

## análisis del impacto de posibles cambios climáticos en la hidrología superficial de la cuenca del río bermejo



**PROGRAMA  
ESTRATEGICO  
DE ACCION**  
≈ PARA LA CUENCA DEL ≈  
**RIO BERMEJO**



Análisis del Impacto de Posibles Cambios Climáticos en la Hidrología Superficial de la Cuenca del Río Bermejo



Gobierno de la República Argentina  
Gobierno de la República de Bolivia  
Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija  
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
Organización de los Estados Americanos  
Fondo para el Medio Ambiente Mundial

elemento 6.1 del programa de trabajo  
Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo  
**Análisis del Impacto de Posibles Cambios Climáticos en la Hidrología Superficial de la Cuenca del Río Bermejo**  
Octubre de 1999

Instituto Nacional del Agua y el Ambiente  
Dirección de Servicios Hidrológicos  
Ing. Rafael Santiago Seoane  
Lic. María Cristina Moyano





Este documento ha sido elaborado por el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) en el marco del Elemento 6.1 del Programa de Trabajo para la Formulación del Programa Estratégico de Acción de la Cuenca del Río Bermejo (PEA). Las informaciones, elaboraciones, conclusiones y/o recomendaciones que contiene, han constituido un valioso aporte para el desarrollo del Proyecto. Los contenidos expresan la opinión del/de los autores y no reflejan necesariamente la de la Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y Río Grande de Tarija, de la Organización de los Estados Americanos, del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

Coordinación Técnica en Argentina Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo



∞	<b>Indice</b>	<b>#</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>DESARROLLO DEL TRABAJO</b>	<b>13</b>
2.1	Análisis de la información básica y estimación del campo de precipitación medio anual y de los coeficientes de escurrentía en las principales subcuencas	13
2.2	Selección de los escenarios básicos del análisis propuesto	18
2.2.1	Análisis de escenarios para la precipitación y la temperatura	18
2.2.2	Escenarios para la temperatura	19
2.2.3	Escenarios para la precipitación	21
2.2.4	Sensibilidad de los caudales ante escenarios del cambio climático	21
2.2.5	Sensibilidad del caudal al efecto combinado de las variaciones en la evapotranspiración potencial y en la precipitación	23
2.2.6	Análisis de resultados	25
2.3	Revisión de las series temporales de caudales y de precipitación	25
2.4	Aplicación de técnicas estadísticas para estudiar la posible presencia de tendencias	27
2.4.1	Análisis de la persistencia	27
2.4.2	Análisis de la homogeneidad	29
2.4.3	Análisis de la pendiente de las series	31
2.5	Análisis de los efectos del ENSO sobre las series de caudales medios	34
2.5.1	Análisis de los efectos del ENSO sobre los caudales medios anuales	34
2.5.2	Relación entre los eventos del ENSO y las anomalías de los caudales medios mensuales	36
<b>3</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>37</b>



## **1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo de este trabajo es avanzar en la estimación de los efectos del cambio climático global sobre el escurrimiento superficial en la cuenca del río Bermejo.

En este estudio se definió la información básica necesaria para la aplicación de la expresión matemática propuesta para evaluar los posibles impactos del cambio climático sobre el escurrimiento medio anual y se avanzó en el análisis de la presencia de tendencia en las series temporales con registros representativos.

El estudio incluyó la selección de distintos escenarios del cambio climático global y un análisis de la sensibilidad del escurrimiento superficial a variaciones estimadas para las series de precipitación y temperatura.

Las tareas realizadas incluyen los siguientes temas:

\* Elección del período normal y estimación del campo de precipitación medio anual en las siguientes subcuencas: Bermejo Superior, Iruya, San Francisco y Grande de Tarija.

\* Selección de los escenarios básicos de precipitación y temperatura a partir de la consulta con fuentes bibliográficas clásicas en función de la representatividad regional y de los objetivos del estudio.

\* Resultados de un análisis de sensibilidad de los caudales medios anuales a distintos escenarios del cambio climático global en las diferentes subcuencas.

\* Revisión de las series temporales de caudales y de precipitación y selección de las que dispongan de registros de extensión y confiabilidad apropiadas para realizar un estudio de tendencia de los datos observados en las distintas subcuencas.

\* Aplicación de técnicas estadísticas para estudiar la posible presencia de tendencias significativas en las series seleccionadas.

\* Análisis de los efectos del fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) sobre series de caudales medios en escalas temporales anual y mensual.



## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este informe se presentan los principales resultados obtenidos en el análisis del impacto de posibles cambios climáticos sobre el escurrimiento medio anual en la cuenca del río Bermejo y un análisis de los efectos del ENSO sobre los caudales medios en distintas escalas de tiempo.

En la primera parte se presentan los resultados de un análisis de la información básica usada en el estudio y la estimación de los coeficientes de escorrentía necesarios para la aplicación de la expresión propuesta por Wigley y Jones (1985) para evaluar la importancia de las posibles variaciones del caudal medio anual ante cambios climáticos.

En la segunda parte se incluye un análisis, con un enfoque estadístico, de la presencia de alteraciones en las series de precipitación. Se estudia las posibles alteraciones, en términos de tendencia o persistencia, que son otro importante elemento para el análisis de los impactos del cambio climático global sobre la respuesta hidrológica de una cuenca.

En la tercera parte se estudian distintos escenarios alternativos obtenidos del análisis de los resultados de cinco modelos de circulación general de la atmósfera que simulan los cambios en los campos de precipitación y temperatura para condiciones asociadas con la duplicación del dióxido de carbono.

En la cuarta parte se presenta los resultados de un análisis de sensibilidad realizado, aplicando una expresión empírica para estimar la variabilidad del caudal medio anual, para diferentes escenarios y distintas subcuencas. Se aplica una expresión clásica para analizar la variación de la evapotranspiración potencial asociada con los escenarios de incremento de la temperatura.

Finalmente, se discuten los resultados de un análisis de los efectos del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) sobre series de caudales medios en escalas temporales anual y mensual. Se estudian las diferencias entre las medias de las series de caudales anuales asociadas con la ocurrencia de El Niño y La Niña y la serie total. Se analiza el efecto que sobre la forma del hidrograma mensual tiene la presencia de las fases del ENSO.

### **2.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN BÁSICA Y ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE PRECIPITACIÓN MEDIO ANUAL Y DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA EN LAS PRINCIPALES SUBCUENCAS**

En esta etapa se ha relevado la información acerca de las series de precipitación y caudales que se presentan en las Tablas N° 1 a 4. El período considerado normal, en el marco de este trabajo y utilizado en la estimación de los coeficientes de escorrentía es el correspondiente a los años 1973-1993.

Los motivos de esta selección se fundamentaron en dos criterios. El primero consiste en utilizar la información básica recopilada de las estaciones de precipitación con la menor cantidad de datos faltantes para evitar completar las series que serán utilizadas para analizar los efectos de un posible cambio climático.

El segundo criterio consistió en seleccionar el período que fuera simultáneo para la mayor cantidad posible de estaciones. La idea de esta opción es lograr la mejor definición areal de la precipitación para un período común.

**Estaciones con series de precipitación y momentos estimados**

**TABLA N° 1.**

Subcuenca / Cuenca	Estación	$\varphi$	$\lambda$	Altitud (m)	Cantidad de datos	Media (mm)	Des. Est. (mm)
Guadalquivir-Tarija	Canasmoro	21° 21´	64° 45´	2080	21	599.5	89.5
Guadalquivir-Tarija	Aasana Tarija	21° 32´	64° 43´	1875	43	605.4	113.7
Tolomosa-Tarija	San Andrés	21° 37´	64° 49´	1950	29	1047.6	228.6
Guadalquivir-Tarija	San Jacinto	21° 36´	64° 43´	1850	31	541.0	118.2
Guadalquivir-Tarija	Chocloca	21° 44´	64° 44´	1800	24	648.8	125.8
Guadalquivir-Tarija	Calderillas	21° 45´	64° 57´	2950	25	1258.	5 286.6
Guadalquivir-Tarija	Pinos Sud	21° 43´	64° 52´	2100	28	1176.0	188.2
Bermejo	Padcaya	21° 53´	64° 43´	2010	26	645.3	114.2
Camacho-Tarija	Canchasmayu	21° 53´	64° 53´	2120	22	928.2	181.7
Bermejo	Alarache	22° 16´	64° 35´	1050	22	2292.	4 305.5
Bermejo	Guadancay	22° 21´	64° 28´	850	23	1062.	5 465.8
Bermejo	Balapuca	22° 31´	64° 26´	530	22	1642.	6 246.9
Bermejo	Aguas Blancas	22° 43´	64° 22´	405	31	1248.9	233.2
Pescado- Bermejo	Cuatro Cedros	22° 48´	64° 29´	450	31	1473.5	322.3
Tarija	Ladera Centro	-	-	-	15	387.4	91.5
Tarija	Salinas	21° 48´	64° 14´	1800	14	1312.7	336.2
Grande de Tarija	Itaú	21° 41´	63° 52´	965	13	918.2	231.6
Grande de Tarija	Astilleros	22° 22´	64° 06´	500	17	1499.1	240.3
Grande de Tarija	San Telmo	22° 35´	64° 14´	450	23	1428.1	274.3
San Francisco	Corral de Piedra	23° 59´	65° 16´	1580	22	1081.7	192.3
San Francisco	Alisos Arriba	24° 15´	65° 20´	1550	22	824.5	246.8
San Francisco	Las Capillas	24° 06´	65° 10´	1185	22	1071.2	267.2
San Francisco	Palma Sola	23° 59´	64° 17´	850	22	841.8	173.9

En la Tabla N° 2 se presenta la información de las series de precipitación correspondientes a la cuenca del río Iruya. Dado que estas series presentan registros significativamente menores que los considerados normales (por lo menos veinticinco años) y se resolvió no realizar el análisis estadístico para determinar la presencia de tendencia o persistencia.

**Momentos de las series precipitación en la cuenca del río Iruya**

**TABLA N° 2.**

Estación	Cantidad de datos originales (años)	Cantidad de datos estimados (años)	Media (mm)	Desvío estándar (mm)
Tuc Tuca	11	1	505.9	229.3
El Molino	10	2	419.5	85.8
Las Higueras	11	1	326.	5 86.0
Iruya	11	1	312.6	65.8
San José	12	0	2046.1	306.3

La Tabla N° 3 muestra los dos primeros momentos de las series de precipitación media anual que fueron estimados para el período normal y que serán utilizados para estimar los campos medios de precipitación.

**Series de precipitación seleccionadas para el período 1973-1993**

**TABLA N° 3.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Estación</b>	<b>Media (mm)</b>	<b>Desvío estándar (mm)</b>
Guadalquivir-Tarija	Canasmoro	599.5	87.4
Guadalquivir-Tarija	Aasana Tarija	605.4	113.7
Tolomosa-Tarija	San Andrés	1008.0	211.0
Guadalquivir-Tarija	San Jacinto	551.7	123.9
Guadalquivir-Tarija	Chocloca	648.8	125.8
Guadalquivir-Tarija	Calderillas	1305.3	272.4
Guadalquivir-Tarija	Pinos Sud	1194.4	202.0
Bermejo	Padcaya	645.3 1	14.2
Camacho-Tarija	Canchasmayu	955.9	156.9
Bermejo	Alarache	2292.3	305.4
Bermejo	Guadancay	1062.5	465.8
Bermejo	Balapuca	1642.6	246.9
Bermejo	Aguas Blancas	1312.8	228.4
Pescado- Bermejo	Cuatro Cedros	1594.4	281.4
Tarija Ladera	Centro	387.4	91.5
Tarija	Salinas	1363.6	273.2
Grande de Tarija	Itaú	918.2	231.6
Grande de Tarija	Astilleros	1389.3	352.8
Grande de Tarija	San Telmo	1447.6	263.9
San Francisco	Corral de Piedra	1081.7	192.3
San Francisco	Alisos Arriba	824.5	246.8
San Francisco	Las Capillas	1071.2	264.9
San Francisco	Palma Sola	841.7	173.9

En la Tabla N° 4 se presentan los primeros momentos de los caudales para las distintas secciones seleccionadas, que serán utilizados para estimar los coeficientes de escorrentía.

**Series de caudales y momentos estimados para el período 1973-1993**

**TABLA N° 4.**

<b>Subcuenca</b>	<b>Estación</b>	<b>Cantidadde datos</b>	<b>Media (m3/seg)</b>	<b>Desvío estándar (m3/seg)</b>
Grande de Tarija	San Telmo	17	140.8	45.6
Bermejo superior	Aguas Blancas	22	101.0	21.9
Iruya	San José	14	25.7	6.5
Bermejo	Pozo Sarmiento	21	421.7	113.2
San Francisco	Caimancito	14	126.5	48.1

Se presentan estimaciones de la precipitación areal para las subcuencas: Bermejo Superior, Iruya, San Francisco y Grande de Tarija (Tablas N° 5 a 8).

---

**Precipitación media areal para la subcuenca del río Bermejo Superior**

**TABLA N° 5.**

<b>Estación</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Alarache	2292.4
Balapuca	1642.6
Aguas Blancas	1312.8
Padcaya	642.8
Media areal	1472.6

---

---

**Precipitación media areal para la subcuenca del río Iruya**

**TABLA N° 6.**

<b>Estación</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Tuc Tuca	505.9
El Molino	419.5
Las Higueras	326.5
Iruya	312.6
San José	2046.1
Media areal	722.1

---

---

**Precipitación media areal para la cuenca del río San Francisco**

**TABLA N° 7.**

<b>Estación</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Corral de Piedra	1081.7
Alisos Arriba	824.5
Las Capillas	1071.2
Palma Sola	841.8
Media areal	954.8

---

---

**Precipitación media areal para la subcuenca del río Grande de Tarija**

**TABLA N° 8.**

<b>Estación</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Canasmoro	600.0
San Andrés	1008.0
San Jacinto	552.0
Calderillas	1305.0
Pinos Sud	1192.0
Chocloca	658.0
Canchasmayu	956.0
Tarija	605.0
Narváez	1155.0

---



El Salado	1388.0
Salinas	1375.0
Itaú	998.0
Astilleros	1389.3
San Telmo	1447.6
Media areal	1044.9

En la Tabla N° 9 se presentan los coeficientes de escorrentía estimados para las subcuencas seleccionadas.

**Coeficientes de escorrentía estimados en la cuenca del río Bermejo**

**TABLA N° 9.**

Río	Sección	Área (km <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)	Lámina escurrida (mm)	Coefficiente de escorrentía
San Francisco	Caimancito	25800	954.8	143.8	0.15
Grande de Tarija	San Telmo	10460	1044.9	417.9	0.40
Bermejo superior	Aguas Blancas	4850	1472.8	659.7	0.45
Iruya	San José	2120	722.1	383.7	0.53
Bermejo	Pozo Sarmiento	25000	1208.5	533.9	0.44
Bermejo	El Colorado	65736	768.0	165.0	0.21

Los resultados muestran el menor coeficiente de escorrentía para el río San Francisco estimado con los caudales observados en la sección hidrométrica de Caimancito. Este resultado se asocia con la menor disponibilidad del recurso debido al empleo del agua en establecimientos agrícolas ubicados antes de la sección de medición.

Al comparar los distintos valores de los coeficientes de escorrentía se debe tener presente que el correspondiente al río Iruya fue estimado para el período disponible de información (1982-1993) y el coeficiente para el río Bermejo en la sección "El Colorado" se obtuvo del Balance Hídrico de la República Argentina (1994).

## 2.2 SELECCIÓN DE LOS ESCENARIOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS PROPUESTO

Se presentan los principales antecedentes estudiados para definir los escenarios iniciales para las variables precipitación y temperatura. Estos escenarios serán utilizados en el análisis de sensibilidad del escurrimiento superficial medio, ante el cambio climático global, para las distintas subcuencas del río Bermejo.

Nemec y Schaake (1982) aplican un modelo determinístico complejo de humedad de suelo (National Weather Service) para estudiar la sensibilidad de sistemas hidrológicos ante variaciones climáticas. En el trabajo se analizaron los efectos de modificaciones en la precipitación y en la temperatura para las cuencas de los ríos: Pease (9034 km<sup>2</sup>) y Leaf (1949 km<sup>2</sup>) con una precipitación media de 540 y 1314 mm, respectivamente. El análisis utilizó escenarios asociados a una variación del clima representada por un intervalo de: -25 a +25 % para la precipitación y de 1° a 3° C para la temperatura.

Wigley y Jones (1985) proponen una expresión para una primera estimación de los cambios del escurrimiento medio anual cuyo coeficiente de escorrentía es conocido. La expresión fue aplicada para evaluar los efectos del cambio climático en cuencas ubicadas en distintas regiones del mundo. En el trabajo se presentan los coeficientes de escorrentía para importantes ríos y se observa la amplitud de su variación. Así, el límite inferior de los coeficientes estimados corresponde al río Murray (0.04) y los valores mayores fueron observados para los ríos Yangtze (0.50) y Brahmaputra (0.65). Se incluyen dos casos de América del Sur: el río Paraná con un coeficiente de 0.20 y el Amazonas con 0.47.

McCabe y Ayers (1989) proponen la utilización del modelo de balance de Thornthwaite para evaluar el efecto que modificaciones seleccionadas de precipitación de -20 a 20 % y temperaturas de 2° y 4° C tienen sobre la humedad del suelo y los caudales en la cuenca del río Delaware (12765 mi<sup>2</sup>). En este trabajo se estudió los efectos de cambios en la precipitación sobre los cau-

dales, la recarga del agua subterránea y la frecuencia de ocurrencia de caudales extremos.

Arnell (1992) estudia los efectos que modificaciones en las series de precipitación y temperatura tienen en la estimación de las variaciones del escurrimiento. Un resultado particularmente interesante se relaciona con la alta variabilidad entre las estimaciones del escurrimiento definidas por los distintos métodos y modelos. Los resultados muestran las posibilidades de aplicar los primeros para evaluaciones preliminares o análisis de sensibilidad y los segundos para obtener estimaciones de mayor precisión. Valdés et al. (1994) aplican un modelo analítico de balance de humedad asociado con un generador de variables hidrometeorológicas para la evaluación numérica de la variabilidad de la humedad del suelo y el escurrimiento ante distintos escenarios de variación en la temperatura y en la precipitación. Los escenarios para la precipitación son de -20 a 20 % y para la temperatura de 2° a 4° C.

Arnell (1995) indica que existen distintas formas de definir los escenarios necesarios para estudiar los efectos del cambio climático sobre las componentes del ciclo hidrológico. Una de las principales consiste en simular el sistema hidrológico con escenarios arbitrarios aplicando modelos matemáticos de distinta complejidad y resolución temporal. Este esquema permite estudiar como los cambios climáticos influyen sobre la forma de los hidrogramas e indicadores de la calidad de agua.

### 2.2.1 ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA LA PRECIPITACIÓN Y LA TEMPERATURA

En el tema del cambio climático en nuestro país se puede citar las siguientes referencias: Labraga (1997) y Labraga y López (1997). En Labraga (1997) se presentan los campos de variables meteorológicas simulados con cinco modelos de circulación general para una situación de equilibrio para el dióxido de carbono duplicado (2(CO<sub>2</sub>)).

Los modelos globales desarrollados a mediados de la década del 90 se caracterizan por ser modelos atmosféricos acoplados a modelos oceánicos completos con varios niveles en la vertical, mejorando los procesos de mezcla oceánica. En estos modelos se incrementa la concentración de CO<sub>2</sub> a una tasa del 1% anual compuesto y hacia el año 2070 se habría duplicado la concentración.

Una de las fuentes de incertidumbre en la definición de los escenarios obedece al tamaño de la malla usada por los modelos de circulación general que define los campos para las variables. Así, se estima en 110.7 km la dimensión asociada para cada grado en la latitud de la zona en estudio. La malla de los modelos se encuentra aproximadamente en 3.5 grados. Así, debe tenerse presente que los valores definen una tendencia, identificada por su signo, para las variables precipitación y temperatura.

En Labraga (1997) se discuten los resultados de simulaciones realizadas con distintos modelos de atmosféricos acoplados a un modelo oceánico simple desarrollados a comienzos de esta década. Los resultados más importantes por su utilización para el análisis de los efectos hidrológicos del cambio climático son los referidos a la precipitación media y a la temperatura en escala anual y estacional. En el análisis del campo de temperatura media en superficie se indica que existen tres regiones con calentamiento continental máximo y una de ellas se encuentra asociada con la región en estudio.

Labraga (1997) indica que: "En la región de tierras semiáridas del centro de Chile y del oeste de Argentina entre los 20° y 40° sur, la temperatura se incrementará durante el verano y el otoño en hasta 5°C". Página 392.

En la zona del estudio, el análisis de los campos de temperatura y precipitación de las primeras versiones de los modelos generales muestra las variaciones que se presentan en la Tabla N° 10. Los resultados señalan la importancia de la incertidumbre asociada con la modelación y justifican que no se realice un análisis espacial de mayor detalle.

Escenarios preliminares para el análisis del escurrimiento medio

TABLA N° 10.

Modelos de Circulación Global	Diferencia T (°C)		Diferencia P (mm / día)	
	Verano	Invierno	Anual	Verano
BRMC: Bureau of Meteorology, Research Center, Australia	+1.5	+1.5	> 0	
CCC: Canadian Climatic Center, Canadá	+4.0	+2.5	-1.5	
CSIRO9: División de Investigación Atmosférica, Australia	+4.5	+4.5	+0.5	+1.0
GFDLH: Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, EUA	+3.0	+4.0	0.0	
UKMOH: United Kingdom Meteorological Office, Inglaterra	+3.5	+4.0	+0.5	+1.0

### 2.2.2 Escenarios para la temperatura

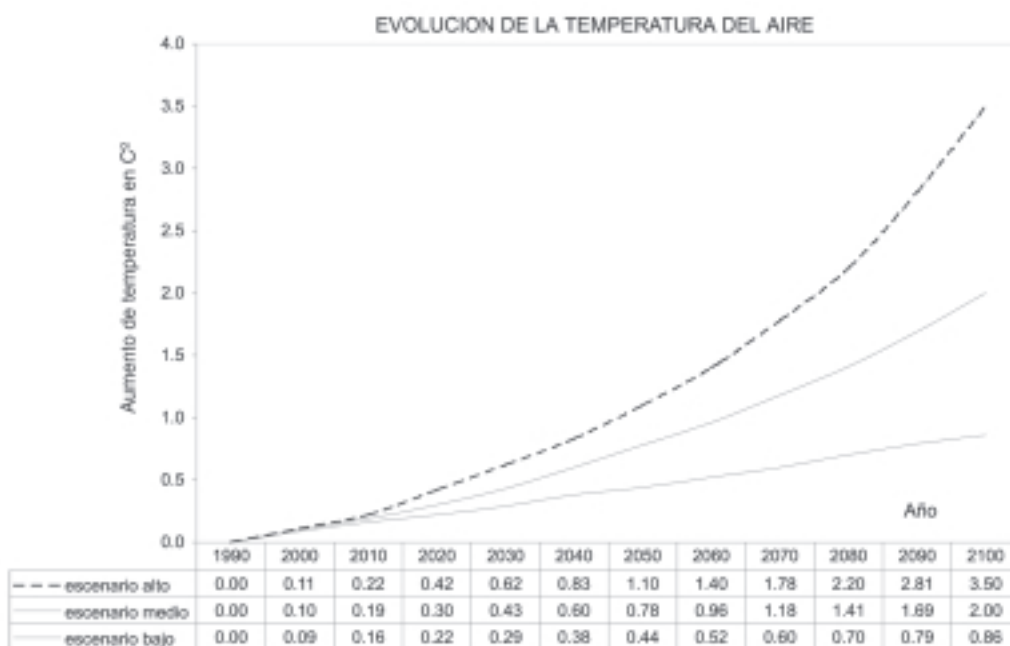
Labraga y López (1997) comparan los resultados obtenidos con los modelos anteriores, de comienzos de la década de los 90, con los estimados con modelos atmosféricos acoplados con una mejor representación matemática de los procesos oceánicos. Se utiliza un factor que define un promedio pesado de los resultados de simulaciones con modelos diferentes para CO<sub>2</sub> creciente. Se atribuye mayor peso a los resultados de modelos que mejor simulan el clima actual.

El aumento progresivo de CO<sub>2</sub> se refleja en los incrementos de la temperatura media global para diferentes horizontes. La figura N° 1 presenta un gráfico publicado por el denominado International Panel on Climate Change (IPCC, 1996). En Labraga (1998) se presentan los mapas para estimar los valores normalizados que se utilizan asociados a los escenarios definidos por el IPCC (1996). Para la zona en estudio (al norte de 25° S y 64° W) los resultados de los nuevos modelos estiman un aumento aproximado de 1.2 °C en verano y 1.3 °C en invierno por cada grado de aumento de la temperatura media global.

Los escenarios de la variación de temperatura se han definido multiplicado los aumentos previstos,

Figura N° 1, por 1.2 °C en verano y 1.3 °C en invierno. En la Tabla N° 11 se muestra la variación de la temperatura estacional en °C. En el año 2070 y para un escenario alto se tendría un aumento de temperatura en las estaciones equivalente a 2.14 °C en verano y 2.31 °C en invierno.

Figura N° 1. Escenarios del calentamiento global (IPCC, 1996)



Escenarios para el aumento de la temperatura

TABLA N° 11.

Año	Verano (+1.2 °C)			Invierno (+1.3 °C)		
	Escenario Bajo	Escenario Medio	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Medio	Escenario Alto
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	0.11	0.12	0.13	0.12	0.13	0.14
2010	0.19	0.23	0.26	0.21	0.25	0.29
2020	0.26	0.36	0.50	0.29	0.39	0.55
2030	0.35	0.52	0.74	0.38	0.56	0.81
2050	0.53	0.94	1.32	0.57	1.01	1.43
2070	0.72	1.42	2.14	0.78	1.53	2.31
2090	0.95	2.03	3.37	1.03	2.20	3.65
2100	1.03	2.40	4.20	1.12	2.60	4.55

En las Tablas N° 12 y 13 se presentan los resultados de un análisis de la variación de la evapotranspiración potencial para distintos incrementos de temperatura en las estaciones Aasana Tarija y Canasmoro. Dado que se han definido escenarios con distintos incrementos de la temperatura se ha aplicado el método de Thornthwaite (1955) para estimar la evapotranspiración potencial utilizando las temperaturas medias mensuales.

**Variación de la evapotranspiración potencial en Aasana Tarija**

**TABLA N° 12**

Mes	Evap. actual	Evap. con + 1 °C	Evap. con + 2 °C	Evap. con + 3 °C
Septiembre	56.0	58.8	62.1	66.0
Octubre	82.0	86.6	92.1	98.7
Noviembre	89.9	95.2	101.4	109.0
Diciembre	99.1	105.0	112.1	120.6
Enero	97.4	103.2	110.2	118.5
Febrero	83.2	88.1	94.0	101.0
Marzo	83.5	88.3	94.1	101.0
Abril	64.9	68.5	72.6	77.5
Mayo	46.9	49.2	51.8	54.9
Junio	34.9	36.6	38.4	40.5
Julio	35.5	37.2	39.1	41.2
Agosto	46.0	48.2	50.8	53.7
Anual	819.2	865.0	918.8	982.7
Variación (%)	-	5.6	12.2	20.0
Evap $\Delta(T)$ / Evap actual	-	1.06	1.12	1.20

**Variación de la evapotranspiración potencial en Canasmoro**

**TABLA N° 13**

Mes	Evap. actual	Evap. con + 1 °C	Evap. con + 2 °C	Evap. con + 3 °C
Septiembre	55.4	58.1	61.2	64.8
Octubre	77.8	82.0	86.8	92.5
Noviembre	84.6	89.2	94.6	101.1
Diciembre	94.1	99.3	105.6	113.0
Enero	94.1	99.4	105.7	113.2
Febrero	80.4	84.9	90.2	96.5
Marzo	81.5	85.9	91.2	97.5
Abril	62.2	65.4	69.1	73.4
Mayo	47.6	49.8	52.4	55.4
Junio	37.0	38.8	40.7	42.9
Julio	36.7	38.4	40.3	42.5
Agosto	44.0	46.0	48.	4 51.0
Anual	795.5	837.3	886.2	943.9
Variación (%)	-	5.26	11.4	18.7
Evap ( $\Delta T$ / Evap actual	-	1.05	1.1	1.119

### 2.2.3 Escenarios para la precipitación

Bajo la suposición 2(CO<sub>2</sub>, la precipitación se manifiesta con distintos escenarios a lo largo del año (por cada grado de aumento de la temperatura global). En la cuenca del Bermejo el cambio es positivo con aumentos de 0.1 mm/día en el verano al oeste de 64°W y hasta 25°S por cada grado de aumento de la temperatura media global. En invierno al oeste de 64°W la tasa de precipitación disminuye aproximadamente 0.05 mm/día por cada grado de aumento de temperatura media global. Una medida de la incertidumbre de estos resultados es el desvío estándar respecto al promedio ponderado. De acuerdo con Labraga (1998) es aproximadamente el 20% del calentamiento global.

**Escenarios para el cambio de la precipitación. Totales estacionales [mm] para diferentes horizontes**

**TABLA N° 14.**

Año	Verano		Invierno	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	1.4	2.0	-0.7	-1.0
2030	2.6	5.6	-1.3	-2.8
2050	4.0	9.9	-2.0	-5.0
2070	5.4	16.0	-2.7	-8.0

El cambio de la precipitación anual es igual a la suma, con su signo, de los cambios estacionales (verano e invierno) y bajo la hipótesis que no hay alteraciones para la primavera y el otoño.

### 2.2.4 Sensibilidad de los caudales ante escenarios del cambio climático

Una vez obtenidos los escenarios para diferentes horizontes se aplica la metodología de Wigley y Jones (1985) para evaluar el cambio en los caudales para los años 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 y 2070.

$$Q_2 = (\alpha - (1 - Cq)\beta) / Cq$$

$$Q_1$$

donde:  $\alpha$  = cambio en la precipitación =  $P_2 / P_0$   
 $\beta$  = cambio en evapotranspiración =  $E_2 / E_0$   
 $Cq$  = coeficiente de escorrentía de la cuenca =  $Q_0 / P_0$   
 $Q_2$  = caudal en el futuro estado 2  
 $Q_0$  = caudal actual.

De acuerdo a los resultados de las tablas anteriores se elaboraron estimaciones del cambio en el caudal anual con diferentes aumentos de la precipitación y los coeficientes de escorrentía de la Tabla N° 9.

De todos los factores que actúan sobre  $\beta_3 = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3$  se ha considerado, en las tablas N° 15 a 20, sólo el efecto directo del CO<sub>2</sub> incorporado en  $\beta_3$  estimado en función de la fracción "a" de cubierta vegetal,  $\beta_3 = 1 - 0.3x$ . Del parámetro a se evaluaron los valores a = [0, 0.17]. En  $\beta_1$  se debe considerar el aumento local de temperatura y en  $\beta_2$  el cambio de superficie deforestada que no fueron evaluados en esta sección considerándose  $\beta_1$  en el próximo punto del informe.

Porcentajes de cambio en el caudal anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en Aguas Blancas, río Bermejo

**TABLA N° 15.**

Año	[(Q2 - Q0) / Q0] I %		[(Q2 - Q0) / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.11	0.15	6.22	6.26
2030	0.20	0.42	6.31	6.53
2050	0.30	0.74	6.41	6.85
2070	0.41	1.21	6.52	7.32

Porcentajes de cambio en el caudal anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en San Telmo, río Grande de Tarija

**TABLA N° 16.**

Año	[[Q2 - Q0] / Q0] I %		[[Q2 - Q0] / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.17	0.24	7.67	7.74
2030	0.31	0.67	7.81	8.17
2050	0.48	1.17	7.98	8.67
2070	0.65	1.91	8.15	9.41

Porcentajes de cambio en el caudal anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en Caimancito, río San Francisco

**TABLA N° 17.**

Año	[[Q2 - Q0] / Q0] I %		[[Q2 - Q0] / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.49	0.70	28.82	29.03
2030	0.91	1.96 2	9.24	30.29
2050	1.40	3.42 2	9.73 3	1.75
2070	1.89	5.59	30.22	33.92

Porcentajes de cambio en el caudal anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en San José, río Iruya

**TABLA N° 18.**

Año	[[Q2 - Q0] / Q0] I %		[[Q2 - Q0] / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.18	0.26	4.62	4.70
2030	0.34	0.73	4.77	5.17
2050	0.52	1.28	4.96	5.71
2070	0.71	2.09	5.14	6.52

Porcentajes de cambio en el caudal medio anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en Pozo Sarmiento, río Bermejo

**TABLA N° 19.**

Año	[[Q2 - Q0] / Q0] I %		[[Q2 - Q0] / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.13	0.19	6.50	6.55
2030	0.24	0.88	6.61	7.24
2050	0.38	0.92	6.74	7.29
2070	0.51	1.50	6.87	7.87

Porcentajes de cambio en el caudal medio anual con escenarios bajos y altos y dos valores de  $\beta_3 = [I, II] = [1, 0.95]$  en Colorado, río Bermejo

TABLA N° 20.

Año	[[Q2 - Q0] / Q0] I %		[[Q2 - Q0] / Q0] II %	
	Escenario Bajo	Escenario Alto	Escenario Bajo	Escenario Alto
2010	0.43	0.62 1	9.24 1	9.43
2030	0.81	1.85 1	9.62 2	0.66
2050	1.24	3.04 2	0.05 2	1.85
2070	1.67	4.96 2	0.48 2	3.77

Se observa que predomina la influencia de valores positivos en los caudales debido a la distribución anual de la precipitación con mayor frecuencia de días (con aumentos positivos) durante el verano. La fórmula aplicada muestra mayor sensibilidad debido al cambio en el coeficiente ( efecto directo del CO<sub>2</sub>) que debido a la evolución en el tiempo de la variable precipitación causada por el cambio global.

### 2.2.5 Sensibilidad del caudal al efecto combinado de las variaciones en la evapotranspiración potencial y en la precipitación

Para cada subcuenca se estima el cambio en el caudal debido al cambio en la evapotranspiración supuesto resultante de dos factores: al aumento de temperatura del aire y al efecto directo del dióxido de carbono. En  $\beta_1$  se muestran aumentos en la evapotranspiración potencial entre el 10% (( $\beta_1=1.10$ ) y el 20% (( $\beta_1=1.20$ )). Se considera en este caso que el cambio en la precipitación anual es el proveniente de los distintos valores de la relación entre las precipitaciones futuras y actuales (( $= P_2/P_0$ )) para cada horizonte, se han utilizado los resultados de la Tabla N° 14.

Con el propósito de estudiar la variación del caudal anual con el tiempo debida al cambio de la evapotranspiración potencial y siendo  $\beta_1 = E_2/E_0$  se consideró una variación lineal del parámetro hasta alcanzar los valores [1.10, 1.15, 1.20] al final del período del análisis.

Cambio en el caudal anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección Aguas Blancas, río Bermejo

TABLA N° 21.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	3.31	1.86	0.41	3.36	1.91	0.46
2030	0.50	-2.40	-11.11	0.73	-2.17	-5.08
2050	-2.30	-6.65	-11.00	-1.86	-6.21	-10.57
2070	-5.09	-10.90	-16.70	-4.29	-10.10	-15.90

23

Cambio en el caudal anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección San Telmo, río Grande de Tarija

TABLA N° 22.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	4.10	2.32	0.54	4.18	2.40	0.61
2030	0.69	-2.88	-6.44	1.04	-2.52	6.08
2050	-2.71	-8.05	-13.40	-2.02	-7.36	-12.70
2070	-6.10	-13.23	-20.35	-4.84	-11.96	-19.09

Cambio en el caudal anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección Caimancito, río San Francisco

TABLA N° 23.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	15.36	8.63	1.91	15.57	8.84	2.11
2030	2.32	-11.13	-24.59	3.37	-10.09	-23.54
2050	-10.65	-30.83	-51.02	-8.62	-28.81	-49.00
2070	-23.61	-50.53	-77.45	-19.91	-46.83	-73.75

Cambio en el caudal anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección San José, río Iruya

TABLA N° 24.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	2.51	1.46	0.40	2.59	1.54	0.48
2030	0.56	-1.54	-3.65	0.95	-1.15	-3.26
2050	-1.36	-4.52	-7.68	-0.60	-3.76	-6.92
2070	-3.29	-7.50	-11.71	-1.90	-6.11	-10.32

Cambio en el caudal anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección Pozo Sarmiento, río Bermejo

TABLA N° 25.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	3.47	1.96	0.45	3.53	2.02	0.51
2030	0.56	-2.46	-5.48	1.20	-1.82	-4.85
2050	-2.33	-6.86	-11.40	-1.78	-6.32	-10.85
2070	-5.22	-11.26	-17.31	-4.22	-10.27	-16.31

Cambio en el caudal medio anual (%) resultante del efecto del factor  $\beta_1$  (cambio en la evapotranspiración potencial debida a la temperatura) y del factor medio  $\beta_3 = 0.95$  (CO<sub>2</sub>), para la sección El Colorado, río Bermejo

TABLA N° 26.

Año	Escenario Bajo de Precipitación			Escenario Alto de Precipitación		
	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)	$\beta_1$ (1.10)	$\beta_1$ (1.15)	$\beta_1$ (1.20)
2010	10.31	5.84	1.37	10.50	6.03	1.56
2030	1.75	7.19	-16.12	2.79	-6.15	-15.08
2050	-6.75	-20.16	-33.56	-4.96	-18.36	-31.76
2070	-15.25	-33.12	-50.99	-11.97	-29.84	-47.71



Los resultados muestran que por el efecto invernadero se estiman caudales anuales decrecientes, a partir de la mitad del período del análisis, en las subcuencas analizadas. El efecto del crecimiento del parámetro (1, asociado con el incremento de la evapotranspiración potencial con el tiempo, causa una disminución del caudal anual debido a la menor disponibilidad de agua.

El análisis de sensibilidad del caudal anual ante distintos escenarios del cambio climático mostró la importancia de sus variaciones ante modificaciones en la precipitación y la temperatura.

### 2.2.6 Análisis de resultados

El análisis de los resultados de los modelos de circulación general mostró distintos escenarios del cambio climático que se expresan en términos de variaciones de la precipitación y de la temperatura. Sin embargo, el estudio de los impactos hidrológicos implica conocer información adicional sobre la precipitación y la evaporación y las características de las superficies cubiertas con vegetación reales.

A partir de estos conceptos se estimó la evapotranspiración potencial utilizando la expresión de Thornthwaite que define la evaporación que podría ocurrir en una superficie extensa sin ninguna restricción del agua disponible, la evaporación real es menor que la potencial cuando esta cantidad de agua es insuficiente.

Según Arnell (1996) para un dado cambio de la temperatura las expresiones de Thornthwaite y Blaney-Cridle definen cambios más altos que Penman en la evapotranspiración potencial. Este resultado debe tenerse presente al analizar la evolución del cambio en la evapotranspiración potencial estimadas con los datos observados de temperaturas en Aasana Tarija y Canasmoro.

El análisis del impacto que los cambios en la precipitación y en la evapotranspiración potencial tiene sobre el caudal anual fue estimado con la expresión de Wigley y Jones (1985). Las principales hipótesis son: el porcentaje de cambio de la evapotranspiración real es igual al de la evapotranspiración potencial y los cambios en la evapotranspiración real son independientes de los de la precipitación anual.

Distintos estudios sobre cambio climático muestran que las expresiones, como Wigley y Jones, definen estimaciones del cambio que difieren significativamente de las obtenidas con modelos de balance mensual que incluyen en la representación matemática la evapotranspiración real, Arnell (1992). En consecuencia, las evaluaciones con expresiones que contienen coeficientes empíricos son una primera etapa para estudiar la sensibilidad del caudal anual y deben ser completadas con los resultados obtenidos con modelos matemáticos más complejos.

Los resultados del análisis de sensibilidad que incluyen las dos variables muestran un intervalo de variación con valores positivos actuales y un posible decrecimiento del caudal anual para las distintas cuencas. El análisis incluyó dos escenarios de la precipitación anual (bajo y alto) y tres variaciones de la evapotranspiración potencial que alcanza su mayor crecimiento hacia el fin del periodo estudiado.

## 2.3 REVISIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE CAUDALES Y DE PRECIPITACIÓN

En esta tarea se resolvió que el criterio de selección de la información utilizada fuera la cantidad de registros faltantes que se indican para cada serie de precipitación y caudales.

<b>Resumen de la información de las series de precipitación</b>					
<b>TABLA N° 27.</b>					
<b>Estación</b>	<b>Período considerado</b>	<b>Cantidad de datos (años)</b>	<b>Información faltante (meses)</b>	<b>Información faltante (años)</b>	<b>Cantidad de datos anuales estimados</b>
Canasmoro	1973 / 74				
	1993 / 94	21	14	5.60	6
Aasana Tarija	1951 / 52				
	1993 / 94	43	-	-	-
San Andrés	1965 / 66				
	1993 / 94	29	2	0.01	2
San Jacinto	1963 / 64				
	1993 / 94	31	1	0.27	1
Chocloca	1970 / 71				
	1993 / 94	24	-	-	-
Calderillas	1969 / 70				
	1993 / 94	25	-	-	-

Pino Sud	1966 / 67				
	1993 / 94	28	7	2.01	1
Padcaya	1968 / 69				
	1993 / 94	26	6	1.92	2
Canchasmayu	1970 / 71				
	1991 / 92	22	-	-	-
Alarache	1972 / 73				
	1993 / 94	22	-	-	-
Guadancay	1970 / 71				
	1993 / 94	23	18	6.52	3 consecutivos
Balapuca	1972 / 73				
	1992 / 93	22	-	-	-
Aguas Blancas	1963 / 64				
	1993 / 94	31	5	1.34	3
Cuatro Cedros	1963 / 64				
	1993 / 94	31	19	5.1	6
Ladera Centro	1979 / 80				
	1993 / 94	15	1	0.01	1
Salinas	1969 / 70				
	1993 / 94	14	13	7.7	5
Astilleros	1971 / 72				
	1993 / 94	17	17	8.3 8	(7 consecutivos)
San Telmo	1971 / 72				
	1993 / 94	23	3	1.1	3
Itaú	1973 / 74				
	1993 / 94	20	30	12.5	6
Corral de Piedra	1965 / 66				
	1993 / 94	29	-	-	-
Alisos Arriba	1965 / 66				
	1993 / 94	23	11	3.9	1
Las Capillas	1965 / 66				
	1993 / 94	29	-	-	-
Palma Sola	1965 / 66				
	1993 / 94	27	-	-	-

TABLA N° 28.

Sección hidrométrica	Período considerado	Cantidad de datos (años)	Información faltante (meses)	Información faltante (%)
Caimancito	1947 / 48 1993 / 94	44	73	13.8
San Telmo	1964 / 65 1993 / 94	28	47	13.9
Aguas Blancas	1944 / 45 1993 / 94	50	-	-
San José	1979 / 80 1993 / 94	15	7	3.9
Pozo Sarmiento	1940 / 41 1993 / 94	53	12	1.9
Puesto Romero	1956 / 57 1993 / 94	38	22	4.8
Colonia Colpana	1945 / 46 1993 / 94	28	-	-
Balapuca	1971/72 1993/94	23	-	-
El Colorado	1968/69 1993/94	26	31	9.9

## 2.4 APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA ESTUDIAR LA POSIBLE PRESENCIA DE TENDENCIAS

En este párrafo se presentan los resultados de un análisis de las series temporales realizado para conocer la existencia de una estructura de asociación lineal entre las observaciones anuales.

El análisis consistió en estimar la función de autocorrelación (fac) para las distintas series de precipitación y caudales seleccionadas y detectar persistencia.

### 2.4.1 Análisis de la persistencia

La persistencia es la tendencia de sucesivos valores de una serie para recordar valores antecedentes y estar influenciados por los mismos. (Giles y Flocas, 1984). Así, valores grandes de una variable tienden a ser seguidos por valores altos y viceversa de tal manera que se puede pensar que persisten a través de la secuencia. La mejor medida de esta persistencia es el coeficiente de autocorrelación ( $r$ ).

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2}$$

Se busca evidencia en contra de la hipótesis nula  $H_0$  que:  $r_1$  no es más grande que los valores apropiados por aleatoriedad (\*). Es decir que  $H_0$  postula: el coeficiente de autocorrelación  $r(1)$  pertenece al intervalo normal teórico  $(-r_1, +r_1)$ .

La significación de  $r_1$  se prueba con el punto correspondiente al nivel de significación del 95% a un lado la función de distribución Normal (Mitchell et al., 1966). Los valores de  $(r_1)_t$  se calculan como:

$$(r_1)_t = \frac{-1 \pm 1.645\sqrt{N-2}}{N-1}$$

Un valor negativo de  $r_1$  indica una frecuencia de oscilaciones alta (es decir período corto) en las series. Por otro lado valores positivos altos indican una persistencia del tipo lineal markoviana. Gilman (1963) ha sugerido que la persistencia tiene la propiedad  $rn = (r_1)^n$ . Por lo tanto al calcular los coeficientes de autocorrelación de retardo 2 y de retardo 3 y si estos coinciden con el cuadrado y el cubo del coeficiente de autocorrelación de retardo 1 respectivamente se puede suponer persistencia. Esto significa que valores anuales altos de un año, por ejemplo, van a ser seguidos por anuales altos el próximo año.

Para determinar la persistencia en las series de precipitación y caudal anual en las cuencas de los ríos Bermejo y Tarija se estimaron los coeficientes de autocorrelación. Se presentan los resultados con los correspondientes desvíos en el segundo renglón de las Tablas N° 29 y 30 y los valores esperados en una distribución normal. Se puede observar que cinco estaciones muestran autocorrelaciones negativas y nueve de ellas tienen autocorrelaciones positivas. Un valor negativo indica oscilaciones de períodos cortos en las series. Autocorrelaciones positivas altas con valores de la función de autocorrelación no perteneciente al intervalo  $(+r_1, -r_1)$  indican la existencia de tendencia de tipo lineal markoviana.

**Análisis de la persistencia en series de precipitación**

**TABLA N° 29.**

Estación	Cantidad de datos	r (1)	DE	r (2)	DE	r (3)	DE	+(r1)t	-(r1)t
Aasana Tarija	43	-0.089	0.147	-0.204	0.146	-0.071	0.144	0.227	-0.275
San Andrés	29	0.508	0.177	0.371	0.173	-0.071	0.170	0.270	-0.341
San Jacinto	31	0.073	0.171	0.213	0.168	0.117	0.165	0.262	-0.329
Calderillas	25	0.077	0.189	0.089	0.185	-0.060	0.181	0.287	-0.370
Astilleros	15	0.201	0.234	-0.169	0.226	-0.029	0.217	0.352	-0.495
San Telmo	23	-0.200	0.196	-0.201	0.191	0.091	0.187	0.297	-0.388
Alarache	22	0.052	0.199	-0.200	0.195	0.068	0.190	0.303	-0.398
Balapuca	22	-0.070	0.199	-0.200	0.195	0.142	0.190	0.321	-0.432
Aguas Blancas	31	-0.082	0.171	-0.087	0.168	0.139	0.165	0.262	-0.329
Cuatro Cedros	31	-0.082	0.171	-0.087	0.168	0.297	0.165	0.262	-0.329

Alguno de los valores positivos es significativo al 95% de confianza por lo tanto los valores de los coeficientes de autocorrelación para retardos 2 y 3 son menores que  $[ac(1)]^2$ . Esto es una indicación de que existe persistencia significativa y las series no se pueden considerar aleatorias en estos casos.

La información del análisis corresponde a todo el período disponible en las estaciones con mediciones de precipitación y con mediciones de caudal. El orden de las estaciones es de norte a sur.

Los resultados muestran que existe persistencia en las series de precipitación de San Andrés y en las series de caudales de Puesto Romero y Pozo Sarmiento. En la serie de caudales de Pozo Sarmiento se han identificado observaciones atípicas que podrían influir sobre la estimación de los coeficientes de autocorrelación.

**Análisis de la persistencia en series de caudales**

**TABLA N° 30.**

Estación	Cantidad de datos	r (1)	DE	r (2)	DE	r (3)	DE	+(r <sub>1</sub> ) <sub>t</sub>	-(r <sub>1</sub> ) <sub>t</sub>
Balapuca	23	-0.095	0.196	-0.205	0.191	0.270	0.187	0.297	-0.388
Colonia Colpana	28	0.297	0.179	-0.000	0.176	0.091	0.173	0.274	-0.348
Puesto Romero	22	0.626	0.199	0.303	0.195	0.194	0.190	0.303	-0.398
Caimancito	28	0.338	0.179	0.060	0.176	-0.051	0.173	0.274	-0.348
San Telmo	16	0.089	0.228	-0.177	0.225	0.222	0.212	0.344	-0.477
Aguas Blancas	50	0.239	0.137	0.009	0.136	0.177	0.135	0.212	-0.253
Pozo Sarmiento	46	0.474	0.143	0.263	0.142	0.288	0.140	0.220	-0.265

**2.4.2 Análisis de la homogeneidad**

El análisis de las series de precipitación se realizó utilizando métodos estadísticos no paramétricos debido a que la distribución de frecuencias empíricas no tiene una distribución normal.

Existen pruebas estadísticas que no son sensibles a la normalidad ni al conocimiento de los parámetros de la población de la serie y se conocen como métodos no paramétricos. La prueba de Kendall está diseñada para detectar una tendencia monótonamente creciente o decreciente en los datos y no la ocurrencia de un episodio determinado. Esta prueba es no paramétrica y se basa en la evaluación de la aleatoriedad de una secuencia  $X_i$ ; específicamente las hipótesis son:

Ho: la muestra de n variables independientes y distribuidas idénticamente al azar, sin tendencia.  
 HA: la distribución de  $X_j$  y  $X_k$  no son idénticas para todo k, j menor o igual a n con k distinto a j.  
 Sea el estadístico S:

donde:

$X_j$  y  $X_k$  son variables independientes y aleatorias

$E(S) = 0$  la media de S y la varianza de S es  $Var(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ .

S tiene una distribución normal aproximada y la variable z es normal y estandarizada con media 0 y desvío 1.

Si  $S > 0$ , igual a cero o es  $S < 0$ , la función signo vale 1 para las diferencias positivas, 0 para las diferencias nulas y -1 para las negativas

#### LA TEMPERATURA DEL AIRE

Después que se calcula el valor de z y se elige un nivel de significación (se puede probar la hipótesis nula. Para un test a dos colas la Ho se rechaza si el valor absoluto de z es mayor que  $z(\alpha/2)$ .

En la Tabla N° 31 se resumen los resultados para las series de precipitación y caudal de tres subcuencas adyacentes, la cuenca del río Bermejo Superior, el río Grande de Tarija y el río San Francisco. La decisión se toma con un nivel de confianza del 95% y se rechaza la presencia de homogeneidad en las series cuando  $z > 1.96$ .

#### Resultados de la prueba de Kendall

TABLA N°31

Estación	Variable	Cantidad de Datos	S	Desv (S)	z	Decisión
Canasmoro	P	21	6	33.1	0.1510	homogénea
Asana Tarija	P	43	37	95.6	0.3768	homogénea
San Andrés	P	29	-16	53.3	-	homogénea
San Jacinto	P	31	71	58.8	1.1897	homogénea
Chocloca	P	24	46	40.3	1.1162	homogénea
Calderillas	P	25	-2	42.8	-0.0234	homogénea
Padcaya	P	26	-45	45.4	-0.9698	homogénea
Canchasmayu	P	22	49	35.4	1.3535	homogénea
Alarache	P	22	-17	35.4	-0.4512	homogénea
Guadancay	P	20	56	30.8	1.7844	homogénea
Balapuca	P	22	-49	35.5	-1.3535	homogénea
Aguas Blancas	P	31	139	58.8	2.3455	no homogénea
Cuatro Cedros	P	31	205	58.8	3.4673	no homogénea
Itaú	P	19	37	28.6	1.2595	homogénea
Ladera Centro	P	15	-29	20.2	-1.3856	homogénea
Salinas	P	19	41	28.6	1.3994	homogénea
Astilleros	P	23	-17	37.9	-0.4226	homogénea
San Telmo	P	23	35	37.9	0.8980	homogénea
Corral de Piedras	P	33	44	64.5	0.6663	homogénea
Alisos Arriba	P	28	-108	50.6	-2.1139	no homogénea
Las Capillas	P	33	-4	64.5	-0.0465	homogénea
Palma Sola	P	32	-2	61.7	-0.0162	homogénea
Colonia Colpana	Q	28	-37	50.6	-0.7112	homogénea
Puesto Romero	Q	38	0	61.6	0.0000	homogénea
Balapuca	Q	23	2	37.9	0.0264	homogénea
Aguas Blancas	Q	50	296	119.5	2.4676	no homogénea
Pozo Sarmiento	Q	54	512	134.0	3.8123	no homogénea

Los resultados muestran que las series de precipitación de las subcuencas analizadas son homogéneas. Sólo Aguas Blancas, Cuatro Cedros y Alisos Arriba son las series de precipitación anual con un comportamiento no aleatorio (afirmación realizada con un nivel de significación del 95%). Las series de caudales anuales en Aguas Blancas y Pozo Sarmiento no son homogéneas y contienen una tendencia creciente. La hipótesis nula se rechaza en la primer estación para los niveles de significación especificados, NS=95% o superiores. La falta de homogeneidad en la serie de Pozo Sarmiento se acepta para todos los niveles.

### 2.4.3 Análisis de la pendiente de las series

Para la detección de tendencia, se ha realizado un análisis de regresión en función del tiempo como variable independiente. La pendiente de la recta de regresión ( $b_1$ ) indica el incremento anual en las precipitaciones. La significación de la pendiente se prueba determinando el valor de  $t$  con la siguiente ecuación que se distribuye con una función de densidad de Student con  $n-2$  grados de libertad:

$$t_0 = \frac{b_1}{\sqrt{MS_E / S_{xx}}}$$

donde,  $n$  es la longitud de la serie,  $MSE = S_{yx}$  y  $S_{xx}$  se definen con las siguientes expresiones:

$$S_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{reg})^2}{n}$$

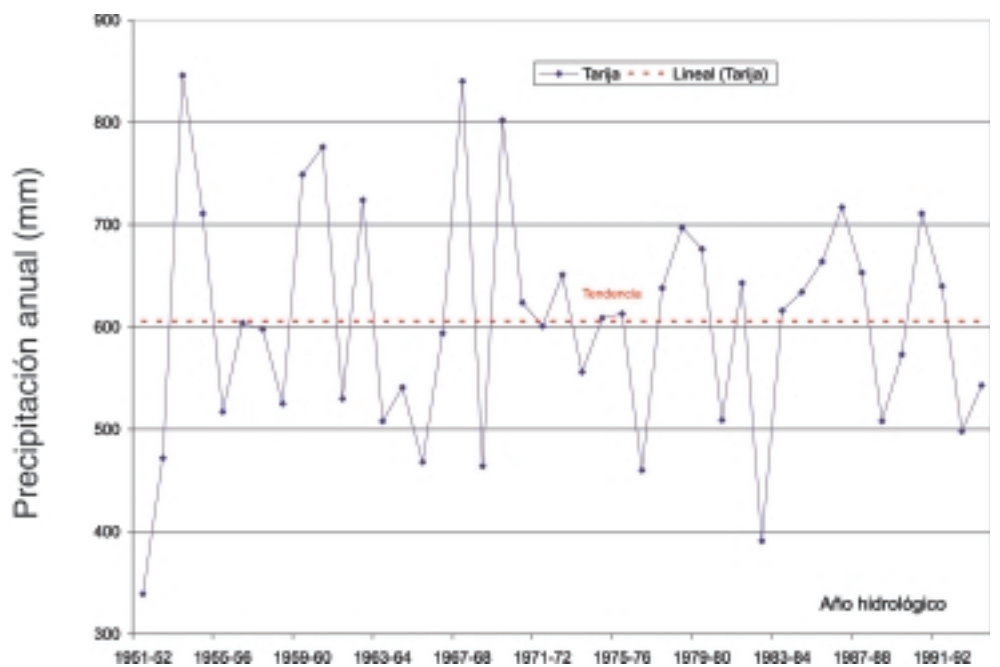
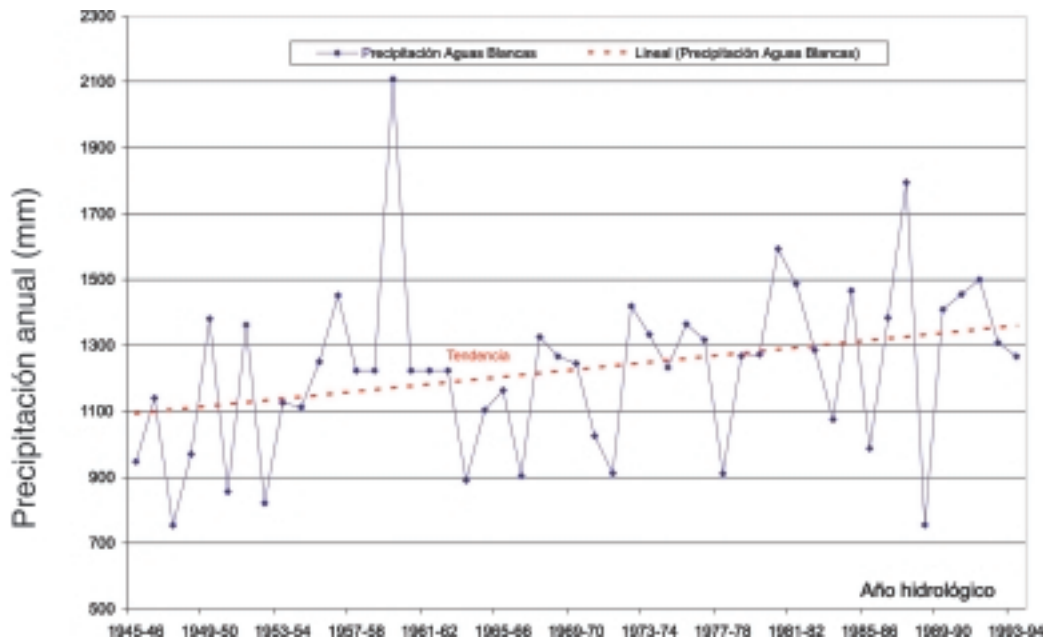
$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}$$

La hipótesis nula  $H_0$ : pendiente nula se rechaza si  $|t| > t_{a/2, n-2}$ . El valor  $a$  indica el error que se comete al rechazar la  $H_0$  si es cierta y el número de grados de libertad corresponde a  $n-2$ . En este caso  $n$  es la cantidad de años con registros.

Se ha estimado la pendiente de la ecuación que vincula las series hidrometeorológicas anuales con el tiempo. En la Tabla N° 32 se presentan para cada serie de precipitación los siguientes parámetros estadísticos:

- (a) Pendiente  $b_1$
- (b) Error de  $b_1$
- (c) Cociente (a) / (b) =  $t$  serie
- (d)  $T$  teórico =  $t_{a/2, n-2}$
- (e) Decisión significativa
- (f) Coeficiente de correlación  $R_2$  entre las series de precipitación anual y el tiempo para verificar una relación general, significativamente baja con los años.

Figura 2. Variabilidad y tendencia de series anuales de precipitación en dos estaciones pluviométricas ubicadas en las subcuencas del río Tarija y Bermejo



**Tabla N° 32. Análisis de las pendientes de las series temporales de precipitación**

Estación	Pendiente	Error	t <sub>serie</sub>	t <sub>teórico</sub>	Decisión	R <sup>2</sup>
Canasmoro	+ 0.381	3.007	+ 0.1266	0.9006	pendiente no significativa	0.00080
Aasana Tarija	- 0.265	2.944	- 0.0901	0.9291	pendiente no significativa	0.00406
San Andrés	+ 11.938	6.758	+ 1.7665	0.9257	pendiente creciente	0.13497
San Jacinto	+ 4.853	4.127	+ 1.1757	0.2535	pendiente creciente	0.06465
Chocloca	- 1.723	4.354	- 0.3958	0.6964	pendiente no significativa	0.00777
Calderillas	- 15.722	8.698	- 1.8076	0.0857	pendiente decreciente	0.14043
Pinos Sud	- 0.759	6.954	- 0.1091	0.9142	pendiente no significativa	0.00060
Padcaya	- 4.528	3.935	- 1.1508	0.2634	pendiente decreciente	0.06210
Canchasmayu	+ 1.722	5.389	+ 0.3196	0.7526	pendiente no significativa	0.00508
Alarache	- 10.685	10.24	- 1.0431	0.3093	pendiente decreciente	0.05160
Guadancay	+ 21.020	15.69	+ 1.3393	0.1955	pendiente creciente	0.08230
Balapuca	- 6.439	8.383	- 0.7682	0.4514	pendiente decreciente	0.02866
Aguas Blancas	+ 2.211	7.851	+ 0.2816	0.7811	pendiente creciente	0.00395
Cuatro Cedros	+ 11.917	9.315	+ 1.2793	0.2154	pendiente creciente	0.07564
Itaú	+ 11.364	7.560	+ 1.5030	0.1485	pendiente creciente	0.10149
Ladera Centro	- 1.867	2.540	- 0.7349	0.4709	pendiente decreciente	0.02629
Salinas	- 0.025	9.409	- 0.0027	0.9979	pendiente no significativa	0.00000
San Telmo	- 0.773	9.084	- 0.0851	0.9330	pendiente no significativa	0.00036
Corral de Piedras	- 5.005	3.057	- 1.6374	0.1117	pendiente decreciente	0.07960
Alisos Arriba	- 7.558	4.030	- 1.8753	0.0720	pendiente decreciente	0.11915
Las Capillas	- 13.585	3.797	- 3.5777	0.0012	pendiente decreciente	0.29220
Palma Sola	- 6.973	3.025	- 2.3051	0.0285	pendiente decreciente	0.15485

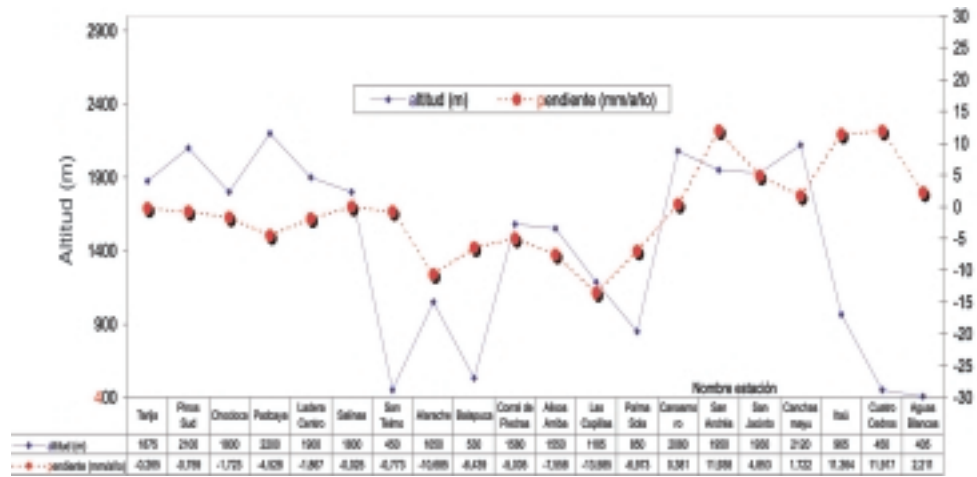
En análisis muestra que en quince series de precipitación se manifiesta la existencia de pendientes significativas. Palma Sola presenta un descenso que no es significativo para un nivel de confianza del 95%. Las tendencias en las estaciones Aasana Tarija, Canasmoro, Pinos Sud, Chocloca, Canchasmayu, Salina, San Telmo no son estadísticamente significativas. En resumen, se observa nueve series que presentan con pendientes decrecientes y seis crecientes.

En la subcuenca del río San Francisco se ha analizado el período completo hasta el año 1998 para las series seleccionadas.

En la búsqueda del significado del signo de la pendiente de la serie de precipitaciones se ha graficado la altitud de la estación y la pendiente de la serie de precipitación, Figura N° 3. Las estaciones con pendientes negativas se encuentran en la izquierda del gráfico y tienen una mejor relación con la altitud que los valores crecientes con tasas superiores a los 5 mm / año.



Figura N° 3. Relación entre pendiente de las series de precipitación y la altitud



Los resultados del análisis indican que, en general, no se observa un comportamiento espacial homogéneo. Este debería mostrar pendientes significativas y de mismo signo para las series de precipitación observadas en una subcuenca. El análisis muestra que solamente en la cuenca del río San Francisco las cuatro series observadas muestran tendencias significativas decrecientes, en el río Grande de Tarija la prueba aplicada indica que no hay tendencia y en las series de las cuencas de los ríos Bermejo y Guadalquivir se observan casos con pendientes positivas y negativas.

El análisis destinado a estudiar la relación entre las pendientes y la altitud no muestra un resultado que permita definir una asociación directa con las pendientes. En consecuencia, se considera necesario utilizar otras técnicas estadísticas para contribuir a la explicación de los cambios observados, aunque debe destacarse que varios de las series estudiadas tienen registros cortos.

## 2.5 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL ENSO SOBRE LAS SERIES DE CAUDALES MEDIOS

En este párrafo se presentan los resultados de un análisis de las series temporales realizado para estudiar la relación entre los caudales medios anuales y los fenómenos extremos del ENSO (El Niño - Oscilación del Sur).

El fenómeno del ENSO constituye una de las mayores fuente de variabilidad en la circulación atmosférica e influye sobre las principales componentes del ciclo hidrológico, responsables de la ocurrencia de eventos de crecidas y sequías.

Se trabajó con los caudales medios anuales, comparando estadísticos descriptivos de las series totales con los de las series correspondientes a los años de ocurrencia de «El Niño» y de «La Niña». Se analizó la importancia de la variación de la forma del hidrograma mensual asociada con la ocurrencia de las fases del ENSO.

### 2.5.1 Análisis de los efectos del ENSO sobre los caudales medios anuales

El análisis propuesto tiene como objetivo mostrar los efectos que las fases extremas del ENSO tienen sobre los dos primeros momentos de los caudales medios anuales. Se usa la clasificación presentada en Kiladis y Díaz (1989) para discriminar los años de ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña.

En la Tabla N° 33 se presenta las medias y sus desvíos estándar para las series completas de caudales medios anuales y las series parciales correspondientes a los años de ocurrencia de los fenómenos extremos y otros años. Los caudales medios se calcularon de acuerdo al año hidrológico.

**Momentos estimados de los caudales medios anuales (m3/seg)\***

**TABLA N° 33.**

	<b>Pozo Sarmiento</b>	<b>Aguas Blancas</b>
Serie total		
Tamaño muestra	53	50
Media	344.0	88.0
Desvío estándar	17.1	3.8
 Años El Niño		
Tamaño muestra	15	16
Media	349.9	85.7
Desvío estándar	26.0	5.11
 Años La Niña		
Tamaño muestra	9	8
Media	329.4	88.7
Desvío estándar	37.0	11.4
 Otros años		
Tamaño muestra	29	26
Media	345.5	89.3
Desvío estándar	26.3	5.5

*Los desvíos estándar de las medias fueron estimados usando bootstrap.*

**Momentos estimados de los caudales medios anuales (m3/seg)**

**TABLA N° 34.**

	<b>Pozo Sarmiento*</b>	<b>Balapuca</b>
Serie total		
Tamaño muestra	46	23
Media	339.0	82.0
Desvío estándar	17.9	3.8
 Años El Niño		
Tamaño muestra	12	9
Media	341.8	77.5
Desvío estándar	31.3	5.4
 Años La Niña		
Tamaño muestra	8	3
Media	338.5	80.1
Desvío estándar	43.0	10.8
 Otros años		
Tamaño muestra	26	11
Media	337.9	86.2
Desvío estándar	26.8	5.7

Para evaluar el significado de las diferencias observadas entre las medias de las series debe estudiarse la precisión de sus estimaciones. La medida más común de la precisión de un

estimador es su error estándar. Se calcula

$$dm = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}$$

que permite evaluar cuan distinta de cero, en unidades de error estándar, es la diferencia entre las medias de las dos series. En la Tabla N° 35 se muestran los valores correspondientes, que asignan indicadores de precisión a las diferencias entre las medias presentadas en las tablas N° 33 y 34.

**ANÁLISIS DE LAS DIFERENCIAS ENTRE MEDIAS DE LOS CAUDALES ANUALES**  
**TABLA N° 35.**

Lugar	DiferenciaMedias El Niño -ST*	Error Estándar Diferencia	dm	Diferencia Medias La Niña -ST	Error Estándar Diferencia	dm
Pozo Sarmiento	5.9	31.1	0.19	-14.6	40.8	-0.36
Pozo Sarmiento*	2.7	36.0	0.08	-0.52	46.6	-0.01
Aguas Blancas	-2.3	6.4	-0.36	0.72	12.0	0.06
Balapuca	-4.5	6.6	-0.68	-1.90	11.4	-0.16

\* Análisis con una serie reducida hasta febrero de 1988. Se observa una menor diferencia entre los valores estimados. \*\* ST: Serie total

La conclusión del análisis usando la diferencia de medias entre la serie total y las series con los eventos extremos del ENSO indica que la variabilidad media de los caudales es pequeña y de difícil detección en esta escala de tiempo. Esta podría ser la causa de los resultados que muestran efectos diferentes para dos de las series analizadas (Aguas Blancas y Pozo Sarmiento). Esta diferencia se reduce aún más al considerar la serie de Pozo Sarmiento hasta 1988.

En el análisis de caudales anuales en Aguas Blancas se observa la ocurrencia de caudales inferiores a la media durante los años en que se presentaron episodios de El Niño. En Pozo Sarmiento se observan valores menores que la media cuando ocurren episodios de La Niña. El comportamiento diferente entre las dos series se podría deber a que las cuencas generadoras de los caudales presentan distintos ambientes hidrológicos. Así, la serie observada en Pozo Sarmiento incluye los caudales en Aguas Blancas pero se incorporan caudales generados en otras cuencas con diferentes características hidrológicas.

### 2.5.2 Relación entre los eventos del ENSO y las anomalías de los caudales medios mensuales

Se presentan los resultados de un análisis de la influencia del ENSO sobre los caudales medios mensuales. Se estimaron las anomalías de los caudales como la relación entre la diferencia de la serie total y las series de caudales asociados con ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña sobre la media de la serie total.

**ANOMALÍAS DE LOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN POZO SARMIENTO**  
**TABLA N° 36.**

Mes	Media ST	Media El Niño	%	Media ST	Media La Niña	%
Septiembre	48.4	53.5	10.5	48.4	41.3	-14.7
Octubre	59.9	61.4	2.5	59.9	47.2	-21.2
Noviembre	141.0	136.7	-3.0	141.0	132.1	-6.3
Diciembre	354.0	386.0	9.0	354.0	294.3	-16.9
Enero	715.0	807.3	12.9	715.0	530.4	-25.8
Febrero	1028.0	960.7	-6.5	1028.0	998.3	-2.9
Marzo	909.0	872.7	-4.0	909.0	1135.2	24.9
Abril	478.0	481.1	6.4	478.0	402.1	-15.9
Mayo	189.0	211.5	11.9	189.0	165.2	-12.6
Junio	110.0	117.6	6.9	110.0	103.3	-6.1
Julio	77.0	81.1	4.47	7.07	2.2	-7.1
Agosto	59.6	63.6	6.75	9.6	52.8	-11.4

Con respecto a los caudales mensuales los resultados de la serie de Pozo Sarmiento muestran señales de ocurrencia de episodios cálidos (El Niño) en los meses de febrero y marzo produciendo una anomalía negativa. En cambio la ocurrencia de episodios fríos (La Niña) se manifiesta en el mes de marzo con valores por encima de la media.

**Anomalías de los caudales medios mensuales en Aguas Blancas**

**TABLA N° 37.**

<b>Mes</b>	<b>Media ST</b>	<b>Media El niño</b>	<b>%</b>	<b>Media ST</b>	<b>Media La Niña</b>	<b>%</b>
Septiembre	13.5	13.6	0.74	13.5	12.9	-4.4
Octubre	17.6	16.7	-5.1	17.6	15.0	-14.8
Noviembre	40.0	36.0	-10.0	40.0	38.8	-3.0
Diciembre	104.0	103.2	-0.8	104.0	82.5	-20.7
Enero	191.0	214.8	12.5	191.0	150.2	-21.4
Febrero	258.0	230.7	-10.6	258.0	274.9	6.6
Marzo	223.0	201.1	-9.8	223.0	308.1	38.1
Abril	112.0	107.9	-3.7	112.0	95.9	-14.4
Mayo	45.0	48.9	8.7	45.0	38.5	-14.5
Junio	27.0	27.7	2.6	27.0	24.9	-7.8
Julio	20.0	20.3	-1.0	20.0	19.5	-4.9
Agosto	16.0	15.6	-3.7	16.0	15.8	-2.5

Los resultados del análisis de la serie observada en Aguas Blancas muestran anomalías de caudales negativas en los meses de febrero a abril asociadas con la ocurrencia de episodios cálidos y anomalías positivas en febrero y marzo que se relacionan con los episodios fríos del ENSO.

**S**

### 3. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio realizado son:

1) El análisis de la cantidad de información faltante en las series de precipitación y de caudales mostró que las primeras presentan menos del 10% de datos faltantes y las segundas valores semejantes. Estos resultados son importantes dado que la información de las series de precipitación y caudales es la utilizada para la estimación de los coeficientes de escorrentía para las distintas sub-cuencas.

Para realizar un análisis estadístico de la homogeneidad, de la persistencia y de la tendencia en las distintas subcuencas analizadas se necesita contar con series de una longitud adecuada. En particular, la cuenca del río Iruya presenta series demasiado cortas (alrededor de diez años) para que los resultados del análisis estadístico puedan resultar confiables. Además, una sola de las estaciones utilizadas se encuentra ubicada en la zona de mayor precipitación.

En general, en los antecedentes consultados se utilizan series más extensas que las registradas en la región. Sin embargo, en Mirza et al. (1998) la menor cantidad de registros de precipitación utilizadas son series de veinte años que coincide con el tamaño de los registros disponibles en las estaciones con los períodos más cortos considerados en este trabajo.

En resumen, se puede afirmar que la información básica procesada es adecuada para un análisis que tiene como objetivo mostrar la sensibilidad de los caudales medios de la región a un cambio climático.

2) El análisis de las principales fuentes bibliográficas con resultados de distintos modelos de circulación general, mostró que los escenarios seleccionados deben incluir la precipitación y la temperatura. Es importante señalar que los modelos de circulación general cuyos resultados fueron analizados presentan una resolución horizontal que en general es mayor que  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ . Así, los campos que deben ser analizados para definir los escenarios tienen una resolución aproximada para una subcuenca especificada. En consecuencia, para la región los resultados deben ser considerados más como indicadores de signo que de magnitud.

Los cinco modelos considerados mostraron para la región en estudio, una tendencia al aumento de la temperatura con escasa dispersión que por ejemplo, influiría en distintos procesos biogeoquímicos que determinan la calidad del agua. Se estudió la sensibilidad de la evapotranspiración potencial al incremento de la temperatura con la expresión propuesta por Thornthwaite. Se estimaron incrementos porcentuales de la evapotranspiración potencial con la serie de temperaturas medias mensuales observadas en dos estaciones (Aasana Tarija y Canasmoro) que es del 12.2 % (aumento de  $2^{\circ} \text{C}$ , escenario alto para el año 2070 del IPCC).

La interpretación de los campos de precipitación es más compleja y por esa razón se desarrolló un análisis de sensibilidad utilizando la expresión simplificada de Wigley y Jones (1985) con variaciones negativas y positivas de esta variable.

3) Los valores de los coeficientes de escurrimiento para las distintas cuencas se encuentran en el rango de

las estimaciones presentadas por Wigley y Jones (1985) al aplicar su metodología. Dada la necesidad de conocer las variaciones del escurrimiento en las distintas subcuencas, el agrupamiento para el cálculo de los coeficientes de escurrimiento ha privilegiado las divisorias de aguas sobre las condiciones de vegetación y clima.

La expresión de Wigley y Jones (1985) muestra que la sensibilidad al cambio climático depende fuertemente del coeficiente de escurrimiento y en las cuencas con valores menores se presentan los mayores efectos. De los casos analizados la mayor sensibilidad al cambio climático se observa para la cuenca del río San Francisco. El resultado de este análisis está influido por la presencia de tomas de agua que afectan la estimación del coeficiente de escurrimiento.

4) Los resultados del análisis de sensibilidad desarrollado muestran la necesidad de avanzar en el estudio del impacto del cambio climático sobre el escurrimiento superficial en otras escalas de tiempo.

Para estudiar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos se debería aplicar modelos de balance para definir la variación de la forma de los hidrogramas mensuales medios con escenarios más precisos del cambio climático. Es necesario relacionar las series de precipitación y temperatura observadas en la región con la información obtenida de los modelos de circulación general en condiciones actuales y con valores duplicados del dióxido de carbono.

El motivo para realizar estudios en esta línea se relaciona con los incrementos de temperatura para la región. El análisis de sensibilidad del caudal medio anual mostró un intervalo de variación que también incluye la disminución del recurso agua y que podría afectar sistemas que se encuentran cerca del límite de sus posibilidades de satisfacer las demandas.

5) La importancia del análisis de los efectos del fenómeno del ENSO se debe a que constituye una de las mayores fuentes de variabilidad en la circulación atmosférica e influye sobre las principales componentes del ciclo hidrológico, que son responsables de la ocurrencia de eventos de crecidas y sequías.

Para la serie observada en Aguas Blancas los resultados del estudio a nivel mensual muestran que la ocurrencia de los episodios fríos en el océano Pacífico (La Niña) produce caudales medios mensuales ligeramente mayores que la media para el mes de marzo y los cálidos (El Niño) menores que la media. El análisis de la variación de la forma del hidrograma medio mensual muestra que las mayores diferencias entre los caudales asociados con eventos extremos del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y los valores medios se observan para los meses de verano y con la ocurrencia de los eventos fríos (La Niña).

Los resultados de este análisis pueden ser utilizados para mejorar la planificación de los usos del agua para distintos propósitos que necesiten de un conocimiento de las variaciones de la media de los caudales en escala mensual.

---

## §

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- \* Arnell, N.W. (1992). Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperature environment. *J. Hydrology* 132, 321-342.
- \* Arnell, N.W. (1996). *Global warming, river flows and water resources*. Wiley and sons.
- \* Comisión Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo. (1992). *Compendio de datos meteorológicos*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Bolivia.
- \* Efron, B. y Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall.
- \* Eltahir, E. A.B. (1996). El Niño and the natural variability in the flow of the Nile River. *Water Resources Research*. 32(1), 131-137.
- \* EVARSA (1994). *Estadística hidrológica 1994*. Tomo I.
- \* INCYTH - CONAPHI. (1994). *Balance Hídrico de la República Argentina*.
- \* George, R.K., Waylen, P. y Laporte, S. (1998). Interannual variability of annual streamflow and the Southern Oscillation in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*. 43(3), 409-424.
- \* Kiladis, G. y Díaz, H. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *Journal Climate* 2, 1069 - 1090.
- \* Labraga, J. (1997). The climate change in South America due to a doubling in the CO<sub>2</sub> concentration: intercomparison of general circulation model equilibrium experiments. *International Journal of Climatology*, vol.17, 377-398.
- \* Labraga, J. y M. López (1997). A comparison of the climate response to increased Carbon Dioxide simulated by general circulation models with mixed-layer and dynamic ocean representations in the region of South America. *International Journal of Climatology*, vol.17, 1635-1650.
- \* Labraga, J. (1998). Cambios climáticos en la Argentina. *Ciencia Hoy*, vol.8, 18-25.
- \* McCabe G.J. y M. Ayers (1989). Hydrologic effects of climate change in the Delaware river basin. *Water Resources Bulletin*, vol. 25, 6, 1231-1241.
- \* McCuen H.R. (1992). *Statistical Hydrology*. Prentice Hall. \* Mirza, M.Q., R.A. Warrick, N.J. Ericksen y G.J. Kenny. (1998). Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna river basins. *Hydrological Sciences Journal*. 43, (6), 845-858.
- \* Moyano, M.C. Seoane, R.S. (1997) El cambio climático y la respuesta de las cuencas lacustres. *Memorias de la VII Conferencia Internacional sobre Conservación y Manejo de Lagos, Argentina*.
- \* Moyano, M.C. Seoane, R.S. (1998) Influencia del cambio climático en cuencas argentinas. *Anales del XVII Congreso Nacional del Agua - II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur*, vol. 1, 215-222.
- \* Nemeç, J. y J. Schaaque (1982). Sensitivity of water resources systems to climate variation. *Hydrological Sciences Journal*. 27, (3), 327-343.
- \* Poveda, G. y Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la Hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XI, núm 1, 21-37.
- \* Subcomisión Binacional para el Aprovechamiento de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija. (1995). *Estudios de factibilidad para el aprovechamiento de los recursos hídricos de la Alta Cuenca del río Bermejo y del Grande de Tarija*. Hidroproyectos S.A. y Consas S.R.L.
- \* Valdés, J., R.S. Seoane, R. y J. North (1994). A methodology for the evaluation of global warming impact on soil moisture and runoff. *Journal of Hydrology*, 161, 389-413.
- \* Wigley, T.M.L y P.D. Jones (1985). Influences of precipitation changes and direct CO<sub>2</sub> effects on streamflow. *Nature* 314, 149-152.
- \* Westmacoat, J.R. y D. H. Burn (1997). Climate change effect on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson river basin. *Journal of Hydrology*, 202, 263-279.
- \* Nota: Los desvíos estándar de las medias fueron estimados usando bootstrap.
- \* Análisis con una serie reducida hasta febrero de 1988. Se observa una menor diferencia entre los valores estimados. \*\* ST: Serie total

### **Agradecimientos**

Al Lic. Roberto Bignone por la información climatológica suministrada de la cuenca de los ríos Tarija y Bermejo Superior.





Este libro fue editado durante los meses de abril y mayo del 2000, en la ciudad de Buenos Aires de la República Argentina.  
Se utilizaron las familias tipográficas Tarzana™ y Filosofía™ de Emigre Fonts.  
**diseño ibáñez:** Felipe Augusto Ibáñez (dirección de diseño y arte), Valeria Safatle y Luciana Rondolini (compaginación).

**fin**



Comisión Binacional para el Desarrollo de la  
Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija  
[www.cbbermejo.org.ar](http://www.cbbermejo.org.ar)

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
[www.unep.org](http://www.unep.org)

Organización de los Estados Americanos  
[www.oas.org](http://www.oas.org)

Fondo para el Medio Ambiente Mundial  
[www.gef.org](http://www.gef.org)

