



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS RESERVAS MENSUALES DE AGUA EN EL
PERÍODO 1960-2000, PARA LA CUENCA DEL RÍO PURAPEL, REGIÓN DEL
MAULE.

MARIELA IVANIA HORMAZÁBAL PAREJA

Memoria para optar al título de
INGENIERO FORESTAL

PROFESOR GUÍA: Dr. ROBERTO PIZARRO TAPIA.

TALCA-CHILE

2004

AGRADECIMIENTOS

Los más sinceros agradecimientos van dirigidos a todas aquellas personas e instituciones que colaboraron para el desarrollo del presente estudio, en especial:

Al Dr. Roberto Pizarro Tapia, por su apoyo, dedicación y amistad.

Al proyecto FONDECYT N°1010590, proyecto dentro del cual se enmarca esta memoria, por financiar y permitir el desarrollo de esta investigación.

A la Dirección General de Aguas de la Región del Maule, por facilitar la información necesaria para llevar a cabo esta memoria.

A todos mis familiares y amigos, por su cariño y preocupación. En especial a las familias Alba Pareja e Islas Pareja.

A mis amigos, Andrea, Coté, Viki e Iván, por demostrarme que con el pasar del tiempo la amistad crece y se hace más incondicional.

Finalmente, quiero agradecerle a mi madre, ya que con mucho esfuerzo me otorgó la mejor herencia que podía darme en la vida, la educación.

A mi padre (Q.E.P.D.), que creyó siempre en mí.

A mi madre, por su ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

Y a ti hijo, que enciendes todos mis sueños.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Precipitaciones	4
3.2. Hidrogramas	5
3.3. Curva de descarga	5
3.4. Componentes de un hidrograma	7
3.5 Características de un hidrograma	8
3.6. Análisis de hidrogramas	10
3.7. Curva de agotamiento y capacidad de almacenamiento de la cuenca	12
3.8. El bosque y el agua	14
4. ANTECEDENTES GENERALES	20
4.1. Antecedentes de la Cuenca Purapel	20
4.2. Situación Vegetacional de la Cuenca Purapel	22
4.3. Estación fluviométrica Purapel en Nirivilo	27
5. METODOLOGÍA	28
5.1. Materiales	28
5.2. Metodología	29

5.2.1. Revisión Bibliográfica	29
5.2.2. Captura de información	29
5.2.3. Confección de las curvas de descarga	30
5.2.4. Análisis estadístico de las curvas de descarga	30
5.2.5. Análisis de limnigramas	33
5.2.6. Obtención de hidrogramas	34
5.2.7. Determinación de los puntos de quiebre	35
5.2.8. Ajuste y evaluación de la función	39
5.2.9. Cálculo de las reservas al inicio y al final de cada mes	41
5.2.10. Análisis de las reservas	44
5.2.10.1. Medias Móviles	44
5.2.10.2. Análisis estadístico no paramétrico	46
5.2.10.3. Construcción de variables	47
6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	48
6.1. Cálculo de las reservas	48
6.1.1. Curvas de descarga	48
6.1.2. Evaluación de la función	51
6.1.3. Reservas mensuales	52
6.2. Análisis de las reservas	55
6.2.1. Medias Móviles	55
6.2.1.1. Medias Móviles a nivel mensual	55
6.2.1.2. Medias Móviles para el total continuo de los datos	57
6.2.2. Análisis estadístico	61
6.2.2.1. Comparación interdecadal a nivel mensual	61
6.2.2.2. Comparación entre periodos para cada mes	63
6.2.2.3. Comparación entre periodos para el total de meses	64
6.2.2.4. Comparación interdecadal para el total de datos	64
6.2.3. Relación entre reservas y precipitaciones	64

APÉNDICES	91
ANEXOS	97
8.1. Conclusiones	84
8.2. Recomendaciones	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Construcción de hidrogramas mediante alturas limnimétricas	6
Figura 2: Tendencias de las curvas de descarga	7
Figura 3: Esquema de un hidrograma de crecida	9
Figura 4: Hidrograma de crecida y sus componentes	11
Figura 5: Mapa de la cuenca del Purapel, Región del Maule	21
Figura 6: Croquis de ubicación de la cuenca del río Purapel	21
Figura 7: Mapa de ocupación de suelo año 1955	24
Figura 8: Mapa de ocupación de suelo año 1978	25
Figura 9: Mapa de ocupación de suelo año 1997	26
Figura 10: Limnigrama	34
Figura 11: Gráfica semilogarítmica utilizada en la determinación del segundo punto de quiebre	36
Figura 12: Histograma de frecuencias de caudal punta	37
Figura 13: Hidrograma para el cálculo de las reservas en las crecidas antes del último día del mes	42
Figura 14: Hidrograma para el cálculo de las reservas en las crecidas entre meses	43
Figura 15: Tendencia de los aforos utilizados en la confección de las curvas de descarga	50
Figura 16: Tendencia de los aforos de la parte baja de la curva	50
Figura 17: Medias móviles para las reservas mensuales anuales	56
Figura 18: Medias móviles para las reservas mensuales estivales	57
Figura 19: Medias móviles para el continuo de los datos	58
Figura 20: Medias móviles por décadas	59
Figura 21: Medias móviles a nivel de periodos	60
Figura 22: Media del cociente entre precipitaciones medias mensuales y	

reservas mensuales	65
Figura 23: Media por décadas del cuociente entre las precipitaciones medias Mensuales y las reservas finales	66
Figura 24: Línea de tendencia del cuociente entre las reservas al final del año y las precipitaciones anuales, en función del tiempo	67
Figura 25: Distribución del E.E.E. por rangos	69
Figura 26: Reservas finales anuales v/s media del periodo	71
Figura 27: Distribución de las medias móviles para el continuo de los datos	74
Figura 28: Variación del cuociente (R_f/P_f) con respecto a las precipitaciones	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Hora de término ponderado de las crecidas	38
Tabla 2: Serie de curvas de descarga obtenidas para las crecidas menores del río Purapel	49
Tabla 3: Indicadores estadísticos aplicados al modelo de la curva recesiva	51
Tabla 4: Reservas mensuales para el periodo 1960-200. (mm)	53
Tabla 5: Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho	61
Tabla 6: Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho	63
Tabla 7: Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho, para el total de meses	64
Tabla 8: Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho, entre meses	64
Tabla 9: Valores extremos de las reservas. (mm)	70
Tabla 10: Distribución de los valores de las medias móviles de las reservas, a nivel de décadas	73
Tabla 11: Variación interdecadal para la prueba U de Mann-Whitney	75
Tabla 12: Variación intertemporal para la prueba U de Mann-Whitney	75
Tabla 13: Precipitación total caída por década	79
Tabla 14: Prueba U de Mann-Whitney de comparación de precipitaciones, entre periodos	79
Tabla 15: Valores de caudal punta (Qp) en (m ³ /s) y hora de término de la Crecida (ht) en horas.	94
Tabla 16: Precipitaciones medias cuenca río Purapel. (mm)	98

RESUMEN

Esta investigación realizó un análisis de la variación de las reservas mensuales, en la cuenca del río Purapel, Región del Maule, durante el periodo 1960-2000, con el fin de determinar si la forestación con plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), ha influido en la capacidad de almacenamiento de esta cuenca.

La cuenca del Purapel, en 1955 presentaba un 63,2% de la superficie ocupada con bosque nativo y un 0% con plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don). Al año 1997, la superficie de bosque nativo, alcanzaba el 19,7% y la de *Pinus radiata* (D.Don), al 51,7%.

El estudio hizo comparaciones interdecadales (60, 70, 80, 90), e intertemporales, (1960-1978, lapso con mayor presencia de bosque nativo, y 1979-2000, lapso con mayor presencia de plantaciones), usando medias móviles y la prueba U de Mann-Whitney. Además se construyeron variables, para determinar proporciones entre las reservas y las precipitaciones.

Los valores de reservas más altos se presentaron en los meses de Septiembre y Octubre, mientras que los valores de reservas más bajos se presentaron entre los meses de Enero y Abril. Asimismo, las comparaciones determinaron que sí existen diferencias significativas entre periodos (1960/1978-1979/2000) y entre décadas, para la prueba U; esto se explica por las mayores precipitaciones de la década del 80. Las medias móviles muestran un aumento de las reservas en el segundo periodo y al comparar las décadas, los 80 presentan valores mayores al resto de las décadas. El cociente entre las reservas y las precipitaciones aumentó en la década del 80 y al relacionarlo con las precipitaciones, mostró una tendencia ascendente.

Finalmente, no se puede establecer que las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), influyan en la generación de mayores o menores reservas de agua, y más bien se puede inferir que éstas son función directa de las precipitaciones.

SUMMARY

The aim of this study was to realize a comparative analysis of monthly water reserves, in Purapel river basin, in Maule Region of Chile, since 1960 to 2000, in order to detect if forestation with *Pinus radiata* (D. Don), has influenced groundwater storage.

In 1955, 63.2% of the total surface of Purapel river basin was covered by native forests and 0% for *Pinus radiata* (D. Don). In 1997, native forest covered 19.7%, while *Pinus radiata* (D. Don) surface increased, until 51.7%.

For this work were made comparisons among decades (60,70,80,90) and between seasons (1960-1978, period with the mayor surface of native forests, and 1979-2000, period with the mayor presence of *Pinus radiata* (D. Don) plantations), using mobile means and the U-test of Mann-Whitney. Besides, were built variables to detect proportions between reserves and precipitations.

The highest monthly reserve values were for September and October, while the lowest were for the period among January and April. As well, the comparisons detect the existence of significant differences between the periods (1960/1978 – 1979/2000) and among decades, for the U-test; this is explained due to the existence of a mayor quantity of precipitations for 80's decade. The mobile means show an increment of the reserves for the second period, and if the decades are compared, the 80's decade shows higher values than the others. The rate between reserves and rainfall was increased for the 80's decade and, in relation to rainfall, it showed an ascendant tendency.

Finally, is not possible to establish that *Pinus radiata* (D. Don) plantations have some interaction in the generation of larger or smaller groundwater reserves, and can be inferred that water reserves depend of rainfall.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos que está presente en todas las zonas de asentamientos de la humanidad, condicionando su desarrollo y estilo de vida. Asimismo, este recurso es utilizado en la gran mayoría de las actividades del hombre, ya sean económicas, de autoconsumo, de exportación de recursos naturales u otras (Jordán, 2002).

Este recurso natural, es de vital importancia para el desarrollo y mantenimiento de la vida en el planeta. Pero el desequilibrio hídrico entre las distintas regiones, el aumento continuado de la demanda, la utilización irracional y la alteración de su ciclo natural, han contribuido a disminuir de forma preocupante las reservas naturales, provocando a su vez drásticas transformaciones en el medio ambiente.

Una de las fuentes más importantes de que dispone el hombre para el abastecimiento de agua, lo constituyen las reservas subterráneas. En ellas se encuentra el 95 % del agua dulce disponible en los continentes.

Las aguas subterráneas revisten una importancia fundamental en el suministro a las redes de agua potable, y se explotan intensivamente para usos privados, domésticos e industriales en muchos centros urbanos de los países en desarrollo. Al mismo tiempo, la subsuperficie se ha convertido en receptor de gran parte de las aguas servidas y los desechos sólidos urbanos e industriales. Así, hay indicios cada vez más generalizados de deterioro de la calidad y la cantidad de las aguas subterráneas, causados por la sobreexplotación y/o el control deficiente de la contaminación. La escala y el grado de la degradación varían considerablemente, según la susceptibilidad de los acuíferos al

deterioro, relacionado esto con la explotación y el nivel de vulnerabilidad a la contaminación.

Considerando la importancia de las aguas subterráneas en el suministro para diferentes usos, urge la necesidad de investigar y estudiar la manera en que cambian las reservas hídricas dentro de la cuenca, y cuáles son los factores que hacen que estas reservas disminuyan o aumenten. Así, un elemento para el análisis de reservas, son los hidrogramas de crecidas; éstos son la expresión gráfica de la variación del caudal con respecto al tiempo y son fundamentales para determinar volúmenes de agua en un intervalo de tiempo.

De acuerdo a lo anterior, esta memoria se realiza sobre la base del análisis de reservas a nivel mensual para la cuenca del Río Purapel, Región del Maule de Chile, durante el período 1960-2000, con el fin de determinar la variación de las reservas y los factores ambientales que inciden en la capacidad de almacenamiento de ésta.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Aportar al conocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas en cuencas costeras de la Región del Maule.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener cuantitativamente la variación de reservas mensuales de agua en el período 1960-2000.
- Inferir si las forestaciones masivas han incidido en la capacidad de almacenamiento de la cuenca, a través del análisis de la variación de reservas y de la ocupación forestal del suelo de la cuenca.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

3.1. Precipitaciones

Como precipitación se conocen todas las formas de humedad que caen a la tierra, provenientes de las nubes, como agua, nieve y hielo. La precipitación constituye la entrada primordial del sistema hidrológico y es el factor que controla la hidrología de una región.

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre (Aparicio, 1997) y es la principal entrada de agua en una cuenca (González y García, 1995); la precipitación, junto con la temperatura, son los elementos climáticos más influyentes en el medio natural.

Las mediciones de las precipitaciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1997). Así se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnicas para obtener información de las diferentes fases de la precipitación. Los instrumentos para medir la cantidad y la intensidad de la precipitación, son los más importantes (Linsley *et al*, 1988).

En muchos tipos de problemas hidrológicos, es necesario determinar la precipitación promedio sobre un área específica o para un período de tiempo dado. Pizarro (1993), señala la importancia de estimar adecuadamente las precipitaciones medias en un área geográfica determinada, sobre la cual se realizan actividades de investigación y/o ejecución de obras técnicas. Asimismo, existe una gran variedad de métodos para la estimación de

precipitaciones medias de una cuenca, entre los cuales destacan la media aritmética, los polígonos de Thiessen, Thiessen modificado e isoyetas entre otros. El uso de una u otra metodología depende, según Ramírez (1998), de la distribución de las precipitaciones, la densidad de la red de medición, la disponibilidad de datos y la posibilidad de ejecución.

3.2. Hidrogramas

Un hidrograma de caudal es una gráfica o una tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto, el hidrograma es “una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje en particular” (Chow *et al*, 1994).

Pizarro (1986), señala que un hidrograma es la relación funcional del gasto *v/s* tiempo, en que se verifica que el área bajo la curva, define el volumen de agua generado en una crecida.

3.3. Curva de descarga.

La relación caudal versus tiempo en un hidrograma, se obtiene en forma directa a través de las estadísticas fluviométricas que generan las redes hidrológicas, que consisten en una serie de estaciones equipadas con instrumentales específicos, como es el caso del limnógrafo. Así, se obtienen las alturas limnimétricas (*h*), las cuales se asocian a medidas directas de caudal (*Q*), y se determina la relación entre ambas variables. Esta relación, $Q=f(h)$ es lo que se llama curva de descarga o curva de gasto.

De esta manera, con las curvas de descarga se obtiene la relación caudal versus tiempo del hidrograma. En la figura 1 se muestra el proceso de construcción de hidrogramas de forma gráfica.

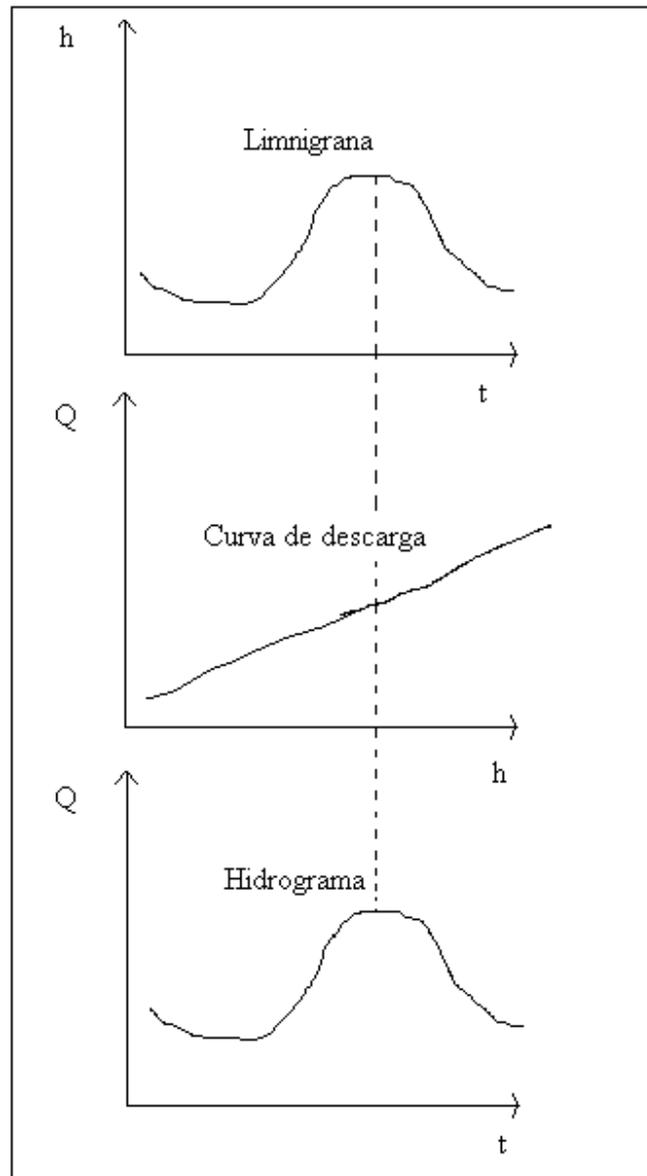


FIGURA 1: CONSTRUCCIÓN DE HIDROGRAMAS MEDIANTE ALTURAS LIMNIMÉTRICAS.

Pizarro (2004), señala al respecto, que la curva de descarga tiene un comportamiento inestable en la parte baja, debido al acarreo de material en las primeras horas de un evento determinado, sin embargo, en la parte alta esta relación tiende a estabilizarse.

De acuerdo a lo anterior, a partir de la gráfica caudal (Q) versus altura limnimétrica (h), se pueden detectar dos grandes tendencias; una parte baja de la curva, caracterizada por una nube de puntos y una tendencia en la parte alta que tiende a estabilizarse. Así es posible determinar la curva de gasto fundamental, que corresponde a las crecidas de mayor magnitud y, en la parte baja, se identifica una serie de curvas. Estas dos tendencias se observan en la figura 2.

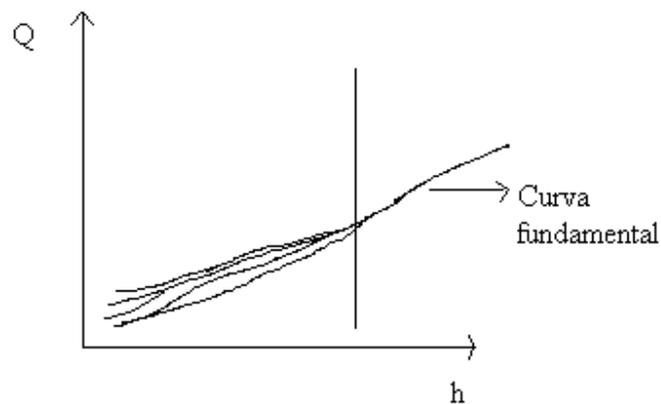


FIGURA 2: TENDENCIAS DE LAS CURVAS DE DESCARGA

3.4. Componentes de un hidrograma

Los componentes de un hidrograma, son el resultado de las diversas formas de escurrimiento existentes en la cuenca.

Remenieras (1971), señala que se pueden diferenciar cuatro vías diferentes:

- El escurrimiento o flujo superficial;
- El escurrimiento “hipodérmico” (subsuperficial);
- El escurrimiento subterráneo;
- Las precipitaciones que caen directamente sobre las superficies de aguas libres.

Se entiende por escurrimiento superficial, el flujo por gravedad en la superficie, según la pendiente del terreno, y de la microred hidrográfica de las aguas meteóricas que han escapado a la infiltración, la evaporación y el almacenaje superficial (Remenieras, 1971). Por otra parte Pizarro (1986), define el escurrimiento subsuperficial como la porción de agua que se infiltra a través de la superficie de la tierra y se mueve lateralmente sobre las capas superiores del suelo. El escurrimiento subterráneo es el agua que se infiltra hasta los niveles freáticos.

Debido a la dificultad de establecer qué caudal corresponde a cada tipo de escurrimiento, Pizarro (1986) señala que se ha dividido el escurrimiento en directo e indirecto, correspondiendo el primero al flujo superficial y subsuperficial, y el segundo al subterráneo.

3.5. Características de un hidrograma.

Si se considera un tipo de hidrograma simple registrado en una estación de aforo después de una precipitación caída en su cuenca vertiente, se encuentra una situación como la que muestra la figura 3, según Sánchez, 2001.

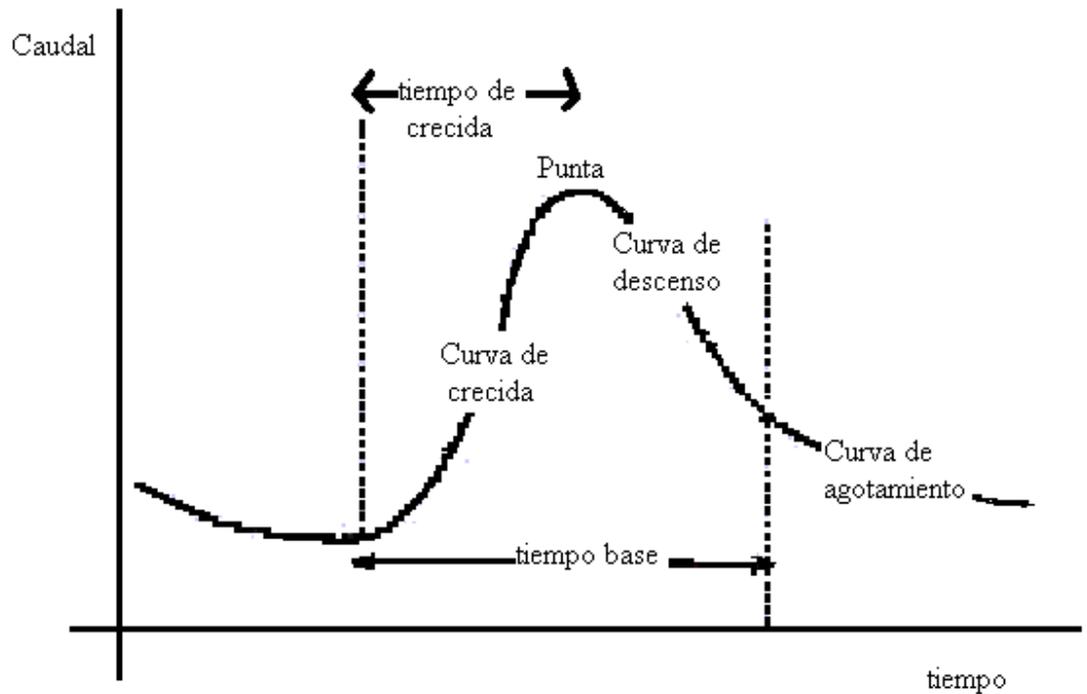


FIGURA 3: ESQUEMA DE UN HIDROGRAMA DE CRECIDA.

La curva de crecida o curva ascendente, es la sección del hidrograma que indica cuándo se inicia la crecida, hasta alcanzar el caudal punta. La curva de descenso o de bajada, corresponde al tramo entre el caudal punta y el fin de la afluencia de aguas superficiales. La curva de agotamiento o curva recesiva, es la sección del hidrograma en donde las aguas provienen exclusivamente de alimentación subterránea.

El tiempo de concentración es un parámetro fundamental en el estudio del comportamiento hidrológico de una cuenca y se define como el tiempo que tarda en llegar a la salida, una gota caída en el punto más alejado de ésta. Pizarro (1986) lo define como el período de tiempo necesario para que el escurrimiento superficial proveniente de una

precipitación, se movilice desde el punto más lejano de la cuenca, hasta la salida.

3.6. Análisis de hidrogramas

La división de hidrogramas en sus componentes, (escorrentía directa e indirecta, ó escorrentía superficial y escorrentía subterránea), se conoce como separación de hidrogramas. Así en la figura 4 que representa un hidrograma de crecida, se aprecian los siguientes componentes.

- a) Curva de crecida: Corresponde a la parte del hidrograma comprendida entre los puntos A y B, entre los cuales se inicia la crecida y se alcanza el caudal punta.
- b) Curva de bajada: Corresponde al tramo comprendido entre los puntos B y D y en donde D, representa el fin de la afluencia de aguas superficiales.
- c) Curva recesiva o de agotamiento: Comprende los puntos D y E, en donde las aguas proceden teóricamente de alimentación subterránea en forma exclusiva, generando la curva de agotamiento o curva de caudales recesivos.

Remenieras (1971) señala que la separación de los diferentes componentes del hidrograma no puede ser sino aproximada, puesto que no existe un método experimental simple que permita identificar el origen y el trayecto anterior de los caudales que llegan a la salida.

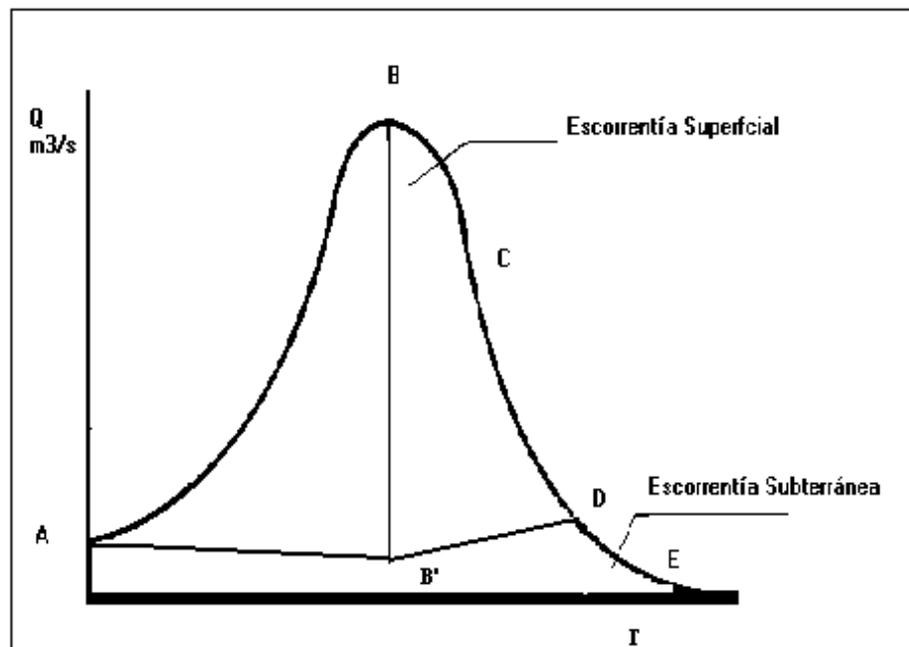


FIGURA 4: HIDROGRAMA DE CRECIDA Y SUS COMPONENTES.

Según Pizarro (1993), el método más utilizado en Chile es el que, definido el punto de inicio, se sigue la tendencia imaginaria que traía el hidrograma antes de la crecida, hasta la proyección del caudal punta y, desde ahí, hasta interceptar el segundo quiebre de la curva de bajada. Toda el área bajo esta separación corresponde al aporte subterráneo y el área sobre ella corresponde al hidrograma superficial.

Hecha la separación de un hidrograma, se pueden obtener entonces los volúmenes de agua generados por cada tipo de escurrimiento. Los volúmenes generados por la escoorrentía

directa pueden obtenerse midiendo directamente sobre el hidrograma generado (Mintegui y López, 1990; López, 1998).

3.7. Curva de agotamiento y capacidad de almacenamiento de la cuenca.

Caro (2001) cita a Vilaró (1976), quien plantea que pasada la punta del hidrograma, se inicia la curva de descenso o bajada, que al principio se debe al aporte conjunto de las tres escorrentías antes mencionadas. Pasado un cierto tiempo, se anula primero la escorrentía superficial y después la subsuperficial, quedando el caudal reducido a los aportes recibidos de la escorrentía subterránea. Entonces recibe el nombre de curva de agotamiento o curva recesiva. Dicha curva representa la disminución del agua almacenada en los acuíferos y sigue una ley exponencial.

A partir de hidrogramas obtenidos en secciones controladas, es posible estudiar el comportamiento de la curva de agotamiento, que es aquella parte del hidrograma que es función exclusiva de aguas subterráneas.

La curva de agotamiento, posee la característica de que la variación del caudal en función del tiempo posee valor negativo, es decir, dQ/dt es menor que 0. Asimismo sus coordenadas de partida, pueden definirse como $Q = Q_0$, para $t = 0 = t_0$.

En este marco, se definirá un modelo matemático para la curva de agotamiento.

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, queda lo siguiente:

$$dQ/dt = -\alpha * Q$$

donde α = constante de proporcionalidad

Operando queda;

$$dQ/Q = -\alpha * dt$$

Se sabe además que cuando $Q = Q_0$, se define que $t = 0 = t_0$

Integrando entre los límites t y t_0 , se define:

$$\ln Q \Big|_{Q_0}^Q = -\alpha * t \Big|_{t_0}^t$$

lo cual queda como sigue,

$$\ln Q - \ln Q_0 = -\alpha * (t - t_0)$$

Por ende;

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

Esta curva representa pues, el descenso de las aguas subterráneas: su integral (calculada entre $t_0 = 0$ e infinito, ya que se asume que no vuelve a llover), da aproximada el volumen de agua almacenado en la cuenca en el instante 0 escogido como origen, y puede ser considerada como un estimador por defecto, de la capacidad de almacenamiento de la cuenca, ya que no considera las evaporaciones.

$$\text{Así, } V = \int_0^{\infty} Q(t) * dt$$

Donde;

$$V = \text{Volumen (m}^3 \text{)}$$

$$Q = \text{Caudal (m}^3 \text{/s)}$$

$$t = \text{tiempo}$$

Para la curva teórica ya definida, se tiene:

$$V = \int_0^{\infty} Q_0 * e^{-\alpha * (t - t_0)} = \frac{Q_0}{\alpha}$$

3.8. El bosque y el agua.

Actualmente, la temática referente a las interacciones bosque y agua, más que una controversia histórica, ha pasado a ser una discusión científica. Así Vazquen (2004),

demonstró que una confrontación más bien romántica y emocional, se transformó finalmente, en una problemática científica.

En este contexto, la problemática se centra principalmente en determinar cómo influye la vegetación en cada uno de los elementos del balance hídrico.

El balance hídrico de una cuenca durante un lapso, se basa en el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad (López, 1998):

$$\text{Input-Ouput}=(\text{velocidad de almacenamiento})$$

Según Lara (1985), citado por Pizarro (1993), las ecuaciones fundamentales que sintetizan las entradas y salidas de agua de una cuenca, durante un tiempo determinado, estarían dadas por:

$$P + R = A + R + \delta R + E$$

En donde las entradas se componen de:

P = Precipitaciones totales en el período (líquidas y sólidas). Las ocultas (rocío, escarchas), salvo en casos excepcionales, suelen despreciarse.

R = Reservas iniciales procedentes de la etapa precedente, que pueden ser superficiales (nieves, glaciares, embalses, etc.) o subterráneas.

Las salidas son:

A = Aportación del cauce que drena la zona.

E = Evaporación y transpiración total desde la cuenca.

R + ∂R = Reservas finales.

Según Aussenac (1970) citado por Huber (1985), la influencia que ejercen los bosques sobre el ciclo hidrológico depende del clima (régimen de las precipitaciones, poder evaporante del aire) y del tipo de cubierta considerada (naturaleza, edad y estructura).

El creciente desarrollo urbano y agrícola acarrea inevitablemente la explotación de los recursos de la tierra y el agua para sostener a una población. Este proceso puede dar lugar a cambios profundos al régimen hídrico de la cuenca afectada. La magnitud de estos efectos ha sido investigada por medio de estudios experimentales. Sahin (1996), obtuvo una extensa base de datos, a partir de 145 experimentos que relacionan la cubierta vegetal con la producción de agua. Así demostró que, para una reducción del 10% de la cubierta de tipo conífera, las precipitaciones aumentaron entre 20-25 mm, mientras que esa misma proporción para el bosque de Eucalipto, aumentó en solamente 6 milímetros las precipitaciones. Una reducción del 10% en la cubierta vegetal de bosque de madera dura y de hojas caducas, presentó un aumento de 17-19 milímetros en las precipitaciones.

Lo anterior se complementa con los resultados de un estudio realizado por Huber y Oyarzún (1983), con respecto a la precipitación neta e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D.Don), donde se muestra que la precipitación interceptada por las copas y troncos, alcanzó un promedio anual de 10,3 %. A su vez, la precipitación neta, estuvo

constituida en un 87 % por precipitación directa y un 13 % por escurrimiento fustal

Con respecto a la escorrentía y los caudales punta, los espacios forestales, según López (1998), citado por Araya (2003), son muy importantes, ya que ocupan posiciones estratégicas en las cuencas, por estar situados en las cabeceras y zonas medias, donde las precipitaciones pluviales y nivales son mayores y el relieve es más accidentado.

El estudio “ Modificaciones microclimáticas causadas por el uso silvícola de bosques de Lenga (**Nothofagus pumilio**), en Magallanes, Chile”, presentado en el Primer Congreso Latinoamericano IUFRO, realizado el año 1998, indica que al comparar las precipitaciones directas de un bosque virgen con respecto a un bosque manejado, este último presenta un aumento de 12,8 %; sin embargo, el escurrimiento fustal se comportó en forma inversa a la fracción anterior. De acuerdo a esto, el monto de agua anual, que llega al piso del bosque (precipitación neta) en el sector intervenido, es mayor en un 8,9 % que en el bosque virgen (Caldentey, *et al* 1998).

El papel fundamental de los bosques sobre la escorrentía, es el de disminuir drásticamente las aportaciones de agua superficial aumentando las subterráneas. Esta disminución se produce por la mayor capacidad de infiltración que los bosques entregan a los suelos; la intercepción de la precipitación a través de sus hojas y ramas, que disminuye la intensidad de los aguaceros; la mayor rugosidad de la superficie, que provoca una fuerte disminución de la velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales; la transpiración de las plantas y, finalmente, la capacidad de absorción de agua de las cubiertas de restos vegetales, propia de las masas forestales. (Araya, 2003).

Iroumé y Huber (2000), en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, estudiaron la intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y su efecto en los

caudales de crecida. El estudio se realizó en dos parcelas con diferentes tipos de bosques, pino oregón y bosque nativo. La precipitación directa y el escurrimiento fustal fueron de 66% y 8% para la parcela de bosque nativo, y de 60% y 6% para pino oregón, respectivamente, como proporción de la precipitación incidente. Los resultados reflejaron la menor capacidad de intercepción que tiene el dosel de bosque nativo, comparado con pino oregón. A su vez, comparando con una situación de cubierta del tipo pradera, se puede observar el efecto de la cubierta vegetal en los caudales, presentándose los mayores valores de caudal máximo en la condición de pradera, y luego, bosque nativo y oregón con valores similares.

Por otra parte, los efectos que provoca la vegetación en el proceso de evapotranspiración son múltiples. Dentro de estos efectos, se encuentra el hecho de que la evaporación es diferente según el tipo de cubierta vegetal. Al aumentar la edad y disminuir la espesura de la masa forestal, la evaporación tiende a incrementarse. Así también, en suelos cubiertos con hojarasca sin descomponer, la evaporación es inferior a la producida en un suelo arenoso desnudo. Por su parte, la transpiración se ve influenciada por la temperatura, la luz solar, el contenido de humedad, la fertilidad del suelo y la composición de la vegetación. (López, 1998)

Huber y López (1993), determinaron la variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo y el consumo de agua por evapotranspiración de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D.Don) antes y después de su tala, comparándose los valores con los de una pradera natural. Los resultados obtenidos, registraron valores de evapotranspiración e intercepción del bosque superiores en un 80 % con respecto a la consumida por la pradera; y un consumo de la pradera de un 13 % superior en relación con la superficie talada. En cuanto a la evapotranspiración, ésta equivale al 96,6 % y 57,7 % de la precipitación total para el bosque y la pradera respectivamente.

Otros estudios comparativos revelan que las plantaciones forestales muestran una evapotranspiración mayor y una escorrentía reducida en comparación con vegetación baja (praderas naturales). Bosch y Hewlett (1982), citado por Hofstede (1998), concluyeron de los resultados de 94 estudios de cuencas comparativas, que bosques de *Pinus* y *Eucalyptus* causan en promedio una reducción de 40 mm en escorrentía anual por cada 10 % de cambio en cobertura respecto a pastos. La reducción causada por bosques templados de madera dura es menor alcanzándose 25 mm en promedio. Esta reducción en escorrentía es en gran parte el resultado de la intercepción de los árboles.

Robinson (1998), en un estudio de 30 años (1967-1996), determinó impactos hidrológicos de una plantación de coníferas en una cuenca experimental, en Gran Bretaña. En una primera etapa la cuenca presentaba pastizales y en el año 1972 se estableció una plantación de coníferas. Los resultados de este estudio indicaron que, dependiendo de la etapa de maduración del bosque de coníferas, la respuesta de las distintas variables hidrológicas, son distintas. Además, determinó que, con el cambio de uso del suelo, la evaporación se vio reducida y el tiempo de concentración de los caudales aumentó; sin embargo, el tiempo de evacuación de los caudales recesivos, aumentó.

4. ANTECEDENTES GENERALES

4.1. Antecedentes de la Cuenca Purapel.

El área de estudio en que se centra esta memoria, se emplaza en la Región del Maule de Chile, específicamente en la cuenca del río Purapel, al interior de la cuenca del Maule. La cuenca posee una superficie de 264,67 km² y su ubicación y forma se puede apreciar en las figuras 5 y 6. La cuenca nace en la cordillera de la costa; su cauce principal es el río Purapel, el cual se origina a 325 m.s.n.m en los 35° 26' Latitud Sur y los 72° 19' Longitud Oeste y su punto de desagüe está en las coordenadas, latitud 35° 33' y longitud 72°05', donde se encuentra una instalación limnigráfica que registra las variaciones fluviométricas del río Purapel.

Este cauce presenta algunas características que lo diferencia del común general de los ríos de la Región, haciendo muy interesante su estudio. Así, presenta un régimen hidrológico netamente pluvial, abasteciéndose solamente de las aguas-lluvias caídas, por lo que en los meses estivales su cauce es prácticamente nulo y, además, posee un recorrido de mar a cordillera, siendo uno de los dos ríos de la Región con este tipo de recorrido.

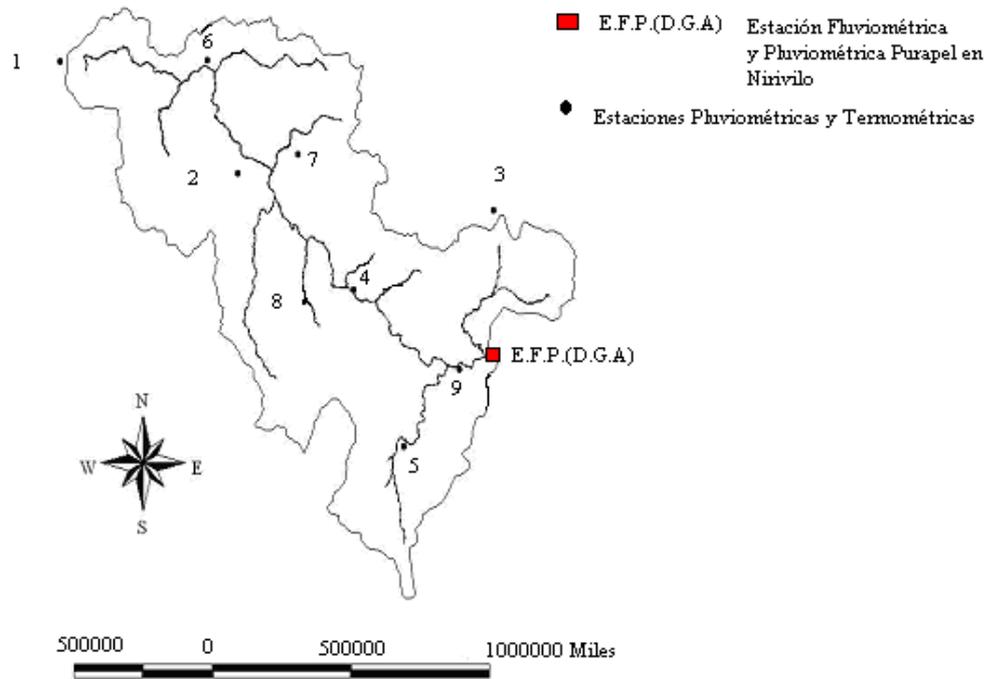


FIGURA 5: MAPA DE LA CUENCA DEL PURAPEL, REGIÓN DEL MAULE.

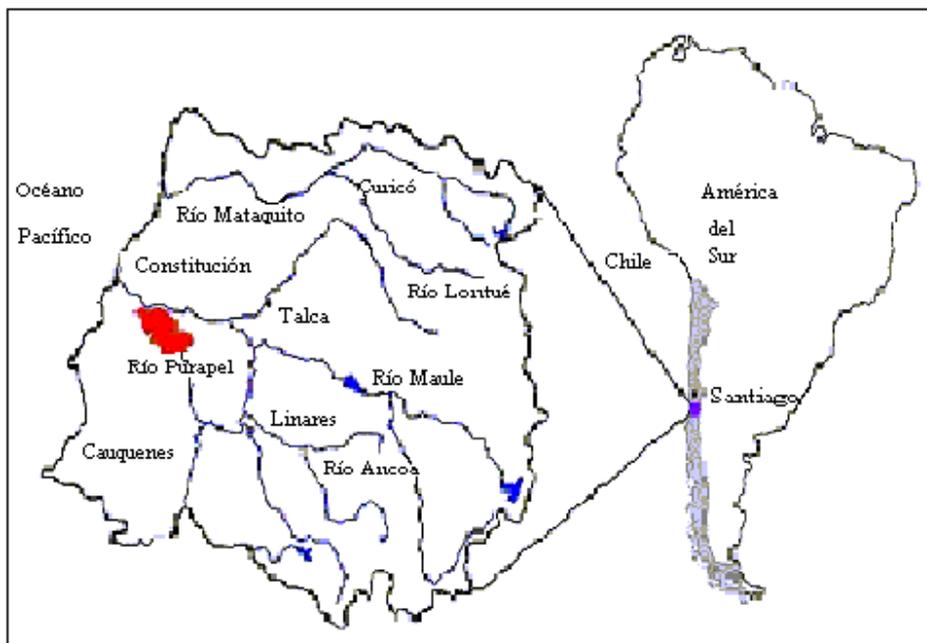


FIGURA 6: CROQUIS DE UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PURAPEL.

Desde el punto de vista climático, la cuenca presenta una prolongada estación seca, período que se extiende por 8 meses, aproximadamente. Por otra parte, las precipitaciones se concentran entre los meses de Mayo a Septiembre, situación que limita esta zona a una agricultura de secano. Su régimen térmico presenta temperaturas que varían entre una máxima promedio de 28,5 °C y una mínima promedio de 5,4 °C; la primera se registra en Enero y, la segunda en Julio. El régimen hídrico observa una precipitación media anual de 780 mm y un déficit hídrico de 884 mm. (Santibañez *et al*, 1993).

El relieve de la cuenca está conformado por lomajes suaves y áreas planas; la vegetación se caracteriza por vastas extensiones de Pino insigne, además de vegetación nativa representada principalmente por especies asociadas a la llamada estepa de Acacia caven o espino y a especies del tipo esclerófilo, como quillay y peumo, entre otras.

La hoya del río Purapel, presenta en la superficie una granulometría, en general, media y fina. Además, como consecuencia de la presencia de roca impermeable muy cerca de la superficie, en los sectores inferiores del valle y aflorando en las lomas existentes, es posible que se encuentren acuíferos compuestos de arena y grava entre los flancos del valle y los umbrales rocosos. Producto de estas características, la cuenca presenta una permeabilidad que va de muy baja a ausente, provocando que las aguas subterráneas sean muy bajas a ausentes (DGA, 1986).

4.2. Situación Vegetacional de la Cuenca Purapel.

Es necesario referirse a la situación vegetacional de la cuenca en el período estudiado, es decir 1960-2000, antes de realizar cualquier análisis.

En primer lugar, se debe señalar que para el año 1955, el 63,2 % de la superficie se encontraba con una cobertura de bosque nativo, entendiéndose éste como un bosque maulino degradado, en términos del Dap de la especie dominante (Hualo), pero con presencia abundante de un sotobosque integrado por especies del tipo forestal siempreverde. En ese mismo año la superficie de *Pinus radiata* (D. Don) era del 0 % y la superficie de matorrales de diverso tipo alcanzaba el 21,8 %; el resto se descomponía en terrenos agrícolas y praderas (14,9 %) (Pizarro *et al*, 2003)

Sin embargo, al año 1978 esta situación cambia drásticamente, ya que el bosque nativo desciende al 51,8 %, mientras que la superficie de *Pinus radiata* (D. Don), llega al 19,3%. Asimismo, el año 1997, como lo señalan Pizarro *et al* (2003), difiere sustancialmente de la situación inicial, ya que las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) alcanzan el 51,7%; el bosque nativo ha descendido al 19,7 de ocupación; los matorrales llegan al 15,8% denotando un leve descenso, y los terrenos de uso agrícola y praderas llegan al 12,7%.

En conclusión, la principal variación vegetacional de la cuenca del río Purapel, corresponde al cambio de un bosque nativo por bosques artificiales de *Pinus radiata* (D. Don). Además, se comprueba que el año 1978 marca una diferencia en la tendencia ya que, a partir de este momento, se produce un aumento explosivo de las plantaciones presentes en la cuenca.

Los mapas de uso de suelo, en los cuales se observa la variación vegetacional en el tiempo, para la cuenca del río Purapel, se observan en las figuras 7, 8 y 9.

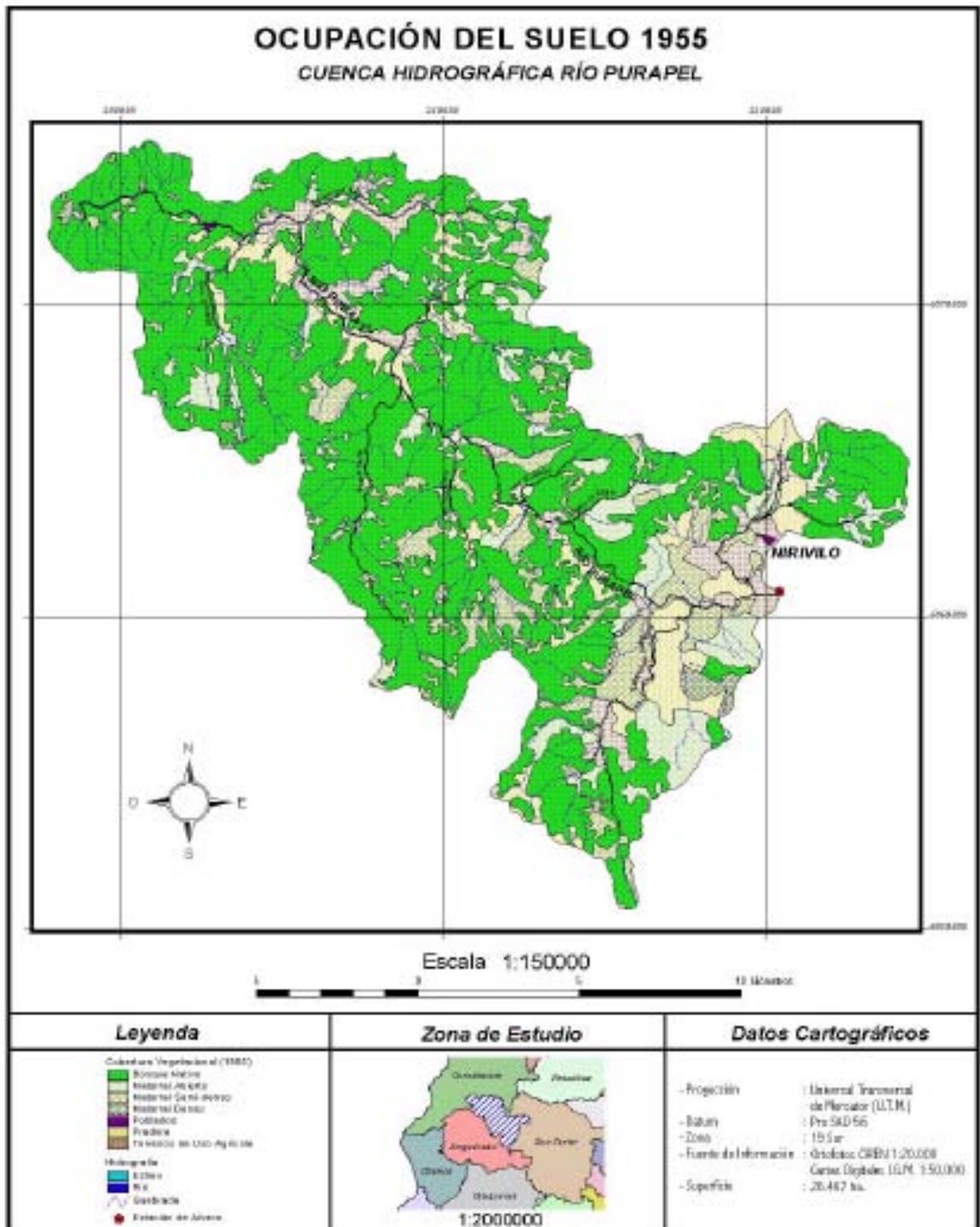


FIGURA 7: MAPA DE OCUPACIÓN DE SUELO AÑO 1955. (Fuente, Pizarro *et al* 2003, proyecto Fondecyt 1010590).

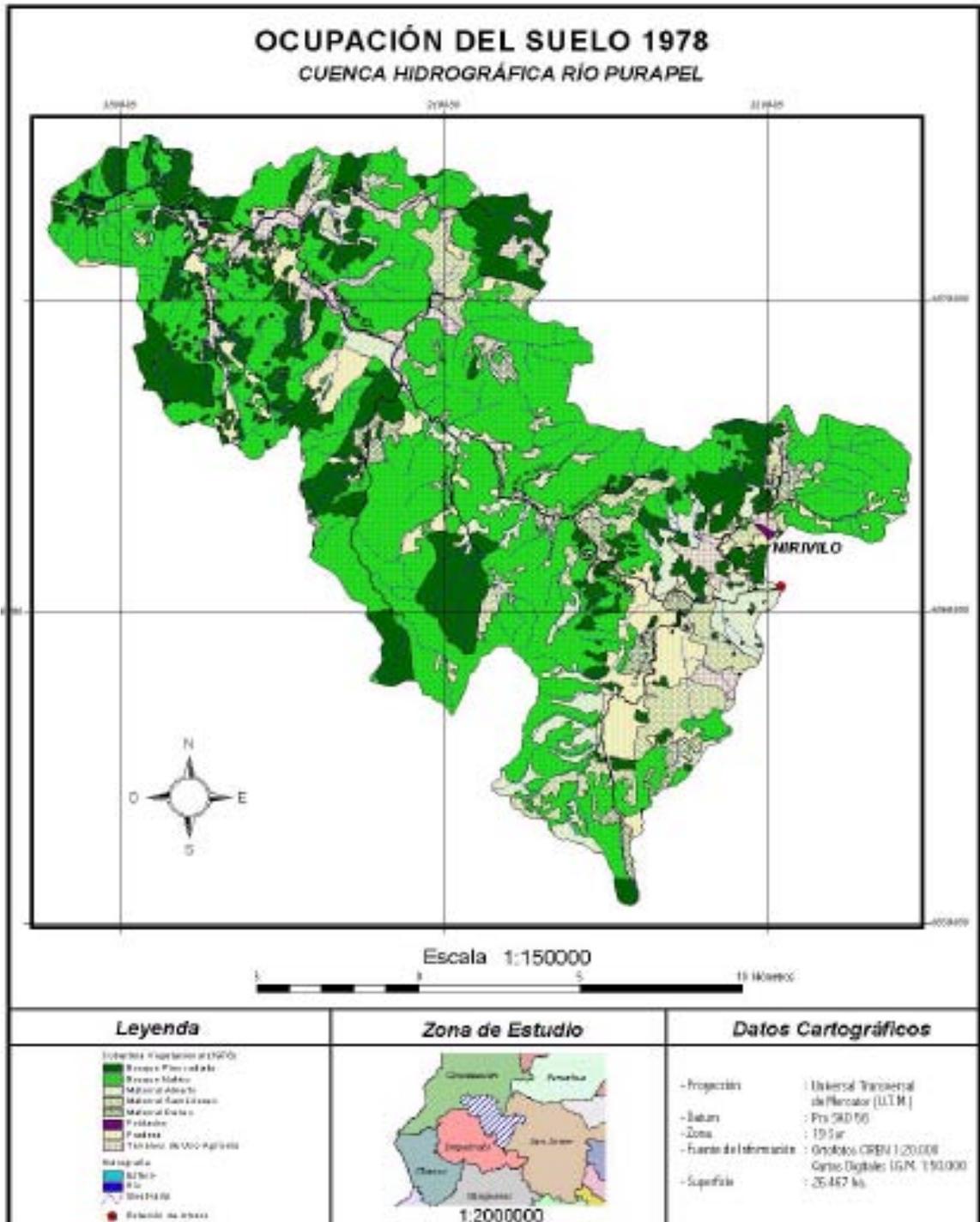


FIGURA 8: MAPA DE OCUPACIÓN DE SUELO AÑO 1978. (Fuente, Pizarro *et al* 2003, proyecto Fondecyt 1010590).

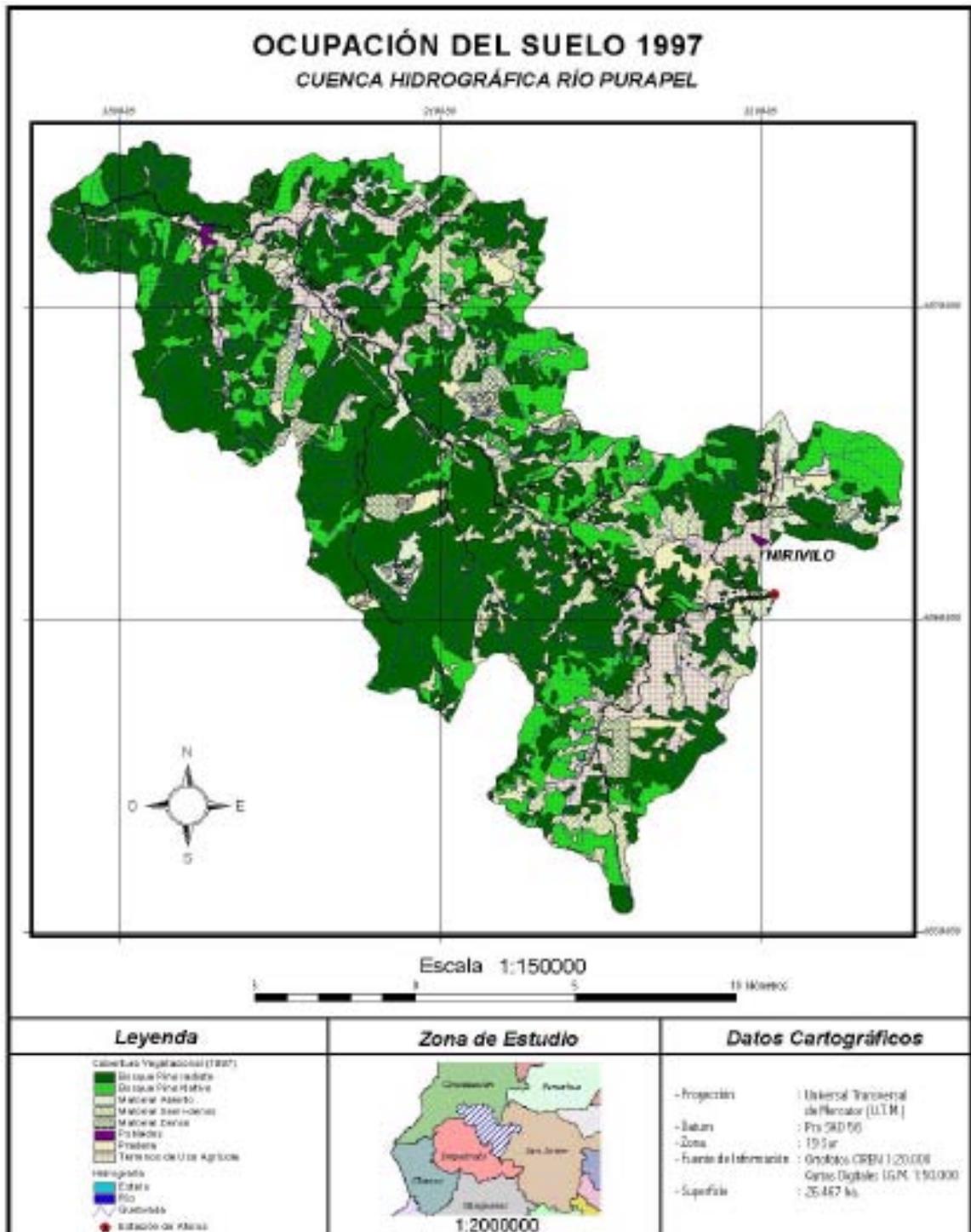


FIGURA 9: MAPA DE OCUPACIÓN DE SUELO AÑO 1997. (Fuente, Pizarro *et al* 2003, Proyecto Fondecyt 1010590).

4.3. Estación fluviométrica Purapel en Nirivilo.

La cuenca del río Purapel cuenta con dos estaciones de registro fluviométrico: Purapel en Nirivilo y Purapel en Sauzal. En este caso la estación utilizada fue la de Nirivilo.

La estación fluviométrica de Purapel en Nirivilo, está ubicada inmediatamente aguas abajo del cruce del Purapel con el Estero Nirivilo, a una altura de 96 m.s.n.m. en la coordenada 35°34' Latitud Sur y 72°05' Longitud Oeste. Esta estación funciona desde 1957 y está bajo el control de la Dirección General de Aguas, Región del Maule. Desde su inicio cuenta con limnímetros y limnógrafos mecánicos, y actualmente también cuenta con un limnógrafo electrónico (datta logger).

5. METODOLOGIA

5.1. Materiales

En la elaboración de esta memoria se necesitaron los siguientes materiales y equipos:

- Información hidrológica, la que comprende;
 - a. Limnigramas, para el período comprendido entre los años 1960 y 2000.
 - b. Afros de caudal líquido, para el período comprendido entre los años 1960 y 2002.
- Cartografía IGM de la cuenca, escala 1:50000, correspondiente a las cartas de Constitución, Pichamán, Sauzal y Melozal.
- Planímetro digital y red de puntos.
- Regla graduada.
- Equipos computacionales para el desarrollo y análisis de la información y elaboración del informe final: Microsoft Word 97, Microsoft Excel 97 y el software estadístico Statgraphics plus 1.4.
- Recursos económicos para salidas a terreno.

5.2. Metodología.

Las fases metodológicas son las siguientes:

5.2.1. Revisión Bibliográfica.

En esta etapa se realizó una revisión y recopilación de la información necesaria para desarrollar este estudio. Ésta comprendió básicamente la información hidrológica referida a temas relacionados con las precipitaciones, curvas de descarga, hidrogramas, curvas recesivas y capacidad de almacenamiento.

Junto con lo anterior, se realizó una recopilación general de antecedentes sobre la zona de estudio, con el fin de caracterizar y contextualizar el lugar de desarrollo de la presente memoria. Asimismo, se realizó una acabada recopilación de trabajos ligados a la temática en estudio, en revistas científicas y direcciones de Internet.

5.2.2. Captura de información.

La información requerida para la ejecución del presente estudio fue del tipo fluviométrica y pluviométrica. La información fluviométrica utilizada consiste en los datos de aforo directo de caudal, curvas de descarga y los limnigramas para el período 1960-2000. La información pluviométrica corresponde a las precipitaciones mensuales de los 40 años que abarca esta memoria.

Toda la información, tanto de los datos de aforo, como de las precipitaciones mensuales (anexo 1) y los limnigramas, fue facilitada por la Dirección General de Aguas, Región del Maule.

5.2.3. Confección de las curvas de descarga.

La revisión de datos de aforo y el trazado armónico de las curvas de descarga es fundamental para el correcto cálculo e interpretación de los caudales de un cauce. Así, para la confección de las curvas de descarga, se utilizaron datos de aforos directos, es decir, medidas directas del caudal a un determinado nivel, además de las alturas limnimétricas. Con esta información, como se mencionó en el capítulo 3, fue posible determinar la relación altura-caudal. Para ello, se siguió la metodología expuesta por Bénitez (1970), estimando el caudal en función de la altura ($Q = f(H)$) según la tendencia de estas variables. Así, se determinó una curva de gastos fundamental para las crecidas de mayor magnitud, y una serie de curvas que abarcan periodos de dos años, comenzando en el periodo 60-61, para las crecidas menores.

5.2.4. Análisis estadístico de las curvas de descarga.

Para conocer el comportamiento de las variables involucradas en la construcción de las curvas de gastos, fue necesario probar funciones de regresión. La curva de gasto fundamental se determinó a través de un análisis de regresión y las correspondientes medidas de bondad del ajuste. Sin embargo para la serie de curvas determinadas por período, el ajuste fue gráfico, porque no fue posible hacerlo por métodos paramétricos, dada la imposibilidad de conectar las tendencias de cada período en la parte baja del lecho y

la curva fundamental. No obstante esto, las curvas obtenidas presentaron un muy buen ajuste como lo demuestran los R^2 obtenidos.

En este marco y con respecto a la curva de descarga fundamental, se analizaron los supuestos de regresión para la función modelada, $Q = f(H)$. Este análisis consta de probar los supuestos de Normalidad, Homocedasticidad y no autocorrelación. Para esto se utilizaron métodos gráficos y matemáticos, cuyos resultados se encuentran en el apéndice 1.

a) Supuesto de Normalidad.

Las pruebas para determinar si se cumple o no el supuesto de normalidad, es decir, que las perturbaciones poblacionales tienen una distribución normal, son el Test de Kolmogorov-Smirnov y el gráfico de Histogramas de frecuencias.

Test de Kolmogorov –Smirnov.

El test de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov (K-S) está basado en un estadístico que mide la desviación de la frecuencia observada acumulada, con relación a la frecuencia teórica acumulada. Este test es válido para distribuciones continuas. Sin embargo, sirve tanto para muestras grandes como para muestras chicas. (Pizarro *et al*, 1986).

Histograma de frecuencias.

Una de las pruebas más simples para verificar la normalidad de los residuos, se basa en utilizar un análisis gráfico, como por ejemplo, el histograma de frecuencias. Éste se basa en la simetría de las frecuencias observadas y dos colas livianas en sus extremos (Cid, 1990).

b) Supuesto de Homocedasticidad.

Un supuesto importante del modelo clásico de regresión lineal, es que las perturbaciones de la función de regresión poblacional son homocedásticas, es decir, que todas tienen la misma varianza. El test que se utilizó para detectar la heterocedasticidad, es la prueba de Goldfeld-Quandt.

Prueba Goldfeld – Quandt.

Este test detecta la presencia de la heterocedasticidad de las varianzas por medio de una prueba de hipótesis que considera una hipótesis nula de homocedasticidad, contra la hipótesis alternativa de heterocedasticidad.

c) Supuesto de no-autocorrelación.

Un supuesto también importante del modelo de regresión lineal es que no existe autocorrelación o relación serial entre las perturbaciones que entran en la función de

regresión poblacional, es decir, no debe existir una correlación entre las perturbaciones de una serie de observaciones ordenadas en el tiempo. La prueba que se utilizó para detectar autocorrelación es la prueba d de Durbin – Watson. El método gráfico utilizado es una gráfica entre los residuos del modelo y el tiempo.

En función de lo anterior, y en relación a la serie de curvas de descarga para la parte baja del lecho, se determinó la bondad del ajuste a cada curva de descarga modelada, mediante el Coeficiente de Determinación (R^2). Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales que es explicado por el modelo seleccionado. De este modo, se escogió el modelo con mayor R^2 .

5.2.5. Análisis de limnigramas.

Un limnigrama es un registro de niveles en función del tiempo, que se obtiene de un limnógrafo (Llamas, 1993 citado por Araya, 2003). En la figura 10 se aprecian las características de los limnigramas, donde el eje X corresponde al tiempo y el eje Y, a las alturas de agua.

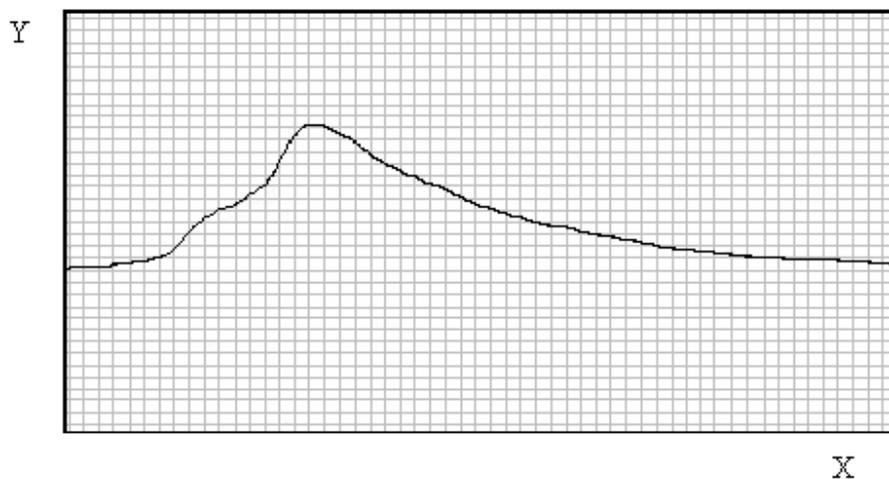


FIGURA 10: LIMNIGRAMA.

En esta etapa se procedió a la recopilación de la información contenida en los limnigramas, para el periodo en estudio (1960-2000). Ésta consistió en medir con regla sobre los limnigramas, las alturas de agua correspondientes a cada hora, de la última crecida de cada mes, con el fin de obtener los registros al inicio y al final de cada mes. Las mediciones se terminaban de hacer, para cada una de las crecidas, cuando se estabilizaba la curva de bajada.

Estos registros de altura de agua fueron transformados posteriormente a caudal mediante la correspondiente curva de descarga.

5.2.6. Obtención de hidrogramas.

En esta etapa se asociaron las alturas de agua registradas de los limnigramas, a las curvas de descarga ya confeccionadas, las cuales indican el valor del caudal para una determinada altura de agua. Así, teniendo a la altura de agua como factor común, se obtiene

la relación de caudal (Q) v/s tiempo (t), necesaria para la confección de los hidrogramas. De esta manera, se determinaron todos los hidrogramas correspondientes a la última crecida de cada mes, y estos hidrogramas constituyeron la base de datos que permitió la determinación de las reservas a nivel mensual.

5.2.7 Determinación de los puntos de quiebre.

Un punto importante dentro de la metodología para la determinación de las reservas mensuales, consiste en establecer cuándo terminan los aportes de aguas superficiales. Para ésto se procedió a determinar el segundo punto de quiebre de la curva de bajada, ya que en este punto cesan los aportes de la escorrentía directa. Para ésto se tomaron los caudales, a partir del caudal punta, graficándolos como $\log(Q)$ v/s t. El resultado de este tipo de gráfico es una línea recta que presenta dos puntos notorios de quiebre de la pendiente, siendo el segundo punto el que representa al término de la escorrentía directa y del hidrograma de crecidas, lo que se puede apreciar en la figura 11.

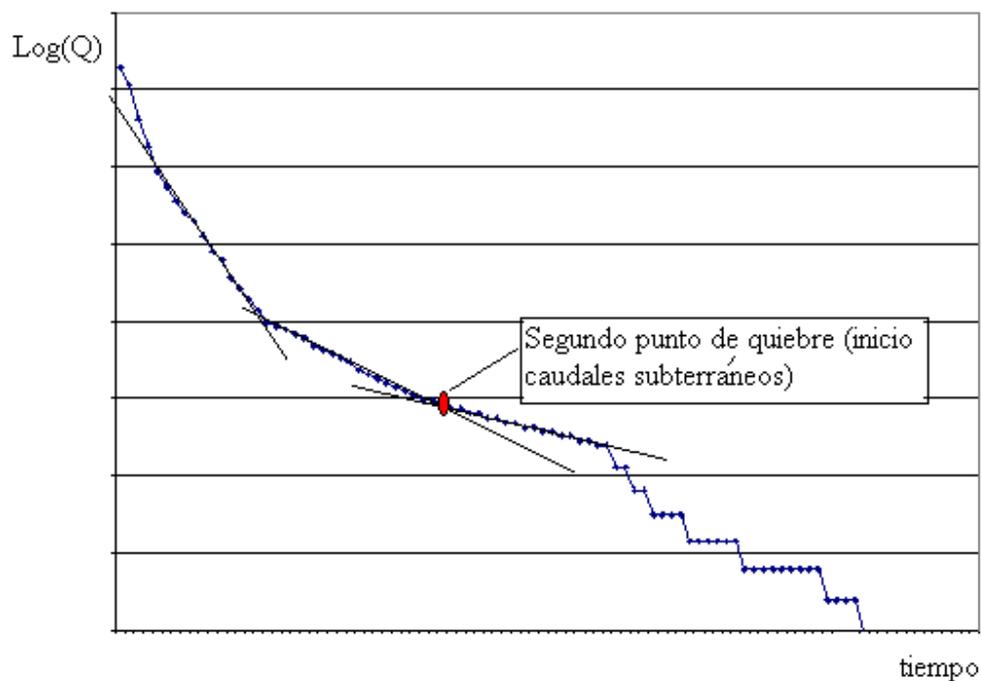
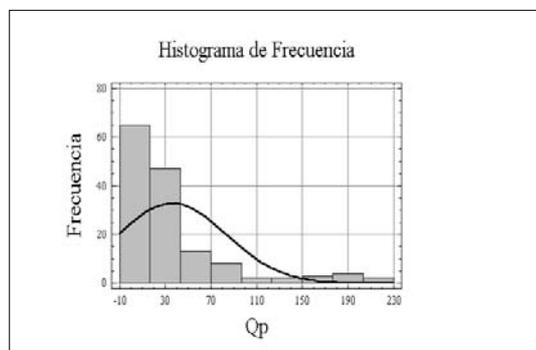


FIGURA 11: GRÁFICA SEMILOGARÍTMICA UTILIZADA EN LA DETERMINACIÓN DEL SEGUNDO PUNTO DE QUIEBRE.

Ahora bien; de un total de 210 hidrogramas, hubo 146 en los que no fue posible obtener el segundo punto de quiebre mediante la metodología expuesta, ya que el segundo punto de quiebre no se visualizaba claramente. Frente a esta situación, se decidió estimarlo a través de los ya obtenidos, mediante un método que permitió clasificar y ponderar los valores de la hora de término de la crecida (H_t), por medio de un histograma de frecuencia.

Con los valores de caudal punta y su respectiva hora de término, que se presentan en el apéndice 2, se construyó un histograma de frecuencia; de esta manera, se determinó para cada clase y/o intervalo, un promedio de la hora de término (H_t), como lo muestra la figura 12.

FIGURA 12: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE CAUDAL PUNTA (QP)



De acuerdo a la estadística descriptiva básica, el número de clases y el rango de cada una de ella, queda expresado como:

Número de clases $(N) = 1 + 3.3 \text{ LOG } N$.

$N = 1 + 3.3 \text{ LOG } 146 = 9 \text{ clases}$

Rango de clase $(R) = (Qp \text{ Mayor} - Qp \text{ menor}) / N$

$R = 24 \text{ m}^3 / \text{s}$

Sin embargo, para dar mayor precisión a las primeras 3 clases, se subdividieron por igual procedimiento. Finalmente, la clasificación y ponderación de la hora de término se puede observar en la tabla 1. Con esta tabla finalmente, se pudo determinar la hora de término y el caudal punta para las restantes 64 crecidas.

TABLA 1: HORA DE TÉRMINO PONDERADO DE LAS CRECIDAS.

CLASE	INTERVALO	RANGO Qp	PROMEDIO Ht
1 (0 - 24 m3/s)	1	(0 - 3 m3/s)	37
	2	(3,1 - 6 m3/s)	39
	3	(6,1 - 9 m3/s)	35
	4	(9,1 - 12 m3/s)	32
	5	(12,1 - 15 m3/s)	33
	6	(15,1 - 18 m3/s)	34
	7	(18,1 - 21 m3/s)	34
	8	(21,1 - 24 m3/s)	32
2 (24,1 - 48 m3/s)	1	(24,1 - 28 m3/s)	28
	2	(28,1 - 32 m3/s)	26
	3	(32,1 - 36 m3/s)	32
	4	(36,1 - 40 m3/s)	25
	5	(40,1 - 44 m3/s)	30
	6	(44,1 - 48 m3/s)	25
3 (48,1 - 72 m3/s)	1	(48,1 - 54 m3/s)	20
	2	(54,1 - 60 m3/s)	24
	3	(60,1 - 66 m3/s)	22
	4	(66,1 - 72 m3/s)	21
4 (72,1 - 96 m3/s)	1	(72,1 - 96 m3/s)	18
5 (96,1 - 120 m3/s)	1	(96,1 - 120 m3/s)	20
6 (120,1 - 144 m3/s)	1	(120,1 - 144 m3/s)	16
7 (144,1 - 168 m3/s)	1	(144,1 - 168 m3/s)	22
8 (168,1 - 192 m3/s)	1	(168,1 - 192 m3/s)	18
9 (192,1 - 216 m3/s)	1	(192,1 - 216 m3/s)	18

5.2.8. Ajuste y evaluación de la función.

Para la modelación de las curvas recesivas, se ajustó y evaluó la función propuesta por Cirujeda 1985, para el cálculo de las reservas:

$$Q = Q_0 * e^{\alpha t}$$

Para ello fue necesario determinar los coeficientes de agotamiento, es decir, el parámetro α . De acuerdo a la información obtenida de cada crecida y a partir del gráfico del logaritmo del caudal de la curva de bajada que marca el comienzo de la curva recesiva (Q_0), fue posible obtener el coeficiente de agotamiento (α) del modelo planteado, mediante el cálculo del tiempo entre Q_0 y el punto donde comenzaba la siguiente crecida, es decir cuando nuevamente el caudal presenta componentes de escorrentía superficial. Luego, se reemplazaron los valores de caudal y tiempo en el modelo, para finalmente despejar el coeficiente α y así obtener su valor.

Además, en esta etapa se verificó la calidad del modelo ya planteado, para lo cual se usaron algunos indicadores estadísticos específicos, a saber, el coeficiente de determinación y el error estándar de estimación, los cuales fueron aplicados con el fin de conocer la calidad de las medidas de bondad de ajuste del modelo propuesto. Para realizar el ajuste, se tomaron al azar 24 crecidas del total del período de 40 años, es decir seis crecidas de cada década. Los años seleccionados fueron: 1960, 1962, 1964, 1965, 1966, 1968, 1970, 1972, 1974, 1975, 1976, 1978, 1980, 1982, 1984, 1985, 1986, 1988, 1990, 1992, 1994, 1995, 1996 y 1998.

a) Coeficiente de determinación (R^2).

Mediante el Coeficiente de Determinación (R^2), se estableció qué proporción de la variación total de los caudales observados, son explicados por los caudales modelados:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

donde;

y_i = caudal observado.

\bar{y} = promedio de los caudales observados.

\hat{y}_i = caudal modelado.

b) Error estándar de estimación.

En el mismo marco, se calculó el error estándar de estimación, para así ver la disparidad promedio entre los caudales observados y los estimados o modelados de cada crecida, en donde los valores más cercanos a cero indican que el modelo hace una buena descripción de los caudales. Por otra parte, un valor grande, indica que el modelo hace una descripción deficitaria de los caudales.

$$E.E.E. = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{(n - 2)}}$$

Donde;

$E.E.E.$ = Error estándar de estimación.

Y = caudal observado.

\hat{Y} = caudal modelado.

n = número de caudales.

5.2.9. Cálculo de las reservas al inicio y al final de cada mes.

Con respecto a este punto, se puede señalar que las reservas de la cuenca al final de cada mes, que resulta ser la misma que la del inicio del mes siguiente, se establece en función del criterio que si no existieran más lluvias, la cuenca terminaría por evacuar, a un tiempo infinito, las reservas existentes. Es decir, si $Q(t)$ es la función que explica el comportamiento recesivo del caudal en función del tiempo, la integral de $f = Q(t)$ entre $t=0$ e infinito, define el volumen de agua almacenado en la cuenca, bajo las condiciones hidrológicas iniciales.

Cabe destacar que para el cálculo de las reservas, se presentaron dos situaciones particulares; el primer caso, que fue el más recurrente, correspondió a aquel, donde la última crecida del mes se encontraba antes del último día del mes (Figura 13) y, el segundo caso, donde la crecida se presentaba justo en el cambio de mes (Figura 14).

Para el primer caso, la reserva fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$Re(i) = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 * e^{-\alpha t} dt - \int_{t_0}^{t_1} Q_0 * e^{-\alpha t} dt$$

Donde;

$Re(i)$ = Reservas al final del mes i o reservas al inicio del mes i+1.

Q_0 = Caudal en el tiempo t_0

α = coeficiente de agotamiento

t_0 = tiempo inicial

t_1 = tiempo al cual se termina el mes i.

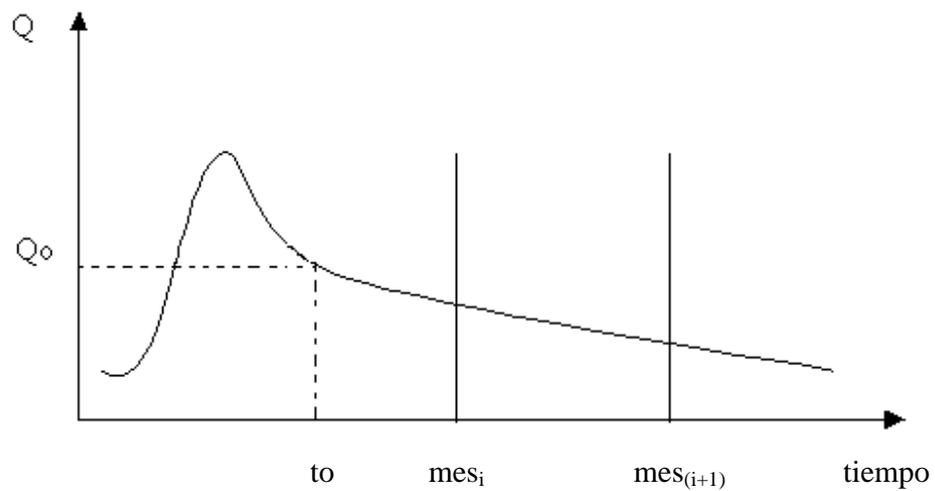


FIGURA 13: HIDROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS RESERVAS EN LAS CRECIDAS ANTES DEL ÚLTIMO DÍA DEL MES.

Para el segundo caso, se utilizó la expresión que se muestra a continuación, para lo cual fue necesario determinar el volumen almacenado bajo la crecida.

$$Re(i) = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 * e^{-\alpha t} dt - \int_{t_0}^{t_1} Q_0 * e^{-\alpha t} dt - V$$

Donde;

$Re(i)$ = Reserva del mes i

Q_0 = Caudal en el tiempo t_0

α = coeficiente de agotamiento

t_0 = tiempo inicial

V = Volumen almacenado bajo la crecida hasta el caudal punta, determinado mediante la separación de hidrogramas.

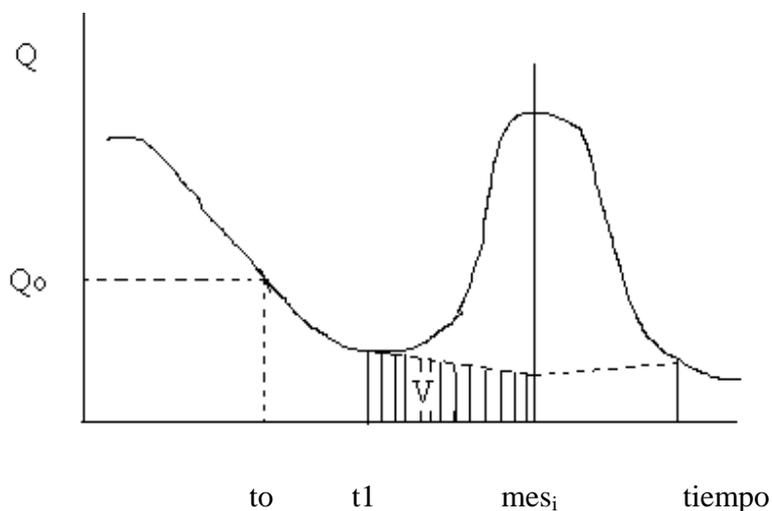


FIGURA 14: HIDROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS RESERVAS EN LAS CRECIDAS ENTRE MESES.

El volumen almacenado bajo la crecida fue determinado mediante la separación de hidrogramas. El procedimiento consistió en identificar y separar los dos tipos principales de escorrentía que componen el hidrograma total de una crecida. En primer lugar se determinó el punto de inicio de la crecida, que corresponde a aquel punto que difiere de la declinación del caudal recesivo previo. Posteriormente se procedió a determinar el punto donde cesaban los aportes de la escorrentía directa, cuya metodología es la misma explicada en el punto 5.2.7. Luego de determinar el punto de inicio y final de la crecida, se procedió a separar los caudales; para ello, se siguió la tendencia que traía el caudal recesivo previo hasta antes de cada crecida, proyectándolo hasta unirlo con la proyección vertical del caudal punta. Desde ahí se proyectó una línea recta hasta unirla con el segundo punto de quiebre de la curva de bajada del hidrograma, representado por el punto D, en la figura 4.

5.2.10. Análisis de las reservas.

El análisis de las reservas de agua de la cuenca, consistió en determinar cómo han variado en los 40 años de estudio, y cómo se relacionan estas variaciones con los cambios que ha tenido la ocupación del suelo de la cuenca. Para ello, se procedió a completar los valores de reservas no determinados por fallas en el registro de la información limnigráfica; estos valores se calcularon mediante el promedio histórico de la década.

5.2.10.1 Medias móviles.

La primera etapa del análisis consistió en realizar un análisis gráfico. Para esto se utilizó uno de los métodos tradicionales para el análisis de series de tiempo, como son las Medias Móviles. Este método permite suavizar los datos, intentando eliminar el efecto de la variación aleatoria y poder obtener las componentes o variables que marcan tendencia.

Ello, porque la componente irregular de las series temporales puede ser tan grande, que esconda cualquier regularidad subyacente, haciendo difícil cualquier interpretación del gráfico temporal. En estas circunstancias, el gráfico aparece desigual y es deseable suavizarlo para lograr un dibujo más claro. Así, este suavizado puede ser conseguido mediante el método de las medias móviles, el cual está basado en la idea de que cualquier componente irregular grande, en cualquier momento de tiempo, ejercerá un efecto más pequeño si la observación en dicho punto se promedia con sus vecinos más inmediatos. La forma de calcular una media móvil en un tiempo t , sobre M períodos de tiempo es:

$$\bar{y}_t = \frac{y_{t-(M-1)/2} + y_{t+1-(M-1)/2} + \dots + y_{t+(M-1)/2}}{M}$$

Donde:

\bar{y}_t : promedio móvil obtenido para una valor y_t .

y_t : valor de la variable y , en un tiempo t .

M : magnitud de agrupación de datos.

Este análisis gráfico pretendió determinar la tendencia de las reservas de agua de la cuenca a lo largo del período de estudio, para lo cual se determinaron las medias móviles por mes y para el total de los datos. Con respecto a esto último, el total de los datos se refiere a la serie de tiempo completa de los 40 años ordenados cronológicamente. Con la finalidad de visualizar mejor la tendencia de estos datos, se graficaron los períodos antes señalados y por décadas (60, 70, 80 y 90).

En esta memoria, para el cálculo de los promedios móviles, las reservas se agruparon de a tres ($M=3$). Las medias móviles fueron determinadas para el análisis mensual y para la serie de datos continua.

5.2.10.1. Análisis estadístico no paramétrico.

En esta etapa se analizaron estadísticamente los datos de las reservas, con el objetivo de establecer la existencia o no de diferencias en el transcurso del tiempo. Este análisis se realizó a nivel de décadas (60, 70, 80 y 90) y a nivel de períodos (1960-1978, lapso con mayor influencia de bosque nativo y 1979-2000, lapso con mayor influencia de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don)).

Para llevar a cabo este análisis, se planteó la idea de realizar pruebas estadísticas paramétricas; sin embargo, los datos no cumplieron los supuestos necesarios a los que se encuentra sujeto un análisis de este tipo, como lo son los supuestos de normalidad de los datos y la igualdad de la varianza. Los resultados de estos análisis se encuentran en el apéndice 3. A lo anterior, se suma el hecho de que la base de datos corresponde a una serie temporal, es decir, un conjunto de medidas ordenadas a lo largo del tiempo de una variable de interés y los datos temporales poseen características que necesitan de métodos estadísticos distintos para su análisis.

De acuerdo a lo anterior, se utilizó una prueba potente de la estadística no paramétrica, que es la prueba U de Mann-Whitney.

Esta prueba se utilizó para ver la presencia de diferencias en la distribución entre décadas y entre los períodos 1960-1978 y 1979-2000, para el análisis por mes y para el análisis continuo. En el apéndice 4 se muestra la metodología utilizada para el cálculo de este estadístico.

5.2.10.3. Construcción de variables.

En esta etapa se construyeron variables que relacionaron las precipitaciones con las reservas, con la finalidad de determinar la incidencia de las precipitaciones en la mayor o menor producción de reservas de agua en la cuenca.

En primer lugar, se pretendió determinar la relación entre las precipitaciones y las reservas, a nivel mensual. Para esto se calculó el cociente entre las precipitaciones mensuales y las reservas mensuales (P_m/R_m); este cociente indica qué proporción de las reservas finales de cada mes, representan las precipitaciones caídas. Así, se determinó un valor medio de este cociente para todo el periodo a nivel mensual; además, para complementar el análisis se determinó un valor medio para cada década del período en estudio. Con estos valores se realizaron las gráficas para determinar la tendencia de este cociente a través del tiempo.

En este mismo contexto, se trabajó el inverso del cociente anterior; es decir, qué proporción de las precipitaciones caídas, representan las reservas. Sin embargo, para este caso se determinó el cociente a nivel anual, para lo cual se definió como reserva final del año, el valor existente al término del año hidrológico, es decir, en el mes de marzo (R_f). Así, se realizó un análisis de tales reservas con respecto a las precipitaciones acumuladas durante el año hasta este mes (P_f); de esta forma, se determinó la variación este cociente (R_f/P_f) con el objetivo de determinar la tendencia que presentaba a lo largo de los 40 años de estudio.

6. PRESENTACION DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan en orden secuencial los resultados obtenidos acerca de las reservas mensuales para el período en estudio. En primer lugar, se entregan los resultados del cálculo de las reservas, sección 6.1 y, posteriormente se presentan los resultados de los análisis de las mismas, sección 6.2.

6.1. Cálculo de las reservas.

6.1.1. Curvas de descarga.

A partir de la gráfica caudal v/s altura limnimétrica del río y de los ajustes matemáticos previos, se pudo detectar dos grandes tendencias, tal como se mencionó en la revisión bibliográfica y se puede apreciar en la Figura 15. Así, se identificó en la parte alta de la curva, la curva de gasto fundamental, que corresponde a las crecidas de mayor magnitud; esta fue obtenida mediante el software STATGRAPHICS PLUS 1.4 y quedó establecida como:

$$Q = -12.3463 * H + 11.0083 * H^2$$

Donde;

Q = Caudal

H = Altura limnimétrica

La segunda tendencia se encuentra en la parte baja de la curva y está caracterizada por una nube de puntos (Figura 16), donde se pudo identificar una serie de curvas que abarcan periodos de dos años, comenzando en el periodo 60-61, para las crecidas menores (Tabla 2).

TABLA 2: SERIE DE CURVAS DE DESCARGA OBTENIDAS PARA LAS CRECIDAS MENORES DEL RÍO PURAPEL.

Período de validez de la curva	MODELO (CURVA)	(R ²) Coef. Deter.
1961 – 1962	$Q = -1,3978 \cdot H^3 + 21,323 \cdot H^2 - 35,75 \cdot H + 15,773$	99,96
1963 – 1964	$Q = -1,7611 \cdot H^3 + 23,94 \cdot H^2 - 41,415 \cdot H + 19,206$	99,94
1965 – 1966	$Q = -1,5235 \cdot H^3 + 21,945 \cdot H^2 - 36,26 \cdot H + 15,335$	99,91
1967 – 1968	$Q = -1,7895 \cdot H^3 + 23,622 \cdot H^2 - 39,102 \cdot H + 16,161$	99,83
1969 – 1970	$Q = -2,45 \cdot H^3 + 29,538 \cdot H^2 - 55,005 \cdot H + 28,05$	99,72
1971 – 1972	$Q = -3,0014 \cdot H^3 + 33,188 \cdot H^2 - 62,183 \cdot H + 32,165$	99,81
1973 – 1974	$Q = -1,13 \cdot H^3 + 19,293 \cdot H^2 - 30,875 \cdot H + 12,056$	99,93
1975 – 1976	$Q = -3,2815 \cdot H^3 + 34,717 \cdot H^2 - 64,014 \cdot H + 31,869$	99,68
1977 – 1978	$Q = -2,2317 \cdot H^3 + 27,647 \cdot H^2 - 50,192 \cdot H + 24,9$	99,65
1979 – 1980	$Q = -0,9153 \cdot H^3 + 17,346 \cdot H^2 - 26,3H + 10,455$	98,89
1981 – 1982	$Q = -1,2287 \cdot H^3 + 19,875 \cdot H^2 - 31,691 \cdot H + 12,042$	99,91
1983 – 1984	$Q = -1,2287 \cdot H^3 + 19,875 \cdot H^2 - 31,691 \cdot H + 12,042$	99,91
1985 – 1986	$Q = -1,2287 \cdot H^3 + 19,875 \cdot H^2 - 31,691 \cdot H + 12,042$	99,91
1987 – 1988	$Q = -1,8407 \cdot H^3 + 24,231 \cdot H^2 - 41,111 \cdot H + 17,939$	99,81
1989 – 1990	$Q = -0,305 \cdot H^3 + 12,907 \cdot H^2 - 15,357 \cdot H + 0,4276$	99,98
1991 – 1992	$Q = 10,904 \cdot H^2 - 12,22 \cdot H - 0,5117$	99,60
1993 – 1994	$Q = 11,161 \cdot H^2 - 12,941 \cdot H + 0,0508$	99,94
1995 – 1996	$Q = -1,1182 \cdot H^3 + 18,849 \cdot H^2 - 28,823 \cdot H + 9,9204$	99,94
1997 – 1998	$Q = 11,047 \cdot H^2 - 12,298 \cdot H - 0,457$	99,93
1999 – 2000	$Q = -1,6118 \cdot H^3 + 23,018 \cdot H^2 - 39,698 \cdot H + 18,119$	99,85

Fuente: Pizarro, *et al* (2003), Proyecto Fondecyt 1010590.

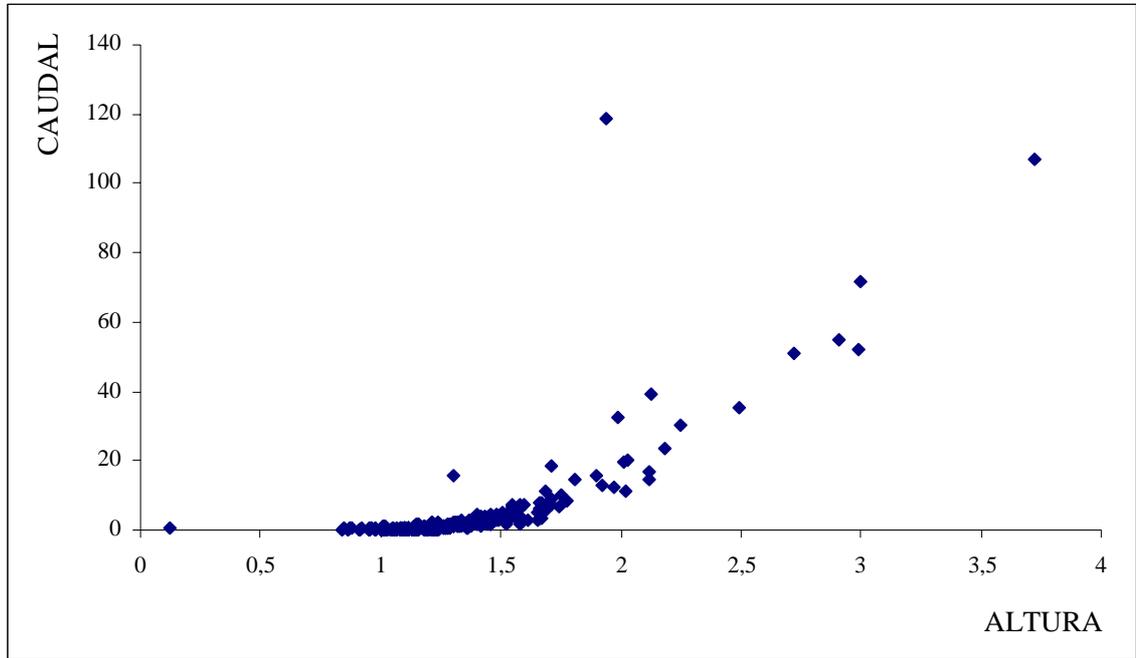


FIGURA 15: TENDENCIA DE LOS AFOROS UTILIZADOS EN LA CONFECCIÓN DE LAS CURVAS DE DESCARGA.

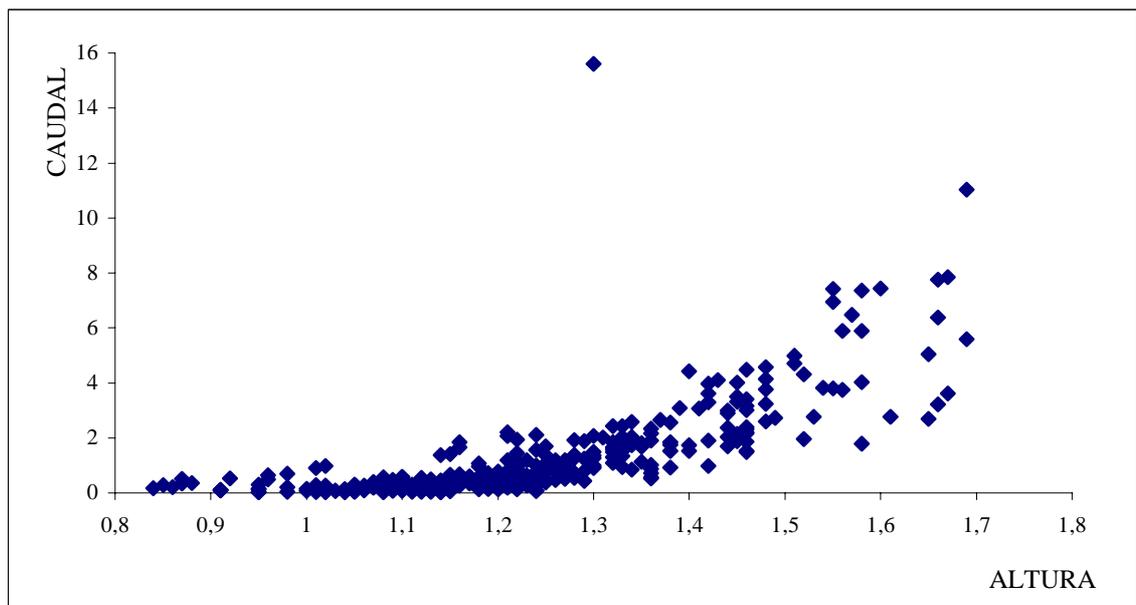


FIGURA 16: TENDENCIA DE LOS AFOROS DE LA PARTE BAJA DE LA CURVA.

6.1.2. Evaluación de la función.

En esta etapa se verificó la calidad del modelo de la curva de agotamiento necesaria para el cálculo de las reservas; para ello se usaron algunos indicadores estadísticos específicos. La tabla 3 muestra los resultados de dicha evaluación; además, se calculó la proporción que representa el error estándar de estimación, con respecto a los caudales estimados promedios, y ambos para cada crecida.

TABLA 3: INDICADORES ESTADÍSTICOS APLICADOS AL MODELO DE LA CURVA RECESIVA.

Crecida	Coefficiente de determinación (R^2)	Error Estándar de Estimación (E.E.E)	Promedio de caudales observados (m^3/s)	Proporción del E. E. E. sobre la media (%)
Julio 1960	0	0,752	3,691	20,4
Julio 1962	0	0,779	2,833	27,5
Julio 1964	0	1,940	6,617	29,3
Julio 1965	0,911	1,597	26,122	6,1
Julio 1966	0	3,632	22,737	16
Julio 1968	0	0,082	1,645	5
Julio 1970	1,000	1,331	17,215	7,7
Julio 1972	0,835	0,088	1,341	6,6
Julio 1975	0,950	1,209	14,177	8,5
Julio 1976	0	0,828	2,989	27,7
Julio 1978	0	3,426	15,179	22,6
Julio 1980	0,991	0,997	15,420	6,5
Julio 1982	0	2,085	14,035	14,9

TABLA 3: INDICADORES ESTADÍSTICOS APLICADOS AL MODELO DE LA CURVA RECESIVA. (CONTINUACIÓN)

Crecida	Coefficiente de determinación (R ²)	Error Estándar de Estimación (E.E.E)	Promedio de caudales observados (m ³ /s)	Proporción del E. E. E. sobre la media (%)
Julio 1984	0	17,366	34,258	50,7
Julio 1985	0,993	0,190	5,955	3,2
Julio 1986	0	0,700	1,795	39
Julio 1988	0	8,313	13,406	62
Julio 1990	0	0,650	2,083	31,2
Julio 1992	0	1,248	12,122	10,3
Julio 1994	0,976	0,217	10,599	2
Julio 1995	0,767	8,590	18,861	45,5
Julio 1996	0	5,682	8,757	65,9
Septiembre 1998	0	0,668	1,825	53,4

6.1.3. Reservas mensuales.

Los datos de la Tabla 4, corresponden a las reservas de agua por mes, para el período 1960-2000. Estos valores se expresan en milímetros; para ello, los volúmenes obtenidos en m³, se dividen por la superficie de la cuenca en m².

TABLA 4: RESERVAS MENSUALES PARA EL PERÍODO 1960-2000, (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1960	29,80	14,30	8,60	11,26	6,64	16,33	11,31	24,86	19,82	7,96	9,61	8,69
1961	0,33	0,17	0,32	0,73	0,58	0,73	1,95	7,90	40,66	12,35	21,76	10,26
1962	2,53	0,54	0,51	1,97	3,77	7,54	13,32	11,44	3,70	0,98	34,73	1,14
1963	0,50	0,40	0,68	0,99	0,29	0,64	5,72	10,85	252,62	30,05	27,73	98,32
1964	21,66	8,59	6,91	6,91	16,74	21,66	7,97	5,76	63,57	18,41	7,64	3,89
1965	0,47	0,12	0,12	0,12	0,82	0,82	2,43	0,91	36,55	20,36	97,95	66,93
1966	13,21	3,13*	2,17*	7,50	4,53	6,09	38,74	16,95	73,30	27,84	26,75	8,05
1967	27,84	2,49	1,06	2,38	14,61	4,51	18,14	9,45	26,40	86,66	41,44	32,66
1968	1,60	1,02	1,31	1,79	5,65	16,52	32,66	8,70	3,72	3,72	3,27	0,59
1969	3,23	0,52	0,02	0,02	0,02	1,39	9,66	19,88	16,71	19,19	4,45	0,60
1970	2,24	7,95*	1,64	1,86	2,02	2,47	12,21	12,98	9,53	2,72	12,64	9,47
1971	2,99	2,17	2,17	11,9*	10,2*	21,2*	20,21	13,22	12,79	2,53	8,23	3,32
1972	3,76	3,32	0,35	11,98	10,37	6,39	5,39	1,23	19,7*	46,92	51,53	14,84
1973	8,27*	7,95*	7,77*	11,9*	10,2*	21,2*	12,1*	12,8*	19,7*	29,7*	120,31	82,26
1974	8,27*	7,95*	7,77*	11,9*	10,2*	51,04	12,1*	12,8*	19,7*	29,7*	32,1*	18,6*
1975	19,86	16,10	16,57	19,39	20,71	43,74	13,31	10,44	97,95	52,03	13,60	4,82
1976	8,27*	7,95*	7,77*	11,9*	10,2*	2,73	8,68	4,16	1,36	7,15	8,68	0,52
1977	8,27*	7,95*	7,77*	11,9*	10,2*	21,2*	12,1*	12,17	6,98	11,42	33,83	24,80
1978	15,77	12,49	14,13	14,95	14,13	18,24	1,09	14,81	2,21	30,38	5,84	2,61
1979	4,99	5,67	11,77	11,77	3,56	23,56	23,56	33,08	7,27	84,45	34,16	24,44

*: Valores completados con el promedio histórico de la década.

TABLA 4: RESERVAS MENSUALES PARA EL PERÍODO 1960-2000, (mm).
(CONTINUACIÓN)

1980	16,64	8,64	4,68	32,62	20,90	58,07	99,62	130,39	0,00	118,67	178,51	136,67
1981	103,70	78,69	61,32	46,53	20,91	32,65	61,83	12,54	22,99	116,67	70,85	43,72
1982	26,55	101,87	11,07	96,91	84,69	7,35	23,80	33,76	54,20	32,29	21,60	1,55
1983	0,10	0,01	0,00	0,00	5,69	13,88	17,34	20,16	35,14	247,24	207,16	174,56
1984	146,26	122,55	103,86	87,02	73,33	7,77	59,44	24,93	81,10	90,86	189,10	107,50
1985	61,11	34,74	20,86	11,86	54,82	4,08	16,43	17,56	65,26	209,61	171,81	141,72
1986	116,16	95,21	79,55	5,49	1,88	5,36	15,45	3,91	0,00	13,67	19,01	108,12
1987	46,61	20,09	9,40	6,37	59,08	49,61	0,00	28,12	54,51	58,60	28,00	120,49
1988	85,36	60,47	43,80	99,12	0,00	6,18	3,39	12,22	29,05	182,49	136,79	103,49
1989	77,58	58,15	44,82	33,60	25,42	19,05	22,30	10,35	51,25	46,12	65,34	52,61
1990	42,06	33,63	27,48	13,82	10,69	31,93	20,57	2,56	9,07	9,54	1,92	4,38
1991	1,83	1,17	0,59	0,28	1,70	21,32	24,90	16,15	24,44	11,14	10,51	2,51
1992	29,02	27,77	26,65	4,84	20,18	133,79	20,18	27,15	69,85	340,01	236,17	165,98
1993	115,29	80,08	56,94	39,55	0,56	0,25	7,50	25,86	97,41	35,97	12,85	4,75
1994	32,72	22,77	16,42	11,43	11,89	11,07	12,87	12,91	34,48	91,60	58,44	37,83
1995	54,54	49,62	45,56	41,45	18,67	5,10	1,77	54,38	27,81	24,52	9,10	3,23
1996	1,11	0,38	0,14	17,06	145,84	141,41	1,34	8,56	29,05	14,35	3,16	0,73
1997	0,16	0,04	0,01	0,00	6,11	6,58	53,99	32,56	12,17	22,25	3,08	0,43
1998	0,06	0,01	0,00	0,00	9,18	3,52	1,39	0,53	0,21	103,39	83,72	68,26
1999	55,28	44,76	36,99	29,96	24,42	19,78	3,02	4,32	50,13	198,82	87,14	39,22
2000	17,19	7,53	7,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	200,40	138,47	21,62

6.2. Análisis de las reservas.

6.2.1. Medias Móviles.

Se realizó un análisis gráfico, determinando las medias móviles de las reservas de agua a nivel mensual y para el continuo del total de los datos; para este último caso, además se determinaron las medias móviles para las décadas (60, 70, 80 y 90) y a nivel de períodos (1960-1978 y 1979-2000). Es importante volver a destacar, que el periodo 1960-1978, es el lapso con mayor presencia de bosque nativo, y 1979-2000, es el lapso con mayor presencia de plantaciones.

6.2.1.1. Medias Móviles a nivel mensual.

Las graficas siguientes muestran las medias móviles a nivel mensual. Así la figura 17 muestra el gráfico de los promedios móviles para los meses invernales, es decir, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre. La figura 18 corresponde a las medias móviles para los meses estivales que son Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo.

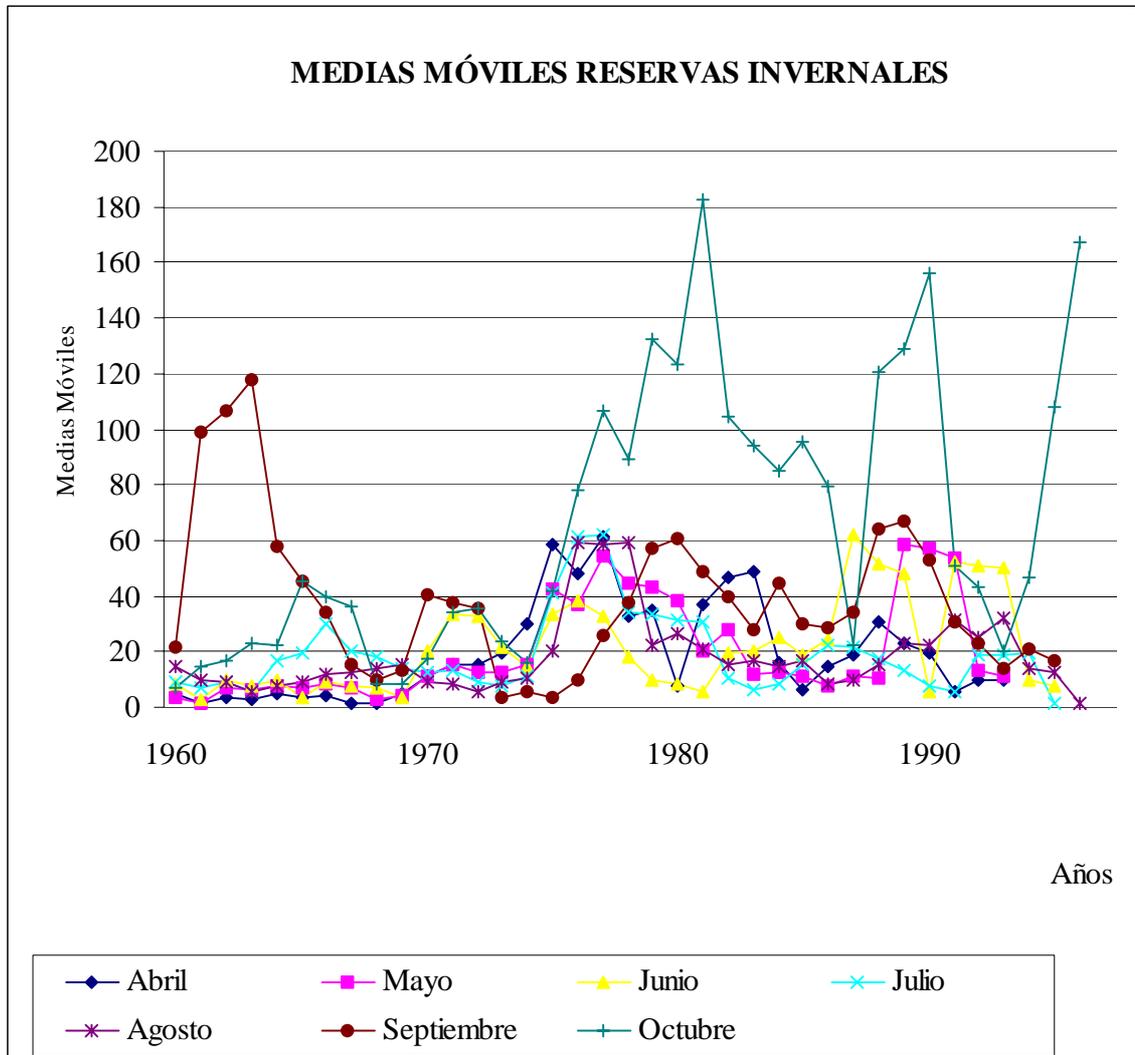


FIGURA 17: MEDIAS MÓVILES PARA LAS RESERVAS MENSUALES INVERNALES.

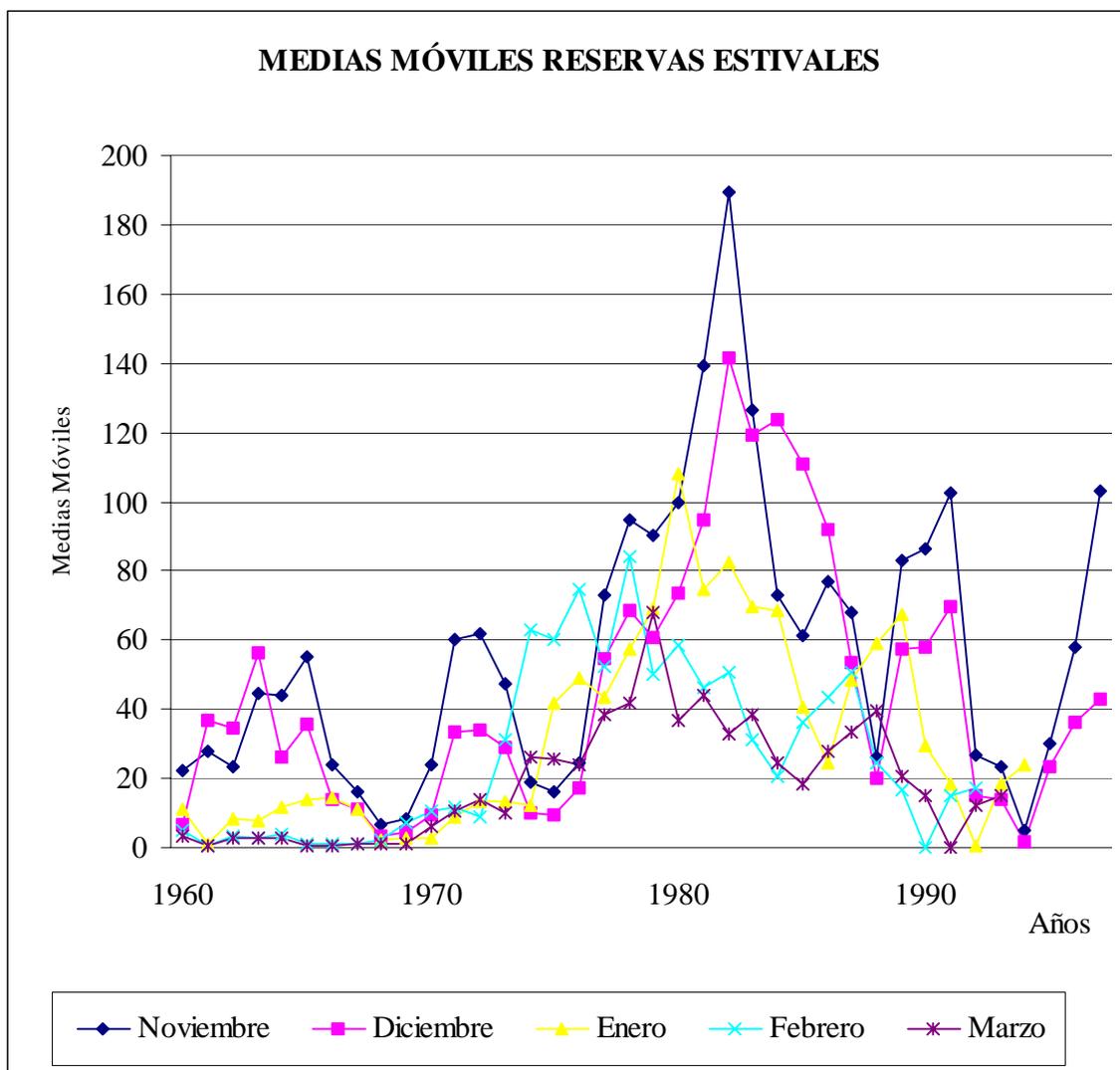


FIGURA 18: MEDIAS MÓVILES PARA LAS RESERVAS MENSUALES ESTIVALES.

6.2.1.2. Medias Móviles para el total continuo de los datos.

Para la serie continua de todos los datos de las reservas, se determinaron las medias móviles. La figura 19 muestra las medias móviles para el total de los datos. La figura 20

corresponde a las medias móviles por década y la figura 21 muestra las medias móviles a nivel de periodos (1960-1978 y 1979-2000).

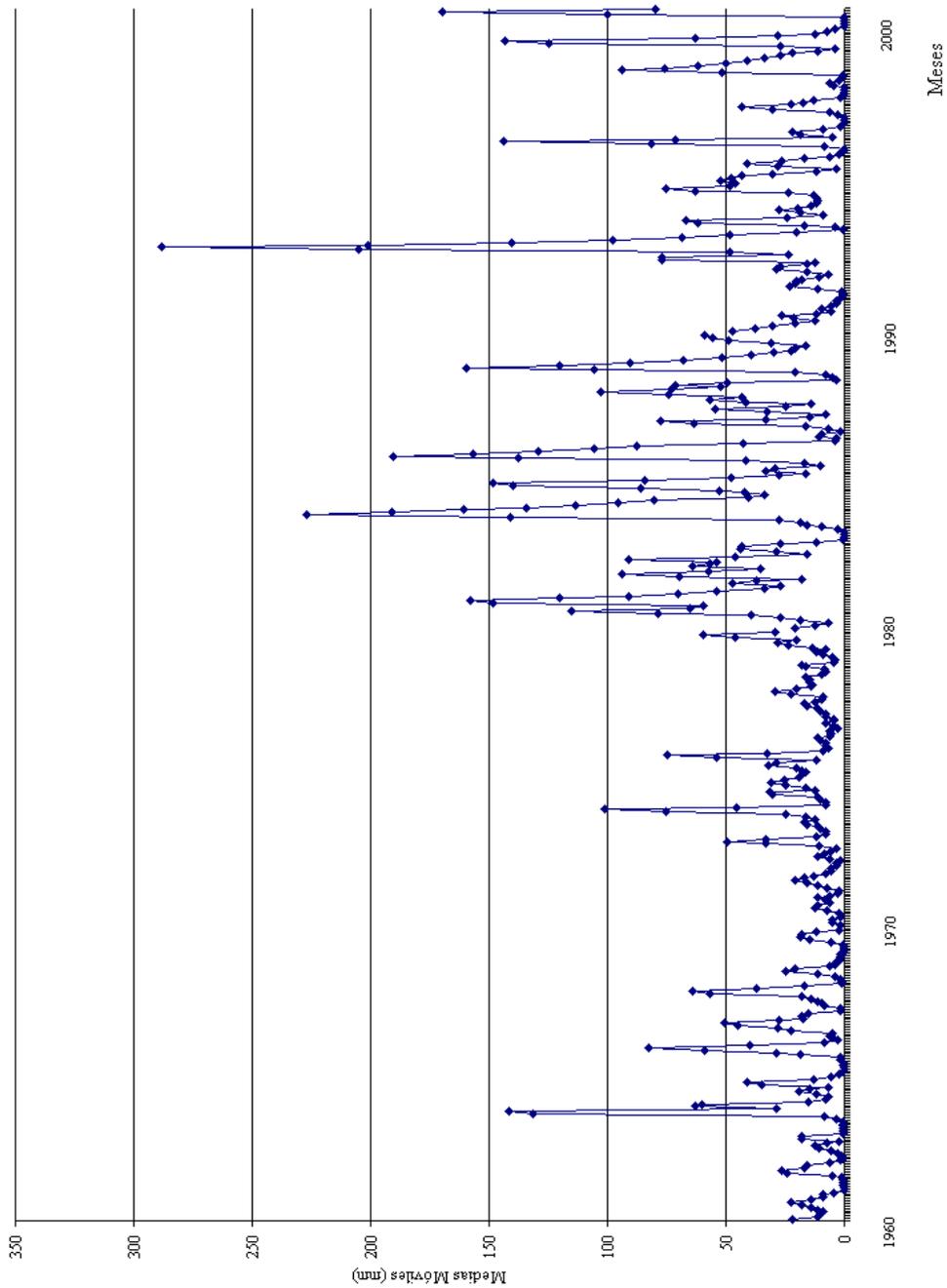


FIGURA 19: MEDIAS MÓVILES PARA EL CONTINUO DE LOS DATOS.

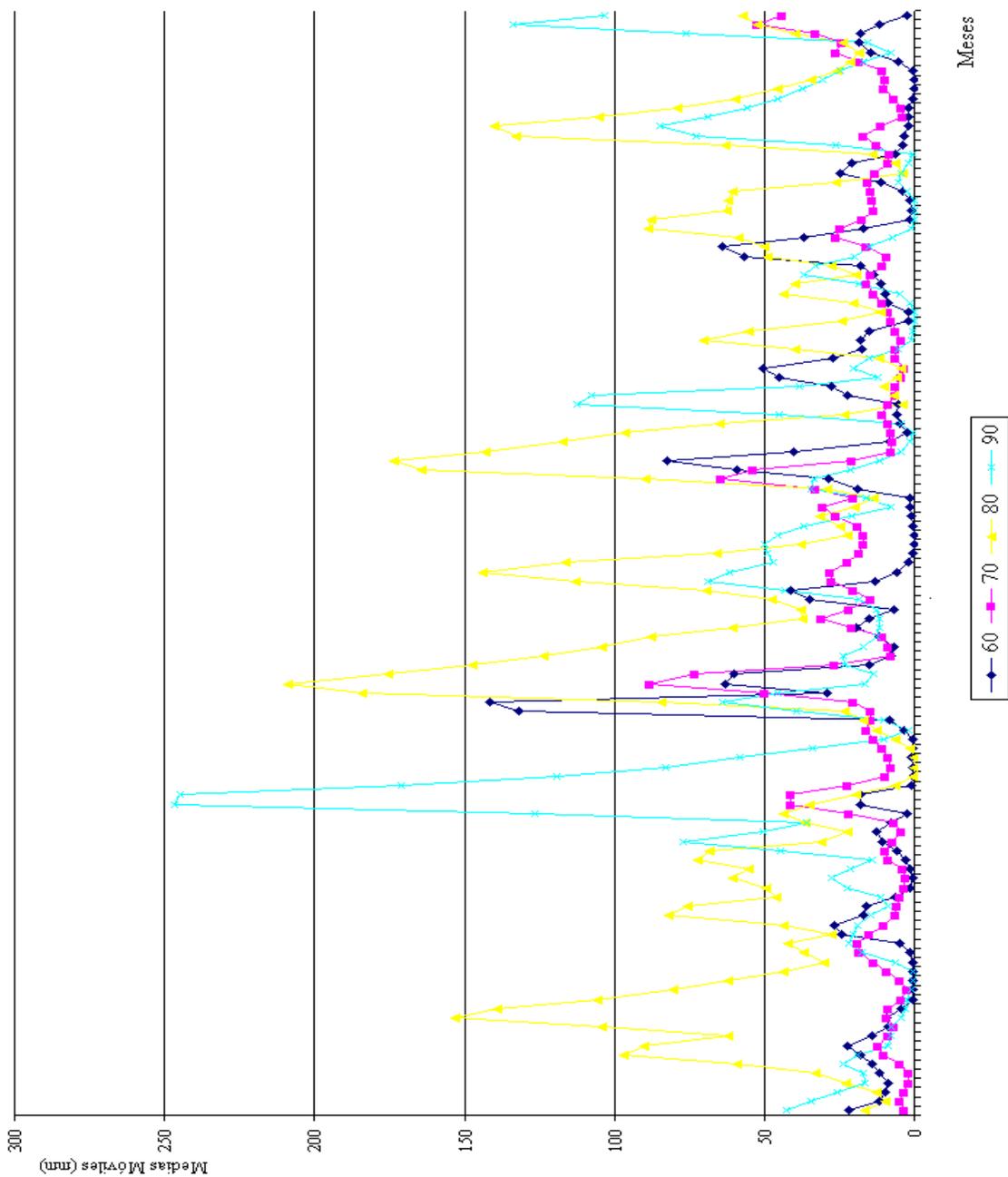


FIGURA 20: MEDIAS MÓVILES POR DÉCADAS.

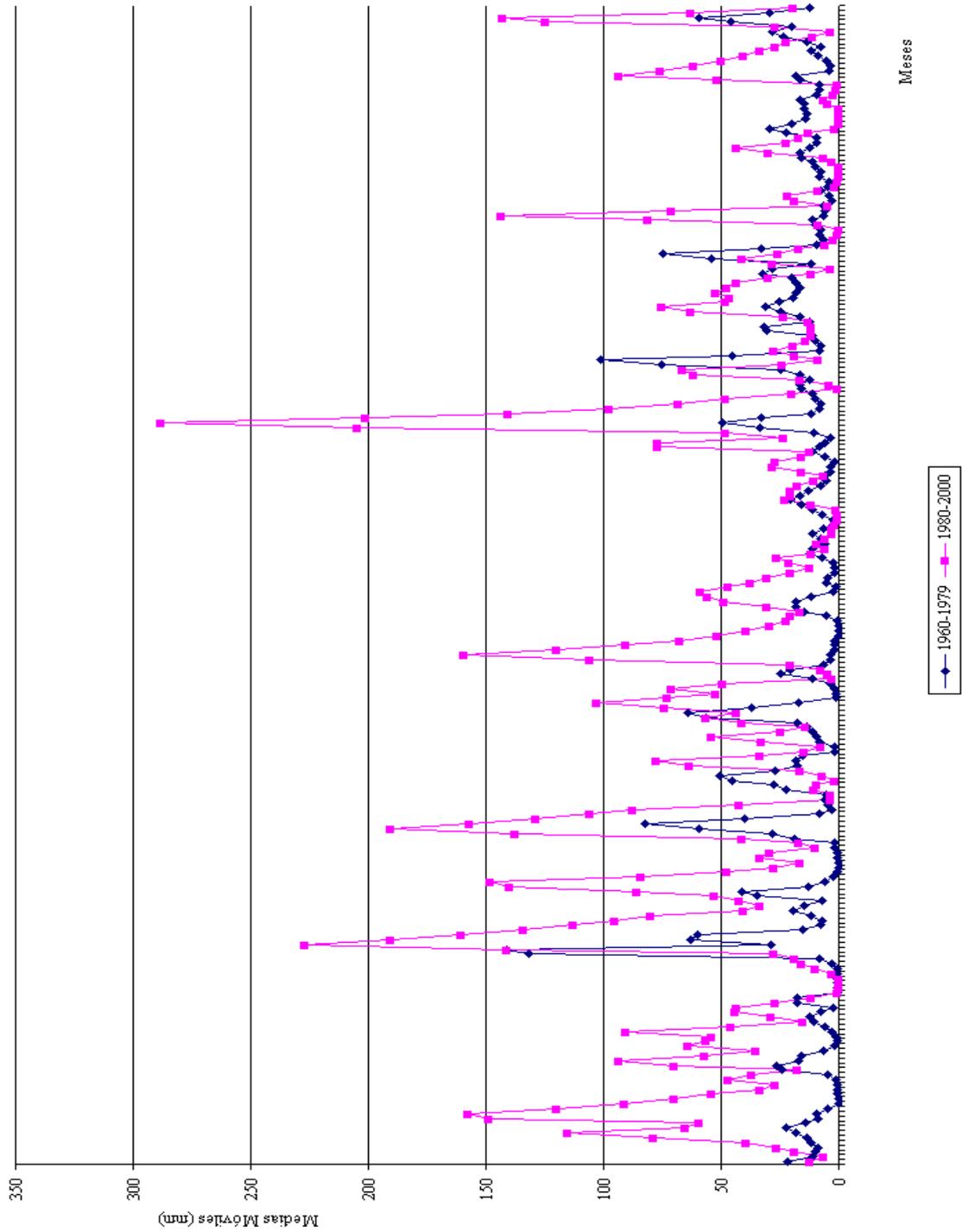


FIGURA 21: MEDIAS MÓVILES A NIVEL DE PERIODOS (1960-1978 y 1979-2000).

6.2.2. Análisis Estadístico.

El análisis estadístico se ve remitido solamente a la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, debido a que al efectuar la prueba de Normalidad a los datos generados, se verificó el no cumplimiento de este supuesto, por lo que no fue posible utilizar el ANDEVA y las pruebas t en el análisis de resultados. En el apéndice 3, se encuentran los resultados de las pruebas de Normalidad realizadas a los datos.

La prueba U de Mann-Whitney, se realizó para comprobar si existían diferencias entre las décadas (60, 70, 80 y 90) y a nivel de períodos (1960-1978 y 1979-2000). En ambos casos el análisis fue a nivel mensual y para el continuo de los datos.

6.2.2.1. Comparación interdecadal a nivel mensual

TABLA 5: VALORES DE CÁLCULO PARA LA PRUEBA U Y DECISIÓN CON RESPECTO A H_0 .

MES	DÉCADAS	U (CALCULADO)	U (TABLA)	DECISIÓN
Enero	60/70	25	11	Se acepta H_0
	70/80	7	11	Se rechaza H_0
	80/90	30	26	Se acepta H_0
Febrero	60/70	8	7	Se acepta H_0
	70/80	7	8	Se rechaza H_0
	80/90	38	26	Se acepta H_0
Marzo	60/70	10	10	Se rechaza H_0
	70/80	15	11	Se acepta H_0
	80/90	39	26	Se acepta H_0

TABLA 5: VALORES DE CÁLCULO PARA LA PRUEBA U Y DECISIÓN CON RESPECTO A H_0 . (CONTINUACIÓN).

Abril	60/70	5	8	Se rechaza H_0
	70/80	16	8	Se acepta H_0
	80/90	32	26	Se acepta H_0
Mayo	60/70	16	8	Se acepta H_0
	70/80	8	7	Se acepta H_0
	80/90	25	23	Se acepta H_0
Junio	60/70	17	14	Se acepta H_0
	70/80	33	14	Se acepta H_0
	80/90	50	26	Se acepta H_0
Julio	60/70	34	14	Se acepta H_0
	70/80	20	14	Se acepta H_0
	80/90	33	26	Se acepta H_0
Agosto	60/70	35	17	Se acepta H_0
	70/80	25	17	Se acepta H_0
	80/90	41	26	Se acepta H_0
Septiembre	60/70	16	14	Se acepta H_0
	70/80	22	14	Se acepta H_0
	80/90	45	26	Se acepta H_0
Octubre	60/70	37	17	Se acepta H_0
	70/80	11	17	Se rechaza H_0
	80/90	41	26	Se acepta H_0
Noviembre	60/70	39	20	Se acepta H_0
	70/80	14	20	Se rechaza H_0
	80/90	29	26	Se acepta H_0
Diciembre	60/70	44	20	Se acepta H_0
	70/80	10	20	Se rechaza H_0
	80/90	28	26	Se acepta H_0

6.2.2.2. Comparación entre períodos para cada mes del año.

TABLA 6: VALORES DE CÁLCULO PARA LA PRUEBA U Y DECISIÓN CON RESPECTO A H_0 .

MES	U	E(U)	VAR(U)	ZC	DECISIÓN
Enero	245	165	1045	2,4747529	Se acepta H_0
Febrero	218	143	858	2,5604578	Se acepta H_0
Marzo	231	154	949,67	2,4986483	Se acepta H_0
Abril	235	154	949,67	2,62844819	Se rechaza H_0
Mayo	212	154	949,67	1,8820987	Se acepta H_0
Junio	233	176	1144	1,6852403	Se acepta H_0
Julio	207	176	1144	0,9165342	Se acepta H_0
Agosto	250	187	1246,67	1,7842897	Se acepta H_0
Septiembre	178	176	1144	0,0591312	Se acepta H_0
Octubre	311	187	1246,67	3,5119353	Se rechaza H_0
Noviembre	253	195,5	1335,92	1,5731791	Se acepta H_0
Diciembre	276	198	1353	2,1205363	Se acepta H_0

De la tabla anterior se desprende que sólo 2 meses presentan rechazo de la hipótesis nula, lo que es esperable, porque son meses de cambio de régimen hídrico.

6.2.2.3. Comparación entre períodos para el total de meses de 1960-1978 y 1979-2000.

TABLA 7: VALORES DE CÁLCULO PARA LA PRUEBA U Y DECISIÓN CON RESPECTO A H_0 , PARA EL TOTAL DE MESES.

COMPARACIÓN	U	E(U)	VAR(U)	ZC	DECISIÓN
1960-1978 y 1979-2000	34929	24948	1887732	7,264469	Se rechaza H_0

6.2.2.4. Comparación interdecadal para el total de los datos

TABLA 8: VALORES DE CÁLCULO PARA LA PRUEBA U Y DECISIÓN CON RESPECTO A H_0 , ENTRE DÉCADAS.

COMPARACIÓN	U	E(U)	VAR(U)	ZC	DECISIÓN
60/70	6112	4920	166460	2,92160373	Se acepta H_0
70/80	7566	4920	166460	6,485372037	Se rechaza H_0
80/90	4841	7200	289200	-4,386607699	Se rechaza H_0

6.2.3. Relación entre reservas y precipitaciones.

Con el objetivo de determinar la existencia de relaciones entre las reservas de agua presentes en la cuenca y las precipitaciones ocurridas, se calculó el cociente entre las precipitaciones mensuales y las reservas mensuales (P_m/R_m); este cociente indica qué proporción de las reservas finales, representan las precipitaciones caídas durante el año, es decir cuánto de lo que precipitó, se mantiene en la cuenca como reserva. En la figura 22 se observa el comportamiento de este cociente, donde cada valor, representa la media del

período en estudio, para cada mes del año. Por otra parte, la figura 23 muestra el comportamiento de este cociente, pero a diferencia del anterior, aquí se hizo una separación por décadas.

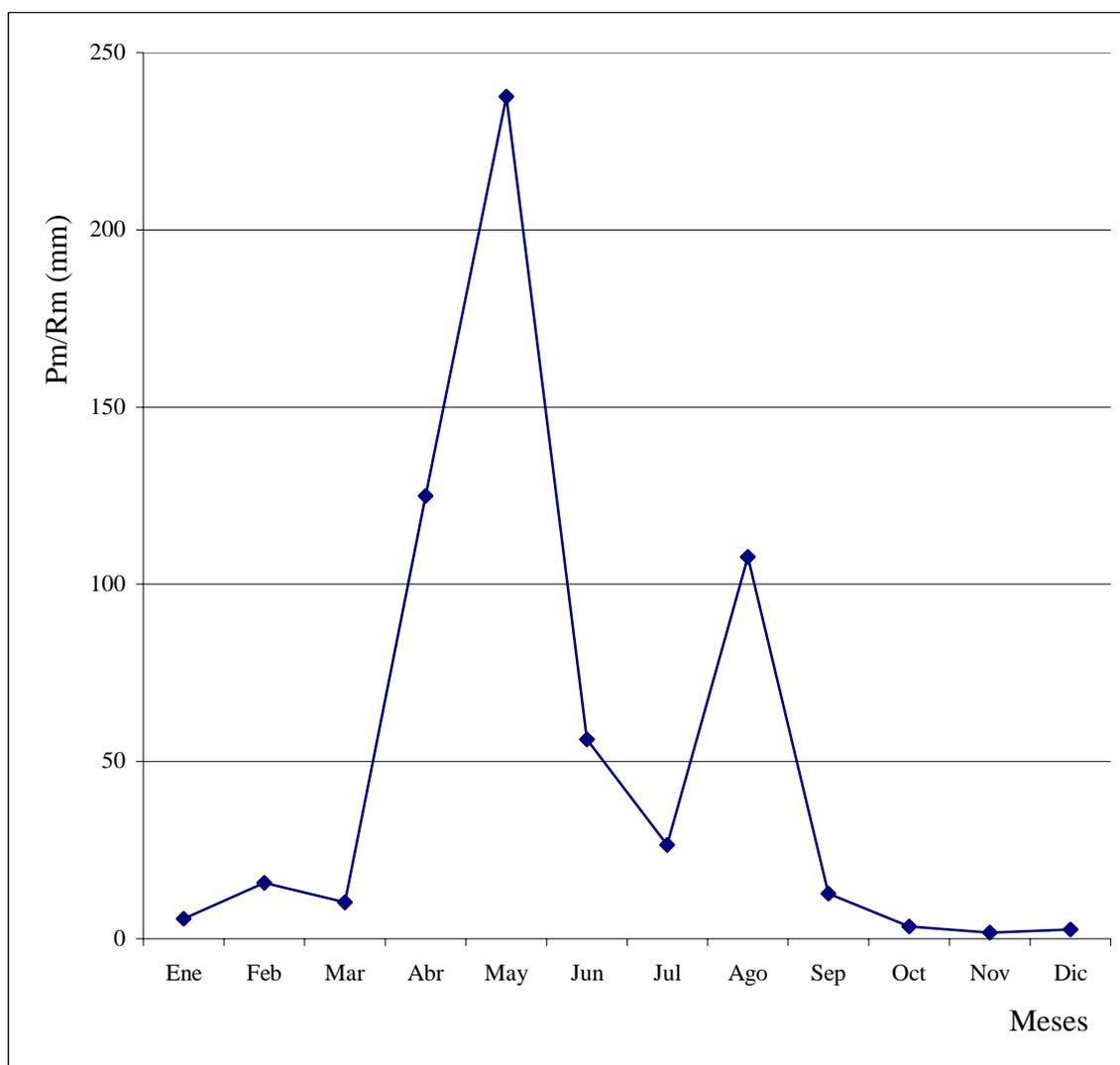


FIGURA 22: MEDIA DEL CUOCIENTE ENTRE PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES Y RESERVAS MENSUALES.

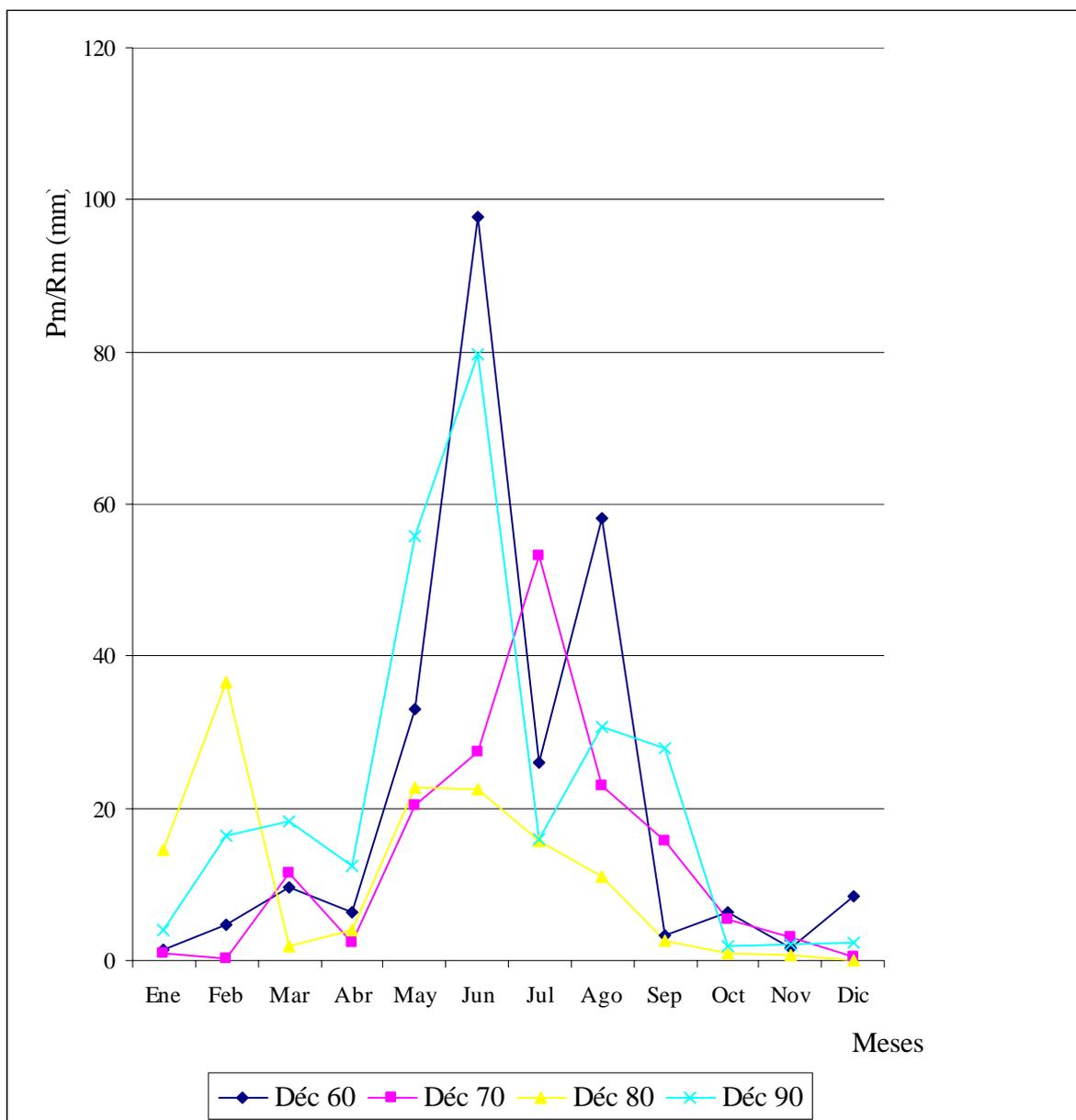


FIGURA 23: MEDIA POR DÉCADAS DEL CUOCIENTE ENTRE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES Y LAS RESERVAS FINALES.

En el mismo contexto de intentar relacionar las reservas con las precipitaciones, se realizó el cuociente entre la reserva al final del periodo anual y la precipitación caída hasta esa fecha, es decir, se tomó la reserva de marzo, que es cuando termina el año

hidrológico, y se relacionó con la precipitación acumulada anual, hasta el final del mismo mes. En la Figura 24 se muestra la línea de tendencia a lo largo del período en estudio.

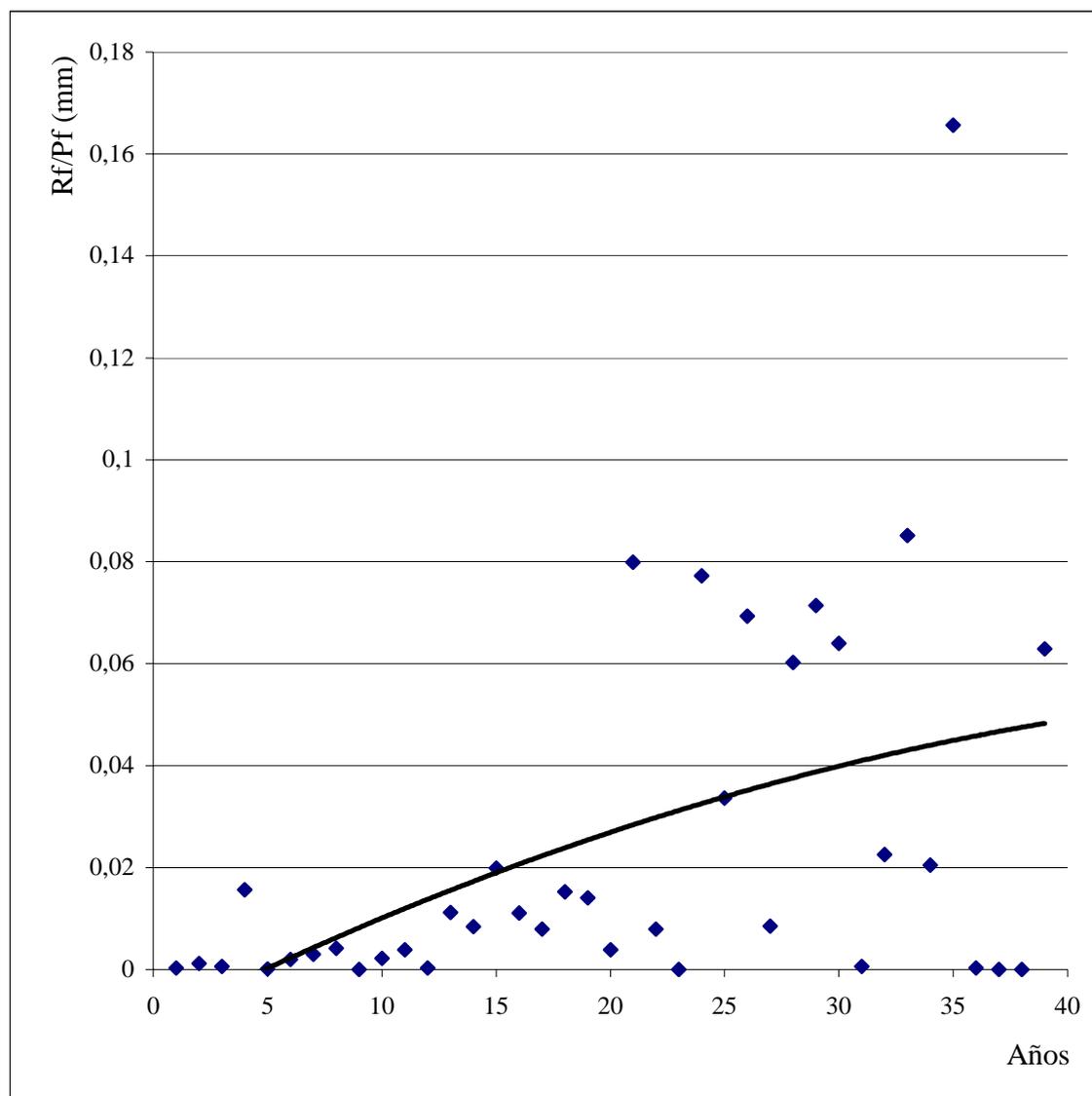


FIGURA 24: LÍNEA DE TENDENCIA DEL CUOCIENTE ENTRE LAS RESERVAS AL FINAL DEL AÑO Y LAS PRECIPITACIONES ANUALES, EN EL TIEMPO.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. Recopilación de la información y su registro.

La obtención de la información se realizó básicamente, haciendo las lecturas de los limnigramas. En este proceso se observaron problemas similares a los expuestos en el estudio realizado por Caro en 2001, para la misma etapa, los cuales están referidos al limnógrafo y a problemas de interpretación de la información. Así, para el primer tipo de problemas, en algunos meses el limnograma registró saltos verticales que luego volvieron a su estado normal, lo que puede ser explicado por la caída de algún objeto de gran tamaño cerca de la estación fluviométrica (Caro, 2001). Además, se produjeron algunos problemas de embancamiento de la estación, lo que produjo la falta de registro para algunos meses, lo que fue más evidente en la década del 70. El segundo tipo de inconveniente, se refiere a la interpretación de la información limnigráfica, es decir, errores que pueden producirse en las lecturas del nivel o altura del agua, producto de una impresión no fidedigna de los niveles.

7.2. Evaluación del modelo de la curva de agotamiento.

7.2.1. Coeficiente de determinación (R^2).

En la tabla 3 se muestran los resultados del cálculo de los coeficientes de determinación (R^2), en las 24 crecidas seleccionadas, donde 15 de ellas presentan un resultado igual a 0; sin embargo, el resto de los valores oscila entre 0,8 y 0,99. Debido a esta situación, no se puede decir con certeza qué proporción de la variación total de los caudales observados son

explicados por los caudales modelados mediante este indicador. Esto se explica, debido a que el modelo para la curva de agotamiento que se utilizó, tiene un comportamiento muy estable; es decir, la variación que muestran los caudales a medida que aumenta el tiempo es muy pequeña, y si se aplica cualquier estimador de la variabilidad a un modelo de este tipo, los resultados, en general, no serán buenos.

7.2.2. Error estándar de estimación (E.E.E.)

Los resultados del cálculo del error estándar de estimación que se muestran en la tabla 3, no presentan ninguna tendencia clara; así, el 48% de los valores de cada crecida presentan un error que se encuentra entre 0-1 m³/s, un 22% de los valores presenta valores entre 1-2 m³/s, y el, 26% de los valores esta entre 2-10 m³/s y sólo un valor se encuentra fuera de este rango. Lo anterior se puede apreciar en la figura, lo que indicaría que el error estándar de estimación, en general presenta valores pequeños, lo que valida en general la aplicación del modelo recesivo.

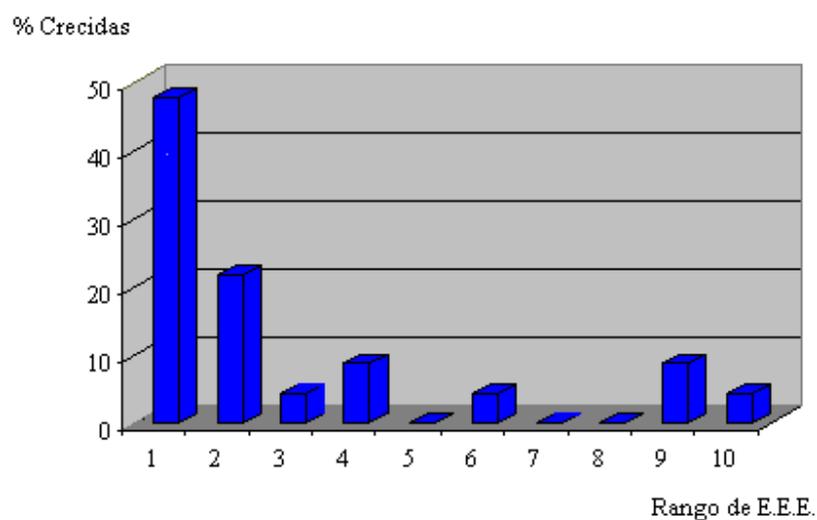


FIGURA 25: DISTRIBUCIÓN DEL E.E.E. POR RANGOS.

Además, resulta interesante evaluar qué proporción de los caudales medios observados, representa el error estándar de estimación Así, de acuerdo a este criterio, el error estándar de estimación se clasifica en 2 rangos; entre 0 y 30 % de error con respecto a los caudales medios observados, donde se encuentra el 83% de las crecidas, y entre 30% y 65%, donde se encuentra el 17% de las crecidas.

7.3. Reservas Mensuales

7.3.1. Análisis de valores extremos

El comportamiento de las reservas a lo largo de las distintas décadas fue muy variado, registrándose los valores más altos durante los meses de Octubre y Noviembre, mientras que, el valor menor se encontró durante el mes de Abril. En la tabla 9 se muestran los valores de las máximas reservas mensuales, las mínimas reservas mensuales, además de la media y el coeficiente de variación, ambos por década.

TABLA 9: VALORES EXTREMOS DE LAS RESERVAS.(mm)

Década		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
60	Mín	0,335	0,123	0,02	0,02	0,02	0,642	1,952	0,912	3,699	0,985	3,268	0,591
	Máx	29,8	14,3	8,597	11,26	16,74	16,52	38,74	24,86	252,6	86,66	97,95	98,32
	Med	10,12	3,13	2,17	3,37	5,37	7,62	14,19	11,67	53,71	22,75	27,53	23,11
	C.V.	14,31	7,92	4,78	4,35	6,58	7,95	10,86	4,27	100,9	26,19	28,56	48,72
70	Mín	2,241	2,175	0,347	1,861	2,024	2,468	1,091	1,225	1,358	2,53	8,226	0,518
	Máx	15,77	16,1	16,57	19,39	20,71	51,1	23,56	33,08	97,95	84,45	120,3	82,26
	Med	8,27	7,95	7,77	11,99	10,16	21,17	12,06	12,76	19,73	29,7	32,09	18,56
	C.V.	6,92	4,63	6,64	3,47	5,83	18,3	5,2	7,05	61,11	29,35	41,66	35,21
80	Mín	0,101	0,007	5E-04	3E-04	1,879	4,076	3,393	3,908	0,003	13,67	21,6	1,546
	Máx	146,3	122,5	103,9	96,91	84,69	58,07	99,62	130,4	81,1	247,2	189,1	174,6
	Med	68,01	58,04	37,94	41,95	34,67	20,4	31,96	29,39	39,35	111,6	108,8	99,04
	C.V.	32	30,03	32,45	36,44	27,5	19,02	31,12	45,58	18,34	56,25	52,34	27,26
90	Mín	0,055	0,007	0,001	1E-04	1,697	0,249	1,337	0,535	0,205	11,14	1,923	0,426
	Máx	115,3	80,08	56,94	41,45	145,8	141,4	53,99	54,38	97,41	340	236,2	166
	Med	33,21	26,02	21,08	15,84	24,92	37,48	14,75	18,5	35,46	85,16	50,61	32,73
	C.V.	40,09	27,88	20,97	16,19	74,85	76,86	18,28	15,18	24,88	136,4	106,6	83,25

En la tabla 9, se puede apreciar que el mínimo valor de reserva mensual se registró en el mes de abril de la década del 90, con un valor de 1×10^{-4} mm; sin embargo, fue en esta misma década donde se obtuvo la máxima reserva mensual en el mes de octubre, con un valor de 340 mm. Ahora bien, si se analiza cada una de las décadas, se puede apreciar que los meses de Marzo y Abril son los que registran principalmente las mínimas reservas mensuales, y en los meses de Octubre y Noviembre se registran las máximas reservas mensuales. Es evidente que en los meses de invierno, la cuenca se recarga, alcanzando máximos valores en los meses de Octubre y Noviembre, donde comienza un rápido descenso debido al periodo estival que termina en el mes de Marzo, mes que registra las mínimas reservas mensuales.

7.3.2 Reserva final con reserva media del período

Con el objetivo de realizar una comparación gráfica de cada año, con la reserva media para todo el periodo en estudio, se determinó la reserva media anual y se contrastó con la media del periodo; ésto se observa en la figura 26.

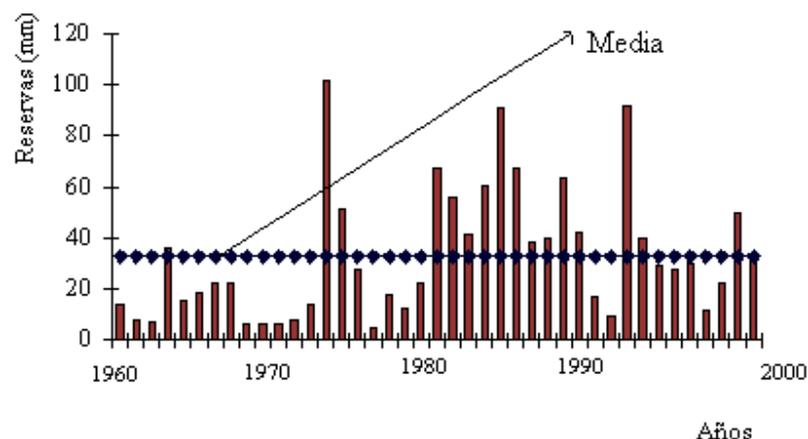


FIGURA 26: RESERVAS FINALES ANUALES V/S MEDIA DEL PERIODO.

Al observar la gráfica de las reservas medias anuales v/s la media para todo el periodo en estudio, se puede apreciar que la media de las reservas para la totalidad de los datos fue de 32,98 mm. Además, se determinó que la mayoría de los valores se encuentran bajo la media, con 25 valores bajo la media y 15 valores sobre la media. Importante es destacar, que antes de la década del 80, sólo dos valores se encuentran sobre la media; sin embargo, a partir de la década del 80 los valores comienzan a ascender hasta el año 1984, donde se alcanza el valor medio anual de reserva máxima del período, que corresponde a 91,14 mm. Esto refleja un incremento importante de las reservas a lo largo del período en estudio, a partir de la década del 80, década que presentó niveles de precipitación superiores al resto de las otras décadas, hecho que influye de manera importante en los valores de las reservas.

7.3.3. Análisis de Medias móviles.

7.3.3.1. Medias móviles a nivel mensual.

Para esta etapa, el análisis se dividió en los meses invernales y estivales. A partir de la figura 17, se pueden analizar las medias móviles durante los meses de invierno, y la figura 18 muestra la gráfica de las medias móviles para los meses estivales.

En relación a las medias móviles mensuales de las reservas invernales, éstas presentan una gran irregularidad para todas las décadas, lo que hace difícil apreciar alguna tendencia que evidencie una variación de las reservas a través del tiempo. Sin embargo, destaca el mes de septiembre que presenta valores considerablemente más altos que el resto de los meses, principalmente en la década del 60. Lo anterior se debe principalmente a que durante el periodo estival, se ha producido una recarga de reservas en la cuenca y evidentemente ésto se ve reflejado en el mes de septiembre. Así también lo muestra, el mes

de octubre, que presenta valores de reservas altos. Pero, a partir de la década del 80, ello se debería a la mayor cantidad de precipitaciones que se registraron en esta década.

7.3.3.2. Medias móviles para el continuo de los datos.

En relación a las medias móviles para el total de datos, se realizó una jerarquización de los valores. Así, en la tabla 10 se observa la distribución de los valores en porcentaje, para cada una de las décadas.

TABLA 10: DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE LAS MEDIAS MÓVILES DE LAS RESERVAS (\bar{R}), A NIVEL DE DÉCADAS.

Década	$\bar{R} < 50$ mm	$50 < \bar{R} < 100$	$100 < \bar{R} < 150$	$150 < \bar{R} < 200$	$\bar{R} > 200$
60	92,3 %	5,9 %	1,7 %	0 %	0 %
70	92,6 %	6,1 %	1,2 %	0 %	0 %
80	55,1 %	27,1 %	11,9 %	5,1 %	0,84 %
90	79,5 %	14,5 %	3,4 %	0 %	2,5 %

Como se señaló, la media móvil para este caso, consideró grupos de tres meses. Así se determinó que 342 valores de medias móviles, presentaron una media bajo los 50 mm; 61 meses tienen una media móvil entre 50 y 100 mm; 21 meses presentan una media móvil entre 100 y 150 mm; sólo 6 meses tienen una media móvil entre 150 y 200 mm y, por último, 4 meses del total presentaron una media móvil sobre 200 mm. La figura 27, muestra la distribución de las medias móviles de las reservas mensuales, donde se aprecia que, la mayoría de los valores de las medias móviles, registran valores bajos; ésto se debería principalmente al régimen hidrológico de la cuenca, que al ser netamente pluvial, es decir,

depende de las precipitaciones para su recarga, provoca que, cuando comienza el periodo estival, las reservas comienzan su rápido descenso, alcanzando valores muy bajos. Esta situación continua hasta que comienza el periodo invernal, en los meses de Abril o Mayo.

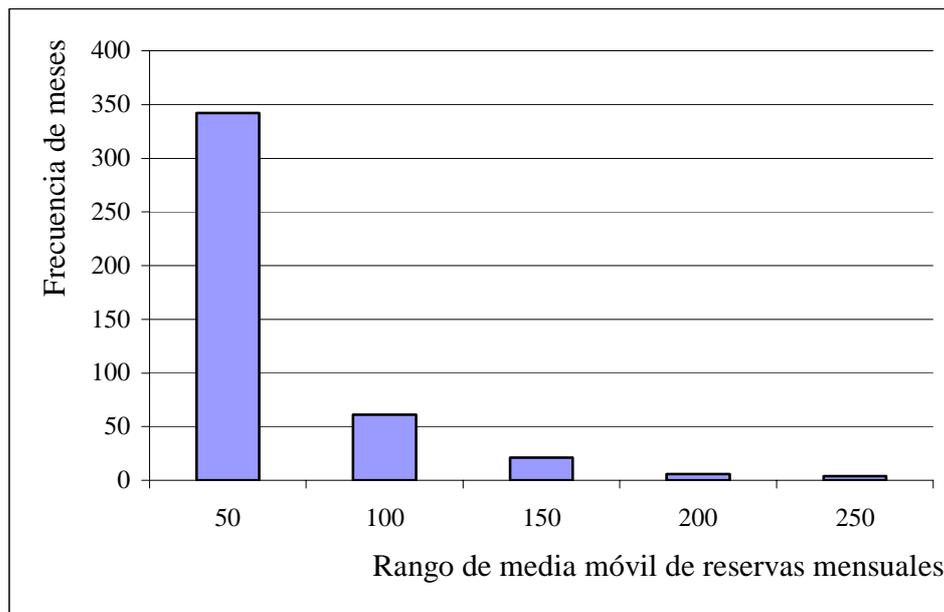


FIGURA 27: DISTRIBUCIÓN DE LAS MEDIAS MÓVILES PARA EL CONTINUO DE LOS DATOS.

7.3.4. Análisis estadístico de las reservas.

Como se mencionó en los resultados, el análisis estadístico se ve remitido a la prueba U de Mann-Whitney; ésta contempló el análisis interdecadal e intertemporal a nivel mensual y para el continuo de los datos. A partir de los resultados arrojados por la prueba U y cuyo resumen de resultados se observa en las tablas 11 y 12, es posible hacer una serie de análisis, que a continuación se detallan.

7.3.4.1. Variación interdecadal a nivel mensual.

TABLA 11: VARIACIÓN INTERDECADAL PARA LA PRUEBA U DE MANN-WHITNEY

	Comparación de Décadas		
	60-70	70-80	80-90
Enero	No	Sí	No
Febrero	No	Sí	No
Marzo	Sí	No	No
Abril	Sí	No	No
Mayo	No	No	No
Junio	No	No	No
Julio	No	No	No
Agosto	No	No	No
Septiembre	No	No	No
Octubre	No	Sí	No
Noviembre	No	Sí	No
Diciembre	No	Sí	No
Continuo de los datos	No	Sí	Sí

No: No existen diferencias entre décadas.

Sí: Sí existen diferencias entre décadas.

De acuerdo a la tabla 11, que entrega los resultados de las comparaciones realizadas entre las décadas en estudio y para la totalidad de los meses, puede señalarse en primer término, que en la mayoría de los meses no existen diferencias entre los datos.

Si se analiza cada una de las comparaciones individualmente, se observa que al comparar las décadas 80-90 no existen diferencias de los datos para ningún mes del año, en tanto que, para las comparaciones 60-70, sólo se presentan variaciones en los meses de Marzo y Abril. Por lo tanto la mayor parte de las variaciones de las reservas se registraron al comparar las décadas 70-80, presentándose diferencias en los meses de Enero, Febrero, Octubre, Noviembre y Diciembre.

En resumen, del total de 36 comparaciones interdecadales realizadas a nivel mensual, en sólo 6 de ellas hubo variaciones entre los datos, es decir, un 16 %, porcentaje relativamente bajo y que no evidencia con certeza una variación importante de las reservas durante el período 1960-2000. Lo anterior se explicaría debido a que al comparar medias, se tienden a esconder las variaciones absolutas de los datos.

En cuanto a las décadas comparadas y para el continuo de los datos, se observa que las comparaciones realizadas entre las décadas 60-70, no presentan diferencias entre los datos; sin embargo, las comparaciones entre las décadas 70-80 y 80-90, sí presentan variación. Esto se puede deber principalmente, a que la década del 80 tuvo niveles de precipitación mucho mayores que el resto de las décadas en estudio.

7.3.4.3. Variación intertemporal a nivel mensual y para el continuo de los datos.

Se sabe que el año 1979 es el año a partir del cual, las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), adquieren una gran influencia en la cuenca del Purapel, por lo que resulta interesante observar cómo se comportan las reservas antes y después de ese año. Es por esto que se realizó la prueba U de Mann-Whitney, para comparar los periodos 1960/1678-1979/2000.

TABLA 12: VARIACIÓN INTERTEMPORAL PARA LA PRUEBA U DE MANN-WHITNEY

	Comparación 1960/1978-1979/2000
Enero	No
Febrero	No
Marzo	No
Abril	Sí
Mayo	No
Junio	No
Julio	No
Agosto	No
Septiembre	No
Octubre	Sí
Noviembre	No
Diciembre	No
Continuo de los datos	Sí

No: No existen diferencias entre décadas.

Sí: Sí existen diferencias entre décadas

Así, se observa en la tabla 12, que al comparar los dos periodos en estudio (1960/1978-1979/2000), se presentaron diferencias significativas sólo para los meses de Abril y Octubre. Estos resultados se diferencian con lo obtenido al comparar los dos periodos, pero para el total continuo de los datos, donde se observó que existían variaciones de las reservas entre los dos periodos; en otras palabras, el periodo con mayor influencia de las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), manifiesta una mayor proporción de reservas, que el periodo con presencia del bosque nativo, aunque ello sería producto más de un aumento de las precipitaciones en la década del 80, que a características vegetacionales.

7.4. Relación entre reservas y precipitaciones.

7.4.1. Precipitaciones

Antes de analizar las relaciones entre las precipitaciones y las reservas, es importante conocer el comportamiento de las precipitaciones en el período 1960-2000. Así, Pizarro *et al* 2003, en el proyecto, “Influencia de masas boscosas en el régimen hídrico del Río Purapel, Chile central”, observaron que existían valores de precipitación mayores en la década del 80, lo que hizo concluir que esta década había sido más lluviosa. Para poder corroborar esto, se sumó el total de lluvia caída en la cuenca durante los 40 años, sumando un valor de 32.495,3 mm. Los valores totales por décadas se muestran en la tabla 13, donde se observa efectivamente que, en los 80, ocurrieron montos superiores de precipitación, que los ocurridos en las décadas del 60, 70 y 90. Además, en la década del 80 es cuando ocurre la mayor cantidad de años con precipitaciones anuales por sobre los mil milímetros en cinco años, registrándose además el mayor monto de toda la serie estudiada, a saber, año hidrológico 82/83, con 1.417,2 mm. De lo anterior, se puede asumir que las precipitaciones se vieron incrementadas en sus montos en la década del 80, respecto a las demás décadas.

TABLA 13: PRECIPITACIÓN TOTAL CAÍDA POR DÉCADA.

Década	Precipitación			Año más lluvioso y valor asociado
	Total (mm)	%	Promedio (mm)	
60	6.606,8	20,3	660,7	1963 (1.133,8)
70	8.554,7	26,3	855,5	1972 (1.393,6)
80	9.703,2	30	970,3	1982 (1.417,2)
90	7.630,6	23,4	763,1	1992 (1.225,7)
Total	32.495,3	100	812,4	

Fuente: Pizarro *et al* (2003), Proyecto Fondecyt 1010590.

La prueba U de Mann-Whitney, comparó el período 1961/1978 con el período 1979/2000, para meses húmedos y secos por año, lo que muestra que el período 1961/1978 no presenta diferencias significativas con el período 1979/2000, a nivel de la serie total de meses. Sin embargo, la misma prueba aplicada a nivel de datos anuales, reveló que sí existen diferencias significativas para las precipitaciones entre ambos periodos (Tabla 14), lo cual se explica porque al tener una serie continua de meses, la variabilidad es mucho menor que a nivel anual.

TABLA 14: PRUEBA U DE MANN-WHITNEY DE COMPARACIÓN DE PRECIPITACIONES, ENTRE PERIODOS 1961/1978 V/S 1979/2000.

Comparación	Zc	Zt *	Conclusión *
Total de meses	0,34	1,96	No existen diferencias significativas
Total de años	-1,99	1,96	Sí existen diferencias significativas

Considerando un nivel de significancia estadística de 0.05

Fuente: Pizarro *et al* (2003), Proyecto Fondecyt 1010590.

7.4.2. Precipitaciones y reservas.

7.4.2.1. Precipitaciones mensuales y reservas mensuales (Pm/Rm).

Se realizó el cociente entre las precipitaciones medias mensuales y las reservas mensuales (Pm/Rm); este cociente significa cuántas veces es superior la precipitación del mes a las reservas, al final del mismo mes. La figura 22 muestra el comportamiento de este cociente mediante un valor medio calculado para todo el periodo en estudio. Así, se pudo observar de manera clara, una tendencia descendente de los valores de este cociente (Pm/Rm), a partir del mes de Mayo, mes que presenta el valor punta, lo cual se explica

porque, la proporción de reservas existentes en la cuenca al comienzo del periodo invernal, es considerablemente menor a las precipitaciones, debido a que la cuenca tiene un régimen netamente pluvial, es decir, las cantidad de reservas almacenadas, dependen exclusivamente de las precipitaciones. Sin embargo, a medida que se avanza en el periodo invernal, se produce una recarga de las reservas, lo que provoca que esta relación disminuya a una razón constante hasta el mes de septiembre. Así, a partir de este mes de cambio de régimen hidrológico, las precipitaciones comienzan su descenso y el cuociente disminuye abruptamente hasta alcanzar valores mínimos al final del período estival, es decir, Marzo-Abril.

Con la finalidad de detectar diferencias en el comportamiento de este cuociente en las distintas décadas que abarca esta memoria, se obtuvo la gráfica de los valores medios por década. Así, se observó que, cada una de las décadas presenta un comportamiento similar a lo explicado en el párrafo anterior; sin embargo, la década del 80 presenta los valores más bajos, en comparación con el resto de las décadas. Esto se explicaría porque, como ya se mencionó, en los 80 ocurrieron montos superiores de precipitación, que los ocurridos en las décadas del 60, 70 y 90; por lo tanto, si este cuociente disminuye, indicaría que parte importante de estas precipitaciones se almacenó en la cuenca. Lo anterior se ve reflejado en los meses del periodo estival, donde los valores de este cuociente presentan valores mayores que el resto de las décadas.

7.4.2.2. Reservas finales y precipitaciones acumuladas (R_f/P_f).

En el mismo marco de relacionar las reservas con las precipitaciones, se realizó el cuociente entre la reserva al final del periodo, y la precipitación caída hasta esa fecha, es decir la reserva de Marzo. Este cuociente indica que proporción de las precipitaciones caídas durante el año, queda almacenada al final del periodo. En la Figura 24 se muestra la

línea de tendencia a lo largo del período en estudio. Se observa que el cociente (R_f/P_f), para el continuo de los datos presenta valores mínimos en la primera década y los máximos valores se registran en la década del 80. Estos resultados indicarían que a medida que las precipitaciones aumentan, evidentemente la recarga de reservas también aumenta, ya que como se sabe, en la década de los 80 se produjo la mayor cantidad de precipitaciones, por lo tanto se puede decir que las reservas son dependientes de las precipitaciones.

7.4.2.3. Variación del cociente (R_f/P_f) con precipitaciones.

Como ya se mencionó, el cociente entre las reservas al final del periodo y las precipitaciones acumuladas (R_f/P_f), indica la proporción de las precipitaciones que se almacena en la cuenca, pero además, resulta interesante determinar el comportamiento de este cociente a medida que aumentan las precipitaciones. De este modo, se relacionó estas dos variables, donde se obtuvo la figura 28, que muestra la tendencia de los valores del cociente a lo largo del periodo de 40 años que abarca esta memoria, con respecto a las precipitaciones.

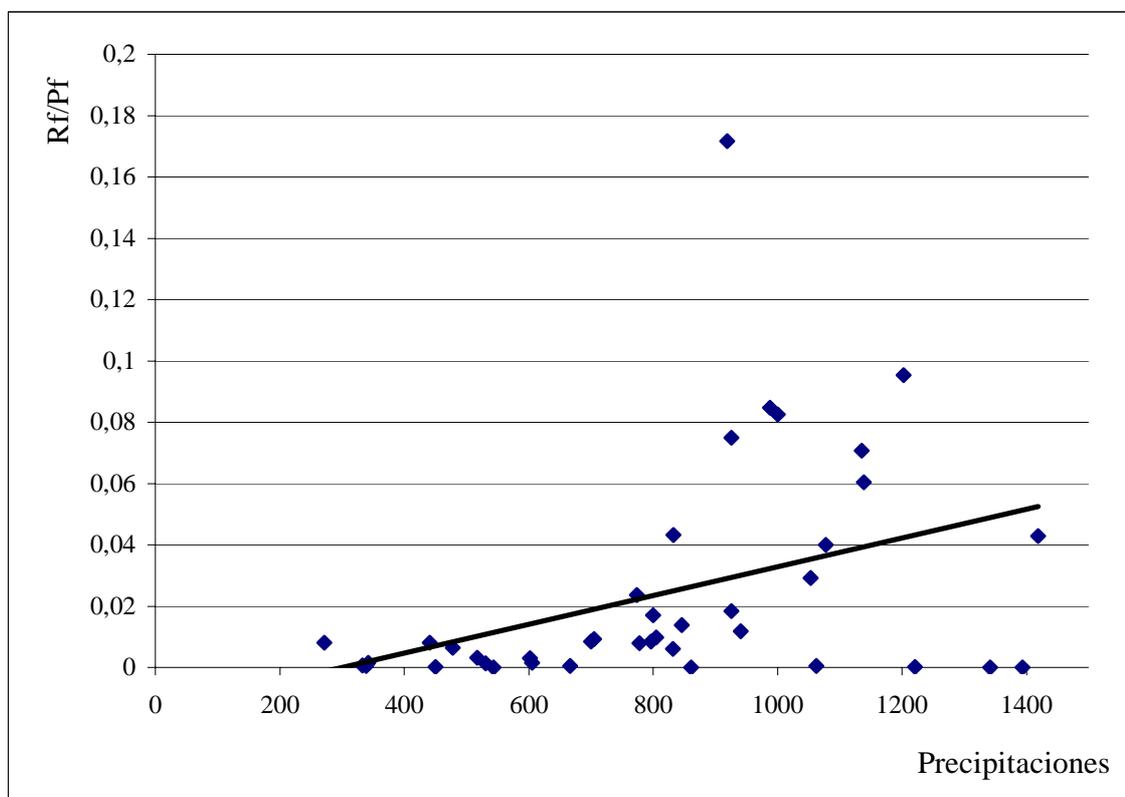


FIGURA 28: VARIACIÓN DEL CUOCIENTE (Rf/Pf) CON RESPECTO A LAS PRECIPITACIONES.

En la figura anterior se muestra la tendencia del cuociente (Rf/Pf) con respecto a las precipitaciones, lo que indicaría claramente que, a medida que aumentan las precipitaciones, la cantidad de reservas almacenada en la cuenca con respecto a esta variable, también aumenta.

Por último, se realizó un análisis de las variables precipitación y reservas. Al realizar un análisis gráfico de las reservas y las precipitaciones por medio de las medias móviles, se observó un comportamiento similar de las tendencias, estando marcadas por la conducta que establecen las precipitaciones (Figura 29). La serie muestra un marcado incremento en la década del 80, en comparación con el resto del período; entonces, se puede decir que la

década del 80 es un periodo con condiciones hidrológicas distintas. La explicación a esta situación se encontraría en las precipitaciones ocurridas durante ésta década, las cuales son mayores en montos e intensidades comparada con las demás décadas, siendo esta característica la responsable del incremento en los valores de las reservas analizadas

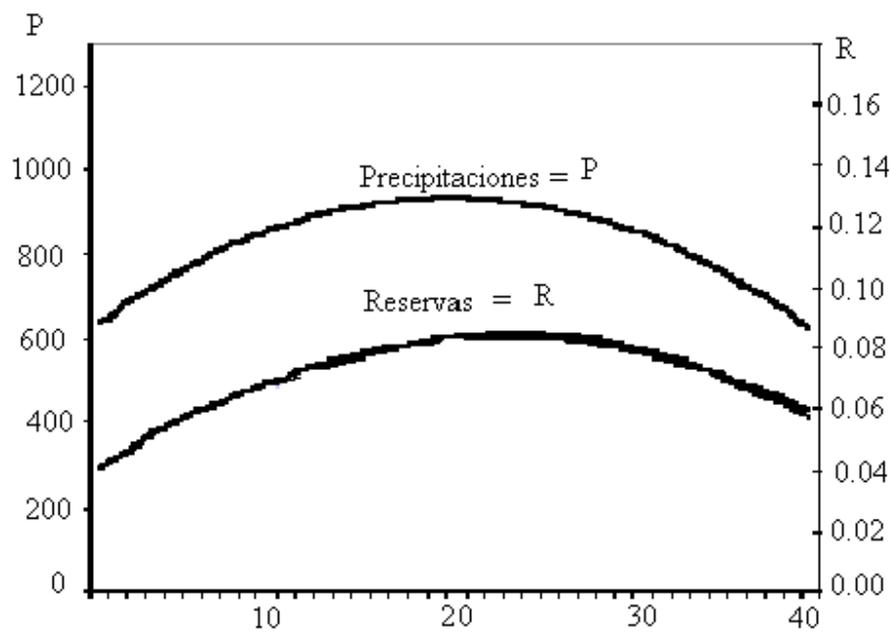


FIGURA 29: GRAFICA DE TENDENCIAS PARA LA SERIE 1960-2000.

En resumen, se puede concluir que la precipitación es la variable más influyente en el comportamiento de las reservas, lo cual explica por qué los dos tipos de bosques analizados, nativos y plantaciones forestales de *Pinus radiata* (D. Don), presentan un comportamiento hidrológico similar. Entonces, es posible señalar que los valores de la variable hidrológica estudiada no estarían en función de las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), sino que se encontrarían relacionadas con las precipitaciones y las intensidades con las que éstas caen sobre la cuenca.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones derivadas de la realización de este estudio.

- A nivel mensual, la mayor reserva de agua almacenada en la cuenca, se registró en el mes de Octubre del año 1992 con 340 mm, en tanto que la reserva mínima de agua almacenada en la cuenca fue de 1×10^{-4} mm y se registró en Abril del año 1998.
- Los valores máximos de reservas a nivel mensual para las décadas 60, 70, 80 y 90 se produjeron en los años 63, 73, 83 y 92, respectivamente. A su vez, los mínimos valores de reservas se presentaron durante los años 69, 72, 83 y 98, respectivamente.
- Para el análisis interdecadal, los resultados de la prueba U de Mann-Whitney, indican que, a nivel de cada mes comparado, no existen diferencias significativas entre décadas. Sin embargo, para el continuo de los datos, sí se presentaron diferencias significativas entre décadas.
- Comparando el periodo 1960/1978, con mayor influencia de bosque nativo, y el periodo 1979/2000, con mayor influencia de las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), se aprecia que según la prueba U de Mann-Whitney, existen diferencias significativas entre ambos, con una presencia de mayores reservas en el segundo

periodo, que estarían explicados porque la década del 80 denotó un mayor valor de precipitación e intensidad.

- Si bien no se puede afirmar que las plantaciones forestales de *Pinus radiata* (D.Don), inciden en la capacidad de almacenamiento de la cuenca, tampoco es posible afirmar que el cambio de uso del suelo de bosque nativo por plantaciones forestales, produce una disminución en los niveles de reservas a través del periodo 1960-2000.
- Finalmente, el análisis de las reservas mensuales y anuales, del río Purapel, no define que pueda atribuirse que a los bosques de *Pinus radiata* (D.Don) plantados en la cuenca del río Purapel, una disminución de las reservas, y más bien los resultados tienden a concluir que, no existen diferencias entre el bosque maulino y las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), en lo que respecta al comportamiento de las reservas de agua de la cuenca.

8.2. Recomendaciones

Las recomendaciones que se pueden hacer para este estudio y para futuras recomendaciones al respecto son:

- Se sugiere mantener el estudio en el tiempo, para tener más certeza con respecto al comportamiento de las diferentes variables hidrológicas, y entre ellas las reservas.
- Se sugiere realizar otros estudios de este tipo, pero sería interesante comparar las mismas situaciones vegetacionales, pero en el mismo tiempo cronológico; es decir,

bajo una misma influencia climática, o sea temperatura y precipitaciones. Además, sería recomendable, el poder incluir más variables en este tipo de estudio, como la evaporación, la capacidad de infiltración y la intercepción, entre otras.

- Finalmente, se sugiere ampliar este estudio a cuencas con mayor capacidad de almacenamiento de reservas, en la zona cordillerana andina, dado que por sus características geológicas, estas áreas pueden constituirse en testigos más eficientes de la influencia del tipo de vegetación, en la generación de reservas de agua.

9. BIBLIOGRAFÍA

- **ARAYA, S.** 2003. Análisis de la variación temporal de los caudales punta instantáneos en la cuenca del río Purapel, VII Región. Memoria de Título. Universidad de Talca. Talca, Chile. 102 p.
- **APARICIO, F.** 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- **CARO, J.** 2001. Modelación de caudales recesivos para la cuenca del río Purapel, Estación Nirivilo. Memoria de Título. Universidad de Talca. Talca, Chile. 121 p.
- **CALDENTEY, J.; SCHMIDT, H.; IBARRA, M.; PROMIS, A.** Modificaciones microclimáticas causadas por el uso silvícola de bosques de Lenga (*Nothofagus pumilio*), en Magallanes, Chile.(en línea). Consultado el 15 enero de 2004. Disponible en:
<http://iufro.boku.ac.at/iufro/iufronet/d6/wu60304/ponencias/tema3/caldenteyj2.html>
- **CID, L.** 1990. Inferencia estadística. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias. Departamento de matemáticas. Concepción. 319 p.
- **CIRUJEDA, J.** 1985. Curso internacional de hidrología general y aplicada. Centros de estudios y experimentación de obras públicas gabinete de formación y documentación. Madrid. España. 65-77 p.
- **CHOW, V.; MAIDMENT, D. y MAYS, D.** 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw-Hill. Santa Fé, Colombia. 584 p.

- **GONZÁLEZ, M.; GARCÍA, D.** 1995. Restauración de ríos y riveras. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 600 p.
- **HOFSTEDE, R.** 1998. Impactos ecológicos de plantaciones forestales. (en línea). Consultado el 15 de enero de 2004. Disponible en: <http://www.condesan.org/paramos2/Ponencia%20RHsemana2.htm>
- **HUBER, A., OYARZÚN, C.** 1983. Precipitación neta e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). Revista Bosque (5) 1:13-20.
- **HUBER, A.; OYARZÚN, C.** 1985. Estudio de los componentes del balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* (D Don). Chile Forestal 10 (112): 18-19.
- **HUBER, A.; LÓPEZ, D.** 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D.Don), Valdivia, Chile. Revista Bosque 14(2): 11-18.
- **IROUMÉ, A.; HUBER, A.** 2000. Intercepción de las lluvias por cubiertas de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. Revista Bosque 21(1); 45-46.
- **JORDÁN, C.** 2002. Análisis de los coeficientes de Escorrentía para la cuenca del río Purapel, Estación Nirivilo, periodo 1970-1990. Memoria de Título. Universidad de Talca. Talca, Chile. 112 p.
- **LINSLEY, R.; KHOLER, M y PAULUS, J.** 1998. Hidrología para Ingenieros. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana. México. 385 p.

- **LÓPEZ, F.** 1998. Restauración Hidrológico Forestal y Control de la Erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa, Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 851 p.
- **MINTEGUI, J; LÓPEZ, F.** 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Victoria-Gasteiz, España. 306 p.
- **MOP, DGA, Chile.** 1986. Estudio del Mapa Hidrológico Nacional. IPLA Ingenieros Consultores. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago. Chile. 164 p.
- **PIZARRO, R.; NOVOA, P.** 1986. Elementos Técnicos de Hidrología I. Instructivos Técnicos. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. La Serena, Chile. 57 p.
- **PIZARRO, R.; GONZÁLEZ, P.; WITTERSHEIM, M.; SAAVEDRA, J y SOTO, C.** 1993. Elementos Técnicos de Hidrología III. Proyecto Regional sobre el uso y conservación de recursos hídricos en áreas de America Latina y El Caribe. UNESCO-ORCYT. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile. 125 p.
- **PIZARRO, R; FARÍAS, C y JORDÁN, C.** 2003. Informe Proyecto Fondecyt N°1010590, “Análisis de la influencia de los bosques de *Pinus radiata* (D.Don) en la producción de agua y régimen hídrico: río Purapel, VII Región”. Talca, Chile. 20 p.
- **RAMÍREZ, C.** 1998. Análisis comparativo de los modelos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. Memoria de Título. Universidad de Talca. Talca, Chile. 78 p.

- **REMENIERAS, G.** 1971. Tratado de hidrología aplicada. Primera edición española. Editores Técnicos Asociados S. A. Barcelona. España. 515 p.
- **ROBINSON, M.** 1998. 30 years of forest hydrology changes at Coalburn: water balance and extreme flows. *Hydrology and Earth Science Systems*. 2: 1, 233 – 238.
- **SAHIN, V.; HALL, M.** 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*. 178: 1, 293-309.
- **SANTIBÁÑEZ, F.; URIBE, J.** 1990. Atlas Agroclimático de Chile, regiones IV a IX. Publicación N°87. CIREN, CORFO. Santiago. Chile. 67 p.
- **SÁNCHEZ, F.** 2001. Hidrología superficial I. (en línea). Consultado el 15 de enero de 2004. Disponible en: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T050.pdf>
- **VAZKEN, A.** 2004. Waters and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. 291: 1, 1-157.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. Análisis de regresión de la curva de descarga fundamental.

Supuesto de Normalidad

- a) Test de Kolmogorov-Smirnov

D tabulado = 0.2844

D calculado = 0.179632

Para un nivel de significancia $\alpha=0,05$ se deduce un comportamiento normal de los residuos.

- b) Histograma de Frecuencias.

Supuesto de Homocedasticidad

- a) Prueba Goldfeld-Quandt

SCR1 = 0,901776 g.l.= 8.

SCR2 = 0,727196 g.l.= 8.

Fc = 0,8064

Ft = 3.4381

Como la aplicación del test de G-Q determinó que $F_c < F_t$ y, al observar la gráfica de residuos no se observa ningún patrón de comportamiento de éstos, se asume que la información utilizada es Homocedástica o de igual varianza.

3. Autocorrelación

a) Test de Durbin-Watson

$n = 22$

Estadístico Durbin Watson = 1,98474

$d_l = 1,239$

$d_u = 1,429$

b) Test gráfico

Decisión: No hay autocorrelación positiva ni negativa.

* Como la regla de decisión del test D-W es la no existencia de autocorrelación positiva ni negativa, y si ello se suma al gráfico, el cual no muestra barras que sobrepasen el intervalo, se comprueba que no se está en presencia de autocorrelación entre las variables.

APÉNDICE 2.

TABLA 15: VALORES DE CAUDAL PUNTA (QP) EN (M³/S) Y HORA DE TÉRMINO DE LA CRECIDA (HT) EN HORAS.

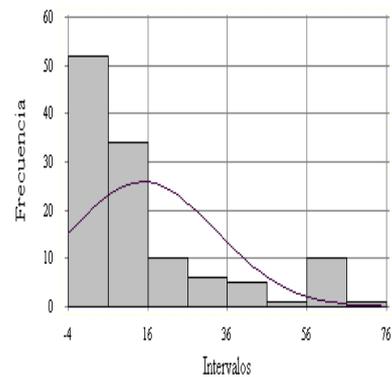
C	Qp	Ht	C	Qp	Ht	C	Qp	Ht	C	Qp	Ht	C	Qp	Ht	C	Qp	Ht
3	7,20	25	40	13,55	35	80	179,7	15	116	34,83	38	147	8,62	41	182	23,33	24
4	4,59	47	41	57,28	24	81	17,30	35	117	17,58	35	148	3,83	45	184	12,44	29
7	3,44	34	46	10,04	25	83	9,09	32	118	0,93	53	150	18,41	36	186	6,27	44
9	17,58	30	49	13,10	44	86	19,57	36	119	7,20	30	153	5,57	47	187	9,56	25
10	52,52	27	50	39,38	20	87	161,7	19	121	12,87	33	154	7,68	40	188	101,8	21
12	53,10	13	51	9,56	27	88	18,13	37	122	7,20	41	155	10,04	26	189	15,22	34
15	4,14	47	53	197,7	21	89	19,57	37	124	12,65	27	156	10,51	37	194	12,87	24
16	45,89	33	54	31,05	20	90	6,12	41	125	199,1	20	159	171,8	17	195	31,86	28
17	4,59	26	55	133,7	16	91	2,76	40	126	207,8	22	161	15,22	25	196	14,25	32
18	2,74	44	56	22,67	36	92	37,52	32	127	13,32	28	162	20,16	34	197	4,47	32
20	15,98	30	58	27,55	30	94	89,65	16	128	4,94	36	163	34,83	29	198	34,39	28
22	36,61	26	60	14,25	38	100	14,49	42	129	4,70	28	164	6,27	35	199	58,52	28
25	15,73	32	62	16,77	42	101	58,52	19	131	70,46	22	165	3,63	40	200	34,83	33
26	9,56	45	64	21,71	36	102	21,39	30	134	0,93	27	168	144,9	21	201	20,16	34
27	3,44	33	65	17,30	47	103	19,27	24	135	29,46	26	169	59,14	18	202	61,68	24
28	8,15	27	67	46,96	25	104	25,38	20	136	29,07	27	170	31,05	26	204	21,39	18
29	5,57	30	70	10,51	44	105	18,98	31	137	17,58	42	171	71,16	21	205	8,15	34
30	17,58	39	71	11,80	34	107	4,82	43	138	55,46	19	172	80,04	21	206	4,25	43
31	213,8	13	72	19,86	32	108	40,83	30	140	8,62	33	173	6,12	30	208	59,77	31
33	15,98	24	73	18,70	42	109	33,11	32	141	33,96	30	174	3,09	46	209	200,5	16
34	23,66	31	74	9,56	45	110	17,03	28	142	166,7	26	175	26,09	23	210	63,64	21
35	45,37	19	75	89,65	19	111	6,12	34	143	21,39	24	177	36,61	22			
36	74,04	13	76	83,95	24	112	22,02	32	144	8,15	35	179	8,15	38			
37	12,44	25	78	29,07	27	114	121,0	20	145	28,69	37	180	4,47	48			
39	13,55	25	79	13,10	36	115	12,01	41	146	84,75	14	181	10,04	47			

C: Número de la crecida

APÉNDICE 3. Prueba de Normalidad para reservas mensuales por década.

- **Reservas Mensuales Década del 60.**

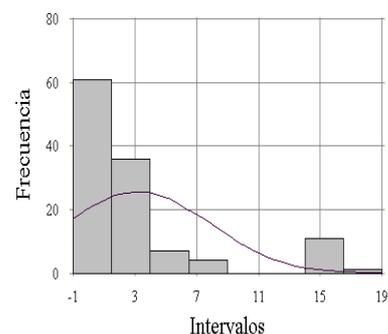
Estadístico K-S DPLUS = 0,247482
Estadístico K-DMINUS = 0,207711
Estadístico K-S DN = 0,247482
Valor p = 0,0000008264



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma gráfica del histograma de frecuencias no se asemeja a la curva normal, los datos no presentan un comportamiento normal, por lo tanto no cumplen el supuesto de normalidad.

- **Reservas Mensuales Década del 70.**

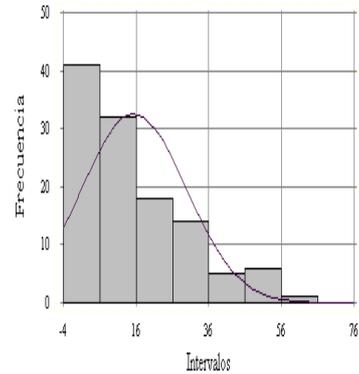
Estadístico K-S DPLUS = 0,277713
Estadístico K-DMINUS = 0,244991
Estadístico K-S DN = 0,277713
Valor p = 0,0000001829



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma gráfica del histograma de frecuencias no se asemeja a la curva normal, los datos no presentan un comportamiento normal, por lo tanto no cumplen el supuesto de normalidad.

- **Reservas Mensuales Década del 80.**

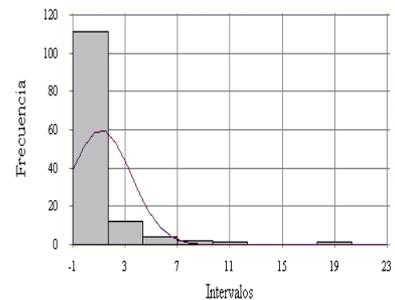
Estadístico K-S DPLUS = 0,143986
 Estadístico K-DMINUS = 0,140631
 Estadístico K-S DN = 0,143986
 Valor p = 0,0156367



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma gráfica del histograma de frecuencias no se asemeja a la curva normal, los datos no presentan un comportamiento normal, por lo tanto no cumplen el supuesto de normalidad.

- **Reservas Mensuales Década del 90.**

Estadístico K-S DPLUS = 0,246402
 Estadístico K-DMINUS = 0,314
 Estadístico K-S DN = 0,314
 Valor p = 0,0



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma gráfica del histograma de frecuencias no se asemeja a la curva normal, los datos no presentan un comportamiento normal, por lo tanto no cumplen el supuesto de normalidad.

ANEXOS

ANEXO 1.

TABLA 16: PRECIPITACIONES CUENCA RÍO PURAPEL(mm)

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
1961	4,4	4,8	11,3	47,8	145,8	106,8
1962	0,0	0,0	12,9	33,6	19,8	198,8
1963	0,0	3,0	10,3	10,9	87,0	147,4
1964	7,9	0,0	0,0	7,9	48,5	75,2
1965	0,0	0,0	0,0	142,4	132,6	99,9
1966	0,0	0,0	0,0	108,3	53,4	419,4
1967	3,0	17,8	0,0	1,0	121,2	39,1
1968	0,0	0,0	14,8	22,7	4,0	60,3
1969	0,0	0,0	0,0	69,7	154,3	375,3
1970	0,0	0,0	11,9	4,9	123,6	275,9
1971	14,8	0,0	0,0	51,4	104,8	34,6
1972	0,0	0,0	36,6	11,9	379,8	340,2
1973	0,0	0,0	10,9	63,3	202,8	104,8
1974	8,9	0,0	1,0	0,0	227,5	527,2
1975	0,0	15,8	1,0	47,5	146,4	184,5
1976	4,9	0,0	0,0	0,0	66,3	190,9
1977	13,8	0,0	3,0	26,3	125,0	190,4
1978	0,0	6,9	0,0	0,5	78,1	155,8
1979	5,4	5,9	0,0	56,9	82,6	20,8
1980	0,0	56,4	4,0	287,8	239,8	273,0
1981	7,4	5,9	19,8	103,4	375,3	34,6
1982	18,8	0,0	12,9	9,4	342,7	321,4
1983	15,8	4,0	0,0	18,8	124,6	284,8
1984	7,9	6,4	4,0	18,8	290,8	163,2
1985	2,0	0,0	7,9	37,1	131,5	132,0
1986	3,5	0,0	22,3	136,5	308,0	293,9
1987	0,0	4,9	34,9	10,9	136,9	82,1
1988	0,0	0,0	72,2	6,9	39,6	200,8
1989	0,0	0,0	3,0	0,0	24,7	137,0
1990	6,9	0,0	113,7	30,2	54,4	42,0
1991	25,2	0,0	0,0	29,5	324,1	179,0
1992	0,0	4,9	36,6	64,3	509,9	349,1
1993	0,0	0,0	0,0	90,6	197,3	190,3
1994	0,2	2,7	2,7	102,5	96,6	151,2
1995	0,0	0,0	0,0	114,9	2,7	23,8
1996	0,0	6,4	3,6	25,7	38,0	139,3
1997	4,6	6,3	1,7	99,7	116,9	313,5
1998	0,0	0,0	0,0	48,2	92,6	93,9
1999	5,0	4,6	14,2	7,4	61,4	175,9
2000	0,0	39,4	0,0	1,7	44,3	528,6
2001	18,8	0,0	4,1	39,3	257,7	102,0

Fuente: Dirección General de Aguas, Región del Maule

TABLA 16: PRECIPITACIONES CUENCA RÍO PURAPEL (mm). CONTINUACIÓN

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
277,9	286,8	157,3	19,8	0,0	0,0	1062,6
30,7	84,1	29,7	37,6	0,0	0,0	447,1
273,0	268,5	249,2	10,4	74,2	0,0	1133,8
90,0	143,4	15,8	1,0	26,7	32,6	449,0
14,8	371,9	6,9	44,5	23,7	8,9	845,7
171,1	156,3	26,7	17,8	12,9	91,0	1056,8
37,1	41,5	66,3	19,8	10,9	2,0	359,5
53,4	38,6	41,5	47,0	17,3	33,1	332,8
149,8	74,7	52,9	36,1	6,4	0,0	919,3
251,7	22,7	55,9	11,9	4,5	0,0	763,1
155,3	113,7	34,6	36,6	0,0	0,0	546,0
168,1	217,6	166,2	73,2	0,0	0,0	1393,6
220,6	18,8	3,0	48,5	16,0	7,6	696,1
49,5	11,9	31,6	12,9	30,7	17,8	918,8
349,1	36,6	13,8	21,3	20,3	7,4	843,7
51,9	84,1	94,0	156,3	42,5	0,0	690,9
369,9	127,6	25,7	89,0	23,7	0,0	994,5
406,0	18,8	116,2	22,3	116,7	0,0	921,3
327,4	114,7	95,9	0,0	40,6	36,6	786,8
222,0	71,2	55,9	0,0	11,9	23,7	1245,7
102,4	65,3	52,4	2,0	0,0	0,0	768,5
274,0	175,1	189,4	74,2	0,0	0,0	1417,8
182,5	129,6	45,5	0,0	0,0	0,0	805,6
496,5	129,6	159,2	75,2	2,0	0,0	1353,5
188,4	17,3	45,5	33,6	8,4	0,0	603,8
62,9	167,8	15,9	13,4	109,6	0,0	1133,7
495,2	194,2	88,8	19,4	0,0	0,0	1067,3
207,7	194,1	55,9	5,9	13,8	0,0	796,9
183,5	99,9	29,7	11,9	0,0	20,8	510,4
110,3	32,6	80,7	39,1	14,8	0,0	524,8
131,5	59,3	90,5	73,7	10,9	37,6	961,4
34,6	133,8	76,3	7,3	6,5	2,4	1225,7
78,0	82,5	5,6	11,6	0,9	6,5	663,3
259,5	4,3	110,0	75,1	0,0	3,4	808,0
39,5	31,4	20,2	32,4	0,2	0,1	265,0
102,8	127,3	17,3	12,4	0,0	0,8	473,5
78,3	79,0	114,9	151,5	41,2	3,6	1011,3
16,1	23,5	58,1	0,0	0,0	0,0	332,3
63,0	110,1	124,2	0,8	5,8	0,0	572,3
7,0	33,5	201,5	11,8	13,9	0,0	881,8
426,4	119,1	44,1	10,6	17,6	8,3	1048,1

Fuente: Dirección General de Aguas, Región del Maule

ANEXO 2: Prueba U de Mann-Whitney para muestras pequeñas ($n \leq 10$).

Dadas dos muestras pequeñas (n_A y $n_B \leq 10$) de las variables A y B, se desea establecer si sus distribuciones son de la misma población. Para ello en primer lugar se deben seguir los siguientes pasos:

- Se ordenan todas las (n_A y n_B) observaciones de acuerdo a su magnitud, de menor a mayor.
- Se le asigna un valor ordinal a cada una de las observaciones ordenadas

Luego se establecen la Hipótesis nula y la Hipótesis alternativa, las que para este estudio serán:

Hipótesis nula (H_0): Las distribuciones de las variables A y B son las mismas.

Hipótesis alternativa (H_a): Las distribuciones de las variables A y B son distintas.

Posteriormente se calculan los siguientes estadísticos:

$$U_A = n_A * n_B + \left[\frac{n_A(n_A + 1)}{2} \right] - \sum R_A \qquad U_B = n_A * n_B + \left[\frac{n_B(n_B + 1)}{2} \right] - \sum R_B$$

Donde:

n_A = Tamaño de la muestra A.

n_B = Tamaño de la muestra B.

$\sum R_A$ = Suma de los rangos para la muestra R_A

$\sum R_B$ = Suma de los rangos para la muestra R_B

Por último, se establece la regla de decisión en la cual se rechaza H_0 , a un nivel de significancia α , si el menor de los estadísticos U_A o U_B , es menor o igual al valor crítico obtenido de la tabla de valores para la prueba U de Mann-Whitney.

ANEXO 3: Prueba U de Mann-Whitney para muestras grandes ($n > 10$).

Dadas dos muestras pequeñas (n_A y $n_B > 10$) de las variables A y B, se desea establecer si sus distribuciones son de la misma población. Para ello en primer lugar se deben seguir los siguientes pasos:

- Se ordenan todas las (n_A y n_B) observaciones de acuerdo a su magnitud, de menor a mayor.
- Se le asigna un valor ordinal a cada una de las observaciones ordenadas

Luego se establecen la Hipótesis nula y la Hipótesis alternativa, las que para este estudio serán:

Hipótesis nula (H_0): Las distribuciones de las variables A y B son las mismas.

Hipótesis alternativa (H_a): Las distribuciones de las variables A y B son distintas.

Posteriormente se calculan los siguientes estadísticos:

$$Z = \frac{\sum R_A - \sum R_B - \left[(n_A + n_B) \frac{n_A + n_B + 1}{2} \right]}{\sqrt{n_A * n_B \left[\frac{n_A + n_B + 1}{3} \right]}}$$

Donde:

n_A = Tamaño de la muestra A.

n_B = Tamaño de la muestra B.

$\sum R_A$ = Suma de los rangos para la muestra R_A

$\sum R_B$ = Suma de los rangos para la muestra R_B

Por último, se establece la regla de decisión en la cual se rechaza H_0 , a un nivel de significancia α , si el menor de los estadísticos U_A o U_B , es menor o igual al valor crítico obtenido de la tabla de valores para la prueba U de Mann-Whitney.