73.5	310.4
Santa Lucia	96.0	58.1	57.5	18.6	1.3	3.0	0.7	3.5	8.0	20.8	32.3	67.7	367.5
Tacobamba	100.0	104.1	92.2	23.4	1.6	1.0	1.1	7.6	15.7	44.2	56.4	97.2	574.5
Talacocha	94.4	86.1	82.2	29.4	1.4	4.2	2.0	6.5	15.1	42.8	50.3	81.1	495.5
Talina	90.8	57.9	50.4	15.0	0.0	0.1	0.0	2.2	5.3	7.1	24.0	79.9	333.7
Tarapaya	87.9	64.2	54.8	14.8	1.1	0.6	0.2	4.9	10.5	27.6	33.6	62.6	362.6
Thola Palca	93.3	66.5	44.3	15.8	1.3	1.2	5.4	8.5	15.9	13.1	24.3	63.2	352.7
Tica Tica	82.1	60.3	32.0	8.2	1.5	1.9	1.0	2.8	1.9	11.7	19.5	35.9	258.8
Tinquipaya	124.1	103.3	76.8	29.5	3.7	1.6	1.1	11.6	12.6	37.6	52.4	96.9	550.9
Tomave	88.2	63.9	48.4	6.6	0.9	3.2	0.0	1.9	5.2	5.5	23.2	68.0	314.8
Tumusla	85.7	65.1	46.1	11.4	0.1	0.2	0.2	2.3	4.5	12.4	27.8	73.5	329.1
Tupiza	94.1	60.7	38.2	7.1	0.7	0.4	0.1	1.0	3.8	6.8	23.3	61.9	298.0
Turuchipa	90.5	74.7	65.9	25.1	5.6	2.8	3.2	5.3	12.6	28.8	49.8	86.1	450.1
Villazón	102.5	59.5	53.4	11.3	1.0	0.4	0.1	2.5	5.0	15.9	26.5	72.2	350.3
Vitichi	91.5	87.5	53.4	13.6	2.6	0.5	0.4	2.9	5.6	18.9	32.4	72.6	381.8
Yocalla	105.4	76.5	58.7	19.1	1.2	1.1	0.4	3.4	7.6	17.4	29.4	76.3	396.5
Yura	52.2	63.9	50.3	3.5	0.0	0.0	0.1	3.6	5.4	12.2	15.6	47.8	255.5
Arpaja Alta	111.6	81.8	74.7	17.0	1.4	1.2	1.1	3.6	9.2	27.1	47.7	85.5	461.9
Cachimayu	114.8	83.4	86.1	23.6	2.2	1.6	0.9	8.4	21.0	36.0	50.0	93.2	521.2
Camargo	70.5	55.0	44.4	4.6	1.9	1.8	0.5	1.4	3.5	13.7	29.2	56.0	282.4
Chilcar	40.7	37.6	25.8	5.9	1.7	1.6	1.1	2.4	4.6	15.0	20.3	32.5	189.1
Culpina	62.3	58.3	46.1	13.5	3.5	1.0	0.4	2.4	6.1	14.7	28.9	51.4	288.6
El Palmar	273.1	255.5	224.7	109.6	31.2	16.7	7.4	16.7	17.0	39.6	111.2	212.7	1294.9
Icla	91.4	68.4	52.4	14.5	1.4	0.7	1.1	5.6	17.4	26.8	38.0	61.4	378.9
La Mendoza	85.8	55.8	61.8	15.0	2.8	0.7	2.0	5.6	13.8	27.7	48.0	73.6	392.4
La Torre	76.9	65.7	57.2	12.9	1.4	0.7	1.0	2.2	8.3	18.9	34.9	66.8	346.9
Las Carrera	58.9	53.1	42.4	10.8	1.5	1.0	0.2	1.2	5.6	19.3	23.6	44.7	262.1

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL		
Depto. Chuquisaca	Machareti	139.2	147.1	130.9	72.1	25.9	7.3	8.3	2.9	9.9	36.6	81.3	142.4	803.9	
	Muyuquiri	106.3	82.0	64.0	13.4	1.4	0.8	1.2	4.2	7.0	25.9	42.1	85.9	434.2	
	Nacamiri	176.8	197.1	161.8	88.0	26.0	8.6	9.0	10.3	13.6	36.1	106.1	160.0	993.4	
	Nújchu	126.7	97.9	87.0	16.3	3.4	1.1	1.2	10.5	19.3	34.5	51.4	92.9	542.2	
	Palca Grande	66.0	52.8	51.1	19.0	2.8	1.0	0.3	1.1	5.6	25.4	44.6	65.1	334.8	
	Pirhuani	183.6	177.2	171.6	74.3	15.5	4.2	5.7	9.0	23.6	79.7	131.8	181.1	1057.2	
	Puente Sucre	123.3	95.7	89.5	23.0	2.9	1.1	0.7	7.5	21.2	36.3	46.4	96.1	543.6	
	Quila Quila	140.6	108.1	107.2	26.2	5.4	1.9	2.9	8.9	19.0	47.1	55.9	95.5	618.6	
	Rosario del Ingre	190.2	176.7	162.5	77.8	39.1	16.4	10.2	6.9	22.6	62.1	102.6	164.9	1032.0	
	San Lucas	107.0	91.5	86.5	19.9	1.9	1.3	1.4	4.7	14.1	36.9	53.8	87.8	506.7	
	San Pedro	73.4	59.3	52.6	9.2	1.0	1.3	1.7	1.8	4.9	18.1	29.9	58.8	311.9	
	San Roque	62.4	59.0	54.3	7.8	1.6	0.4	0.3	2.4	5.5	14.5	30.7	55.4	294.1	
	Sucre Aasana	149.8	111.6	111.4	30.5	4.1	1.6	3.1	10.7	30.6	58.5	69.4	106.4	687.6	
	Sucre Senamhi	143.9	107.7	111.1	30.3	4.1	1.6	3.1	10.7	30.6	58.1	69.7	107.6	678.5	
	Talula / Taco Taco	144.3	103.1	100.3	27.8	4.5	0.9	1.8	9.1	24.5	43.1	50.5	89.9	599.8	
	Tarabuco	143.1	97.7	81.9	28.0	4.2	2.7	1.6	9.0	20.9	40.2	55.4	101.6	586.2	
	Tulima	152.2	124.9	92.7	32.7	6.8	4.6	4.2	10.0	18.2	44.0	58.3	108.1	656.7	
	Villa Abecia	70.2	56.0	40.4	5.3	2.1	0.7	0.5	1.0	2.0	11.3	23.2	50.2	262.8	
	Viña Quemada	93.5	75.7	76.0	22.2	1.6	1.5	1.1	4.6	16.9	33.2	41.8	84.2	452.4	
	Yamparec	120.3	100.2	76.4	17.9	3.7	1.4	1.6	8.4	21.4	38.5	43.7	78.2	511.6	
	Yotala	114.9	86.2	91.4	19.4	3.0	2.1	1.9	7.3	20.3	43.8	48.8	90.9	530.1	
	Cruce Ventilla	132.4	98.1	89.7	25.0	2.6	2.2	0.8	7.9	10.6	27.2	47.4	81.4	525.2	
	Departamento de Tarija	Aguayarcito	154.1	137.1	143.4	68.3	27.3	1.8	1.7	2.1	13.7	32.0	79.9	122.3	783.7
		Aguayrenda	221.4	196.0	196.4	120.4	41.3	8.4	5.8	4.4	16.5	41.6	104.5	155.1	1111.8
		Algarrobillas	148.7	117.8	128.4	64.3	20.2	5.5	2.7	2.7	8.3	32.9	83.3	127.4	742.3
		Alto de Cajas	89.1	86.0	75.2	42.6	5.6	4.6	2.8	3.6	4.0	17.9	57.7	93.0	482.0
		Bagual	133.5	122.0	123.1	33.0	30.6	2.5	0.7	5.4	15.5	45.1	113.3	191.3	815.9
		Barro Blanco	160.9	113.9	112.8	26.8	28.7	2.2	1.4	1.9	32.5	48.0	131.4	158.6	819.0
		Berey	138.0	124.2	130.5	52.6	11.0	6.7	3.7	5.2	6.7	35.6	90.9	111.9	717.0
		Caigua	189.6	176.2	155.4	114.4	35.0	11.4	5.3	7.2	13.2	41.7	118.8	172.6	1040.8
		Campanario	82.9	79.4	45.4	17.4	1.0	1.3	0.4	2.0	6.2	13.1	33.3	67.5	350.0
		Canto De Monte	134.8	114.0	75.9	29.4	20.7	2.2	1.0	1.5	17.8	35.0	108.9	120.4	661.7
		Crevaux	116.1	102.3	86.8	21.8	14.9	0.1	0.0	2.2	8.2	23.0	81.3	118.9	575.7
El Huayco		214.2	215.2	195.6	95.6	15.6	10.7	9.5	8.1	8.7	55.3	141.4	179.0	1148.9	
El Molino		141.3	129.5	79.3	22.5	2.4	1.3	1.4	7.9	4.6	18.5	52.5	118.9	579.9	
El Puente		74.0	61.0	43.6	10.3	0.6	0.8	0.2	2.0	3.9	21.3	34.7	55.5	307.8	
El Veinticuatro		139.4	146.4	86.5	31.6	16.0	2.7	1.2	0.4	13.9	48.3	71.8	117.5	675.6	
Esmeralda		108.3	84.6	117.7	47.0	15.6	15.4	3.2	6.6	2.7	18.4	77.9	90.6	588.1	
Ibibobo		89.5	105.8	78.8	15.3	10.4	3.8	1.6	4.2	10.1	22.1	57.1	93.6	492.3	
La Vertiente		148.8	133.2	119.7	65.6	21.8	7.6	3.7	6.6	9.8	35.6	96.5	131.3	780.1	
Leon Cancha		110.8	72.2	61.7	13.1	3.2	2.7	0.6	1.0	2.9	17.5	36.4	87.5	409.4	
Palermo		101.2	69.5	50.5	24.5	25.0	5.5	0.3	0.8	4.6	8.3	57.4	43.3	390.8	
Palmar Chico		219.8	181.2	195.8	88.7	25.3	7.7	3.7	4.1	12.8	34.1	116.0	168.4	1057.7	
Palmar Grande		146.5	127.4	135.7	63.6	18.6	3.5	2.1	6.0	6.2	23.0	94.5	133.8	760.8	
Palo Marcado		85.5	94.9	77.0	33.0	19.3	2.9	0.1	2.7	10.8	22.8	58.7	78.3	485.9	
Palos Blancos		154.7	115.9	119.5	42.7	9.0	3.1	1.0	3.1	10.4	33.8	74.1	121.1	688.4	
Puesto Margarita		104.6	78.7	66.8	21.4	6.1	5.2	2.2	1.8	11.5	34.2	49.7	82.4	464.5	
Sachapera		208.7	165.5	184.8	86.4	20.7	6.9	2.7	4.6	16.5	32.8	109.9	154.1	993.7	
Saladito Norte		185.2	146.7	141.9	73.5	16.8	6.5	4.3	7.4	10.3	27.0	83.3	128.1	831.0	
Sama Iscaya		103.5	79.7	60.7	10.7	1.0	0.0	0.6	2.9	4.2	17.2	39.0	85.2	404.7	
San Anton Iscayachi		80.2	74.3	52.8	10.3	1.6	0.3	0.5	4.7	5.9	14.1	33.4	63.6	341.4	
San Bernardo		122.2	85.2	112.7	36.5	19.9	6.1	8.7	10.4	4.3	19.3	59.7	73.8	558.8	
San Josesito		184.2	170.7	151.5	79.4	12.5	7.7	7.7	6.9	9.5	33.2	100.7	131.1	894.9	
Tiguipa		190.1	196.9	108.2	56.5	39.0	7.2	2.6	2.0	16.0	44.3	108.7	192.1	963.6	
Timboy		117.4	118.7	102.8	52.9	7.8	4.0	0.3	3.7	4.2	38.4	79.1	112.7	641.8	
Tojo	79.7	62.3	45.3	9.7	1.0	0.4	0.2	1.4	3.1	17.4	32.7	58.4	311.6		
Tuscal	101.5	114.8	79.0	24.1	20.9	1.6	0.6	2.5	10.4	31.5	72.9	124.3	584.0		
VillaMontes Aasana	169.0	140.2	131.9	88.5	22.8	8.0	3.5	9.4	10.0	31.4	77.3	129.1	821.2		
VillaMontes Senamhi	168.7	136.6	153.5	77.6	27.1	10.0	6.0	6.2	10.0	34.8	96.6	154.9	881.9		
ARC	La Quiaca	77.9	61.4	39.2	9.8	0.8	0.0	0.0	6.6	9.9	24.0	64.9	294.4		
	Yavi	45.5	48.1	43.9	8.1	0.0	0.8	0.0	0.2	1.5	8.1	19.0	40.9	215.9	

La figura 4.6 muestra el mapa de isoyetas anuales 1970-2000 para toda la Cuenca Alta del río Pilcomayo y regiones adyacentes. Este mapa fue elaborado en base a los valores medios anuales de las estaciones de la tabla 4.4 y de estaciones de apoyo situadas fuera de la cuenca. Fue trabajado en ArcView con ajuste manual, tomando en cuenta la orografía y comportamiento regional. Se observa que la precipitación supera los 1200 mm/año en la zona alrededor de El Palmar, ubicada en el tramo del Pilcomayo entre Viña Quemada y Villamontes en el departamento de Chuquisaca. Otro núcleo de precipitación se presenta en el extremo sur y lado este de la serranía del Aguaragüe, en la zona próxima a Yacuiba (estación situada fuera de la Cuenca Alta). Se observa también valores por encima de los 1000 mm/año en las subcuencas de algunos afluentes (Ingre, Ñacamiri) de la margen norte del Pilcomayo. Por contraste, en la margen sur del Pilcomayo y cerca de de Puesto Margarita, la precipitación se reduce hasta un mínimo de 500 mm/año.

**Figura 4.6: Isoyetas anuales en la Cuenca Alta del río Pilcomayo, periodo 1970-2000**



Fuente: Elaboración propia

Los valores mínimos se presentan en el extremo suroeste de la cuenca, en las cabeceras de la cuenca del río San Juan en Argentina, donde la precipitación apenas supera los 200 mm/año. Existe también un mínimo local en El Chilcar, cerca de Camargo. Gran parte del sector oeste de la cuenca, que pertenece al departamento de Potosí y las cuencas de los ríos Tumusla, Cotagaita y San Juan, presenta una precipitación por debajo de 300 mm/año. En la llanura chaqueña se observa que la precipitación disminuye al alejarse de la serranía del Aguaragüe y adentrarse en la llanura chaqueña en dirección al este, lo que hace suponer que esa serranía juega un rol orográfico.

#### 4.4 EVALUACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

Para las etapas posteriores del estudio y en particular, para la modelación, se requiere estimar la precipitación por subcuencas, en forma de series mensuales para todo el periodo de análisis. Para evaluar la precipitación espacial sobre una superficie definida existen varios métodos, empezando con el más simple, que es la media aritmética de los valores registrados en las estaciones en la subcuenca. Cada método tiene limitaciones, especialmente en zonas montañosas, donde puede existir una gran variación espacial de la precipitación frente a una densidad insuficiente de la red pluviométrica.

Por consideraciones prácticas se usó el módulo Spatial de Hydraccess para el cálculo de valores medios sobre una cuenca. Este módulo incorpora los métodos de media aritmética, polígonos de Thiessen, inverso de la distancia y recientemente, el de Kriging. Este módulo accede directamente a la base de datos y tiene una gran flexibilidad de cálculo. Por ejemplo, para el método de Thiessen calcula los coeficientes de peso de una manera dinámica, creando diversas combinaciones según la disponibilidad simultánea de datos en las estaciones próximas, para todo el periodo de análisis. Así, cuando un usuario modifica las coordenadas de alguna estación en Hydraccess se puede actualizar rápidamente la lluvia media sobre la cuenca. La figura 4.7 muestra una ventana del módulo Spatial, con los resultados obtenidos para una cuenca mediante los métodos de polígonos de Thiessen y de inverso de la distancia.

El módulo Spatial tiene la posibilidad (entre otras) de importar un archivo ArcView (shapefile) que represente los límites de la subcuenca y para el cálculo espacial de la precipitación, combinarlo con las coordenadas geográficas de las estaciones que se encuentran en la base de datos. Existe también la posibilidad de seleccionar de esa base las estaciones que se van a utilizar.

Considerando que la densidad relativa de la red pluviométrica de la cuenca es relativamente buena y que no se observa una variación espacial de la magnitud que se registra en los Yungas de La Paz y Cochabamba, se optó por el método de Thiessen para el cálculo de la precipitación en las subcuencas. La tabla 4.4 y la figura 4.8 muestran la precipitación media mensual y anual para las subcuencas e intercuencas definidas previamente. Las series completas fueron incorporadas a la base de datos Hydraccess y utilizadas en las siguientes etapas del estudio.

Figura 4.7: Ventana de resultados del módulo Spatial de Hydraccess

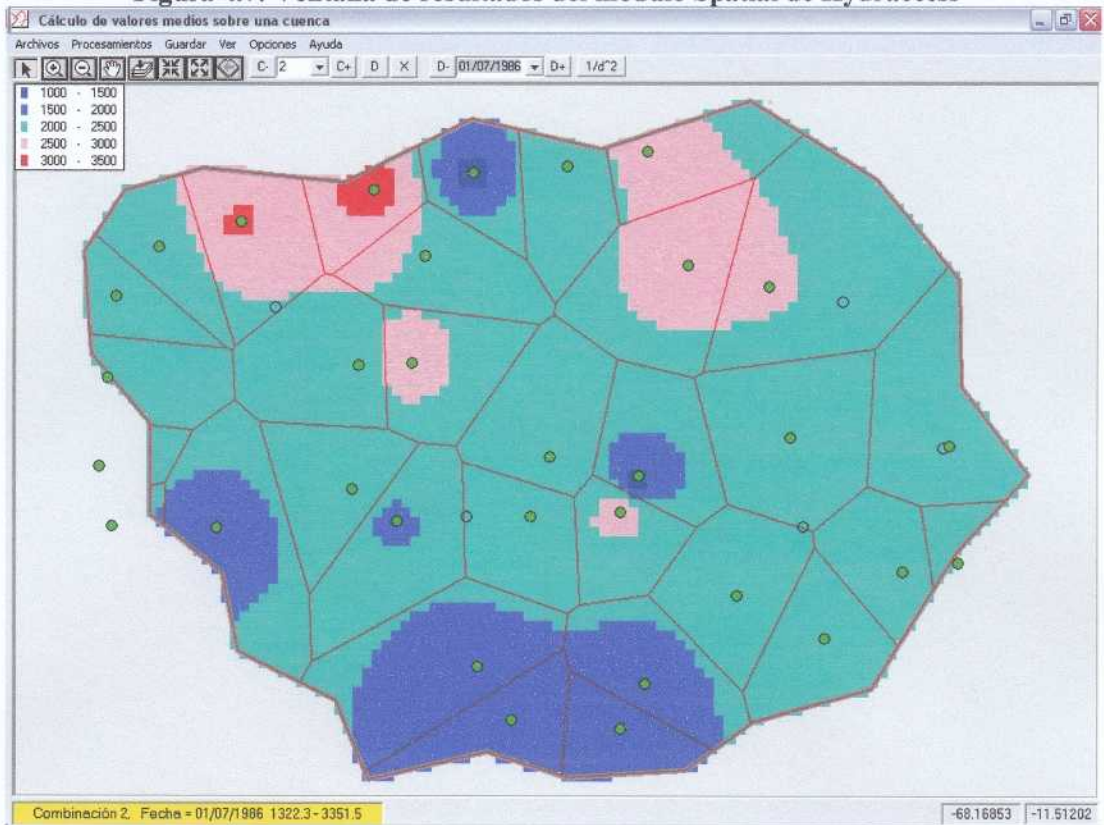
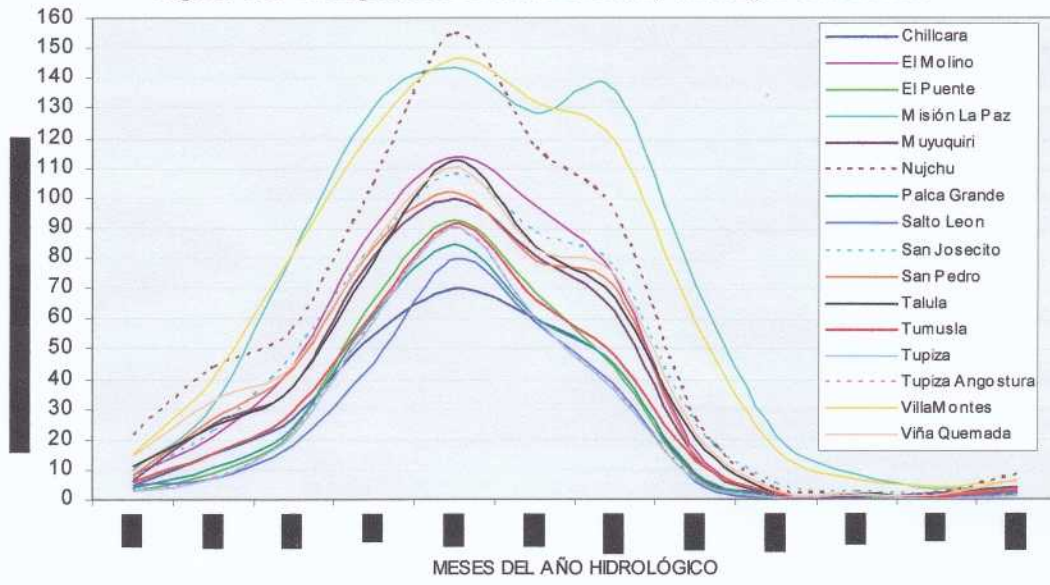


Tabla 4.4: Precipitación media mensual y anual por subcuenca

Nº	Sub Cuenca (Est. Hidrométri.)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	Njchu	154.9	116.6	95.0	266	3.5	26	1.9	8.4	21.9	44.0	56.6	105.3	637.4
2	Talula	112.8	83.9	67.3	20.4	1.9	1.6	1.1	6.2	11.0	24.7	37.3	79.3	447.5
3	Víña Quemada	110.5	83.5	75.0	22.0	2.6	1.8	0.9	6.5	14.6	32.5	44.3	85.1	479.4
4	Mjuquiri	100.0	81.3	62.5	14.0	1.1	0.6	1.6	3.9	6.3	25.0	37.5	81.0	409.9
5	San Pedro	102.4	79.2	70.9	14.6	2.3	1.4	1.1	3.4	8.3	27.0	43.5	84.2	438.3
6	Salto Leon	80.0	59.0	37.8	5.8	0.8	1.6	0.4	2.4	4.5	7.0	18.0	45.7	262.8
7	Tumusla	91.9	66.7	48.1	12.8	1.6	1.1	0.4	2.9	5.7	15.5	29.2	62.7	338.4
8	Palca Grande	84.5	60.7	45.2	9.0	0.9	1.0	0.2	1.9	3.9	10.6	23.8	61.6	303.4
9	El Molino	113.7	97.6	74.2	16.3	1.9	0.5	0.6	3.2	8.2	21.3	44.5	90.2	472.2
10	Tupiza	90.6	59.9	36.3	6.2	0.4	1.0	0.1	1.0	3.1	6.9	21.7	59.7	286.9
11	La Angostura	89.9	59.8	36.6	6.3	0.4	1.0	0.1	1.1	3.2	7.1	22.3	59.4	287.3
12	El Puente	92.8	68.7	43.5	7.4	1.0	0.5	0.2	1.2	3.0	8.8	22.5	66.5	316.0
13	Chilcara	69.8	60.0	45.1	8.3	1.6	0.7	0.5	1.6	4.9	15.0	27.1	54.9	289.6
14	San Josecito	107.8	88.5	77.1	25.3	5.5	2.5	1.4	2.6	7.3	22.9	48.0	84.5	473.5
15	Villa Montes	146.5	131.9	119.0	59.3	16.3	6.4	4.3	6.1	15.4	40.3	81.5	123.2	750.2
16	Misión La Paz	143.5	128.6	136.0	72.0	21.8	8.2	3.7	4.4	9.7	31.6	81.5	130.6	771.5
	MAXIMO	154.9	131.9	136.0	72.0	21.8	8.2	4.3	8.4	21.9	44.0	81.5	130.6	771.5
	MINIMO	69.8	59.0	36.3	5.8	0.4	0.5	0.1	1.0	3.0	6.9	18.0	45.7	262.8

(Fuente: Elaboración propia en base a datos reconstituidos 1970-2000)

Figura 4.8: Precipitación media mensual y anual por subcuenca



(Fuente: Elaboración propia en base a datos reconstituidos 1970-2000)

## Capítulo 5

### EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua en estado líquido se transforma a su estado gaseoso (vapor de agua), lo que requiere de aporte externo de energía. La evapotranspiración (ET) es la cantidad de agua que se transfiere de la superficie terrestre (suelo y cuerpos de agua) a la atmósfera. Se compone de evaporación del agua líquida o sólida y de transpiración de las plantas. La evapotranspiración potencial (ETP) es la cantidad de agua que, si estuviera disponible, sería evapotranspirada desde una superficie definida. El proceso y variables necesarias para estimar este parámetro a nivel puntual y espacial serán descritos en el desarrollo del presente capítulo. La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que realmente pasa a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración. Su valor máximo sería la evapotranspiración potencial. La ETR es uno de los tres componentes del balance hídrico y será evaluada en los capítulos siguientes.

#### 5.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

##### 5.1.1 Evaporación en tanque

La evaporación medida en tanque evaporimétrico concentra la mayor parte de variables que intervienen en el fenómeno físico de evapotranspiración y aparenta ser una estimación confiable para la determinación de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, los efectos del instrumento de medición obligan a usar un coeficiente de ajuste (cuyo valor es generalmente menor a 1) para cada tanque en particular y un coeficiente para cada tipo de cultivo o vegetación (UNESCO-ROSTLAC, 1982). Además, el número de estaciones de la red meteorológica de SENAMHI que cuenta con mediciones en tanque (tipo A) es muy pequeño y es aún menor el de estaciones que disponen de lisímetro, método que proporciona datos más precisos.

La tabla 5.1 muestra los valores de evaporación media mensual y anual medida en tanque evaporimétrico para las estaciones meteorológicas que cuentan con registros para un periodo considerable y la tabla 5.2 los valores anuales para estaciones de apoyo con registros cortos. Los valores extremos de algunas estaciones, como Crevaux y Palmar Grande, probablemente se deben a problemas de medición o transcripción y deben ser usados con cuidado. Los datos de la tabla 5.1 servirán para comparar y validar los otros métodos.

**Tabla 5.1: Evaporación media en tanque, a nivel mensual y anual (mm)**  
Cuenca Alta del Río Pilcomayo

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
POTOSÍ	13 Chinoli	123	109	122	127	132	126	140	156	160	179	157	145	1675
	28 Potosi Senamhi	92	83	104	117	124	123	129	129	141	142	139	133	1455
	29 Puna (Villa Talavera)	114	104	116	108	111	105	113	132	135	154	142	129	1464
	41 Tarapaya	144	119	133	136	138	111	111	132	172	178	167	175	1716
47 Tupiza	146	133	142	144	125	111	124	146	179	206	209	179	1844	
CHUQUISACA	57 Chilcara	313	284	295	263	208	162	179	235	273	313	329	281	2658
	58 Culpina	167	148	149	162	168	157	163	180	201	213	201	191	2099
	76 San Roque	146	134	137	114	98	87	89	105	124	152	141	152	1477
	78 Sucre Senamhi	144	126	138	131	139	130	142	159	173	181	172	161	1797
	79 Talula / Taco	170	147	150	150	153	146	162	186	199	218	205	194	2082
84 Yotala (Villa Carmen)	169	136	142	126	119	106	117	146	167	186	184	183	1781	
TARIJA	97 Crevaux	265	241	282	252	264	180	161	210	289	276	317	300	3037
	104 La Vertiente	65	64	93	54	45	40	57	68	51	58	71	78	742
	108 Palmar Grande	65	63	73	51	40	27	39	50	57	70	68	73	677
	111 Puesto Margarita	192	163	148	105	104	96	124	171	177	231	196	173	1880
	115 San Antonio (Iscaj)	131	106	124	139	147	141	148	153	153	158	141	137	1676
	122 VillaMontes Senamhi	155	135	133	105	83	75	100	128	161	203	190	160	1627

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

**Tabla 5.2: Evaporación media anual en tanque [ mm ]**

ESTACION			ANUAL	ESTACION			ANUAL
P.	141	Uyuni	1722	TARIJA	196	Canasmoro	1577
CHUQUIS	303	Alcantari	2124		198	Cañas	1178
	144	Azurduy	1550		204	Chocloca	1302
	150	El Salvador	1445		206	Entre Rios	1536
	156	Monteagudo	1225		227	San Andres	1340
	172	Zudañez	1426		228	San Jacinto	1854
O	191	Pazña	1896		233	Tarija Senamhi	1576

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

### 5.1.2 Métodos indirectos

Cuando no se poseen mediciones directas de la evaporación se recurre a métodos indirectos, generalmente fórmulas empíricas basadas en la ley de Dalton o en los factores meteorológicos que intervienen en el proceso, como temperatura del aire, humedad, radiación solar, horas del sol, velocidad del viento, presión atmosférica y otros. Estos métodos difieren en sus requerimientos de información y los principios físicos en que se basan.

Algunas de los métodos más difundidos para estimar la ETP son: Turc, Thornthwaite-Mather (1944), Blaney-Criddle, Gras y Christiansen (desarrollado para superficies regadas), Penman (1965) y Avellán. La elección de un método es muy sensible respecto a la disponibilidad de información.

Las fórmulas de Turc, Thornthwaite-Mather y Blaney-Criddle se basan en la temperatura para el cálculo de la ETP, lo cual es al mismo tiempo, una ventaja y una debilidad. La fórmula de Thornthwaite y Mather se utilizó para el Balance Hídrico de Bolivia (1992). Sin embargo, varios estudios, como el de Herbas (1987), muestran que el método subestima grandemente la

ETP en zonas montañosas tropicales. Algunos autores (Zonisig, 2001) han intentado superar ese problema aplicando un coeficiente de corrección por altitud, obtenido empíricamente en base al método de Penman, pero las limitaciones de este enfoque sugieren que solo puede usarse para una aproximación inicial.

Para el Balance Hídrico Microregional de Bolivia se definió aplicar el método de Penman, que tiene una base físico-teórica y es recomendado por la OMM. La fórmula de Penman está basada en la combinación del balance de energía y la ecuación de transporte aerodinámico. Requiere de la medición de varios parámetros climáticos, lo que limita su uso hasta cierto punto, pero se ha encontrado que proporciona resultados consistentes y confiables para las diversas regiones del país.

Las principales suposiciones del método son que prevalezca un flujo de energía de estado permanente y que los cambios temporales en el almacenamiento del calor en el agua no sean significativos. Estas suposiciones limitan su aplicación a intervalos de tiempo diarios o mayores y a situaciones que no involucren gran almacenamiento de calor (ej. lagos grandes). La fórmula utilizada es:

$$E = \frac{\frac{\Delta \cdot H + E_a \cdot \gamma}{\Delta + \gamma}}{\frac{\Delta + \gamma}{\gamma}} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot H + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (5.1)$$

Donde:

- E Evaporación del periodo en mm  
 $\Delta/\gamma$  Se determina en función a la temperatura media diaria. Este cociente adimensional es una función de la temperatura y de la altitud que se debe multiplicar por el cociente  $P_o/P_z$  ( $P_o$  = presión al nivel del mar y  $P_z$  = presión a la altitud del lugar).  
 $\gamma$  Constante psicrométrica de valor 0.65  
 $\Delta$  Pendiente de la curva de presión de saturación "ee", en función a la temperatura del aire, en el punto  $\theta = \theta_{\text{AIRE}}$

$$\Delta = 1.3356 \cdot e_s \cdot \frac{17.27 \cdot 237.3}{(T + 237.3)^2} \quad (5.2)$$

H Balance de energía diaria, calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$H = \frac{R_o}{59} \cdot \left( 0.24 + 0.58 \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot (1 - \alpha) - \frac{\sigma \cdot \theta^4}{59} \cdot (0.56 - 0.0913 \cdot \sqrt{e}) \cdot \left( 0.1 + 0.9 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (5.3)$$

Donde:

- R<sub>0</sub>: Radiación solar diaria en el límite superior de la atmósfera, en (cal/cm<sup>2</sup>-día), estimada en función de la latitud y época del año (Tabla 5.3)
- n Número de horas de brillo solar, aproximado hasta la décima, obtenido de los heliógrafos
- N Número máximo de horas de brillo solar aproximado hasta la décima, en función de la latitud del lugar (Tabla 5.4.)
- α Albedo de la superficie. Está en función al tipo de suelo, varia de 0 a 1 (tabla 5.5)
- θ : Temperatura media ambiente (aire) en (°K), θ = (T<sub>[°C]</sub> + 273)
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann, igual a 1.18\*10<sup>-7</sup> (cal / cm<sup>2</sup>-día)
- e : Valor medio de la presión parcial del vapor de agua, en [mmHg], calculado con la

ecuación: 
$$e = \frac{H_{RM}}{100} \cdot e_s \tag{5.4}$$

Siendo: H<sub>RM</sub> Humedad relativa media en [%]  
 e<sub>s</sub> Presión de vapor de saturación (en función de la temperatura media ambiente)

E<sub>a</sub> Poder evaporante del aire en función del viento y del gradiente de la presión del vapor, (m/día), calculado a partir de la expresión:

$$E_a = 0.3473 \cdot \left( 1 + 0.4 \cdot \left( \frac{10}{H_v} \right)^{5.4} \cdot V \right) \cdot (e_s - e) \tag{5.5}$$

Donde:

H<sub>v</sub> : Altura a la que se mide la velocidad del viento en (m), (se consideró 2.0 m)

V: Velocidad media del viento en (m/s)

**Tabla 5.3: Radiación Solar R<sub>0</sub> en el límite superior de la atmósfera (cal/cm<sup>2</sup>-día)**

LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10 S	920	920	873	802	720	684	702	767	850	897	915	920
12 S	938	920	867	791	696	661	684	755	838	897	926	932
14 S	950	926	861	773	679	637	661	738	838	903	938	944
16 S	956	932	856	755	661	614	637	720	826	903	944	956
18 S	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
20 S	979	932	838	720	614	566	596	684	802	897	962	985
22 S	991	932	826	702	590	543	572	661	791	897	968	991
24 S	991	932	814	684	566	519	549	643	779	897	968	1003

Fuente: UNESCO (1982)

**Tabla 5.4: Medias mensuales de la duración astronómica del día N (horas)**

LAT. SUD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
10	12.60	12.40	12.10	11.90	11.70	11.50	11.60	11.80	12.00	12.30	12.60	12.70
12	12.70	12.50	12.20	11.80	11.60	11.40	11.50	11.70	12.00	12.40	12.70	12.80
14	12.73	12.44	12.06	11.67	11.35	11.19	11.26	11.54	11.91	12.30	12.64	12.81
16	12.84	12.50	12.06	11.62	11.25	11.06	11.15	11.47	11.89	12.34	12.73	12.93
18	12.95	12.57	12.07	11.57	11.15	10.94	11.04	11.40	11.88	12.39	12.83	13.06
20	13.06	12.64	12.08	11.51	11.04	10.81	10.92	11.33	11.87	12.43	12.93	13.19
22	13.18	12.71	12.09	11.46	10.94	10.68	10.80	11.25	11.85	12.48	13.03	13.32
24	13.30	12.78	12.10	11.40	10.83	10.54	10.68	11.18	11.84	12.53	13.14	13.45

Fuente: UNESCO (1982)

Tabla 5.5: Albedo  $\alpha$  en función al tipo de suelo

Tipo de suelo	$\alpha$	Tipo de suelo	$\alpha$	Tipo de suelo	$\alpha$
Agua	0.02 - 0.06	Cereales	0.10 - 0.25	Nieve	0.40 - 0.90
Arcillas húmedas	0.02 - 0.08	Césped Verde	0.26	Pastos	0.26
Arcillas Secas	0.16	Césped seco	0.19	Pastos y cultivos	0.22
Arenas Claras	0.35 - 0.40	Cultivos	0.18	Rocas	0.13 - 0.15
Arenas Oscuras	0.35	Hielo	0.36 - 0.50	Tierras inundables	0.35
Bosques de pinos	0.10 - 0.14	Lechugas	0.22	Zonas urbanizadas	0.15 - 0.25
Bosques frondosos	0.18				

## 5.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS

A continuación se describe por separado las principales variables que requiere el método de Penman.

### 5.2.1 Temperatura media ambiente

La temperatura es el estado calorífico o nivel térmico del calor en un cuerpo. “Mediante la temperatura se expresa numéricamente el efecto que en los cuerpos producen el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida. Interesa especialmente, la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre. El aire se calienta o enfría a partir del suelo por distintos métodos de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica” (Herbas, 1987).

La temperatura varía de acuerdo a la ubicación geográfica. En la región andina y subandina, la variación diaria de temperatura tiene un ligero retraso respecto a la variación diaria de la radiación solar. La temperatura comienza a subir poco después de la salida del sol, alcanza un máximo de una a tres horas después de alcanzar el sol su cenit y baja durante la noche hasta alcanzar un mínimo hacia la salida del sol.

La tabla 5.6 muestra la temperatura media ambiente mensual y anual para el periodo de registro en las estaciones que miden este parámetro, situadas dentro de la cuenca. La columna Perfil indica el grupo regional térmico al que pertenece (perfil térmico). La tabla 5.7 muestra la temperatura media anual para las estaciones de apoyo (fuera de la cuenca) con periodo de registro aceptable.

Tabla 5.6: Temperatura media ambiente mensual y anual en (°C)

	ESTACION	Altura [msnm]	Pefil	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
POTOSÍ	4	Atocha	3654	1	13.9	13.9	12.5	10.0	7.2	4.3	3.9	6.1	8.6	11.5	13.6	14.9	10.0
	5	Calcha	2850	-	18.5	18.2	17.8	16.9	13.3	11.3	10.9	13.4	15.8	17.9	18.4	19.0	16.0
	7	Challviri	4095	2	9.9	9.8	9.6	8.8	6.9	5.5	5.4	7.0	8.5	9.9	10.2	10.4	8.5
	8	Chaqui	3550	2	11.9	11.8	11.3	11.3	9.9	9.0	10.0	10.0	10.9	12.0	12.4	12.1	11.2
	12	Chico Chico	3480	2	12.2	12.1	11.5	11.7	10.7	8.6	8.8	9.9	10.7	12.0	12.7	12.7	11.1
	13	Chinoli	3450	2	13.3	12.9	13.0	12.3	10.6	9.0	8.9	10.2	11.8	13.1	13.7	13.7	11.9
	15	Cotagaita	2690	1	20.1	19.8	20.4	18.3	13.6	10.5	10.2	12.4	14.6	19.5	19.3	20.3	16.6
	17	Escara	2870	1	17.3	17.1	16.5	15.4	12.6	10.6	10.4	12.7	14.3	16.0	17.1	17.3	14.8
	300	Millares	2300	2	21.5	21.0	21.6	21.3	19.6	17.2	16.2	18.6	20.2	21.5	22.0	21.8	20.2
	23	Mojo	3460	1	14.9	14.5	14.2	12.6	9.3	7.2	7.0	8.9	11.1	13.4	14.8	15.2	11.9
	24	Mosoj Llajta	2800	1	19.1	19.0	18.1	16.1	12.0	9.6	10.2	11.8	14.8	17.9	19.0	19.6	15.6
	25	Oploca	3121	1	17.6	17.2	16.8	15.0	12.3	10.2	10.2	11.9	14.4	16.7	18.0	17.7	14.9
	301	Otavi	3380	2	14.3	14.5	14.2	13.6	10.3	8.6	9.1	10.7	12.2	14.3	15.1	14.9	12.7
	26	Palca Higueras	2550	2	21.2	21.1	21.1	19.4	17.0	14.5	15.0	16.7	18.7	20.5	21.7	21.6	19.0
	27	Potosi Aasana	4100	2	9.1	9.0	8.7	7.8	6.1	4.6	4.2	5.8	7.1	8.6	9.1	9.5	7.5
	28	Potosi Senamhi	3860	2	10.7	10.5	10.6	9.7	7.8	6.1	5.7	7.1	8.4	10.3	11.0	11.0	9.0
	29	Puna (Villa Talavera)	3290	2	14.0	13.7	13.4	12.6	10.8	9.2	8.8	10.2	11.9	13.4	14.0	14.1	12.1
	31	Ravelo	3200	2	14.3	13.9	13.6	12.6	11.1	9.5	9.5	10.8	12.3	13.9	14.2	14.2	12.5
	33	Salto Leon	3200	2	16.8	17.8	16.6	14.8	11.7	9.0	9.7	8.7	12.0	13.9	15.7	17.0	13.6
	34	Samasa	3650	-	13.2	12.8	12.7	12.7	11.4	10.1	9.8	11.0	12.3	13.7	13.9	14.1	12.3
	36	San Jose Pampa G	3000	1	17.4	17.3	17.3	15.9	13.2	11.5	11.9	13.5	15.0	17.2	18.6	18.9	15.6
	41	Tarapaya	3340	2	14.9	14.5	13.8	12.3	10.1	7.8	7.9	9.7	11.4	13.9	15.0	15.7	12.2
	44	Tinquipaya	3200	2	15.2	15.3	15.2	14.7	12.9	10.2	10.0	12.0	13.8	15.2	15.8	15.7	13.8
	45	Tomave	3920	2	13.0	11.0	10.0	10.5	7.5	6.6	5.7	7.5	6.9	9.9	10.2	11.4	9.2
	46	Tumusla	2580	2	21.1	20.8	19.8	19.1	15.2	12.6	12.2	14.8	17.4	20.0	21.0	21.3	18.0
	47	Tupiza	2952	1	17.5	17.4	17.1	15.0	11.4	8.5	8.5	11.3	14.2	16.6	17.8	18.0	14.5
	48	Turuchipa	2360	2	20.9	20.9	21.7	20.1	18.6	17.4	17.9	18.9	20.0	20.8	21.1	21.4	20.0
	49	Villazón	3443	1	15.4	15.2	14.4	12.5	8.2	4.6	4.1	7.5	10.2	13.1	15.0	15.2	11.3
	50	Vítichi	3020	2	16.1	15.9	15.4	15.0	13.3	11.6	13.4	13.6	15.2	16.5	16.5	15.4	14.8
	51	Yocalla	3420	2	14.5	14.2	14.3	13.4	11.0	9.2	9.0	10.9	12.7	14.4	15.3	15.2	12.6
	52	Yura	3375	2	16.1	15.8	15.3	13.5	10.7	8.9	8.6	10.1	11.7	14.5	16.2	16.5	13.2
	CHUQUISACA	54	Arpaja Alta	3190	1	14.3	13.8	15.1	13.6	11.8	10.0	9.7	11.1	12.3	13.6	13.9	14.5
55		Cachimayu	2400	2	18.9	27.9	18.3	18.0	15.9	13.9	13.1	15.3	16.8	18.8	19.0	19.7	18.0
56		Camargo	2408	-	23.0	23.2	23.1	21.7	18.6	15.8	15.9	19.3	21.5	23.0	23.3	24.1	21.2
57		Chilcara	2242	-	21.7	21.5	21.1	20.0	17.8	15.2	15.2	16.9	18.6	21.4	21.8	21.9	19.4
58		Culpina	3150	1	14.2	13.8	13.9	13.3	11.0	9.4	8.9	10.3	11.3	13.5	14.1	14.5	12.4
62		La Torre	2420	-	21.0	20.6	20.4	19.9	17.1	14.7	14.3	16.7	18.6	20.6	21.1	21.5	18.9
64		Machareti	660	1	26.4	25.5	24.7	21.6	19.1	17.1	16.8	20.5	21.1	24.3	25.7	26.3	22.4
67		Ñujchu	2398	2	21.3	20.7	19.8	19.4	16.8	14.6	14.8	17.1	18.5	19.8	21.0	21.0	18.6
74		San Lucas	3000	2	17.1	17.3	17.4	16.7	14.1	12.1	12.4	13.5	14.8	16.4	16.9	17.1	15.5
76		San Roque	2550	2	20.5	19.8	19.8	18.0	15.0	13.2	12.5	14.7	16.8	20.1	21.3	21.6	17.8
77		Sucre Aasana	2903	2	15.7	15.1	15.2	14.8	13.7	12.6	12.2	13.4	14.4	15.7	16.0	16.1	14.6
78		Sucre Senamhi	2890	2	16.3	15.9	16.0	15.3	14.2	12.8	12.5	13.7	15.1	16.3	16.7	16.5	15.1
79	Talula / Taco	2700	2	17.6	17.3	17.1	16.9	15.2	13.9	13.6	15.1	16.2	17.8	18.3	18.3	16.4	
80	Tarabuco	3284	2	13.0	13.0	13.1	12.8	12.5	11.2	10.8	11.7	12.5	13.6	13.7	13.5	12.6	
84	Yotala (Villa Carmen)	2511	2	18.8	18.5	18.2	17.5	15.2	13.5	13.7	15.3	17.0	18.5	19.2	19.3	17.1	
TARIJA	87	Aguayarcito	400	1	28.1	26.7	26.0	23.0	19.8	18.7	17.5	20.8	23.3	26.3	26.7	27.7	23.7
	97	Crevaux	302	1	27.9	25.8	25.9	23.4	20.7	18.8	17.7	20.0	22.8	25.5	27.3	27.0	23.6
	99	El Puente	2345	-	22.6	22.2	22.2	20.6	16.9	13.9	13.4	15.9	19.1	21.4	22.5	22.6	19.5
	104	La Vertiente	348	1	27.1	26.5	25.6	22.5	20.3	17.5	16.9	20.0	23.3	26.4	26.7	27.9	23.4
	108	Palmar Grande	467	1	26.4	26.0	25.1	22.2	19.0	17.3	16.7	18.8	21.7	25.8	26.0	26.5	22.6
	111	Puesto Margarita	485	1	28.1	27.6	25.7	22.9	20.3	18.2	19.2	20.6	22.8	26.6	27.7	28.0	24.0
	115	San Antonio (Iscaj)	3440	1	11.7	11.9	12.0	11.4	10.5	9.6	9.3	9.8	10.3	11.8	11.9	11.9	11.1
	121	VillaMontes Aasana	500	1	26.9	25.7	25.1	22.4	19.9	16.7	16.8	19.3	21.7	25.4	26.4	27.4	22.8
122	VillaMontes Senamhi	340	1	27.4	26.6	25.6	22.8	20.2	17.5	18.0	20.8	23.1	26.1	27.1	27.5	23.6	

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

Tabla 5.7: Temperatura media anual en (°C) en estaciones de apoyo

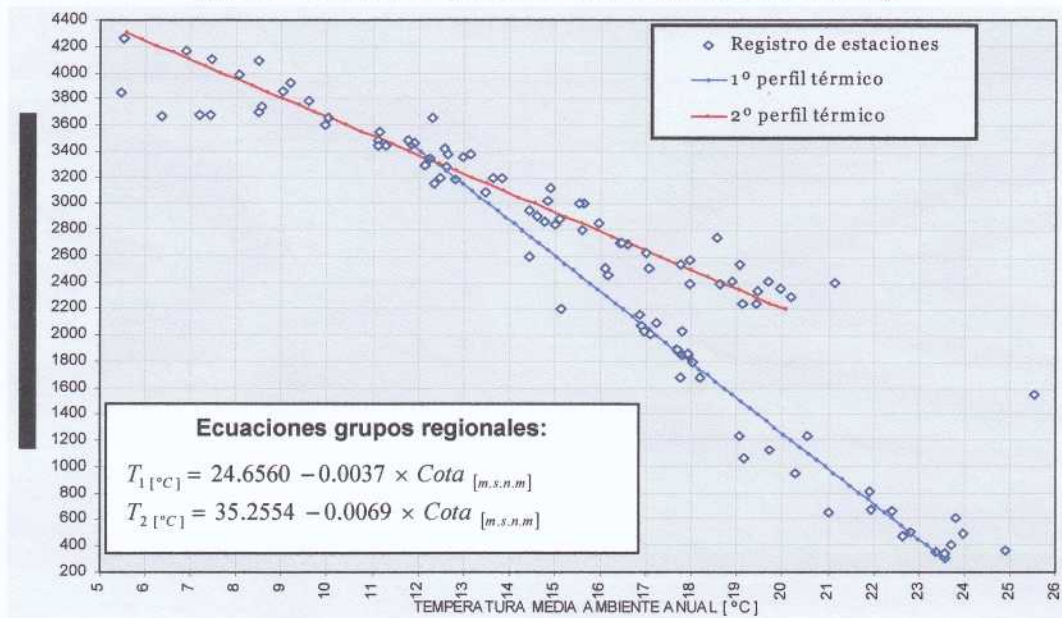
	ESTACION	Altura [m.s.n.m]	Pefil	ANUAL		ESTACION	Altura [m.s.n.m]	Pefil	ANUAL		
POTOSÍ	125	Calcha de Lipez	3670	-	7.2	TARIJA	193	Angostura	1680	1	18.2
	126	Colcha K	3780	-	9.6		194	Calamuchita	1680	1	17.8
	127	Colquechaca	4170	2	6.9		196	Canasmoro	2080	1	16.9
	128	Julaca	3665	-	6.4		198	Cañas	2030	1	17.0
	129	Laguna Colorada	4278	2	1.8		204	Chocloca	1800	1	18.0
	130	Macha	3480	2	11.8		206	Entre Rios	1230	1	19.1
	302	Mojo Torillo	3360	2	13.0		209	Itau	950	1	20.3
	131	Ocuri	3980	2	8.1		211	Juntas	1900	1	17.7
	134	Río Mulatos	3850	-	5.5		212	Los Galpones	365	1	24.9
	135	San Agustín	3675	-	7.4		216	Padcaya	2010	1	17.1
	137	San Pedro de Buena V	2743	-	18.6		224	Salinas	1060	1	19.2
	138	San Pablo de Lipez	4260	2	5.5		227	San Andres	1900	1	17.7
	139	Toro Toro	2700	2	16.5		228	San Jacinto	1850	1	17.9
	140	Uncia	3600	2	9.9		232	Tarija Aasana	1855	1	17.8
141	Uyuni	3695	2	8.5	233	Tarija Senamhi	1860	1	17.9		
CHUQUISACA	303	Alcantari	3084	2	13.5	237	Yacuibá AASANA	644	1	21.0	
	144	Azurdúy	2600	2	14.4	238	Yesera Norte	2200	1	15.1	
	150	El Salvador	670	1	21.9	OR	191	Pazña	3740	2	8.5
	304	Escana	2630	2	17.0	CBBA	173	Aiquile	2250	2	19.1
	153	La Madonna	2840	2	15.0	175	Mizque (Maira)	2035	-	17.8	
	156	Monteagudo	1230	1	20.5	177	Puente Arce	1550	-	25.5	
	157	Muyupampa (Ibope	1130	1	19.7	SC	183	Camiri (AASANA)	810	1	21.9
	159	Padilla	2102	-	17.2	190	San Antonio	600	1	23.8	
	165	Redención Pampa	2460	-	16.2						
	168	Tarvita	2420	2	19.7						
	171	Villa Serrano	2160	-	16.9						
	172	Zudáñez	2510	2	16.1						

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

La información térmica existente fue utilizada tanto para el cálculo de la ETP como para la obtención del mapa de temperaturas. Para este último se obtuvieron perfiles térmicos a nivel anual, es decir se estableció una relación entre la temperatura media anual y la altitud de la estación, mediante regresión. La figura 5.1 muestra esos perfiles en base a todos los datos disponibles, que permiten identificar claramente dos grupos regionales. La correlación es muy alta para las dos ecuaciones ( $r^2=0.953$  y  $r^2=0.942$ , respectivamente), lo que evidencia que la altitud es el factor más significativo y que el comportamiento es consistente y homogéneo para ambos grupos.

El primer grupo comprende todas las estaciones por debajo de los 2200 msnm, que incluye toda la región del Chaco. Incluye también estaciones entre 2200 y 3000 msnm situadas en el sector sur de la Cuenca Alta. La ecuación indica que el gradiente térmico es moderado ( $0.37$  °C/100 m) y que la temperatura base (a una altitud de 0) es de  $24.65$  °C en toda la subregión. El segundo grupo comprende estaciones ubicadas en su mayoría en el sector noroeste de la cuenca, por encima de los 2200 msnm, así como estaciones cordilleranas del sector oeste. Este grupo presenta un fuerte gradiente térmico ( $0.69$  °C/100 m) y una alta temperatura base ( $35.2$  °C). La ecuación está fuertemente influenciada por un grupo de estaciones de valle, entre 2200 y 2800 msnm, que presentan temperaturas medias altas en relación a su altitud. En el otro extremo, las estaciones por encima de los 3800 msnm muestran un comportamiento más próximo a las estaciones del Altiplano Sur, situadas al Oeste.

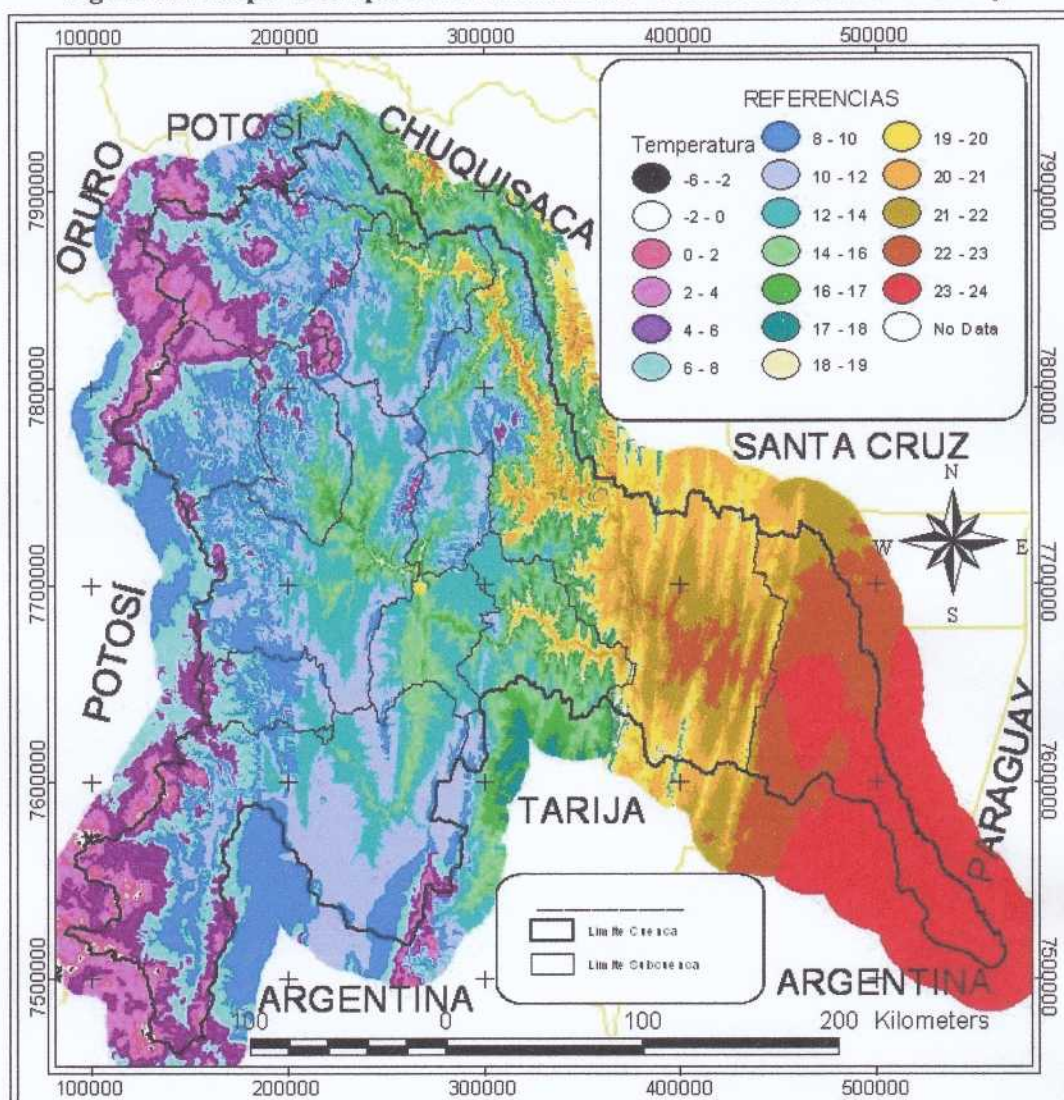
Figura 5.1: Perfiles térmicos - Cuenca Alta del río Pilcomayo



Fuente: Elaboración propia

Se combinó las dos relaciones temperatura-altitud con un modelo digital de elevaciones para obtener un mapa de temperatura en formato raster para toda la cuenca (figura 5.2). Para obtenerlo, se definió la región correspondiente a cada ecuación (por ejemplo, el perfil 2 se aplica solamente por encima de los 2200 msnm) y se aplicó las herramientas de álgebra de mapas disponibles existentes en ArcView. En la figura 5.2 se identifican las temperaturas más bajas sobre la región montañosa y las más altas en la región del Chaco. El mapa resultante muestra la temperatura media anual en toda la cuenca, con mayor precisión y detalle que un mapa tradicional de isotermas.

Figura 5.2: Mapa de temperatura media anual - Cuenca Alta del río Pilcomayo



Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

### 5.2.2 Humedad relativa

La atmósfera contiene cantidades variables de agua en forma de vapor. La humedad absoluta se define como el peso en gramos del agua contenida en un metro cúbico de aire. El contenido de agua en la atmósfera depende, principalmente, de la temperatura. Cuanto más caliente está una masa de aire, mayor es la cantidad de vapor de agua que puede retener. En contrapartida, a temperaturas bajas puede almacenar menos vapor de agua. Cuando una masa de aire caliente se enfría, por la causa que fuere, se desprende del vapor excedente en forma de precipitación.. Es de más interés práctico conocer cuánto vapor de agua existe expresado como porcentaje de la cantidad máxima que puede contener el aire saturado a una determinada temperatura,

variable que se conoce como humedad relativa. La humedad relativa es un indicador del grado de saturación del aire, de la magnitud de la evaporación, transpiración y de la probabilidad de lluvia convectiva. Se mide con psicrómetro ó termómetro de bulbo húmedo.

La tabla 5.8 muestra los valores de humedad relativa media mensual y anual, para estaciones meteorológicas de la cuenca incluidas en la base de datos, que cuentan con registros mensuales para un periodo considerable y la tabla 5.9, los valores medios anuales en estaciones meteorológicas de apoyo.

**Tabla 5.8: Humedad relativa media mensual y anual (%), Cuenca Alta del río Pilcomayo**

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
POTOSI	5 Calcha	60.8	60.0	60.2	56.0	48.3	47.9	49.0	47.8	44.5	48.2	49.6	53.0	52.1
	8 Chaqui	58.4	56.0	53.9	40.8	25.2	22.0	23.3	27.7	34.9	40.6	43.3	48.4	39.5
	12 Chico Chico	71.6	71.1	74.6	65.8	57.4	51.9	53.8	56.1	58.5	58.5	60.2	70.8	62.5
	13 Chindi	65.5	68.2	66.6	58.7	50.7	45.5	45.8	47.4	50.0	54.1	57.3	62.2	56.0
	17 Escara	47.0	46.6	46.8	38.3	33.5	34.6	32.6	31.6	32.0	35.8	39.4	41.4	38.3
	23 Mojo	58.8	59.6	55.9	44.5	37.0	37.8	35.8	34.8	38.4	44.2	47.5	53.3	45.6
	24 Mosoj Llajta	61.2	50.2	49.6	33.7	30.7	36.7	34.0	35.7	32.3	35.8	36.7	38.0	39.5
	25 Oploca	58.4	57.7	56.4	48.5	43.1	40.3	37.8	37.1	37.8	41.0	43.9	51.3	46.1
	26 Palca Higuera	50.8	49.2	46.7	40.6	35.2	37.8	37.1	35.1	33.9	38.7	45.3	46.6	41.4
	27 Potosi Aasana	67.1	67.5	66.6	53.6	41.6	41.7	43.0	42.0	43.1	48.0	50.8	56.8	51.8
	28 Potosi Senamhi	57.8	57.6	55.2	41.6	30.8	30.8	28.8	31.1	32.2	37.8	44.1	52.4	41.7
	29 Puna (Villa Talavera)	60.4	60.7	60.8	49.6	33.3	30.1	32.1	33.9	38.3	43.1	47.0	53.8	45.3
	34 Samasa	64.9	65.8	58.8	52.8	46.0	41.0	38.8	43.5	55.4	48.3	54.8	57.8	52.3
	41 Tarapaya	62.7	61.9	60.8	53.4	44.4	43.3	41.5	42.0	42.8	46.7	49.5	54.0	50.3
	45 Tomave	40.7	60.0	59.0	46.5	55.0	47.0	41.5	45.5	40.0	46.5	50.4	49.0	48.4
46 Tumusla	51.2	50.3	48.3	42.0	34.4	37.0	36.0	36.2	35.5	38.5	44.1	47.6	41.7	
47 Tupiza	58.8	57.3	55.3	46.8	41.7	38.9	38.1	37.1	39.1	42.2	47.7	52.2	46.3	
50 Vitichi	58.1	58.3	57.0	47.4	39.0	38.6	38.3	39.9	40.4	46.2	49.2	54.6	47.3	
CHUQUISACA	54 Arpaja Alta (I)	76.8	78.2	76.8	69.2	63.0	57.0	60.0	59.1	61.5	67.1	70.3	74.0	67.7
	55 Cachimayu	71.5	72.1	74.0	67.8	57.8	54.5	45.7	51.8	53.3	54.3	63.2	64.0	60.8
	56 Camargo	43.0	48.0	44.1	39.0	37.1	29.3	30.1	36.9	32.1	31.3	39.9	43.1	37.8
	58 Culpina	68.6	71.0	68.2	58.5	43.8	39.0	38.8	42.9	46.7	52.6	57.3	63.6	54.3
	62 La Torre	55.1	53.9	55.1	47.6	43.3	41.8	42.1	41.0	41.4	46.4	50.6	51.9	47.5
	64 Machareti	79.8	82.4	81.7	85.2	83.0	76.3	71.3	70.0	72.6	63.7	73.0	78.3	76.4
	74 San Lucas	69.6	69.2	68.2	61.3	54.2	54.0	55.1	53.6	56.9	59.1	63.0	65.3	60.8
	76 San Roque	60.6	59.3	59.9	54.6	49.6	48.7	51.6	52.5	45.2	48.6	52.2	53.9	53.0
	77 Sucre Aasana	67.8	69.2	67.7	60.6	47.3	40.1	38.7	43.0	46.2	49.8	55.1	60.6	53.8
	78 Sucre Senamhi	66.3	68.5	66.6	60.6	45.7	40.6	40.2	42.6	46.8	49.8	54.9	59.9	53.6
80 Tarabuco	78.9	79.6	77.6	70.0	56.0	49.6	50.5	52.0	58.5	63.9	68.6	72.5	64.8	
84 Yotala (Villa Carmen)	65.2	67.8	67.7	63.9	57.4	53.9	51.4	50.2	52.8	55.2	57.0	59.9	58.5	
TARIJA	97 Crevaux	77.0	81.0	79.0	72.0	73.0	80.0	80.0	78.0	76.0	77.5	77.0	78.5	77.4
	99 El Puente	46.1	48.7	47.6	44.9	38.8	37.5	40.8	41.7	41.2	44.1	43.2	41.5	43.0
	104 La Vertiente	86.9	88.6	88.3	89.0	87.2	85.1	79.0	73.1	70.8	76.0	83.4	85.0	82.7
	108 Palmar Grande	62.1	64.7	68.3	71.6	71.2	66.7	60.8	54.1	49.7	51.8	55.5	58.1	61.2
	111 Puesto Margarita	65.7	60.0	75.0	68.5	60.0	57.5	53.5	56.0	61.5	53.0	55.5	64.5	60.9
	121 VillaMontes Aasan	65.9	70.4	68.3	73.4	72.3	68.1	58.1	52.7	51.5	50.2	54.6	60.1	62.1
122 VillaMontes Senamhi	73.1	75.8	77.3	79.9	80.6	79.1	72.5	68.7	65.5	65.6	68.6	69.2	73.0	

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

Tabla 5.9: Humedad relativa media anual en (%)

	ESTACION	Periodo	Media Anual		ESTACION	Periodo	Media Anual
POTOSI	126 Colcha K	1986-2000,2002	39.2	S	173 Aiquile	1973-1984	66.1
	127 Colquechaca	1975-79,82-1984	65.5		178 Puente Taperas	1980-1984	58.8
	128 Julaca	1975-1985	58.9		183 Camiri (AASANA)	1965-2004	65.8
	129 Laguna Colorada	1983-87,98-2001	40.9		193 Angostura	1991-1998	83.2
	130 Macha	1983-2001	46.8		194 Calamuchita	1990-1994	70.9
	134 Río Mulatos	1987-2002	32.9		196 Canasmoro	1978-1999	65.2
	137 San Pedro de Buena	1977-80,82-1983	60.7		204 Chocloca	1992-2000	68.4
	140 Uncia	1973-75,78-1984	54.5		206 Entre Rios	1978-85,87-1999	71.8
	141 Uyuni	1944-48,75-2001	43.2		211 Juntas	1987-2002	69.1
	CHUQUISACA	144 Azurduy	1975-2001		76.3	TARIJA	216 Padcaya
150 El Salvador		975-82,86-82,95-199	71.7	227 San Andres	1996-2002		62.6
153 La Madonna		1989-1992	72.7	228 San Jacinto	1978-1996		63.3
156 Monteagudo		1973-85,90-1998	66.4	232 Tarija Aasana	1945-2003		56.5
165 Redencion Pampa		1974-80,82-1998	63.1	233 Tarija Senamhi	1974-1986		57.0
168 Tarvita		1997-2002	75.2	237 Yacuiba AASANA	945-62,65-91,93-200		68.8
172 Zudañez		1975-2002	64.7	238 Yesera Norte	1990-2003		68.6

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

### 5.2.3 Vientos

El viento es el aire en movimiento. El viento es causado por las diferencias de temperatura producto de un desigual calentamiento de las diversas zonas de la Tierra y de la atmósfera. El viento ejerce influencia en los procesos de evaporación, como se puede observar en el término aerodinámico de la ecuación de Penman: a mayor intensidad de viento, mayor evaporación. La velocidad del viento se mide con anemómetros y la dirección, con veletas. La velocidad del viento se expresa en millas por hora, metros por segundo y muy frecuentemente en nudos ( $1 \text{ m/s} = 2.2 \text{ mph}$ ) y ( $1 \text{ nudo} = 1 \frac{1}{7} \text{ mph}$ ). En un grado mayor que las otras variables, el viento está influenciado por la topografía local.

Para el cálculo de ETP, es importante conocer la velocidad. La tabla 5.10 muestra los valores de velocidad media del viento a nivel mensual y anual en estaciones de la cuenca y la tabla 5.11 los valores medios anuales en estaciones meteorológicas de apoyo.

**Tabla 5.10: Velocidad media del viento, mensual y anual en (m/s)**  
**Cuenca Alta del río Pilcomayo**

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
CHUQUISACA	54 Arpaja Alta	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	55 Cachimayu	0.7	0.8	1.1	1.0	1.0	1.1	1.4	1.1	1.3	1.1	1.0	0.8	1.0
	57 Chilcara	3.6	4.0	4.3	3.0	1.4	0.8	1.2	2.0	2.5	3.6	4.1	4.1	2.9
	58 Culpina	3.7	3.7	3.3	3.9	3.8	3.6	3.8	3.9	4.3	4.2	4.2	3.9	3.9
	62 La Torre	1.6	1.9	1.5	1.5	1.2	1.6	1.8	2.0	2.3	2.3	2.1	1.8	1.8
	64 Machareti	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.4	1.1
	67 Ñujchu	2.1	2.1	2.1	2.6	2.6	2.1	2.6	3.1	2.6	2.1	2.1	2.1	2.3
	74 San Lucas	1.9	1.9	2.0	2.2	2.0	2.3	2.0	2.3	2.5	2.3	2.0	2.2	2.1
	76 San Roque	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
	77 Sucre Aasana	2.7	2.8	2.8	2.9	2.8	2.7	2.9	3.1	3.3	3.4	3.2	3.0	3.0
	78 Sucre Senamhi	2.6	2.9	3.0	3.0	2.7	2.7	2.8	3.2	3.7	3.8	3.7	3.1	3.1
	79 Talula / Taco	1.7	1.6	1.5	1.8	2.1	2.4	2.3	2.3	2.6	2.6	2.4	2.1	2.1
	80 Tarabuco	1.8	1.7	1.8	1.9	2.0	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.2	1.8	2.0
84 Yotala (Villa Carmen)	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.6	1.7	1.7	1.7	1.5	1.5	
TARIJA	97 Crevaux	1.7	2.1	1.7	1.7	1.6	1.8	1.7	2.0	2.2	2.2	2.0	1.8	1.9
	111 Puesto Margarita	1.1	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.6	1.6
	121 VillaMontes Aasan	1.7	1.7	1.3	1.3	1.2	1.3	2.1	2.5	2.8	3.0	2.5	2.3	2.0
	122 VillaMontes Senamhi	2.0	1.5	1.1	0.9	1.1	1.2	1.3	1.8	2.1	2.3	1.8	2.0	1.6
ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
POTOSÍ	5 Calcha	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.8	1.6	2.0	2.4	2.5	2.3	1.9	1.9
	8 Chaqui	1.2	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.6	1.7	1.5	1.5	1.2	1.1	1.4
	12 Chico Chico	2.3	1.9	1.9	2.7	2.4	2.4	2.5	2.0	2.9	2.4	2.8	2.4	2.4
	13 Chinoli	3.5	3.4	3.4	3.4	2.9	2.9	3.6	3.6	4.4	4.4	4.2	3.8	3.6
	15 Cotagaita	1.1	1.2	0.4	0.7	0.6	0.8	1.4	1.0	1.1	1.0	0.6	1.5	0.9
	17 Escara	2.0	2.4	2.1	2.2	2.5	2.5	2.0	2.1	2.5	2.5	2.1	2.5	2.3
	300 Millares	2.2	2.2	2.1	2.1	2.4	2.0	2.3	2.2	2.4	2.4	2.3	2.6	2.3
	23 Mojo	0.8	0.8	0.8	0.8	1.1	1.2	1.2	1.2	1.4	1.3	1.0	1.0	1.0
	24 Mosoj Lljata	2.0	1.9	1.7	1.7	2.2	2.5	2.4	2.4	2.9	2.7	2.8	2.3	2.3
	25 Oploca	0.9	0.9	0.9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.1	1.0	1.1
	301 Otavi	1.5	2.1	2.0	1.2	2.1	2.4	2.2	2.3	1.6	1.6	1.8	1.4	1.9
	26 Palca Higuera	2.7	2.7	2.6	2.4	2.5	2.7	2.6	2.7	2.6	2.8	2.7	3.1	2.7
	27 Potosi Aasana	3.1	2.9	2.6	2.7	3.1	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.5	3.3	3.1
	28 Potosi Senamhi	1.9	2.2	2.2	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.4	2.5	2.2	2.3
	29 Puna (Villa Talavera)	1.7	1.6	1.5	1.6	1.4	1.6	1.7	2.0	2.0	2.0	1.8	1.7	1.7
	34 Samasa	3.1	2.7	3.2	3.2	3.4	3.6	4.2	4.1	4.1	3.3	3.3	3.2	3.4
	36 San Jose Pampa G	1.1	0.5	1.2	1.2	1.1	1.3	0.7	1.4	1.0	1.4	0.8	0.8	1.0
	41 Tarapaya	2.6	2.7	2.6	2.5	2.6	2.7	2.4	2.5	2.7	2.7	2.9	3.0	2.7
	44 Tinquipaya	3.3	3.2	3.1	3.2	3.7	3.9	4.1	4.0	3.8	3.7	3.2	3.3	3.5
	45 Tomave	1.8	1.5	1.5	2.6	3.6	5.6	5.3	3.0	5.6	3.6	2.3	0.9	3.1
	46 Tumusla	0.6	0.8	0.9	0.7	1.0	1.0	1.3	1.4	1.2	1.0	1.0	0.8	1.0
	47 Tupiza	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	2.2	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.4	2.3
	48 Turuchipa	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8
49 Villazón	0.3	0.0	0.3	0.1	0.2	0.5	0.2	0.7	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	
50 Vitichi	2.6	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7	2.8	2.6	2.5	2.5	2.7	
51 Yocalla	1.7	1.7	1.6	2.1	2.7	2.7	2.7	2.4	2.5	2.5	2.3	1.9	2.2	
52 Yura	1.5	1.5	1.0	1.0	1.5	1.1	1.5	1.1	1.5	1.2	1.2	1.2	1.3	

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

Tabla 5.11: Velocidad media anual del viento en (m/s) - Estaciones de apoyo

	ESTACION	MEDIA ANUAL		ESTACION	MEDIA ANUAL		ESTACION	MEDIA ANUAL
POTOSÍ	125 Calcha de Lipez	4.9	CHUQUISACA	303 Alcantari	4.7	TARIJA	193 Angostura	2.6
	126 Colcha K	1.9		144 Azurduy	4.3		196 Canasmoro	1.8
	127 Colquechaca	2.6		150 El Salvador	1.9		204 Chocloca	2.1
	128 Julaca	5.0		304 Escana	2.4		206 Entre Rios	1.8
	130 Macha	3.0		153 La Madonna	1.6		216 Padcaya	1.6
	134 Río Mulatos	2.6		156 Monteagudo	0.7		228 San Jacinto	1.3
	137 San Pedro de Buena V	1.6		165 Redencion Pampa	2.6		232 Tarija Aasana	2.2
140 Uncia	1.8	168 Tarvita	2.0	233 Tarija Senamhi	1.5			
CI	173 Aiquile	0.8	171 Villa Serrano	1.7	237 Yacuiba AASANA	2.4		
			172 Zudañez	2.4	183 Camiri (AASANA)	1.5		

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

#### 5.2.4 Radiación e insolación

Ante la escasez de estaciones meteorológicas que midan la radiación solar incidente, la mayoría de las versiones de la ecuación de Penman usan la insolación en horas sol/día (ver ecuación 5.3) para estimar la radiación neta. El número de horas en que irradia el sol sobre una estación meteorológica durante el día se mide con heliógrafo. La tabla 5.12 muestra los valores medios de insolación a nivel mensual y anual en estaciones de la cuenca y la tabla 5.13 en estaciones de apoyo.

Tabla 5.12: Insolación mensual y anual media (hr<sub>sol</sub>/día), Cuenca Alta del río Pilcomayo

	ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
POTOSÍ	13 Chindi	6.5	5.9	6.5	7.7	8.9	8.3	9.0	9.1	7.8	7.9	6.8	6.8	7.6
	28 Potosi Senamhi	5.8	6.0	6.6	8.0	8.7	8.7	9.4	9.2	8.4	8.1	7.6	6.6	7.8
	29 Puna (Villa Talavera)	5.9	6.1	6.3	7.6	8.2	7.3	7.5	8.2	7.3	6.6	6.5	6.2	7.0
	41 Tarapaya	5.6	5.4	6.3	7.5	8.1	7.7	8.2	8.3	7.9	7.5	7.2	6.5	7.2
	47 Tupiza	6.2	6.2	7.3	7.6	8.3	7.5	8.3	8.5	7.8	7.8	8.0	7.3	7.6
CHUQUIS	58 Culpina	6.6	6.3	7.3	7.4	8.2	8.2	8.2	8.7	8.3	8.0	7.8	7.1	7.7
	62 La Torre	6.0	5.9	6.8	7.6	7.3	6.3	7.1	7.8	7.3	7.4	7.2	6.6	6.9
	76 San Roque	6.8	6.6	7.3	7.8	8.2	7.1	6.9	8.0	8.3	8.2	7.4	6.9	7.5
	78 Sucre Senamhi	5.7	5.3	6.4	7.1	9.0	8.5	8.9	8.7	8.0	7.7	6.9	6.3	7.4
	84 Yotala (Villa Carmen)	5.2	5.5	5.6	7.2	8.3	8.3	8.6	8.5	7.9	7.0	6.7	6.1	7.1
111 Puesto Margarita	6.6	5.9	5.6	4.4	5.1	3.7	6.4	8.1	6.1	7.0	6.0	5.8	5.9	

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

Tabla 5.13: Insolación mensual y anual media (hr<sub>sol</sub>/día) en estaciones de apoyo

	ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
POT	137 San Pedro de Buena Vis	5.6	5.1	4.2	7.2	8.5	7.7	7.8	8.1	7.9	7.8	7.3	5.8	6.9
	141 Uyuni	6.8	7.4	8.0	9.0	8.6	7.4	8.2	8.9	9.0	9.4	9.6	8.9	8.4
CHU	144 Azurduy	4.8	4.6	5.4	6.2	7.1	7.3	7.7	7.9	6.9	6.5	5.3	4.9	6.2
	150 El Salvador	6.0	5.8	5.5	4.7	3.9	3.8	5.9	6.1	5.2	5.9	6.2	5.8	5.4
	156 Monteagudo	5.3	4.6	4.4	3.7	4.1	4.2	5.2	5.8	5.1	5.6	5.3	5.1	4.9
TA	206 Entre Rios	5.7	5.8	6.0	6.6	7.5	7.3	7.5	7.7	7.3	7.2	6.5	6.1	6.7
	233 Tarija Senamhi	5.9	5.8	6.0	6.5	8.5	7.7	8.4	8.5	7.6	7.2	6.9	6.4	7.1

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI

### 5.3 CÁLCULO DE LA ETP CON EL MÉTODO DE PENMAN

La tabla 5.14 muestra la planilla electrónica EXCEL diseñada para el cálculo de la evapotranspiración potencial por el método de Penman. Los parámetros de entrada se muestran sin sombreado, las salidas intermedias en gris claro y los resultados finales en gris oscuro. La planilla fue aplicada a todas las estaciones que contaban con los parámetros meteorológicos requeridos, para el periodo 1970-2000.

Con el objeto de obtener valores de ETP en el mayor número de estaciones y durante el periodo más largo posible, se adoptaron algunos criterios de orden práctico:

- Cuando el periodo de registro de una o más de las variables meteorológicas era más corto que el del Balance (1970-2000), los años faltantes se rellenaron con los promedios mensuales de esa variable.
- Para estaciones donde no existiesen mediciones de las variables humedad relativa, vientos e insolación (una de ellas y solo en casos excepcionales, dos), se realizó la transposición de datos de otra estación próxima que contase con esos registros.

El resultado de esta etapa son las series mensuales de ETP para el periodo 1970-2000 por estación, que fueron incluidas en la base de datos meteorológicos Hydraccess.

**Tabla 5.14: Planilla electrónica de cálculo de ETP - Método de Penman**

ESTACION :		SUCRE SENAMH	ALTITUD [m.s.n.m] :	2890	PRESION REL=	0.677								
LATITUD [°] :		19.0203 S	LONGITUD [°] :	65.2605 W	ALTURA V (m) =	2.00								
PERIODO EST [años]		70-2000	ALMACENAM. :	100	ALBEDO =	0.22								
		MES												
PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	Observ.
T media [°C]	14.8	15.2	14.4	14.6	13.0	11.2	11.0	13.1	13.6	16.2	15.4	14.4	13.9	
Hum. Rel m [%]	71	71	72	66	57	49	50	53	52	54	62	72	60.8	
V [m/s]	1.54	2.06	2.06	3.09	2.57	2.06	1.54	2.57	3.09	3.09	2.57	3.09	2.4	
n [hr.sol/d]	2.95	4.66	5.84	7.45	8.08	8.60	9.39	9.14	8.48	6.65	6.15	4.70	6.8	
Ro [cal/cm <sup>2</sup> -d]	983.2	943.3	860.9	742.5	636.1	581.1	603.9	694.3	808.4	906.0	963.7	989.6	809.4	
N [hr.max sol]	13.01	12.61	12.08	11.54	11.09	10.87	10.98	11.36	11.87	12.41	12.88	13.13		
es [mm]	12.61	12.94	12.29	12.45	11.22	9.96	9.82	11.29	11.67	13.79	13.11	12.29	12.0	
D / g	1.67	1.71	1.63	1.65	1.51	1.36	1.34	1.52	1.56	1.61	1.73	1.63	19.1	
Ea [mm/día]	2.33	2.75	2.62	3.92	4.00	3.72	3.12	4.40	5.18	5.87	4.13	3.18		
H [mm/día]	3.63	3.98	3.82	3.25	2.24	1.67	1.83	2.77	3.63	4.06	4.39	4.20		
ETP [mm/mes]	946.5	954.4	893.2	768.5	660.5	608.8	777.8	110.9	187.6	161.2	128.1	119.2	1287.1	
ETP [mm/día]	2.02	3.41	3.20	3.56	3.11	2.69	2.51	3.57	4.39	4.68	4.27	3.32		

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.15 muestra los valores de evapotranspiración potencial media mensual y anual en estaciones situadas en la cuenca y la tabla 5.16 en estaciones meteorológicas de apoyo. El rango de variación de este parámetro (1037 a 1868 mm/año) es más estrecho que el de la precipitación. Los valores extremos de ETP se pueden explicar como el resultado de los registros de dos o más parámetros, por ejemplo en el caso de Palca Higuera baja humedad relativa, intensidad del viento superior a la media y alta insolación.

**Tabla 5.15: Evapotranspiración potencial media mensual y anual (mm), método de Penman, Cuenca Alta del río Pilcomayo**

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
POTOSI	5 Calcha	138	121	121	108	91	76	76	105	134	157	155	153	1436
	8 Chaqui	106	92	97	99	104	96	93	106	109	121	118	115	1256
	12 Chico Chico	108	92	88	95	89	77	82	89	108	120	127	114	1188
	13 Chindi	133	109	117	113	100	90	104	122	144	159	152	145	1486
	15 Cotagaita	149	132	124	107	80	65	82	94	115	148	142	169	1405
	17 Escara	155	142	141	126	116	96	93	118	145	167	162	176	1638
	300 Millares	145	124	130	121	117	92	103	126	144	163	160	165	1590
	23 Mojo	111	93	101	85	73	60	64	82	101	120	122	124	1135
	25 Oploca	123	106	111	96	80	67	73	94	114	138	141	136	1278
	301 Otavi	117	110	112	93	100	93	97	114	112	129	133	126	1335
	26 Palca Higuera	178	155	167	143	130	107	116	139	160	187	186	199	1868
	27 Potosi Aasana	104	89	91	93	98	85	88	106	116	130	132	127	1257
	28 Potosi Senamhi	107	96	105	101	98	85	95	110	120	135	132	122	1308
	29 Puna (Villa Talavera)	117	102	102	96	91	82	86	105	117	132	129	128	1288
	36 San Jose Pampa G	125	101	117	98	82	73	70	99	108	139	135	137	1283
	41 Tarapaya	130	113	119	106	102	88	88	107	126	148	153	160	1441
44 Tinquipaya	140	122	132	128	132	115	125	145	157	174	162	162	1693	
46 Tumusla	141	123	129	106	91	72	82	108	127	148	150	151	1426	
47 Tupiza	139	123	131	111	90	83	94	118	139	166	167	164	1524	
48 Turuchipa	137	118	125	106	91	77	84	103	123	143	141	144	1391	
ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
POTOSI	49 Villazón	113	98	104	84	65	50	55	76	94	117	121	125	1104
	50 Vitichi	142	125	130	126	116	101	111	126	143	154	149	143	1565
	51 Yocalla	115	98	105	103	105	89	96	109	127	145	143	134	1367
	52 Yura	123	105	106	90	85	65	76	85	106	125	132	133	1230
CHUQUISACA	54 Arpaja Alta (I)	104	86	90	79	68	57	60	77	91	106	108	110	1037
	55 Cachimayu	112	98	103	94	83	70	84	95	113	132	124	128	1236
	58 Culpina	135	110	119	118	119	105	112	128	144	161	156	149	1557
	62 La Torre	152	136	134	119	93	86	93	119	145	168	163	164	1570
	64 Machareti	149	120	117	80	61	50	64	88	97	141	145	147	1259
	67 Ñujchu	144	124	124	121	110	87	105	137	142	151	154	156	1556
	74 San Lucas	122	108	114	108	92	80	80	104	117	132	126	134	1316
	76 San Roque	144	124	129	108	90	72	75	97	124	154	155	159	1429
	77 Sucre Aasana	128	108	118	112	115	105	116	132	145	165	153	147	1544
	78 Sucre Senamhi	130	111	125	115	116	104	113	135	153	173	162	150	1588
79 Talula / Taco	125	107	108	103	98	90	97	117	133	151	148	145	1422	
80 Tarabuco	98	83	91	86	92	82	88	104	110	125	116	110	1185	
84 Yotala (Villa Carmen)	128	109	111	101	87	73	81	105	122	142	144	142	1345	
TARIJA	97 Crevaux	164	132	130	101	77	60	66	90	112	145	157	157	1390
	99 El Puente	165	142	147	122	93	80	85	109	142	172	176	178	1612
	103 Ibibobo	162	135	135	99	80	63	74	99	119	150	160	161	1438
	104 La Vertiente	154	124	119	79	66	49	65	101	123	159	143	153	1334
	108 Palmar Grande	171	142	124	85	70	63	76	110	142	179	167	181	1509
	111 Puesto Margarita	168	147	130	99	89	73	80	116	127	174	171	167	1539
	115 San Antonio (Isca)	106	91	99	88	79	68	73	87	96	114	116	116	1134
121 VillaMontes Aasan	168	133	130	90	75	60	83	120	141	188	176	178	1542	
122 VillaMontes Senamhi	172	135	127	87	71	54	70	105	124	166	158	168	1435	

Fuente: Elaboración propia

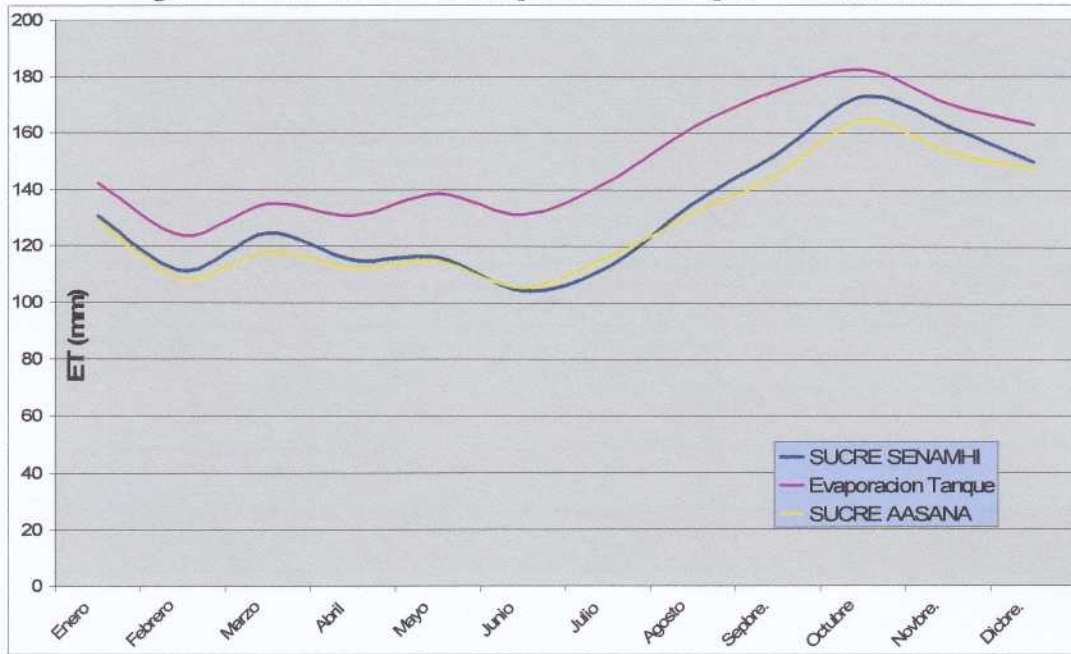
**Tabla 5.16: Evapotranspiración potencial anual (mm), método de Penman**  
**Estaciones meteorológicas de apoyo**

	ESTACION	ANUAL		ESTACION	ANUAL		ESTACION	ANUAL				
POTOSI	125	Calcha de Lipez	1419	CHUQUISACA	144	Azurduy	1245	TARIJA	193	Angostura	1237	
	126	Colcha K	1306		150	El Salvador	1324		194	Calamuchita	1367	
	127	Colquechaca	1027		156	Monteagudo	1141		196	Canasmoro	1304	
	128	Jufaca	1379		165	Redencion Pampa	1388		204	Chocloca	1347	
	129	Laguna Colorada	837		168	Tarvita	1260		206	Entre Rios	1286	
	130	Macha	1532		171	Villa Serrano	1312		211	Juntas	1264	
	134	Río Mulatos	1325		172	Zudañez	1319		216	Padcaya	1252	
	138	San Pablo de Lipez	1188		173	Aiquile	1256		227	San Andres	1256	
	137	San Pedro de Buena V	1410		SCCB	183	Camiri (AASANA)		1353	228	San Jacinto	1280
	140	Uncia	1124							232	Tarija Aasana	1463
141	Uyuni	1303					233	Tarija Senamhi	1343			
							237	Yacuiba AASANA	1469			
							238	Yesera Norte	1202			

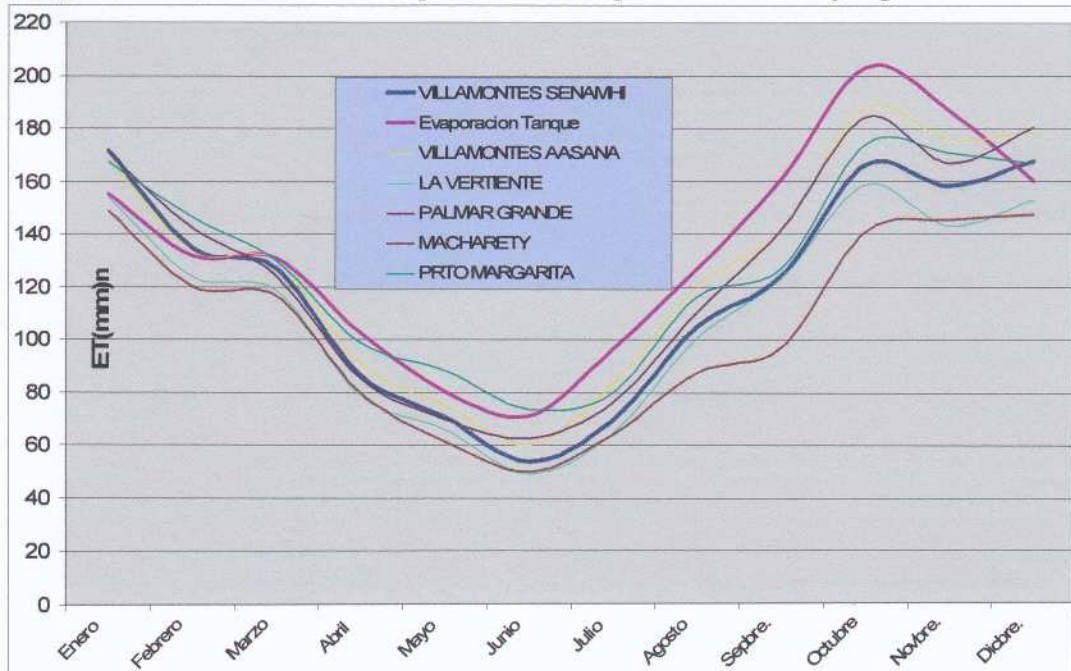
Fuente: Elaboración propia

La figura 5.3 muestra la ETP media mensual calculada con Penman y la medida con tanque, para la estación de Sucre SENAMHI. Como complemento, se muestra la ETP calculada con Penman para Sucre AASANA (en amarillo). Para este ejemplo, la correspondencia entre valores mensuales es muy buena: las líneas son paralelas, con los valores de tanque por encima, como era de esperar. Se puede hallar fácilmente un coeficiente de corrección que ajuste los valores del tanque. En la figura 5.4 el comportamiento general sigue siendo bueno para Villamontes, pero los coeficientes presentan más variación mensual y en enero y febrero son mayores a 1. Por otro lado, la ETP calculada para las otras 5 estaciones chaqueñas muestra que el comportamiento regional es homogéneo.

**Figura 5.3: ETP Penman vs Evaporación en tanque – Estación Sucre**



**Figura 5.4: ETP Penman vs Evaporación en tanque – Villamontes y región del Chaco**

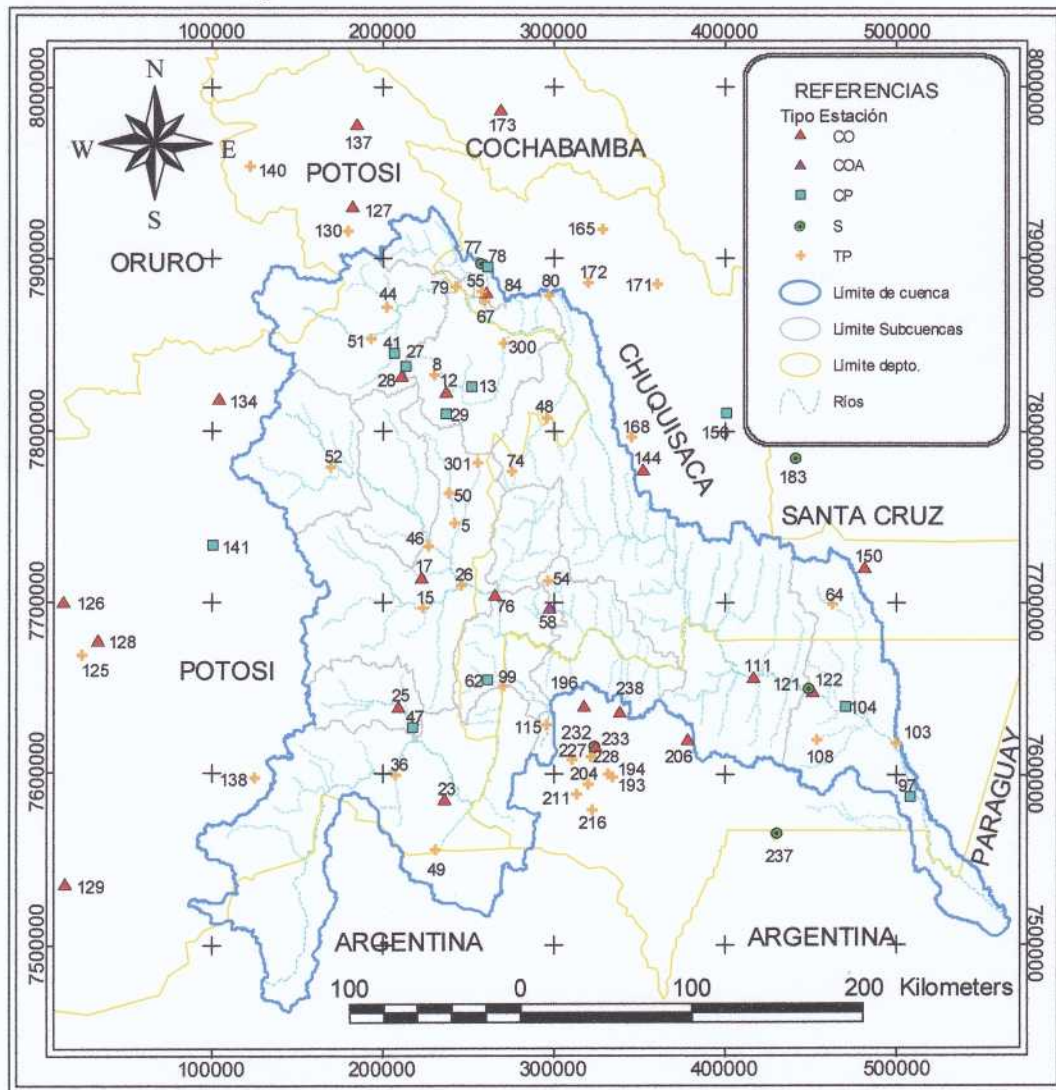


Fuente: Elaboración propia

**5.4 EVALUACIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL**

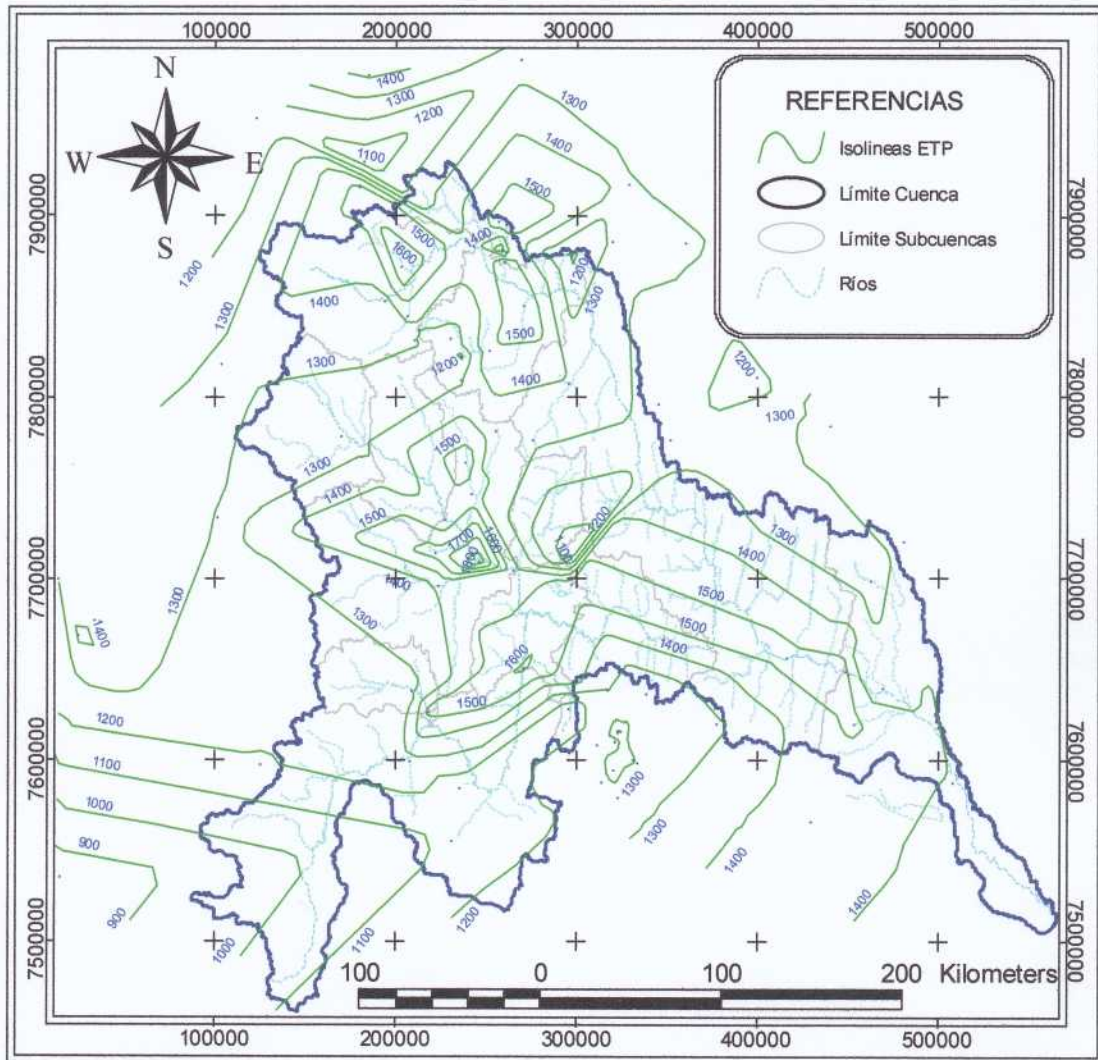
Con los resultados del análisis puntual para las estaciones de la cuenca, se elaboró el mapa de isolíneas de evapotranspiración potencial y el cálculo de las series mensuales para las subcuencas en que se aplicó el modelo, para todo el periodo 1970-2002. La figura 5.5 muestra las estaciones donde se calculó ETP por Penman, donde los números de estación corresponden a la tabla 3.2. La figura 5.6 muestra el mapa de isolíneas ETP para toda la Cuenca Alta, elaborado en ArcView y ajustado manualmente según criterios topográficos y de ubicación, así como valores de referencia de otros estudios.

**Figura 5.5: Estaciones usadas en el cálculo de ETP**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.6: Mapa de isóneas de ETP, periodo 1970-2000  
Cuenca Alta del río Pilcomayo**



Fuente: Elaboración propia

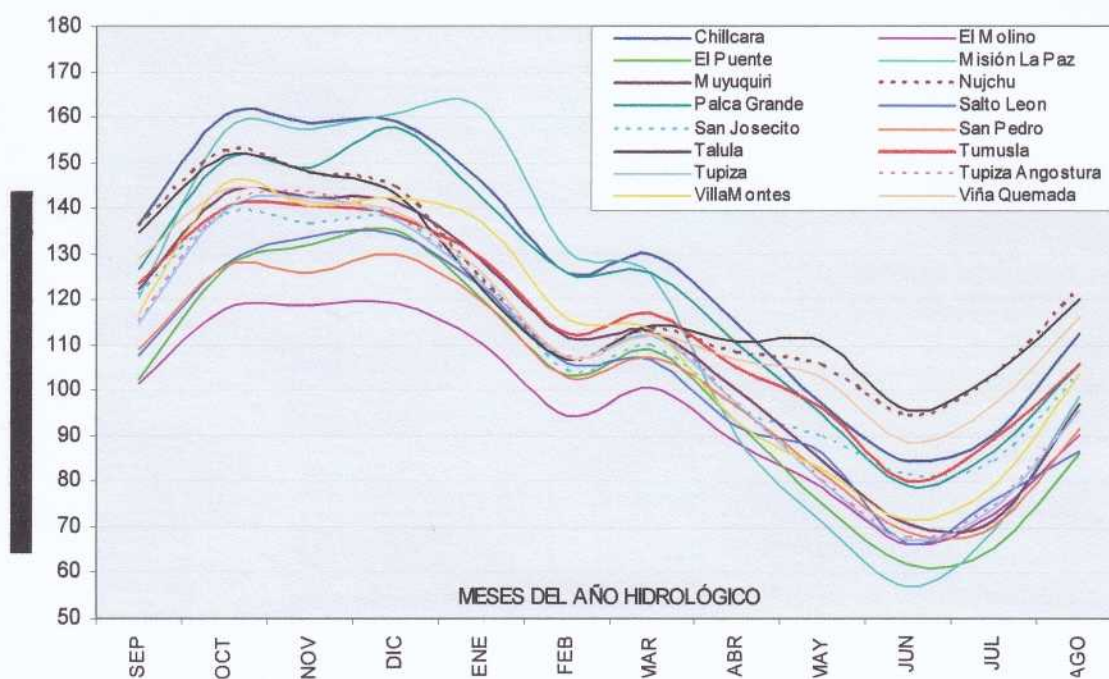
Para la evaluación espacial de la evapotranspiración potencial se usó el módulo Spatial de Hydraccess, bajo los mismos criterios que se aplicaron a la precipitación y descritos en el punto 4.4. Se obtuvieron así series de paso mensual para las subcuencas, para todo el periodo 1970-2000. La tabla 5.17 y la figura 5.7 muestra la evapotranspiración media mensual y anual para las subcuencas e intercuencas. Las series completas fueron incorporadas a la base de datos Hydraccess.

**Tabla 5.17: ETP media mensual y anual por subcuencas en (mm), periodo 1970-2000**  
**Cuenca Alta del río Pilcomayo**

Nº	Sub Cuenca (Est. Hidrométri.)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	Nujchu	124	107	113	108	105	94	103	122	136	153	147	144	1458
2	Talula	122	107	114	111	111	96	104	120	135	152	148	143	1462
3	Viña Quemada	126	107	112	107	103	89	97	116	129	144	141	139	1410
4	Muyuquiri	129	112	113	100	85	71	72	97	122	143	142	141	1327
5	San Pedro	120	103	107	96	82	69	71	92	109	127	126	130	1231
6	Salto Leon	123	106	107	92	86	66	76	87	108	127	134	134	1247
7	Tumusla	129	113	117	105	96	80	89	106	124	140	140	138	1378
8	Palca Grande	142	126	126	110	95	79	87	106	127	151	149	158	1456
9	El Molino	110	94	101	88	79	67	73	90	101	118	119	119	1160
10	Tupiza	123	107	112	97	80	68	74	96	115	140	142	137	1291
11	La Angostura	124	107	112	97	80	68	75	96	115	140	143	138	1296
12	El Puente	120	103	109	93	75	62	66	87	102	127	132	135	1211
13	Chillcara	146	126	130	115	97	85	90	112	137	161	159	159	1516
14	San Josecito	125	104	110	96	90	82	85	103	121	139	137	138	1329
15	VillaMontes	137	115	113	93	83	72	79	104	117	145	141	142	1341
16	Misión La Paz	162	131	125	90	71	57	69	99	121	157	157	161	1400
	MAXIMO	162	131	130	115	111	96	104	122	137	161	159	161	1516
	MINIMO	110	94	101	88	71	57	66	87	101	118	119	119	1160

Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.7: ETP media mensual y anual por subcuencas en (mm), periodo 1970-2000**



Fuente: Elaboración propia

**Capítulo 6**

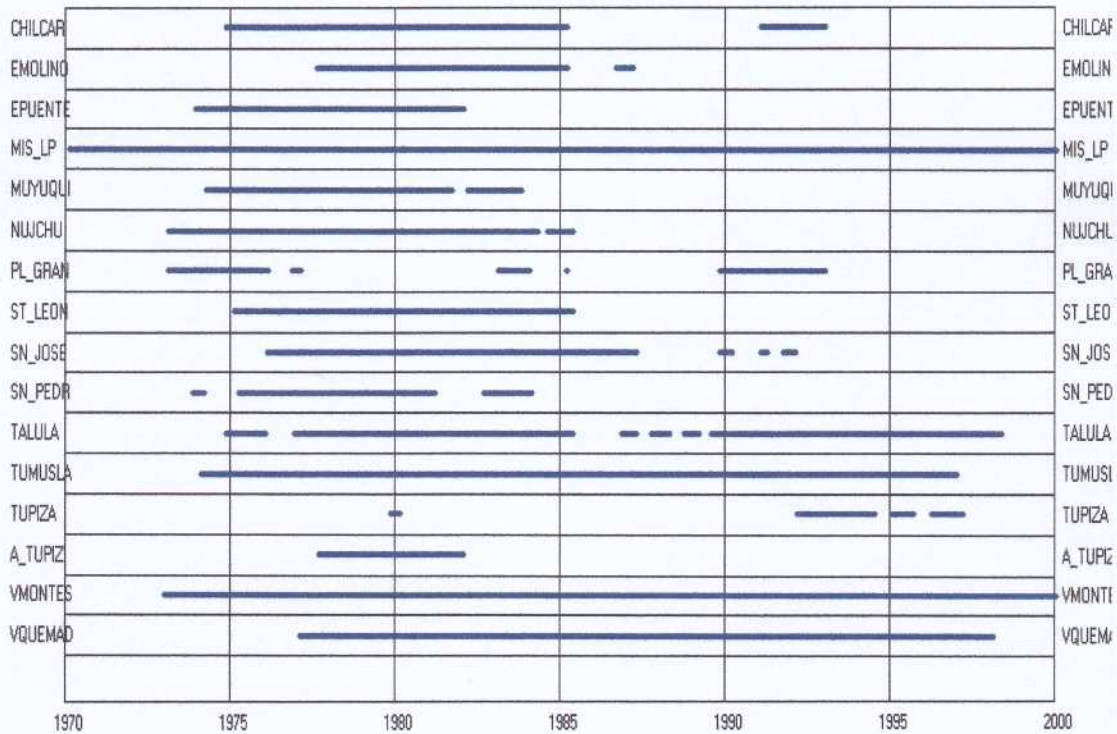
**MODELACIÓN**

**6.1 ESCORRENTIA**

Tal como se describió en el capítulo 3, los componentes del balance hídrico se evaluaron por separado. Los datos de escurrimiento usados en el presente estudio fueron tratados y evaluados por Aguilar, Malbrunot y Vauchel (2005). De las 24 estaciones hidrométricas identificadas en la Cuenca Alta del río Pilcomayo (tabla 3.3), 16 cuentan con registros de aforos. La figura 6.1 muestra el diagrama de barras del periodo 1970-2004, donde se identifican los periodos con registros.

Se observa que algunas estaciones, como Pampa Grande o Puente Sucre, cuentan con periodos de registro muy cortos. Solamente dos estaciones (Villamontes y Misión La Paz) cuentan con más de 20 años de datos. La figura 6.1 permite también identificar los periodos comunes y los años en que hubo mayor número de estaciones funcionando.

**Fig. 6.1: Diagrama de barras de caudales observados**



La tabla 6.1 muestra el caudal medio mensual y anual en 14 estaciones hidrométricas, obtenido en base a registros, correspondientes al captor QMVR de la base de datos de caudal adjunta. Se muestran también el área de aporte hasta cada punto de control y el periodo de observación que se usó para obtener valores medios. Un análisis de consistencia llevado a

cabo por Aguilar et al (2006) no permitió validar los datos de las estaciones de Muyuquiri y Tupiza, por lo que los caudales correspondientes no aparecen en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1: Caudal medio mensual y anual (m<sup>3</sup>/s) en estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)**

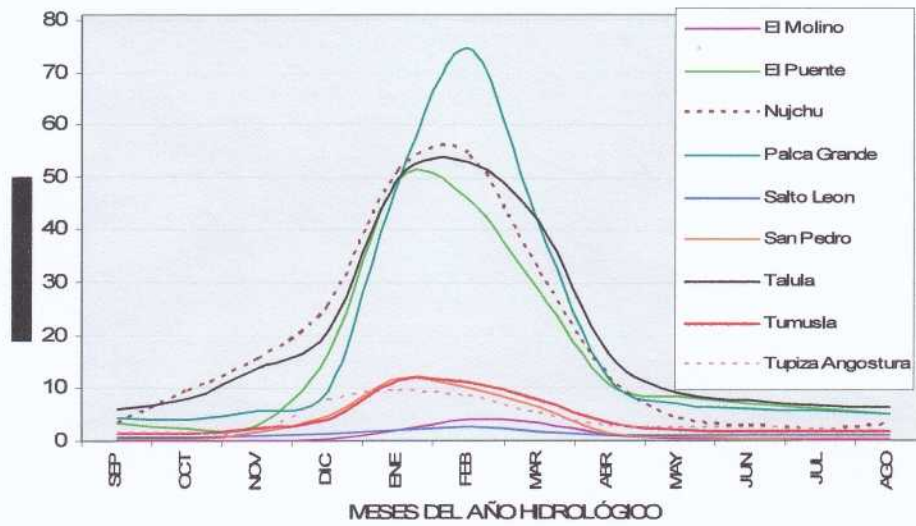
Nº	Estación Hidrométrica	Río	Periodo	Área (km <sup>2</sup> )	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media Anual
1	Nujchu	Cachimayu	1973-1985	1608	51.3	54.4	32.0	12.0	4.0	2.7	2.1	3.0	3.3	9.3	15.6	25.8	18.0
2	Talua	Pilcomayo	1975-85,87-98	6493	49.8	53.0	41.7	16.6	9.2	7.7	6.8	6.3	6.1	8.0	13.9	21.1	20.0
3	Víña Quemada	Pilcomayo	1978-1998	13449	147.3	126.6	115.4	41.5	14.9	11.5	9.7	8.8	8.6	15.7	28.8	72.2	50.1
4	Muyuquiri	Lique Mayu	1974-1984	63													
5	San Pedro	C. Camargo	1974-81,83-84	2108	11.8	10.2	6.5	1.3	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	1.6	4.7	3.2
6	Salto Leon	Yura	1976-1985	4455	1.9	2.8	1.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.9	1.3	1.3
7	Tumusla	Tumusla	1974-1997	8117	11.3	11.1	7.9	3.2	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	2.3	4.2	4.1
8	Palca Grande	Tumusla	74-77,84,90-93	18613	49.3	74.5	41.3	11.7	7.0	6.2	5.7	5.0	4.4	4.1	5.7	9.5	18.7
9	El Molino	Tarayapo	1978-86,1988	297	1.9	4.2	3.3	1.1	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.5	1.0
10	Tupiza	Tupiza	1992-1997	2262													
11	La Angostura	Tupiza	1978-1983	2311	9.4	8.3	5.0	2.7	2.5	2.4	1.9	1.6	1.3	1.3	1.4	7.9	3.8
12	El Puente	Sn Juan	1974-1982	19707	49.8	45.9	28.7	10.7	8.6	7.1	5.9	5.0	3.5	2.5	3.0	16.4	15.6
13	Chillacara	Camblaya	1975-85,92-94	43880	164.7	184.1	133.7	38.0	22.1	19.1	15.7	13.3	10.1	9.4	19.9	45.9	56.3
14	San Josecito	Pilaya	1977-87,90-92	48130	209.3	263.8	209.6	75.0	34.0	28.4	23.4	20.0	15.2	15.1	40.8	92.0	65.5
15	VillaMontes	Pilcomayo	1974-2005	80711	575.2	716.0	645.5	277.4	105.1	61.7	48.9	40.1	34.4	45.3	104.9	218.6	239.4
16	Misión La Paz	Pilcomayo	1960-2004	86595	469.0	614.5	543.8	265.0	97.8	60.9	41.9	31.5	23.0	31.1	81.6	203.8	205.3

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de Aguilar et al, 2006)

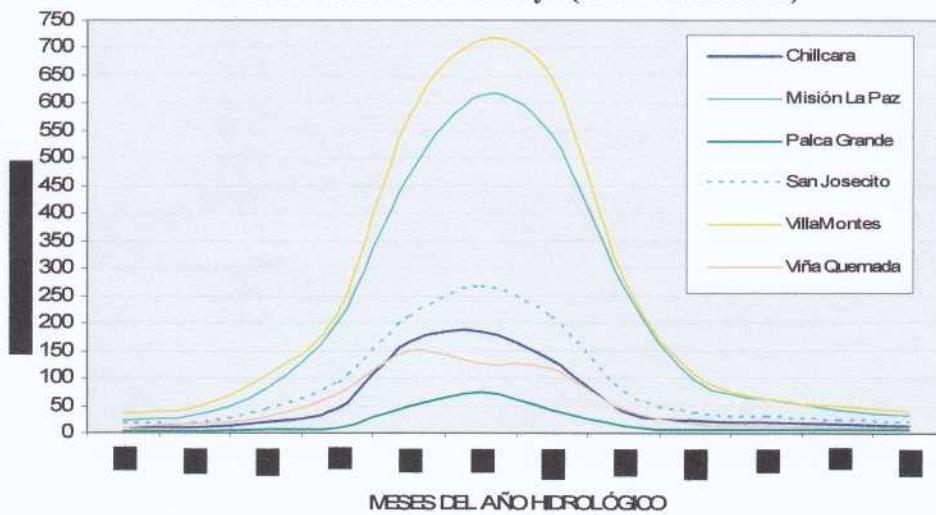
Las figuras 6.2 y 6.3 muestran los hidrogramas del año hidrológico medio para las 14 estaciones, divididas en dos grupos según la magnitud de los caudales. Se observa que a pesar de que los periodos de registro no son iguales, el comportamiento es muy similar en la gran mayoría de las estaciones. Se identifica claramente la estación húmeda de diciembre a marzo y los meses de transición de noviembre, abril y mayo. En la mayoría de las estaciones, incluyendo todas las de la parte media y baja de la cuenca, el caudal medio máximo se produce en febrero, es decir con un mes de retraso con respecto a la máxima de precipitación (ver tabla 4.4). Solamente en algunas de las estaciones de la parte alta (La Angostura, El Puente, San Pedro), los caudales medios más altos se presentan en enero.

En la mayoría de las estaciones, incluyendo las que controlan las cuencas más grandes (San Josecito, Villamontes y Misión La Paz), los caudales mínimos se presentan en septiembre, pero se observan algunas estaciones en que el mínimo se produce en agosto o octubre y una (Nujchu) en que se produce en julio.

**Figura 6.2: Caudal medio mensual por estación en [m<sup>3</sup>/s]  
Cuenca Alta del Río Pilcomayo (Datos observados)**



**Figura 6.3: Caudal medio mensual por estación en [m<sup>3</sup>/s]  
Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)**



(Fuente: Elaboración propia en base a datos de Aguilar et al, 2006)

La tabla 6.2 muestra la lámina de escurrimiento media mensual y anual en mm para la cuenca de aporte de cada estación, en base a los datos de caudal y superficie de la tabla 6.1. Se puede así comparar el escurrimiento de cuencas de superficie muy diversa. Se observa que el escurrimiento medio anual observado para la cuenca hasta Villamontes es de 94 mm, equivalentes a un caudal específico de 2.9 l/s-km<sup>2</sup>. La lámina de escurrimiento media anual

observada varía de un máximo de 348 mm en Ñujchu a un mínimo de 9 mm en Salto León. Estos valores son considerablemente más bajos que los registrados en la cuenca amazónica.

**Tabla 6.2: Lámina de escurrimiento media (mm) para cuencas de aporte a estaciones hidrométricas de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo, (Datos observados)**

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Periodo	Área (Km <sup>2</sup> )	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total Anual
1	Ñujchu	Cachimayu	1975-1983	1608	85.5	81.9	53.3	19.4	6.7	4.4	3.5	4.9	5.3	15.5	25.2	42.9	348.4
2	Talúa	Pilcomayo	1975-1998	6493	20.5	19.8	17.2	6.6	3.8	3.1	2.8	2.6	2.4	3.3	5.6	8.7	96.3
3	Viña Quemada	Pilcomayo	1978-1998	13449	29.3	22.8	23.0	8.0	3.0	2.2	1.9	1.7	1.7	3.1	5.5	14.4	116.6
4	Muyquirí	Lique Mayu	1974-1984	63													
5	San Pedro	C. Camargo	1974-1984	2108	15.0	11.7	8.3	1.6	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	2.0	6.0	47.7
6	Salto León	Yura	1975-1985	4455	1.1	1.5	1.1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.8	8.8
7	Tumusla	Tumusla	1974-1997	8117	3.7	3.3	2.6	1.0	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.7	1.4	15.9
8	Palca Grande	Tumusla	1974-84,90-93	20721	6.4	8.7	5.3	1.5	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	1.2	28.0
9	El Molino	Tormayapo	1978-1987	297	17.2	34.3	29.8	9.8	3.5	2.0	0.8	0.4	0.3	0.5	0.4	4.5	103.6
10	Tupiza	Tupiza	1982-1997	2262													
11	La Angostura	Tupiza	1979-1985	2311	10.9	8.7	5.8	3.0	2.9	2.7	2.2	1.9	1.5	1.6	1.5	9.1	51.7
12	El Puente	San Juan Oro	1974-1982	19707	6.8	5.6	3.9	1.4	1.2	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.4	2.2	24.7
13	Chillacara	Camblaya	1975-85,92-94	43880	10.1	10.1	8.2	2.2	1.4	1.1	1.0	0.8	0.6	0.6	1.2	2.8	40.0
14	San Josecito	Pilaya	1976-87,90-92	48130	11.6	13.3	11.7	4.0	1.9	1.5	1.3	1.1	0.8	0.8	2.2	5.1	55.4
15	VillaMontes	Pilcomayo	1974-87,89-04	80711	19.1	21.5	21.4	8.9	3.5	2.0	1.6	1.3	1.1	1.5	3.4	7.3	92.5
16	Misión La Paz	Pilcomayo	1980-2004	89585	14.0	16.6	16.3	7.7	2.9	1.8	1.3	0.9	0.7	0.9	2.4	6.1	71.5

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de Aguilar et al, 2006)

La tabla 6.3 muestra las láminas de escurrimiento por subcuencas e intercuencas, estas últimas calculadas por diferencia entre los caudales registrados entre dos o más estaciones hidrométricas consecutivas. Así por ejemplo, el área y la lámina de escurrimiento de la intercuencia Villamontes se obtuvo restando al área de aporte y caudal totales registrados en esa estación los valores correspondientes de San Josecito y Viña Quemada.

**Tabla 6.3: Lámina de escurrimiento media (mm) para subcuencas e intercuencas de la Cuenca Alta del río Pilcomayo (Datos observados)**

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Periodo	Área (Km <sup>2</sup> )	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total Anual
1	Ñujchu	Cachimayu	1975-1983	1608	85.5	81.9	53.3	19.4	6.7	4.4	3.5	4.9	5.3	15.5	25.2	42.9	348.4
2	Talúa	Pilcomayo	1975-1998	6493	20.5	19.8	17.2	6.6	3.8	3.1	2.8	2.6	2.4	3.3	5.6	8.7	96.3
3	Viña Quemada	Pilcomayo	1978-1998	5348	23.1	8.7	20.9	6.3	0.9	0.5	0.4	-0.2	-0.4	-0.8	-0.4	12.7	71.6
4	Muyquirí	Lique Mayu	1974-1984	63													
5	San Pedro	C. Camargo	1974-1984	2108	15.0	11.7	8.3	1.6	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	2.0	6.0	47.6
6	Salto León	Yura	1975-1985	4455	1.1	1.5	1.1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.8	8.8
7	Tumusla	Tumusla	1974-1997	3662	6.9	5.5	4.5	1.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	1.0	2.1	24.6
8	Palca Grande	Tumusla	1974-84,90-93	10496	6.7	12.2	6.9	1.8	1.2	1.0	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.1	33.3
9	El Molino	Tormayapo	1978-1987	297	17.2	34.3	29.8	9.8	3.5	2.0	0.8	0.4	0.3	0.5	0.4	4.5	103.6
10	Tupiza	Tupiza	1982-1997	2262													
11	La Angostura	Tupiza	1979-1985	2311	10.9	8.7	5.8	3.0	2.9	2.7	2.2	1.9	1.5	1.6	1.5	9.1	51.7
12	El Puente	San Juan Oro	1974-1982	17396	6.2	5.2	3.6	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	1.3	21.1
13	Chillacara	Camblaya	1975-85,92-94	3155	44.1	37.8	45.7	10.8	4.8	4.3	3.1	2.4	1.4	1.9	7.8	12.6	176.7
14	San Josecito	Pilaya	1976-87,90-92	4250	28.1	45.4	47.8	22.6	7.5	5.6	4.9	4.3	3.1	3.6	12.8	29.1	214.6
15	VillaMontes	Pilcomayo	1974-87,89-04	19131	30.6	41.2	44.9	21.8	7.9	3.0	2.2	1.6	1.4	2.0	4.8	7.6	169.0
16	Misión La Paz	Pilcomayo	1980-2004	8884	-32.0	-27.7	-30.6	-3.6	-2.2	-0.2	-2.1	-2.6	-3.3	-4.3	-6.8	-4.5	-120.0

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de Aguilar et al, 2006)

La tabla 6.3 muestra que la lámina de escurrimiento de la parte baja de las cuencas de los ríos Pilaya y Pilcomayo es considerablemente más alta que la de la parte alta de esas mismas

cuencas. Esto coincide con el hecho de que también se registran valores más altos de precipitación en esas intercuenas (ver capítulo 4 y mapa de isoyetas).

## 6.2 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

Como se describió en el capítulo 3.2, el modelo requiere de varios parámetros de calibración. Con el objeto de disminuir el número de esos parámetros, explotar al máximo la información cartográfica disponible y tener la posibilidad de extender la modelación a subcuencas no aforadas, los parámetros de capacidad de almacenamiento del suelo  $H_{max}$  y capacidad de infiltración  $I_{max}$  se determinaron por medio de la base de datos y mapas temáticos elaborados por Zonisig (2000-01) para los tres departamentos bolivianos de Potosí, Chuquisaca y Tarija, que cubren más del 90% de la superficie de la Cuenca Alta del río Pilcomayo. Este proceso y los mapas resultantes se describen a continuación.

### 6.2.1 Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

$H_{max}$  es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y zona no saturada en mm, incluyendo el almacenamiento superficial (charcos y depresiones) y en la vegetación. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración, por lo que un valor más grande de  $H_{max}$  implica en principio una disminución del volumen de escorrentía. El proceso para obtener  $H_{max}$  considera características del suelo (textura y pedregosidad) y de la vegetación (profundidad radicular).

La tabla 6.4 (Zonisig, 2001) usa doce tipos de textura de suelos y el contenido de piedra y grava (pedregosidad) en porcentaje, para determinar valores de capacidad de retención de humedad (CRH) por metro de profundidad del suelo. Se define la pedregosidad del suelo en la superficie, en base a descripciones de perfiles de suelo obtenidos de los estudios de ZONISIG en la zona de estudio, cuya fuente es el muestreo de campo y los análisis de laboratorio realizados durante las campañas de trabajo de esa institución. La información cartográfica fue procesada en base a la metodología elaborada por el Lic. Freddy Miranda, técnico en SIG del IHH y se describe a continuación.

La información requerida se encuentra en dos tablas de la base de datos Zonisig: la tabla LABSUE de análisis de muestras de suelos en laboratorio y la tabla HORIZON de suelos con datos de campo. Como vinculantes, se usaron la tabla PERFIL que describe la estructura del suelo, SUBPAI que presenta las componentes de las unidades de terreno. En las tablas de la base de datos se detalla la información de posición de los datos de campo tomados en cuenta para los muestreos, con sus respectivos identificadores donde se incluye las coordenadas de cada registro: UTM zona 20, PSAD 56 en el caso de los departamentos de Chuquisaca y Tarija. Para el departamento de Potosí están en coordenadas Lambert conforme cónica, por encontrarse en dos usos zonales (19 y 20).

La tabla LABSUE de Potosí posee los datos provenientes de los resultados de campo, en la que se incluye el valor de pedregosidad de cada una de las unidades, entre otras características, además de un identificador utilizado en campo para las muestras de laboratorio. En el caso de Chuquisaca y Tarija, existe otra tabla con las características de textura determinadas en

laboratorio y que permiten ligar los datos de pedregosidad, textura y la ubicación a través de identificadores de punto de muestreo y de muestra de campo.

**Tabla 6.4: Valores de la capacidad de retención de humedad (CRH) por metro de suelo en relación a la pedregosidad y la textura**

Textura <sup>1/</sup>		Sin piedra ajustado a CRH [mm/m] <sup>2/</sup>	CRH [ mm/m ] tropical <sup>3/</sup> Contenido de piedra y grava (y % de reducción sin piedra con CRH tropical)				
Código	Descripción	0%	0-5%	5-15%	15-40%	40-80%	> 80%
Y	Arcilla	140	130	120	90	50	10
F	Franco	170	160	140	110	40	20
L	Limo	150	130	120	100	55	10
A	Arena	90	80	70	60	30	10
AF	Arena francosa	110	100	90	70	40	10
YA	Arcilla arenosa	110	100	90	70	40	10
FYA	Franco arcillo arenoso	150	140	130	100	55	10
FA	Franco arenoso	150	130	120	100	55	10
YL	Arcilla limosa	160	140	130	110	55	10
FYL	Franco Arcillo limoso	170	150	140	110	65	20
FL	Franco limoso	190	170	150	130	70	20
FY	Franco arcilloso	150	130	120	100	55	10

(Fuente: ZONISIG, 2001)

- <sup>1/</sup> Las texturas anotadas son las más cercanas a las texturas equivalentes USDA utilizadas en los levantamientos de suelos. Estas texturas se han uniformado a la clasificación de la base de datos de ZONISIG. Por esto la clase Limo (L) es una interpolación entre Arcilla arenosa fina y Arcilla limosa.
- <sup>2/</sup> Son valores adaptados de Salter y Williams (1967, 1969) y Hall et al. (1977), en Booker (1984).
- <sup>3/</sup> Rangos de pedregosidad según los datos en la base de datos biofísicos de ZONISIG.

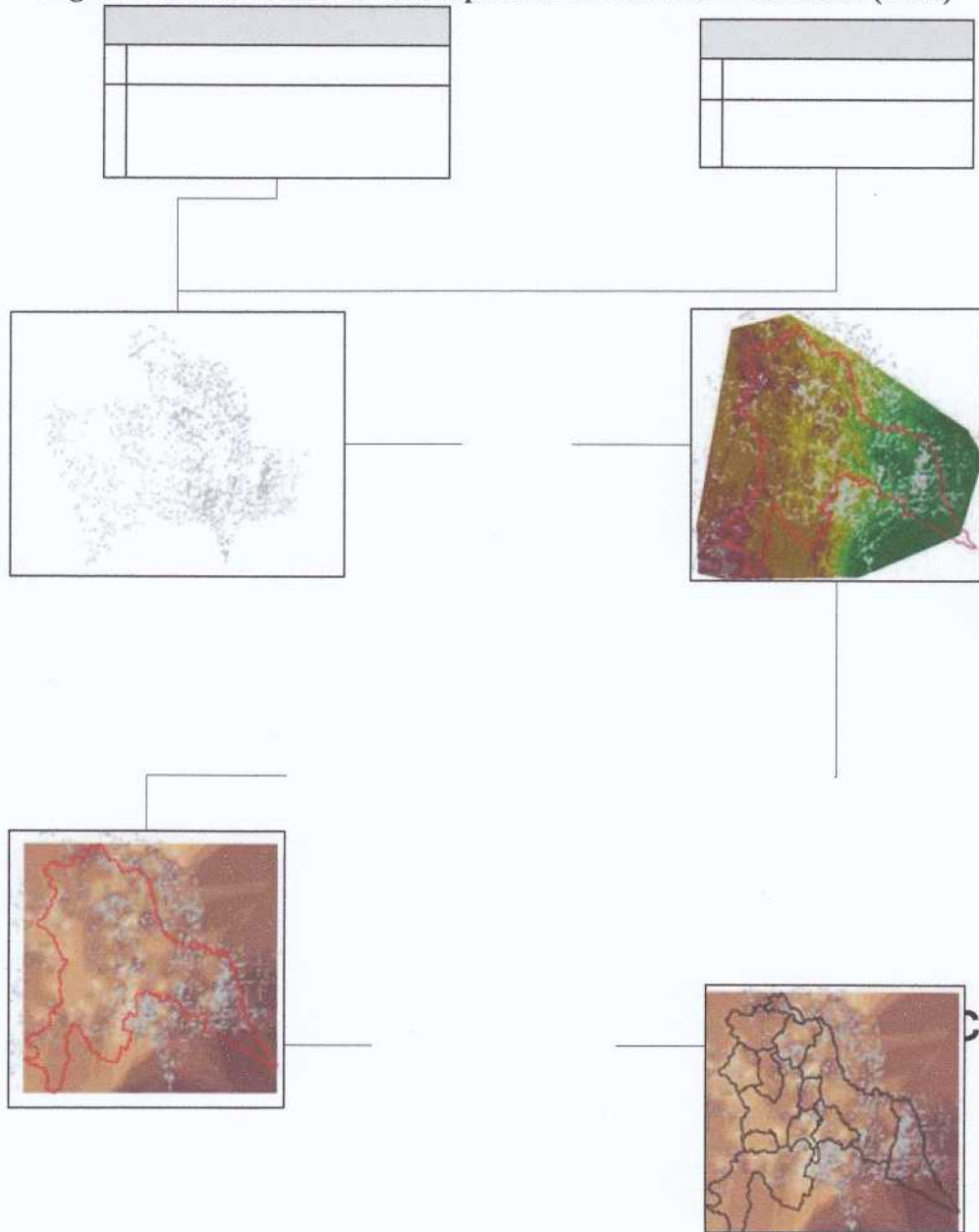
Una vez integradas las tablas con los parámetros requeridos para el cálculo, a nivel departamental, se realizó la integración de los tres departamentos a través de la conversión de las coordenadas UTM y Lambert a coordenadas geográficas, con el fin de desplegar toda la información existente en el mismo plano.

Con la información de los tres departamentos y la selección de los parámetros a ser usados, se realizó una interpolación de los valores obtenidos, con el fin de incorporar datos discretos a continuos (raster), asumiendo que los valores de cada una de las muestras llevan una cierta relación espacial de distribución. El método usado fue el de distancia inversa ponderada, como consecuencia de un análisis de los datos geológicos y fisiográficos, usando los parámetros de interacciones para 12 puntos vecinos y en grado 2. A pesar de las limitaciones de la interpolación, sirvió para la generalización de las unidades y la incorporación de información de unidades mayores a través de la vegetación para el cálculo a nivel de cada subcuenca.

Asumiendo que muchos de los muestreos realizados están a nivel de datos parciales y al no contar con otra herramienta de información, se tomó la decisión de obtener áreas de trabajo que representen condiciones similares y más frecuentes en las subcuencas. En algunas de las

subcuencas los valores obtenidos en las tablas son de alta variación, por lo que se recomendó el uso de los valores mas frecuentes como media de las condiciones existentes. La figura 6.4 es un esquema del proceso. La figura 6.5 presenta es el mapa resultante de capacidad de retención de humedad en milímetros por metro de profundidad de suelo para la cuenca Alta del Río Pilcomayo.

**Fig. 6.4: Proceso de cálculo de la capacidad de retención de humedad (CRH)**



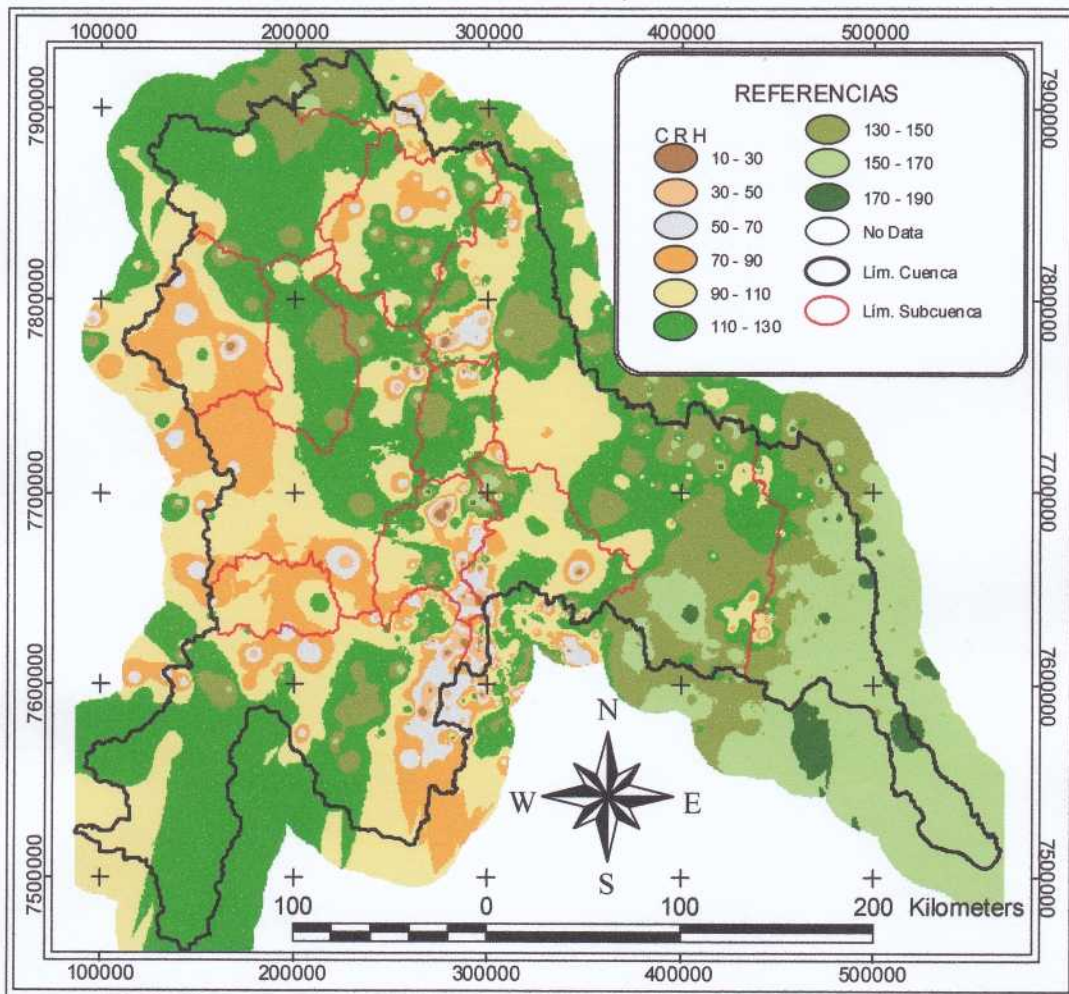
ción de p

Coordenadas

ID 79

#

**Figura 6.5: Capacidad de retención de humedad (CRH) en [mm/m] en la Cuenca Alta del río Pilcomayo**



(Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG, 2001)

El cálculo de la capacidad de almacenamiento  $H_{max}$  se ve afectado también por la profundidad radicular  $h$ , que indica hasta que profundidad las raíces de las plantas pueden llegar y usar el agua que está almacenada en el suelo. La profundidad radicular es una función de la cobertura vegetal y uso de la tierra. Los valores más bajos de  $h$  corresponden a las rocas y los más altos a los bosques y agricultura perenne de alta densidad. El agua presente en el suelo a una profundidad mayor a la radicular no está disponible para la evapotranspiración, y por tanto no se toma en cuenta en la estimación de  $H_{max}$  ni en el balance hídrico del suelo. Diferentes valores de  $h$  influyen directamente en los resultados de la evapotranspiración real, del almacenamiento, del déficit y de la excedencia de agua. Al multiplicar la profundidad radicular por la capacidad de retención de humedad, se obtiene el almacenamiento potencial  $H_{max}$ .

La tabla 6.5 es una guía para la estimación de la profundidad radicular para diferentes tipos de cobertura y uso del suelo. Por la escala del estudio y de los mapas Zonisig, se calculó para tipos de cobertura con una profundidad radicular generalizada, correspondientes a los cinco primeros valores de la tabla 6.5, que presentan solamente dos profundidades: 100 cm y 150 cm. Sin embargo, para definir la profundidad radicular debe tomarse en cuenta el tipo de suelo y el tipo de vegetación actual o proyectada. Se calcula con el valor mínimo de los dos. Por ejemplo, el balance hídrico para vegetación o cultivos de 150 cm de profundidad radicular sobre un suelo con una profundidad efectiva de solamente 50 cm, está limitado por esos 50 cm. La tabla 6.6 presenta los tipos dominantes de cobertura vegetal, en la cuenca alta del Pilcomayo, según la clasificación UNESCO (Zonisig, 2001).

**Tabla 6.5. Profundidad máxima de raíces por tipo de cobertura vegetal y uso de la tierra (escala 1:250.000)**

Tipo de uso de la tierra	Profundidad máxima de raíces
Agricultura anual	100 [cm]
Agricultura perenne	150 [cm]
Pastos sembrados	100 [cm]
Pasturas naturales	100 [cm]
Bosques	150 [cm]
Pradera	90 [cm]
Terrazas	90 [cm]
Llanuras	80 [cm]
Abanicos	75 [cm]
Cuesta	70 [cm]
Serranías	65 [cm]
Colina	60 [cm]
Rocas	30 [cm]

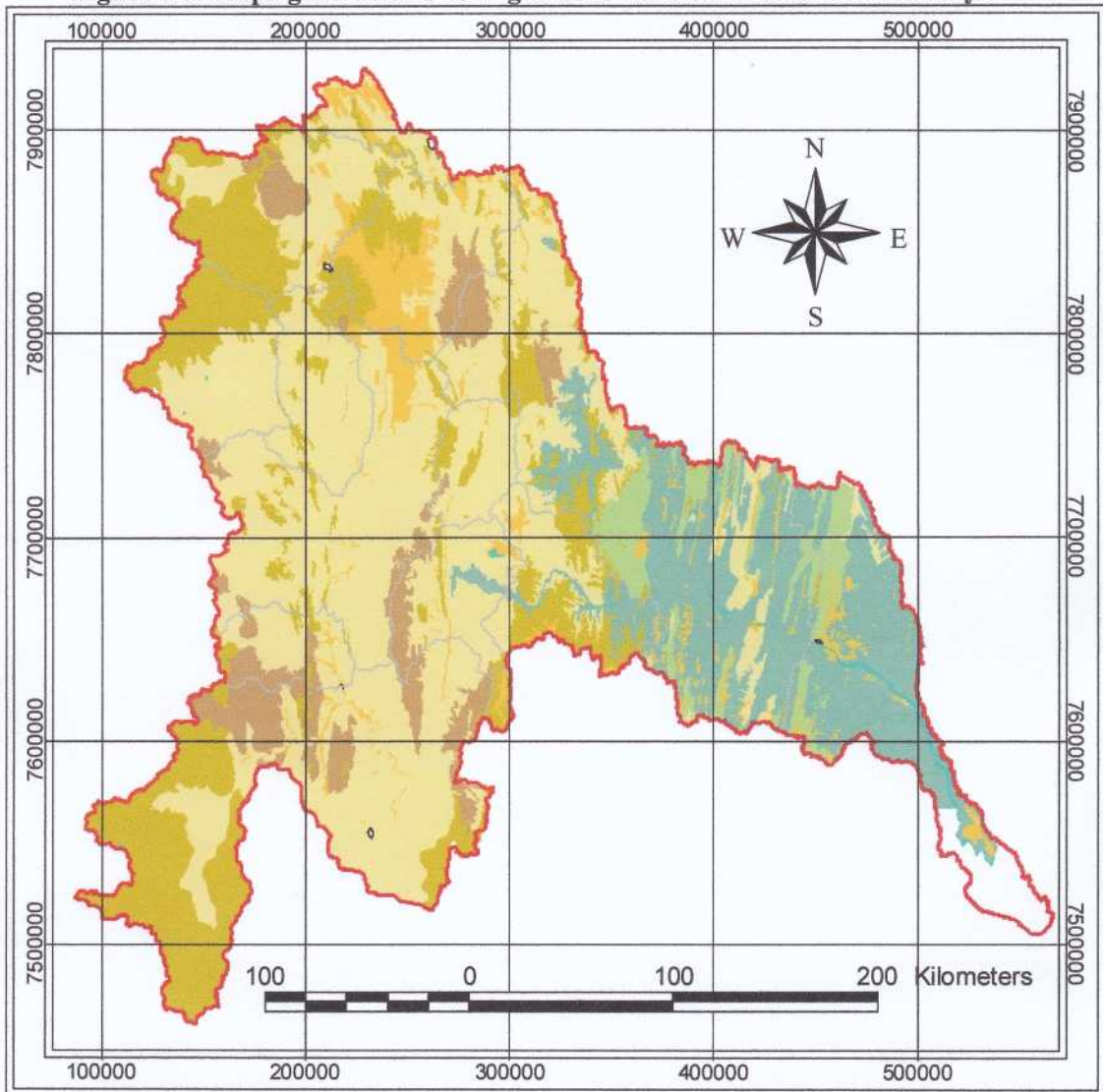
**Tabla 6.6: Tipo de cobertura vegetal en la Cuenca Alta**

Tipo de vegetación (UNESCO, 1973)
Pradera gramínea o herbácea densa, muy densa
Pradera gramínea o herbácea semidensa
Pradera gramínea o herbácea abierta
Matorral claro o abierto y/o espinoso
Matorral semidenso, denso y muy denso y/o espinoso
Bosque claro, abierto o semidenso
Bosque denso o muy denso
Cualquier tipo de vegetación dispersa

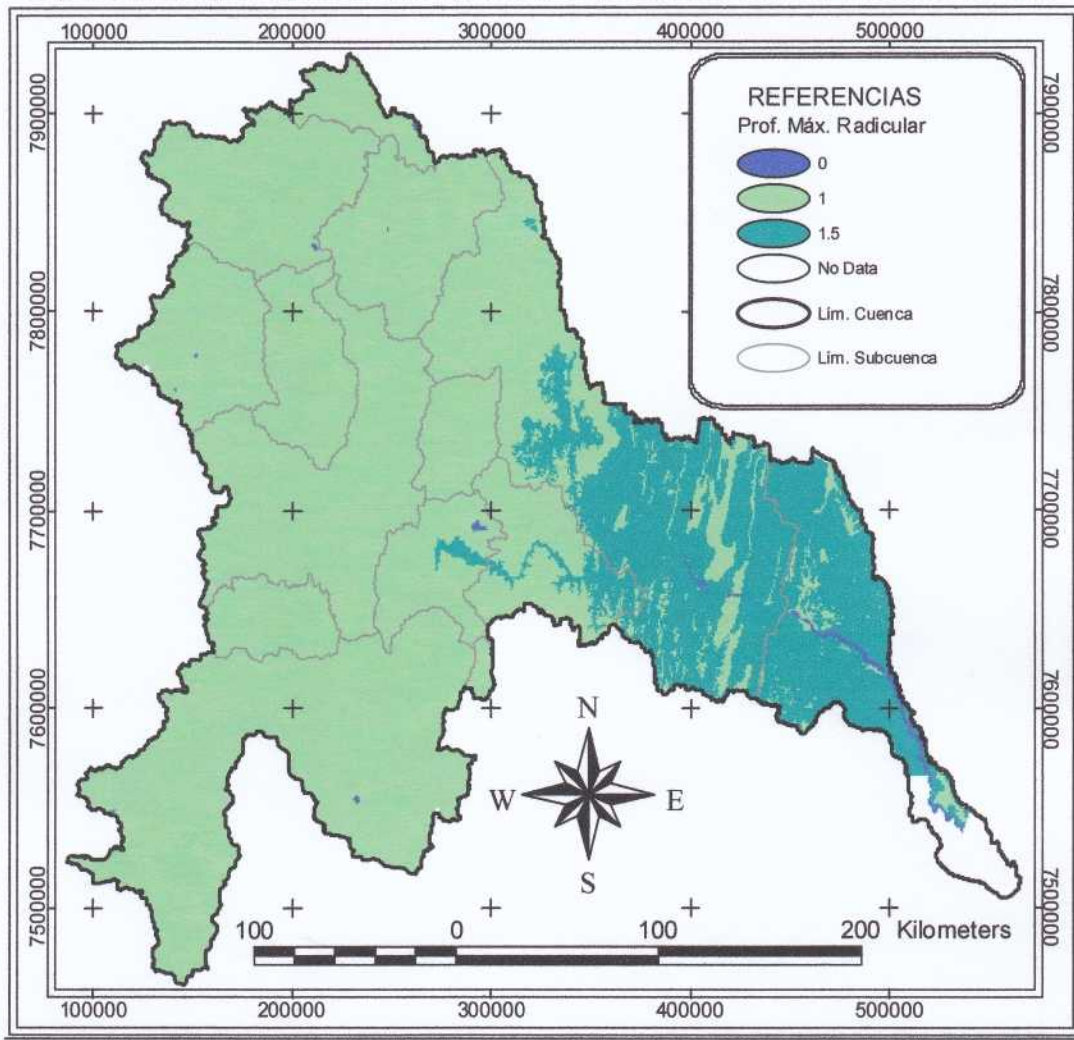
(Fuente: ZONISIG, 2001)

La figura 6.6 presenta el mapa generalizado de vegetación y la figura 6.7 el mapa de profundidad radicular para la cuenca Alta del Río Pilcomayo, obtenido en base a la cartografía temática de ZONISIG.

**Figura 6.6: Mapa generalizado de vegetación - Cuenca Alta del río Pilcomayo**



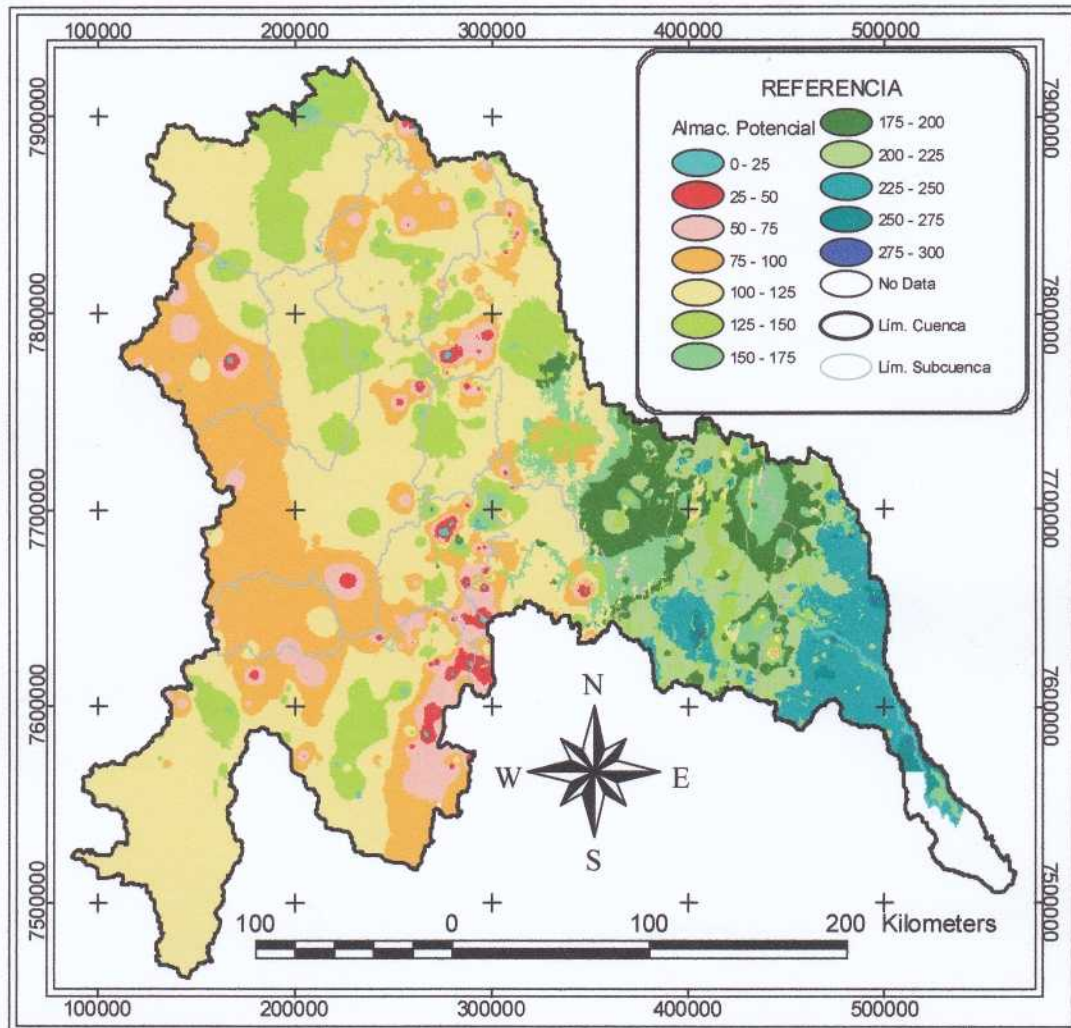
**Figura 6.7: Mapa de profundidad radicular (m) en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo**



(Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG, 2001)

La figura 6.8 presenta el mapa de capacidad de almacenamiento Hmax del suelo (potencial) para la Cuenca Alta del Río Pilcomayo, resultado de combinar los mapas de capacidad de retención de humedad (figura 6.5) con el de profundidad radicular (figura 6.7). Se observan diferencias significativas por regiones. La zona cordillerana andina al oeste es la que presenta menor potencial de almacenamiento hídrico, con los valores mínimos asociados a algunas serranías altas y cumbres. En los valles interandinos, Hmax tiende a aumentar, pero algunas serranías presentan valores bajos. La mayor capacidad de almacenamiento se da en la llanura chaqueña al este del Aguaragüe y en segundo lugar, en los valles de algunos afluentes aguas arriba de Villamontes, que tienen una cobertura boscosa importante.

**Figura 6.8: Almacenamiento potencial del suelo Hmax en (mm), Cuenca Alta del río Pilcomayo**



(Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG, 2001)

### 6.2.2 Capacidad de infiltración

Varios autores proponen estimar la infiltración máxima posible o capacidad de infiltración  $I_{max}$  a partir de las características hidrogeológicas de la cuenca, usando tablas como la 6.7. A falta de esa información,  $I_{max}$  fue calculada usando el método del Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS). Debe tomarse en cuenta la limitación de que el CN está asociado a la infiltración superficial, por lo que el uso del CN para estimar  $I_{max}$  sólo puede tomarse como referencia preliminar. Como se mencionó en 3.2,  $I_{max}$  está asociada a la percolación.

**Tabla 6.7: Infiltración máxima en la cuenca del río Turia**

Tipo de material (según su geología)	I max [mm]
Material aluvial de origen fluvial indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Calcerenitas (Macigno)	250
Rañas	95
Pizarra	40

(Fuente: ASS – GIRH - IIAMA, UPV, 2005)

El número de curva de escurrimiento **CN** o número de complejo hidrológico suelo-cobertura, es una transformación del potencial máximo de retención **S**:

$$CN = \frac{25400}{S + 254}, \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{en (mm)}$$

Para determinar el CN se comienza por clasificar los suelos por grupos hidrológicos según su capacidad de infiltración relativa. El Soil Conservation Service propone cuatro grupos (A,B,C,D), según las clases texturales y el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación. El grupo hidrológico de suelos se combina con el tipo de cobertura vegetal para definir el CN. Cuanto más densa es la cobertura vegetal mayor será la infiltración y más bajo el CN. El procedimiento es el siguiente:

1. Se asignan las condiciones de humedad antecedente (AMC). En el presente estudio se asumió la condición de humedad antecedente II (AMC-II) (condición media), por trabajar sobre el modelo hidrológico a paso mensual sobre un área grande.
2. Se asigna el grupo hidrológico del suelo en base al mapa respectivo.
3. Se asignan las condiciones de infiltración del suelo con el mapa de uso y cobertura vegetal de la cuenca.
4. Se intersectan ambos mapas para obtener un tercer mapa, que combina el grupo hidrológico y las condiciones de infiltración. En este mapa se asigna valores de CN a cada polígono resultante de la intersección, según tablas elaboradas por el SCS, asignándolas a los mapas de vegetación disponibles según experiencia del operador. Es conveniente que el mapa generado sea transformado a tipo Raster (matricial).
5. Puesto que el modelo es de tipo agregado (parámetros concentrados), se usan valores medios ponderados para la subcuenca. Si la superficie presenta varios complejos hidrológicos suelo-cobertura con sus respectivos valores de CN, el valor representativo puede ser ponderado según:

$$CN_p = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{A}$$

Donde:

- $CN_p$  : Número de curva ponderado para la cuenca total  
 $CN_i$  : Número de curva del complejo hidrológico suelo cobertura del  $A_i$   
 $A_i$  : Área del complejo hidrológico parcial  
 $A$  : Área total de la cuenca

6. Por último, el valor ponderado de CN puede transformarse a un único valor de S, según las relaciones descritas anteriormente.

Para el presente estudio, se utilizó el mapa de número de curva elaborado por el Proyecto Pilcomayo (2005). Para elaborarlo se usaron los mapas de suelos y cobertura vegetal de Zonisig (2001) escala 1:250,000 y mapas argentinos para el sector correspondiente de la cuenca. Los técnicos del Proyecto Pilcomayo tuvieron que adaptar los grandes grupos edafológicos o subórdenes usados en esos mapas a los grupos hidrológicos del SCS, según la tabla 6.8. Zonisig usó la clasificación edafológica de la FAO para Bolivia, mientras que en Argentina se usó la Soil Taxonomy. La figura 6.9 muestra el mapa de CN de la Cuenca Alta del río Pilcomayo, elaborado por el Proyecto Pilcomayo

**Tabla 6.8: Asignación del grupo hidrológico de suelo**

**BOLIVIA**

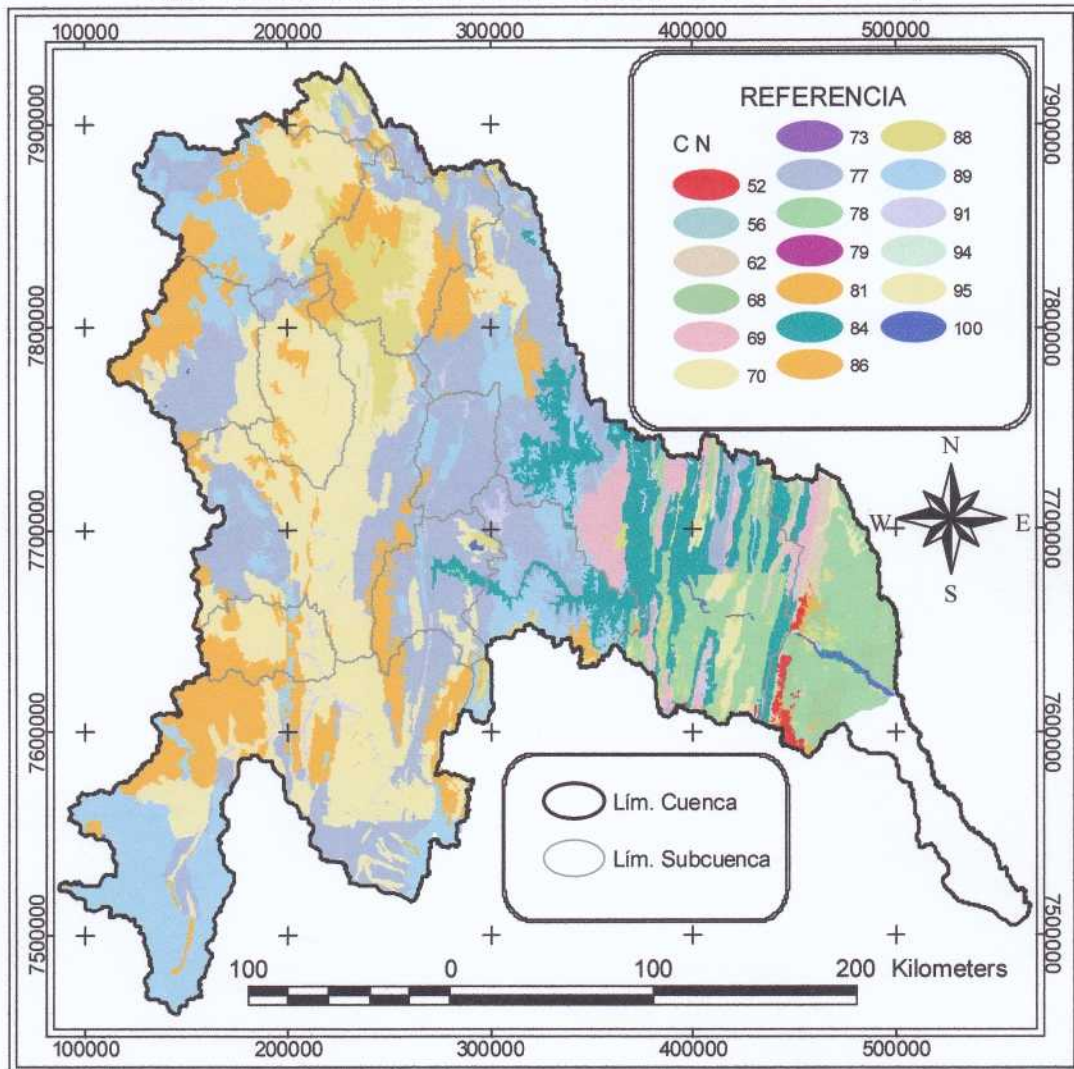
Grupo de Suelo	Leptosol	Regosol	Fluvisol	Arenosol	Cambisol	Phaeozem	Greyzem	Calcisol	Solonetz	Solonchac	Lixisol	Gleysol
Grupo Hidrológico SCS	D	C	D	C	C	B	B	C	D	D	C	C

**ARGENTINA**

Grupo de Suelo	Torriortente	Criorrientes	Torrifluvent	Ustifluvent	Cambortide	Paleargides
Grupo Hidrológico SCS	D	D	C	C	D	D

Fuente: Proyecto Pilcomayo, 2005

Figura 6.9: Número de curva CN - Cuenca Alta del río Pilcomayo



(Fuente: Proyecto Pilcomayo, 2005)

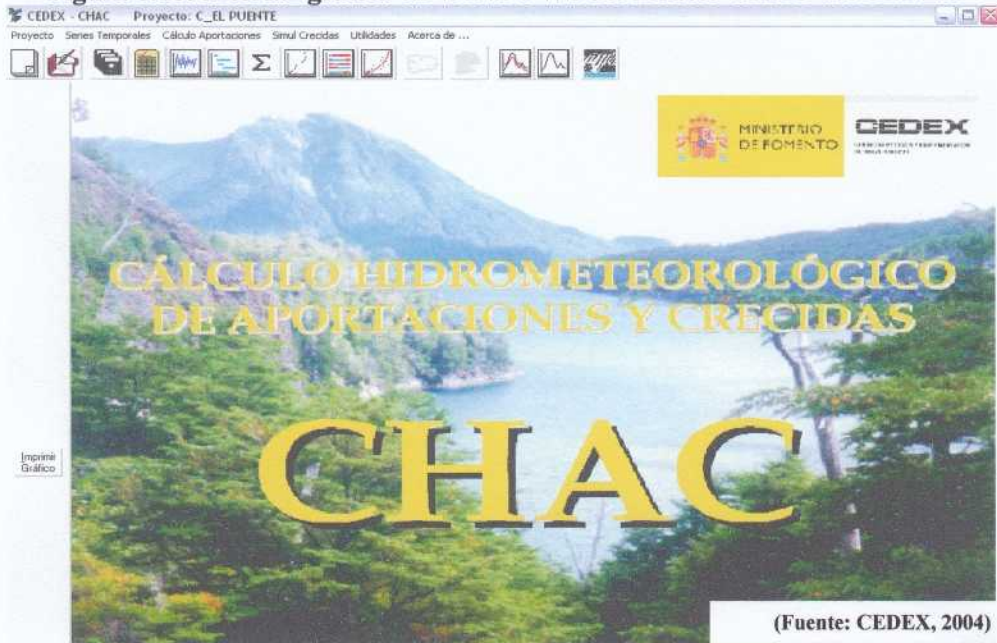
### 6.3 CALIBRACIÓN

#### 6.3.1 Conceptos básicos

La aplicación **CHAC** (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) ha sido desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento de España (ver figura 6.10). CHAC está desarrollado en Visual Basic para MS Windows, con subrutinas de cálculo en Fortran 77, de fácil manejo a través de una interfaz gráfica. La versión utilizada es

la PreAlfa03j de junio del 2004, que incorpora al SIMULA como modelo precipitación-escurrecimiento, considerado adecuado para proyectos que requieran resultados confiables a corto plazo en virtud de sus requerimientos de datos. La ventana de datos generales de entrada se presenta en la figura 6.11.

**Figura 6.10: Interfaz gráfica en WINDOWS del modelo CHAC del CEDEX**



**Figura 6.11: Ventana de datos de entrada del modelo CHAC**

Aportaciones - Calibración: Datos iniciales Proyecto: velillos aportaciones

Variables medias en cuenca:

Precipitaciones C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Presa de Velillos\Velillos Aportaciones\Velillos Precipit areales.txt

ETP C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Presa de Velillos\Velillos Aportaciones\Velillos ETP Areal.txt

Caudales registrados para calibración:

Caudales C:\Archivos de programa\Chac\Proyectos\Presa de Velillos\Velillos Aportaciones\Velillos Aport registradas.txt

Fichero de caudales para CALIBRACION

Año hidrológico inicial: 1971 / 72

Año hidrológico final: 1984 / 85

Superficie de la cuenca: 180 Km<sup>2</sup>

Número de días de lluvia por mes: 30 1 a 30 Parametro del modelo

Número de ramas de descarga: 1 Máximo 2 ramas

Aceptar Cancelar

En el capítulo 3.2 se presentaron los conceptos y estructura básica del modelo. CHAC-SIMULA usa cuatro parámetros de calibración: la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo  $H_{max}$ , la capacidad de infiltración  $I_{max}$ , el parámetro  $C$  de excedencia y el coeficiente de descarga del acuífero  $\alpha$ . La ubicación de estos parámetros en la figura 3.3 indica en que subproceso tiene más influencia cada uno de ellos. En el subcapítulo anterior se describió como se obtuvieron preliminarmente valores de  $H_{max}$  e  $I_{max}$  para cada una de las subcuencas. Los valores de  $C$  y  $\alpha$ , así como los definitivos de  $H_{max}$  e  $I_{max}$ , fueron resultado del proceso de calibración.

Durante el proceso de calibración se busca obtener juegos de valores para los cuatro parámetros, de tal manera de lograr el mejor ajuste posible entre las series de caudales simulados y las series de caudales observados. La calibración es una etapa fundamental de la modelación y con frecuencia determina el nivel de confiabilidad del modelo para aplicaciones posteriores. La experiencia y criterio del operador son también fundamentales.

La calibración del CHAC-SIMULA es manual y se apoya en la evaluación estadística de errores y en la comparación visual de los hidrogramas observados y simulados. Los errores calculados por el modelo son:

Error medio: Índice de ajuste para volúmenes medios

$$e = \sum_{i \in \text{meses}}^n \left( \frac{Q_{sim\_i} - Q_{obs\_i}}{n \cdot \bar{Q}_{sim}} \right) \quad (6.1)$$

Error cuadrático relativo: Índice de ajuste de caudales bajos

$$e_{cr} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in \text{meses}}^n \left( \frac{Q_{sim\_i} - Q_{obs\_i}}{Q_{sim\_i}} \right)^2}{n}} \quad (6.2)$$

Error cuadrático estándar: Índice de ajuste de caudales altos

$$e_{ct} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in \text{meses}}^n (Q_{sim\_i} - Q_{obs\_i})^2}{n \cdot \bar{Q}_{sim\_i}^2}} \quad (6.3)$$

La figura 6.12 muestra la ventana de calibración, que se accede desde el módulo de Cálculo de Aportaciones. Desde esta ventana se accede a la ventana de Gráficos, donde se pueden comparar visualmente hidrogramas y trazar gráficas de otras variables (figura 6.13).

Figura 6.12: Ventana de calibración del modelo CHAC

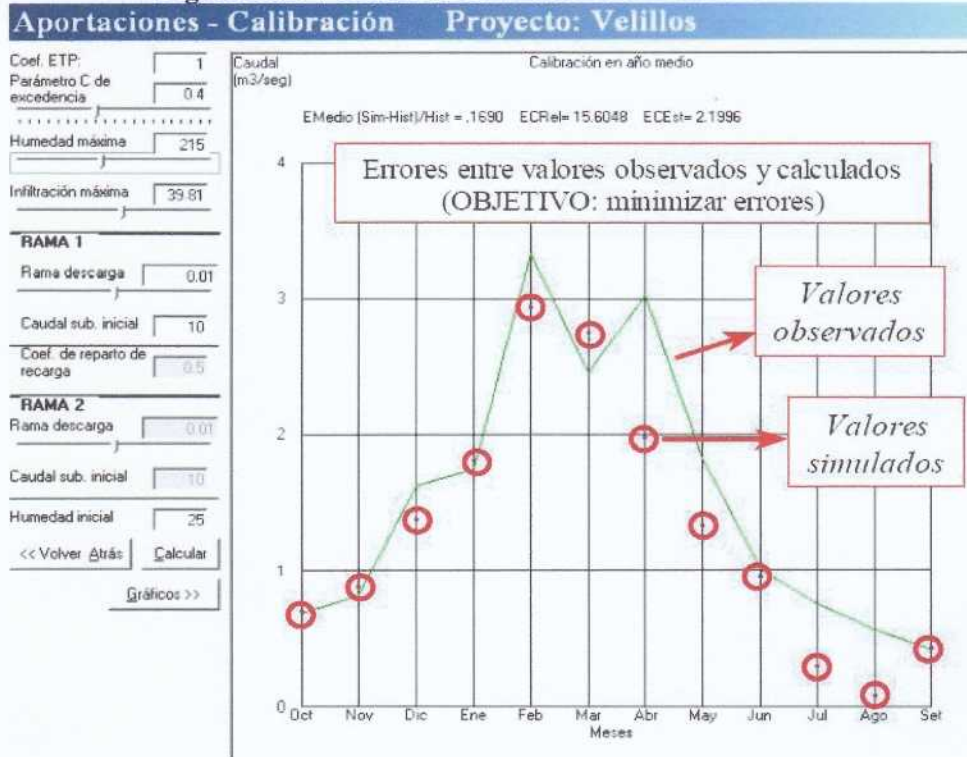
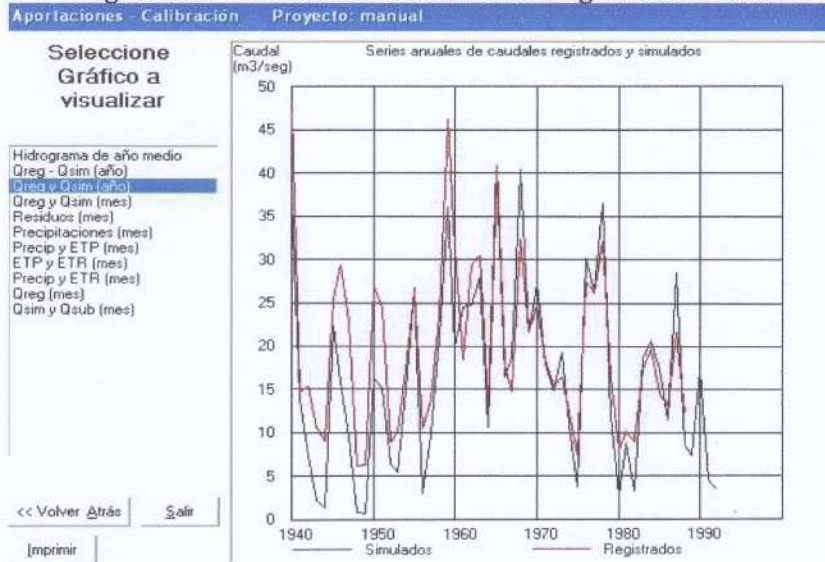


Figura 6.13: Ventana de visualización de gráficos de calibración



Los resultados que proporciona el CHAC durante el proceso de calibración son:

- Series de caudal subterráneo
- Series de caudal superficial
- Series de caudal total
- Series de evapotranspiración real
- Series de contenido de humedad en el suelo
- Series de recarga al acuífero
- Series de cambio en el almacenamiento subterráneo

Los ficheros temporales con los parámetros y resultados de simulación son:

- ResultadosSimula.txt : Parámetros de simulación
- \$APORC.tmp (m3/s) : Caudales totales simulados
- \$APSUB.tmp (m3/s) : Caudales subterráneos simulados
- \$ETP1.tmp (mm) : ETP afectada por el coeficiente de cultivo
- \$EREAL.tmp (mm) : ET real
- \$HUMEDAD.tmp (mm) : Humedad del suelo a final de mes
- \$VOLSUB.tmp (Hm3) : Volumen en acuífero a final de mes
- \$RESIDUO.tmp : Residuos mes absolutos (simulado histórico)
- <\$> : Incluye el año medio

### 6.3.2 Resultados

La calibración se realizó usando las series de caudales observados de las 14 estaciones de la tabla 6.1, por subcuencas e intercuencas. Los caudales para las intercuencas se obtuvieron restando a los caudales observados en la estación de control los caudales registrados en la o las estaciones inmediatamente aguas arriba. Por ejemplo, para obtener la serie de caudales de la intercuenca Villamontes, se restaron a los caudales observados en la estación Villamontes los de las estaciones de San Josecito y Viña Quemada. La figura 2.6 muestra la ubicación y límites de cada una de las subcuencas e intercuencas,

Se aplicó la siguiente simbología:

- Q<sub>1</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Nujchu
- Q<sub>2</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Talula
- Q<sub>3</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Viña Quemada
- Q<sub>4</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Muyuquiri
- Q<sub>5</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de San Pedro
- Q<sub>6</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Salto León
- Q<sub>7</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Tumusla
- Q<sub>8</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Palca Grande
- Q<sub>9</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de El Molino
- Q<sub>10</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Tupiza
- Q<sub>11</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de La Angostura Tupiza
- Q<sub>12</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de El Puente
- Q<sub>13</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Chillcara
- Q<sub>14</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de San Josecito
- Q<sub>15</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Villa Montes
- Q<sub>16</sub> = Caudal observado en la estación hidrométrica de Misión La Paz

En base a lo anterior los siguientes valores corresponden a subcuencas de cabecera o únicas:

Q CAL. NUJCHU	=	Q 1
Q CAL. TALULA	=	Q 2
Q CAL. MUYUQUIRI	=	Q 4
Q CAL. SAN PEDRO	=	Q 5
Q CAL. SALTO LEÓN	=	Q 6
Q CAL. EL MOLINO	=	Q 9
Q CAL. TUPIZA	=	Q 10
Q CAL. ANGOSTURA	=	Q 11

Los siguientes valores corresponden a intercuenas. Se observa que en algunos casos (Viña Quemada, Palca Grande y El Puente), se consideraron dos opciones de intercuenca para la calibración.

Q CAL. VIIÑA QUEMADA	=	Q 3	-	Q 1	-	Q 2
Q*CAL. VIIÑA QUEMADA	=	Q 3	-	Q 1		
Q CAL. TUMUSLA	=	Q 7	-	Q 6		
Q CAL. PALCA GRANDE	=	Q 8	-	Q 7	-	Q 5
Q*CAL. PALCA GRANDE	=	Q 8	-	Q 7		
Q CAL. EL PUENTE	=	Q 12	-	Q 11		
Q*CAL. EL PUENTE	=	Q 12				
Q CAL. CHILLCARA	=	Q 13	-	Q 5	-	Q 8 - Q 9 - Q 12
Q CAL. SAN JOSECITO	=	Q 14	-	Q 13		
Q CAL. VILLAMONTES	=	Q 15	-	Q 3	-	Q 14
Q CAL. MISIÓN LA PAZ	=	Q 16	-	Q 15		

La tabla 6.9 resume los valores obtenidos por subcuencas e intercuenas de: a) los datos de entrada generales ( $n_d$ ,  $n_{rd}$ ,  $C_{ETP}$ ); b) los parámetros de calibración ( $C$ ,  $H_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $\alpha$ ); c) los valores iniciales ( $Q_{sub0}$ ,  $H_0$ ); d) los errores estadísticos. Se usó la siguiente simbología:

$A_{sub i}$	[ Km <sup>2</sup> ]	=	Superficie de la cuenca (área de cuenca cabecera, subcuenca, intercuenca para la calibración)
$Q_{CAL}$	[ ]	=	Caudal de calibración, la nomenclatura utilizada corresponde al n° asignado en la tabla
Año hidrológico		=	Año hidrológico, inicial y final en el que es posible la calibración
$n_d$	[ días ]	=	Número de días de lluvia por mes (recomendado promedio en época de lluvias)
$n_{rd}$	[ ]	=	Número de ramas de descarga del acuífero
$C_{ETP}$	[ ]	=	Coefficiente de corrección de ETP (método y por el uso de suelo)
$C$	[ ]	=	Parámetro C de Excedencia (rango recomendado por DHI, 2001 de 0.1-0.4)
$H_{MAX}$	[ mm ]	=	Humedad máxima (Capacidad máxima de almacenamiento del suelo)
$I_{MAX}$	[ mm ]	=	Infiltración máxima (Capacidad de percolación superficial, aproximado a S del SCS)
$\alpha 1$	[ 1/días ]	=	Coefficiente de descarga de la primera rama del acuífero
$Q_{SUB01}$	[ m <sup>3</sup> /s ]	=	Caudal subterráneo inicial del la primera rama del acuífero
$H_0$	[ % ]	=	Humedad inicial ó antecedente (agua almacenada en estado intermedio)
$E_{Medio}$	[ 1/1 ]	=	Error medio (para volúmenes medios)
$E_{C Rel}$	[ 1/1 ]	=	Error cuadrático relativo (índice de ajuste en caudales bajos)
$E_{C Est}$	[ 1/1 ]	=	Error cuadrático estandar (índice de ajuste en caudales altos)
$R$	[ 1/1 ]	=	Correlación entre valores históricos observados y valores simulados por el modelo

Tabla 6.9: Parámetros de calibración por subcuencas - Cuenca Alta del Río Pilcomayo

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Asub i	Q <sub>CAL</sub>	Datos de entrada del Modelo				Parámetros de Calibración del modelo							Errores - Calibración				Mapas temáticos	
					Año hidrológico		n <sub>d</sub>	n <sub>rd</sub>	C <sub>ETP</sub>	C	H <sub>MAX</sub>	I <sub>MAX</sub>	α <sub>1</sub>	Q <sub>SUB o 1</sub>	H <sub>O</sub>	E <sub>med</sub>	E <sub>Creel</sub>	E <sub>cEst</sub>	R	H max	I max
					Inicial	Final															
1	Nujchu	Nujchu	1608	Q 1	73 - 74	85 - 86	11	1	1	0.150	110	70	0.010	4.7	0	-0.224	1.727	0.770	0.806	120	69
2	Talula	Pilcomayo	6493	Q 2	75 - 76	84 - 85	12	1	1	0.170	120	95	0.010	5.5	0	-0.063	0.487	0.813	0.807	120	62
					90 - 91	97 - 98	12	1	1	0.170	120	95	0.010	5.5	0	0.143	0.577	0.621	0.904		
					75 - 76	97 - 98	12	1	1	0.170	120	95	0.010	5.5	0	0.009	0.520	0.714	0.836		
3	Viña Quemada	Pilcomayo	5348	Q3-Q2-Q1	78 - 79	84 - 85	11	1	1	0.140	118	60	0.010	3.5	0	0.867	10.779	1.828	—	109	59
			6956	Q3-Q2	77 - 78	84 - 85	11	1	1	0.160	118	52	0.012	4.0	0	0.133	6.249	0.967	0.829	112	61
					90 - 91	97 - 98	11	1	1	0.160	118	52	0.012	4.0	0	-0.011	6.409	0.650	0.924		
77 - 78	97 - 98	11	1	1	0.160	118	52	0.012	4.0	0	0.053	6.125	0.811	0.860							
4	Muyuquin	Lique Mayu	63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	133	50
5	San Pedro	C. Camargo	2108	Q 5	75 - 76	83 - 84	9	1	1	0.460	128	75	0.022	1.0	0	0.010	2.367	0.732	0.910	116	66
6	Salto Leon	Salto Leon	4455	Q 6	75 - 76	84 - 85	8	1	1	0.450	110	100	0.012	1.0	0	0.965	1.814	4.111	0.660	93	70
7	Tumusla	Tumusla	3662	Q7-Q6	76 - 77	84 - 85	9	1	1	0.450	120	90	0.012	0.5	0	0.119	1.378	1.399	—	117	97
			8117	Q7	74 - 75	96 - 97	8	1	1	0.450	110	120	0.010	2.0	0	0.305	1.471	1.895	0.761	104	82
8	Palca Grande	Tumusla	10496	Q8-Q7-Q5	74 - 76	76 - 77	8	1	1	0.450	110	83	0.016	1.0	0	-0.513	0.630	0.855	—	101	83
					82 - 83	84 - 85	8	1	1	0.450	110	83	0.016	1.0	0	0.848	1.718	2.114	—		
					74 - 76	83 - 84	8	1	1	0.450	110	83	0.016	1.0	0	0.315	1.209	1.940	—		
			12604	Q8-Q7	74 - 75	75 - 76	10	1	1	0.450	105	130	0.010	2.5	0	-0.041	0.896	0.867	0.814	105	86
83 - 84	84 - 85	10	1	1	0.450	105	130	0.010	2.5	0	0.647	2.917	1.433	0.516							
90 - 91	92 - 93	10	1	1	0.450	105	130	0.010	2.5	0	-0.054	0.551	0.584	0.898							
74 - 75	92 - 93	10	1	1	0.450	105	130	0.010	2.5	0	0.116	1.296	1.110	0.823							
9	El Molino	Tomayapo	297	Q 9	78 - 79	84 - 85	10	1	1	0.480	82	55	0.018	0.02	0	0.010	6.952	1.075	0.873	66	35
10	Tupiza	Tupiza	2262	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	91	82
11	La Angostura	Tupiza	2311	Q 11	78 - 79	81 - 82	9	1	1	0.480	110	80	0.008	1.5	0	0.455	1.041	2.722	0.693	91	82
12	El Puente	Sn Juan Oro	17396	Q12-Q11	78 - 79	81 - 82	9	1	1	0.520	145	90	0.010	2.5	0	0.005	0.580	0.826	—	105	63
			19707	Q12	74 - 75	81 - 82	9	1	1	0.480	125	110	0.009	2.5	0	0.291	0.919	1.387	0.825	103	65
13	Chilcara	Camblaya	3155	Q13-Q12-Q9-Q8	75 - 76	92 - 93	7	1	1					0	—	—	—	—	—	99	68
14	San Josecito	Pilaya	4250	Q14-Q13	76 - 77	84 - 85	9	1	1	0.150	110	100	0.008	6.0	0	-0.099	1.081	1.000	0.671	116	52
15	Villa Montes	Pilcomayo	19131	Q15-Q14-Q3	77 - 78	86 - 87	10	1	1	0.210	154	66	0.010	17.0	0	-0.073	1.101	0.887	0.781	155	66
16	Misión La Paz	Pilcomayo	8884	Q16-Q15	73 - 74	99 - 00	7	1	1					0	—	—	—	—	—	209	89

Fuente: Elaboración propia

En las dos últimas columnas de la tabla 6.9 se muestran los valores de los parámetros Hmax e Imax obtenidos de los mapas temáticos, según la metodología descrita en 6.2. Se observa que con la única excepción de la subcuenca controlada por la estación de El Puente, los valores calibrados de Hmax son iguales o muy próximos a los obtenidos de los mapas Zonisig. Lo anterior se cumple para Imax en la mayor parte de las subcuencas. Sin embargo, se presentan diferencias relativamente grandes entre valores calibrados y cartográficos de Imax en algunas subcuencas, con una tendencia a que el valor calibrado sea mayor al cartográfico. Esto era de esperar de acuerdo a lo descrito en 6.2.

Los parámetros C y  $\alpha$  de todas las subcuencas, obtenidos durante la calibración, están dentro del rango normal (ver subcapítulo 3.2). Durante el proceso de calibración se tomó muy en cuenta la influencia que tiene cada uno sobre los caudales simulados. El parámetro adimensional C se usa para calcular el valor límite Po de la precipitación por encima del cual habrá excedente de agua para la escorrentía e infiltración. Si C es 0 el valor de Po=0, por lo que toda lluvia, aún de pequeña magnitud, producirá escorrentía a la salida de la cuenca. Al aumentar el valor de C disminuye la escorrentía (y por tanto el volumen total de escurrimiento) producto de la precipitación en el mes. Este efecto es más notable en los meses lluviosos. C aumenta en caso de vegetación densa, terreno llano o suelos permeables. Los valores más altos de C se presentan en la parte alta de la subcuenca del río San Juan y los más bajos en la parte alta de la subcuenca del río Pilcomayo, aguas arriba de la estación de Viña Quemada.

El valor del coeficiente de descarga del acuífero  $\alpha$  o inversa de la constante de recesión k ( $\alpha=1/k$ ), expresada en (1/días), afecta ante todo la forma y comportamiento del hidrograma durante los meses de transición y de estiaje: abril a noviembre en la cuenca de estudio. Mientras más pequeño sea  $\alpha$ , la curva de recesión se extiende sobre un periodo más largo, el caudal base es más alto y cabe suponer que el almacenamiento temporal en el acuífero es más importante.

El valor de la humedad inicial del suelo Ho fue cero en todas las subcuencas, lo que era de esperar por las condiciones de aridez/semiaridez de la cuenca y porque se usó el año hidrológico en la calibración y validación. En cambio el caudal subterráneo inicial varió de una subcuenca a otra. Para todas las subcuencas se usó una sola rama de acuífero y se adoptó un coeficiente de corrección de la evapotranspiración potencial de 1.0.

El coeficiente de correlación permite comparar la forma de los hidrogramas calculado y observado. Un valor alto por encima de 0.70 indica una buena concordancia entre ambos. En dos subcuencas (Salto León y La Angostura), R estuvo por debajo de 0.70. En el caso de Salto León, la explicación más probable es que el río Yura está regulado por las centrales hidroeléctricas ubicadas en esa subcuenca. En el caso de La Angostura, el R bajo probablemente se explique por la extracción aguas arriba del punto de control. Se destaca que en estas subcuencas el error medio relativo fue también alto.

En gran parte de las subcuencas e intercuencas el error medio relativo se mantuvo por debajo de  $\pm 0.10$  e incluso por debajo de  $\pm 0.02$ . Este error expresa la diferencia entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados y por tanto, es muy relevante para el balance hídrico. Sin embargo, existe un grupo de subcuencas en que el error medio fue positivo ( $Q_{sim} > Q_{obs}$ ) y

alto, con valores entre 0.30 y 0.96. Esas subcuencas corresponden al río Tumusla (estaciones de Salto León y Tumusla) y Tupiza (estación de La Angostura). En las estaciones de Palca Grande y El Puente, el error fue positivo de magnitud media (entre 0.12 y 0.29). Se pudo forzar la calibración asignando valores muy altos al coeficiente C, por ejemplo. Sin embargo, se prefirió mantener la discrepancia, que probablemente se explique por una significativa extracción de agua para riego en las intercuenas Tumusla y Palca Grande y en las subcuencas de los ríos Tupiza y San Juan del Oro. Es más difícil encontrar una explicación para la subcuenca Salto León. Pueden existir varias: extracción de agua para uso consuntivo, la estación hidrométrica no mide el caudal total (hay varias centrales hidroeléctricas sobre este río), “pérdidas” importantes o simplemente, los caudales observados son erróneos. Es importante destacar que los caudales simulados por el modelo corresponden a los caudales “naturales”, es decir no regulados ni disminuidos por extracción de agua para uso consuntivo.

En la subcuenca Ñujchu el error medio relativo fue negativo ( $Q_{sim} < Q_{obs}$ ) y de magnitud media (-0.22). Se decidió mantener la discrepancia basándose en la calibración y análisis cruzado de los datos de Ñujchu y Viña Quemada. Como se observa en la tabla 6.9, la calibración de la intercuenca Viña Quemada bajo la opción  $Q_3-Q_1-Q_2$  dio un error relativo muy alto y positivo (0.867). En el criterio de los autores del presente estudio, esto indica que la explicación más probable es que los caudales observados en Ñujchu estén sobreestimados. Por esa razón y como consecuencia adicional del razonamiento anterior, para el balance hídrico se optó por la alternativa de calibración  $Q_3-Q_2$ . En general, para las intercuenas donde existían alternativas de calibración, se usó en el balance aquella alternativa que en el proceso de calibración producía los errores más bajos o que tenía la serie observada más larga.

Se destaca que en las intercuenas de Villamontes y San Josecito el error medio fue negativo: -0.073 para la primera y -0.099 para la segunda. Si bien estos valores están por debajo de  $\pm 0.10$ , el tamaño e importante caudal que aportan ambas subcuencas se traduce en que las diferencias entre caudales observados y simulados son significativas en valor absoluto. Para el balance hídrico se definió mantener estas diferencias, lo que implícitamente supone que los caudales observados en Villamontes están ligeramente sobreestimados.

En el proceso de calibración se usaron todos los datos observados disponibles, que son los consignados en la tabla 6.9. En el caso de las subcuencas se usaron las series completas de caudales observados, proporcionadas por Aguilar et al (2006). En el caso de las intercuenas se usaron los caudales correspondientes a los periodos comunes de las dos o más estaciones que definen el área de aporte de la intercuenca respectiva.

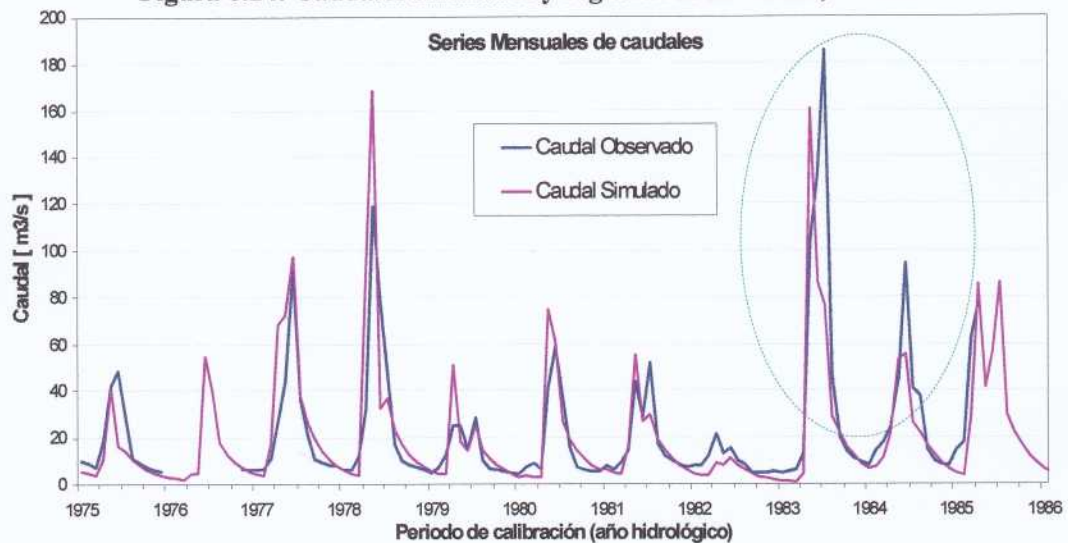
La tabla 6.10 muestra los errores cuando se extraen selectivamente los datos observados correspondientes a periodos en que la discrepancia entre  $Q_{sim}$  y  $Q_{obs}$  es grande, pero manteniendo los valores de los parámetros de calibración de la tabla 6.9. Como es de esperar, los errores se reducen significativamente. Aparte de ilustrar este aspecto, la tabla 6.10 permite identificar en cada estación meses o periodos en que los caudales observados o simulados difieren significativamente. Se plantea entonces hallar una explicación a esas diferencias, que pueden presentarse incluso en estaciones y puntos de control en que el error relativo medio es bajo. Para ese análisis son relevantes el error cuadrático relativo, que es un índice de ajuste de caudales bajos y el error cuadrático estándar, un índice de ajuste de caudales altos.

**Tabla 6.10: Errores de calibración después de extracción selectiva de datos observados - Cuenca Alta del Río Pilcomayo**

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Rio	Asub i	Q <sub>CAL</sub>	Año hidrológico		Resultados de la Calibración				Observaciones de caudales observados en la calibración
					Inicial	Final	Emed	ERel	EEst	R	
1	Nujchu	Nujchu	1608	Q 1	73 - 74	85 - 86	-0.174	1.807	0.651	—	Eliminando Q en los meses: [12] 78 - [01,02,03] 79 - [02,03,08,09,10,11] 80 - [10] 82 - [10,11] 83 - [01,02] 84
2	Talula	Pilcomayo	6493	Q 2	75 - 76	84 - 85	-0.063	0.487	0.813	—	Eliminando Q en los meses: [03,12] 82 - [01,02,03] 83 - [03] 84 - [02,03,04] 85 - [01] 96 - [01,02,11] 97
					90 - 91	97 - 98	0.143	0.577	0.621	—	
3	Viña Quemada	Pilcomayo	5348	Q3-Q2-Q1	78 - 79	84 - 85	0.563	1.994	1.288	—	Sin eliminar meses: al eliminar algunos meses malos, se pierden algunos años hidrológicos (semi) completos. El modelo no responde bien en este caso
			6956	Q3-Q2	77 - 78	84 - 85	0.157	6.381	0.696	—	Eliminando Q en los meses: [02] 78 - [01,02] 84 - [02,12] 85 - [03] 95
					90 - 91	97 - 98	0.028	6.444	0.561	—	
				77 - 78	97 - 98	0.083	6.211	0.599	—		
4	Muyuquiri	Lique Mayu	63	—	—	—	—	—	—		
5	San Pedro	C. Camargo	2108	Q 5	75 - 76	83 - 84	0.049	2.428	0.577	—	Eliminando Q en los meses: [01,02] 76 - [01,02] 77 - [12] 79
6	Salto Leon	Salto Leon	4455	Q 6	75 - 76	84 - 85	0.965	1.814	4.111	—	Simulación a partir de la calibración en TUMUSLA, generando los caudales naturales por medio de la simulación y no así los caudales observados
7	Tumusla	Tumusla	3662	Q7-Q6	76 - 77	84 - 85	-0.001	1.138	1.229	—	Eliminando Q en meses: [02,12]78 - [01]79 - [03]80 - [03]82 - [01,02,03,04,05,06,07]84
			8117	Q7	74 - 75	95 - 96	-0.029	1.078	0.830	—	Eliminando Q en los meses: [01,02,03] 76 - [12] 77 - [01,12] 79 - [02,03,04,05,06] 84 - [01] 86 - [01,02,03] 87 - [03-04] 88 - [01,02,03] 92 - [01,02] 93 - [02] 95 - [01,02,03,04,05] 97
8	Palca Grande	Tumusla	10496	Q8-Q7-Q5	74 - 76	76 - 77	-0.513	0.630	0.855	—	
					82 - 83	84 - 85	0.848	1.718	2.114	—	
					75 - 76	83 - 84	0.315	1.209	1.940	—	
			74 - 75	75 - 76	-0.041	0.896	0.867	—			
12604	Q8-Q7	83 - 84	84 - 85	0.647	2.917	1.433	—				
		90 - 91	92 - 93	-0.054	0.551	0.584	—				
		74 - 75	92 - 93	0.110	1.296	1.110	—				
9	El Molino	Tomayapo	297	Q 9	78 - 79	84 - 85	0.071	6.293	0.881	—	Eliminando Q en los meses: [01,02,03] 81 - [03] 82 - [01,02,03,04] 84 - [03] 84 - [03,04,05,06] 85
10	Tupiza	Tupiza	2262	—	—	—	—	—	—		
11	La Angostura	Tupiza	2311	Q 11	78 - 79	81 - 82	0.227	0.829	2.542	—	Eliminando Q en los meses:[12] 78 - [01] 79 - [01,12] 81 - [02] 82
12	El Puente	Sn Juan Oro	17396	Q12-Q11	78 - 79	80 - 81	0.142	0.543	0.757	—	Eliminando Q en los meses: [12] 75 - [01,02,03] 76 - [01,02,03,04] 77 - [02] 78 - [03] 80
			19707	Q12	74 - 75	81 - 82	0.465	0.946	1.368	—	
13	Chilcara	Camblaya	3155	Q8-Q7-Q5							
14	San Josecito	Pilaya	4250	Q14-Q13	76 - 77	84 - 85	-0.030	0.853	0.997	—	Eliminando Q en los meses: [02,03] 84 - [10,11,12] 84
15	Villa Montes	Pilcomayo	19131	Q13-Q14-Q2	77 - 78	86 - 87	0.005	1.120	0.828	—	Eliminando Q en los meses: [03] 82 - [02,03] 84 - [01] 86 - [01] 87
16	Misión La Paz	Pilcomayo	11110	Q16-Q15							

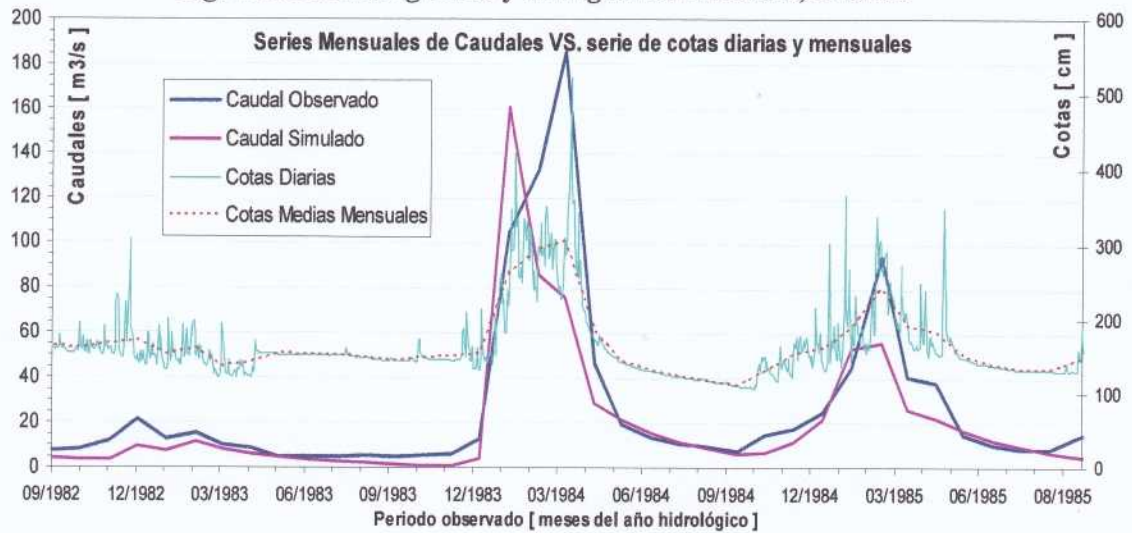
La figura 6.14 muestra, para la subcuenca controlada por la estación de Talula, el hidrograma del periodo 1975-86. Entre los años 1983 y 1985 se observan dos casos en que el caudal observado durante un mes o periodo lluvioso es significativamente más alto que el caudal simulado, lo que estadísticamente se traduce en un error cuadrático estándar relativamente grande. En el caso del año hidrológico 1983-84 se observa además un desplazamiento del pico del hidrograma. La explicación más frecuente a este tipo de error es que debido a su paso mensual, el modelo no puede representar adecuadamente aquellos meses o periodos en que el caudal medio mensual está afectado por crecidas de gran magnitud y corta duración (pocos días) y en particular, por las crecidas que se producen al final de la época lluviosa (marzo) en condiciones de saturación del suelo. Como ejemplo ilustrativo, la figura 6.15 muestra los caudales mensuales simulados frente a los limnigramas diarios y mensuales para el periodo 1982-85 en la misma estación de Talula. Como este error es implícito al paso de tiempo del modelo, no se lo puede reducir dentro de la metodología empleada. Por otro lado, no es muy relevante en términos del balance hídrico.

**Figura 6.14: Caudales simulados y registrados en Talula, 1975-86**

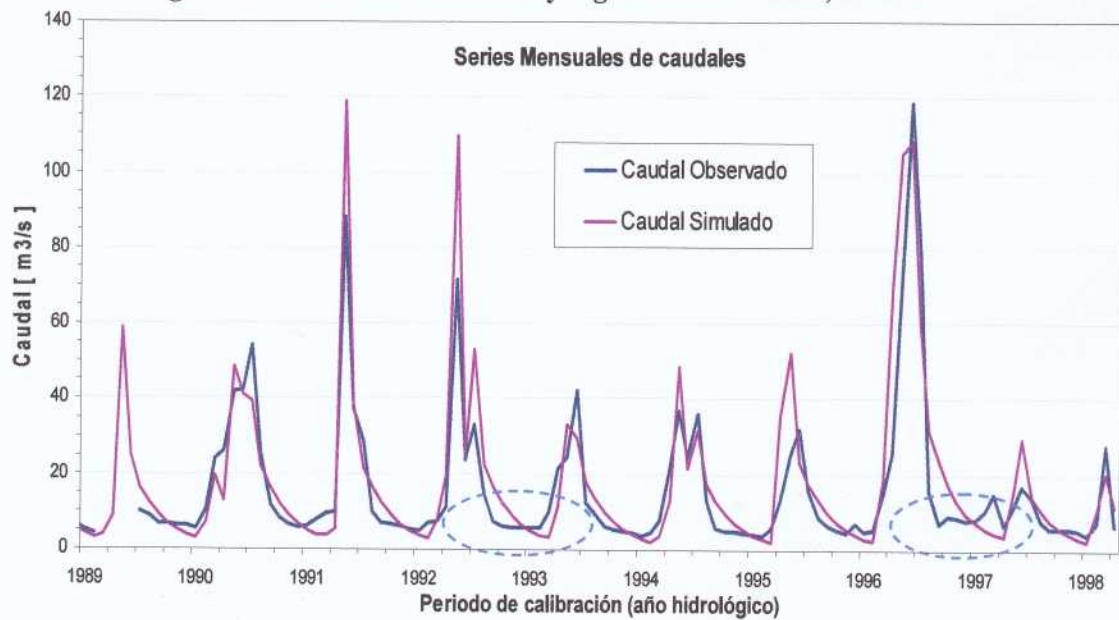


En la figura 6.16 se destaca otro tipo de discrepancia entre caudales observados y simulados, que se produce durante la época de estiaje. Se observa que la curva de recesión del hidrograma simulado sigue una tendencia más suave al inicio (la pendiente es menor) que la del hidrograma observado. Como consecuencia, los caudales simulados tienden a ser más altos que los observados al inicio de la curva (meses de abril-mayo) y más bajos al final (meses de agosto-octubre). Este error es implícito al modelo y está asociado a la ecuación 3.4 de tipo exponencial, que resulta de suponer al acuífero un embalse lineal. Se lo puede reducir considerando dos ramas de descarga del acuífero (o lo que es lo mismo, el acuífero dividido en dos compartimentos), cada una con su propio valor de  $\alpha$ , que es una opción disponible en el modelo CHAC/SIMULA. Sin embargo, esto complica la calibración y no se lo consideró justificado para el presente estudio.

**Figura 6.15: Hidrogramas y limnigramas en Talula, 1982-85**



**Figura 6.16: Caudales simulados y registrados en Talula, 1990-98**



La tabla 6.11 muestra los valores de los parámetros de calibración para las macrocuencas controladas por las estaciones de Chillcara y Misión La Paz. En ambos casos no se pudo realizar la calibración de las respectivas intercuenas: en Chillcara por la inexistencia de periodos de observación comunes a las estaciones que definen la intercuenca y en Misión La Paz porque el comportamiento hidrológico de la intercuenca no se puede modelar con el CHAC/SIMULA.

En la parte superior de la tabla 6.11 se muestran los valores calculados como promedio ponderado (por área) de los parámetros obtenidos durante la calibración de todas las subcuencas e intercuencas que componen la respectiva macrocuenca. Para estos valores, el error medio en Chillcara es de magnitud baja: -0.084 y medio en Misión La Paz: 0.336.

En la parte inferior de la tabla se muestran los valores obtenidos mediante calibración considerando a la macrocuenca como una cuenca única. En el caso de Misión La Paz los valores de C y Hmax aumentan con respecto a los promedios ponderados. Estas diferencias son consecuencia, entre otras cosas, de la no linealidad de las ecuaciones del modelo. En general no es recomendable aplicar un modelo agregado de balance hídrico a una macrocuenca cuyas características físicas varíen mucho en el espacio. Por eso es preferible realizar tanto el balance como la modelación por subcuencas e intercuencas.

**Tabla 6.11: Parámetros de calibración en las macrocuencas Chillcara y Misión La Paz**

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Datos de entrada del Modelo						Parámetros de Calibración del modelo						Resultados de la Calibración				Mapas temáticos		
			AsubI	Q <sub>CAL</sub>	Año hidrológico		n <sub>u</sub>	n <sub>id</sub>	C <sub>ETP</sub>	C	H <sub>MAX</sub>	I <sub>MAX</sub>	α <sub>1</sub>	Q <sub>UBO1</sub>	H <sub>0</sub>	E <sub>red</sub>	E <sub>ori</sub>	E <sub>est</sub>	R	H <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>
					Inicial	Final															
13	Chillcara	Carrilaya	43680	Q13	75-76	92-93	8	1	1	0.43	109	92	0.011	5.0	0	-0.084	0.632	1.045	—	102	73
16	Misión La Paz	Pilcomayo	86665	Q16	69-70	99-00	9	1	1	0.29	110	75	0.009	27.0	0	0.336	1.163	1.132	—	118	72
<b>Valores ajustados para la calibración en macrocuencas totales</b>																					
Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Datos de entrada del Modelo						Parámetros de Calibración del modelo						Resultados de la Calibración				Mapas temáticos		
			AsubI	Q <sub>CAL</sub>	Año hidrológico		n <sub>u</sub>	n <sub>id</sub>	C <sub>ETP</sub>	C	H <sub>MAX</sub>	I <sub>MAX</sub>	α <sub>1</sub>	Q <sub>UBO1</sub>	H <sub>0</sub>	E <sub>red</sub>	E <sub>ori</sub>	E <sub>est</sub>	R	H <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>
					Inicial	Final															
13	Chillcara	Carrilaya	43680	Q13	75-76	92-93	8	1	1	0.38	110	74	0.012	6.0	0	0.020	0.639	1.152	0.838	102	73
16	Misión La Paz	Pilcomayo	86665	Q16	69-70	99-00	9	1	1	0.35	118	66	0.011	27.0	0	0.018	0.708	0.947	0.801	118	72

Como se puede observar en las figuras 6.14, 6.16 a 6.19, después de la calibración el ajuste entre datos observados y simulados es bueno o muy bueno para la mayor parte de las subcuencas e intercuencas, lo que sustenta el uso del modelo para completar y extender las series de caudales.

Figura 6.17: Caudales simulados y registrados en intercuenca Viña Quemada, 1989-98

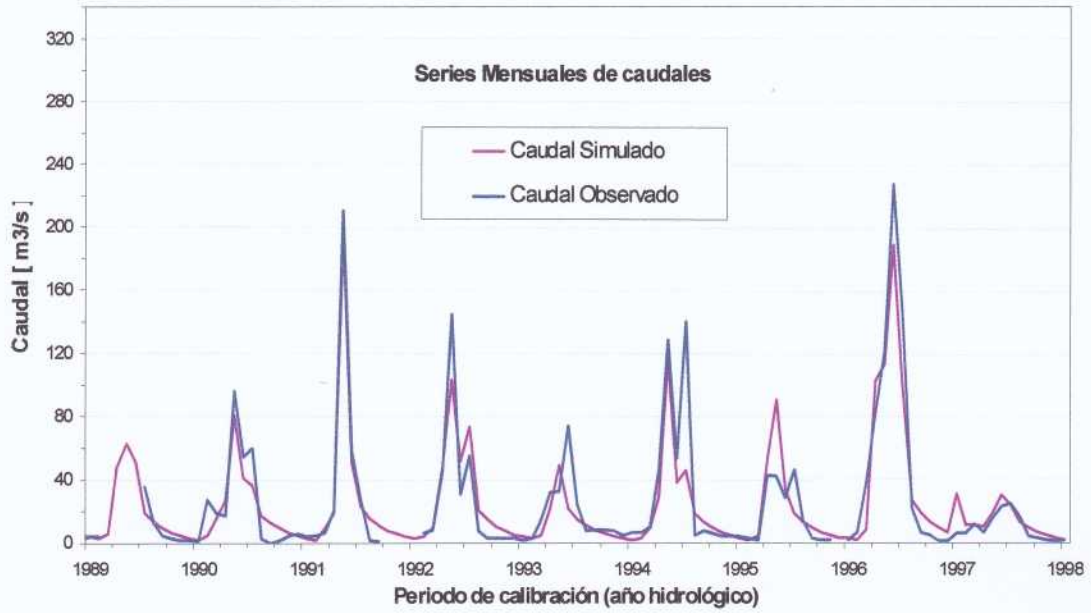
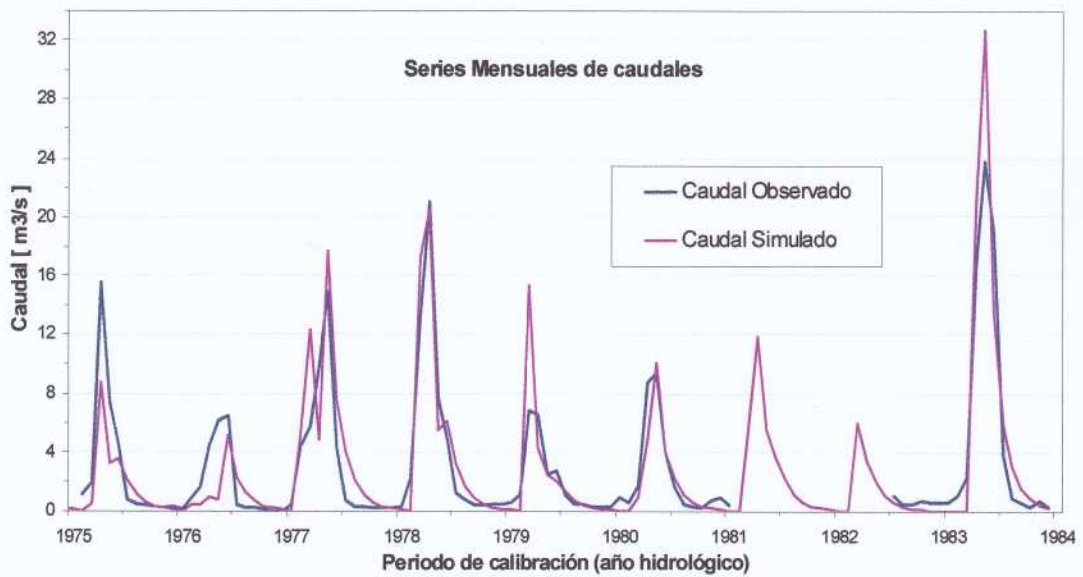
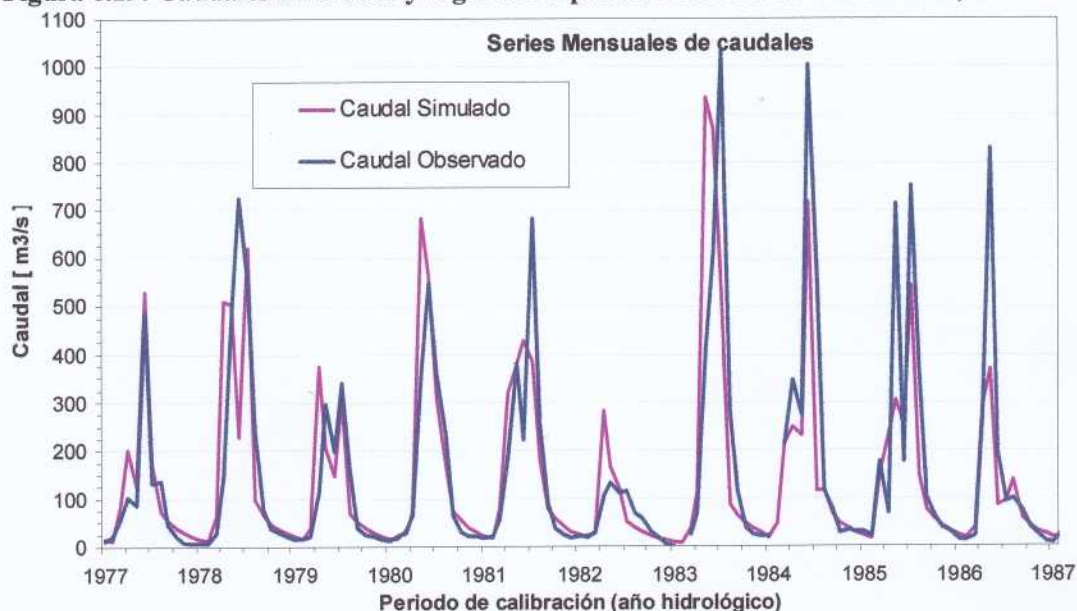


Figura 6.18: Caudales simulados y registrados en subcuenca San Pedro, 1975-1984



**Figura 6.19: Caudales simulados y registrados para la intercuenca Villamontes, 1977-87**

## 6.4 SIMULACION

### 6.4.1 Simulación en subcuencas aforadas

Una primera aplicación del modelo CHAC/SIMULA fue la de completar y extender las series de caudales registrados en las subcuencas e intercuenas con control hidrométrico (tabla 6.9). Esto se realizó para todo el periodo 1970-2000 en todas las subcuencas, con la excepción de la subcuenca controlada por la estación de El Molino, donde solo se pudo simular el periodo 1974-2000, por falta de datos de precipitación. Los parámetros que se usaron en esta etapa fueron los obtenidos por calibración y mostrados en la tabla 6.9.

La tabla 6.12 muestra los caudales simulados medios mensuales y anuales del periodo para las subcuencas con control hidrométrico. Estos valores se pueden comparar con los caudales medios observados de la tabla 6.1. Se observan diferencias significativas, atribuibles en primer lugar a que el periodo de observación es diferente y más corto que el de simulación en todos los casos. Para las subcuencas del río Tumusla (estaciones de Salto León, Tumusla y Palca Grande), del río Tupiza (estación de La Angostura) y río Ravelo/Cachimayu (estación de Ñujchu), en todas las cuales el error medio relativo fue medio o alto durante la calibración, las diferencias son parcialmente atribuibles a las razones expuestas en 6.3.

El caudal máximo medio simulado se produce en enero en todas las subcuencas e intercuenas, coincidiendo con el mes de máxima precipitación. Esto difiere de los valores observados (tabla 6.1) en varias subcuencas, donde el máximo mensual se produce en febrero.

Esto se debe a una limitación común a los modelos de balance de paso mensual, que no consideran tránsito del flujo (flow routing).

La base de datos Hydraccess adjunta al presente estudio incluya las series simuladas completas bajo el captor M-Qsim.

**Tabla 6.12: Caudal medio mensual y anual ( $m^3/s$ ) en subcuencas aforadas, periodo 1970-2000 (Datos simulados)**

Nº	Cuenca Est. Hidrométrica	Q <sub>SIM</sub> *	Área [Km <sup>2</sup> ]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media Anual
1	Nujchu (S)	Q1	1608	38.9	26.5	19.4	6.2	4.5	3.4	2.5	1.9	2.1	3.0	4.7	17.4	10.9
2	Talula (S)	Q2	6493	65.5	46.8	37.3	19.3	14.3	10.6	7.8	5.8	4.5	4.3	6.6	27.0	20.8
3	Vfña Quemada (I)	Q3-Q2	6956	103.2	65.7	58.2	18.7	12.9	9.0	6.3	4.4	4.2	5.5	10.7	49.9	29.1
4	Muyuquiri	—	63													
5	San Pedro (S)	Q5	2108	9.6	6.7	5.3	2.2	1.2	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	4.2	2.6
6	Salto Leon (S)	Q6	4455	12.5	9.7	5.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	1.8	3.2
7	Tumusia (S)	Q7	8117	22.8	15.9	9.3	6.3	4.7	3.5	2.6	1.9	1.4	1.1	1.1	3.8	6.2
8	Paica Grande (I)	Q8-Q7	12604	32.1	23.2	16.6	11.9	8.8	6.5	4.8	3.6	2.6	2.0	2.0	13.0	10.6
9	El Molino (S)*	Q9	297	3.8	3.0	2.2	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	2.1	1.1
10	Tupiza	—	2262													
11	La Argostura (S)	Q11	2311	9.5	4.9	2.1	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.7	4.2	2.3
12	El Puente (S)	Q12	19707	49.0	33.7	18.3	13.4	10.2	7.8	5.9	4.5	3.4	2.6	2.1	13.5	13.7
13	Chilcara (M)	Q13	43880	189.2	120.6	64.8	39.6	27.6	19.3	13.4	9.4	6.5	4.6	6.5	61.1	46.9
14	San Josecito (I)	Q14-Q13	4250	52.9	40.7	35.1	13.7	10.7	8.4	6.6	5.2	4.1	3.6	7.9	28.1	18.1
	San Josecito (M)	Q14	48130	251.2	170.2	103.3	61.2	42.7	29.8	20.8	14.5	10.2	7.2	10.5	88.4	67.5
15	VillaMontes (I)	Q15-Q14-Q3	19131	308.1	270.7	257.3	84.9	52.2	38.7	28.7	21.2	15.8	14.0	63.7	196.3	112.6
	VillaMontes (M)	Q15	80711	805.2	584.9	444.7	189.4	137.0	98.5	70.8	50.9	36.2	28.0	65.3	380.7	241.0
16	Misión La Paz (M)	Q16	89595	770.4	535.9	441.9	176.6	126.1	90.7	65.2	46.9	33.5	24.3	45.6	331.9	224.1

Nota: Q SIM \*, es el caudal hipotético simulado para cada caso en particular (S = subcuenca, I = intercuenca y M = macro cuenca)

(\*) Para la subcuenca El Molino solamente pudo generarse la serie de caudales para el periodo 1974-2000 por falta de datos meteorológicos

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4.2 Simulación en subcuencas no aforadas

Varias estaciones hidrométricas de la lista de la tabla 3.3 contaban solamente con lecturas de escala y no aforos, por lo que fue imposible construir curvas de descarga y por tanto, series de caudales. Por otro lado, el análisis realizado por Aguilar et al (2006) no permitió validar los datos de caudal en estaciones como Muyuquiri y Tupiza. Para estos puntos y de acuerdo al alcance del estudio, se aplicó el modelo CHAC/SIMULA bajo la opción de simulación, es decir sin comparar los caudales simulados con los datos observados.

Este proceso exige una determinación cuidadosa y fundamentada de los cuatro parámetros de calibración del modelo. Para ello se combinó los valores obtenidos de los mapas con aquellos obtenidos mediante calibración en las subcuencas e intercuenas (tabla 6.9). En particular se tomó en cuenta los valores obtenidos por calibración para las subcuencas mayores a la que pertenecen las subcuencas de simulación y su ubicación respectiva. Así por ejemplo, para definir los valores de los parámetros para las subcuencas Pilcomayo en Yocalla y Tarapaya en Tarapaya se tomó en cuenta los valores obtenidos por calibración en la subcuenca Pilcomayo en Talula, modificándolos ligeramente según los valores de los mapas temáticos y tomando en

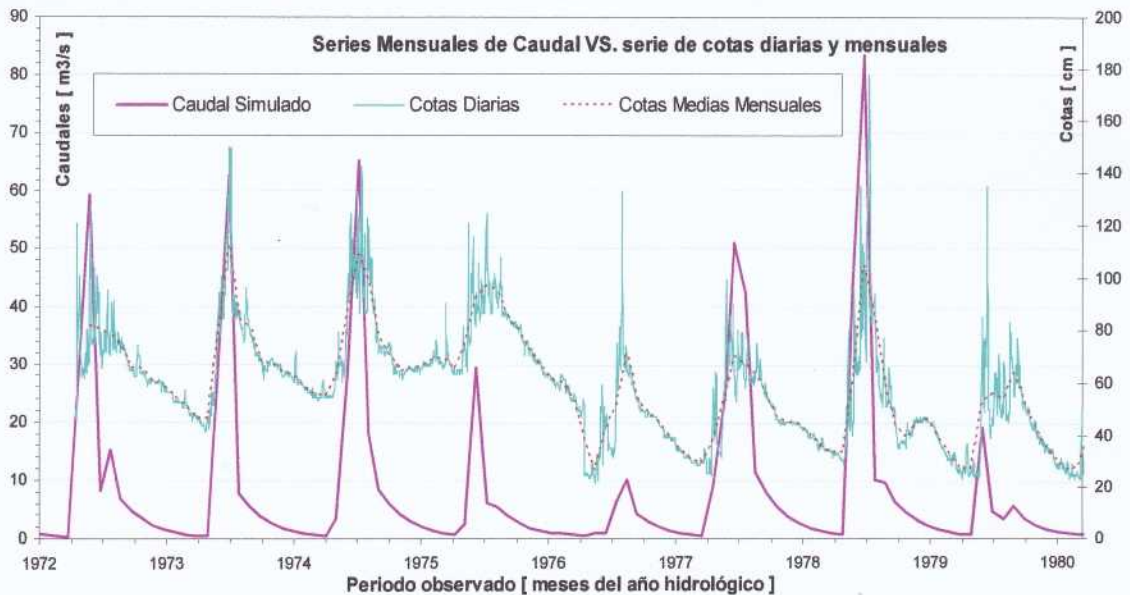
cuenta que el valor del parámetro  $\alpha$  de una subcuenca tiende a ser mayor que el de la cuenca a que pertenece. La tabla 6.13 resume los parámetros adoptados para subcuencas no aforadas.

**Tabla 6.13: Parámetros adoptados para simulación en subcuencas no aforadas**

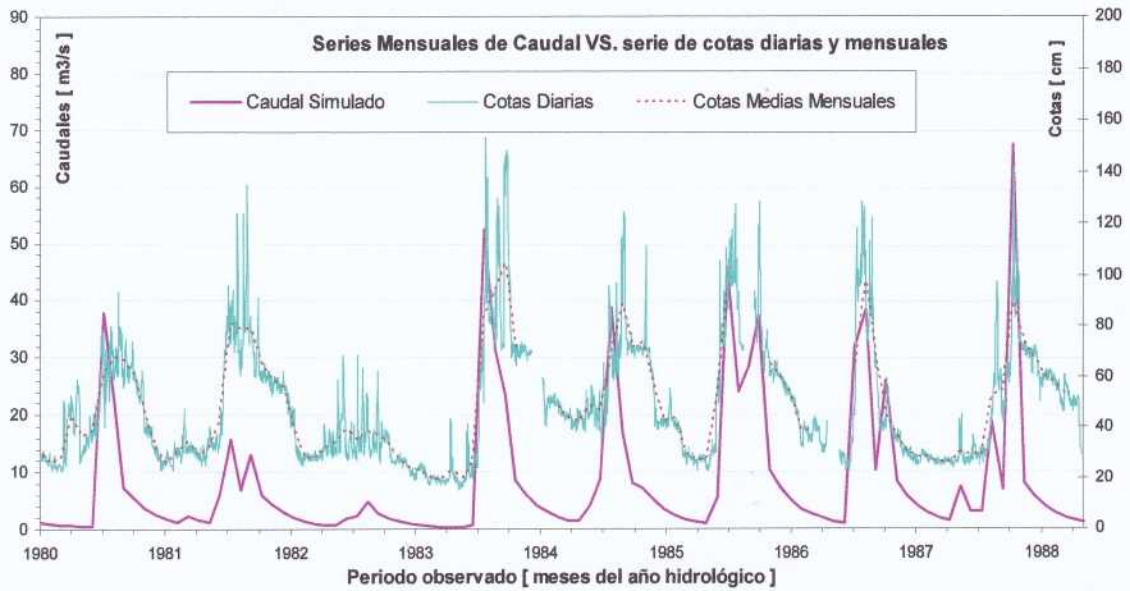
Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Datos de entrada del Modelo						Parámetros del modelo						Mapas temáticos		
			Asub i	Q <sub>SIM</sub> LLA	Año hidrológico		$\eta_i$	$\eta_d$	C <sub>ETP</sub>	C	H <sub>MAX</sub>	I <sub>MAX</sub>	$\alpha_i$	Q <sub>SUB01</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>
					Inicial	Final											
4	Muyuquiri	Lique Mayu	63	Q.SIM4	74 - 75	99 - 00	7	1	1	0.40	145	50	0.025	0.01	0	133	50
10	Tupiza	Tupiza	2262	Q.SIM10	69 - 70	99 - 00	9	1	1	0.48	108	80	0.008	1.4	0	91	82
17	Yocalla	Pilcomayo	2751	Q.SIM17	69 - 70	99 - 00	10	1	1	0.18	117	70	0.012	1.5	0	117	47
18	Tarapaya	Pilcomayo	884	Q.SIM18	69 - 70	99 - 00	10	1	1	0.18	122	90	0.014	1.0	0	122	61
19	Puente Sucre	Pilcomayo	995	Q.SIM19*	69 - 70	99 - 00	11	1	1	0.16	108	60	0.012	1.0	0	102	70
20	Yura	Yura	1337	Q.SIM20	69 - 70	99 - 00	7	1	1	0.45	106	86	0.014	0.5	0	91	62
21	Palca Higuera	Tumsvuta	3595	Q.SIM21*	69 - 70	99 - 00	9	1	1	0.45	115	120	0.011	1.0	0	114	81
22	Cotagaita	Cotagaita	4201	Q.SIM22	69 - 70	99 - 00	8	1	1	0.45	92	124	0.012	1.0	0	92	83
23	Charaja	Sn Juan Oro	10631	Q.SIM23*	69 - 70	99 - 00	9	1	1	0.48	132	90	0.011	1.5	0	109	54
24	Pampa Grande	Pilaya	3026	Q.SIM24*	69 - 70	99 - 00	9	1	1	0.15	104	100	0.012	1.0	0	110	53

Como las estaciones de la tabla 6.13 cuentan con datos de niveles de agua (lecturas de regla), resulta de interés compararlos con las series de caudales generadas por el modelo. Las figuras 6.20 y 6.21 muestran el hidrograma simulado para las estaciones de Yocalla y Tarapaya junto con los limnigramas registrados, diario y medio mensual. Se observa que el comportamiento es muy similar en el tiempo, lo que en cierto modo valida la modelación y los valores adoptados para los parámetros del modelo.

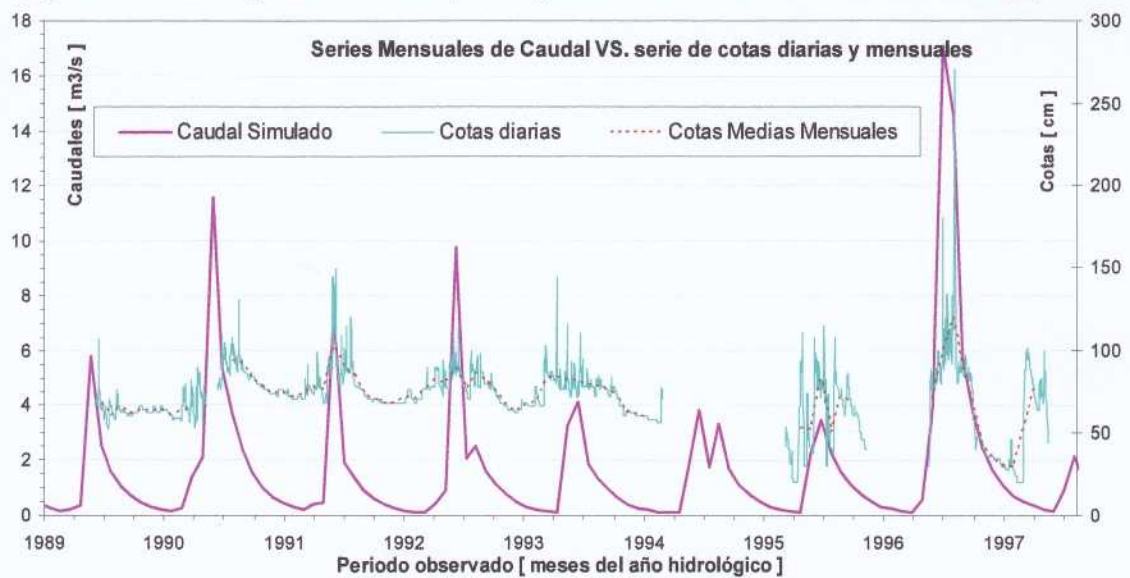
**Figura 6.20a: Hidrograma simulado y limnigramas observados en la estación Yocalla**



**Figura 6.20b: Hidrograma simulado y limnigramas observados en la estación Yocalla**



**Figura 6.21: Hidrograma simulado y limnigramas observados en la estación Tarapaya**



La tabla 6.14 muestra los caudales simulados medios mensuales y anuales del periodo 1970-2000 para las subcuencas sin control hidrométrico. Las series completas fueron incluidas en la base de datos Hydraccess y se constituyen en la primera evaluación de la oferta de agua en esas subcuencas.

**Tabla 6.14: Caudal medio mensual y anual (m<sup>3</sup>/s) en subcuencas no aforadas (Datos simulados)**

Nº	Cuenca Est. Hidrométrica	Q <sub>SIM</sub> *	Área [Km <sup>2</sup> ]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media Anual
4	Muyuquiri (S)*	Q4	63	0.35	0.19	0.09	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.15	0.07
10	Tupiza (S)	Q10	2262	9.6	5.0	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.7	4.2	2.3
17	Yocalla (S)	Q17	2751	32.1	20.5	16.0	6.4	4.5	3.1	2.2	1.5	1.2	1.3	2.5	12.7	8.7
18	Tarapaya (S)	Q18	884	6.1	4.0	3.4	1.8	1.2	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	2.4	1.8
19	Puente Sure (I)	Q19-Q1-Q2	995	17.2	11.8	11.2	3.3	2.2	1.5	1.1	0.8	0.9	1.1	2.0	8.7	5.2
20	Yura (S)	Q20	1337	5.2	4.1	1.7	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	1.0	1.2
21	Palca Higuera (I)	Q21-Q7	3595	10.4	8.0	6.1	3.7	2.7	1.9	1.4	1.0	0.7	0.5	0.6	4.0	3.4
22	Cotagalla (S)	Q8-Q7	4201	13.9	10.2	5.7	3.9	2.7	1.9	1.3	0.9	0.6	0.5	0.6	6.5	4.1
23	Cheraja (I)	Q23-Q11	10631	36.7	24.5	11.1	7.5	5.4	3.9	2.8	2.0	1.4	1.0	0.8	11.2	9.0
24	Pampa Grande (I)	Q24-Q13	3026	29.9	23.0	19.2	8.6	6.1	4.2	3.0	2.1	1.4	1.3	3.2	15.8	9.8

Nota: Q<sub>SIM</sub>\*, es el caudal hipotético simulado para cada caso en particular (S = subcuenca, I = intercuenca y M = macro cuenca)

(\*) Para la subcuenca Muyuquiri solamente pudo generarse la serie de caudales para el periodo 1974-2000 por falta de datos meteorológicos

### 6.4.3 Simulación en el punto de control Machigua

A solicitud del Proyecto Pilcomayo y como una aplicación adicional del modelo, se evaluó mediante simulación la oferta de agua en Machigua, localidad cercana a la nueva estación hidrométrica de Puente Arumá, instalada por el Proyecto. Las coordenadas de Machigua son: 20°54'39.3 de latitud sur y 64°06'34.8" de longitud oeste, que la ubican aguas abajo de la confluencia de los ríos Pilcomayo y Pilaya y aguas arriba de la población de Villamontes.

Como se muestra en la figura 7.8 del siguiente capítulo, Machigua controla una intercuenca de 11075 km<sup>2</sup> y una cuenca de 72655 km<sup>2</sup> de superficie hasta el punto de control. La intercuenca, a la que se le asignó el número 25 (P25) está definida aguas arriba por las estaciones hidrométricas de Viña Quemada sobre el río Pilcomayo y San Josecito sobre el río Pilaya.

El trabajo incluyó la delimitación de la intercuenca, el cálculo de la precipitación y evapotranspiración areal, la evaluación de H<sub>max</sub> e I<sub>max</sub> mediante el uso de los mapas temáticos y la adopción de valores de los parámetros de simulación, tomando en cuenta los valores obtenidos por calibración en la intercuenca Villamontes. La tabla 6.15 resume los valores adoptados para la intercuenca.

**Tabla 6.15: Parámetros adoptados para simulación de intercuenca Machigua**

Nº	Cuenca - Est. Hidrométrica	Río	Asubi	Datos de entrada del Modelo				Parámetros de Calibración del modelo								Mapas temáticos	
				Q <sub>SIM</sub>	Año hidrológico		n <sub>t</sub>	n <sub>rd</sub>	C <sub>ETP</sub>	C	H <sub>MAX</sub>	I <sub>MAX</sub>	α <sub>t</sub>	Q <sub>Subo-1</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>
					Inicial	Final											
25	Machigua	Pilcomayo	11075	Q <sub>SIM</sub> 25	69-70	99-00	11	1	1	0.210	131	80	0.012	9.5	0	131	80

El resumen del balance hídrico en Machigua, incluyendo caudales, se muestra en el subcapítulo 7.2.1. Por otro lado, a la base de datos Hydraccess del Balance se añadió las entradas y salidas del modelo en ese punto de control.

**Capítulo 7****SINTESIS DEL BALANCE HIDRICO****7.1 BALANCE HIDRICO CONSOLIDADO**

Se entiende por Balance Hídrico de Cuenca a la evaluación de las entradas y salidas de agua en un hidrosistema natural llamado cuenca hidrográfica. La ecuación simplificada (3.1) del balance ( $P=Q+ETR+\eta$ ), incluye un término de discrepancia  $\eta$ , que expresa ante todo el hecho de que las mediciones de cada uno de los parámetros que intervienen en el balance se efectúan en forma separada y por diferentes medios de observación. La ecuación simplificada es aplicable a valores medios interanuales de los componentes del balance. A nivel mensual es perfectamente posible que el escurrimiento  $Q$  supere a la precipitación en algunos meses. Como resultado del paso mensual y el uso de un modelo precipitación-escurrimiento, la ecuación de balance utilizada en el presente estudio fue:

$$P - ETR - Q_{sO} - Q_{uO} - \Delta SM - \Delta SG - \eta = 0 \quad (7.1)$$

Donde:

P	=	Precipitación
ETR	=	Evapotranspiración real
$Q_{sO}$	=	Salida de agua superficial
$Q_{uO}$	=	Salida de agua subterránea
Q	=	Escurrimiento total = $Q_{sO}+Q_{uO}$
$\Delta SM$	=	Variación del almacenamiento de agua en el suelo
$\Delta SG$	=	Variación del almacenamiento en acuíferos
$\eta$	=	Término residual de discrepancia, error de medición o estimación

El balance hídrico se expresa generalmente en forma de lámina de agua en mm (UNESCO-ROSTLAC, 1982). En el presente estudio se ha seguido esta convención para los tres principales componentes del balance (P, ETR y Q). Como información adicional se presentan la evapotranspiración potencial ETP, la escurrimiento  $Q$  en forma de caudal ( $m^3/s$ ) y el caudal subterráneo  $Q_{bas}$ .

Los valores de la precipitación  $P$  y la evapotranspiración potencial ETP por subcuencas e intercuencas corresponden a los calculados en los capítulos 4 y 5, respectivamente. Los valores de la evapotranspiración real ETR y del caudal subterráneo  $Q_{uO}$  provienen del modelo CHAC/SIMULA. Las series de caudal y lámina de escurrimiento del periodo 1970-2000 por subcuenca e intercuenca resultan de la combinación de los valores observados y simulados. Es decir, las series de caudales mensuales observados, disponibles para los periodos mostrados en la figura 6.1, fueron rellenadas y ampliadas mediante los caudales simulados por el modelo hasta disponer de series completas 1970-2000.

Para la subcuenca de Salto León y las intercuencas de Tumusla y Palca Grande, los caudales observados fueron substituidos en su totalidad por los caudales simulados. Es decir, toda la serie de caudales utilizada en el balance provino de la simulación con el modelo. Esta decisión

se tomó bajo la consideración de que los caudales observados en esas estaciones están fuertemente afectados por regulación y/o extracción. Por esa razón se asumió que los caudales simulados representan mejor que los observados a los caudales “naturales” con los que debe realizarse el balance hídrico.

La excepción es la intercuenca entre Villamontes y Misión La Paz, donde no se aplicó el CHAC/SIMULA, ya que tiene un comportamiento que no se puede simular o representar con un modelo de ese tipo. El balance para esta intercuenca fue resultado de los caudales consolidados en Villamontes y observados en Misión La Paz.

Para facilitar la lectura e interpretación de los resultados del Balance, la figura 7.1 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.

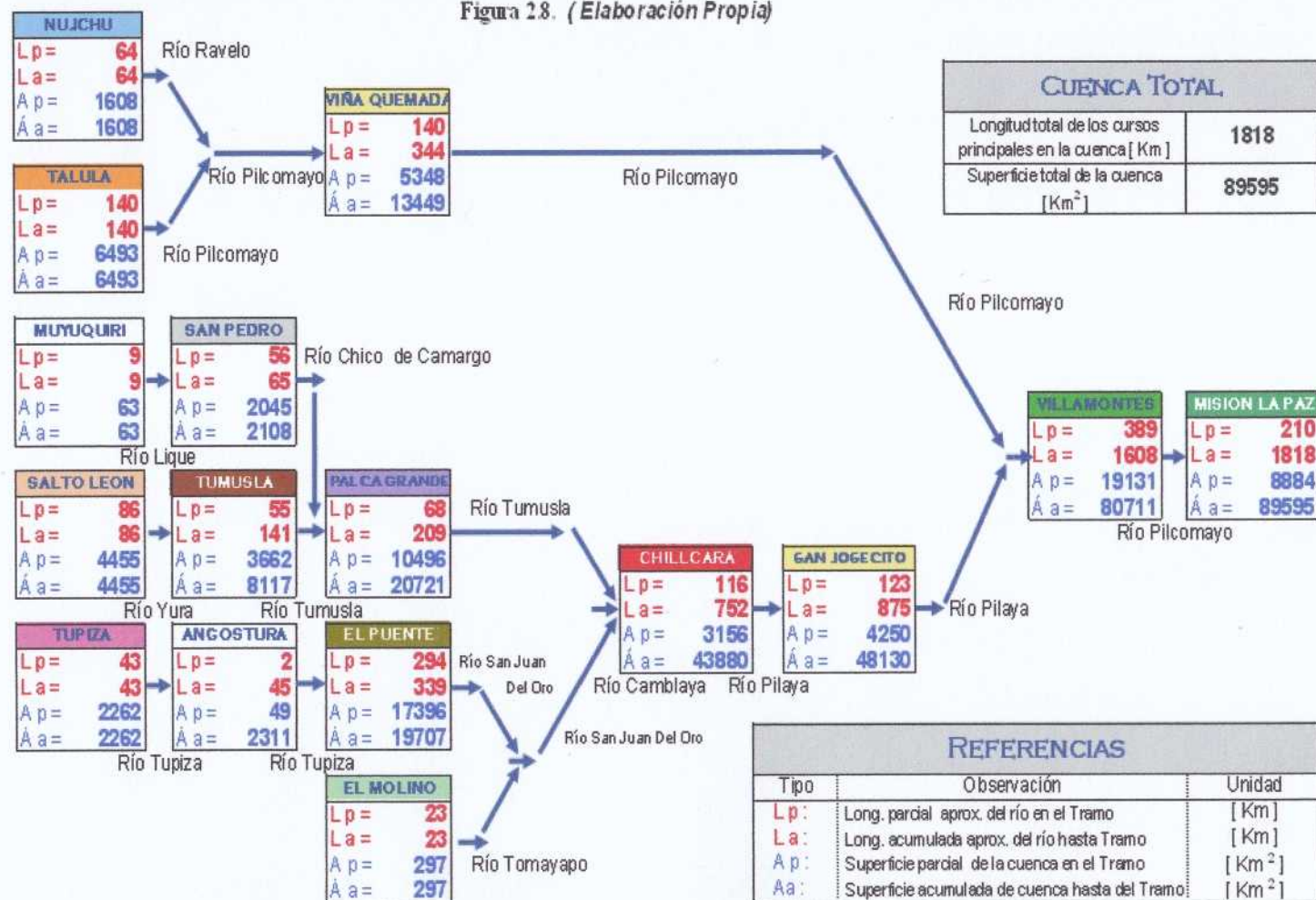
La tabla 7.1 muestra los resultados en forma de valores medios mensuales del periodo 1970-2000 de las variables mencionadas, para todas las subcuencas e intercuenas con control hidrométrico. La tabla 7.1 incluye también el balance hídrico consolidado por cuencas, por lo que varias estaciones o puntos de control aparecen dos veces en la tabla. Para estos casos, se consolidan los balances hídricos de las subcuencas e intercuenas que componen toda el área de aporte situada aguas arriba hasta el punto de control.

El caudal incluido en el balance hídrico consolidado de una cuenca resulta de sumar el caudal en los puntos de control aguas arriba y el de la intercuenca respectiva. Así por ejemplo, el caudal en Villamontes (ver figura 2.6) resulta de sumar los caudales en San Josecito y Viña Quemada con el caudal de la intercuenca Villamontes (P15). El resultado puede diferir ligeramente de los caudales observados en la estación hidrométrica de Villamontes. En la tabla 7.1 los puntos de control donde se consolida el balance hídrico se han remarcado en color crema.

Un caso particular es el de la intercuenca Chillcara, donde fue imposible calibrar el modelo: los caudales simulados fueron siempre muy inferiores a los observados para todas las combinaciones de parámetros ensayadas. La precipitación areal estimada (capítulo 4) para esta intercuenca es muy baja (menor a 300 mm/año). Las razones más frecuentes para situaciones de este tipo son que la precipitación sobre la subcuenca ha sido subestimada o que los caudales observados han sido sobrestimados. Una revisión del informe y resultados de Aguilar (2006) no permitió identificar anomalías en el comportamiento de la estación hidrométrica de Chillcara, por lo que se decidió usar los caudales observados en combinación con una simulación para toda el área de aporte, para consolidar el balance hasta ese punto de control. De todas maneras, se recomienda que la intercuenca Chillcara y las estaciones hidrométricas que la definen (Chillcara, El Puente, Palca Grande y El Molino) sean objeto de un análisis hidrológico más amplio y detallado.

## ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DE SUB CUENCAS "CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO"

Figura 2.8. (Elaboración Propia)



**Tabla 7.1: Síntesis del Balance Hídrico superficial por subcuencas  
Periodo 1970-2000 Cuenca Alta del Río Pilcomayo**

Codigo Cuenca Est. Hídrico	Río	Área [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIJ	Media	Total Anual	
P 1 NUJCHU	Cahimayu	1608	Prec [mm]	154.9	116.6	95.0	26.6	3.5	2.6	1.9	8.4	21.9	44.0	56.6	105.3	53.1	637	
			Escoor [mm]	62.8	46.2	36.5	12.1	6.9	4.8	3.7	3.3	3.8	7.5	12.2	29.7	19.1	230	
			ETR [mm]	76.6	68.5	68.4	27.1	3.6	2.3	2.0	8.5	19.4	38.0	45.8	68.3	35.7	429	
			ETP [mm]	124.1	106.6	113.3	108.3	105.3	94.2	103.3	122.2	136.2	152.7	147.5	144.3	121.5	1458	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	37.7	30.7	21.9	7.5	4.1	3.0	2.2	2.0	2.3	4.5	7.6	17.8	11.8		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	4.8	6.1	6.6	6.0	4.5	3.4	2.5	1.9	1.6	1.6	2.1	3.1	3.7		
P 2 TALULA	Pilcomayo	6493	Prec [mm]	112.8	83.9	67.3	20.4	1.9	1.6	1.1	6.2	11.0	24.7	37.3	79.3	37.3	448	
			Escoor [mm]	22.6	19.6	18.0	7.3	4.7	3.5	3.0	2.6	2.3	2.8	4.2	9.3	8.3	100	
			ETR [mm]	72.6	61.3	55.5	21.2	2.0	1.5	1.1	6.4	11.0	23.6	34.2	59.8	29.2	350	
			ETP [mm]	122.1	106.7	114.5	110.6	111.0	95.8	103.9	120.0	134.7	151.6	148.2	143.2	121.9	1462	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	54.7	52.7	43.7	18.3	11.3	8.7	7.2	6.3	5.7	6.8	10.4	22.5	20.7		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	14.7	20.3	21.7	19.0	14.3	10.6	7.8	5.8	4.5	3.8	4.2	7.6	11.2		
P 3 VIÑA QUEMADA	Pilcomayo	5348	Prec [mm]	110.5	83.5	75.0	22.0	2.6	1.8	0.9	6.5	14.6	32.5	44.3	85.1	40.0	479	
			Escoor [mm]	27.6	19.8	22.5	4.5	2.1	1.4	1.1	0.7	0.4	1.4	2.3	12.1	8.0	96	
			ETR [mm]	73.5	62.3	58.3	22.7	2.7	1.6	0.9	6.5	14.1	30.9	39.9	63.8	31.4	377	
			ETP [mm]	125.7	107.3	112.1	106.9	103.0	88.8	96.9	116.0	128.9	144.1	141.3	139.3	117.5	1410	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	55.1	43.8	44.9	9.4	4.2	3.0	2.1	1.4	0.7	2.9	4.8	24.1	16.4		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	10.5	13.5	14.4	12.2	8.4	5.7	3.8	2.5	1.7	1.8	2.8	5.8	6.9		
P.3.C=P.1+P.2+P.3	Pilcomayo	13449	Prec [mm]	117.5	87.6	73.6	21.7	2.4	1.9	1.2	6.5	13.5	30.3	42.5	85.2	40.3	484	
			Escoor [mm]	29.4	22.9	22.0	6.8	3.9	2.8	2.3	1.9	1.7	2.8	4.4	12.8	9.5	114	
			ETR [mm]	73.4	62.5	58.2	22.5	2.4	1.7	1.2	6.7	13.2	28.2	37.9	62.4	30.9	370	
			ETP [mm]	123.8	106.9	113.4	108.9	107.2	92.9	101.1	118.7	132.6	148.8	145.4	141.8	120.1	1441	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	147.5	127.3	110.5	35.2	19.6	14.6	11.6	9.7	8.7	14.2	22.9	64.5	48.8		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	30.0	39.9	42.7	37.1	27.2	19.6	14.1	10.2	7.8	7.2	9.0	16.5	21.8		
P 5 SAN PEDRO	Chico de Camargo	2108	Prec [mm]	102.4	79.2	70.9	14.6	2.3	1.4	1.1	3.4	8.3	27.0	43.5	84.2	36.5	438	
			Escoor [mm]	12.9	7.6	6.9	2.3	1.2	0.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.7	4.8	3.2	38	
			ETR [mm]	77.3	71.6	66.3	23.4	2.3	1.4	1.1	3.4	8.6	26.5	42.8	69.6	32.9	394	
			ETP [mm]	119.7	102.7	107.2	96.4	81.8	69.0	70.6	91.8	108.9	127.0	125.7	130.0	102.6	1231	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	10.2	6.6	5.4	1.9	0.9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	3.8	2.6		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	3.1	3.7	3.3	2.3	1.2	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	1.3	1.4		
P 6 SALTO LEÓN	Yura	4455	Prec [mm]	80.0	59.0	37.8	5.8	0.8	1.6	0.4	2.4	4.5	7.0	18.0	45.7	21.9	263	
			Escoor [mm]	7.5	5.3	3.0	1.7	1.3	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	1.1	1.9	22	
			ETR [mm]	63.0	50.7	40.1	7.0	0.8	1.1	0.4	2.5	4.6	7.1	17.9	43.4	19.9	239	
			ETP [mm]	122.8	106.1	106.8	92.1	86.2	66.4	76.2	86.6	107.7	127.4	133.7	134.5	103.9	1247	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	12.5	9.7	5.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	1.8	3.2		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	2.6	4.2	4.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.7	1.7		
P 7 TUMUSLA	Tumusla	3662	Prec [mm]	91.9	66.7	48.1	12.8	1.6	1.1	0.4	2.9	5.7	15.5	29.2	62.7	28.2	338	
			Escoor [mm]	7.6	4.1	3.2	2.3	1.9	1.4	1.1	0.9	0.6	0.5	0.5	1.5	2.1	26	
			ETR [mm]	72.6	61.0	50.1	14.1	1.6	1.1	0.4	3.1	5.9	15.6	29.1	58.7	26.1	313	
			ETP [mm]	129.1	112.7	117.1	104.8	96.4	80.0	89.5	105.9	123.5	140.1	140.4	138.2	114.8	1378	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	10.3	6.2	4.4	3.3	2.6	2.0	1.5	1.2	0.9	0.7	0.8	2.1	3.0		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	2.7	4.1	4.0	3.3	2.6	2.0	1.5	1.2	0.9	0.7	0.8	1.0	2.1		
P.7.C=P.6+P.7	Tumusla	8117	Prec [mm]	85.8	62.7	42.3	9.1	1.1	1.4	0.4	2.6	5.0	10.5	22.6	52.8	24.7	296	
			Escoor [mm]	7.5	4.7	3.1	2.0	1.5	1.1	0.8	0.6	0.5	0.3	0.3	1.3	2.0	24	
			ETR [mm]	67.4	55.3	44.6	10.2	1.2	1.1	0.4	2.7	5.2	10.9	23.0	50.3	22.7	272	
			ETP [mm]	125.5	109.0	111.5	97.9	90.8	72.6	82.2	95.4	114.9	133.1	136.7	136.1	108.8	1306	
			Q [m <sup>3</sup> /s]	22.8	15.9	9.3	6.3	4.7	3.5	2.6	1.9	1.4	1.1	1.1	3.8	6.2		
			Qbas [m <sup>3</sup> /s]	5.3	8.3	8.0	6.3	4.7	3.5	2.6	1.9	1.4	1.1	0.9	1.7	3.8		

**Tabla 7.1: Síntesis del Balance Hídrico superficial por subcuencas  
Periodo 1970-2000 Cuenca Alta del Río Pilcomayo**

Código Cuenca Est. Hídro.	Río	Área [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual	
P 1	NUJCHU	Cahimayo	1608	Prec [mm]	154.9	116.6	95.0	26.6	3.5	2.6	1.9	8.4	21.9	44.0	56.6	105.3	53.1	637
				Escorr [mm]	62.8	46.2	36.5	12.1	6.9	4.8	3.7	3.3	3.8	7.5	12.2	29.7	19.1	230
				ETR [mm]	76.6	68.5	68.4	27.1	3.6	2.3	2.0	8.5	19.4	38.0	45.8	68.3	35.7	429
				ETP [mm]	124.1	106.6	113.3	108.3	105.3	94.2	103.3	122.2	136.2	152.7	147.5	144.3	121.5	1458
				Q [m <sup>3</sup> /s]	37.7	30.7	21.9	7.5	4.1	3.0	2.2	2.0	2.3	4.5	7.6	17.8	11.8	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	4.8	6.1	6.6	6.0	4.5	3.4	2.5	1.9	1.6	1.6	2.1	3.1	3.7	
P 2	TALULA	Pilcomayo	6493	Prec [mm]	112.8	83.9	67.3	20.4	1.9	1.6	1.1	6.2	11.0	24.7	37.3	79.3	37.3	448
				Escorr [mm]	22.6	19.6	18.0	7.3	4.7	3.5	3.0	2.6	2.3	2.8	4.2	9.3	8.3	100
				ETR [mm]	72.6	61.3	55.5	21.2	2.0	1.5	1.1	6.4	11.0	23.6	34.2	59.8	29.2	350
				ETP [mm]	122.1	106.7	114.5	110.6	111.0	95.8	103.9	120.0	134.7	151.6	148.2	143.2	121.9	1462
				Q [m <sup>3</sup> /s]	54.7	52.7	43.7	18.3	11.3	8.7	7.2	6.3	5.7	6.8	10.4	22.5	20.7	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	14.7	20.3	21.7	19.0	14.3	10.6	7.8	5.8	4.5	3.8	4.2	7.6	11.2	
P 3	VIÑA QUEMADA	Pilcomayo	5348	Prec [mm]	110.5	83.5	75.0	22.0	2.6	1.8	0.9	6.5	14.6	32.5	44.3	85.1	40.0	479
				Escorr [mm]	27.6	19.8	22.5	4.5	2.1	1.4	1.1	0.7	0.4	1.4	2.3	12.1	8.0	96
				ETR [mm]	73.5	62.3	58.3	22.7	2.7	1.6	0.9	6.5	14.1	30.9	39.9	63.8	31.4	377
				ETP [mm]	125.7	107.3	112.1	106.9	103.0	88.8	96.9	116.0	128.9	144.1	141.3	139.3	117.5	1410
				Q [m <sup>3</sup> /s]	55.1	43.8	44.9	9.4	4.2	3.0	2.1	1.4	0.7	2.9	4.8	24.1	16.4	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	10.5	13.5	14.4	12.2	8.4	5.7	3.8	2.5	1.7	1.8	2.8	5.8	6.9	
P.3.C=P1+P2+P3	VIÑA QUEMADA	Pilcomayo	13449	Prec [mm]	117.5	87.6	73.6	21.7	2.4	1.9	1.2	6.5	13.5	30.3	42.5	85.2	40.3	484
				Escorr [mm]	29.4	22.9	22.0	6.8	3.9	2.8	2.3	1.9	1.7	2.8	4.4	12.8	9.5	114
				ETR [mm]	73.4	62.5	58.2	22.5	2.4	1.7	1.2	6.7	13.2	28.2	37.9	62.4	30.9	370
				ETP [mm]	123.8	106.9	113.4	108.9	107.2	92.9	101.1	118.7	132.6	148.8	145.4	141.8	120.1	1441
				Q [m <sup>3</sup> /s]	147.5	127.3	110.5	35.2	19.6	14.6	11.6	9.7	8.7	14.2	22.9	64.5	48.8	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	30.0	39.9	42.7	37.1	27.2	19.6	14.1	10.2	7.8	7.2	9.0	16.5	21.8	
P 5	SAN PEDRO	Chico de Camargo	2108	Prec [mm]	102.4	79.2	70.9	14.6	2.3	1.4	1.1	3.4	8.3	27.0	43.5	84.2	36.5	438
				Escorr [mm]	12.9	7.6	6.9	2.3	1.2	0.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.7	4.8	3.2	38
				ETR [mm]	77.3	71.6	66.3	23.4	2.3	1.4	1.1	3.4	8.6	26.5	42.8	69.6	32.9	394
				ETP [mm]	119.7	102.7	107.2	96.4	81.8	69.0	70.6	91.8	108.9	127.0	125.7	130.0	102.6	1231
				Q [m <sup>3</sup> /s]	10.2	6.6	5.4	1.9	0.9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	3.8	2.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	3.1	3.7	3.3	2.3	1.2	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	1.3	1.4	
P 6	SALTO LEÓN	Yura	4455	Prec [mm]	80.0	59.0	37.8	5.8	0.8	1.6	0.4	2.4	4.5	7.0	18.0	45.7	21.9	263
				Escorr [mm]	7.5	5.3	3.0	1.7	1.3	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	1.1	1.9	22
				ETR [mm]	63.0	50.7	40.1	7.0	0.8	1.1	0.4	2.5	4.6	7.1	17.9	43.4	19.9	239
				ETP [mm]	122.8	106.1	106.8	92.1	86.2	66.4	76.2	86.6	107.7	127.4	133.7	134.5	103.9	1247
				Q [m <sup>3</sup> /s]	12.5	9.7	5.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	1.8	3.2	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	2.6	4.2	4.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.7	1.7	
P 7	TUMUSLA	Tumusla	3662	Prec [mm]	91.9	66.7	48.1	12.8	1.6	1.1	0.4	2.9	5.7	15.5	29.2	62.7	28.2	338
				Escorr [mm]	7.6	4.1	3.2	2.3	1.9	1.4	1.1	0.9	0.6	0.5	0.5	1.5	2.1	26
				ETR [mm]	72.6	61.0	50.1	14.1	1.6	1.1	0.4	3.1	5.9	15.6	29.1	58.7	26.1	313
				ETP [mm]	129.1	112.7	117.1	104.8	96.4	80.0	89.5	105.9	123.5	140.1	140.4	138.2	114.8	1378
				Q [m <sup>3</sup> /s]	10.3	6.2	4.4	3.3	2.6	2.0	1.5	1.2	0.9	0.7	0.8	2.1	3.0	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	2.7	4.1	4.0	3.3	2.6	2.0	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	1.0	2.1	
P.7.C=P6+P7	TUMUSLA	Tumusla	8117	Prec [mm]	85.8	62.7	42.3	9.1	1.1	1.4	0.4	2.6	5.0	10.5	22.6	52.8	24.7	296
				Escorr [mm]	7.5	4.7	3.1	2.0	1.5	1.1	0.8	0.6	0.5	0.3	0.3	1.3	2.0	24
				ETR [mm]	67.4	55.3	44.6	10.2	1.2	1.1	0.4	2.7	5.2	10.9	23.0	50.3	22.7	272
				ETP [mm]	125.5	109.0	111.5	97.9	90.8	72.6	82.2	95.4	114.9	133.1	136.7	136.1	108.8	1306
				Q [m <sup>3</sup> /s]	22.8	15.9	9.3	6.3	4.7	3.5	2.6	1.9	1.4	1.1	1.1	3.8	6.2	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	5.3	8.3	8.0	6.3	4.7	3.5	2.6	1.9	1.4	1.1	0.9	1.7	3.8	

**Tabla 7.1 (cont.): Síntesis del Balance Hídrico superficial por subcuencas  
Periodo 1970-2000 Cuenca Alta del Río Pilcomayo**

Codigo Cuenca Est. Hidro.	Rio	Area [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual			
P 8	PALCA GRANDE	Tumusla	10496	Prec [mm]	85.3	61.2	44.7	8.9	0.9	1.0	0.2	1.9	3.8	10.4	23.6	61.3	25.3	303		
				Escorr [mm]	5.6	3.8	2.8	2.5	2.0	1.5	1.2	0.9	0.6	0.4	0.4	0.4	2.3	2.0	24	
				ETR [mm]	69.7	52.2	40.6	6.6	0.7	0.7	0.0	1.7	3.1	7.5	20.5	53.7	21.4	21.4	257	
				ETP [mm]	142.1	125.8	126.0	110.5	95.0	79.4	86.9	105.9	126.7	150.9	148.9	157.6	121.3	121.3	1456	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	21.9	16.6	11.1	10.0	7.9	6.0	4.5	3.4	2.5	1.7	1.5	9.2	8.0	8.0	8.0	8.0
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	7.5	11.8	11.5	9.6	7.6	5.9	4.5	3.4	2.5	1.9	1.5	2.6	5.9	5.9	5.9	5.9
P 8.C = P 7.C + P 8	PALCA GRANDE	Tumusla	20721	Prec [mm]	84.8	63.4	46.8	9.8	1.2	1.4	0.5	2.4	4.8	12.7	25.7	60.4	26.1	314		
				Escorr [mm]	7.1	4.6	3.3	2.3	1.7	1.2	1.0	0.7	0.5	0.4	0.4	2.2	2.1	2.1	25	
				ETR [mm]	69.7	55.5	44.9	9.8	1.0	0.9	0.3	2.3	4.4	10.7	23.6	53.9	23.1	23.1	277	
				ETP [mm]	133.4	117.0	118.5	104.2	92.1	75.8	83.5	100.5	120.4	141.7	141.9	146.6	114.6	114.6	1376	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	54.9	39.1	25.9	18.2	13.5	10.0	7.4	5.5	4.1	3.0	3.1	16.8	16.8	16.8	16.8	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	15.9	23.8	22.9	18.2	13.5	10.0	7.4	5.5	4.1	3.0	2.6	5.6	11.0	11.0	11.0	
P 9	EL MOLINO	Tomayapo	297	Prec [mm]	113.7	97.6	74.2	16.3	1.9	0.5	0.6	3.2	8.2	21.3	44.5	90.2	39.3	472		
				Escorr [mm]	30.5	25.3	23.2	6.8	3.3	1.9	1.0	0.6	0.3	0.3	2.3	17.3	9.4	113		
				ETR [mm]	70.4	64.9	59.1	20.9	2.0	0.4	0.6	3.3	8.3	21.7	41.1	63.3	29.7	29.7	356	
				ETP [mm]	110.1	94.3	100.8	88.5	78.7	66.6	72.9	90.3	101.4	118.0	119.0	119.1	96.6	96.6	1160	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	3.4	3.1	2.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	1.9	1.1	1.1	1.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	0.6	0.8	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	
P 11	LA ANGOSTURA TUPIZA	Tupiza	2311	Prec [mm]	89.9	59.8	36.6	6.3	0.4	1.0	0.1	1.1	3.2	7.1	22.3	59.4	23.9	287		
				Escorr [mm]	8.9	5.6	2.6	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.9	2.8	2.3	2.3	2.3	28	
				ETR [mm]	71.1	56.7	42.4	6.4	0.4	1.0	0.1	1.1	3.2	7.1	21.4	50.9	21.8	21.8	262	
				ETP [mm]	123.8	107.4	112.5	97.2	80.2	67.8	74.8	96.1	115.4	140.1	143.0	137.9	108.0	108.0	1296	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	7.7	5.4	2.2	1.6	1.3	1.1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.8	2.4	2.1	2.1	2.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	1.5	2.2	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6	1.1	1.1	1.1	
P 12	El Puente	San Juan del Oro	17396	Prec [mm]	92.8	68.7	43.5	7.4	1.0	0.5	0.2	1.2	3.0	8.8	22.5	66.5	26.3	316		
				Escorr [mm]	5.6	4.4	2.7	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	1.2	1.6	1.6	20	
				ETR [mm]	74.0	63.0	51.4	9.8	1.0	0.5	0.2	1.2	3.1	9.1	23.6	60.5	24.8	24.8	297	
				ETP [mm]	120.0	103.3	108.9	92.8	75.4	61.8	65.7	86.6	102.4	126.8	132.0	135.2	100.9	100.9	1211	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	36.2	31.4	17.6	10.1	7.7	5.9	4.6	3.6	2.6	1.9	1.4	7.6	10.9	10.9	10.9	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	10.2	15.4	14.7	11.7	8.9	6.8	5.2	3.9	2.9	2.2	1.7	3.5	7.3	7.3	7.3	
P 12.C = P 11 + P 12	El Puente	San Juan del Oro	19707	Prec [mm]	92.9	66.3	43.8	7.3	0.9	0.6	0.1	1.2	3.1	8.7	23.3	64.1	26.0	312		
				Escorr [mm]	6.0	4.5	2.7	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	1.4	1.7	1.7	21	
				ETR [mm]	73.6	62.2	50.4	9.4	0.9	0.5	0.2	1.2	3.1	8.9	23.4	59.4	24.4	24.4	293	
				ETP [mm]	120.0	103.3	108.9	92.8	75.4	61.8	65.7	86.6	102.4	126.8	132.0	135.2	100.9	100.9	1211	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	43.9	36.7	19.9	11.7	9.0	7.0	5.5	4.3	3.1	2.3	2.2	10.0	13.0	13.0	13.0	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	11.7	17.6	16.7	13.4	10.2	7.8	5.9	4.5	3.4	2.6	2.1	4.1	8.3	8.3	8.3	
P 13	CHILCARA	Camblaya	3156	Prec [mm]	69.8	60.0	45.1	8.3	1.6	0.7	0.5	1.6	4.9	15.0	27.1	54.9	24.1	290		
				Escorr [mm]	54.5	39.7	33.3	5.2	1.0	0.6	0.4	0.4	0.2	0.7	5.8	13.9	13.0	156		
				ETR* [mm]	37.0	21.0	29.1	4.5	2.5	2.9	2.7	2.3	7.8	27.8	39.8	42.3	18.3	18.3	220	
				ETP [mm]	145.8	125.8	129.6	115.0	97.0	84.8	90.5	112.5	136.6	160.6	158.7	159.1	126.3	126.3	1516	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	63.7	51.2	38.8	6.2	1.1	0.7	0.5	0.5	0.3	0.9	7.0	16.1	15.6	15.6	15.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	10.3	13.0	11.4	7.4	3.6	1.3	0.0	-0.7	-1.0	-1.1	-0.7	3.4	3.9	3.9	3.9	
P 13.C = P 8.C + P 9 + P 12.C + P 13	CHILCARA	Camblaya	43880	Prec [mm]	87.3	64.3	45.1	8.7	1.1	1.0	0.4	1.8	4.0	11.1	24.6	62.1	26.0	311		
				Escorr [mm]	10.1	7.2	5.3	2.2	1.5	1.1	0.8	0.6	0.4	0.4	0.7	2.7	2.8	2.8	33	
				ETR [mm]	69.1	56.1	46.3	9.3	1.1	0.9	0.4	1.8	4.1	11.2	24.8	55.6	23.4	23.4	281	
				ETP [mm]	128.3	111.5	115.1	100.0	85.1	70.4	76.4	95.5	114.0	136.9	139.1	142.3	109.5	109.5	1315	
				Q [m <sup>3</sup> /s]	165.8	130.2	87.1	36.8	24.0	17.9	13.5	10.4	7.5	6.3	12.6	44.7	46.4	46.4	46.4	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	38.5	55.1	51.8	39.6	27.6	19.3	13.5	9.4	6.6	4.6	4.0	13.4	23.6	23.6	23.6	

**Tabla 7.1 (cont.): Síntesis del Balance Hídrico superficial por subcuencas  
Periodo 1970-2000 Cuenca Alta del Río Pilcomayo**

Código	Cuenca Est. Hídrico	Río	Área [km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual
P-14	SAN JOSECITO	Pilcaya	4250	Prec [mm]	107.8	88.5	77.1	25.3	5.5	2.5	1.4	2.6	7.3	22.9	48.0	84.5	39.5	473
				Escorr [mm]	31.1	24.6	24.9	11.2	7.2	5.6	4.5	3.6	2.8	2.7	5.4	14.8	11.5	138
				ETR [mm]	66.2	58.4	56.9	25.6	5.6	2.6	1.4	2.7	7.4	22.0	40.8	59.0	29.1	349
				ETP [mm]	124.8	104.0	109.8	96.3	90.1	81.6	84.8	103.5	120.8	138.9	136.6	137.8	110.8	1329
				Q [m <sup>3</sup> /s]	49.3	43.3	39.5	18.3	11.4	9.2	7.1	5.7	4.5	4.4	8.9	23.5	18.7	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	9.7	12.5	14.0	13.2	10.7	8.4	6.6	5.2	4.1	3.4	3.9	6.2	8.2	
P-14C=P-13C+P-14	SAN JOSECITO	Pilcaya	48130	Prec [mm]	89.1	66.4	47.9	10.1	1.5	1.1	0.5	1.9	4.3	12.2	26.7	64.1	27.1	326
				Escorr [mm]	12.0	8.7	7.0	3.0	2.0	1.5	1.1	0.9	0.6	0.6	1.2	3.8	3.5	42
				ETR [mm]	68.9	56.3	47.3	10.7	1.5	1.1	0.5	1.9	4.4	12.1	26.2	55.9	23.9	287
				ETP [mm]	128.0	110.8	114.6	99.7	85.6	71.4	77.2	96.2	114.6	137.0	138.8	141.9	109.7	1316
				Q [m <sup>3</sup> /s]	215.1	173.5	126.6	55.1	35.4	27.1	20.6	16.0	12.0	10.6	21.4	68.3	65.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	48.1	67.7	65.8	52.8	38.3	27.7	20.1	14.6	10.6	8.0	7.9	19.6	31.8	
P-15	VILLAMONTES	Pilcomayo	19131	Prec [mm]	146.5	131.9	119.0	59.3	16.3	6.4	4.3	6.1	15.4	40.3	81.5	123.2	62.5	750
				Escorr [mm]	43.4	35.7	42.8	15.2	7.8	4.6	3.5	2.5	1.8	2.0	7.8	22.2	15.8	189
				ETR [mm]	93.1	85.0	84.8	63.9	21.7	6.3	4.3	6.1	15.4	39.2	67.7	84.4	47.7	572
				ETP [mm]	136.9	115.5	113.5	93.0	83.0	71.9	79.1	103.6	116.8	145.4	140.6	142.1	111.8	1341
				Q [m <sup>3</sup> /s]	310.3	282.0	305.7	112.4	55.5	33.9	24.9	18.1	13.4	14.5	57.8	158.8	115.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	48.6	61.4	68.6	65.4	52.1	38.7	28.7	21.2	15.8	12.6	17.5	31.5	38.5	
P-15C=P-13C+P-14C+P-15	VILLAMONTES	Pilcomayo	80711	Prec [mm]	107.7	85.3	69.3	23.5	5.1	2.5	1.5	3.6	8.4	22.0	42.4	81.6	37.7	453
				Escorr [mm]	22.3	17.5	18.0	6.5	3.7	2.4	1.9	1.5	1.1	1.3	3.3	9.7	7.4	89
				ETR [mm]	75.4	64.1	58.0	25.3	6.5	2.4	1.5	3.7	8.5	21.2	38.0	63.7	30.7	368
				ETP [mm]	129.4	111.3	114.2	99.7	88.6	75.1	81.7	101.8	118.2	141.0	140.4	142.0	112.0	1343
				Q [m <sup>3</sup> /s]	672.9	582.7	542.9	202.6	110.5	75.6	57.0	43.8	34.1	39.3	102.1	291.5	229.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	126.8	169.0	177.1	155.3	117.6	86.0	62.9	46.0	34.2	27.8	34.3	67.6	92.1	
P-16	MISIÓN LA PAZ	Pilcomayo	8884.37	Prec [mm]	148.2	125.6	139.4	73.5	22.2	9.7	4.7	5.4	9.8	31.1	87.4	131.1	65.7	788
				Escorr [mm]	-46.9	14.8	19.0	25.6	-1.8	-3.1	-4.1	-3.6	-3.0	-3.1	-3.8	-26.5	-3.0	-36
				ETR+Δ [mm]	195.1	110.8	120.4	47.9	24.0	12.8	8.8	9.0	12.7	34.2	91.2	157.5	68.7	824
				ETP [mm]	160.3	130.0	124.8	89.2	70.5	56.7	69.0	97.8	118.3	155.2	155.4	159.9	115.6	1387
				Q [m <sup>3</sup> /s]	-155.6	54.4	63.1	87.9	-5.9	-10.6	-13.6	-11.9	-10.2	-10.3	-13.2	-87.8	-9.5	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	9.3	17.7	23.9	18.6	8.5	4.7	2.3	0.8	-0.7	-3.6	-9.7	-4.8	5.6	
P-16C=P-15C+P-16	MISIÓN LA PAZ	Pilcomayo	89595	Prec [mm]	115.4	92.3	86.7	36.7	8.3	4.7	2.4	3.6	8.6	24.0	53.8	91.7	44.0	528
				Escorr [mm]	15.5	17.2	18.1	8.4	3.1	1.9	1.3	1.0	0.7	0.9	2.6	6.1	6.4	77
				ETR [mm]	80.9	72.2	68.8	33.8	7.6	4.0	2.5	3.7	8.8	23.5	46.9	73.4	35.5	426
				ETP [mm]	132.5	113.2	115.2	98.6	86.8	73.3	80.4	101.4	118.3	142.5	142.0	143.9	112.3	1348
				Q [m <sup>3</sup> /s]	517.4	637.1	606.0	290.5	104.6	64.9	43.4	31.9	23.9	29.0	88.9	203.7	220.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	136.1	186.6	200.9	173.9	126.1	90.7	65.2	46.9	33.5	24.2	24.6	62.8	97.6	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que durante el periodo 1970-2000 la lámina promedio anual de escurrimiento en la Cuenca Alta hasta Villamontes fue de 89 mm, equivalente a un caudal específico de 2.8 l/s-km<sup>2</sup>. La subcuenca Ñujchu y las intercuencas Chillcara, San Josecito y Villamontes fueron, en ese orden, las que presentan la lámina de escurrimiento más alta. Por su extensión (19131 km<sup>2</sup>) y lámina de escurrimiento, la intercuenca Villamontes (P15) es la que aporta la parte más importante del volumen y caudal del río Pilcomayo en Villamontes. En el otro extremo, las subcuencas del río Yura en Salto León y del río Tupiza en La Angostura, así como las intercuencas Tumusla y Palca Grande del río Tumusla y del río San Juan del Oro en El Puente, presentan escorrentías anuales muy bajas en el orden de 20 a 28 mm/año.

La tabla 7.1 muestra que en la gran mayoría de las subcuencas, la lámina de escurrimiento supera a la de precipitación durante varios meses al año, en época de estiaje. En estos meses

todo o la mayor parte del caudal de los ríos proviene del aporte subterráneo (caudal base). Esto se corrobora con los valores medios de caudal subterráneo, que se muestran en la tabla para cada punto de control.

A nivel mensual, el balance hídrico indica que para toda el área de estudio la lámina de escorrentía media máxima debería producirse en enero, en coincidencia con la máxima de precipitación. En varias estaciones, incluyendo Villamontes y Misión La Paz, esto no corresponde a los caudales observados, que muestran un máximo medio en febrero. Por la misma razón, los caudales observados en febrero y marzo tienden a ser más grandes que los estimados mediante el balance. Este efecto del proceso de simulación, que fue identificado y descrito en el capítulo 6, puede estudiarse y eventualmente corregirse con un modelo que considere tránsito del flujo, como el MIKE BASIN.

En todas las subcuencas, el contenido de agua en el suelo es cero al final del año hidrológico, lo que es resultado de que la evapotranspiración potencial supera a la precipitación, a nivel anual y en casi todos los meses del año. Por la misma razón, en todas las subcuencas la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo  $H_{max}$  no es cubierta ni aún en los meses más lluviosos, lo que evidencia la relativa aridez de la región y las consecuentes limitaciones para muchos cultivos a secano.

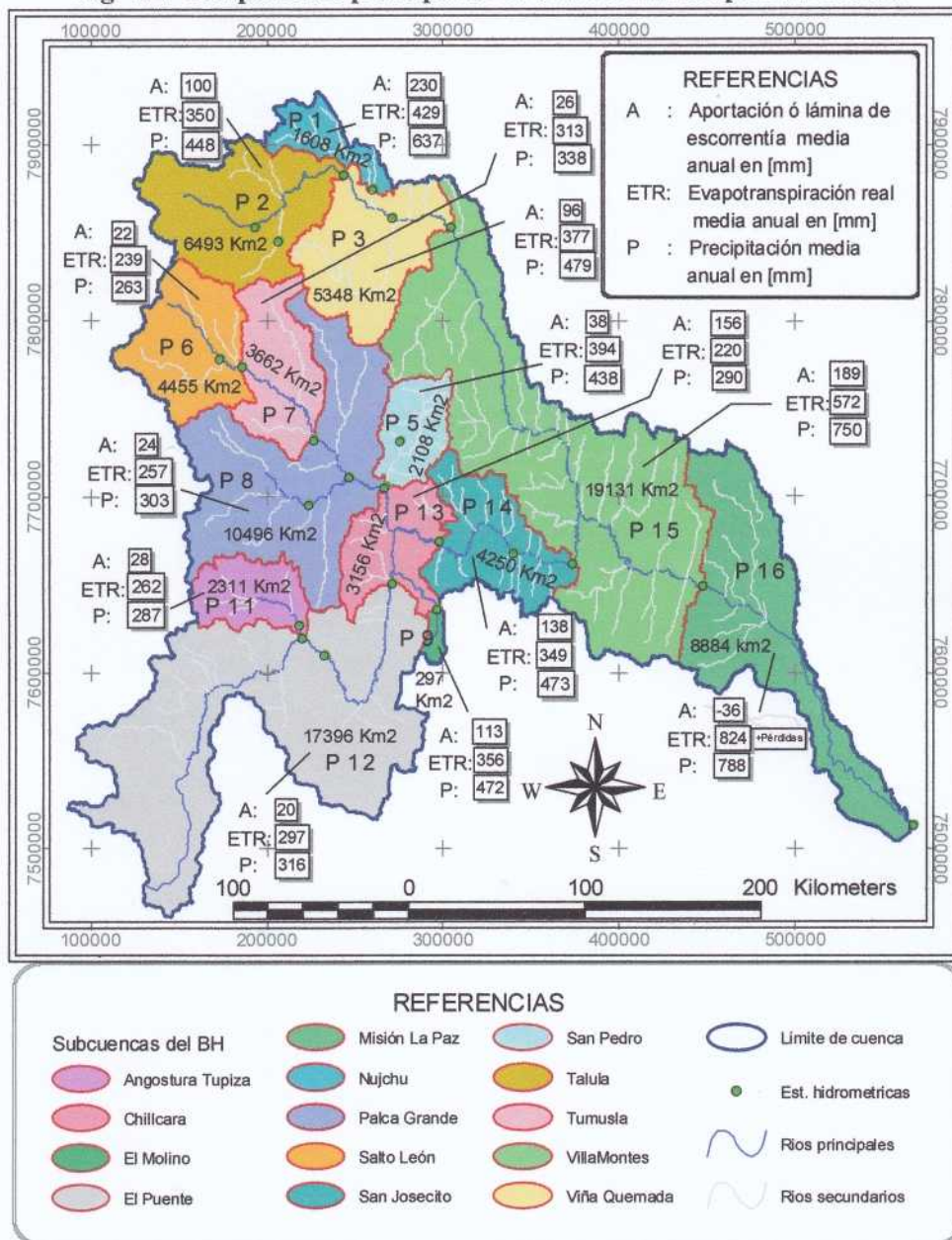
La tabla 7.2 muestra los valores medios interanuales por subcuencas e intercuencas de los tres componentes del balance, el término de discrepancia, el coeficiente de escurrimiento, ETP, caudal Q y caudal específico Qesp. La figura 7.2 muestra los tres componentes del balance (aportación/escurrimiento, precipitación y evapotranspiración real) a nivel anual por subcuencas e intercuencas.

**Tabla 7.2: Balance hídrico de subcuencas a nivel anual**

Nº	Código BH	Sub Cuenca (Est. Hidrométri.)	Área [Km <sup>2</sup> ]	Medias interanuales (Periodo 1970-2000)								
				Precip. [mm]	Ecurr. [mm]	ETR [mm]	Discrepancia		Coef Esc. [mm/mm]	ETP [mm]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Qesp [l/s-Km <sup>2</sup> ]
							[mm]	[%]				
1	P 1	Nujchu	1608	637	230	429	-20.6	3.2	0.36	1458	11.8	7.3
2	P 2	Talula	6493	448	100	350	-2.4	0.5	0.22	1462	20.7	3.2
3	P 3	Viña Quemada	5348	479	96	377	6.3	1.3	0.20	1410	16.4	3.1
5	P 5	San Pedro	2108	438	38	394	5.7	1.3	0.09	1231	2.6	1.2
6	P 6	Salto León	4455	263	22	239	1.8	0.7	0.09	1247	3.2	0.7
7	P 7	Tumusla	3662	338	26	313	-0.7	0.2	0.08	1378	3.0	0.8
8	P 8	Palca Grande	10496	303	24	257	22.3	7.4	0.08	1456	8.0	0.8
9	P 9	El Molino	297	472	113	356	3.5	0.7	0.24	1160	1.1	3.6
11	P 11	Angostura Tupiza	2311	287	28	262	-2.7	0.9	0.10	1296	2.1	0.9
12	P 12	El Puente SJO	17396	316	20	297	-1.0	0.3	0.06	1211	10.9	0.6
13	P 13	Chillcara	3156	290	156	220	-85.8	29.6	0.54	1516	15.6	4.9
14	P 14	San Josecito	4250	473	138	349	-13.4	2.8	0.29	1329	18.7	4.4
15	P 15	VillaMontes	19131	750	189	572	-11.1	1.5	0.25	1341	115.6	6.0
16	P 16	Misión La Paz	8884	788	-36	824	0.0	0.0	-0.05	1387	-9.5	-1.1

Fuente: Elaboración propia

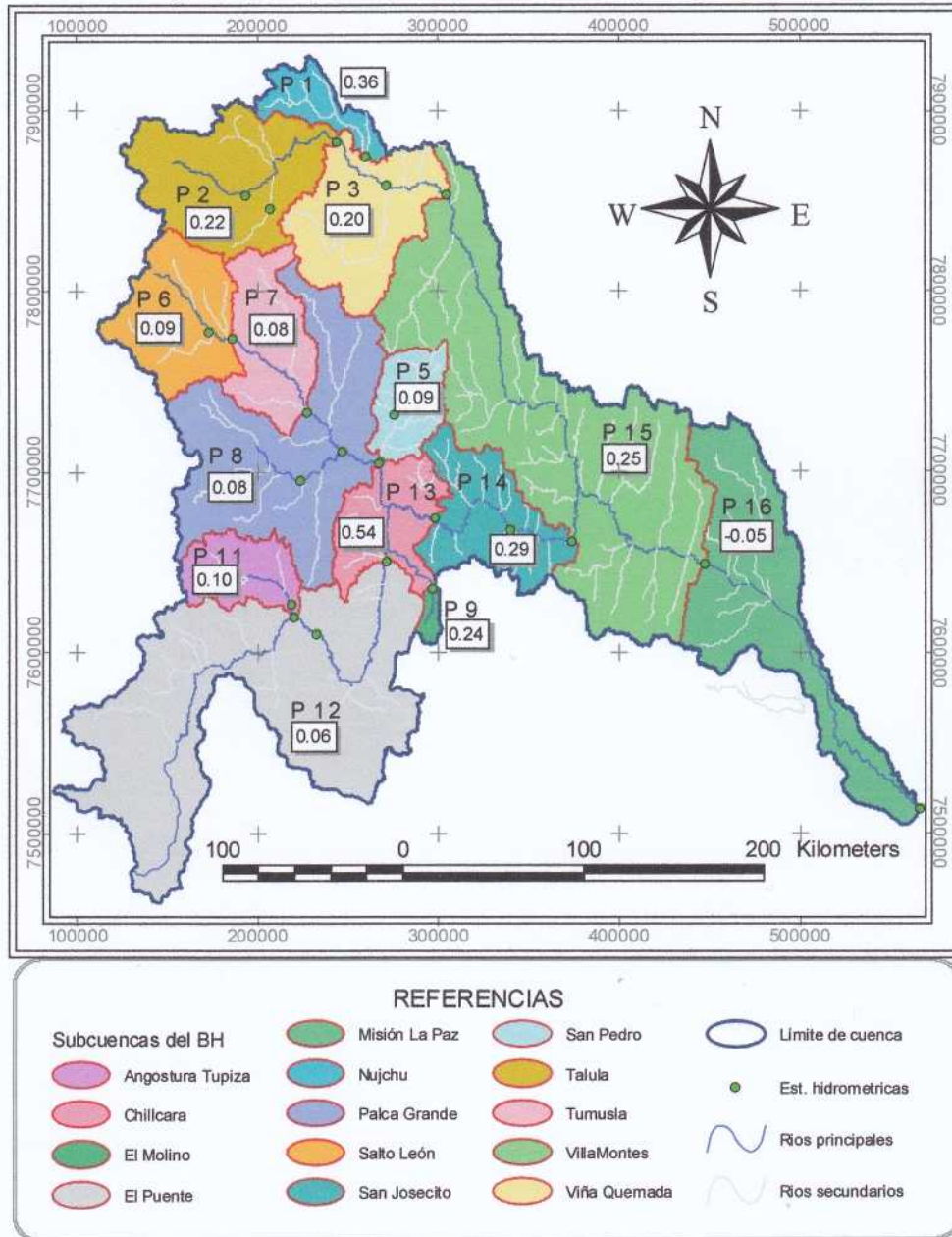
Fig. 7.2: Componentes principales del balance hídrico por subcuencas



El coeficiente de escurrimiento se define como la relación entre lámina de escurrimiento y de precipitación P.. Sin contar a la intercuenca Chillcara, el coeficiente de escurrimiento medio interanual varía des un valor de 0.06 la subcuenca del río San Juan del Oro, hasta un valor máximo de 0.36 en la subcuenca del río Cachimayu en Ñujchu. Se observa que el coeficiente de escurrimiento tiende a aumentar con la precipitación. Para la Cuenca Alta hasta

Villamontes, el coeficiente de escurrimiento medio fue de 0.20 para el periodo 1970-2000. La figura 7.3 muestra el coeficiente de escurrimiento medio interanual por subcuencas.

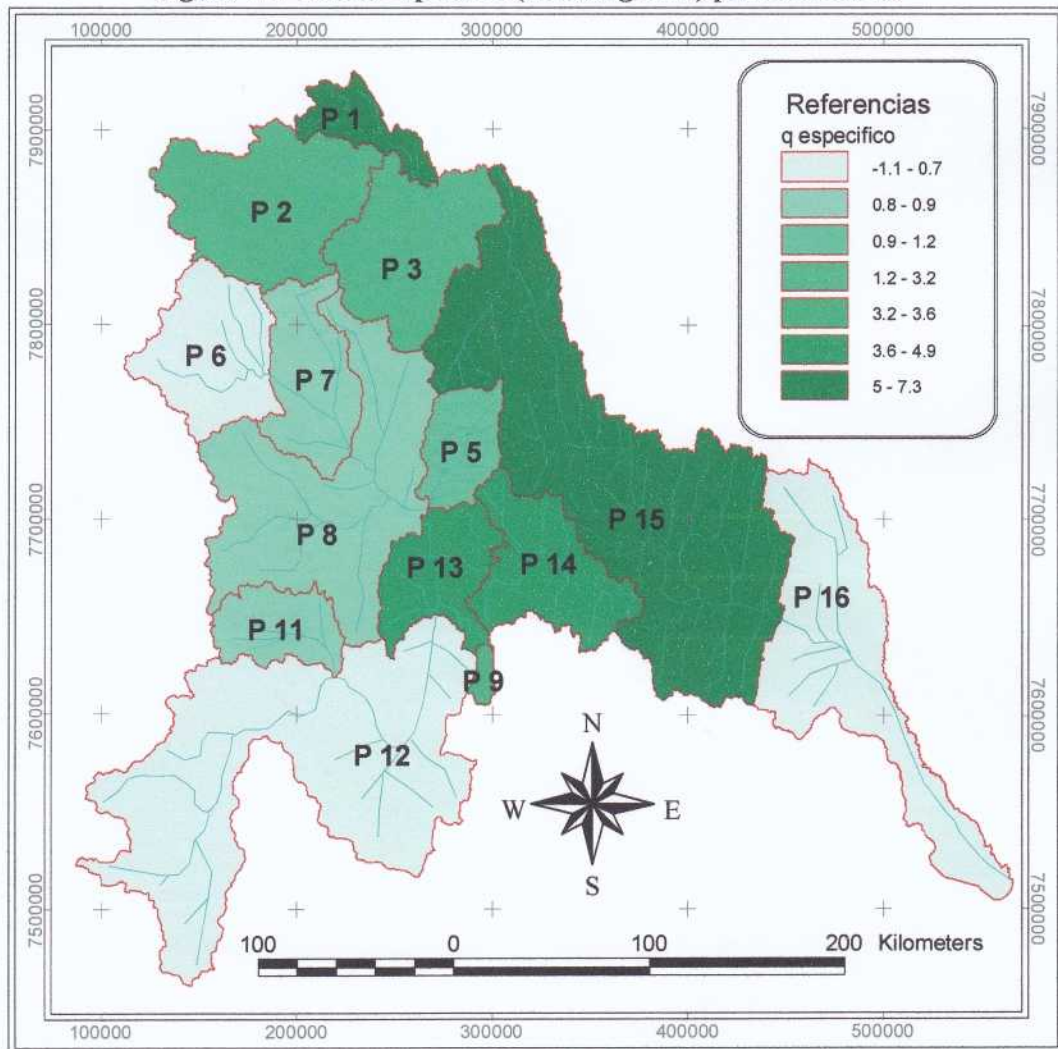
**Figura 7.3: Coeficiente de escurrimiento por subcuencas**



El caudal específico se define como el caudal medio del periodo por unidad de área y se expresa generalmente en litros/seg-km<sup>2</sup>. El caudal específico varía desde valores de 0.6 y 0.8 litros/seg-km<sup>2</sup> en las cuencas de los ríos San Juan del Oro y Tumusla hasta 7.3 litros/seg-km<sup>2</sup>

en la subcuenca del río Cachimayu en Ñujchu. Para el conjunto de la Cuenca Alta hasta Villamontes, el caudal específico fue de 2.8 litros/seg-km<sup>2</sup> para el periodo 1970-2000. Las intercuenas de Chillcara (P13), San Josecito (P14) y Villamontes (P15) presentan caudales específicos claramente por encima de ese valor, aunque como se indicó líneas arriba, el valor de Chillcara (en fondo gris en la tabla) está sujeto a confirmación. El caudal específico en las subcuencas e intercuenas de Talula, Viña Quemada, y El Molino se aproxima al valor medio de 2.8 litros/seg-km<sup>2</sup>. En cambio, las subcuencas e intercuenas que aportan a los ríos San Pedro, Tumusla y San Juan del Oro presentan caudales específicos muy por debajo de ese valor. El signo negativo delante de la lámina de escurrimiento y caudal específico de la intercuenca de Misión La Paz indica que el río Pilcomayo pierde parte de su caudal en ese tramo. La figura 7.4 muestra el caudal específico por subcuencas.

**Figura 7.4: Caudal específico (litros/seg-km<sup>2</sup>) por subcuencas**



## 7.2 BALANCE HÍDRICO EN SUBCUENCAS NO AFORADAS

La tabla 7.3 resume los resultados en forma de valores medios mensuales de los componentes del balance hídrico, en las subcuencas e intercuencas no aforadas, obtenidos para el periodo 1970-2000 mediante simulación. Para este grupo los valores de escorrentía, caudales y ETR son exclusivamente resultado de la simulación.

**Tabla 7.3: Balance hídrico superficial en subcuencas no aforadas**

Código	Cuenca Est. Hídrico.	Río	Área [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual	
P 4	MUYUQUIRI	Lique Mayu	63	Prec [mm]	98.7	76.2	58.3	13.0	1.3	0.7	1.2	4.1	3.1	20.1	35.9	73.2	32.2	386	
				Escorr [mm]	14.6	7.3	3.6	1.5	0.8	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	6.0	3.0	36
				ETR [mm]	72.8	71.1	61.7	18.0	1.3	0.7	1.2	4.1	7.1	24.5	38.2	68.8	30.8	30.8	370
				ETP [mm]	128.4	111.7	113.1	100.2	84.8	70.8	71.8	97.3	122.1	143.3	141.3	140.8	110.5	1326	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	0.35	0.19	0.09	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.15	0.07		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	0.07	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03		
P 10	TUPIZA	Tupiza	2262	Prec [mm]	89.7	61.3	36.5	6.2	0.4	0.9	0.1	1.0	3.0	6.7	21.2	59.2	23.9	286	
				Escorr [mm]	11.4	5.4	2.5	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.8	5.0	2.7	32	
				ETR [mm]	70.8	56.3	42.1	6.4	0.4	1.0	0.1	1.1	3.2	7.1	21.4	50.8	21.7	261	
				ETP [mm]	123.5	107.1	112.1	97.0	80.0	67.5	74.4	95.6	114.9	139.6	142.4	137.4	107.6	1291	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	9.6	5.0	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.7	4.2	2.3		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	1.5	2.2	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6	1.1		
P 17	YOCALLA	Pilcomayo	2751	Prec [mm]	110.8	79.7	63.7	19.0	1.6	1.8	1.7	5.9	10.4	20.3	32.5	75.0	35.2	422	
				Escorr [mm]	31.3	18.0	15.6	6.1	4.4	3.0	2.1	1.5	1.1	1.3	2.3	12.4	8.2	99	
				ETR [mm]	68.9	59.5	52.1	21.0	1.6	1.6	1.8	6.1	10.5	19.5	29.7	54.9	27.3	327	
				ETP [mm]	116.0	101.4	109.4	106.8	107.0	91.4	99.2	113.5	129.0	146.0	144.5	136.9	116.8	1401	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	32.1	20.5	16.0	6.4	4.5	3.1	2.2	1.5	1.2	1.3	2.5	12.7	8.7		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	5.2	7.2	7.5	6.3	4.5	3.1	2.2	1.5	1.1	1.0	1.2	2.5	3.6		
P 18	TARAPAYA	Tarapaya	884	Prec [mm]	92.0	62.7	55.1	16.5	1.4	2.0	0.5	3.9	8.9	21.1	30.4	64.2	29.9	359	
				Escorr [mm]	18.6	11.0	10.3	5.4	3.7	2.3	1.6	1.0	0.8	0.9	1.2	7.2	5.3	64	
				ETR [mm]	62.3	51.2	47.8	18.0	1.5	1.9	0.5	4.0	8.9	20.3	29.3	51.2	24.7	297	
				ETP [mm]	113.6	100.1	107.5	102.5	100.6	86.0	94.0	108.9	122.9	139.9	138.7	132.3	112.3	1347	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	6.1	4.0	3.4	1.8	1.2	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	2.4	1.8		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	1.6	2.2	2.2	1.8	1.2	0.8	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3	0.7	1.0		
P 19	PUENTE SUCRE	Pilcomayo	995	Prec [mm]	128.3	99.7	88.4	23.3	2.9	1.3	1.1	8.2	18.1	36.6	49.6	95.7	46.1	553	
				Escorr [mm]	46.4	28.7	30.1	8.7	5.9	4.0	2.9	2.0	2.2	3.1	5.2	23.5	13.6	163	
				ETR [mm]	74.2	65.1	61.2	22.8	3.0	1.3	1.1	8.3	16.8	32.7	42.0	64.7	32.8	393	
				ETP [mm]	134.8	115.5	118.2	113.4	107.0	89.6	100.6	124.9	136.6	151.0	150.0	150.7	124.4	1492	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	17.2	11.8	11.2	3.3	2.2	1.5	1.1	0.8	0.9	1.1	2.0	8.7	5.2		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	2.5	3.2	3.5	3.1	2.2	1.5	1.1	0.8	0.6	0.6	0.9	1.6	1.8		
P 20	YURA	Yura	1337	Prec [mm]	83.6	60.5	39.0	5.9	0.5	1.2	0.3	2.6	5.2	6.9	19.3	47.2	22.7	272	
				Escorr [mm]	10.4	7.4	3.4	1.8	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	2.1	2.4	28	
				ETR [mm]	64.5	50.5	41.6	7.0	0.6	0.9	0.3	2.7	5.2	7.0	19.2	43.6	20.3	243	
				ETP [mm]	122.4	106.5	107.4	93.4	87.1	67.3	76.6	88.1	108.6	129.0	134.8	135.2	104.7	1256	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	5.2	4.1	1.7	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	1.0	1.2		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	0.9	1.4	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5		
P 21	PALCA HIGUERAS	Tumusia	3595	Prec [mm]	90.6	66.6	54.5	13.2	1.6	1.5	0.4	2.9	6.2	17.9	30.1	67.8	29.4	353	
				Escorr [mm]	7.7	5.4	4.5	2.7	2.0	1.4	1.0	0.7	0.5	0.4	0.5	3.0	2.5	30	
				ETR [mm]	74.8	60.2	53.7	14.9	1.6	1.3	0.4	3.0	6.4	18.1	30.3	62.1	27.2	327	
				ETP [mm]	137.2	122.1	124.8	111.5	102.1	87.6	91.5	113.6	131.5	150.4	148.6	149.4	122.5	1470	
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	10.4	8.0	6.1	3.7	2.7	1.9	1.4	1.0	0.7	0.5	0.6	4.0	3.4		
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	3.1	4.6	4.6	3.7	2.7	1.9	1.4	1.0	0.7	0.5	0.5	1.1	2.2		

Código	Cuenca Est. Hídrico	Río	Área [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual
P 22	COTAGAITA	Cotagaita	4201	Prec [mm]	78.5	57.1	36.8	6.5	0.6	0.9	0.1	1.4	2.6	5.6	18.4	56.1	22.1	265
				Escurr [mm]	8.9	5.9	3.6	2.4	1.7	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.4	4.2	2.5	30
				ETR [mm]	64.3	50.6	36.7	6.7	0.6	0.5	0.1	1.5	2.6	5.5	18.5	49.2	19.7	237
				ETP [mm]	141.6	125.4	123.2	107.5	90.5	73.7	82.4	99.0	121.4	147.4	145.5	158.8	118.0	1416
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	13.9	10.2	5.7	3.9	2.7	1.9	1.3	0.9	0.6	0.5	0.6	6.5	4.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	4.1	5.8	5.2	3.9	2.7	1.9	1.3	0.9	0.6	0.5	0.4	1.4	2.4	
P 23	CHARAJA	San Juan del Oro	10631	Prec [mm]	97.1	69.1	42.2	6.0	0.9	0.6	0.2	1.0	2.1	5.7	19.3	67.1	25.9	311
				Escurr [mm]	9.3	5.6	2.8	1.8	1.4	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	2.8	2.2	27
				ETR [mm]	74.8	63.9	51.0	8.4	0.9	0.6	0.2	1.0	2.1	5.5	19.8	59.5	24.0	288
				ETP [mm]	121.0	104.5	109.8	94.9	76.6	62.9	66.1	87.6	101.8	127.7	134.7	138.2	102.1	1226
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	36.7	24.5	11.1	7.5	5.4	3.9	2.8	2.0	1.4	1.0	0.8	11.2	9.0	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	7.0	10.6	10.0	7.5	5.4	3.9	2.8	2.0	1.4	1.0	0.8	2.2	4.6	
P 24	PAMPA GRANDE	Pillaya	3026	Prec [mm]	94.3	76.1	63.4	16.6	3.9	1.7	0.6	2.1	6.7	19.9	39.0	74.2	33.2	399
				Escurr [mm]	26.5	18.4	17.0	7.4	5.4	3.6	2.6	1.8	1.2	2.8	14.0	8.5	102	
				ETR [mm]	62.0	52.8	49.5	16.6	4.0	1.8	0.6	2.2	6.8	19.3	34.4	53.2	25.3	303
				ETP [mm]	127.3	106.1	113.2	102.7	95.5	84.9	90.1	107.9	125.4	143.5	141.6	140.3	114.9	1378
				Q sim [m <sup>3</sup> /s]	29.9	23.0	19.2	8.6	6.1	4.2	3.0	2.1	1.4	1.3	3.2	15.8	9.8	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	7.0	9.3	10.0	8.6	6.1	4.2	3.0	2.1	1.4	1.1	1.6	3.7	4.8	

Fuente: Elaboración propia

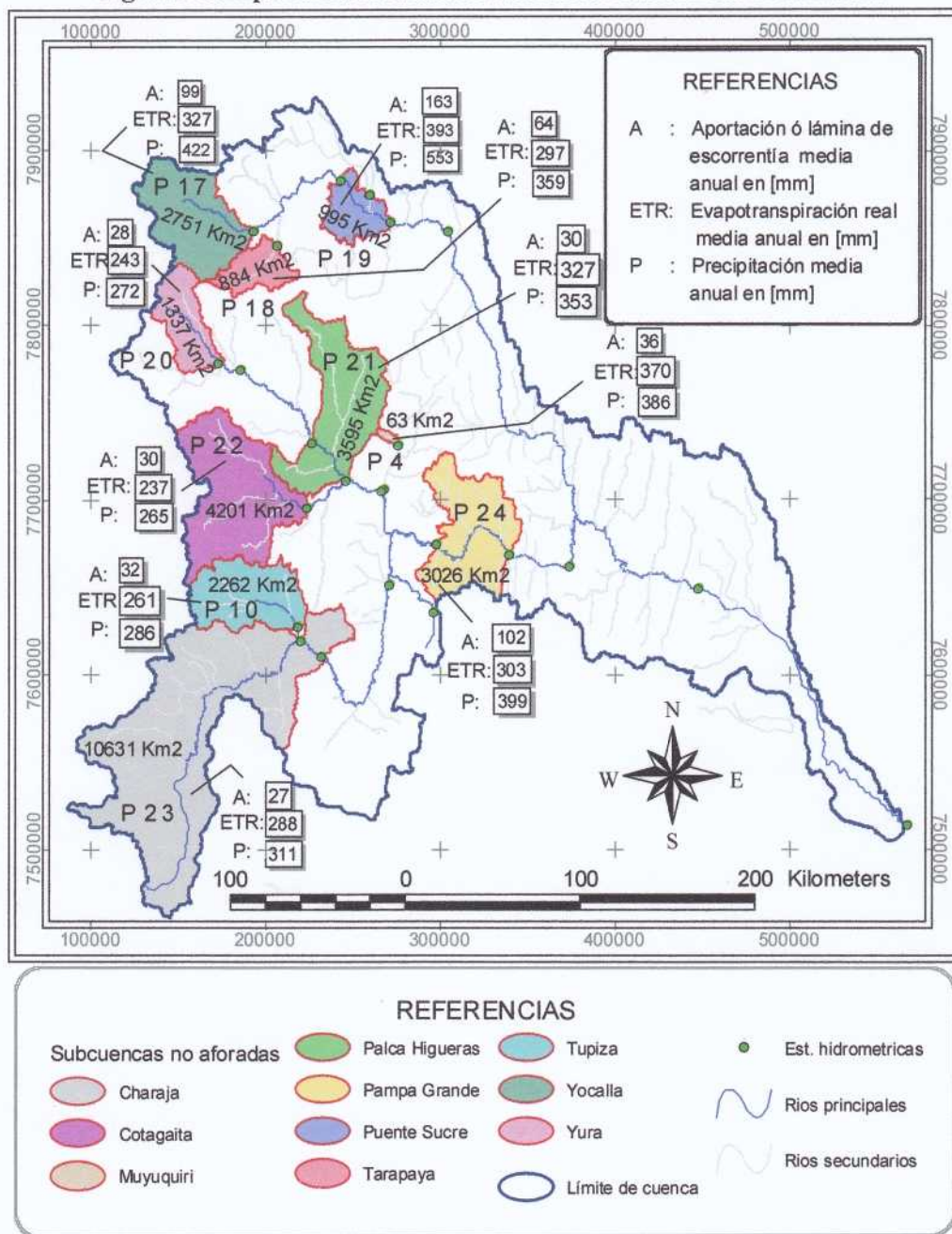
La tabla 7.4 muestra, para subcuencas no aforadas, los valores medios interanuales de los tres componentes del balance, el término de discrepancia, el coeficiente de escurrimiento, ETP, caudal Q y caudal específico Qesp. La figura 7.5 muestra los tres componentes del balance (aportación/escurrimiento, precipitación y evapotranspiración real) a nivel anual por subcuencas. La figura 7.6 muestra el coeficiente medio de escurrimiento, que para este grupo varía en el rango de 0.09 a 0.29.

Tabla 7.4: Balance hídrico de subcuencas no aforadas a nivel anual

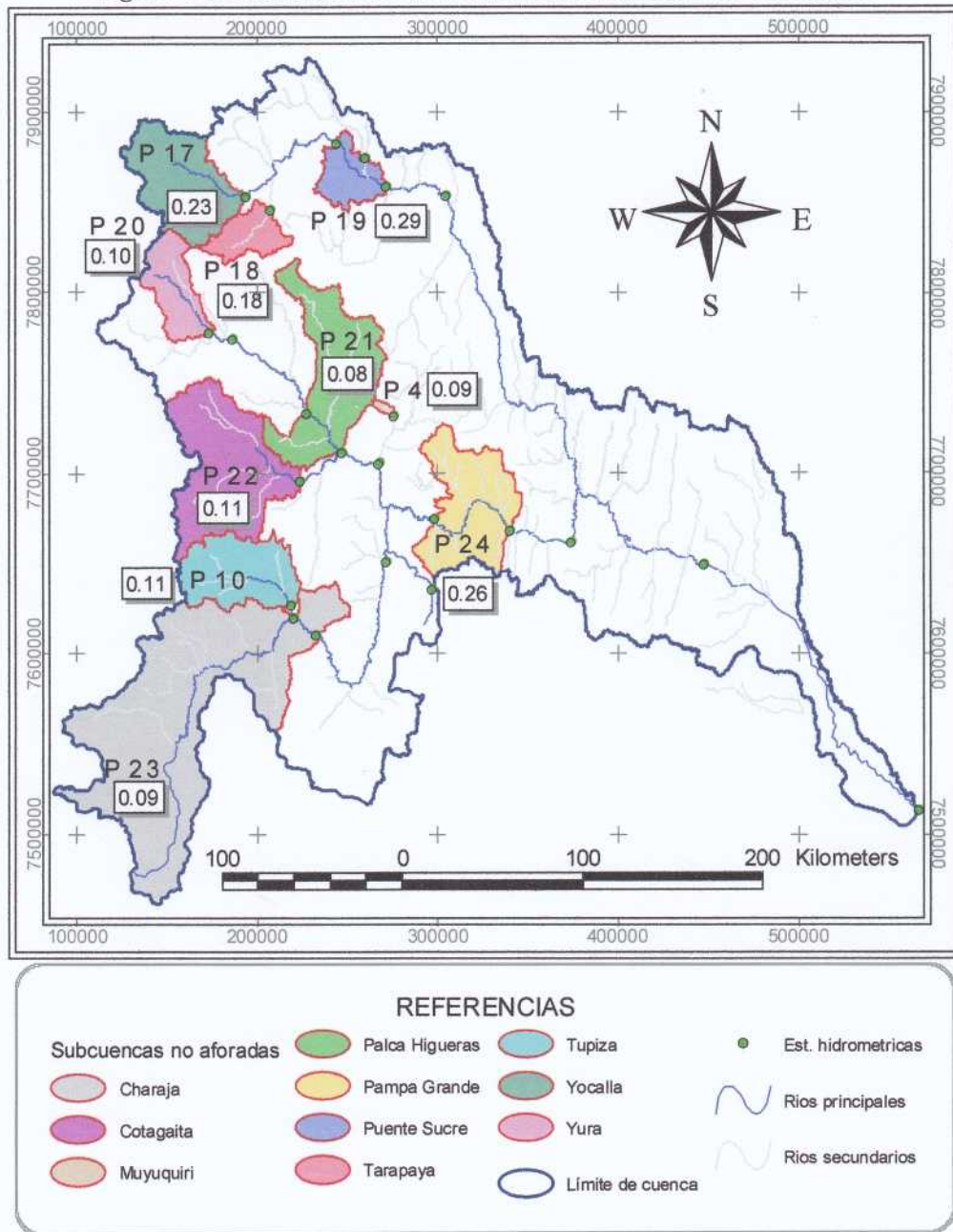
N°	Código BH	Sub Cuenca (Est. Hidrométrico)	Área [Km <sup>2</sup> ]	Medias interanuales (Período 1970-2000)								
				Precip. [mm]	Escurr. [mm]	ETR [mm]	Discrepancia		Coef Esc. [mm/mm]	ETP [mm]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Qesp [l/s-Km <sup>2</sup> ]
							[mm]	[%]				
4	P 4	Muyuquiri	63	386	36	370	-19.7	5.1	0.09	1326	0.07	1.2
10	P 10	Tupiza	2262	286	32	261	-6.8	2.4	0.11	1291	2.3	1.0
17	P 17	Yocalla	2751	422	99	327	-3.8	0.9	0.23	1401	8.7	3.1
18	P 18	Tarapaya	884	359	64	297	-2.1	0.6	0.18	1347	1.8	2.0
19	P 19	Puente Sucre	995	553	163	393	-3.0	0.5	0.29	1492	5.2	5.2
20	P 20	Yura	1337	272	28	243	0.6	0.2	0.10	1256	1.2	0.9
21	P 21	Palca Higuera	3595	353	30	327	-3.4	1.0	0.08	1470	3.4	1.0
22	P 22	Cotagaita	4201	265	30	237	-2.5	0.9	0.11	1416	4.1	1.0
23	P 23	Charaja	10631	311	27	288	-3.1	1.0	0.09	1226	9.0	0.9
24	P 24	Pampa Grande	3026	399	102	303	-6.3	1.6	0.26	1378	9.8	3.2

Fuente: Elaboración propia

Fig. 7.5: Componentes del balance hídrico en subcuencas no aforadas

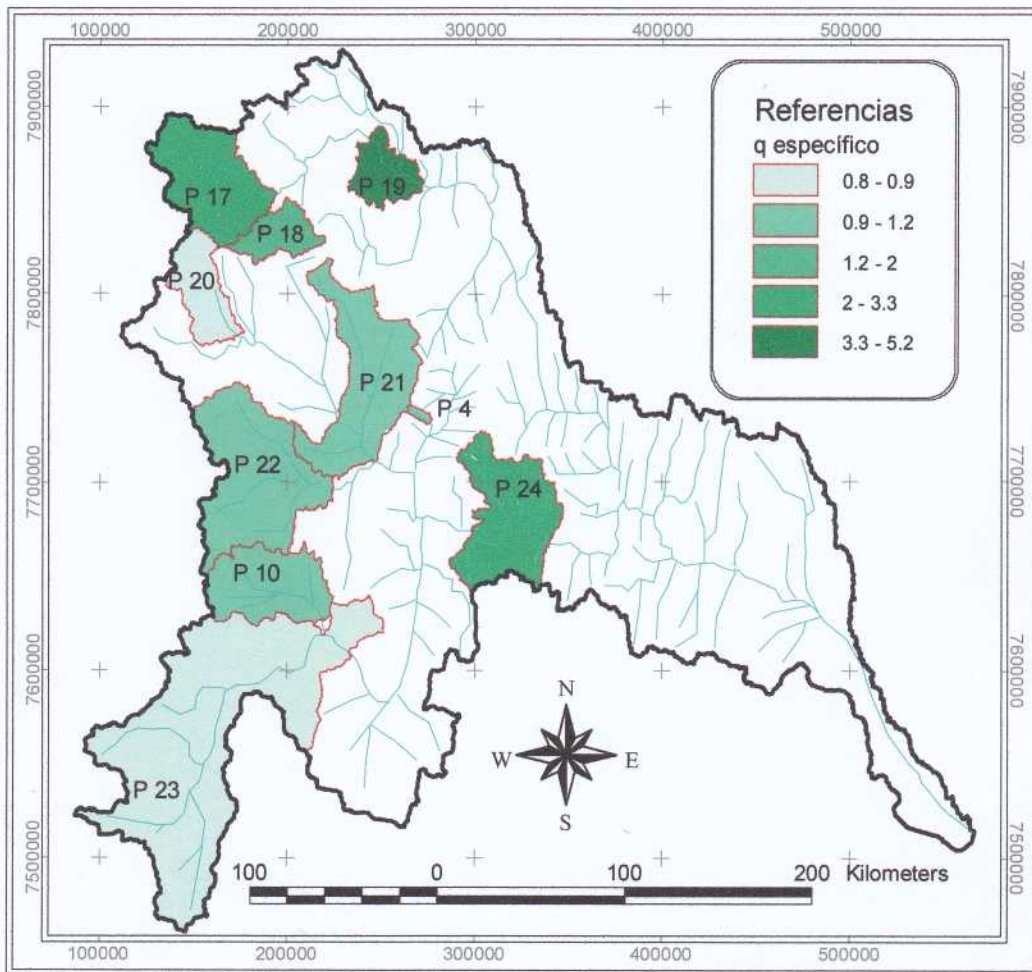


**Figura 7.6: Coeficiente de escurrimiento de subcuencas no aforadas**



La figura 7.7 muestra el caudal específico medio en subcuencas no aforadas, con un rango que va de 0.9 a 3.2 . litros/seg-km<sup>2</sup>. Los valores más bajos se presentan nuevamente en subcuencas pertenecientes a las cuencas de los ríos Tumusla y San Juan.

**Figura 7.7: Caudal específico (litros/seg-km2) en subcuencas no aforadas**



### 7.2.1 Balance hídrico en Machigua

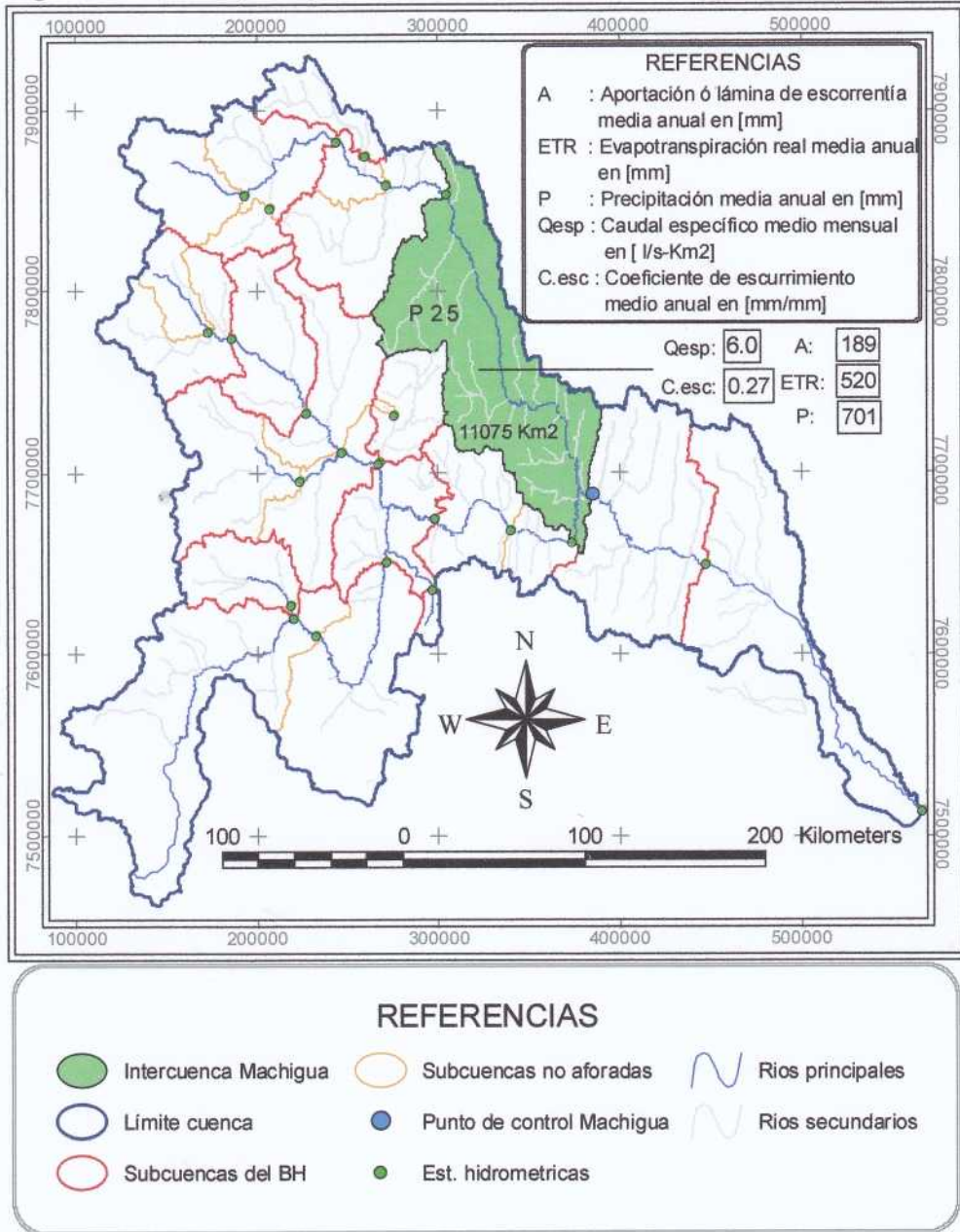
La tabla 7.5 resume los valores medios interanuales del balance hídrico en el punto de control de Machigua. La figura 7.8 muestra la intercuenca y los tres componentes principales del balance, estimados mediante el modelo.

**Tabla 7.5: Balance hídrico de intercuenca Machigua a nivel anual**

N°	Código BH	Sub Cuenca (Est. Hidrométri.)	Área [Km <sup>2</sup> ]	Medias interanuales (Periodo 1970-2000)								
				Precip. [mm]	Escorr. [mm]	ETR [mm]	Discrepancia		Coef Esc. [mm/mm]	ETP [mm]	QBH [m <sup>3</sup> /s]	Qesp [l/s-Km <sup>2</sup> ]
							[mm]	[%]				
25	P 25	Machigua	11075	701	189	520	-7.6	1.09	0.27	1335	66.6	6.0

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 7.8: Ubicación y componentes del balance hídrico de la intercuenca Machigua**



La tabla 7.6 muestra los valores medios mensuales de las variables del balance hídrico en la intercuenca Machigua y en la cuenca consolidada. Para facilitar la comprensión del cálculo, la tabla 7.5 incluye también los balances hídricos consolidados de Viña Quemada y San Josecito, extraídos de la tabla 7.1.

Tabla 7.6: Balance hídrico superficial en Machigua

Código	Cuenca Est. Hidro.	Río	Área [Km <sup>2</sup> ]	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	Total Anual
P.30C=P1+P2+P3	VIÑA QUEMADA	Pilcomayo	13449	Prec [mm]	117.5	87.6	73.6	21.7	2.4	1.9	1.2	6.5	13.5	30.3	42.5	85.2	40.3	484
				Aport [mm]	29.4	22.9	22.0	6.8	3.9	2.8	2.3	1.9	1.7	2.8	4.4	12.8	9.5	114
				ETR [mm]	73.4	62.5	58.2	22.5	2.4	1.7	1.2	6.7	13.2	28.2	37.9	62.4	30.9	370
				ETP [mm]	123.8	106.9	113.4	108.9	107.2	92.9	101.1	118.7	132.6	148.8	145.4	141.8	120.1	1441
				Q [m <sup>3</sup> /s]	147.5	127.3	110.5	35.2	19.6	14.6	11.6	9.7	8.7	14.2	22.9	64.5	48.8	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	30.0	39.9	42.7	37.1	27.2	19.6	14.1	10.2	7.8	7.2	9.0	16.5	21.8	
P.14C=P13C+P14	SAN JOSECITO	Playa	48130	Prec [mm]	89.1	66.4	47.9	10.1	1.5	1.1	0.5	1.9	4.3	12.2	26.7	64.1	27.1	326
				Aport [mm]	12.0	8.7	7.0	3.0	2.0	1.5	1.1	0.9	0.6	1.2	3.8	3.5	42	
				ETR [mm]	68.9	56.3	47.3	10.7	1.5	1.1	0.5	1.9	4.4	12.1	26.2	55.9	23.9	287
				ETP [mm]	128.0	110.8	114.6	99.7	85.6	71.4	77.2	96.2	114.6	137.0	138.8	141.9	109.7	1316
				Q [m <sup>3</sup> /s]	215.1	173.5	126.6	55.1	35.4	27.1	20.6	16.0	12.0	10.6	21.4	68.3	65.1	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	48.1	67.7	65.8	52.8	38.3	27.7	20.1	14.6	10.6	8.0	7.9	19.6	31.8	
P.25	MACHIGUA	Pilcomayo	11075	Prec [mm]	138.2	123.1	111.0	50.6	11.9	4.9	3.6	6.7	16.6	41.3	76.5	116.3	58.4	701
				Aport [mm]	42.6	35.6	35.7	12.6	8.5	5.7	4.1	2.9	2.0	2.3	8.9	27.7	15.7	189
				ETR [mm]	83.8	76.7	78.8	56.5	13.1	4.9	3.7	6.8	16.8	38.6	62.1	77.7	43.3	520
				ETP [mm]	122.4	103.4	107.0	94.6	87.0	77.8	83.4	102.8	115.3	134.8	128.4	131.1	107.3	1288
				Q [m <sup>3</sup> /s]	176.1	163.0	147.6	53.9	35.0	24.4	17.0	11.9	8.6	9.5	37.9	114.7	66.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	36.9	46.4	51.0	46.6	35.0	24.4	17.0	11.9	8.5	7.2	12.0	23.4	26.7	
P.25C=P3C+P14C	MACHIGUA	Pilcomayo	72655	Prec [mm]	102.1	79.2	62.4	18.6	3.3	1.9	1.1	3.5	7.9	20.1	37.3	76.0	34.4	413
				Aport [mm]	19.9	15.4	14.2	5.1	3.3	2.4	1.8	1.4	1.0	1.3	2.9	9.1	6.5	78
				ETR [mm]	72.0	60.6	54.1	19.9	3.4	1.8	1.1	3.5	7.9	19.2	33.8	60.4	28.1	338
				ETP [mm]	126.4	109.0	113.2	100.6	89.8	76.4	82.5	101.4	118.0	138.9	138.5	140.2	111.2	1336
				Q [m <sup>3</sup> /s]	538.7	463.8	384.8	144.1	89.9	66.1	49.2	37.6	29.4	34.3	82.2	247.4	180.6	
				Q bas [m <sup>3</sup> /s]	115.0	153.9	159.5	136.5	100.5	71.7	51.2	36.7	26.9	22.4	28.9	59.5	80.2	

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 COROLARIO

El presente estudio de Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Alta del río Pilcomayo cumplió completamente con el alcance de trabajo, definido por el Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la cuenca del río Pilcomayo y el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA. Los resultados son los siguientes:

- Base de datos meteorológicos originales (Bd\_Pilc\_orig\_Com\_trinal.mdb) y corregidos/rellenados (Bd\_Pilc\_rell\_Com\_trinal.mdb) por estación, con series mensuales de las principales variables climatológicas que intervienen en el balance: precipitación, temperatura, humedad relativa, vientos, insolación, evaporación medida en tanque y evapotranspiración potencial. La base de datos se creó en formato Hydraccess y contiene información de más de 250 estaciones dentro y fuera de la cuenca.
- Base de datos hidrológicos con series de caudales mensuales para cada una de las estaciones hidrométricas ubicadas en la Cuenca Alta, de 30 años de duración, periodo 1970-2000. Las series de caudales se incluyeron en la base de datos de resultados del Balance (Bd\_Pilc\_BH.mdb). Adicionalmente y como resultado del convenio paralelo con el SENAMHI, el Proyecto Pilcomayo dispone de una base de datos hidrométricos a nivel diario e instantáneo para toda la Cuenca Alta.

- Base de datos geográficos que incluye los mapas de cuencas y subcuencas, la ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas, los mapas temáticos creados durante el estudio (i.e. capacidad de almacenamiento de agua en el suelo) y resultados.
- Modelo precipitación-escorrentía CHAC/SIMULA calibrado y validado, que permitió la extensión de las series de caudales y la evaluación del balance en todas las subcuencas con información incompleta.
- Mapas temáticos digitales e impresos que muestren gráficamente los resultados principales: isolíneas de variables climáticas, componentes del balance hídrico, coeficientes de escorrentía y caudales específicos por subcuenca e intercuenca.
- El presente Informe Final, que sintetiza los procedimientos y resultados del Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo.

Las series de valores mensuales de los tres componentes del balance para todo el periodo 1970-2000 fueron introducidas en Hydraccess. Para ello se añadieron a la base de datos los captos correspondientes y a cada subcuenca e intercuenca se le asignó una estación ficticia que "registra" las variables precipitación, evapotranspiración real y escorrentía. También se incluyó en la base de datos los componentes del balance hídrico consolidado a nivel de macrocuenca. De esta manera, los resultados del estudio son fácilmente utilizables para cualquier aplicación posterior. Adicionalmente se añadieron las series de entrada y salida al modelo CHAC/SIMULA, concretamente de evapotranspiración potencial, caudal total y caudal subterráneo. Como una aplicación adicional se simuló el balance hídrico y la escorrentía para la intercuenca y cuenca Machigua.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Proyecto Pilcomayo, en la persona de su Codirector Regional, Ing. Fernando José Zárate y de los Ing. José Molina Mitru y Mario Gamarra, supervisores del estudio, por la confianza y apoyo brindados para su realización.

A los Ings. Carlos Díaz, Director y Luis Noriega, Jefe de Hidrología del SENAMHI, por toda la información y apoyo que siempre han prestado en los proyectos conjuntos con el Instituto de Hidráulica e Hidrología.

A la Srta. Isabel Aguilar y al Ing. Philippe Vauchel del IRD, que realizaron el análisis y tratamiento de toda la información hidrométrica utilizada en el presente estudio.

## **REFERENCIAS**

Aguilar, I., Malbrunot, A. y Vauchel, P., 2005. Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos disponibles aguas arriba de Misión La Paz. La Paz, agosto 2005.

Aguilar, I., Malbrunot, A. y Vauchel, P., 2006. Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos disponibles aguas arriba de Misión La Paz, Informe final, marzo 2006

Arellano, R., 1988. Balance Hídrico de la cuenca del río Pilcomayo. Tesis UMSA, publicación PHICAB, La Paz.

ASS, GIRH, IIAMA, 2005. Modelos Precipitación-escorrentía. México.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas- CEDEX, Ministerio de Fomento, España, 2004. Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (C.H.A.C.), Manual provisional. Madrid, mayo 2004.

Herbas, C., 1987. Climatología de la Cuenca Andina y Amazónica del río Grande, Bolivia. Tesis UMSA, Publicación PHICAB, La Paz. 237 p.

Roche, M.A. et al, 1992. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. Publicación PHICAB, La Paz, 28 p.

UNESCO-ROSTLAC, 1982. Guía metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur.

ZONISIG. 2000, 2001. Zonificación Agroecológica y Socioeconómica, departamentos de Chuquisaca, Potosí y Tarija.

**ANEXO 1**

**DESCRIPCIÓN BASE DE DATOS METEOROLÓGICOS - HYDRACCESS**

(Bd\_Pilc\_orig\_Com\_Trinal.dbf): Base de datos originales, sin modificaciones  
 (Bd\_Pilc\_rell\_Com\_Trinal.dbf): Base de datos con rellenos y reconstituciones

**ESTACIONES**

- Id Estaciones:** "Nombre de la estación" (max. 12 caracteres)
- Orden:** " \_ "
- Id\_Hybam:** "Provincia a la que pertenece la estación" (según SENAMHI)
- Id Terciaria:** " \_ "
- Nombre:** "Nombre completo de la estación" (descripción\*)
- Departamento:** "País – departamento al que pertenece la estación"
- Cuenca:** "Cuenca a la que pertenece la estación"
- Río:** "Desconocido" (\*\*)
- Administrador:** "Administrador de la estación"
- Latitud:** "Latitud de la estación" (Coord. Geográficas en ° decimales)
- Longitud:** "Longitud de la estación" (Coord. Geográficas en ° decimales)
- Altitud:** "Altitud de la estación" (altura sobre el nivel del mar en metros)
- Superficie de cuenca:** " \_ " (no se cuenta con esta información)
- Inicio de actividad:** "Año de inicio de actividad en la estación" (según SENAMHI)
- Inicio del año hidro:** "Año en que se inicia el año hidrológico en la región" (\*\*\*)

**Referencias:**

- \* En algunos casos presenta información adicional (información según SENAMHI)
- \*\* La base de datos de SENAMHI no presenta esta información
- \*\*\* Año hidrológico asumido para el desarrollo del Balance Hídrico microregional

**CAPTORES (M-...) “mensuales”**

Tipo de tablas (P=lluvias,M=datos meteo)

**Editar los Captores**

Id Estación: SucreSenamhi ← → Bolivia - Chuquisaca

Sucre Senamhi

Captor	Tabla	Descripción	Naturaleza	Registrador
▶ M-ETP	M	Evapotranspiración Potencial	Ev(mm)	
M-EVT	M	Evaporación Total	Ev(mm)	
M-HRM	M	Humedad Relativa Media	H(%)	
M-INS	M	Horas de Sol Total	R(W/m <sup>2</sup> )	
M-TMA	M	Temperatura Media Ambiente	T(°C)	
M-VTS	M	Velocidad Media del Viento	V(m/s)	
M-Pm1	P	Lluvias	P(mm)	


Inventario Datos del Captor
+
↶
Propiedades

Inventario Datos de la Estación


<u>Captor:</u>	<u>Descripción</u>
M-Pm1_	: Lluvias mensuales (Precipitación en [mm])
M-TMA_	: Temperatura Media Ambiente mensual (Temperatura en [°C])
M-HRM_	: Humedad Relativa Media mensual (Humedad relativa en [%])
M-VTS_	: Velocidad Media del Viento mensual (Velocidad en [m/s])
M-INS_	: Horas de Sol Total al mes (tiempo en [Horas])
M-EVT_	: Evaporación Total mensual en tanque (Evaporación en [mm])
M-ETP_	: Evapotranspiración Potencial por Penman (evaporación en [mm])

## ANEXO 2

## DESCRIPCIÓN BASE DE DATOS HYDRACCESS DEL BALANCE HIDRICO

**(Bd\_Pile\_BH.dbf):** Base de datos del balance hídrico superficial. Incluye datos originales de caudales, los componentes del balance y las variables de entrada y salida (simuladas) del modelo CHAC/SIMULA, para subcuencas, intercuencas y macrocuencas. La información de caudales y escurrimiento en el módulo HIDRO y la meteorológica (precipitación y evapotranspiración real y potencial) se incluye en el respectivo módulo PLUVIO-METEO.

Las **ESTACIONES** hidrométricas para el módulo HIDRO, incluyendo cuencas aisladas (subcuencas e intercuencas) son descritas de la siguiente manera:

Id Estaciones: "Nombre de la estación" (max. 12 caracteres)

Orden: " \_ " "

Id\_Hybam: " \_ " "

Id Terciaria: " \_ " "

Nombre: "Nombre completo de la estación"

Departamento: "País – departamento al que pertenece la estación"

Cuenca: Cuenca a la que pertenece la estación"

Río: "Monitoreado por la estación hidrométrica en cuestión"

Administrador: "Administrador de la estación"

- Latitud: "Latitud de la estación" (Coord. Geográficas en ° decimales)
- Longitud: "Longitud de la estación" (Coord. Geográficas en ° decimales)
- Altitud: "Altitud de la estación" (altura sobre el nivel del mar en metros)
- Superficie de cuenca: " — " (la estación.hidrométrica no requiere esta información, pero sí la estación ficticia que representa a la cuenca)
- Inicio de actividad: "Año de inicio de actividad en la estación" (según SENAMHI)
- Inicio del año hidro: "Mes en que se inicia el año hidrológico en la región" (\*)

\*Año hidrológico asumido para el desarrollo del Balance hídrico microregional (septiembre-agosto)

Las estaciones ficticias que representan a los valores medios areales de precipitación P y evapotranspiración potencial ETP por subcuenca e intercuenca se describen en forma similar, pero están incluidas en el módulo PLUVIO-METEO. Esos datos son las entradas al modelo CHAC/SIMULA y se presentan en forma de series mensuales para el periodo 1970-2000.

### CAPTORES

Todos los captosres incluidos en la base de datos son del tipo M (mensuales), debido a que el balance hídrico es de paso mensual. Para incluir en la base de datos las salidas del modelo CHAC/SIMULA, diferenciadas por subcuenca o intercuenca, así como el balance consolidado por macrocuencas, en la base de datos Hydraccess se crearon varios captosres que se describen a continuación.

Tipo de tablas (P=lluvias, M=datos meteo, D=caudales y/o escorrentía)

Editar los Captosres

Id Estación: C\_VillaMonte | PILCOMAYO

Villa Montes Estación Hidrométrica

Captor	Tabla	Descripción	Naturaleza	Registrador
M-Acmm	D	Aportación mm 70-2000 BH consolid macrocuenca	Q(m3/s)	
M-Ammi	D	Aportación mm 70-2000 BH intercuenca aislada	Q(m3/s)	
M-QBHc	D	Caudales 70-2000 BH consolid macrocuenca aisla	Q(m3/s)	
M-QBHi	D	Caudales 70-2000 BH intercuenca aislada	Q(m3/s)	
M-QMVR	D	Caudales medio mensual observado	Q(m3/s)	
M-Qsim	D	Caudales SIMULADOS intercuenca aislada	Q(m3/s)	
M-Qsmc	D	Caudales SIMULADOS macrocuenca total	Q(m3/s)	
M-Qsub	D	Caudales subterr SIMULADOS intercuenca aislada	Q(m3/s)	
M-Qsug	D	Caudales subterr SIMULADOS macrocuenca aislar	Q(m3/s)	
M-Qvri	D	Caudales medio mensual observado intercuenca	Q(m3/s)	

Inventario Datos del Captor | + | Propiedades

Inventario Datos de la Estación | STOP

Los captosres de la base de datos, en los módulos HIDRO y PLUVIO-METEO son:

<u>Captor:</u>	<u>Descripción</u>
M-QMVR	: Caudales medios mensuales observados (m3/s)
M-Qsim	: Caudales simulados 70-2000 para la subcuenca aislada (m3/s)
M-Qsub	: Caudales subterráneos simulados 70-2000 para la subcuenca aislada (m3/s)
M-Qsui	: Caudales subterráneos simulados 70-2000 para la intercuenca aislada "ponderada"(m3/s)
M-Qsug	: Caudales subterráneos simulados 70-2000 para la macrocuenca "ponderada"(m3/s)
M-QBHc	: Caudales del balance hídrico 70-2000 para la subcuenca aislada (m3/s)
M-QBHc (m3/s)	: Caudales del balance hídrico consolidado 70-2000 para la macrocuenca (m3/s)
M-QBHi	: Caudales del balance hídrico 70-2000 para la intercuenca aislada (m3/s)
M-Apmm	: Aportación ó lámina de escorrentía 70-2000 para la subcuenca aislada (mm)
M-Ammi	: Aportación ó lámina de escorrentía 70-2000 para la intercuenca aislada (mm)
M-Acmm	: Aportación ó lámina de escorrentía consolidado 70-2000 para la macrocuenca (mm)
M-PGbl	: Lluvias mensuales sobre la macro cuenca aislada (mm)
M-Pmsi	: Lluvias mensuales sobre la subcuenca aislada (mm)
M-Pint	: Lluvias mensuales sobre la intercuenca aislada (mm)
M-ETPs	: Evapotranspiración potencial para simulación en la subcuenca aislada (mm)
M-ETPg	: Evapotranspiración potencial en la macrocuenca aislada (mm)
M-ETR	: Evapotranspiración real simulada sobre la subcuenca aislada (mm)
M-ETRc	: Evapotranspiración real simulada sobre la macrocuenca "ponderada" (mm)
M-ETRI	: Evapotranspiración real simulada sobre la intercuenca "ponderada" (mm)