



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y AMBIENTAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**CALIBRACIÓN DE DOS MODELOS DE SIMULACIÓN  
INTEGRAL DE CUENCA, PARA LA HOYA  
HIDROGRÁFICA DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN  
NIRIVILO**

**MANUEL HERIBERTO SOTO BENAVIDES**

**Memoria para optar al título de:  
INGENIERO FORESTAL**

**Profesor Guía : Roberto Pizarro Tapia**  
**Profesor Patrocinante: Medardo Aguirre González**

**TALCA - CHILE**  
**2001**

**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

El alumno Sr. MANUEL HERIBERTO SOTO BENAVIDES, ha realizado la memoria: "CALIBRACIÓN DE DOS MODELOS DE SIMULACIÓN INTEGRAL DE CUENCA, PARA LA HOYA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN NIRIVILO", como uno de los requisitos para optar al título de Ingeniero Forestal. El profesor guía es el Sr. Roberto Pizarro Tapia y el profesor patrocinante es el Sr. Medardo Aguirre González.

La Comisión de Calificación, constituida por los profesores : Roberto Pizarro Tapia y Mauricio Ponce Donoso, evaluó la memoria con nota 6,9 (en letras), seis coma nueve.



**MAURICIO PONCE DONOSO**  
**DIRECTOR ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TALCA- CHILE**

**2001**

***A mi madre Graciela,  
a mi padre Fernando,  
a mi tía Inés,  
y a Eugenia.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta Memoria ha sido apoyada por el Programa de Becas Profesor Eduardo Zapater A. de la Dirección de Investigación de la Universidad de Talca, Proyecto N° 99 – 428 – 207.

El autor agradece la colaboración y la orientación de los Profesores Roberto Pizarro Tapia y Medardo Aguirre González.

Asimismo, agradece la colaboración en la oportuna y eficaz entrega de información a la Dirección General de aguas y a la Armada de Chile, instituciones que a través de su accionar hicieron posible la realización de esta investigación.

***“Al darle peso al viento  
y fijar la medida de las aguas;  
al darle ley a la lluvia  
y camino al relámpago de los truenos,  
ya entonces la vio él y la puso de manifiesto...”***

**(Job 28:25-27)**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>vii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>viii</b>
<b>1.0 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0 OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
2.1    Objetivo general.....	4
2.2    Objetivos Específicos.....	4
<b>3.0 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
3.1    Modelos para abordar el estudio de un sistema.....	5
3.2    Modelos Matemáticos en el estudio del Ciclo Hidrológico.....	6
3.3    Modelos de Simulación Integral de Cuenca.....	7
3.4    Escala Temporal en la Modelación del Ciclo Hidrológico.....	9
3.5    Fases de la modelación matemática en hidrología.....	9
3.5.1    Calibración.....	10
3.5.2    Validación.....	11
3.6    Modelos hidrológicos en la cuenca del río Purapel.....	12
3.7    Dos Modelos de Simulación Integral de Cuenca.....	16
3.7.1    Modelo T.....	17
3.7.2    Modelo Témez.....	21
3.8    Caracterización del Lugar de Estudio.....	27
<b>4.0 METODOLOGÍA</b> .....	<b>30</b>
4.1    Actividades.....	30
4.1.1    Revisión Bibliográfica.....	30
4.1.2    Obtención de la información básica.....	30
4.1.3    Proceso de la Información.....	31
4.1.4    Modelación matemática.....	36
4.1.5    Análisis de Resultados y redacción del informe final.....	46

<b>5.0</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
5.1	Calibración.....	47
5.1.1	Resultados calibración modelo T.....	47
5.1.2	Resultados calibración modelo Témez.....	49
5.2	Validación.....	51
5.2.1	Resultados validación modelo T.....	51
5.2.2	Resultados validación modelo Témez.....	59
<b>6.0</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
6.1	Análisis de los resultados de la calibración.....	67
6.1.1	Análisis de los resultados de la calibración modelo T.....	67
6.1.2	Análisis de los resultados de la calibración modelo Témez	70
6.2	Análisis de resultados de la validación.....	77
6.2.1	Análisis de la validación del modelo T.....	77
6.2.2	Análisis de la validación del modelo Témez.....	81
6.3	Discusión de resultados.....	86
6.3.1	Ajuste de los modelos.....	86
6.3.2	Causas de la variabilidad de la aportación no explicadas.....	88
6.3.3	Comparación entre el modelo T y el modelo Témez.....	91
<b>7.0</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>8.0</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>
	<b>APÉNDICES.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>113</b>

## RESUMEN

En la presente investigación, se calibraron dos modelos de simulación integral de cuenca, a saber, Modelos T y Témez, para la hoya hidrográfica del río Purapel, estación Nirivilo, VII Región, Chile; zona que presenta un clima semiárido con 800 mm. de precipitación media, régimen exclusivamente pluvial en su escorrentía y una superficie de 259 km<sup>2</sup>.

La validación de los parámetros hallados, se efectuó sobre el tercio de la serie de datos disponible, que presentaba un total de 31 años, siendo analizada la idoneidad de las respuestas de caudal de cada modelo con respecto a datos reales según test estadísticos no paramétricos. Los modelos fueron calibrados en dos modalidades o planteamientos, donde a partir del planteamiento original, se procedió a diferenciar en la calibración valores para los parámetros en los meses húmedos y valores para los meses secos.

Los resultados muestran que en general un 74% y un 82% del nivel de aportación de la cuenca es explicado por los modelos T y Témez respectivamente.

Sin embargo, a nivel mensual, es decir, analizando el ajuste de cada mes en particular, los resultados no se consideraron satisfactorios, aunque se observa un mejor desempeño por parte del modelo Témez de 8 parámetros, donde los meses en que el ajuste se consideró adecuado son: mayo, julio, y octubre, los que en suma representan un 44% de la escorrentía anual.

Finalmente, se recomienda el modelo Témez, sólo para los meses anteriormente mencionados, como una herramienta a considerar para la evaluación del recurso hídrico en la cuenca, toda vez que al incluir los principales procesos del ciclo hidrológico en su proceso de simulación, incorpora un número de parámetros fácilmente manejable.



## SUMMARY

Two models of Rainfall-Runoff simulation of basin were gauged, for the basin of the river Purapel, Nirivilo, VII Region, Chile. They were the model T and model Téméz. This region presents a semi-arid climate with 800 mm. of half precipitation, exclusively rainy law runoff and a surface of 259 km<sup>2</sup>.

The validation of the found parameters, was made on the third of the available series of data that presented a 31 year-old total, being analyzed the suitability of the answers of flow of each pattern with regard to real data according to statistical test not parametric. The models were gauged in two modalities or positions, where starting from the original position, you proceeded to differ in the calibration values for the parameters in the humid months and value for the dry months.

The results show that in general 74% and 82% of the level of contribution of the basin are explained respectively by the model T and model Téméz.

However, at monthly level, that is to say, analyzing the adjustment of every month in particular, the results were not considered satisfactory, although one observes a better acting on the part of the model Téméz of 8 parameters, where the months in that the adjustment was considered appropriate they are: May, July, and October, those that represent 44% of the annual runoff in sum.

Finally, the model Téméz is recommended, for the previously mentioned months, like a tool to consider for the evaluation of the water resource in the basin, all time that when including the main processes of the hydrological cycle in its simulation process, it incorporates an easily governable number of parameters.

## 1.0 INTRODUCCIÓN

El problema del recurso hídrico surge de desajustes entre la oferta y la demanda de agua; tales desajustes pueden ser de tipo espacial, temporal y sectorial (UNESCO, 1986), y redundan tanto en la escasez como en la sobreoferta del recurso.

Producto de la presencia de estos desajustes, surge lo que se conoce como demanda social de regulación del recurso hídrico, la que se define como la necesidad del uso y distribución adecuada del nivel de reservas, considerando el crecimiento demográfico y la oferta natural de agua que es generalmente constante.

Entre las causas fundamentales de la escasez del agua, comúnmente se cita a la aleatoriedad del recurso en cuanto a la magnitud y al lugar donde ésta se presenta en forma de precipitación (UNESCO, 1986). Asimismo, la ocurrencia de torrenciales lluvias provoca numerosos trastornos a actividades humanas de toda clase, en el caso de no contar con sistemas que faciliten la comprensión del fenómeno, ni herramientas idóneas para desarrollar una administración adecuada de las grandes cantidades de agua incorporadas al sistema.

Frente a esta situación, en una zona como la VII Región del Maule, que es considerada una zona de alta torrencialidad, tanto en sus cauces como en la forma y distribución de la precipitación, se hace necesaria no sólo la cuantificación de los volúmenes de agua que circulan por las diversas cuencas y subcuencas mediante una red fluviométrica, sino que además, desde el punto de vista hidrológico, se hace imprescindible la comprensión de los fenómenos hídricos al interior de ésta.

En tal comprensión los modelos físicos a escala real, escala reducida o modelos matemáticos, son herramientas fundamentales para una evaluación correcta del ciclo hidrológico.

Así, diversos modelos matemáticos se han probado y aplicado en vastas regiones con el fin de proporcionar conocimientos sobre los procesos al interior de la cuenca y apoyar un manejo adecuado del recurso. Asimismo, en la Región del Maule, en trabajos de titulación de alumnos de Ingeniería Forestal, el Departamento de Gestión Forestal y Ambiental de la Universidad de Talca, con el apoyo de la Dirección General de Aguas, ha llevado a cabo, con éxito, la calibración de modelos precipitación escurrentía a nivel anual, sobre cuencas pluviales y nivopluviales de la zona. Entre tales modelos destacan el Modelo de Budyko (Schreiber y Renard, 1978 citado por Ruiz, 1996); el modelo de Turc-Pike (Turc-Pike, 1964; citado por Pizarro, 1996), y el modelo de Pizarro (Pizarro, 1996). Sin embargo, los resultados a nivel mensual de los mencionados modelos, no han sido satisfactorios.

En tales circunstancias, la presente Memoria pretende aumentar el conocimiento del ciclo hidrológico que tiene lugar en la cuenca del río Purapel en la Séptima Región mediante la calibración y validación, a nivel mensual, de dos modelos matemáticos de simulación integral de cuenca. Estos modelos al ser implementados, deberían ayudar tanto a una comprensión más acabada de los fenómenos hídricos al interior del sistema, como también, servir de base en la generación de un adecuado proceso de gestión del recurso en toda la cuenca.

Cabe mencionar la suma importancia que adquiriría un estudio de este tipo en esta hoya en particular, ya que a modo de ejemplo, desde 1978 se visualiza la construcción de un embalse de regulación en el Río Purapel (CEDEC-DOH, 1992), Estos estudios y proyectos eventualmente requerirían la utilización de modelos de simulación, no sólo en la generación de caudales instantáneos máximos y

mínimos, sino que además, modelos de simulación integral de cuenca que entreguen información sobre las principales variables hidrológicas que interactúan al interior del sistema.

## **2.0 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

“ Contribuir a un mayor conocimiento del Ciclo Hidrológico en la cuenca del río Purapel en la Séptima Región, proporcionando información básica sobre las variables de estado hidrológicas de toda la cuenca ”.

### **2.2 Objetivos específicos**

“Calibrar dos modelos de Precipitación Aportación, Modelo T (Thornwaithe y Mather, 1955) y Modelo Témez (Témez, 1977), para la cuenca del Río Purapel”.

“Validar aquellos modelos que demuestren un ajuste más acertado en el cálculo de la aportación de la cuenca del Río Purapel, estación Nirivilo”.

### 3.0 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Modelos para abordar el estudio de un sistema.

Existen diversas formas mediante las cuales se puede estudiar un Sistema. Una de ellas consiste en realizar la experimentación sobre el sistema real; en tal caso, debe ser posible alterar físicamente los componentes de éste y observar cómo se comporta bajo las nuevas condiciones. Otra forma de abordar el estudio es la realización de experimentos sobre un modelo del sistema, el cual puede ser de dos tipos: modelo físico, realizado comúnmente a escala; o por el contrario, modelo matemático o abstracto (Law y Kelton, 1991; Chow et al, 1994).

Según Kalplus, citado por Llamas (1993), un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones que caracterizan un sistema real, llamado prototipo, de tal forma que al menos un cierto número de nexos entre las solicitudes externas y las respuestas correspondientes, se han representado de forma adecuada.

Asimismo, dentro de los modelos matemáticos pueden diferenciarse por un lado, aquellos modelos cuya solución es analítica, la que se obtiene directamente con simples metodologías; y por otro, se distinguen los Modelos de Simulación, que se hacen necesarios cuando el sistema en estudio es altamente complejo.

Si un Modelo de Simulación no contiene una componente probabilística, entonces se habla de Modelos de Simulación determinísticos. En ellos las salidas o respuestas son constantes, para datos de entrada constantes (Law y Kelton, 1991).

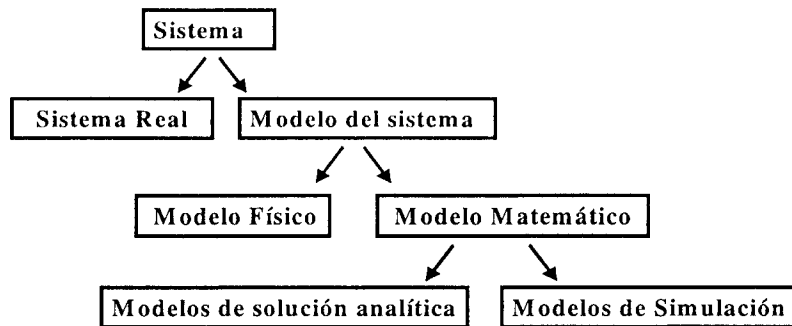


Figura N°1. Formas de abordar el estudio de un sistema (Law y Kelton, 1991).

### 3.2 Modelos Matemáticos en el estudio del Ciclo Hidrológico.

Si bien los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, siendo muy posible que nunca se llegue a su total comprensión, son susceptibles de ser presentados simplificadamente mediante la representación del ciclo hidrológico. Este ciclo puede abordarse como un conjunto de componentes conectados entre sí, entre los cuales están la precipitación, la evaporación, la escorrentía y otras fases (Chow *et al*, 1994).

En la comprensión del ciclo hidrológico, la gran mayoría de los estudios que a la fecha se han realizado, se han llevado a cabo mediante el empleo de modelos matemáticos los que, en extremo, pueden ser de dos tipos: caja negra o caja blanca (Llamas, 1993).

Entre los modelos de caja negra, los cuales desconocen los procesos al interior del sistema, empleados preferentemente para el cálculo de aportaciones anuales, existen entre otros, modelos tales como el modelo de Budyko, el cual calcula las aportaciones anuales en función de condiciones meteorológicas, precipitación y evapotranspiración potencial, (Schreiber y Renard, 1978 citado por

Ruiz, 1996); el modelo de Turc-Pike (Turc-Pike, 1964; citado por Pizarro, 1996), y el modelo de Pizarro (Pizarro, 1996).

Acercándose a una situación de caja blanca, en una situación intermedia que es llamada de caja gris, destacan los modelos de simulación, los que, en hidrología, implican el empleo de una escala temporal menor y un mayor conocimiento de los procesos al interior del sistema. Entre éstos últimos se diferencian los modelos de sucesos hidrológicos, cuya escala temporal va de minutos a horas y los modelos de simulación integral de cuenca, cuya escala temporal es mayor e involucra la simulación de la totalidad del ciclo hidrológico que ocurre al interior de la unidad hidrográfica (Estrela, 1988).

Siendo la relación entre la precipitación y la escorrentía la más estudiada y analizada por los modelos precipitación-escorrentía, la experiencia ha demostrado que entre estos dos factores difícilmente se encuentran relaciones de tipo lineal. (Ye, W. *et al*, 1997). Esto último redundaría en la necesidad de establecer otros enfoques y esquemas de cálculo, ante la realidad de que los modelos de caja negra eventualmente sólo logren modelar adecuadamente parte de la realidad.

### **3.3 Modelos de Simulación Integral de Cuenca**

Linsley *et al* (1988), destacan la importancia de los modelos de simulación como un método para la obtención de datos de flujo en cauces naturales, los que pueden someterse a análisis probabilísticos para la determinación de parámetros en diseño de obras hidráulicas, como por ejemplo, la simulación en el análisis de drenaje urbano, la generación de mapas de planicies de inundación, el diseño de embalses, etc. Asimismo, el valor que se le asigna a los modelos de simulación es que éstos son capaces de producir datos en cuencas sin estaciones de medición o el extrapolar registros cortos.



Thyer *et al* (1999), refiriéndose a modelos conceptuales de precipitación esorrentía, donde la relación precipitación-aportación es modelada por un grupo de funciones que conectan una serie de receptáculos o embalses desde y hacia donde el agua se traslada, señala que dichos modelos simulan los procesos físicos comprendidos en la fase del ciclo hidrológico que tiene lugar en la tierra.

Asimismo, la Comisión Nacional de Riego (CNR), (1978), destaca que una de las aplicaciones en las cuales los modelos de simulación intervienen, es para ofrecer la posibilidad de disponer de información hidrológica completa, mediante la generación de series de caudales en diversos puntos y en nudos que carezcan de información foronómica o que, su serie de datos sea incompleta o de escasa duración, con vistas al análisis de factibilidad de diversas obras de ingeniería, permitiendo la aplicación de modelos de operación general al interior del sistema.

En tanto, y refiriéndose a los modelos de simulación integral de cuenca, Estrela (1988), postula que la principal finalidad de estos modelos es generar series de datos de caudal o aportaciones, a partir de datos meteorológicos, entre los cuales destacan las precipitaciones y las evapotranspiraciones potenciales. Tales modelos pueden usar un reducido número de parámetros y variables de estado, en el caso de modelos agregados, o por el contrario, incorporar un significativo número de variables, dividiendo virtualmente la cuenca en zonas homogéneas y trabajando individualmente cada una de ellas; en este caso se habla de modelos distribuidos. Un ejemplo de esto último, lo constituye el modelo SIMPA (Sistema Integrado de Modelación Precipitación Aportación), el cual con apoyo de Sistemas de Información Geográfica y herramientas informáticas, simula el comportamiento hidrológico de una cuenca, parcializando a ésta en pequeñas unidades y generando resultados de aportaciones o generación de caudales, los que son agregados o contabilizados en un punto de la cuenca determinado (Ruiz *et al*, 1997).

### **3.4 Escala Temporal en la Modelación del Ciclo Hidrológico.**

Tan importante como el tipo de modelo a emplear en el estudio de un sistema hidrológico, lo es la escala temporal que éste contempla (Ruiz *et al*, 1996). Este autor constató que, tratándose de modelos hidrológicos de simulación continua, no existe diferencia significativa en los resultados entre una escala temporal diaria y una escala temporal mensual, por lo que esta última se hace más recomendable al generar resultados lo suficientemente precisos, además de considerar un menor número de entradas y cálculos. Al respecto Ye *et al* (1997), señalan que los modelos conceptuales simples son adecuados para escalas temporales mensuales, mientras que los modelos más complejos se justificarían a escalas temporales menores.

### **3.5 Fases de la modelación matemática en hidrología.**

Llamas (1993), propone 4 etapas en la modelación, y ellas son:

- a) Identificación, fase que contempla un análisis de la estructura del modelo y definición del número de variables e hipótesis;
- b) Calibración, etapa que consiste en estimar los parámetros del modelo con criterios deductivos o con ayuda de anteriores observaciones sobre las sollicitaciones y respuestas;
- c) Validación, fase en la cual, haciendo uso de sollicitaciones y respuestas diferentes a las empleadas en la anterior etapa, se compara la respuesta teórica que se obtiene del paso de una sollicitación experimental, a través de la imagen del sistema modelado, con la respuesta obtenida por observaciones directas;
- d) Límites de aplicación, que es la fase final que contempla la especificación clara de los marcos en que ha sido elaborado el modelo, información con la

cual sus usuarios potenciales conocerán el ámbito de aplicación real y los límites físicos y analíticos fuera de los cuales puede resultar arriesgado o inadecuado su uso.

De las etapas involucradas en la modelación hidrológica, tal vez las más importantes, son las que se detallan a continuación:

### **3.5.1. Calibración**

Previamente a la aplicación de los modelos matemáticos, en la gestión del recurso hídrico, y en especial los modelos de simulación integral de cuenca, éstos deben ser ajustados a las condiciones meteorológicas y fisiográficas particulares de la zona en estudio. Tal proceso de adecuación, donde uno o más parámetros que rigen las relaciones matemáticas al interior de la imagen (S), del sistema ven modificados sus valores, se conoce como calibración.

Según la CNR (1978), la calibración en modelos hidrológicos es el proceso mediante el cual los parámetros utilizados en el cálculo de las variables hidrológicas se hacen variar dentro de un rango físico posible, hasta adquirir valores tales que las respuestas del modelo sean suficientemente similares a las registradas durante un periodo particular, y según determinados criterios de prueba.

Según Llamas (1993), la calibración es la etapa en la cual se evalúan o estiman los parámetros del modelo con criterios deductivos, además de la ayuda de observaciones anteriores sobre las solicitudes y respuestas.

Según Schwar (1996), el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas reales del sistema y las respuestas simuladas por el modelo empleado. La representación matemática de esta diferencia es lo que

comúnmente se conoce como función objetivo.

Según Estrela (1988), la calibración se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato directo, siendo una etapa en la que se busca que el modelo reproduzca con la mayor fidelidad el funcionamiento del sistema observado.

Thyer et al (1999), refiriéndose a la calibración de modelos conceptuales de precipitación escorrentía, señala que el objetivo de ésta es estimar un grupo factible y único de parámetros que calculen la escorrentía de la forma más ajustada posible a la información observada.

Dependiendo de la naturaleza y complejidad del modelo a utilizar, se emplean diversos métodos en la calibración; estos métodos van desde la estimación por el método de los momentos, hasta técnicas de solución numérica. Los primeros pertenecerían a los más conocidos y utilizados, tales como la estimación por el método de mínimos cuadrados; los segundos en cambio, forman parte y como su nombre lo indica, de métodos que emplean algoritmos de cálculo que iterativamente se acercan a la solución óptima. Tal es el caso de los métodos del gradiente y de Newton.

### **3.5.2. Validación**

Según Llamas (1993), la validación es la fase de la modelación matemática donde, haciendo uso de solicitaciones y respuestas diferentes a las empleadas en la calibración, se compara la respuesta teórica, que se obtiene del paso de una solicitación experimental a través de la imagen del sistema modelado, con la respuesta obtenida por observaciones directas.

Según la CNR (1978), la validación es el proceso en que, tratándose de

modelos hidrológicos, se generan caudales mediante el modelo, durante un periodo distinto al usado en la calibración, y del cual se dispone de caudales registrados para la misma sección, para así comprobar si en definitiva el modelo es capaz de generar aportación con un nivel adecuado de confiabilidad y precisión.

### **3.6. Modelos Hidrológicos en la cuenca del río Purapel**

A escala temporal mensual, y sobre la cuenca del río Purapel, la investigación llevada a cabo por entidades de la VII Región, muestra tres estudios significativos en los cuales se calibraron modelos de simulación precipitación aportación. Cabe señalar en este punto, que no se contó con la información original de caudales registrados y simulados derivados de las investigaciones que a continuación se detallan, por lo que sólo se pudo recabar información sobre el nivel de ajuste alcanzado en base a los presentados por cada estudio. Como consecuencia de esto, los niveles de ajuste mostrados por cada modelo calibrado y validado en esas oportunidades, no pudieron ser comparados entre sí, y sólo desde un punto de vista referencial, pudieron ser comparados con los modelos calibrados en la presente investigación.

Una primera investigación fue publicada por la Comisión Nacional de Riego en 1978, y contempló la calibración de un modelo de simulación hidrológica de 10 parámetros. La aplicación del citado modelo tuvo por objetivo satisfacer la necesidad de determinar, a través de la extrapolación de sus resultados, los parámetros óptimos para un conjunto de cuencas pluviales pertenecientes a la hoya del río Mataquito. Sobre el particular es necesario aclarar que si bien la cuenca del Río Purapel pertenece a la gran cuenca del Río Maule, su relativa cercanía a la zona en estudio dentro de la región (siendo la cuenca en estudio la del Río Mataquito), además de sus características hidrológicas, hicieron aceptable para los investigadores tal procedimiento. La estadística fluviométrica empleada

abarcó los años 1957/58 a 1971/72, mientras los datos pluviométricos provinieron de una antigua estación ubicada en Constitución, de la cual los primeros siete años se emplearon en la calibración y los restantes en el proceso de validación. Sus resultados se consideraron razonablemente aceptables, dado que en términos generales, para el 40% de los meses, el error fue menor al 30%. Sin embargo a nivel anual, el comportamiento del modelo resultó ser menos satisfactorio. Los valores alcanzados por cada uno de los parámetros calibrados, se muestran en el cuadro N°1.

**Cuadro N°1. Parámetros modelo de simulación hidrológica, cuenca Purapel.**

Valor de los parámetros										Area aportante	Caudal anual promedio
Coef.	LAST mm	PMP mm	Alfa	Beta	Gama	GWL	QWT AS	RESK	EBSI	Km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
2,00	425	25	0,1	1,00	0,7	0,4	0,20	0,45	0,85	259	1,97

**Fuente : Comisión Nacional de Riego, 1978.**

Donde:

Beta: Parámetro multiplicador de los registros de precipitación utilizados, para obtener una precipitación media sobre la cuenca.

Alfa: Coeficiente de escorrentía directa.

Last: Máxima capacidad de retención de agua en la zona de raíces de los suelos de la cuenca.

PMP: Mínimo contenido de agua en la zona de raíces de los suelos de la cuenca. Corresponde a la porción de agua retenida capilarmente y que no puede ser evapotranspirada ni percolada profundamente al acuífero.

Coef: Parámetro que determina el nivel de consumo evapotranspirativo real.

Gwlev: Nivel de agua en la zona de raíces del suelo bajo el cual se produce percolación profunda.

Gwtas: Tasa mensual de percolación profunda.

Gamma: Coeficiente de escorrentía secundaria por sobre la escorrentía directa, en caso de saturación de la zona de raíces de los suelos.

Kr: Constante de recesión del acuífero de la cuenca.

Ebsi: porcentaje de flujo base del acuífero que aflora y se aporta al cauce superficial de salida de la cuenca.

Un segundo estudio, llevado a cabo por el consorcio CEDEC, bajo publicación de la Dirección de Riego en 1992, contempló la calibración del modelo denominado Modelo Matemático de Simulación de Escorrentía Pluvial, para la estimación de caudales medios mensuales desde 1942 a 1976. Tal trabajo se realizó en el estudio integral de riego de la cuenca del río Purapel, estudio enmarcado en el análisis de factibilidad de riego de las zonas costeras de la VI a la IX Regiones. La razón fundamental para la calibración del modelo radicó en la necesidad de determinar los recursos de agua existentes en la cuenca, con vistas a la proyección del embalse del río Purapel. El modelo se calibró con datos de los años 1960, 1961 y 1962. Así, el valor del coeficiente de correlación fue de un 95%. Tal valor denotó un alto nivel de precisión de la estimación de caudales a la escala temporal mensual, lo que supone un adecuado ajuste del modelo. Los parámetros calibrados del modelo se presentan en el cuadro N°2.

**Cuadro N°2. Parámetros modelo de simulación de escorrentía pluvial**

<b>Parámetros óptimos</b>	
A	1,1550
B	1,4000
FC	3,7659
ALFA	148,0128
SCC	0,6088
SMIN	0,1683
SCRIT	0,2404
HMAX	484,9595
K	12,8119
PMIN	0,1973
AREA	259,0000

Fuente: Dirección de obras hidráulicas, 1992.

Un tercer estudio sobre la cuenca, fue llevado a cabo por Arrese en 1984. En su tesis de titulación el autor efectuó la calibración de un modelo de simulación hidrológica de 10 parámetros, empleando información hidrológica correspondiente al periodo 1959 a 1971. Tal modelo, que deriva del concebido por Ferrer en 1973 (Citado por Arrese, 1984), fue implementado para realizar los cálculos a nivel diario; así, los caudales de un mes se contabilizaron mediante la suma de la escorrentía de los días del periodo. La razón del uso de una escala temporal diaria radicó fundamentalmente en que las precipitaciones, que constituían la entrada de agua al sistema, fueron simuladas mediante un método estocástico, el cual efectúa las estimaciones de la precipitación a esa escala temporal.

Los resultados del mencionado estudio se consideraron satisfactorios, dada la apreciación de una diferencia máxima de sólo un 35% entre los caudales anuales simulados e históricos (registrada para el año 1968), alcanzando en general tales diferencias sólo magnitudes del orden del 10% en los restantes años. Asimismo, el coeficiente de determinación obtenido fue de 0,95.

En el cuadro N°3, se muestran los parámetros encontrados en el proceso de calibración del estudio.

**Cuadro N°3. Parámetros modelo de simulación hidrológica, cuenca río Purapel.**

<b>Parámetros óptimos</b>	
A	0,700
B	0,700
Hmax	160,000
PORC	29%
Cmax	0,850
Cmin	0,020
K	0,005
Plim	22,000
D	65,000
N	1,140

Fuente: Arrese, 1984.



Donde:

A: Factor que multiplica el índice de precipitación para hacerlo representativo de las condiciones medias de la cuenca.

B: Factor que multiplica el índice de evaporación para determinar la ETP de la cuenca.

Cmax: Coeficiente de escorrentía máximo de la cuenca.

Cmin: Coeficiente de escorrentía mínimo de la cuenca.

Plim: Precipitación límite, sobre la cual hay aporte directo al embalse subterráneo.

D: porcentaje de lluvia sobre Plim que se incorpora directamente al acuífero.

Hmax: Capacidad de retención máxima de agua sobre los primeros estratos del suelo.

Porc: Porcentaje de Hmax bajo el cual la ET es restringida.

n: Exponente que permite una relación no lineal entre la humedad del suelo y el coeficiente de escorrentía. Ello logra disminuir la escorrentía en los periodos secos.

K: Coeficiente de embalse o de proporcionalidad entre la escorrentía subterránea y el volumen de dicho embalse.

### **3.7. Dos modelos de simulación integral de cuenca**

A continuación se presentan las bases teóricas y el desarrollo de dos modelos de simulación integral de cuenca que, al contemplar una escasa o nula variabilidad espacial de sus parámetros y variables de estado, forman parte de los modelos cuya tendencia es a usar un reducido número de parámetros (modelos agregados), (Estrela, 1988).

### 3.7.1. Modelo T

El modelo T fue propuesto originalmente en 1955 (Thornwaithe *et al*, 1955; citado por Carmona *et al*, 1990), y entre otros, ha sido utilizado con éxito en la cuenca aforada del Río Guadalquivir, provincia de Córdoba, España.

En tal estudio fue comparado junto a otros modelos de simulación precipitación escurrentía, tales como el modelo ABCD, el modelo ABC, el modelo MS1, el modelo MS2 y el método del Coeficiente de Ajuste; encontrándose que junto al modelo ABCD resultó ser uno de los modelos de mejor comportamiento, a la vez que necesita un menor número de parámetros en su ajuste. Asimismo, Carmona *et al*, señalan que el Modelo T, luego del análisis estadístico, presentó un buen ajuste mensual, rechazándose la hipótesis nula de igualdad entre aportaciones reales y simuladas sólo para tres meses, los que en suma no representan mayor significación al ser principalmente meses de estiaje en el hemisferio norte, a saber, Junio, Julio y Octubre, con una escurrentía menor al 7% del total anual.

Este modelo asume que el suelo de la cuenca cuenta con una capacidad de almacenamiento de humedad ( $\Phi$ ). El almacenamiento al final de cada período, en este caso un mes, se expresa por ( $S_i$ ) donde  $i$  corresponde a la notación del período en cuestión. Dada una precipitación ( $P_i$ ) durante el mes  $i$ , y una Evapotranspiración Potencial ( $ETP_i$ ) el almacenamiento de humedad al final del mes viene dado por:

$$S_i = \begin{cases} \min(P_i - ETP_i + S_{i-1}; \Phi) & , \quad \text{si } P_i \geq ETP_i \\ S_{i-1} e^{-(ETP_i + P_i)\Phi} & , \quad \text{si } P_i < ETP_i \end{cases}$$

Según el modelo, se producirá escurrentía ( $Q_i$ ) cuando la humedad total existente en el suelo exceda su capacidad de almacenamiento, siendo este excedente denominado ( $T$ ).

Matemáticamente la suma de los excesos de agua se expresa por:

$$T_i = \begin{cases} (P_i - ETP_i) + S_{i-1} - \Phi & , \text{ si } (S_i) = \Phi \\ 0 & , \text{ en cualquier otro caso } (S_i < \Phi) \end{cases}$$

Sólo parte de estos excesos de humedad pasan a constituir escorrentía durante el periodo presente. Dicho excedente es entonces modelado por un parámetro ( $\lambda$ ), el cual expresa la proporción de agua que permanece en la cuenca para formar parte de aportaciones futuras. Su valor depende entre otros aspectos del tamaño y la fisiografía de la cuenca, y de la textura y profundidad del suelo. Así, la escorrentía para el período es:

$$Q_i = (1 - \lambda)(H_{i-1} + T_i)$$

y la humedad excedente al final del mes es:

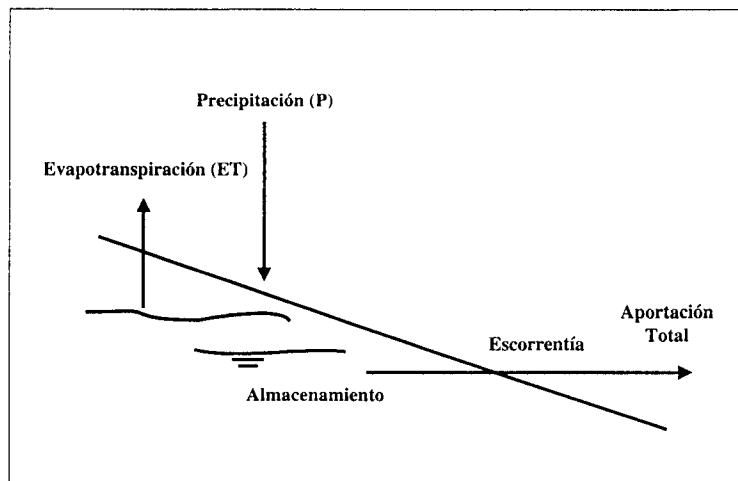
$$H_i = \lambda (H_{i-1} + T_i)$$

El modelo así planteado contempla el ajuste de dos parámetros,  $\lambda$  y  $\Phi$ .

Donde:

$\lambda$  : Corresponde a la fracción remanente de humedad excedente que permanece en la cuenca al final del periodo considerado, generalmente de un mes. Este parámetro depende entre otras características, de la profundidad del suelo, y el tamaño y fisiografía de la cuenca, siendo empleado según Carmona *et al*, un valor de 0,5 para pequeñas cuencas y 0,75 para hoyas de mayor magnitud.

$\Phi$  : Corresponde a la capacidad máxima de almacenamiento de humedad que posee el suelo, variando necesariamente según la profundidad de éste y su composición.



Fuente : Elaboración propia a partir del modelo matemático.

**Figura N°2. Representación simplificada del ciclo hidrológico, modelo T.**

Los datos meteorológicos de entrada, o solicitudes al sistema, para el funcionamiento del modelo son:

$P_i$  : Precipitación total durante el periodo  $i$ . Corresponde a la cantidad areal media de agua caída para toda la zona en estudio (cuenca), expresada en mm; su cálculo puede efectuarse en base a numerosos procedimientos, cada uno bajo sus correspondientes supuestos, siendo uno de los más recomendados el empleado en la presente investigación (método de los polígonos de Thiessen).

$ETP_i$  : Corresponde a la evapotranspiración potencial ocurrida durante el mes  $i$ . Se define como la evaporación de agua desde la superficie terrestre y la transpiración de la vegetación, cuando el suministro de agua es ilimitado (Chow *et al*, 1994). Existen numerosos métodos para su obtención, desde la medición directa en tanques evaporimétricos, hasta el cálculo de su valor mediante metodologías que incorporan el balance de energía, el factor aerodinámico y una combinación de ambos. A su vez, Llamas (1993), distingue entre las metodologías destinadas al cálculo de la evapotranspiración potencial, los métodos directos,

basados en medidas tomadas *in situ*; los métodos analíticos, basados en el balance energético o el balance hídrico; y los métodos empíricos, basados en el análisis estadístico de las observaciones.

Las principales variables de estado durante o al final de cada mes en la simulación son:

$S_i$  : Almacenamiento de humedad al final del mes  $i$ ; esta humedad aumenta o disminuye dependiendo de las condiciones meteorológicas registradas durante el periodo. Si la precipitación es tal que supera a la evapotranspiración potencial, aumentan las reservas de humedad; sin embargo, si la precipitación es menor que la ETP, el nivel de reservas expresado en esta variable de estado  $S_i$ , disminuirá.

$D_i$  : Déficit de humedad durante el periodo  $i$ . Depende de la máxima capacidad de humedad por parte del suelo y de la humedad del periodo. Su cálculo no es decisivo para el modelo, pero tiene la capacidad de evidenciar la cantidad de precipitación necesaria para producir un aumento en el nivel de escorrentía para el periodo siguiente. En otras palabras, se puede decir que actúa como una variable de estado similar al conocido umbral de escorrentía, el cual es el valor mínimo de precipitación acumulada, durante un periodo determinado, para generar cierto tipo de aportación.

$Q$  : Suma de los excesos de agua. Su valor corresponde al agua precipitada que no va a formar parte de la humedad del suelo, por estar éste completamente saturado habiendo ya alcanzado el máximo valor,  $\Phi$ . En suma, el valor de  $Q$  depende de la cantidad de precipitación del periodo, la humedad almacenada en el periodo precedente y la capacidad máxima de humedad del suelo.

$Q_i$  : Es la humedad excedente al final del mes  $i$ ; corresponde al exceso de agua almacenado durante el período, descontada la escorrentía que se calcula para el mes en cuestión.

$R_i$  : Corresponde a la variable de estado que expresa las salidas o respuestas a las solicitaciones del sistema, esto es, la escorrentía durante el periodo en cuestión. Ésta sólo depende del parámetro  $\lambda$ , la humedad excedente al final del mes anterior, y la suma de los excesos de agua, por lo que no se divide en escorrentía directa y escorrentía subterránea, sino que por el contrario, constituye en sí misma la aportación total.

### **3.7.2 Modelo Témez**

Este modelo, creado por el autor del mismo nombre en 1977 (Estrela, 1988), ha sido implementado con éxito en la vertiente peruana del lago Titicaca, cuya precipitación media oscila en los 850 mm, con una evapotranspiración potencial anual de 800 mm.

Además, el Modelo Témez ha sido incorporado en el sistema SIMPA, (Sistema integrado modelación precipitación-aportación), para el trabajo con cálculos a nivel mensual. Tal sistema aprovecha las ventajas de la implementación computacional de un sistema de información geográfica del tipo "Raster", que mediante rutinas de programación lleva a cabo el cálculo de las variables de estado del modelo y de las aportaciones mensuales, dados de entrada de evapotranspiraciones potenciales y precipitaciones mensuales.

El modelo Témez, supone dividido el perfil del suelo en dos zonas. La superior contiene en sus poros agua y aire, lo que le da un carácter de insaturada. La zona inferior, por el contrario, se halla completamente saturada de agua y su comportamiento se asemeja a un embalse subterráneo que desagua en la red

superficial de drenaje, constituyéndose esta escorrentía en caudal subterráneo o indirecto.

El agua precipitada (**P**), una vez en el suelo, se divide en evapotranspiración (**ET**) y excedente (**T**). El excedente a su vez alimenta la escorrentía superficial (**E**), y la fracción remanente pasa a formar parte de las reservas dentro del acuífero subterráneo, mediante la infiltración (**I**).

El cálculo del excedente se efectúa según la siguiente ley de excedentes:

$$T_i = \begin{cases} 0 & , \text{ si } P_i \leq P_0 \\ (P_i - P_0)^2 / (P_i - \delta_i - 2P_0) & , \text{ si } P_i > P_0 \end{cases}$$

donde:

$$\delta = H_{max} - S_{i-1} + ETP_i$$

$$P_0 = C \cdot (H_{max} - S_{i-1})$$

La humedad en el suelo al final del mes *i* es,

$$S_i = \max \{0; -S_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i\}$$

con una evapotranspiración real igual a:

$$ET_i = \min \{S_{i-1} + P_i - T_i; ETP_i\}$$

Por otra parte, la ley de infiltración al acuífero en función del excedente (**T**) y del parámetro de máxima infiltración (**I<sub>max</sub>**) es,

$$I_i = I_{max} * T_i / (T_i + I_{max})$$

Esta infiltración se convierte en recarga (**R**) al acuífero, mientras la otra parte del excedente va íntegramente a formar parte de la escorrentía superficial o

directa, durante el período en cuestión.

$$E_i = T_i - I_i$$

Las ecuaciones que modelan el comportamiento del acuífero se expresan como :

$$V_i = V_{i-1} + R_i$$

$$Q_i = \alpha \cdot D_i \cdot V_i$$

donde :

**D<sub>i</sub>** : Días del mes i.

Así, el volumen de agua almacenado en el acuífero al final del período es:

$$V_{i-1} = V_i - Q_i$$

Finalmente, la aportación total para el mes se calcula como la suma de la escorrentía superficial y la aportación subterránea.

El modelo así planteado contempla el ajuste de cuatro parámetros, los cuales se detallan a continuación.

**H<sub>max</sub>** : Corresponde a la capacidad máxima de humedad de la capa superior del suelo, y su valor, entre otros aspectos, depende de las características del material parental del suelo, la profundidad y la composición del mismo.

**C** : Parámetro propio del modelo que regula cuánto será el umbral de escorrentía una vez calculado el déficit de humedad correspondiente al periodo en curso.

**Imáx** : Corresponde a la capacidad máxima de infiltración del suelo, dependiendo su valor fundamentalmente de la capacidad de percolación del agua hacia capas más internas de éste, donde quedaría disponible para formar parte



del acuífero subterráneo.

$\alpha$  : Es el coeficiente de la rama de descarga, a nivel instantáneo, mediante la función exponencial de la curva de descarga; determina el caudal circulante por la zona de control. A nivel mensual participa en el cálculo de la aportación subterránea del acuífero, para el periodo en curso.

Por su parte, las solicitudes al sistema o datos de entrada se componen de la misma forma que para el Modelo T, esto es, son los datos meteorológicos de precipitación areal media y evapotranspiración potencial.

Por otro lado, en el modelo Témez, las variables de estado que destacan por su importancia son:

$T_i$  : Excedente del agua precipitada que no pasa a alimentar la capa superficial del suelo, que es donde se almacena la humedad para alimentar la evapotranspiración, sino que queda disponible para el escurrimiento superficial y la infiltración hacia el acuífero.

$H_i$  : Humedad en el suelo en el instante  $i$ . Corresponde a las reservas superficiales de donde se produce la evapotranspiración, dependiendo su magnitud de la humedad precedente, la precipitación del periodo, el excedente y la evapotranspiración potencial.

$ET_i$  : Corresponde a la evapotranspiración real del periodo. Tiene como máximo valor la  $ETP_i$  y depende de la humedad precedente, la precipitación y el excedente.

$I_i$  : Es la infiltración calculada para el mes en curso; está determinada por el excedente y la capacidad máxima de infiltración. Su máximo valor

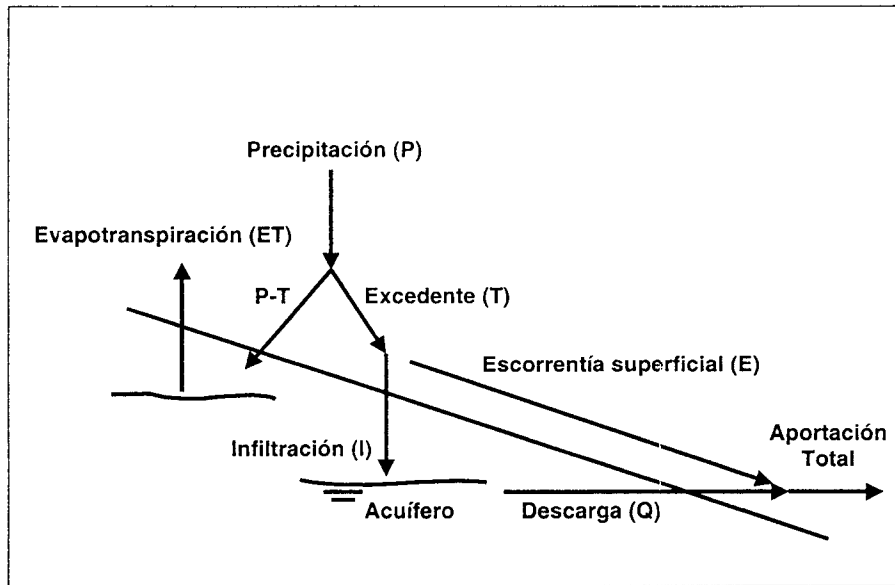
correspondería al excedente del período; esto último sólo si se verifica una gran capacidad  $I_{\max}$ . Cuando la infiltración se incorpora al acuífero, lo hace en forma de recarga, la cual se expresa por  $R_i$ .

$V_i$  : Expresa el volumen de agua almacenada en el acuífero; su valor dependerá del equilibrio mantenido entre la recarga al acuífero y el caudal subterráneo evacuado.

En último término, Las variables de estado que expresan las salidas o respuestas a las solicitaciones del sistema son:

$Q_i$  : Caudal de descarga subterránea para el periodo  $i$ . La relación que presenta con el volumen de agua almacenado en el acuífero, está modelada por el coeficiente de la rama de descarga y el número de días del periodo.

$E_i$  : corresponde a la aportación superficial o escorrentía directa; es la parte del excedente que no infiltra a su llegada al suelo, sino que escurre durante el mismo periodo y junto al caudal de descarga subterránea, forma la aportación total para el mes  $i$ .



Fuente: Estrela, 1988.

Figura N° 3. Representación simplificada del ciclo hidrológico, modelo Témez. (Estrela T, 1988).

### 3.8. Caracterización del Lugar de Estudio

La cuenca del Río Purapel se ubica en el secano interior de la Cordillera de la Costa de la VII Región del Maule, Chile. Forma parte de la hoya hidrográfica del Río Maule y cuenta con un área de tributación hasta la estación de aforos en Nirivilo de 259 km<sup>2</sup>. Su cota máxima es de 540 m.s.n.m y su cota mínima, en el punto de salida, es de 96 m.s.n.m. La orientación de su cauce principal va de oeste al sur-oriente, con una longitud de alrededor de 25 Km.

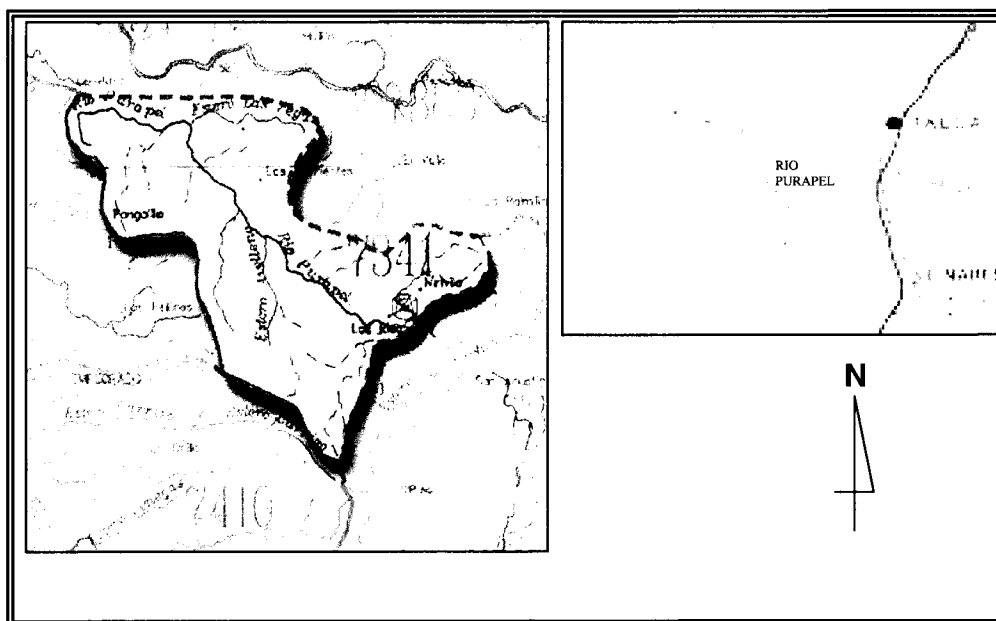
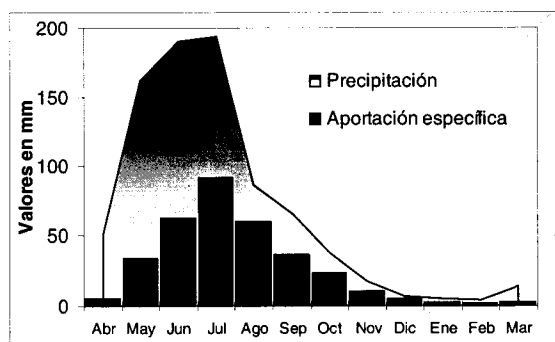


Figura Nº4. Croquis cuenca del Río Purapel y su ubicación en la VII Región, Chile.

Las precipitaciones normales para la zona se estiman en 830 mm, presentando una primavera relativamente cálida y seca. La aportación anual media oscila en los 310 mm/año o 8.029 hectómetros cúbicos.

La Figura Nº5, muestra el régimen de precipitaciones y aportaciones específicas para la zona. En ella se observa cómo las precipitaciones y la escorrentía se dan principalmente en el periodo invernal, teniendo su máximo en el mes de Julio, para luego disminuir ostensiblemente en los meses de verano.

Asimismo es posible apreciar claramente el carácter estrictamente pluvial de la escorrentía, el que es poco habitual en cuencas aforadas en la región, lo que la constituye en una zona que con justa razón puede ser denominada un laboratorio natural para estudios hidrológicos.



**Figura N°5. Contraste entre precipitaciones y aportaciones a nivel medio, cuenca Río Purapel, Estación Nirivilo.**

Las rocas fundamentales del suelo de la zona corresponden exclusivamente a granitos de la edad Paleozoica, las que constituyen el batolito costero. Éstas se hallan meteorizadas hasta una profundidad de más o menos 5 metros. A nivel de los suelos que componen el piso del valle del río Purapel, los suelos están constituidos por residuos de la erosión de los lomajes de la hoya y están compuestos de arena media a fina.

Los suelos de la zona pertenecen a las series Reguegua, Las Garzas, Purapel, San Lorenzo, Huapi, Vaquería, Cauquenes, Quella y Quipato; y los cultivos de la zona, realizados en los terrenos más planos de la cuenca, son los característicos de la agricultura de secano de invierno-primavera, esto es: trigo, avena, centeno, arveja, lentejas, garbanzos, etc. Además, estos suelos presentan gran aptitud para el cultivo de frutales de hoja caduca, vides y una amplia gama de cultivos anuales (CEDEC-DOH, 1992). La cuenca presenta también vastos terrenos con bosques de Pino Insigne, actualmente en explotación.

Asimismo, desde 1978, durante el estudio Integral de Riego de la Cuenca del Río Maule, llevado a cabo por el Consorcio de profesionales consultores Ltda. (CEDEC), por petición de la Comisión Nacional de Riego, se visualiza la construcción de un embalse de regulación en el Río Purapel (CEDEC-DOH, 1992), lo que determinó la elaboración del proyecto preliminar en 1992.

## **4.0 METODOLOGÍA**

### **4.1 Actividades**

#### **4.1.1 Revisión Bibliográfica**

Se realizó la revisión bibliográfica buscando proporcionar la mayor cantidad posible de información existente sobre la modelación matemática en el estudio del ciclo hidrológico, en particular, los modelos de simulación integral de cuenca, haciendo hincapié en sus bases conceptuales, su expresión de cálculo, la calibración, la validación y la utilización práctica que éstos presentaban a la fecha. Tal revisión contempló aspectos como modelos para abordar el estudio de un sistema, modelos matemáticos en el estudio del ciclo hidrológico, calibración, validación, modelos de simulación integral de cuenca, escala temporal en la modelación del ciclo hidrológico, fases de la modelación en hidrología, modelos hidrológicos en la cuenca del río Purapel, y la descripción de dos modelos de simulación integral de cuenca.

#### **4.1.2 Obtención de la información básica.**

Ante la necesidad de contar con información básica previa a las fases de calibración y validación, se recopiló la información disponible en cuanto a:

Cartas IGM escala 1 : 50.000 correspondientes a Constitución, Pichamán, Empedrado y Sauzal.

Temperaturas medias mensuales para la estación de Pencahue. Ya que se requería de registros de temperatura lo más representativos de la zona en estudio, se intentó contar con datos pertenecientes a una estación dentro de sus límites. Sin embargo, la estación más cercana que se conoce para la cuenca del Río Purapel, y que cuenta con registros de temperatura media mensual, resultó ser la estación Pencahue. Así se empleó la información correspondiente a esta estación

para el cálculo de la ETP, no obstante su ubicación la emplaza fuera de la cuenca del Río Purapel.

Registros mensuales de precipitación para las estaciones Nirivilo, Constitución, y Faro Carranza.

Información de caudales medios mensuales registrados en la estación Nirivilo.

Todos los datos meteorológicos y foronómicos fueron aportados por la Dirección General de Aguas, organismo estatal perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, salvo los datos de precipitaciones mensuales de la Estación de Faro Carranza, los cuales fueron facilitados por el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile. En su recopilación se buscó incorporar el mayor número de puntos posibles, dada la red de estaciones a la fecha existentes en la región y que, para efectos del estudio, tuviesen relevancia en cuanto a la data de sus registros y ubicación espacial.

#### **4.1.3 Proceso de la información.**

##### ***Delimitación de la cuenca.***

Haciendo uso de las cartas IGM, se delimitó la zona superior de la cuenca del río Purapel, tomando como punto de desagüe la estación de aforos Nirivilo. Posteriormente, sobre esta área de estudio, y estableciendo la ubicación de las estaciones de medición sobre el plano, se delimitaron los polígonos de Thiessen, para luego mediante la utilización de un planímetro polar digital, estimar el área total de la cuenca y la superficie de cada polígono.



### ***Cálculo de las Evapotranspiraciones Potenciales.***

Si bien en lo posible el valor de la ETP para cada periodo debe ser calculado para cada mes en particular, para la cuenca del río Purapel, o zonas cercanas, no se contaba con estadísticas completas de temperaturas medias mensuales. Por ello, tuvo que procederse al cálculo de los valores de evapotranspiración potencial medio para cada mes según el procedimiento expuesto a continuación.

La obtención de la evapotranspiración potencial se efectuó mediante el método de Thornthwaite y Mather (UNESCO-ROSTLAC, 1982), el cual utiliza las temperaturas medias mensuales y la latitud de la estación. Ya que los registros de la estación Penciahue de la Dirección General de Aguas sólo contemplaban datos de temperatura media mensual desde agosto de 1986 a octubre de 1997, y que no existen en la zona de estudio, otras estaciones meteorológicas de antigüedad tal que permita un cálculo más detallado, se optó por que una vez calculada la evapotranspiración potencial mensual para ese periodo y esa estación, se calcularon los valores medios para cada mes, los que pasaron a constituir los datos de entrada para los modelos de simulación. Lo anterior ocurrió bajo el supuesto que a mediano plazo el régimen de temperatura media mensual puede considerarse constante a través del tiempo.

En el apéndice N°1, se observan los valores calculados de evapotranspiración potencial media, y el coeficiente de variación de los mismos. Allí se aprecia que para la gran mayoría de los meses la desviación estándar de la ETP, no supera un 30% del valor medio, evidenciando en tales períodos una baja variabilidad.

## ***Completación de datos y cálculo de Precipitaciones medias Areales Mensuales.***

Ante la falta de datos pluviométricos para la estación Constitución entre los años hidrológicos 1968/69 y 1991/92, información necesaria para el cálculo de la precipitación areal media para la cuenca, se procedió a efectuar la completación de la serie de datos registrada en la estación. Para ello fue necesario establecer el método que ofrecía un mayor ajuste y una mínima manipulación de la información.

En este sentido se probaron distintas opciones. Se realizó una regresión lineal entre los datos de Constitución y Faro Carranza y además Constitución y Nirivilo. Los resultados señalaron que los modelos no satisfacían los supuestos de la regresión (apéndice N°2); allí se muestran los supuestos vulnerados, siendo necesario, en ambos casos, proceder a eliminar pares de datos que alteraban la estructura del modelo, a fin de mejorar el grado de ajuste de los mismos y un cabal cumplimiento de sus requerimientos. Como resultado de ésto se obtuvieron regresiones que satisfacían los requerimientos del método, pero que, a juicio del investigador, alteraban de tal forma la composición de la información en cuanto al número de datos y estructura del modelo, que hacían poco confiable las estimaciones que se hicieran a partir de los mencionados ajustes.

Para salvar este problema, se optó por realizar la completación por el método denominado correlación con estaciones vecinas, recomendado cuando el nivel del ajuste alcanzado en los modelos de regresiones simples no es el adecuado o el procedimiento de regresión no satisface los requerimientos del estudio (Pizarro *et al*, 1993). Para la aplicación del método, se hizo uso de los datos de los períodos en que las tres estaciones coincidían en la toma de registros, dejando de lado aquellos períodos en que al menos una de ellas carecía de información. Así, con los 57 datos iniciales disponibles de la serie, de un total de 73 datos, se calibró el modelo planteado según el método en cuestión (véase

anexo N°3), realizando las regresiones, entre Constitución y Faro Carranza y entre Constitución y Nirivilo. Posteriormente, con los 16 datos restantes se verificó y el ajuste y se validó el procedimiento. Los resultados y el nivel de ajuste obtenidos en la aplicación del método se muestran en el apéndice N°3.

Con posterioridad y empleando las series completas de precipitaciones mensuales de Nirivilo y Constitución, se realizó el cálculo de las precipitaciones medias areales mediante el método de los Polígonos de Thiessen (Pizarro *et al*, 1993), método sugerido como uno de los más recomendables para las zonas de la cordillera de la costa de la VII Región (Ramírez, 1998).

### ***Tratamiento de los datos de caudal.***

En una primera aproximación al tratamiento de la información de la escorrentía, se realizó la completación de datos faltantes en los registros de caudal correspondientes a la estación de aforos Nirivilo. Dicho proceso se llevó a cabo mediante el empleo de los promedios históricos registrados para la misma estación.

Sin embargo, ante la necesidad de contar con datos reales y confiables, con vistas a realizar una calibración sobre la base de información fidedigna y representativa de la escorrentía, se optó por usar sólo los caudales reales registrados en la estación de aforos, toda vez que la completación por promedios históricos o cualquier otro método, aportaría información cuyo carácter es meramente estimativo.

Intuitivamente puede respaldarse esta decisión, tomando en consideración que algunos métodos comunes de completación, tales como los promedios históricos, en general subestiman la varianza de la serie de datos que se pretende prolongar o completar. Así, al efectuarse la completación de la serie de caudales

históricos de la estación, mediante alguno de éstos métodos, disminuiría su varianza. Ésto equivaldría a predisponer a los modelos de simulación a que entregasen series de aportación simuladas, cuya variabilidad resultaría sensiblemente menor en comparación con los caudales reales registrados en la estación.

Cabe mencionar en este punto, que si bien las mencionadas deficiencias de disminución de la varianza, originadas producto de la completación de datos, también se presentarían en los procedimientos de completación de precipitaciones, para ese caso se tuvo que obligatoriamente proceder a su completación. La razón de aquello, es que series pluviométricas, a diferencia de la información de caudales, deben ser continuas, ya que éste es un requisito indispensable para el funcionamiento de los modelos.

### ***Cálculo de Aportaciones Específicas.***

De la información de caudales para la estación Nirivilo, se obtuvo la aportación específica mensual, expresada en mm/mes, (apéndice N°4), mediante el cálculo de:

$$A_i = Q_i \cdot f_s \cdot D_i / S$$

donde:

$A_i$  : Aportación específica para el periodo  $i$ , (mm/mes).

$Q_i$  : Caudal medio mensual para el periodo  $i$ , (m<sup>3</sup>/s).

$f_s$  : Factor de conversión del número de segundos por día y conversión de metro a milímetro (86.400.000).

$D_i$  : Duración del periodo  $i$  en días.

$S$  : Superficie de la cuenca (m<sup>2</sup>).

#### **4.1.4. Modelación matemática**

La modelación matemática del sistema hidrológico se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por Llamas (1993), contemplando las fases de identificación, calibración, validación y recomendaciones; esta última fase reemplazó a la mencionada por el autor llamada límites de aplicación, por considerar que satisfacía mejor los objetivos de la investigación, al ser más amplia y contemplar sugerencias para una mejora en las futuras aplicaciones de los modelos.

La aplicación de esta metodología obedeció al hecho de que se trabajó con modelos del sistema hidrológico previamente diseñados e implementados en cuencas de clima mediterráneo; en tal caso, las fases de diseño conceptual y estructuración de un nuevo modelo matemático, escapaban a los alcances de la investigación.

#### ***Identificación***

En esta etapa, se realizó el análisis de las ecuaciones matemáticas que dan estructura a cada modelo, propiciando el conocimiento profundo de la forma en que cada una representa las sucesivas fases del ciclo hidrológico. De este modo, con el apoyo de la información de estudios hidrológicos previos sobre la zona y en función de algunas características específicas de la cuenca, se definieron las restricciones para los parámetros a ajustar en cada modelo.

#### **Modelo T**

Los valores máximos y mínimos admisibles para los parámetros se muestran en el apéndice N°5; a continuación se detallan los criterios usados para la estimación de los valores admisibles para cada uno.

Para el parámetro  $\Phi$  de capacidad máxima de humedad del suelo, se estimaron los valores extremos admisibles, en base a que por un lado, la capacidad máxima de humedad (o en su equivalente de almacenamiento), de cualquier componente del ciclo hidrológico que guarde cierta consistencia física, no puede presentar valores negativos, por lo que el valor mínimo admisible para  $\Phi$ , se fijó en cero. Por otro lado, el valor máximo a alcanzar por el parámetro se determinó en base a los resultados de los estudios hidrológicos llevados a cabo sobre la cuenca.

Una primera investigación, publicada por la Comisión Nacional de Riego (1978), la cual se ha descrito en el capítulo anterior, muestra que uno de los parámetros (LAST) del modelo calibrado, corresponde a la máxima capacidad de retención de agua en la zona de raíces de los suelos de la cuenca, y su valor fue de 425 mm.

Un segundo estudio, llevado a cabo por el consorcio CEDEC, bajo publicación de la Dirección de Riego en 1992, igualmente citado con anterioridad, en el uso del modelo de simulación denominado “Simulación de escorrentía pluvial”, presenta que uno de los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo, expresa la máxima humedad del suelo,  $H_{\max}$ . Este parámetro, sería equivalente al parámetro  $\Phi$  del modelo T, y su valor en milímetros resultó ser de 484,9 mm.

El tercer estudio presentado en el capítulo anterior, llevado a cabo por Arrese en 1984, presentó un valor para  $H_{\max}$  de 160 mm. No obstante, éste es menor en comparación con los valores de los parámetros presentados en los casos anteriores, al igual éstos, sirvió como un valor referencial sobre la magnitud real a encontrar para la capacidad máxima de humedad de la cuenca.

Así, gracias a que conceptualmente los parámetros enunciados en tales

estudios, guardan gran similitud con el parámetro  $\Phi$  del modelo T, sus valores se emplearon en la presente investigación, para servir como valores de referencia en la estimación del máximo valor admisible del parámetro en cuestión.

Cabe hacer notar que si bien los parámetros mencionados no son exactamente equivalentes, dada la interpretación del ciclo hidrológico particular de cada modelo, expresan básicamente lo mismo, ya que regulan la capacidad de almacenar agua por parte de la capa superior del suelo de la cuenca, humedad que está disponible para alimentar la evapotranspiración, e indirectamente la escorrentía subterránea, ello durante el mismo periodo o en los meses posteriores.

Asimismo, los límites para el valor del parámetro  $\lambda$ , dado que éste expresa una proporción o porcentaje del agua disponible para la escorrentía que permanece en el suelo de la cuenca, se establecieron como se muestra en el apéndice N°5. Si bien los valores para este parámetro propuestos por Carmona (1990), van de 0,5 para pequeñas cuencas, a 0,75 para cuencas de mayor envergadura, se optó por fijar sus límites entre cero y uno, para así dar mayor libertad al modelo en el proceso de calibración, a fin de lograr un mejor ajuste.

#### Modelo Témez:

Los valores máximos y mínimos admisibles para los parámetros del Modelo Témez, se muestran en el apéndice N°6.

Los límites del parámetro de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo ( $H_{max}$ ), se establecieron de la misma forma como se fijaron para el modelo T. Es decir, en base a los estudios anteriormente efectuados sobre la cuenca, detallados en el punto anterior y que determinaron la calibración de parámetros equivalentes al parámetro de la máxima capacidad de humedad del suelo del modelo Témez.

Por su parte, ya que el parámetro C al ser un valor que, en la simulación, participa en la determinación del umbral de escorrentía para cada periodo, en base a una cierta fracción del déficit de humedad del suelo, y que al expresar una fracción o porcentaje fluctúa entre cero o valores muy bajos, y uno, se optó por fijar sus límites en 0,01 (representando la fracción mínima de un 1%), y un máximo de 1, (expresando una fracción máxima, o sea el 100%).

La fijación de los valores extremos para el caso del parámetro  $I_{\max}$ , debido a que se carecía en absoluto de anteriores antecedentes sobre él y a que no había mayor información sobre la capacidad máxima de infiltración de los suelos de la zona en estudio, obedeció sólo a la observación del comportamiento de la infiltración calculada por el modelo. Por otro lado, y siguiendo el criterio de la consistencia física del parámetro, su valor mínimo se estableció en cero.

La estimación de los límites del parámetro  $\alpha$  se efectuó mediante el análisis estadístico de la información de las curvas de caudales recesivos registrados en el Río Purapel, estación Nirivilo.

En este punto se recurrió a la investigación en preparación llevada a cabo por Caro (2001), tal estudio contempla la modelación de caudales recesivos para el Río Purapel, estación Nirivilo. Este autor, a partir del análisis de numerosas curvas recesivas de duración variable de 15 a 48 horas, estableció los valores del parámetro  $\alpha$ , constante de agotamiento que expresa la variación del caudal en función del tiempo, definido para el tiempo de duración observado en la curva recesiva.

En el presente estudio, los valores extraídos se llevaron a su expresión diaria mediante el cálculo:

$$\alpha_D = \alpha_h * 24/h_\alpha$$



donde:

$\alpha_D$  : Valor del parámetro  $\alpha$  expresado a nivel temporal diario.

$\alpha_h$  : valor del parámetro  $\alpha$  expresado a nivel temporal horario ( $h_\alpha$ ).

$h_\alpha$  : Duración en horas de la curva recesiva.

Una vez conocidos los valores  $\alpha_D$ , se procedió a su análisis de frecuencias, ajustándoles, mediante el método de los momentos, una ley de distribución del tipo Gamma de dos parámetros. Luego, a partir de ésta función de distribución ajustada, se estableció un intervalo de confianza para la variable  $\alpha_D$ , a un nivel de confianza del 95%, constituyendo los valores extremos del intervalo los límites admisibles para el parámetro  $\alpha$ . Los parámetros del ajuste a la función Gamma y el nivel de aceptación del mismo se muestran en el apéndice N°7.

### ***Calibración***

Se llevó a cabo la programación y posterior calibración de los modelos sobre una planilla electrónica Excel 97, empleando para tales efectos la información de precipitaciones areales medias, aportaciones específicas y evapotranspiraciones potenciales, correspondientes a los años hidrológicos 1968/69 a 1986/87.

El ajuste de los parámetros de cada modelo se efectuó en base a minimizar la función objetivo que expresa la sumatoria del cuadrado de las diferencias entre las aportaciones reales y las aportaciones calculadas. Para hallar la combinación de parámetros que minimizan la función, se utilizó la herramienta informática denominada “Solver”, “macro automática” incorporada en la planilla electrónica Excel 97.

El empleo de ésta herramienta obedeció a la necesidad de realizar el ajuste

de los parámetros que minimizan la función objetivo mediante métodos numéricos, específicamente empleando el algoritmo de Newton (véase anexo N°6). Tal proceso, llevado a cabo internamente por el ordenador, consiste en la expresión del modelo a optimizar mediante funciones matemáticas que hagan posible llevar a cabo sucesivas iteraciones que permitan acercarse al óptimo buscado con un nivel de precisión dado. El problema de optimización, resultó ser el siguiente:

Sea

$A_r : a_{r_1}, \dots, a_{r_n} : \text{conjunto de aportaciones reales registradas (Cte.)}$

$A_c : a_{c_1}, \dots, a_{c_n} : \text{conjunto de aportaciones calculadas}$

$P_1, \dots, P_n : \text{precipitaciones areales medias (Cte)}$

$ETP_1, \dots, ETP_n : \text{evapotranspiraciones potenciales para la zona (Cte)}$

$p_1, \dots, p_n : \text{parámetros del Modelo}$

$k_1, \dots, k_p : \text{valores máx. admisibles para los parámetros (Cte)}$

$l_1, \dots, l_p : \text{valores mín. admisibles para los parámetros (Cte)}$

Ac depende del valor de los parámetros dada la función:

$$A_c = f(P_1, \dots, P_p; ETP_1, \dots, ETP_p; p_1, \dots, p_p)$$

Luego:

Función Objetivo:  $\min d^2(A_r, A_c) = \sum_{i=1}^n (A_{ri} - A_{ci})^2$

Sujeto a:

$$P_1 \leq k_1; P_2 \leq k_2; \dots; P_p \leq k_p$$

$$P_1 \geq l_1; P_2 \geq l_2; \dots; P_p \geq l_p$$

Durante el proceso anteriormente descrito, y luego de las primeras iteraciones en la calibración, se encontró, para ambos modelos en estudio, el problema de existencia de abundantes mínimos locales. Tal hecho significó que para distintas combinaciones iniciales en los valores de los parámetros, se

encontraron distintas soluciones que en mayor o menor medida, minimizaban la función objetivo.

El problema de la abundancia de mínimos locales ya había sido descrito por Estrela en 1988, y por Thyer *et al* en 1999. Éste último, comparó dos técnicas de solución al problema de la calibración de un modelo precipitación aportación. En tal estudio señala además, que numerosas investigaciones del mismo tipo presentan éste inconveniente, destacando que los algoritmos de calibración son comúnmente afectados por lo que se conoce como regiones de atracción múltiple. Estas regiones serían porciones del espacio paramétrico, circundante a un mínimo local, desde las cuales parte el algoritmo con su proceso iterativo, desembocando a ese punto óptimo. Ante la presencia de ellas, el óptimo local encontrado depende de los valores iniciales de los parámetros al momento de comenzar con la aplicación del algoritmo.

Ante esta situación y los antecedentes presentados, se optó por realizar la minimización de la función empleando numerosas combinaciones de valores iniciales para los parámetros, registrando cada una de las soluciones halladas, y posteriormente seleccionando aquella cuyo valor en su función objetivo resultó mínima, toda vez que cumplía con las restricciones impuestas en la fase de identificación.

### **Validación.**

Una vez terminada la fase de calibración de los modelos, la cual empleó la información hidrológica de los años 1968/69 a 1986/87, se procedió, con los restantes datos, correspondientes a los años hidrológicos 1987/88 a 1998/99, a validar sus resultados evaluando el ajuste brindado por los parámetros. En esta fase de validación se emplearon pruebas estadísticas no paramétricas, las cuales fueron:

- Prueba U de Mann-Withney (aplicado para muestras grandes o pequeñas según fuese el caso).
- Test Kolmogorov-Smirnov (aplicado para muestras grandes o pequeñas según correspondiese).
- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), estimador propuesto para esta etapa por Nash (1969), (citado por Llamas, 1993).

La razón del uso de pruebas no paramétricas se basó en que el comportamiento de la variable aportación no mostró una distribución Normal, dejando de manifiesto que los resultados de pruebas que exigiesen este supuesto fundamental, perderían toda consistencia estadística.

La aplicación de estas pruebas se realizó conforme a tres esquemas o niveles de comparación.

El primero de estos esquemas, denominado pruebas de bondad de ajuste a nivel general, implicó la realización de las pruebas anteriormente mencionadas sobre la información correspondiente a la totalidad de los meses en el periodo 1987/88 a 1998/99 (periodo de validación). El número de datos empleados fue de 136. En el caso de las pruebas de U de Mann-Whitney y de Kolmogorov-Smirnov, su aplicación obedeció a la metodología, expuesta en los Anexos N°8 y N°9 respectivamente.

El segundo esquema o nivel de aplicación de las pruebas de bondad de ajuste fue llevado a cabo sobre los resultados anuales de los modelos, esto es la sumatoria de los meses de cada año hidrológico durante el periodo de validación. El número de datos que se contempló en estas pruebas, fue de  $n=8$ , el cual correspondió al número de años hidrológicos, del periodo de validación, que contaban con sus registros de caudal completos.

Finalmente, el tercer nivel de aplicación de las pruebas estadísticas lo constituyó el nivel mensual. Así se realizaron los test anteriormente descritos sobre los resultados obtenidos por los modelos según cada mes individualmente. El número de datos disponible fue de,  $n=12$  para abril, y el periodo junio a diciembre;  $n=11$  para mayo y enero, y  $n=9$  para febrero y marzo

Para los dos últimos niveles en los cuales se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste descritas, esto es, a nivel anual y a nivel mensual, y para el caso específico de las pruebas de U de Mann-Whitney y de Kolmogorov-Smirnov, su aplicación obedeció a la metodología propuesta para pruebas de muestras pequeñas (véase Anexos N°7 y N°9).

### ***Variantes introducidas a los modelos***

Al analizar los resultados preliminares de los procesos de calibración y validación de los modelos de simulación, modelo T y modelo Témez, surgió como interrogante si al incorporar variabilidad temporal a los parámetros que rigen los modelos, fuese posible hacer mejoras en los niveles de ajuste presentados, en especial en los meses más deficitarios. Es así, que como se elaboró un segundo planteamiento, para cada modelo, a partir del planteamiento original.

Así, y en procura de lograr un mayor ajuste a nivel general y mensual, se decidió dotar a ambos modelos calibrados de variabilidad temporal en sus parámetros. Tal procedimiento, implicó la realización de una nueva calibración, estableciendo un valor óptimo, en cada uno de los modelos, para los parámetros que rigen el comportamiento de los modelos. Dichos parámetros se dividieron en

parámetros para los meses lluviosos (abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, y octubre), como también para los meses secos (enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre).

Para el modelo T los parámetros a calibrar que fueron planteados son los siguientes:

$\lambda_h, \lambda_s$  : Fracción remanente de humedad excedente que permanece en la cuenca al final del periodo considerado, para los meses lluviosos (húmedos) y secos respectivamente.

$\Phi_h, \Phi_s$  : Capacidad máxima de almacenamiento de humedad que posee el suelo, para los meses húmedos y secos respectivamente.

Por su parte, para el caso del modelo Témez los parámetros a calibrar fueron:

$Hmax_h, Hmax_s$  : Capacidad máxima de humedad de la capa superior del suelo, para los meses húmedos y meses secos respectivamente.

$C_h, C_s$  : Parámetro propio del modelo que regula cuánto será el umbral de escorrentía una vez calculado el déficit de humedad para los meses húmedos y meses secos respectivamente.

$Imáx_h, Imáx_s$  : Corresponde a la capacidad máxima de infiltración del suelo para los meses lluviosos y secos respectivamente.

$\alpha_h, \alpha_s$  : Es el coeficiente de la rama de descarga, a nivel instantáneo, para los meses húmedos y los meses secos respectivamente.

## ***Recomendaciones***

En esta fase, se procedió a definir y acotar el ámbito de aplicación para el cual los resultados de la modelación son confiables; tal ámbito estuvo definido en base al nivel de ajuste general y mensual alcanzado, y el tipo de información empleada. Asimismo se identificaron aquellos aspectos en los cuales se cree los modelos serían susceptibles de mejorar, y se establecieron recomendaciones que guíen las acciones pertinentes, para efectuar dichas mejoras.

### **4.1.5. Análisis de resultados y redacción del informe final.**

Realizadas las etapas anteriores se procedió al análisis de la información, de la calibración con los parámetros encontrados y las características de las principales variables de estado de cada modelo. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de los resultados de la validación de los parámetros obtenidos, para así efectuar la redacción final del estudio.

## 5.0. PRESENTACION DE RESULTADOS

### 5.1. Calibración

#### 5.1.1. Resultados calibración modelo T

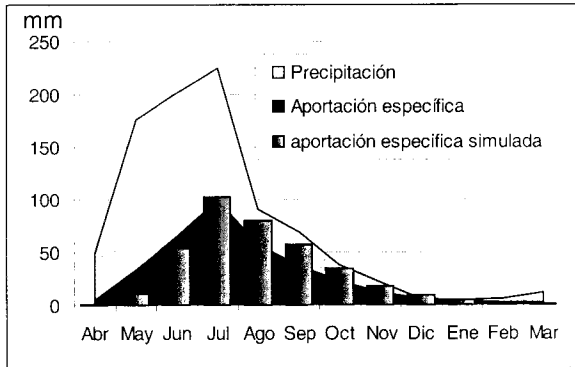
En el Cuadro N°4, se muestran los valores hallados en el proceso de calibración para los dos parámetros del modelo T, que hacen mínima la función objetivo. Tales valores se alcanzaron luego del proceso de optimización llevado a cabo por la “macro automática” incorporada en la planilla electrónica Excel 97, y junto a otra combinación formaron el conjunto de soluciones óptimas que en mayor o menor medida, hacían mínimas las diferencias entre las aportaciones observadas y las aportaciones calculadas para los años hidrológicos 1968/69 a 1986/87.

**Cuadro N°4. Parámetros Modelo T, Cuenca Río Purapel.**

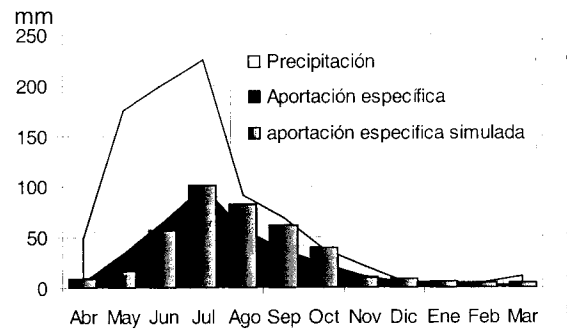
<b>Planteamiento original</b>				
<b>Parámetro</b>	$\Phi$		$\lambda$	
Valor	339,206		0,537	
<b>Planteamiento con modificaciones</b>				
<b>Parámetro</b>	$\Phi_h$	$\Phi_s$	$\lambda_h$	$\lambda_s$
Valor	378,313	550,000	0,594	0,831

Asimismo, las figuras N°6 y N°7 muestran, el contraste entre aportaciones específicas simuladas por el modelo T y aportaciones específicas reales registradas a nivel medio para los años hidrológicos 1968/69 a 1986/87 para el caso de su planteamiento original y para su planteamiento modificado (planteamiento con variantes introducidas al modelo), siendo la relación que guardan las aportaciones a nivel mensual mostrada en las figuras N°8 y N°9.

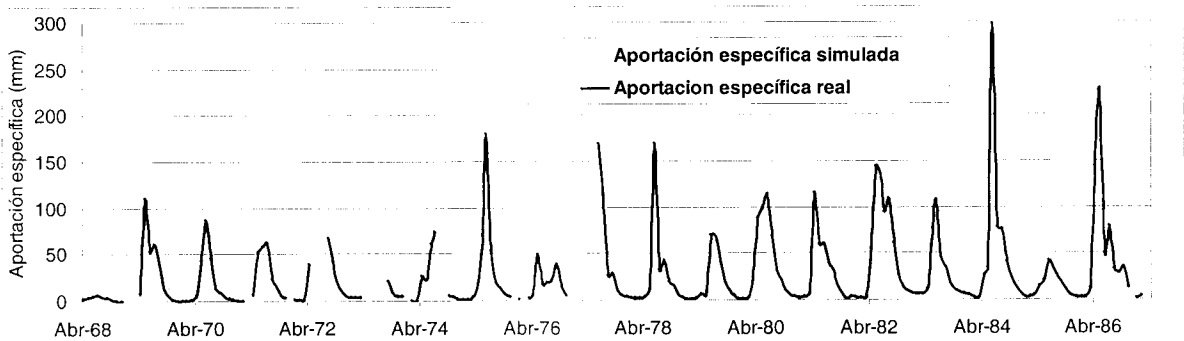




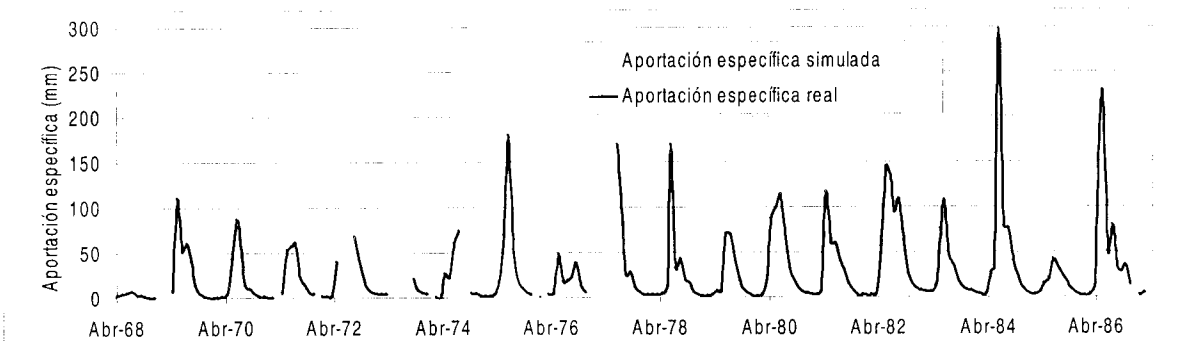
**Figura N°6. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento original modelo T, (periodo 1968/69-1986/87).**



**Figura N°7. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento modificado modelo T, (periodo 1968/69-1986/87).**



**Figura N°8. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento original modelo T, (periodo 1968/69-1986/87).**



**Figura N°9. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento modificado modelo T, (periodo 1968/69-1986/87).**

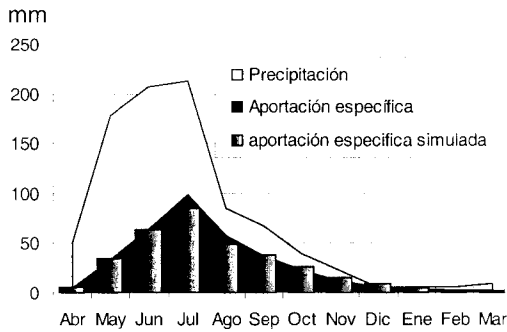
### 5.1.2. Resultados calibración modelo Témez.

En el Cuadro N°5, se muestran los valores hallados en el proceso de calibración para los parámetros del modelo Témez, que hacen mínima la función objetivo. Tales valores se alcanzaron luego del proceso de optimización llevado a cabo por la macro automática incorporada en la planilla electrónica, y junto a otras combinaciones formaron el conjunto de soluciones óptimas que hacían mínimas las diferencias entre las aportaciones observadas y las aportaciones calculadas para los años hidrológicos 1968/69 a 1986/87.

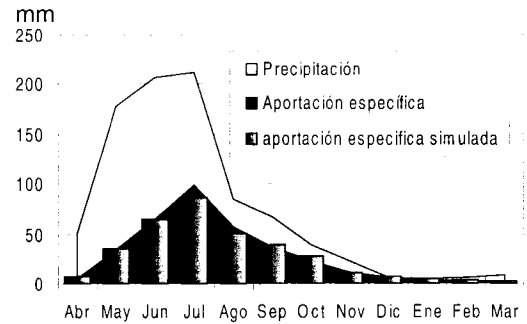
**Cuadro N°5. Parámetros Modelo Témez, Cuenca Río Purapel.**

<b>Planteamiento original</b>								
<b>Parámetro</b>	<b>H<sub>max</sub></b>		<b>C</b>		<b>I<sub>max</sub></b>		<b>α</b>	
Valor	355,9		0,01		1000		0,01434	
<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>								
<b>Parámetro</b>	<b>Hmax<sub>h</sub></b>	<b>Hmax<sub>s</sub></b>	<b>C<sub>h</sub></b>	<b>C<sub>s</sub></b>	<b>I<sub>max<sub>h</sub></sub></b>	<b>I<sub>max<sub>s</sub></sub></b>	<b>α<sub>h</sub></b>	<b>α<sub>s</sub></b>
Valor	338,6	292,0	0,01	0,67	1000	20,5	0,01353	0,00891

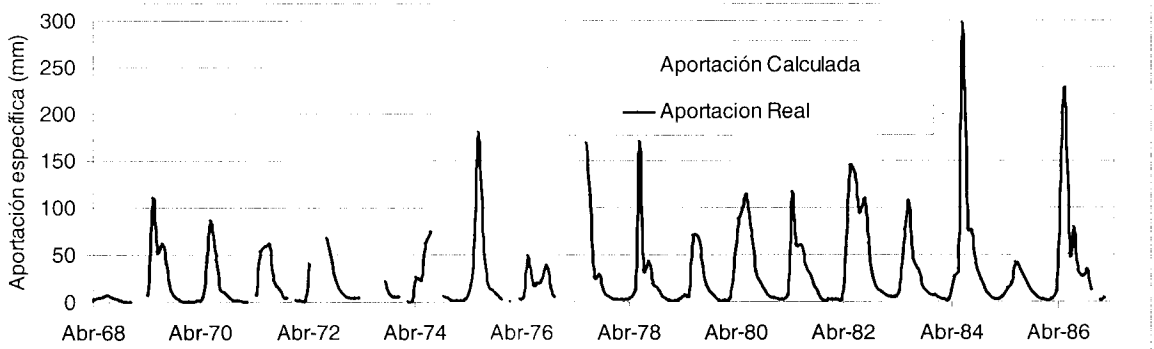
Las figuras N°10 y N°11, muestran la relación entre aportaciones específicas simuladas y aportaciones específicas reales registradas, a nivel medio, por los dos planteamientos propuestos en el modelo Témez, para los años hidrológicos 1968/69 a 1986/87. Allí se aprecia cómo el modelo reproduce en términos promedios el nivel de escorrentía para cada uno de los meses durante el periodo de calibración. Pueden visualizarse niveles de escorrentía menores para los meses en que efectivamente la aportación real es baja, como también mayores aportaciones para aquellos meses en que se espera un mayor caudal (meses invernales). Por su parte, las figuras N°12 y N°13 muestran la relación precipitación aportación a nivel mensual para el periodo de calibración.



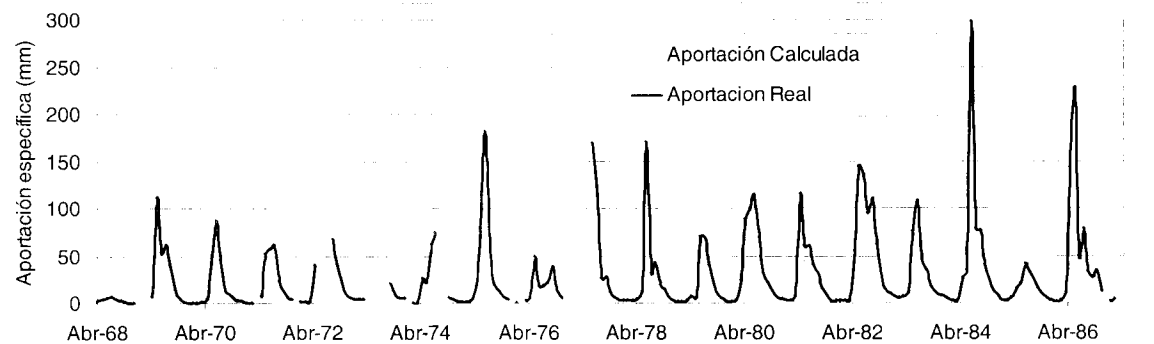
**Figura N°10. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento original modelo Témez, (periodo 1968/69-1986/87).**



**Figura N°11. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento modificado modelo Témez, (periodo 1968/69-1986/87).**



**Figura N°12. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento original modelo Témez, (periodo 1968/69-1986/87).**

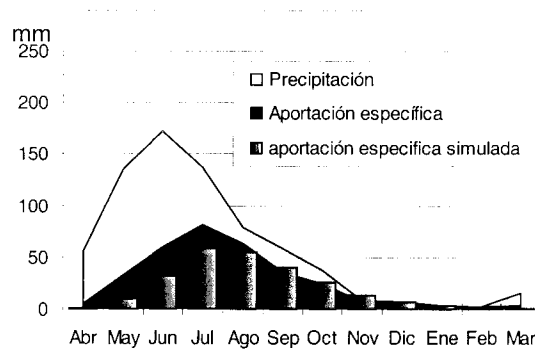


**Figura N°13. Aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento modificado modelo Témez, (periodo 1968/69-1986/87).**

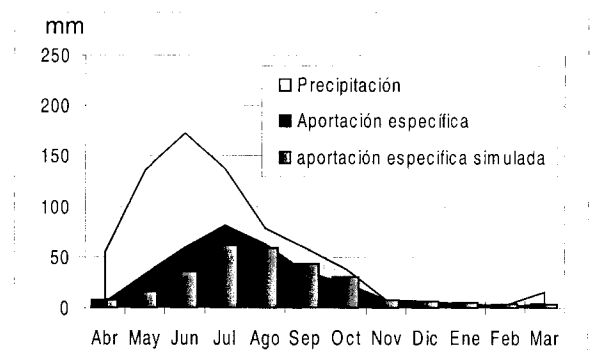
## 5.2. VALIDACION.

### 5.2.1. Resultados validación modelo T

En las figuras N°14 y N°15, se observa el nivel de precipitaciones y aportaciones, a nivel medio registradas en el área, y las aportaciones específicas generadas por el modelo T para el periodo 1987/88 a 1998/99, tanto para la planteamiento original del modelo, como para el planteamiento con variantes introducidas.

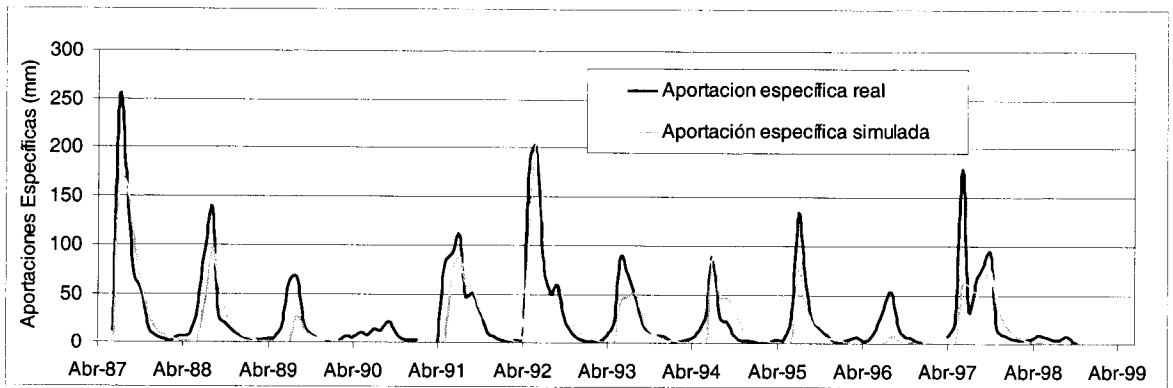


**Figura N°14. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).**

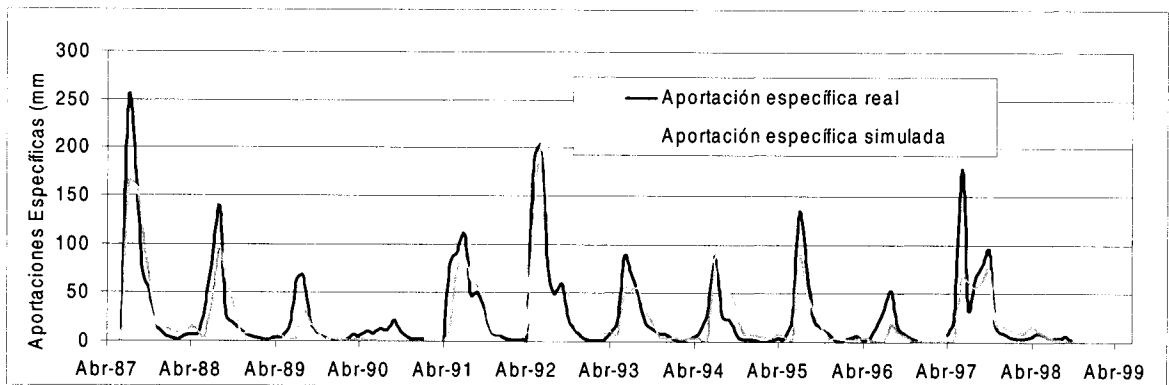


**Figura N°15. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).**

Asimismo, las figuras N°16 y N17, muestran, a nivel mensual, el nivel de aportaciones reales registradas en el área, y las aportaciones específicas generadas por el modelo T, para su planteamiento original y modificado respectivamente, para el periodo de calibración, 1987/88 a 1998/99.



**Figura N°16. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).**



**Figura N°17. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).**

En las Figuras N°18, N°19, N°20 y N°21 se muestra, mediante diferentes enfoques el error o diferencia entre aportaciones reales y aportaciones simuladas por el modelo T en su planteamiento original, para el periodo de validación (1987/88 a 1998/99).

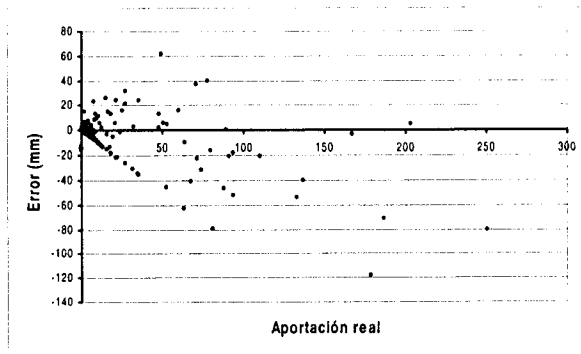


Figura N°18. Errores en el proceso de validación, planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

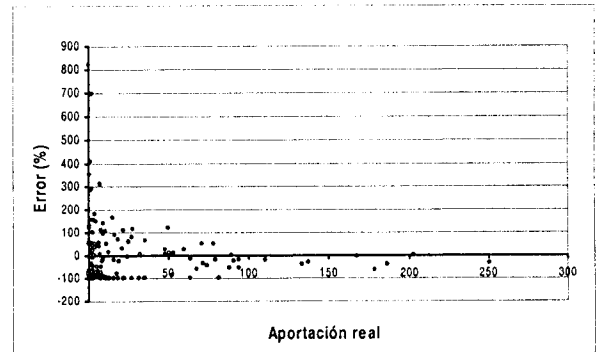


Figura N°19. Errores porcentuales en el proceso de validación, planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

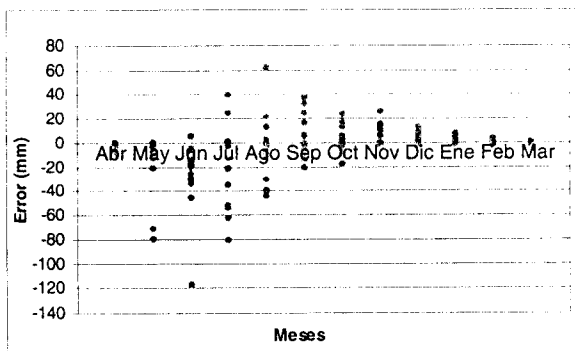


Figura N°20. Errores, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

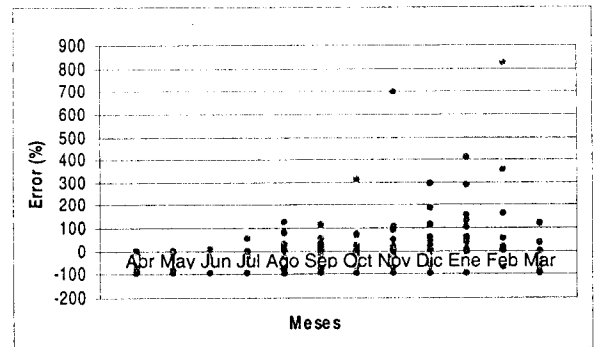


Figura N°21. Errores porcentuales, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento original modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

Por su parte, en las Figuras N°22, N°23, N°24 y N°25 se muestran gráficamente los errores o diferencias entre aportaciones reales y aportaciones simuladas por el modelo T, en su planteamiento modificado, para el periodo de validación (1987/88 a 1998/99).

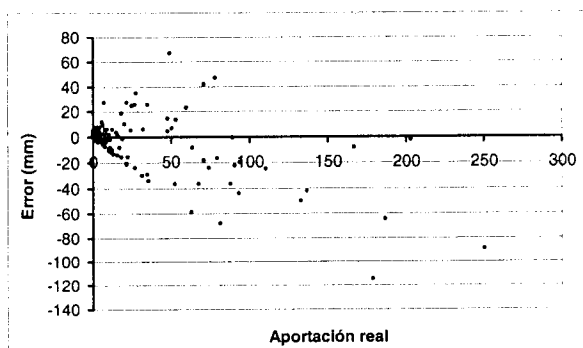


Figura N°22. Errores en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

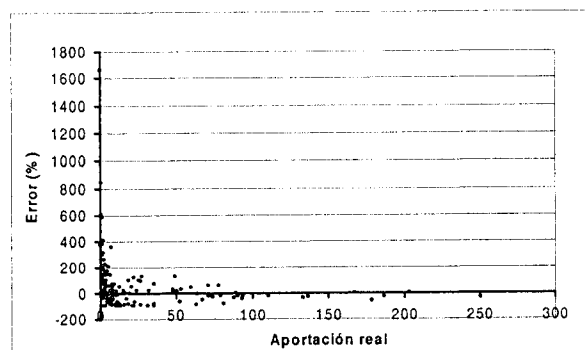


Figura N°23. Errores porcentuales en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

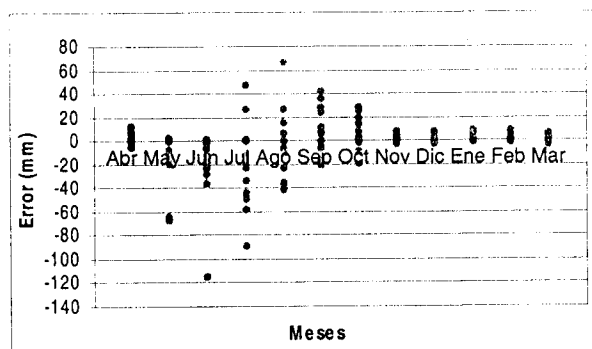


Figura N°24. Errores, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

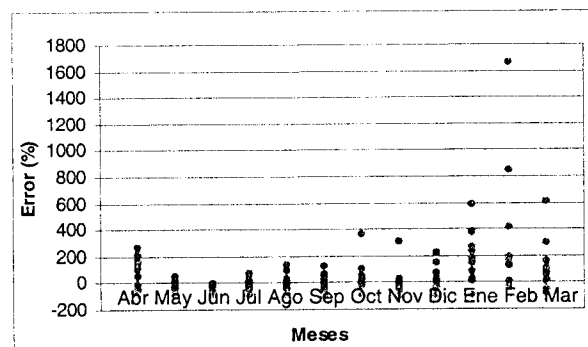


Figura N°25. Errores porcentuales, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo T. (Periodo 1987/88-1998/99).

### **Medidas de bondad de ajuste.**

a) Test estadísticos a nivel general.

En el cuadro N°6, se muestra el valor de los estadísticos calculados para la comprobación de la bondad del ajuste mensual a nivel general, esto es, empleando la totalidad de los meses desde los años hidrológicos 1987/88 a 1998/99.

**Cuadro N°6. Resultados test estadísticos a nivel general. Modelo T.**

<b>Planteamiento original</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,35	0,16	Se rechaza $H_0$
Test U de Mann-Whitney	4,27	$\pm 1,96$	Se rechaza $H_0$
Coeficiente de Determinación		0,73	

<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,11	0,16	Se acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	1,45	$\pm 1,96$	Se acepta $H_0$
Coeficiente de Determinación		0,74	

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.



b) Resultados Test estadísticos a nivel anual.

El nivel de ajuste mostrado por el modelo T, determinado para un nivel de significación para  $\alpha=0,05$ ; y en términos de la escorrentía anual calculada, se muestra en el cuadro N°7.

**Cuadro N°7. Resultados test estadísticos a nivel anual. Modelo T.**

<b>Planteamiento original</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,50	0,58	Se acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	26	22	Se acepta $H_0$
Coeficiente de determinación		0,45	
<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,33	0,58	Se acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	35	22	Se acepta $H_0$
Coeficiente de determinación		0,57	

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

c) Test estadísticos a nivel mensual.

En los cuadros N°8, N°9, y N°10, se muestran los resultados de los test estadísticos, de Kolmogorov-Smirnov, test U de Mann-Whitney, coeficiente de determinación, y coeficiente de correlación respectivamente, aplicados entre aportaciones específicas mensuales reales y simuladas por el Modelo T, para el periodo hidrológico de los años 1987/88 a 1998/99.

**Cuadro N°8. Test de Kolmogorov-Smirnov, modelo T.**

Planteamiento original												
Periodo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
D máximo	0.92	0.92	0.67	0.33	0.17	0.25	0.25	0.50	0.42	0.50	0.39	0.61
DS <sub>(α=0,05)</sub>	0.50	0.55	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	0.56	0.56
	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>
Planteamiento con variantes introducidas												
Periodo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
D máximo	0,50	0,39	0,67	0,25	0,17	0,33	0,33	0,17	0,25	0,50	0,50	0,25
DS <sub>(α=0,05)</sub>	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,56	0,56
	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>

Donde H<sub>0</sub> corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

**Cuadro N°9. Test U de Mann-Whitney, modelo T.**

Planteamiento original												
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
U1	7	10	36	55	62	73	74	88	89	80	53	18
U2	137	111	108	89	82	71	70	56	55	41	28	63
Valor crítico α=0,05	37	33	37	37	37	37	37	37	37	33	26	26
	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se acepta H <sub>0</sub>	Se rechaza H <sub>0</sub>

Planteamiento con variantes introducidas												
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
U1	94	37	35	56	70	80	83	66	82	89	75	51
U2	51	85	110	89	75	65	62	79	63	33	7	31
Valor crítico $\alpha=0,05$	37	33	37	37	37	37	37	37	37	33	26	26
	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se acepta $H_0$

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

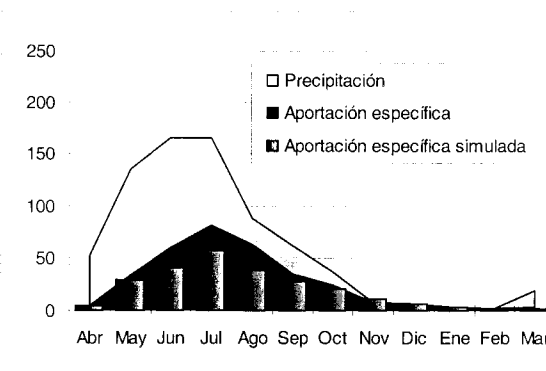
**Cuadro N°10. Coeficiente de determinación, modelo T.**

Planteamiento original											
Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
--	--	0,25	0,56	0,55	0,20	0,80	--	--	--	--	--
Planteamiento con variantes introducidas											
Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
--	0,68	0,64	0,56	0,57	0,16	0,67	0,61	--	--	--	--

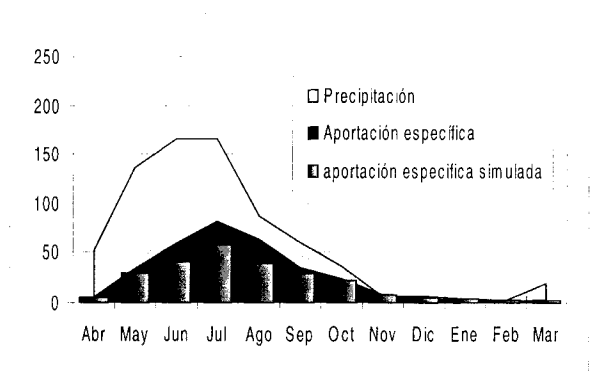
Nota: Para los meses en que el resultado del cálculo del estadístico resultó ser negativo, se procedió a interpretar éste como el valor nulo, es decir cero, y se expresó mediante (--).

## 5.2.2. Resultados validación modelo Témez

En las figuras N°26 y N°27, se observa el nivel de precipitaciones y aportaciones, a nivel medio, registradas en el área, y las aportaciones específicas generadas por el modelo, en sus dos planteamientos, para el periodo 1987/88 a 1998/99.

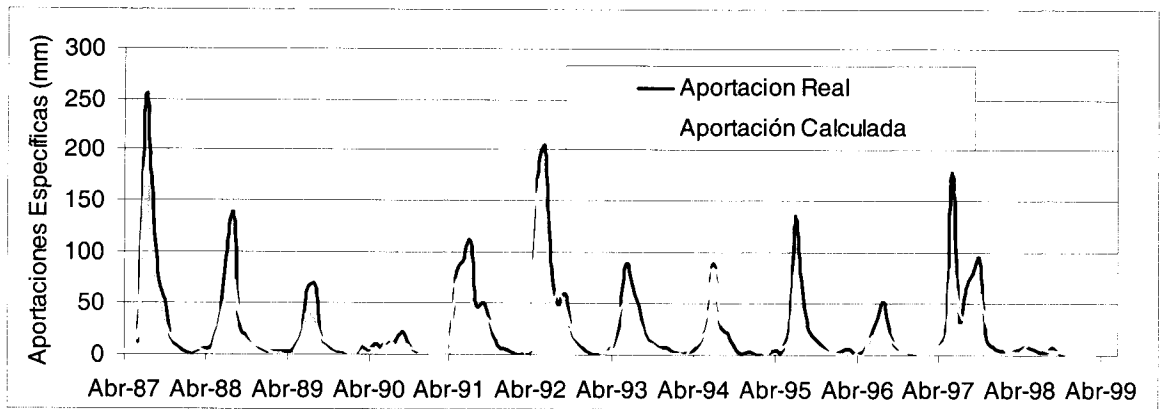


**Figura N°26. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento original modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).**

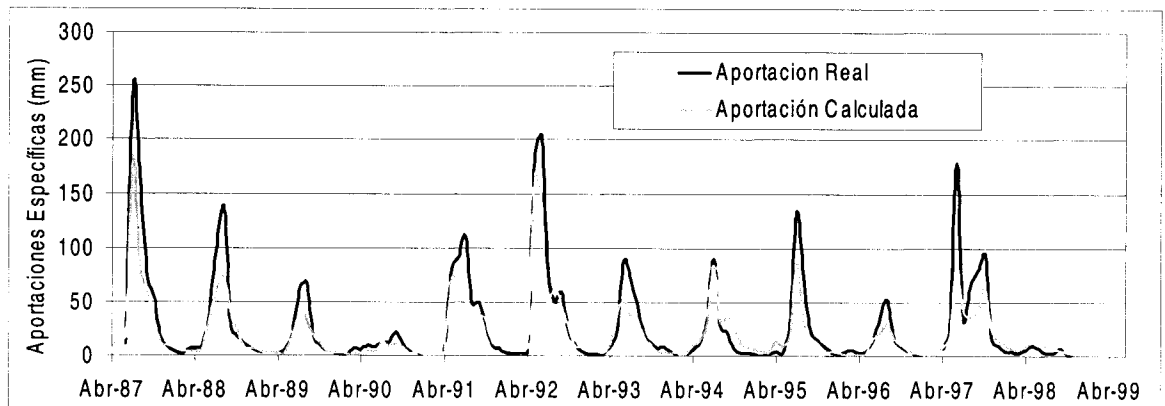


**Figura N°27. Contraste Precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel medio; planteamiento modificado modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).**

Por otro lado, en las figuras N°28 y N°29, se muestra el nivel de precipitaciones y aportaciones, a nivel mensual, registradas en el área, y las aportaciones específicas generadas por el modelo para el periodo 1987/88 a 1998/99.



**Figura N°28. Contraste precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento original modelo Témez (periodo 1987/88-1998/99).**



**Figura N°29. Contraste precipitación, aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas, a nivel mensual; planteamiento modificado modelo Témez (periodo 1987/88-1998/99).**

En las figuras N°30, N°31, N°32 y N°33, se muestra el error o diferencia entre aportaciones reales y aportaciones simuladas por el modelo Témez, en su planteamiento original, para el periodo 1987/88 a 1998/99.

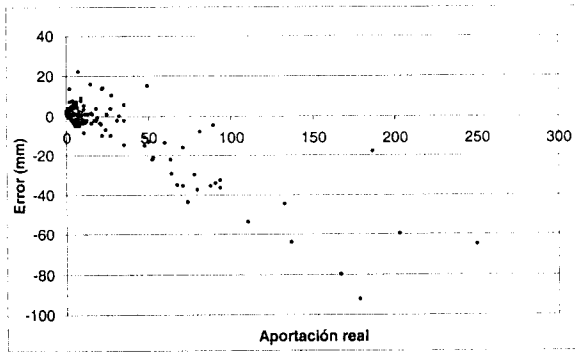


Figura N°30. Errores en el proceso de validación, planteamiento original modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

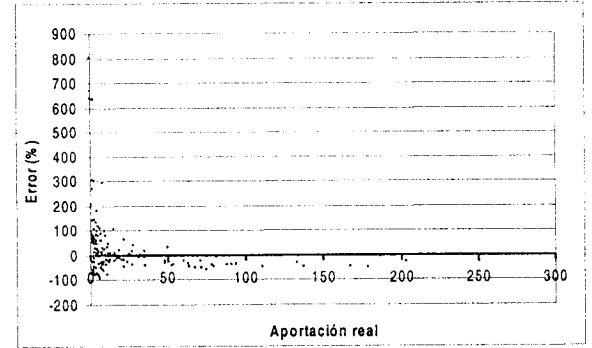


Figura N°31. Errores porcentuales en el proceso de validación, planteamiento original modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

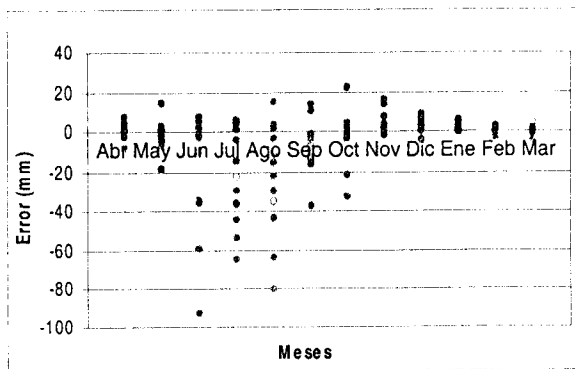


Figura N°32. Errores, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento original modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

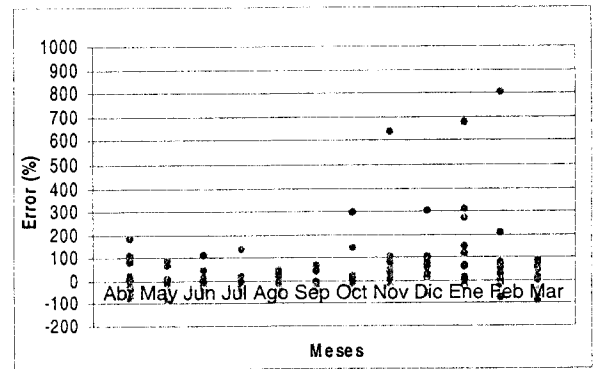


Figura N°33. Errores porcentuales, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento original modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

Por otro lado, en las figuras N°34, N°35, N°36 y N°37, se muestra el error o diferencia entre aportaciones reales y aportaciones simuladas por el modelo Témez, en su planteamiento modificado, para el periodo 1987/88 a 1998/99.

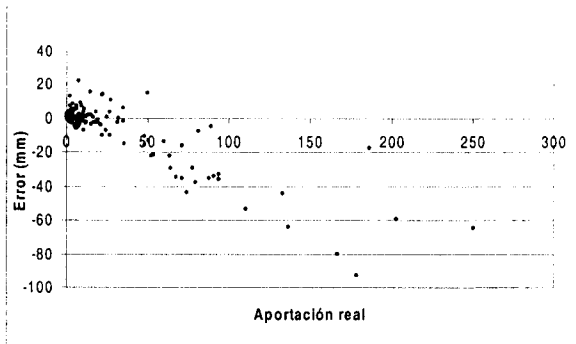


Figura N°34. Errores en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

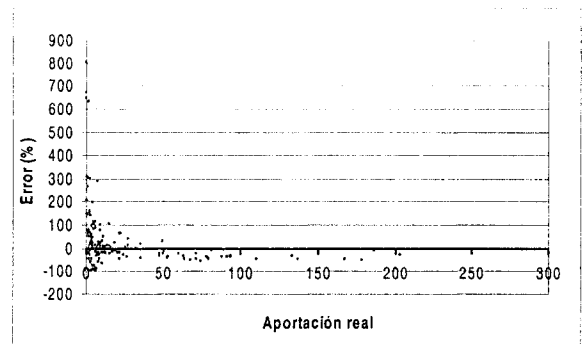


Figura N°35. Errores porcentuales en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

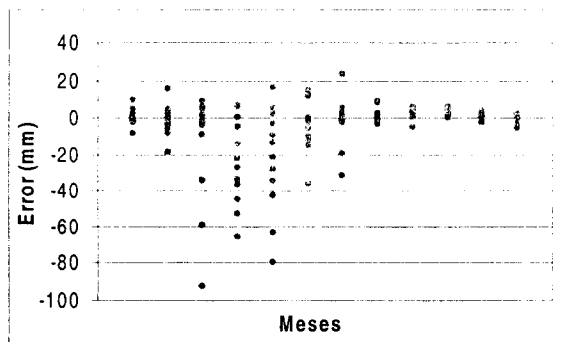


Figura N°36. Errores, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

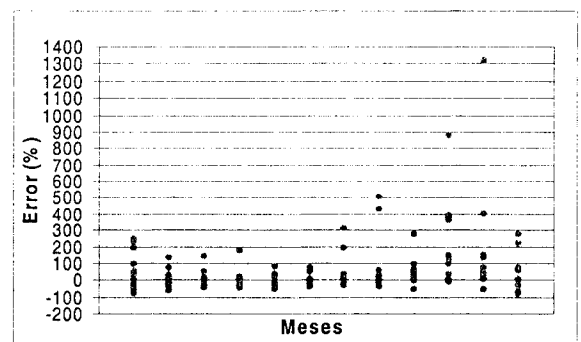


Figura N°37. Errores porcentuales, a nivel mensual, en el proceso de validación, planteamiento modificado modelo Témez. (Periodo 1987/88-1998/99).

## Medidas de bondad de ajuste.

a) Resultados Test estadísticos a nivel general.

En el cuadro N°11, se muestra el valor de los estadísticos calculados para la comprobación de la bondad del ajuste mensual a nivel general, esto es, empleando la totalidad de los meses desde los años hidrológicos 1987/88 a 1998/99 sobre las aportaciones específicas calculadas por el modelo Témez.

**Cuadro N°11. Resultados test estadísticos a nivel general. Modelo Témez.**

<b>Planteamiento original</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,10	0,16	Se Acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	0,58	$\pm 1,96$	Se Acepta $H_0$
Coefficiente de determinación		0,81	

<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,10	0,16	Se Acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	0,13	$\pm 1,96$	Se Acepta $H_0$
Coefficiente de determinación		0,82	

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.



b) Resultados Test estadísticos a nivel anual.

El nivel de ajuste mostrado por el modelo Témex, bajo un nivel de confianza del 95%; y en términos de la escorrentía anual calculada, se muestra en el cuadro N°12.

**Cuadro N°12. Resultados test estadísticos a nivel anual. Modelo Témex.**

<b>Planteamiento original</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,42	0,58	Se acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	27	22	Se acepta $H_0$
Coeficiente de Determinación		0,48	
<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>			
	<b>Estadístico calculado</b>	<b>Valor crítico (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	
Kolmogorov-Smirnov	0,42	0,58	Se acepta $H_0$
Test U de Mann-Whitney	29	22	Se acepta $H_0$
Coeficiente de determinación		0,52	

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

c) Test estadísticos a nivel mensual.

En los cuadros N°13, N°14 y N°15, se muestran los resultados de los test estadísticos aplicados entre aportaciones específicas mensuales reales y simuladas por el modelo Témex, a nivel mensual, para el periodo hidrológico de los años 1987/88 a 1998/99.

**Cuadro N°13. Test de Kolmogorov-Smirnov, modelo Tézmez.**

Planteamiento original												
Periodo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
D máximo	0,33	0,17	0,25	0,42	0,50	0,33	0,17	0,33	0,33	0,41	0,25	1,00
$DS_{(\alpha=0,05)}$	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,56	0,56
	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$
Planteamiento con variantes introducidas												
Periodo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
D máximo	0,33	0,17	0,25	0,42	0,50	0,25	0,17	0,08	0,25	0,50	0,28	0,28
$DS_{(\alpha=0,05)}$	0,50	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,56	0,56
	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

**Cuadro N°14. Test U de Mann-Whitney, modelo Tézmez.**

Planteamiento original												
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
U1	86	63	66	54	50	55	77	93	96	92	58	0
U2	58	58	78	90	94	89	67	51	48	29	23	81
Valor crítico $\alpha=0,05$	37	33	37	37	37	37	37	37	37	33	26	26
	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se rechaza $H_0$
Planteamiento con variantes introducidas												
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
U1	78	62	78	90	94	86	63	69	52	22	8	32
U2	66	59	66	54	50	58	81	75	92	99	73	49
Valor crítico $\alpha=0,05$	37	33	37	37	37	37	37	37	37	33	26	26
	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se acepta $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se rechaza $H_0$	Se acepta $H_0$

Donde  $H_0$  corresponde a la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de probabilidad de las aportaciones específicas reales y las aportaciones específicas simuladas.

**Cuadro Nº15. Coeficiente de determinación, modelo Témez.**

<b>Planteamiento original</b>												
<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Diciembre</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	
--	0.91	0.46	0.72	0.36	0.53	0.72	--	--	--	--	--	
<b>Planteamiento con variantes introducidas</b>												
<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Diciembre</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	
--	0,90	0,45	0,72	0,37	0,56	0,73	0,28	--	--	--	--	

Nota: Para los meses en que el resultado del cálculo del estadístico resultó ser negativo, se procedió a interpretar éste como el valor nulo, es decir cero, y se expresó mediante (--).

## 6.0. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Análisis de los resultados de la calibración

#### 6.1.1. Análisis de los resultados de la calibración modelo T

Al observar las figuras N°6, N°7, N°8 y N°9, se aprecia cómo el modelo T, en su versión original y con su planteamiento con variantes, reproduce el nivel de escorrentía para cada uno de los meses durante el periodo de calibración, adoptando valores bajos de aportación para los meses de menor escorrentía registrada en la estación, como también aportaciones de mayor magnitud para aquellos meses en que se espera un mayor caudal.

#### *Parámetro $\Phi$*

El valor óptimo de la máxima capacidad de almacenamiento, encontrado en la calibración del modelo con su planteamiento original, fue de 339,2 mm, valor que expresado en volumen, equivale a suponer que la capacidad máxima de retención de agua del suelo en su estado de completa saturación, alcanza los 9.785 hectómetros cúbicos.

Al analizar los cálculos efectuados por el modelo, en estas condiciones, es posible apreciar que para los meses de mayo a octubre, frecuentemente la variable de estado almacenamiento de humedad ( $S_i$ ), que está estrechamente relacionada con la capacidad máxima de almacenamiento de humedad  $\Phi$ , al final del periodo alcanza su valor máximo, bajando notablemente en los meses restantes, dada una mayor tasa de evapotranspiración potencial. La importancia de que el suelo alcance su humedad máxima, radica en que sólo una vez ocurrido este evento, el excedente de agua generará escorrentía. Por ello, es posible observar que la aportación específica para los meses anteriores y posteriores al

periodo mayo a octubre, es sensiblemente menor, dado que en ellos el suelo no presenta un nivel de humedad que ocupe su máxima capacidad.

Por su parte, y producto de las variantes introducidas al modelo en la segunda calibración, se aprecia que los valores de los parámetros de Capacidad máxima de humedad para los periodos definidos como húmedo y seco son, respectivamente, 378,3 y 550 mm. Si bien, el mayor de estos valores difiere del calculado en el planteamiento original del modelo, la variable de estado de almacenamiento de humedad ( $S_i$ ), en estas nuevas condiciones continúa presentando sus máximos valores en los meses de mayo a octubre. Esto último, además de significar una mayor reserva de agua por parte del suelo, la que se traduce en mayores montos de escorrentía para esos meses, estaría indicando una muy leve variación en el régimen de generación de caudales del modelo, toda vez que los meses en que se espera una mayor escorrentía continúan siendo los meses de mayo a octubre. Asimismo, dado un aumento en el valor del parámetro  $\Phi$  en el mencionado periodo, en comparación con el valor obtenido en la primera calibración, sumado a los aumentos en la variable de estado  $S_i$ , se verifica que mantiene el déficit de humedad en el suelo, oscilando en promedio alrededor de los mismos valores registrados en la calibración con el planteamiento original, pero, con una leve tendencia a presentar un menor valor, lo que significa que la precipitación requerida para generar almacenamiento y escorrentía durante los meses del periodo, es, aunque un poco menor, esencialmente similar para ambos planteamientos (modelo original y modelo con variantes). Esto último aportaría argumentos para suponer que la variación en el régimen de generación de caudales para el periodo mayo a octubre continuaría siendo, con algunas variaciones, el mismo en ambas calibraciones (calibración del modelo en su planteamiento original y calibración del modelo con variantes introducidas).

Sin embargo, no sucedería lo mismo para los meses de noviembre a marzo, donde dado una gran valor para el parámetro  $\Phi$ , el déficit de humedad es mayor.

Los valores óptimos de los parámetros de capacidad de almacenamiento, obtenidos en ambos procesos de calibración (calibración del modelo T en su planteamiento original y en su planteamiento modificado), se hallan por sobre los descritos por Carmona sobre la cuenca del embalse Guadalmellato, España, que sólo alcanza los 77 mm. La razón de que ésto sea así, radicaría en que la cuenca del Río Purapel presentaría un comportamiento distinto en comparación con la mencionada zona de la península Ibérica, lo que parece lógico ya que, no obstante presenta un clima semiárido, al igual que la VII Región de Chile, es una región muy distante y por ello muy poco comparable. Por otro lado, al comparar los valores obtenidos para  $\phi$  tanto para el planteamiento original, como para el planteamiento con variantes introducidas con respecto a los estudios efectuados sobre la cuenca del Río Purapel, se observa que todos los valores obtenidos se hallan por sobre el encontrado por Arrese en 1984, mientras que el valor del parámetro obtenido en el planteamiento original y el periodo húmedo del planteamiento con variantes introducidas, se encuentra algo por debajo por el encontrado por la Comisión Nacional de Riego y por el consorcio CEDEC. Sin embargo, la magnitud de la diferencia al parecer no sería tan significativa ya que en el peor de los casos se acerca sólo al 30%. Por otro lado, el valor de la capacidad máxima de almacenamiento de humedad para el periodo seco en la calibración con variantes introducidas, se encuentra por sobre todos los valores presentados por estudios anteriores. La razón de esto último, estaría dada por un incremento de la capacidad de los suelos de la cuenca de absorber y movilizar la humedad durante el periodo seco.

En suma, a la luz de la comparación de los valores mostrados por los estudios anteriores sobre la cuenca y los encontrados para el parámetro de capacidad máxima de humedad según el modelo T, no habría razones significativas para suponer que éstos últimos vulneran su consistencia física o presenten magnitudes excesivas.

### **Parámetro $\lambda$**

El parámetro  $\lambda$  determina la fracción del excedente que permanece en el suelo. Así, el valor alcanzado en la calibración del modelo, en su planteamiento original, de 0,537 denota que cerca de un 50% del agua disponible para escorrentía pasará a formar parte de ésta durante el mismo periodo o mes de cálculo en la simulación. El 50% restante, quedará almacenado y disponible para alimentar la escorrentía en los futuros periodos. En cambio, como resultado de la segunda calibración del modelo, estos es, el planteamiento con variantes introducidas, en la que se hace diferencia entre los parámetros de periodo seco y húmedo, se obtiene un valor para la fracción del excedente que permanece en el suelo de la cuenca de 0,594 y 0,831 para los periodos húmedo y seco respectivamente. Así, en comparación con el planteamiento original, la segunda calibración del modelo T, al presentar un elevado valor de  $\lambda$  para los meses secos, sumado a un mayor déficit de humedad para dicho periodo, estaría llevando al modelo a disminuir en los periodos secos no sólo la fracción de humedad del suelo que pasa a formar parte de la escorrentía, sino que además, la escorrentía.

Es importante señalar que los valores ajustados de  $\lambda$  en la primera calibración y para el periodo húmedo de la segunda calibración, se hallan muy cercanos al valor sugerido por Thornthwaite y Mather en 1955 (citado por Carmona, 1990), cuya magnitud alcanza el valor 0,5; pero, son disímiles con los empleados por Carmona en 1990.

#### **6.1.2. Análisis de los resultados de la calibración modelo Témez**

En las figuras que muestran las aportaciones específicas reales y aportaciones específicas simuladas a nivel medio y a nivel mensual para el modelo Témez, en el periodo 1968/69 a 1986/87, y según la calibración del modelo en su planteamiento original y en su planteamiento con variantes (figuras

N°10, N°11, N°12 y N°13), se aprecia cómo el modelo reproduce el nivel de escorrentía para cada uno de los meses durante el periodo de calibración. Así, la aportación calculada por el modelo, para cada uno de los meses de simulación, muestra magnitudes bajas para los meses en que se espera una menor escorrentía y aportaciones mayores para aquellos meses en que se espera un mayor caudal (meses húmedos).

### ***Parámetro $H_{max}$***

Para la calibración efectuada sobre el modelo original, el valor óptimo de la máxima capacidad de almacenamiento fue de 355,9 mm. Esto, expresado en volumen, equivale a suponer que la capacidad máxima de retención de agua de la capa superior del suelo de la cuenca en su estado de completa saturación, alcanza los 9.218 hectómetros cúbicos. En tanto, los valores que asume este parámetro en la segunda calibración del modelo, son 338,6 mm para el periodo húmedo, valor muy cercano al obtenido en planteamiento del modelo original, y 292 mm para los meses correspondientes al periodo definido como seco.

En general se aprecia que, al igual que para el modelo T, el modelo Témez presenta valores en la capacidad máxima de retención de humedad, mayores que los encontrados por Arrese en 1984. Asimismo, al comparar los valores de  $H_{max}$  hallados para el modelo Témez, se aprecia que éstos están por debajo de los determinados por la Comisión Nacional de Riego y el consorcio CEDEC. La mayor diferencia encontrada es del orden del 40%, y se da entre el valor de  $H_{max}$  según el consorcio CEDEC y el valor de  $H_{max}$  del periodo húmedo en la segunda calibración del modelo Témez (planteamiento con variantes). Sin embargo debe recordarse que los valores presentados por los mencionados estudios, sólo tienen un carácter referencial. Por tanto, al igual que para el modelo T, en el caso del modelo Témez, no hay mayores razones para suponer que los valores del parámetro de capacidad de almacenamiento de humedad presentados por él, en



sus dos planteamientos, estén alejados de la realidad, por lo que serían esencialmente correctos, al menos desde el punto de vista físico.

Por otro lado, una de las variables de estado que se ve fuertemente influenciada por el parámetro  $H_{max}$  es el excedente de humedad. Esta variable es importante porque en el modelo Témez influye decisivamente en el cálculo del almacenamiento de humedad y en el cálculo de la infiltración. Como resultado del valor asumido por  $H_{max}$  en la primera calibración, el excedente de humedad fluctúa, en términos promedios, desde 0,0 mm en el mes de enero a 76,8 mm en el mes julio. Del mismo modo, para el caso de la segunda calibración, esta variable presenta, en términos promedios, valores extremos de 0,0 mm para los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, y de 78,8 mm en el mes de julio. Tales resultados para la variable de estado en comento, resultan lógicos al analizar su esquema de cálculo, donde es posible apreciar que al depender ésta de  $H_{max}$ ,  $ETP_i$  y  $P_i$ , entre otros, los valores máximos se esperan para los meses de invierno donde la precipitación es mayor que en el resto del año y la evapotranspiración es más baja.

Asimismo, también es posible señalar, a juicio del investigador, que la abundante existencia de vegetación de tipo boscosa, que se presenta en gran parte del área superior de la cuenca del Río Purapel, ejercería un importante papel en la modificación de la capacidad de almacenamiento del suelo, elevando significativamente ésta, al favorecer procesos de retención superficial de agua en el momento de la precipitación, además de modificar la capacidad de absorción de agua del suelo gracias a la materia orgánica que sería incorporada constantemente por las formaciones vegetales.

Por otro lado, los valores de capacidad máxima de almacenamiento, para el modelo Témez, y el de humedad máxima para el modelo T, en general mostrarían a luz de los resultados y salvo una excepción, valores en una rango de los 290 a

los 550 mm aproximadamente. Tales valores se hallan dentro del rango inicial propuesto para la calibración, lo que reforzaría la idea de que la elección del valor de los parámetros ha sido acertada.

### ***Parámetro C***

El parámetro C señala indirectamente el umbral de escorrentía ( $P_0$ ), para el periodo considerado, esto es, aquel nivel mínimo de precipitación necesario para generar escorrentía superficial. En la primera calibración, el valor alcanzado para este factor, que en términos porcentuales equivale a un 1% de la diferencia entre la capacidad máxima de humedad y la humedad inicial del periodo, traería como consecuencia que los valores calculados para el umbral de escorrentía, periodo a periodo, serían bajos. Esto, en términos hidrológicos, equivale a que aún para aquellos eventos de precipitación de baja magnitud, la respuesta de la cuenca se traduciría en aportación, lo que se acentuaría lógicamente cuando la capa superior del suelo se halla saturada.

Aparentemente los valores alcanzados por el umbral de escorrentía, a lo largo de los meses simulados, cuyos valores máximos alcanzan los 3,6 mm, son pequeños en comparación con los comúnmente adoptados para Chile, que oscilan en torno a un valor medio de 30 mm. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, en la realidad, las precipitaciones durante cada periodo no ocurren en un solo evento, como ocurre en el modelo, ya que puede suceder que dentro del mismo mes, éstas se den forma fragmentada, dando de todos modos lugar a que gran parte del excedente infiltre y parte de él pase a formar escorrentía superficial. En este caso entonces, sería posible suponer que los valores de  $P_0$  que surgen en los cálculos del modelo, no serían sino un valor medio del comportamiento general del umbral de escorrentía durante el mes. Por otro lado, cabe recordar además, que 30 mm para el umbral de escorrentía, valor comúnmente usado para  $P_0$  en Chile,

es sólo un valor referencial, por lo que bien puede variar notablemente en las diferentes zonas del país.

En tanto, como resultado de la segunda calibración, el valor del parámetro calculado para los meses húmedos, mantiene el mismo valor que el parámetro calculado según la calibración sobre el modelo en su planteamiento original. Sin embargo, para los meses secos, el parámetro C alcanza el valor de 0,67. Este valor, equivalente a un valor porcentual significativamente mayor que en el caso de la calibración del modelo en su planteamiento original, y se traduce en umbrales de escorrentía mucho mayores en comparación con los meses de invierno. Estos resultados, a juicio del investigador, serían adecuados, ya que en el periodo húmedo, el suelo se halla más saturado de humedad, lo que estaría representado por el valor  $C_h$  calculado; en cambio, en los meses secos, en un suelo significativamente menos saturado, se darían umbrales de escorrentía mayores, los cuales serían satisfactoriamente calculados dado el valor hallado para  $C_s$ .

### ***Parámetro $I_{max}$***

Como resultado de la calibración del modelo Témez, en su planteamiento original, el valor del parámetro de capacidad máxima de infiltración alcanzó el valor máximo establecido como límite superior del intervalo de máximos valores admisibles, es decir, 1.000 mm.

Si bien el valor obtenido está dentro del margen aceptado como valor máximo admisible para el parámetro, resulta elevado al establecer una comparación entre éste resultado y el resultado obtenido por Estrela en 1988, sobre una subcuenca del Titicaca, que alcanza sólo los 210 mm. Sin embargo, el parámetro de capacidad máxima de infiltración, expresa la cantidad de agua que, por período, el suelo de la cuenca podría absorber, en el caso que se den

condiciones extraordinarias de baja humedad del suelo, y altas precipitaciones, los cuales son eventos extremos de muy baja probabilidad de ocurrencia conjunta.

Así, dado el esquema de cálculo del modelo, el cual relaciona la infiltración real calculada por periodo con el excedente y con la máxima capacidad de infiltración, para la calibración del modelo en base al planteamiento original, las máximas tasas de infiltración reales calculadas alcanzan sólo los 268 mm. Es decir, en ningún momento el modelo registra tasas mensuales de infiltración cercanas a los 1.000 mm, ya que éste sería sólo un valor límite cuyo alcance tendría muy baja probabilidad.

Como resultado de la segunda calibración, durante los meses húmedos, el parámetro en comento, presenta el mismo valor que en el caso anterior.

Estos resultados, obedecerían al hecho de que potencialmente, y en términos agregados, la composición y textura del suelo del sector redundarían en una capacidad de infiltración tal, que escasos eventos hidrológicos llevarían la infiltración real calculada a acercarse asintóticamente a la capacidad máxima de infiltración. Ésto, haría posible pensar que el diseño de obras que fomenten la permanencia de agua en el estrato superior para acrecentar la infiltración, tendría significativo éxito y baja probabilidad de colapsar. Sin embargo, es necesario aclarar que, ello no está comprobado, así como el valor real de la capacidad máxima de infiltración

Por otro lado, para los meses secos, el valor óptimo hallado es significativamente menor al encontrado en los casos comentados con anterioridad, alcanzando los 20,5 mm. Tal valor, sumado a los valores determinados para  $H_{max_s}$  y  $C_s$  (parámetros calculados para los meses secos, ya comentados con anterioridad), hace que, para el periodo seco comprendido entre noviembre a diciembre y enero a marzo, en términos promedios la infiltración calculada por el

modelo sea un poco menor que la calculada durante el mismo periodo según el modelo en su planteamiento original y significativamente menor que en los meses húmedos. Tales resultados serían bastante adecuados si se piensa que por un lado, la precipitación durante estos meses es significativamente más baja que durante el periodo húmedo, y por otro, las tasas de evapotranspiración potencial son mucho mayores en los meses secos, dejando poca oportunidad de infiltrar y alimentar como recarga al acuífero a la de por sí escasa cantidad de agua precipitada.

### ***Parámetro $\alpha$ .***

El valor del parámetro  $\alpha$ , coeficiente de agotamiento o constante de proporcionalidad que expresa la variación del caudal en el tiempo, como resultado de la calibración del modelo según su planteamiento original, muestra un valor de 0,014341, en contraste con un valor medio esperado de 0,016197, claramente dentro del rango establecido en el intervalo de confianza [0,005839 ; 0,026555], el cual fue obtenido según la metodología expuesta en el capítulo 4.

Para el caso de la segunda calibración los valores obtenidos son 0,01353 para el periodo húmedo, el cual aparecería muy similar al calculado con anterioridad para la primera calibración; y 0,00891 para los meses secos. Éste último, es menor que los mostrados por la primera calibración y por el valor obtenido en el periodo húmedo de la segunda calibración. La razón de esta disminución del parámetro para los meses secos, radicaría en que de esta forma, el modelo se ajustaría mejor para el mencionado periodo, en el cual, los niveles de aportación son significativamente menores que en los meses húmedos.

## **6.2. Análisis de resultados de la validación**

### **6.2.1. Análisis de los resultados de la validación del modelo T**

Las figuras N°14, N°15, N°16 y N°17, muestran la aportación real y la aportación calculada según el modelo T, en su planteamiento original y modificado. En ellas se puede apreciar que, para ambas alternativas, y tratándose de los meses de mayor escorrentía, el modelo tiende a subestimar el cálculo de la aportación. Esto puede corroborarse, al observar las figuras N°18, N°19, N°20 y N°21. Allí se aprecia que la distribución de los errores o diferencias entre la aportación real y la aportación calculada por el modelo, para ambos planteamientos, si bien se agrupa en torno a cero para los niveles de aportación bajos, no es así para niveles de aportación altos, donde los errores son en su mayoría negativos. En otras palabras, para caudales de mayor magnitud, se observa que el modelo subestimaría la aportación real.

### ***Medidas de bondad de ajuste***

#### **Test estadísticos a nivel general**

Para el caso de la calibración del modelo original, tanto para las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, como para la prueba U de Mann-Whitney, se rechaza la hipótesis de igualdad entre las distribuciones de las aportaciones específicas calculadas y reales, hallándose además un valor para el coeficiente de determinación de 0,73, lo que expresa que un 73% de la variabilidad de la aportación, estaría siendo explicada por el modelo. Si bien, en términos generales, esto es aceptable, no es posible afirmarlo a la luz de las restantes pruebas. Tal desajuste se verificaría fundamentalmente dada la escasa capacidad del modelo

de predecir satisfactoriamente datos de aportación, en especial los de carácter extremo.

Sin embargo, los resultados arrojados por la incorporación de cierta variabilidad temporal de los parámetros, mediante la segunda calibración, presentarían un mejor ajuste, ya que el coeficiente de determinación se eleva levemente a 0,75 y las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y U de Mann-Whitney no hallan evidencia para rechazar la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de la aportación real y la aportación simulada.

Resultados Test estadísticos a nivel anual.

El nivel de ajuste mostrado por el modelo en su planteamiento original, en términos de la esorrentía anual calculada, cuadro N°7, determina que para un nivel de significación para  $\alpha=0,05$  y según los test de Kolmogorov-Smirnov y U de Mann-Whitney, el modelo reproduciría satisfactoriamente la aportación específica total anual en la cuenca. Sin embargo, el coeficiente de determinación indica que sólo un 45% de su variabilidad es explicada, lo que podría eventualmente explicarse dada una baja capacidad del modelo de generar valores satisfactorios en los meses invernales, subestimando fuertemente la aportación específica total. Cabe señalar que, para este caso en particular (test a nivel anual), el coeficiente mencionado se calculó sólo en base a los años que dentro del periodo de calibración, contaban con sus series mensuales completas, para así acceder al cálculo del total anual (8 datos), lo que puede ser una importante causal de anulación de su significación estadística.

Las pruebas estadísticas sobre los resultados de la calibración del modelo en su planteamiento modificado muestran en general un mejor ajuste a nivel anual del modelo, en comparación con el planteamiento original. Ésto puede verificarse ya que si bien al igual que en el caso anterior, las pruebas de U de Mann-Whitney

y de Kolmogorov-Smirnov no rechazan la hipótesis nula, sus estadísticos de prueba, están más lejanos de la zona de rechazo. Del mismo modo, el coeficiente de determinación calculado, expresa que en este segundo caso, la variabilidad de la aportación anual es explicada en un 56%.

#### Test estadísticos a nivel mensual

##### Test de Kolmogorov-Smirnov

Los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov, mostrados en el cuadro N°8, muestran, que para el modelo en su planteamiento original, se rechaza la hipótesis nula para los meses de abril, mayo, junio, noviembre y marzo; verificándose por otro lado, un buen ajuste para el periodo de julio a octubre y diciembre a febrero.

Por otro lado, en los resultados para esta prueba a nivel mensual, del modelo en su planteamiento con variantes, sólo se rechaza la hipótesis nula para los meses de abril y junio, mejorando el ajuste en los meses de mayo, noviembre y marzo.

##### Test U de Mann-Whitney.

Para la calibración del modelo en su planteamiento original y con un nivel de confianza de 95%, la prueba U de Mann-Whitney determina que la bondad del ajuste para los meses de abril, mayo, junio y marzo es inadecuada, con valores bajos en sus estadísticos de prueba. No ocurre así con los restantes meses, donde no es posible rechazar la hipótesis de igualdad entre las distribuciones de las aportaciones específicas calculadas y reales, por lo que se asume un ajuste adecuado del modelo para dichos periodos.



Sin embargo, los resultados mejoran producto de las variantes introducidas al modelo, ya que para este caso, sólo se rechaza la hipótesis nula para los meses de junio, enero y febrero. Este resultado indica que el ajuste mejora en relación al caso anterior, para los meses de abril, mayo, y marzo; pero a su vez se ve empeorado para los meses de enero y febrero.

Coefficiente de determinación.

El cuadro N°10, muestra los valores del coeficiente de determinación calculado a nivel mensual. Para el planteamiento original y como resultado del cálculo del coeficiente  $R^2$ , se aprecia que para los meses de abril, mayo y noviembre a marzo, el valor calculado es cero, denotando una nula explicación del comportamiento de la aportación para dichos periodos. Para los meses de julio a octubre, la situación cambia sin llegar a un satisfactorio nivel de aceptación, salvo para el mes de octubre, donde se alcanza un  $R^2$  del 80%.

Por su parte, los resultados de la calibración del modelo en su planteamiento con variantes, muestran en general una mejor adecuación de sus resultados. Ésto está dado fundamentalmente por una mejora en el valor del coeficiente de determinación para los meses de mayo, junio, agosto y noviembre, bajando su valor para los meses de septiembre y octubre.

En ambos planteamientos, se observa que se obtienen valores muy disímiles entre los meses de mayor escorrentía y los meses de menor escorrentía, en cuanto al coeficiente de determinación calculado. La razón de valores tan extremos en los resultados del test, radicaría fundamentalmente, en las magnitudes de los valores de la variable aportación. Para valores simulados de aportación, de magnitud pequeña (meses secos), cualquier diferencia con respecto a los valores reales se traduce en una gran diferencia considerando las características de cálculo del estadístico. En otras palabras, y tomando como

ejemplo un caso en particular, en el mes de marzo de 1995, el valor real de aportación específica es de 1,03 mm, mientras que el valor calculado por el modelo en su planteamiento modificado, es de 4,10. En este caso, porcentualmente el modelo sobrestima el valor de la aportación en casi un 400%, mientras que en términos generales y considerando la escorrentía total anual de 201 mm, ambos valores serían prácticamente de la misma magnitud, ya que la diferencia es menor a 3 mm. Es esa la razón por la cual se estima que el ajuste expresado en porcentaje difiere tanto en los meses secos, con respecto a los meses lluviosos.

### **6.2.2. Análisis de resultados de la validación modelo Témez**

En las Figuras N°26 y N°27, que muestran la aportación media mensual para el periodo de calibración, se aprecia que para las mayores aportaciones, el modelo Témez tiende a subestimar el cálculo de la aportación. Esto puede verificarse en las figuras N°30, N°32, N°34 y N°36, donde para los meses de mayor escorrentía, las que se dan en algunos meses lluviosos, se tiende a subestimar el valor real de la aportación; ésto se comentará en forma más extensa y para ambos modelos, con posterioridad.

#### ***Medidas de bondad de ajuste***

Resultados Test estadísticos a nivel general.

El resultado de los test de Kolmogorov-Smirnov, y la prueba U de Mann-Whitney, aplicados sobre las aportaciones calculadas según el modelo Témez en su planteamiento original, determina que a un nivel de significación para  $\alpha=0,05$ ; no es posible rechazar la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de las aportaciones específicas calculadas y reales, por lo que en términos generales, el modelo podría considerarse adecuado. Por otro lado, el coeficiente  $R^2$  calculado

es de un 81%, con el consiguiente análisis de que la variabilidad de la aportación, estaría siendo explicada en un alto porcentaje por el modelo en cuestión.

Los resultados de la calibración del modelo en su planteamiento modificado, muestran por su parte, resultados muy similares tanto en las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, verificándose además una mejora, con respecto a los resultados de la calibración del modelo en su planteamiento original, en el estadístico de prueba calculado para la prueba U de Mann-Whitney y en el coeficiente de determinación.

#### Resultados Test estadísticos a nivel anual

En la primera calibración, a nivel anual y con una significación para  $\alpha=0,05$ ; cuadro N°12, el modelo Témez presenta según las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y U de Mann-Whitney, un adecuado comportamiento con respecto a la aportación específica anual real registrada en la cuenca. Sin embargo, el coeficiente de determinación indica que sólo un 48% de la variabilidad de la escorrentía total es explicada, lo que estaría determinado por una escasa capacidad del modelo de generar valores satisfactorios en los meses punta, subestimando fuertemente la aportación específica total. Al igual que en las pruebas del modelo T, el coeficiente mencionado se calculó sólo en base a los años con los que se contaba con sus series mensuales completas, determinando un número de datos igual a 8.

Por su parte, luego de las variantes introducidas al modelo (segunda calibración), se observa que las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y U de Mann-Whitney mantienen prácticamente los mismos resultados, y el coeficiente de determinación mejora levemente situándose en 0,52.

## Test estadísticos a nivel mensual

### Test de Kolmogorov-Smirnov.

Al examinar los resultados del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov en el Cuadro N°13, se aprecia que para la primera calibración y en los meses de agosto y marzo, el ajuste mostrado por el modelo no es satisfactorio a un nivel de significación de  $\alpha=0,05$ . Tales meses corresponderían a períodos en que el modelo reproduce deficientemente el comportamiento de la variable aportación. Para los restantes meses no es posible rechazar la hipótesis de igualdad en las distribuciones de datos simulados y reales, lo que en general concuerda con la prueba anterior U de Mann-Whitney.

Una de las razones por las cuales podría darse lo anterior, para el caso del mes de Agosto, es que en ese periodo, se estaría ante una situación en la cual las reservas y el nivel de aportaciones descienden bruscamente, demandando del modelo significativas variaciones en las relaciones de sus variables de estado, modificaciones que sólo se llevarían a cabo con un desfase, determinando una mala aproximación en el cálculo de la aportación presente y sólo subiendo significativamente el ajuste en el mes posterior. Las anteriores pruebas, evidencian algo muy similar, tanto en el coeficiente de determinación, con una baja explicación de la variable en el periodo (agosto), y en menor medida la prueba U de Mann-Whitney, que a pesar de aceptarse, muestra un menor valor en su estadístico calculado en comparación con los restantes meses que sí se aceptan.

Por otro lado, y producto de las variantes incorporadas al modelo en la segunda calibración, se mejora el ajuste para el mes de marzo, pero se mantiene cierta deficiencia del modelo en el mes de agosto. Tal desajuste en el mes de marzo, al igual que en el planteamiento original, se halla en el límite de la aceptación.

Test U de Mann-Whitney.

En el cuadro N°14, al observar los estadísticos U1 y U2, se verifica que para los meses de abril a diciembre, en el caso de la calibración del modelo en su planteamiento original, no es posible rechazar la hipótesis nula de igualdad entre las distribuciones de los datos reales de aportación y los datos calculados por el modelo. No ocurre lo mismo para los meses de enero a marzo, donde a un nivel de significación de 0,05; la prueba halla diferencias significativas entre las distribuciones de ambas variables.

Tal resultado obedecería a que el modelo en análisis reproduce adecuadamente el comportamiento de la variable aportación, en la gran mayoría de los meses a lo largo del año, pero no así en los meses más secos donde la variabilidad del componente aportación no es explicado satisfactoriamente.

Sin embargo, desajustes a nivel mensual como los observados para los períodos de enero a marzo, podrían eventualmente, considerarse despreciables, ya que en suma estos meses sólo representan un 2,4% de la escorrentía total anual.

En su segundo planteamiento, con variantes introducidas, el modelo Témez mejora el ajuste en el mes de marzo, pero, mantiene sus deficiencias en los meses de enero y febrero.

Coeficiente de determinación.

Para la calibración del modelo en su planteamiento original, los valores alcanzados por el coeficiente de determinación calculado para verificar el ajuste del modelo Témez (cuadro N°15), muestran grandes diferencias dependiendo del mes considerado. Así, en términos generales se aprecia que el ajuste calculado

para los meses lluviosos, presenta los mayores niveles de aceptación, llegando a obtener valores sobre el 70% para los meses de mayo, julio y octubre. No ocurre lo mismo con los periodos secos, dónde se encuentran valores nulos para  $R^2$ .

En la segunda calibración el ajuste varía levemente para los meses de mayo a octubre, experimentando un notable aumento en noviembre, donde de valores nulos, pasa a casi un 30%.

Al igual que como sucede con el cálculo del coeficiente de determinación a nivel mensual sobre las aportaciones calculadas por el modelo T, se dan valores extremos entre los meses de mayor escorrentía y los meses de menor escorrentía. Así, la razón de valores tan extremos en los resultados del test, radicaría fundamentalmente en las magnitudes de los valores de la variable aportación. Para valores simulados de aportación, de magnitud pequeña (meses secos), cualquier diferencia con respecto a los valores reales se traduciría en una gran diferencia considerando las características de cálculo del estadístico. En otras palabras, y tomando esta vez como ejemplo el caso particular del mes de marzo de 1995, el valor real de aportación específica es de 1,03 mm, mientras que el valor calculado por el modelo es de 0,054; porcentualmente el modelo subestima el valor de la aportación, llevándolo a un 5 % del real, mientras que la diferencia en milímetros de ambos valores es de menos de 1, por lo que, en términos generales y considerando la escorrentía total anual de 201 mm, ambos valores serían prácticamente de la misma magnitud.

## **6.3. Discusión de resultados**

### **6.3.1. Ajuste de los modelos**

Para ambos modelos, modelo T y modelo Témez, se aprecia un aumento en el nivel de ajuste, dada la modificación al planteamiento original, comentada y detallada en la fase metodológica. Así y en términos generales, en el caso de la segunda calibración, el modelo T y el Modelo Témez, aplicados sobre la cuenca del Río Purapel, explican un 75% y un 82%, respectivamente, de la variabilidad mensual del componente aportación. Es posible señalar que los resultados ofrecidos por el modelo Témez son más satisfactorios en comparación con los presentados por el modelo T, siendo en el caso de la segunda calibración donde se encuentran los mejores resultados, lo cual se presume es debido a la variabilidad temporal introducida a los parámetros,.

A nivel anual se observa que para la primera calibración el modelo Témez, dado el mejor valor alcanzado en sus estadísticos de prueba, presentaría mejores resultados en comparación con el modelo T. Sin embargo, producto de las variantes introducidas en el planteamiento de los modelos, se observa que en el caso de la segunda calibración, los resultados ofrecidos por el modelo T mejoran en forma más significativa que en comparación con el modelo Témez, razón por la cual, en estas circunstancias, éste resultaría más adecuado en el trabajo con aportaciones a nivel anual. Del mismo modo, es posible apreciar para ambos modelos, una mejora en el nivel de ajuste alcanzado, dada la variabilidad temporal en los parámetros que cada uno emplea. Cabe señalar en este punto que lo que se buscaba correspondía al ajuste mensual, por lo que si se quisiese hacer mínima la diferencia entre los valores de aportación real y aportación simulada para todo el año hidrológico, los parámetros de los modelos deberían recalcularse ya que no son estrictamente los mismos que optimizan el ajuste a nivel mensual. Así, realizando el ajuste a nivel anual, la gráfica de aportación mensual se

visualizaría como una curva más constante y cercana a los valores medios, no importando el mes del año para el cual se haga el cálculo de la escorrentía. Es necesario recordar una vez más, que el objetivo fundamental de la calibración fue el hallar aquellos parámetros que hacían mínima la diferencia entre aportaciones reales y calculadas, a nivel exclusivamente mensual, ya que para cálculos a escala temporal anual existen numerosos modelos ya mencionados en la revisión bibliográfica. Éstos, con una simpleza extrema en su aplicación, resultan más convenientes en esas circunstancias.

A nivel mensual, se aprecia que en general los resultados presentados por los modelos adolecerían de ciertas deficiencias en el cálculo de las aportaciones. Ésto, ya que en general para los meses secos, más el mes de abril, la variabilidad de la aportación no está siendo mínimamente explicada por los modelos; lo que sumado a que, para algunos meses como son mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, en el caso del modelo T y junio, agosto, septiembre y noviembre en el caso del modelo Témez, los resultados serían sólo medianamente satisfactorios, porque, si bien un cierto porcentaje significativo de la variación de la aportación real está siendo explicado, su valor no supera el 70%, considerado en general como satisfactorio tratándose de variables hidrológicas. Esto, sin perjuicio de que todo nuevo avance o mejora en la explicación del comportamiento de una variable, es en sí ya un logro satisfactorio. Por otro lado, se observa que en el caso de los meses de mayo, julio, y octubre, para el modelo Témez, los resultados se consideran satisfactorios, dada una explicación del componente aportación por sobre el 70%, además de la superación exitosa de las restantes pruebas estadísticas no paramétricas realizadas.

Haciendo frente a la problemática presentada por los modelos para calcular adecuadamente la aportación en los periodos secos, al observar las figuras N°19, N°23, N°31 y N°35, es posible apreciar que porcentualmente los errores de ambos modelos, en sus dos planteamientos en la estimación de la aportación, son



mayores para las aportaciones de menor cuantía, lo que a nivel mensual también puede apreciarse en las figuras N°21, N°25, N°33 y N°37. Ésto se debería a que, si bien en términos volumétricos el error es menor para los periodos en que se registra una menor aportación, los que en general corresponden a los meses de primavera y verano, una pequeña diferencia entre caudales observados y simulados se traduciría en una gran diferencia porcentual. Esta diferencia en términos porcentuales, comentada también anteriormente en la discusión de los resultados de los modelos a nivel mensual, puede ser causal de que en algunos meses secos, las pruebas estadísticas, en especial el coeficiente de determinación, muestren diferencias tales que hacen necesario rechazar la hipótesis de igualdad entre las distribuciones de aportaciones observadas y simuladas, y sin embargo, la diferencia en milímetros entre el valor estimado y el real sigue siendo aceptable tomando como referencia o criterio discriminante la diferencia en milímetros (figuras N°18, N°20, N°22, N°24, N°30, N°32, N°34 y N°36)

### **6.3.2. Causas de variabilidad de la aportación no explicada**

#### ***a) Omisión de sucesos hidrológicos relevantes al interior del sistema***

Se cree que una de las probables causas por las que los valores que asume la variable aportación no sean explicados en mayor proporción por los modelos, radicaría en el desconocimiento de ciertos procesos que se llevan a cabo en el sistema cuenca y que los modelos no abordan matemáticamente. En otras palabras, una posible fuente de error la constituiría la ausencia, en la concepción de los modelos, de rutinas matemáticas que ejemplifiquen uno o varios sucesos hidrológicos, que en el sistema cuenca ocurren y que influyen en los valores asumidos en una o más variables de estado. A modo de ejemplo puede citarse que los modelos estudiados en esta investigación no abordan algunos sucesos hidrológicos tales como:

- Intercambio de humedad entre las capas superficiales y subsuperficiales del suelo de la cuenca, tales como los afloramientos de agua.
- Intervenciones sobre el cauce con motivo de actividades humanas.
- Intervenciones y cambios en el uso de la tierra.
- Existencia de más de un acuífero al interior de la cuenca, los que no necesariamente tendrían un comportamiento similar dada su ubicación o rocas que lo constituyen.

### ***b) Agregación de los parámetros y variables de estado por los modelos hidrológicos***

Debe recordarse además el carácter agregado de los modelos en estudio, los que no consideran la variabilidad espacial de los sucesos hidrológicos que se llevan a cabo al interior del sistema. Esto, redundaría en un menor nivel de ajuste, ya que parámetros como capacidad máxima de humedad, capacidad de infiltración, o variables de estado como humedad del suelo, evapotranspiración, por mencionar algunos, no necesariamente son representativos de toda el área geográfica en estudio, pudiendo variar significativamente según la pendiente, profundidad del suelo, material parental, uso del suelo, etc.

### ***c) Error en la ejemplificación de los sucesos hidrológicos abordados por cada modelo***

Asimismo y constituyendo otra probable causa en complemento a la anterior, surge la duda sobre si los sucesos hidrológicos que cada modelo está abordando, son ejemplificados de la manera más correcta para la zona en estudio.

Esto, porque si bien los eventos de evapotranspiración, infiltración y generación de caudales, por mencionar algunos, han sido estudiados independientemente por numerosos investigadores en otras latitudes, algunos de los cuales se hallan ejemplificados en los modelos estudiados, la extrapolación de su planteamiento y resultados y su aplicación a una zona como el secano interior de la VII Región, podría determinar significativos errores en la simulación de los eventos del ciclo hidrológico que tienen lugar al interior del sistema cuenca y por ende, en los resultados esperados, en el caso que para esta zona en particular efectivamente se den distintas relaciones entre los componentes del modelo.

#### ***d) Variabilidad temporal de los eventos hidrológicos***

Otra fuente de error surgiría de que tales procesos o eventos en el sistema hidrológico, no ocurrirían con las mismas características a lo largo del año, debiendo para cada periodo o época en particular, determinar individualmente nuevos esquemas de cálculo que sean más representativos de los eventos ocurridos en el sistema. Si bien, esto en parte, ya se ha implementado en la segunda calibración de los modelos, se cree que se podría lograr un mejor ajuste aumentando el número de periodos en el año (periodo húmedo, subhúmedo, medio, seco, etc.). De no incorporarse estos aspectos en la concepción del modelo matemático, podrían fácilmente estarse cometiendo significativos errores en el cálculo de las variables de estado y por consiguiente, de la esorrentía.

### ***e) Errores provenientes de la información hidrológica***

Otra razón de las diferencias observadas y esta vez no concerniente a las características propias de cada modelo, podría atribuirse a la falta de precisión de algunos datos meteorológicos, entre otros la temperatura media mensual, necesaria para el cálculo de la evapotranspiración potencial, y que para efectos de este estudio, provino de la estación Pencahue, que sin embargo, es la más cercana en distancia y régimen hídrico a la cuenca del Río Purapel. Así, se estima que una red meteorológica más densa, con un parcelamiento espacial de la zona en unidades más homogéneas tratadas independientemente, sumado al parcelamiento temporal de los distintos periodos presentes en el año, incrementaría significativamente el nivel de ajuste de cada uno de los modelos, lo que por otro lado demandaría la necesidad de calibrar un mayor número de parámetros, con la consiguiente dificultad en la aplicación de los mismos.

### **6.3.3 Comparación entre el modelo T y el modelo Témez**

Al analizar los resultados de ambas calibraciones, se aprecia que el Modelo Témez presenta un mejor comportamiento en comparación con el Modelo T. Se cree que una de las razones más importantes e influyentes de tal resultado, radica en que el modelo Témez es más detallado y a la vez más complejo al reproducir ciertos eventos hidrológicos. Ésta capacidad del modelo Témez está fundamentalmente dada por un mayor número de parámetros. Tal condición tiene tanto connotaciones positivas como negativas. Así, entre los aspectos positivos cuenta el ya mencionado mayor nivel de ajuste, mientras que uno de los aspectos negativos, es que requiere la calibración de un mayor número de parámetros, por lo que sería un poco más dificultosa su comprensión y su uso práctico.

Puede además en este punto citarse a modo de comparación los procedimientos de cálculo para la generación de caudales, donde por un lado, el

modelo T no cuenta con las instancias o rutinas para generar escorrentía directa, sino que sólo produce aportación, en la forma de escorrentía subterránea, una vez que la capacidad de humedad del suelo se ha saturado. Ésto no ocurre con el modelo Témez, el cual genera escorrentía directa aún ante moderados eventos de precipitación y escorrentía subterránea, producto de la descarga del acuífero en el mismo periodo y en los sucesivos. Por otro lado, las ecuaciones de cálculo que generan la escorrentía subterránea en el caso del modelo T, son de tipo lineal, mientras que en el caso del modelo Témez, provienen de ecuaciones del tipo exponencial negativo, las que se estima serían más adecuadas para reproducir tales eventos.

Asimismo, los procedimientos de cálculo de la infiltración son distintos para cada uno de los modelos. Mientras, en el caso del modelo T, ésto se hace mediante un calculo lineal, en el modelo Témez, la infiltración se calcula mediante una ecuación exponencial.

En suma, y como resultado de la comparación entre los modelos estudiados, modelo T y modelo Témez, se estaría visualizando que, a medida que un modelo precipitación escorrentía suma mayores componentes en la reproducción del ciclo hidrológico, los resultados de su implementación a nivel mensual tenderían a mejorar.

## 7.0 CONCLUSIONES.

Las siguientes son las principales conclusiones que pueden extraerse de los resultados y discusión mostrados en el presente estudio.

- No obstante la abundancia de numerosas combinaciones en los valores de los parámetros que optimizan el ajuste de los modelos T y Témez, se ha logrado determinar para cada uno de ellos, una combinación en particular de parámetros que minimiza la distancia entre la aportación específica real de la cuenca del Río Purapel y la aportación específica calculada por cada modelo. En dicho proceso, ha sido fundamental el apoyo de la implementación informática de procedimientos de ajuste numérico, tales como el método de Newton, incorporado en la herramienta Solver, de la planilla electrónica Excel 97.
- Los Modelos de Simulación Integral de Cuenca, modelos T y Témez, calibrados en el presente estudio, en general presentan aceptables niveles de ajuste. Así, el modelo T explica un 73% de la variabilidad de la aportación ocurrida en la cuenca, mientras el modelo Témez explica un 81% de ella. A nivel mensual los resultados muestran que para los meses secos el ajuste no es adecuado, siendo en sólo algunos de los meses lluviosos, en el caso del modelo Témez, considerado como aceptable.
- El modelo Témez, que considera la calibración de 8 parámetros, dada la incorporación de variabilidad temporal a éstos, calibrado para la Cuenca del Río Purapel, Estación Nirivilo, VII Región, se presentaría como más adecuado y recomendable que el modelo T a la hora de realizar la estimación de aportaciones a nivel mensual en esta unidad geográfica, para los meses de mayo, julio, y octubre (los que suman un 44% de la escorrentía anual),

pudiendo emplearse además en los meses de junio, agosto, septiembre y noviembre, bajo la condición de que tales resultados sólo entregan un marco referencial respecto del comportamiento de la variable aportación. El modelo T por su parte, no ofrecería tal confiabilidad.

- Para la cuenca del río Purapel, si bien en el presente estudio sólo dos Modelos de Simulación Integral de Cuenca han sido probados, se cree que a la luz de la tendencia de los resultados, los modelos que incorporen más componentes del ciclo hidrológico, más variables de estado, más parámetros a calibrar y una desagregación de los mismos, mostrarían los ajustes más adecuados.
- Si se considera a los modelos matemáticos como herramientas fundamentales en la evaluación del ciclo hidrológico y teniendo presente que entre éstos, los Modelos de Simulación Integral de Cuenca poseen la facultad de estimar series de aportaciones a partir de sólo datos meteorológicos, resulta de gran utilidad el contar con modelos ajustados los cuales permitan completar series históricas de caudales y además, puedan servir de base en la planificación e implementación de acciones tendientes a una gestión adecuada a nivel de cuenca. Así, el Modelo Témez, para el caso de los meses de mayo, julio y octubre, constituiría una herramienta de gestión, la cual serviría de apoyo para llevar a cabo, en una escala temporal mensual, la evaluación del ciclo hidrológico a fin de abordar desde nuevas perspectivas el problema del recurso hídrico.

## 8.0 RECOMENDACIONES

Las siguientes son algunas recomendaciones que se formulan con la finalidad de mejorar los resultados en las futuras aplicaciones de los modelos calibrados en este estudio y sus posibles variantes.

- Incorporar en futuras modelaciones y aplicaciones de los modelos de simulación integral de cuenca, modelo T y modelo Témez, la mayor cantidad de sucesos hidrológicos posibles, siendo necesario agregar variantes y nuevos parámetros a los modelos, de modo que simulen de mejor forma los eventos hidrológicos al interior del sistema.
- Incorporar, en futuras aplicaciones de los modelos, parámetros o componentes que incorporen en la simulación la variabilidad espacial y temporal, de las variables de estado. Esto, con el fin de flexibilizar el comportamiento de los modelos, haciendo posible su adecuación según una desagregación espacial de la hoya, discriminando distintas unidades homogéneas en base a características relevantes, tanto para los periodos secos, como para los periodos húmedos.
- Emplear en la implementación de los modelos, dentro de lo posible, series de datos meteorológicos que sean representativos de la zona a estudiar. Por esta razón se sugiere un aumento en la densidad de la red meteorológica de la Región, a fin de otorgar mayor confiabilidad en el proceso y uso de la información que de ella se obtenga.
- Potenciar y masificar el uso de Modelos de Simulación Integral de Cuenca, para que en base a metodologías probadas y factibles de ser implementadas, poder planificar y realizar una mejor gestión de los Recursos Hídricos en la VII Región.



## BIBLIOGRAFÍA

**ARRESE, J.A.** 1984. "Generación de gastos medios mensuales. Simulación hidrológica con series estocásticas de precipitaciones diarias". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 112 p.

**CARMONA A., AYUSO J. y AYUSO J.L.** . 1990. " Estudio de algunos Modelos Determinísticos Lluvia-Escorrentía. Aplicación a una cuenca Real". Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente. Ingeniería civil N° 77. Madrid, España. pp. 13-28.

**CARO, J.** 2001. "Modelación Matemática de Caudales Recesivos para la Cuenca del Río Purapel, Estación Nirivilo", Memoria en elaboración para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca.

**COMISION NACIONAL DE RIEGO,** 1978. Estudio integral de riego de la cuenca del Río Mataquito, Prefactibilidad. Hidrología. Comisión Nacional de Riego, República de Chile. 401 p.

**CONSORCIO CEDEC - D.O.H.** 1992. "Análisis de riego zonas costeras VI, VII, VIII y IX Regiones". Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.

**CHOW V.T., MAIDENT D. y MAYS L.** 1994. "Hidrología aplicada". McGraw-Hill Interamericana S.A. Santefé de Bogotá, Colombia. 584 p.

**ESTRELA, T.** 1988. " Los Modelos de Simulación Integral de Cuenca y su utilización en estudios de Recursos Hídricos". Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente. Ingeniería Civil N° 72. Madrid, España. pp.83-95.

**FERNANDEZ B. y SALAS J.** 1995. "Transferencia de información hidrológica por correlación". En: Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Volumen 10, N°1. 56 p.

**GUZMÁN, J. F..** 1994, " Modelación Matemática de Caudales Recesivos para la Cuenca del Río Achibueno, Estación la Recova ", Tesis para optar al grado de licenciado en Ciencias Forestales. Universidad de Talca. Talca,. 62 p.

**KINCAID D. y CHENEY W.** 1994. "Análisis numérico, las matemáticas del cálculo científico". The University of Texas in Austin. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, Delaware, E.U.A. 718 p.

**LAW, A. y KELTON, D.** 1991. "Simulation Modeling and Analysis ". McGraw-Hill, New York. U.S.A. 759 p.

**LINSLEY, R., KOHLER, M. y PAULHUS. J.** 1988. "Hidrología para Ingenieros". McGraw-Hill/Interamericana de México. México, 384 p.

**LLAMAS, J.** 1993. "Hidrología General, Principios y Aplicaciones"., Servicio Editorial Universidad del País Vasco. España. 635 p.

**MADDALA G. S.** 1985. "Econometría". Universidad de Florida. McGraw-Hill/Interamericana de México. México, 546 p.

**MASON R. y LIND D.** 1995. "Estadística para administración y economía". The University of Toledo, Ohio. U.S.A. Editorial Alfaomega. México. 911 p.

**PIZARRO, R.** 1996. "Análisis Comparativo de Modelos Matemáticos Precipitación-Escorrentía en Cuencas de la España Peninsular". Tesis para optar al grado de Doctor. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 277 P.

**PIZARRO R., GONZÁLEZ P., WITHERSHEIM M., SAAVEDRA J. y SOTO C..** 1993. "Elementos Técnicos de Hidrología III". Editorial Universidad de Talca, Talca,. 133 p.

**RAMIREZ, C.** 1998. "Análisis comparativo de modelos para la estimación de precipitaciones anuales en periodos extremos". Tesis para optar al grado de licenciado en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Chile. 78 p.

**RUIZ, J. M., ESTRELA, T. y QUINTAS, L.** 1996. "Modelización hidrológica distribuida en el proyecto Guadiana. El Modelo SIMPA 1.0 (Sistema integrado modelación Precipitación-Aportación)".

**STELL R. y TORRIE J.** 1980. "Principles and procedures of statistics". McGraw-Hill Book Company. New York. U.S.A. 633 p.

**THYER M., KUCZERA G. y BATES B.** 1999. "Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated abbealing algorithms". en Water resources research. Vol 35, N°3. Marzo 1999. Pag. 767-773.

**UNESCO-ROSTLAC.** 1982. "Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur", UNESCO-ROSTLAC. Montevideo, Uruguay. 130 p.

**UNESCO-ROSTLAC.** 1986. "Manual: Agua, Vida y Desarrollo". Tomo 1, Estrategias. INCA Editorial. Mendoza, Argentina. 105 p.

**YE W., BATES B.C., VINEY N.R., SIVAPALAN M. y JAKEMAN A.J.** 1997. "Performance of Conceptual Rainfall-Runoff Models in low Yielding Ephemeral Catchments". En Water Resources Research, volumen 33 número 1. pag. 153-166., Centre for Water Research Reference ED 912 MS. <http://www.cwr.uwa.edu.au/cwr/publications/papers/912.html>

# APÉNDICES

## APÉNDICE Nº1

**Evapotranspiración potencial (mm), estación Pencahue (Método de Thornthwaite y Mather).**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1986 / 87	*	*	27	*	36	40	72	77	118	129	111	99
1987 / 88	44	27	22	20	24	34	60	94	119	124	112	87
1988 / 89	52	28	22	17	22	33	56	91	112	129	112	84
1989 / 90	51	30	22	14	22	32	56	99	112	125	95	78
1990 / 91	52	32	22	23	31	38	53	77	103	114	101	80
1991 / 92	53	36	24	24	28	41	57	82	99	127	95	90
1992 / 93	46	33	21	17	29	42	57	84	108	130	109	94
1993 / 94	54	31	24	19	31	37	59	76	113	126	100	87
1994 / 95	54	34	30	22	23	45	63	86	114	122	94	81
1995 / 96	55	35	27	17	27	39	57	84	124	113	98	87
1996 / 97	51	38	21	27	36	43	63	97	*	130	100	93
1997 / 98	84	63	47	43	56	66	81	*	*	*	*	*
Valor medio	54	35	26	22	30	41	61	86	112	125	102	87
Coef. de Variación (%)	0.20	0.28	0.29	0.36	0.31	0.22	0.13	0.10	0.07	0.05	0.07	0.07

(\*) información faltante.

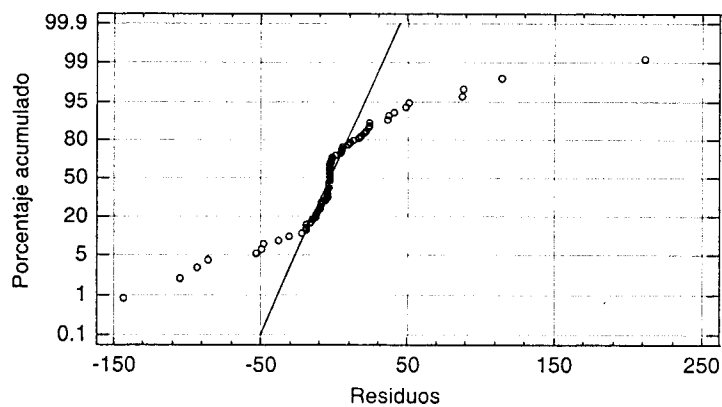
## APÉNDICE N°2

### Regresión precipitaciones Constitución - Faro Carranza

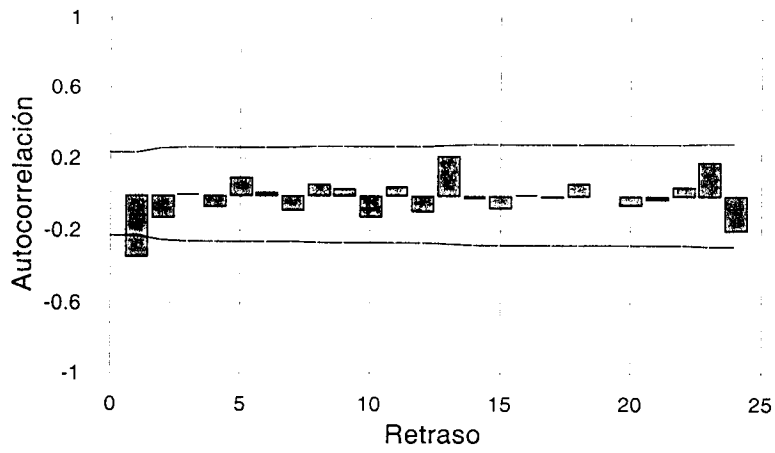
Variable dependiente	Precipitación Constitución
Variable Independiente	Precipitación Faro Carranza
Constante	2,93669
Pendiente	0,818839
Coeficiente de correlación	0,746735
Error estándar de la estimación	45,542

### Regresión precipitaciones Constitución - Nirivilo

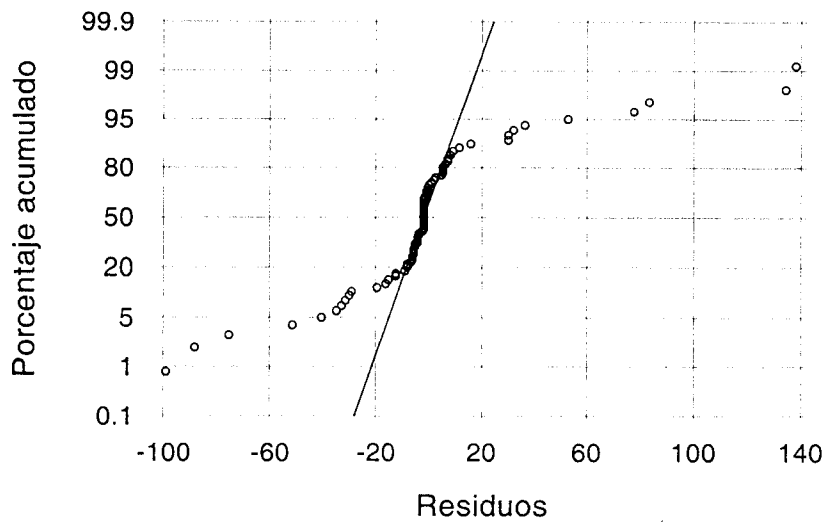
Variable dependiente	Precipitación Constitución
Variable Independiente	Precipitación Faro Carranza
Constante	1,69271
Pendiente	0,86315
Coeficiente de correlación	0,853161
Error estándar de la estimación	35,2736



Prueba de normalidad de residuos regresión Constitución – Faro Carranza.



**Test de autocorrelación residuos regresión Constitución – Faro Carranza**



**Prueba de normalidad de residuos regresión Constitución – Nirivilo.**

### APÉNDICE N°3

Parámetros y nivel de ajuste método de completación de precipitaciones por correlación con estaciones vecinas.

	<b>Regresión Constitución-Faro Carranza.</b>	<b>Regresión Constitución-Nirivilo.</b>
<b>Intercepción</b>	3,00307	-2,58247
<b>Pendiente</b>	0,81335	1,00826
<b>r</b>	0,72979	0,87834

Producto de la aplicación del método de completación por correlación con estaciones vecinas, se obtuvo un coeficiente de determinación cuyo valor resultó ser  $R^2=0,7466$ .



## APÉNDICE N°4

**Cuadro N° 19. Aportaciones reales (Hm<sup>3</sup>), cuenca Río Purapel. (Periodo 1987/88 – 1998/99).**

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1968 / 69	47	75	106	137	171	93	86	36	3	0	*	*
1969 / 70	*	190	2862	1379	1580	1039	343	127	24	8	7	16
1970 / 71	26	121	1091	2231	1165	327	249	104	54	29	12	16
1971 / 72	*	169	1356	1500	1594	591	370	135	107	*	19	43
1972 / 73	44	1018	*	*	*	1744	1058	552	260	147	106	110
1973 / 74	104	*	*	*	*	*	544	215	142	131	*	3
1974 / 75	16	670	581	1580	1918	*	*	130	110	46	36	43
1975 / 76	88	445	1804	4666	1377	490	319	168	91	*	17	*
1976 / 77	65	131	1273	447	501	562	1002	355	139	*	*	*
1977 / 78	*	*	*	4374	2917	664	723	280	137	86	60	78
1978 / 79	80	110	316	4390	833	1112	496	402	150	72	46	43
1979 / 80	62	179	148	1824	1778	1045	455	218	123	40	27	59
1980 / 81	599	2263	2545	2938	1789	816	541	280	134	104	70	88
1981 / 82	171	2992	1545	1570	1012	793	391	176	48	88	56	64
1982 / 83	80	1436	3725	3503	2445	2823	1588	664	348	244	179	158
1983 / 84	163	300	1960	2791	1184	897	445	280	201	179	123	70
1984 / 85	75	683	871	7700	2011	1970	1045	609	321	169	65	86
1985 / 86	135	378	531	1058	854	617	402	215	107	56	51	62
1986 / 87	298	3704	5850	1278	2038	840	720	899	327	*	24	104
1987 / 88	280	*	290	6490	4328	1843	1379	425	206	91	48	134
1988 / 89	166	217	907	2424	3546	713	479	295	166	94	58	67
1989 / 90	86	137	482	1642	1752	500	233	106	59	13	17	174
1990 / 91	130	268	207	348	313	565	271	93	64	51	*	*
1991 / 92	13	2105	2354	2858	1240	1306	833	246	166	70	48	59
1992 / 93	65	4832	5262	2022	1286	1553	651	277	107	32	19	21
1993 / 94	200	581	2281	1845	1240	537	324	192	204	64	31	51
1994 / 95	130	327	814	2314	699	565	196	54	59	32	7	27
1995 / 96	106	88	697	3447	1923	630	404	223	75	32	114	155
1996 / 97	54	96	407	916	1361	451	209	117	48	5	*	*
1997 / 98	189	557	4629	911	1655	2061	2429	391	236	121	106	88
1998 / 99	145	244	163	86	86	181	29	5	0	*	*	*

(\*) Información faltante.

## APÉNDICE N°5

Restricciones Modelo T, Cuenca Río Purapel.

<b>Parámetro</b>	$\Phi$	$\lambda$
Límite inferior	0	0,5
Límite superior	550	0,75

## APÉNDICE N°6

Restricciones Modelo Témex, Cuenca Río Purapel.

<b>Parámetro</b>	$\Phi$	<b>C</b>	$I_{\max}$	$\alpha$
Límite inferior	0	0,01	0	0.005839
Límite superior	550	1,00	1.000	0.026555

## APÉNDICE N°7

Resultados ajuste de la función de distribución de probabilidad del tipo Gamma de dos parámetros al coeficiente de la rama de descarga ( $\alpha$ ).

$\alpha$ /día	F(x) observado	F(x) calculado según distribución Gamma	
0,005	0,048	0,063	
0,005	0,095	0,071	
0,006	0,143	0,109	
0,008	0,190	0,200	
0,009	0,238	0,252	
0,009	0,286	0,264	
0,009	0,333	0,267	
0,011	0,381	0,373	
0,012	0,429	0,388	
0,012	0,476	0,414	
0,014	0,524	0,527	
0,015	0,571	0,585	
0,018	0,619	0,676	
0,018	0,667	0,683	
0,019	0,714	0,725	
0,019	0,762	0,732	
0,023	0,810	0,827	
0,025	0,857	0,877	
0,031	0,905	0,947	
0,036	0,952	0,976	
<b>Media (<math>\alpha</math>)</b>	<b>Varianza (<math>\alpha</math>)</b>	<b><math>\theta_1 = \text{media}(\alpha)^2 / \text{Varianza}(\alpha)</math></b>	<b><math>\theta_2 = \text{Varianza}(\alpha)^2 / \text{media}(\alpha)</math></b>
0,015	0,000072	3,215327	0,00472522
Coeficiente de determinación			0,987
Test Kolmogorov-Smirnov			Se acepta $H_0$

## APÉNDICE N°8

Precipitaciones areales medias (mm), cuenca Río Purapel. (Periodo 1968/69–1998/99).

	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
1968 / 69	24	4	60	54	39	43	47	18	33	0	0	0
1969 / 70	68	153	374	151	74	53	36	7	0	0	0	12
1970 / 71	14	120	265	244	23	54	12	5	0	14	0	0
1971 / 72	51	105	38	155	115	35	36	0	1	0	0	38
1972 / 73	12	297	334	168	218	164	72	1	0	0	0	11
1973 / 74	64	200	106	215	21	3	48	0	1	9	0	1
1974 / 75	0	221	527	49	12	31	13	30	18	0	16	1
1975 / 76	48	148	184	348	37	14	21	20	8	5	0	0
1976 / 77	0	66	187	52	83	95	154	42	1	14	0	3
1977 / 78	25	124	190	363	127	26	89	24	0	0	7	0
1978 / 79	1	76	154	400	21	115	22	112	0	5	6	0
1979 / 80	57	79	21	318	116	96	1	41	37	0	56	4
1980 / 81	275	237	267	216	70	56	0	13	24	9	6	20
1981 / 82	103	375	37	102	65	52	3	0	0	18	0	13
1982 / 83	10	336	322	269	172	186	74	0	0	16	4	0
1983 / 84	19	122	278	180	127	45	1	0	1	8	7	4
1984 / 85	19	286	161	495	126	156	74	2	0	2	0	8
1985 / 86	37	132	131	188	18	46	34	9	0	4	0	22
1986 / 87	135	305	291	62	164	16	14	107	0	0	6	34
1987 / 88	15	135	90	479	187	86	20	0	0	0	0	70
1988 / 89	7	40	197	203	192	56	6	14	0	0	0	3
1989 / 90	1	25	137	183	100	30	12	0	21	7	0	114
1990 / 91	30	54	42	110	33	81	39	15	0	24	0	0
1991 / 92	28	319	176	133	58	91	72	11	38	0	5	38
1992 / 93	64	513	342	35	134	76	7	6	2	0	0	0
1993 / 94	91	197	190	78	82	6	12	1	7	0	3	3
1994 / 95	102	96	151	259	4	110	75	2	3	0	0	0
1995 / 96	115	3	125	308	31	20	32	0	0	0	6	0
1996 / 97	26	38	139	103	127	17	12	0	1	5	6	2
1997 / 98	98	118	306	79	78	115	152	41	4	0	0	0
1998 / 99	48	90	94	16	24	45	0	0	0	8	6	12

## APÉNDICE N°9

**Aportaciones calculadas modelo T, planteamiento original (Hm<sup>3</sup>). (Periodo 1968/69 – 1998/99).**

	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
1968 / 69	12	6	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0
1969 / 70	0	0	2426	2854	2056	1249	670	360	193	104	56	30
1970 / 71	16	9	610	2988	1603	933	501	269	144	77	42	22
1971 / 72	12	6	3	2	338	181	97	52	28	15	8	4
1972 / 73	2	1	3590	3683	4222	3747	2143	1150	617	331	178	95
1973 / 74	51	27	15	2253	1209	649	348	187	100	54	29	15
1974 / 75	8	4	4839	2921	1567	841	451	242	130	70	37	20
1975 / 76	11	6	51	3944	2191	1176	631	339	182	97	52	28
1976 / 77	15	8	4	2	1	571	1415	759	407	219	117	63
1977 / 78	34	18	10	4051	3328	1786	1109	595	319	171	92	49
1978 / 79	26	14	8	3341	1793	1749	938	503	270	145	78	42
1979 / 80	22	12	6	1190	1662	1556	835	448	240	129	69	37
1980 / 81	20	2149	4053	4507	2892	1733	930	499	268	144	77	41
1981 / 82	22	1536	957	1476	1211	778	417	224	120	65	35	19
1982 / 83	10	271	3698	4951	4353	4083	2341	1256	674	362	194	104
1983 / 84	56	30	886	2368	2432	1360	730	392	210	113	61	32
1984 / 85	17	9	1289	6372	4571	3831	2206	1184	635	341	183	98
1985 / 86	53	28	15	1238	664	357	191	103	55	30	16	9
1986 / 87	5	1044	3749	2497	2942	1579	847	455	244	131	70	38
1987 / 88	20	11	6	4395	4235	2811	1508	809	434	233	125	67
1988 / 89	36	19	10	1079	2516	1527	820	440	236	127	68	36
1989 / 90	20	10	6	3	697	374	201	108	58	31	17	9
1990 / 91	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1991 / 92	0	41	1821	2307	1572	1444	899	483	259	139	75	40
1992 / 93	21	2981	5397	3047	2875	1969	1057	567	304	163	88	47
1993 / 94	25	14	1083	1254	1297	696	374	200	108	58	31	17
1994 / 95	9	5	3	2330	1250	1199	807	433	232	125	67	36
1995 / 96	19	10	6	2045	1109	595	319	171	92	49	26	14
1996 / 97	8	4	2	1	188	101	54	29	16	8	4	2
1997 / 98	1	1	1579	1531	1393	1637	1960	1052	564	303	162	87
1998 / 99	47	25	13	7	4	2	1	1	0	0	0	0

## APÉNDICE N°10

**Aportaciones calculadas modelo Témez, planteamiento original (Hm<sup>3</sup>). (Periodo 1968/69 – 1998/99).**

	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
1968 / 69	123	72	122	145	120	113	123	71	62	34	17	11
1969 / 70	106	570	3084	1799	1224	836	574	309	182	101	51	35
1970 / 71	22	331	1659	2405	970	689	408	220	130	75	38	25
1971 / 72	70	288	182	707	760	430	303	162	96	53	27	47
1972 / 73	27	1674	3132	2247	3144	2659	1645	856	504	280	141	95
1973 / 74	140	901	707	1738	738	397	327	174	103	58	29	19
1974 / 75	10	984	5550	1059	596	380	232	158	101	56	32	21
1975 / 76	61	510	1054	3530	1078	592	374	216	128	71	36	24
1976 / 77	13	109	806	469	500	579	1102	573	337	190	96	63
1977 / 78	47	367	1015	3647	1785	917	956	517	304	169	85	56
1978 / 79	30	151	612	3723	905	1055	592	756	409	228	114	76
1979 / 80	110	209	118	2071	1127	952	532	343	238	132	124	81
1980 / 81	1416	1937	2900	3153	1693	1168	671	369	236	132	67	51
1981 / 82	252	2749	782	876	679	501	291	157	92	56	28	21
1982 / 83	12	2066	3089	3604	2864	3031	1756	912	537	304	153	101
1983 / 84	61	368	1812	1765	1577	907	530	285	168	94	47	31
1984 / 85	23	1571	1267	6283	1942	2258	1466	759	447	249	125	83
1985 / 86	73	423	634	1352	612	423	296	161	95	53	26	26
1986 / 87	386	2095	2943	1340	2053	895	541	725	391	217	109	96
1987 / 88	55	429	421	4803	2251	1416	823	443	261	145	73	148
1988 / 89	78	82	837	1473	1884	983	574	316	186	103	52	34
1989 / 90	19	24	416	1057	842	471	283	152	98	55	28	279
1990 / 91	157	161	127	372	223	300	216	120	71	49	25	16
1991 / 92	25	1897	1470	1468	953	961	830	437	309	171	86	86
1992 / 93	134	4356	3719	1250	1669	1189	670	362	213	119	60	39
1993 / 94	196	942	1357	924	840	433	261	140	83	46	23	15
1994 / 95	229	352	750	2191	793	919	766	399	235	131	66	43
1995 / 96	298	161	432	2288	794	445	303	162	96	53	27	18
1996 / 97	22	46	442	526	779	389	234	126	74	41	21	14
1997 / 98	212	446	2229	1058	891	1085	1577	797	468	260	131	87
1998 / 99	96	242	342	199	126	122	71	38	22	13	7	6

## APÉNDICE N°11

**Aportaciones calculadas modelo T, planteamiento modificado (Hm<sup>3</sup>). (Periodo 1968/69 – 1998/99).**

	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
1968 / 69	11	6	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0
1969 / 70	0	0	2164	2645	2032	1335	793	197	163	136	113	94
1970 / 71	187	111	862	2841	1689	1068	635	157	131	109	90	75
1971 / 72	149	89	53	31	602	358	213	53	44	36	30	25
1972 / 73	50	192	3356	3532	4065	3713	2323	576	478	397	330	274
1973 / 74	547	325	502	2329	1384	823	489	121	101	84	70	58
1974 / 75	115	68	4463	2937	1746	1038	617	153	127	106	88	73
1975 / 76	145	86	353	3638	2227	1324	787	195	162	135	112	93
1976 / 77	185	110	65	39	144	654	1359	337	280	232	193	161
1977 / 78	320	190	416	3830	3287	1954	1293	320	266	221	184	153
1978 / 79	304	181	108	3276	1947	1846	1097	272	226	188	156	130
1979 / 80	258	154	91	1473	1771	1634	971	241	200	166	138	115
1980 / 81	294	2295	3903	4361	3007	1945	1156	286	238	198	164	137
1981 / 82	272	1791	1180	1544	1284	876	521	129	107	89	74	61
1982 / 83	123	519	3418	4629	4236	4047	2537	629	522	434	361	300
1983 / 84	597	355	1289	2423	2457	1508	896	222	185	153	127	106
1984 / 85	211	125	1419	5815	4465	3861	2426	601	499	415	345	287
1985 / 86	571	340	202	1541	916	544	324	80	67	55	46	38
1986 / 87	76	1280	3552	2536	2910	1730	1028	255	212	176	146	121
1987 / 88	242	144	86	4166	4118	2919	1735	430	357	297	247	205
1988 / 89	409	243	144	1277	2454	1614	959	238	197	164	136	113
1989 / 90	226	134	80	114	796	473	281	70	58	48	40	33
1990 / 91	66	39	23	14	8	5	3	1	1	0	0	0
1991 / 92	1	332	1772	2217	1611	1482	990	245	204	169	141	117
1992 / 93	233	3146	5193	3220	2999	2156	1281	317	264	219	182	151
1993 / 94	302	179	1328	1378	1366	812	483	120	99	83	69	57
1994 / 95	114	68	40	2295	1364	1272	899	223	185	154	128	106
1995 / 96	212	126	75	2151	1289	766	455	113	94	78	65	54
1996 / 97	107	64	38	23	418	249	148	37	30	25	21	17
1997 / 98	35	21	1646	1577	1438	1633	1917	475	395	328	273	226
1998 / 99	451	268	160	95	56	34	20	5	4	3	3	2



## APÉNDICE N°12

Aportaciones calculadas modelo Témez, planteamiento modificado (Hm<sup>3</sup>). (Periodo 1968/69 – 1998/99).

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1968 / 69	117	72	122	148	125	118	128	47	36	26	17	14
1969 / 70	114	568	3064	1812	1264	884	622	229	173	125	82	68
1970 / 71	75	359	1663	2412	1011	734	452	167	127	92	60	50
1971 / 72	109	310	200	715	775	454	328	121	92	66	43	36
1972 / 73	40	1659	3118	2263	3156	2674	1695	610	462	334	218	181
1973 / 74	281	977	762	1774	786	441	363	133	101	73	48	40
1974 / 75	42	988	5525	1100	646	422	267	99	75	54	35	29
1975 / 76	80	516	1057	3522	1115	639	417	154	117	84	55	46
1976 / 77	49	130	809	485	519	598	1117	347	263	190	124	103
1977 / 78	122	409	1035	3647	1818	971	1001	351	266	192	126	104
1978 / 79	111	200	636	3717	943	1090	635	580	157	113	74	61
1979 / 80	134	225	132	2057	1141	980	571	211	160	116	76	63
1980 / 81	1417	1939	2909	3167	1746	1226	735	272	206	149	97	81
1981 / 82	307	2755	818	914	719	539	326	121	91	66	43	36
1982 / 83	39	2054	3081	3605	2884	3038	1808	651	492	356	233	193
1983 / 84	212	457	1850	1802	1623	963	586	217	164	119	78	64
1984 / 85	75	1581	1286	6266	1987	2281	1512	542	410	297	194	161
1985 / 86	199	497	679	1382	653	461	329	121	92	66	43	36
1986 / 87	403	2088	2942	1379	2086	950	597	664	126	91	59	49
1987 / 88	56	424	425	4776	2265	1453	877	325	246	178	116	97
1988 / 89	103	99	836	1475	1898	1021	621	230	174	126	82	68
1989 / 90	73	57	430	1064	862	501	313	116	88	63	41	34
1990 / 91	56	102	98	354	220	302	224	83	63	45	30	25
1991 / 92	42	1881	1475	1493	997	1002	869	310	235	170	111	92
1992 / 93	185	4342	3722	1302	1711	1234	725	268	203	147	96	80
1993 / 94	256	971	1378	959	881	475	297	110	83	60	39	33
1994 / 95	252	368	760	2193	824	949	799	287	217	157	103	85
1995 / 96	361	206	455	2286	823	480	335	124	94	68	44	37
1996 / 97	52	64	447	535	791	412	258	95	72	52	34	28
1997 / 98	231	458	2222	1080	928	1118	1598	609	382	277	181	150
1998 / 99	209	311	384	232	150	138	84	31	24	17	11	9

# **ANEXOS**

## ANEXO N°1

### Obtención de la Evapotranspiración Potencial mediante el método de Thornthwaite y Mather (UNESCO, 1982).

La formula empírica para calcular la Evapotranspiración Potencial mensual en mm, basada en la correlación entre la temperatura media del aire y la tasa de transpiración de las plantas, se expresa por:

$$ETP = 1,6 \cdot LA(10 \cdot t/I)^a$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial mensual en mm.

LA : Factor de corrección para la duración del día, el número de días en el mes, y la latitud del lugar.

t : Temperatura media del aire en °c.

I :  $I = (t/5)^{1,514}$

a :  $a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49$

Así, los únicos datos necesarios para el cálculo son la temperatura media y la latitud.

## ANEXO N°2

### Supuestos del modelo de regresión lineal (Maddala, 1985).

En el proceso de la especificación de una relación funcional entre dos variables  $x$  e  $y$ , relación dada por  $y=f(x)$ , donde  $x$  es llamada la variable independiente e  $y$  la variable dependiente, debido a que la explicación de la variable  $Y$  no es perfecta, se llega a establecer la relación  $y=f(x)+u$ , donde  $u$  es una variable aleatoria llamada residuo o error. Tal error surge de deficiencias en la medición, o en imperfecciones en la especificación de  $f(x)$ .

Si se asume que  $f(x)$  es una relación lineal de  $x$ , es decir,  $f(x)=a+bx$ ; y se dispone de  $n$  observaciones de  $x$  y de  $y$ :

$$y_i = a + b \cdot x_i + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Entonces, es posible la estimación de los parámetros  $x$  e  $y$ , mediante el denominado Método de los Mínimos Cuadrados, de tal manera que:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{a} - bx_i)^2$$

Los estimadores mínimos cuadrados obtenidos minimizando  $Q$  en la anterior ecuación encierran propiedades deseables bajo el cumplimiento de los siguientes supuestos acerca de  $u_i$ :

Media cero :  $E(u_i)=0$ , para todo  $i$ .

Varianza :  $V(u_i)=\sigma^2$  para todo  $i$ .

Independencia :  $u_i$  y  $u_j$  son independientes para cualquier  $i$  y  $j$  ( $i \neq j$ ).

Independencia de  $x_j$ :  $u_i$  y  $x_j$  son independiente  $\forall_{ij}$ .

Normalidad :  $u_i \sim IN(0, \sigma^2)$ .

### ANEXO N°3

#### **Método de completación por correlación con estaciones vecinas (Pizarro, 1993).**

Para la completación de datos faltantes el método de completación por correlación con estaciones vecinas incorpora la ponderación de precipitaciones en función de los coeficientes de correlación obtenidos entre los registros de la estación con datos faltantes y las estaciones vecinas. Su uso es recomendable cuando el método de completación por correlación lineal no satisface los requerimientos de la investigación en curso.

$$PX = \frac{PXA * rXA + PXB * rXB + \dots + PXn * rXn}{rXA + rXB + \dots + rXn}$$

donde: Px : Valor estimado para la estación con datos faltantes (estación X).

Pxi : Valor estimado en X, a partir de la correlación con la estación i.

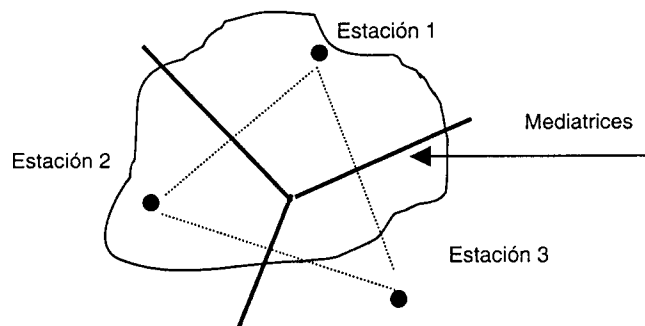
rXi : Coeficiente de correlación entre los registros de la estación X y la estación i.

## ANEXO N°4

### Cálculo de las precipitaciones areales medias mediante el método de los polígonos de Thiessen (Pizarro, 1993; Ramírez, 1998).

El método de Thiessen asigna una ponderación de representatividad en función de la superficie o área de influencia calculada para cada una de las estaciones pluviométricas, involucradas en el estudio. Así la obtención de la precipitación areal media se establece mediante del cálculo de:

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i * P_{ij}}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

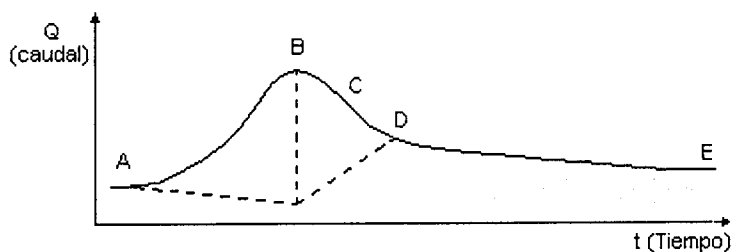


donde :       $P_{mj}$  : Precipitación media del área en estudio  
                  $S_i$  : Superficie de influencia de la estación  $i$ .  
                  $P_{ij}$  : Precipitación de la estación  $i$  para el periodo  $j$ .

## ANEXO N°5

### Determinación de la curva de caudales recesivos. (Pizarro, 1993).

Las curvas de agotamiento o curvas de caudal recesivo, modelan en forma empírica la parte del hidrograma que es función exclusiva de las aguas subterráneas. Lo que se puede apreciar gráficamente, en el tramo comprendido entre los puntos D y E.



Se sabe que  $dQ/dt < 0$  , donde Q: caudal ; t: tiempo.

Si se asume que la variación del caudal en el tiempo es proporcional al mismo caudal, resulta:  $dQ/dt = -\alpha \cdot Q$  ,  $\alpha$ : constante de proporcionalidad.

Operando se obtiene :  $dQ/Q = -\alpha \cdot dt$

Como resultado de lograr la solución a esta ecuación diferencial se obtiene la curva de agotamiento que se expresa por:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

Donde  $\alpha$  es la constante de proporcionalidad que expresa la variación del caudal en el tiempo.

## ANEXO N°6

### Método de Newton (Kincaid *et al*, 1994).

El método de Newton es un procedimiento general que se puede aplicar en muy diversas situaciones con el fin de hallar la solución a complicadas funciones o valores numéricos de integrales de difícil manejo. Lo que se obtiene no es una respuesta inmediata sino que una sucesión de respuestas aproximadas cada vez más precisas.

Sea  $f$  una función cuyas raíces se han de determinar numéricamente. Sea  $r$  una raíz de  $f$  y sea  $x$  una aproximación a  $r$ .

Si  $f''$  existe y es continua, por el teorema de Taylor se sabe que:

$$0 = f(r) = f(x+h) = f(x) + hf'(x) + o(h)^2, \text{ donde } h = r - x$$

Si  $h$  es pequeño (en otras palabras  $x$  es próximo a  $r$ ), es posible ignorar el término  $o(h)^2$  y así resolver el resto de la ecuación para  $h$ , quedando por determinar  $h = -f(x)/f'(x)$ .

Si  $x$  es próximo a  $r$  entonces,  $x - f(x)/f'(x)$  debería estar más próximo a  $r$ .

Así, el método de Newton comienza con una estimación  $x_0$  de  $r$  a partir de la cual se define inductivamente una sucesión de aproximaciones.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (n \geq 0)$$



## ANEXO N°7

**Prueba U de Mann-Whitney para Muestras pequeñas:  $n \leq 20$  (Mason y Lind, 1995).**

El objetivo de la prueba U, propuesta originalmente por Mann y Whitney en 1947, es determinar si dos muestras independientes provienen o no de la misma población. Este test forma parte del conjunto de las pruebas no paramétricas, por lo que no requiere de los supuestos de normalidad e igualdad de las varianzas (Mason y Lind, 1995).

Dadas dos muestras pequeñas ( $n_1$  ó  $n_2 \leq 25$ ), de las variables  $r_1$  y  $r_2$ , se desea establecer si sus distribuciones corresponden a la misma población.

Solución:

$H_0$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  son las mismas.

$H_1$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  no son las mismas.

Paso1 : Se deben ordenar en orden creciente o decreciente los valores correspondientes a las dos muestras.

Paso2 : Se le asigna un valor ordinal a cada uno de los elementos ordenados.

Paso3 : Se calculan los estadísticos:

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - \sum R_1 \qquad U_2 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - \sum R_2$$

Donde:

$n_1$  : tamaño de la muestra  $r_1$

$n_2$  : tamaño de la muestra  $r_2$

$\sum R_1$  : Suma de los rangos para la muestra  $r_1$ .

$\sum R_2$  : Suma de los rangos para la muestra  $r_2$ .

Paso4 : Regla de decisión.

Se rechaza  $H_0$  a un nivel de significación  $\alpha$  si el menor de los estadísticos  $U_1$  o  $U_2$  es menor o igual al valor crítico obtenido de tabla de valores prueba U de Mann-Whitney.

## ANEXO N°8

### Prueba U de Mann-Whitney para Muestras grandes: $n > 20$ (Mason y Lind, 1995).

El objetivo de la prueba U, propuesta originalmente por Mann y Whitney en 1947, es determinar si dos muestras independientes provienen o no de la misma población. Este test forma parte del conjunto de las pruebas no paramétricas, por lo que no requiere de los supuestos de normalidad e igualdad de las varianzas

Dadas dos muestras pequeñas ( $n_1$  ó  $n_2 > 25$ ), de las variables  $r_1$  y  $r_2$ , se desea establecer si sus distribuciones corresponden a la misma población.

Solución:

$H_0$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  son las mismas.

$H_1$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  no son las mismas.

Paso1 : Se deben ordenar en orden creciente o decreciente los valores correspondientes a las dos muestras.

Paso2 : Se le asigna un valor ordinal a cada uno de los elementos ordenados.

Paso3 : Se calcula el estadístico:

$$z = \frac{\sum R_1 - \sum R_2 - \left[ \frac{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2 + 1)}{2} \right]}{\sqrt{n_1 \cdot n_2 \cdot \frac{[n_1 + n_2 + 1]}{3}}}$$

Donde:

$n_1, n_2$  : tamaño de la muestra  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente.

$\sum R_1, \sum R_2$  : Suma de los rangos para la muestra  $r_1$  y  $r_2$ .

Paso4 : Regla de decisión.

Se rechaza  $H_0$  a un nivel de significación  $\alpha$  si :

$$z \geq \pm z_\alpha$$

donde  $z_\alpha$  : Valor crítico obtenido de tabla normal estándar, a un nivel de significación  $\alpha$ .

## ANEXO N°9

### Test de Kolmogorov-Smirnov para comparación de dos muestras (Steel R. y Torrie J., 1980)

El objetivo de Kolmogorov-Smirnov para comparación de dos muestras, es determinar si dos muestras independientes provienen o no de la misma población.

Dadas dos muestras, de las variables  $r_1$  y  $r_2$ , se desea establecer si sus distribuciones corresponden a la misma población.

Solución:

$H_0$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  son las mismas.

$H_1$  : Las distribuciones de las variables  $r_1$  y  $r_2$  no son las mismas.

Paso1 : Se deben ordenar, en un solo conjunto, en orden creciente o decreciente los valores correspondientes a las dos muestras.

Paso2 : Se le asigna un valor a cada elemento dado por su frecuencia relativa dentro de su conjunto.

Paso3 : Se calculan las diferencias entre las frecuencias relativas acumuladas para cada una de las filas.

Paso4: Se selecciona la diferencia más alta entre la comparación de las frecuencias relativas ( $D_s$ ).

Paso5 : Se compara el valor calculado, con un valor de la tabla de Kolmogorov-Smirnov, para un nivel de significación dado.

Paso 6 : Regla de decisión.

Se rechaza  $H_0$  a un nivel de significación dado si  $D_s \geq D$  de tabla.