



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

**ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LOS CAUDALES PUNTA  
INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA DEL RÍO PURAPEL, VII REGIÓN**

**SANDRA PATRICIA ARAYA CRISÓSTOMO**

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

**PROFESOR GUÍA: DR. ROBERTO PIZARRO TAPIA**

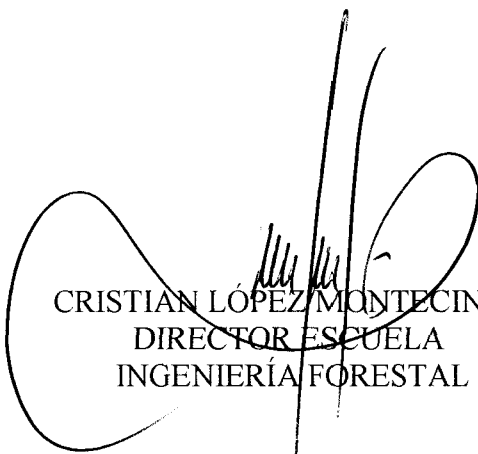
**TALCA – CHILE**

**2003**

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

La alumna Srta. Sandra Patricia Araya Crisóstomo, ha realizado la Memoria "ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LOS CAUDALES PUNTA INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA DEL RÍO PURAPEL, VII REGIÓN", como uno de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal con el profesor Roberto Pizarro Tapia como Profesor Guía.

La comisión de Calificación de la memoria constituída por los profesores Dr. Roberto Pizarro Tapia y Dr. Carlos Mena Frau, la han evaluado con nota 6,8 (seis coma ocho).



CRISTIAN LÓPEZ MONTECINOS  
DIRECTOR ESCUELA  
INGENIERÍA FORESTAL

TALCA CHILE  
2003

**Memoria desarrollada con financiamiento del 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”**

*A mi madre, quien desde su nuevo universo,  
sigue guiando mis pasos por el camino  
que va a mis sueños.*

*A mi padre, por la protección, el cuidado y  
amor de cada día.*

*A mi hermana, mi rayo de luz, por tu alegría,  
fuerza y complicidad.*

## AGRADECIMIENTOS

- Al Dr. Roberto Pizarro Tapia, Ingeniero Forestal y profesor guía de esta memoria, por su gran dedicación, apoyo y buenos consejos.
- 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, VII Región, por facilitar la información necesaria para llevar a cabo esta memoria.
- A Cesar Farías y Cristian Jordán, por la ayuda y paciencia entregados a lo largo de esta investigación.
- A Maria Eliana Reyes, por la preocupación y sobre todo la amistad de siempre.
- A mis amigos, Maria Elisa, Cristian, Rosita, Daniela, Yohana y Karina, por todo lo vivido, por escucharme, entenderme y estar a mi lado cuando los necesité.
- A la Familia Araya Vega, por su apoyo y cariño incondicional.

## RESUMEN

Esta investigación realizó un análisis temporal, mensual y anual, de los caudales punta, (máximos caudales que produce una tormenta), en la cuenca del río Purapel, VII Región, durante el periodo 1960-2000, con el fin de determinar si la forestación con plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), ha influido en la producción de caudales máximos en el tiempo.

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), un 51,7%.

El estudio hizo comparaciones interdecadales (60,70,80 y 90), e intertemporales (1960-1978, lapso con mayor presencia de bosque nativo, y 1979-2000, lapso con mayor presencia de plantaciones), usando la prueba U de Mann-Whitney, los promedios móviles y funciones de distribución de probabilidad, a saber, Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Los mayores caudales punta a nivel mensual se produjeron en los meses de Junio y Julio, mientras que los caudales punta más bajos se presentaron entre los meses de Enero y Abril. Asimismo, las comparaciones determinaron que no existen diferencias significativas entre periodos (1960/1978 – 1979/2000), para la prueba U; sí se verificaron a nivel de décadas, pero eso se explica por las mayores precipitaciones de la década del 80. Los promedios móviles no presentaron mayores variaciones. Al aplicar las funciones de distribución de probabilidad, se aprecia que al incorporar los caudales de las últimas décadas, la probabilidad de encontrar valores mayores de caudal punta no decrece, sino que al contrario, aumenta, lo que demuestra que los caudales punta no han disminuido con la presencia de plantaciones.

Finalmente, no se puede establecer que las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don) disminuyan los caudales punta y, más bien se puede inferir que el comportamiento hidrológico entre ambos tipos de bosques, no presenta diferencias significativas.

## SUMMARY

This investigation made an analysis of weather, monthly and annual of peak flows (maximum volumes produced by a storm), in the river basin of the Purapel river, VII Region, during the period 1960-2000, to determine if reforestation with plantations of *Pinus radiata* (D.Don) has influenced in the production of maximum volumes over this period.

In 1955 the river basin of the Purapel had 63,2% of the surface occupied by native forest and 0% with plantations of *Pinus radiata* (D.Don). In 1997, the surface of native forest was 19,7% and the *Pinus radiata* (D.Don) reached 51,7%.

The study made comparisons between decades (60,70,80 and 90) and between the periods of 1960-1978 (with a greater presence of native forest); and 1979-2000 (with a greater presence of plantations). The Mann-Whitney test, moving averages, and functions of probability distribution (Gumbel, Goodrich and Pearson III) were used.

Monthly, the highest peak flow was registered in the months of June and July, and the lowest peak flow appeared between the months of January and April. Also, it was determined that significant differences between periods (1960/1978- 1979/2000) for the U test. Differences were verified at the level of decades, but that is explained by greater precipitations in the decade of the 80's. The moving averages did not register major variations. When the functions of probability distribution were applied, it was observed that when incorporating the volumes of the last decades, the probability of finding greater values of peak flow does not diminish, on the contrary, it grows, which demonstrates that the peak flow has not diminished with the presence of plantations.

Finally, it is not possible to establish that the plantations of *Pinus radiata* (D.Don), diminish the peak flow and, it can be inferred that the hydrological behavior when comparing types of forest does not present significant differences.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
3.1. Ciclo Hidrológico.	4
3.2. Precipitaciones.	5
3.3. Hidrogramas de Crecida.	7
3.4. Caudales máximos o Caudales punta.	9
3.4.1. Medición del nivel de aguas.	9
3.4.2. Caudales.	11
3.4.3. Factores que Influyen en caudales punta.	12
3.5. Relaciones Precipitación- Escorrentía.	14
3.6. Relaciones Precipitación- Escorrentía-Vegetación.	15
3.6.1. Influencia de la vegetación sobre las precipitaciones.	15
3.6.2. Influencia de la vegetación en la infiltración.	17
3.6.3. Influencia de la vegetación sobre la evapotranspiración.	17
3.6.4. Influencia de la vegetación sobre escorrentía y caudales punta.	18
3.7. Estudios realizados en Chile.	22
3.8. Bosque nativo y plantaciones forestales en Chile.	23
<b>4. ANTECEDENTES GENERALES</b>	<b>25</b>
4.1. Antecedentes de la Cuenca Purapel.	25
4.2. Situación Vegetacional de la Cuenca Purapel.	27



4.3. Estación Purapel en Nirivilo.	31
<b>5. MATERIALES Y METODOLOGÍA</b>	<b>32</b>
5.1. Materiales.	32
5.2. Metodología.	32
5.2.1. Revisión Bibliográfica.	32
5.2.2. Captura de Datos.	33
5.2.3. Selección de alturas máximas.	33
5.2.4. Determinación de las curvas de descarga.	33
5.2.5. Transformación a caudales punta.	34
5.2.6. Completación de caudales punta.	35
5.2.7. Diferenciación de caudales invernales y caudales estivales.	35
5.2.8. Análisis estadístico de las series de caudales punta.	36
5.2.8.1. Prueba no paramétrica U de Mann – Whitney.	36
5.2.8.2. Análisis gráfico.	37
5.2.9. Ajuste a Funciones de Distribución de Probabilidad.	38
5.2.9.1. Funciones de Distribución de Probabilidad.	39
5.2.9.2. Medidas de Bondad de Ajuste.	42
5.2.10. Discusión de Resultados.	43
5.2.11. Conclusiones y Recomendaciones.	43
<b>6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>44</b>
6.1. Alturas máximas.	44
6.2. Caudales punta invernales.	45
6.3. Caudales punta estivales.	46
6.4. Análisis Estadístico.	47
6.4.1. Prueba no paramétrica U de Mann – Whitney.	47
6.4.1.1. Comparación Interdecadal a nivel mensual.	47

6.4.1.2. Comparación Inter- periodos (1960/1978 - 1979/2000) a nivel mensual.	49
6.4.1.3. Comparación Interdecadal los caudales punta promedio anuales.	49
6.4.1.4. Comparación Inter-periodos caudales punta promedio anuales.	50
6.4.1.5. Comparación Interdecadal para los máximos caudales punta anuales.	50
6.4.1.6. Comparación Inter-periodos para máximos caudales punta anuales.	50
6.4.1.7. Comparación Interdecadal para los máximos caudales punta estivales.	50
6.4.1.8 Comparación Inter-periodos para los máximos caudales punta estivales.	51
6.4.2. Análisis Gráfico.	51
6.5. Ajuste a funciones de distribución de probabilidad.	54
6.5.1. Pruebas de bondad de ajuste.	54
6.5.2. Probabilidad de caudales punta para distintos lapsos.	55
<b>7. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>58</b>
7.1. Obtención de la información y su registro.	58
7.2. Completación de la información.	58
7.3. Caudales punta o máximos.	59
7.3.1. Caudales invernales.	59
7.3.2. Caudales estivales.	60
7.3.3. Caudales punta como promedio anual.	61
7.3.4. Caudales punta promedio anual estivales.	62

7.4. Análisis Estadístico de los caudales punta.	63
7.4.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.	63
7.4.1.1. Variación interdecadal a nivel mensual.	64
7.4.1.2. Variación interdecadal a nivel anual.	65
7.4.1.3. Variación intertemporal a nivel mensual.	66
7.4.1.4. Variación intertemporal a nivel anual.	67
7.4.2. Análisis por medio de promedios móviles.	69
7.4.2.1. Análisis para meses invernales.	69
7.4.2.2. Análisis para meses estivales.	70
7.5. Análisis de las Funciones de Distribución de Probabilidad.	71
7.5.1. Análisis de pruebas de bondad de ajuste.	71
7.5.2. Análisis de los caudales punta para distintos lapsos.	72
7.5.2.1. Análisis de caudales máximos a nivel anual.	73
7.5.2.2. Análisis de caudales máximos a nivel mensual.	74
7.6. Variación de uso del suelo en la cuenca del río Purapel.	77
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>79</b>
8.1. Conclusiones.	79
8.2. Recomendaciones.	81
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Alturas de agua mensuales, Estación Nirivilo (metros).	44
Tabla 2: Caudales punta para meses invernales, Estación Nirivilo ( $m^3 / \text{seg}$ ).	45
Tabla 3: Caudales punta estivales, Estación Nirivilo ( $m^3 / \text{seg}$ ).	46
Tabla 4: Valores de la prueba U para comparación década 60 –70 a nivel mensual.	47
Tabla 5: Valores de la prueba U para comparación década 60 –80 a nivel mensual.	47
Tabla 6: Valores de la prueba U para comparación década 60 –90 a nivel mensual.	48
Tabla 7: Valores de la prueba U para comparación década 70 –80 a nivel mensual.	48
Tabla 8: Valores de la prueba U para comparación década 70 –90 a nivel mensual.	48
Tabla 9: Valores de la prueba U para comparación década 80 –90 a nivel mensual.	49
Tabla 10: Valores de la prueba U para comparación intertemporal a nivel mensual.	49
Tabla 11: Valores de la prueba U para comparación interdecadal de los caudales punta promedio anuales.	49
Tabla 12: Valores de la prueba U para comparación intertemporal de los caudales punta promedio anuales.	50
Tabla 13: Valores de la prueba U para comparación interdecadal de los máximos caudales punta anuales.	50
Tabla 14: Valores de la prueba U para comparación intertemporal de máximos caudales punta anuales.	50
Tabla 15: Valores de la prueba U para comparación interdecadal de los máximos caudales punta estivales.	50
Tabla 16: Valores de la prueba U para comparación Intertemporal de los máximos caudales punta estivales.	51
Tabla 17: Valores de K-S y $R^2$ para la Función Gumbel.	54
Tabla 18: Valores de K-S y $R^2$ para la Función Goodrich.	54
Tabla 19: Valores de K-S y $R^2$ para la Función Pearson III.	54
Tabla 20: Caudales punta para Gumbel, Goodrich y Pearson III a nivel promedio anual.	55
Tabla 21: Caudales punta para Enero ( $m^3/s$ ).	56

Tabla 22: Caudales punta para Febrero ( $m^3/s$ ).	56
Tabla 23: Caudales punta para Junio ( $m^3/s$ ).	56
Tabla 24: Caudales punta para Julio ( $m^3/s$ ).	57
Tabla 25: Caudales punta para Agosto ( $m^3/s$ ).	57
Tabla 26: Caudales punta para Diciembre ( $m^3/s$ ).	57
Tabla 27: Máximos caudales punta mensuales y anuales para las décadas en estudio ( $m^3/s$ ).	61
Tabla 28: Mínimos caudales punta mensuales y anuales para las décadas en estudio ( $m^3/s$ ).	61
Tabla 29: Variación interdecadal para la prueba U de Mann- Whitney.	66
Tabla 30: Variación intertemporal para la prueba U de Mann- Whitney.	68
Tabla 31: Valores de K-S y $R^2$ para Gumbel, Goodrich y Pearson III a nivel anual.	71
Tabla 32: Número de meses con ajuste aceptados y rechazados para cada función.	72
Tabla 33: Diferencial de caudal máximo anual.	73
Tabla 34: Diferencial de caudal máximo, Enero.	75
Tabla 35: Diferencial de caudal máximo de Febrero.	75
Tabla 36: Diferencial de caudal máximo, Junio.	75
Tabla 37: Diferencial de caudal máximo Julio.	76
Tabla 38: Diferencial de caudal máximo Agosto.	76
Tabla 39: Diferencial de caudal máximo de Diciembre.	76
Tabla 40: Promedios móviles a nivel mensual ( $m^3/s$ ).	90
Tabla 41: Pruebas de bondad de ajuste para Enero.	91
Tabla 42: Pruebas de bondad de ajuste para Febrero.	91
Tabla 43: Pruebas de bondad de ajuste para Marzo.	91
Tabla 44: Pruebas de bondad de ajuste para Abril.	91
Tabla 45: Pruebas de bondad de ajuste para Mayo.	92
Tabla 46: Pruebas de bondad de ajuste para Junio.	92
Tabla 47: Pruebas de bondad de ajuste para Julio.	92
Tabla 48: Pruebas de bondad de ajuste para Agosto.	92
Tabla 49: Pruebas de bondad de ajuste para Septiembre.	92

Tabla 50: Pruebas de bondad de ajuste para Octubre.	93
Tabla 51: Pruebas de bondad de ajuste para Noviembre.	93
Tabla 52: Pruebas de bondad de ajuste para Diciembre.	93
Tabla 53: Curvas de descarga para los periodos en estudio.	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico.	5
Figura 2: Hidrograma de crecida y sus componentes.	8
Figura 3: Mapa de ubicación de la Cuenca del Río Purapel.	25
Figura 4: Mapa de uso del suelo cuenca Purapel para el año 1955.	28
Figura 5: Mapa de uso del suelo cuenca Purapel para el año 1978.	29
Figura 6: Mapa de uso del suelo cuenca Purapel para el año 1997.	30
Figura 7: Promedios móviles para caudales punta anuales.	51
Figura 8: Promedios móviles para caudales punta invernales.	52
Figura 9: Promedios móviles para caudales punta estivales.	53
Figura 10: Caudales punta promedio anual v/s promedio del periodo.	61
Figura 11: Tendencia de caudales punta promedio estivales.	63

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia más abundante en la tierra y el principal constituyente de todos los seres vivos. También es un factor clave en la climatización del planeta, la existencia humana y el progreso de la civilización.

Debido a la importancia del agua, tanto para la existencia humana como para la vida natural, surge la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan determinar el comportamiento y disponibilidad de este recurso, con la finalidad de tener un mayor conocimiento del mismo, así como también el poder desarrollar un mejor uso y gestión.

Dentro de los estudios que se llevan a cabo en materia hídrica, los referidos a la estimación de caudales punta o caudales máximos son de gran relevancia, principalmente en el diseño y construcción de obras civiles que permiten reducir o evitar daños en cauces o núcleos urbanos.

Las precipitaciones que llegan a la red hidrográfica, son las causantes de la escorrentía que produce los caudales líquidos (López, 1998). Las escorrentías rápidas que escurren por la superficie del terreno, llegando a los cauces en poco tiempo, son las que producen los caudales punta de las avenidas. Así también, existen las escorrentías subsuperficiales y subterráneas que alimentan los cauces en forma lenta y dan lugar a los caudales base.

Las grandes crecidas, tienen como origen tormentas excepcionales por su intensidad, extensión, duración y repetición. Estas tormentas torrenciales, cortas, violentas y localizadas, producen en pequeñas cuencas de fuertes pendientes, crecidas de punta con caudales máximos muy altos (López, 1998). Sin embargo, para el estudio de caudales de crecida es necesario también conocer las características propias de la cuenca, como su topografía, dimensiones, trazado de la red hidrográfica, etc., además de tener conocimiento



con respecto a la cobertura vegetal, permeabilidad del suelo y estación del año, que son factores de los cuales depende la escorrentía que provoca el caudal (López, 1998).

De todo lo anterior, se desprende la importancia de estudiar el comportamiento de los caudales máximos o caudales punta, y la influencia que ejercen tanto las masas boscosas, como otro tipo de vegetación (cultivos o pastizales), en la reducción de estos caudales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Aportar al conocimiento del comportamiento de los caudales punta mensuales en la VII Región en general y particularmente en la cuenca del Río Purapel.

### **2.2 Objetivo Especifico**

- Definir el comportamiento temporal de los caudales punta de la cuenca del Río Purapel, a través del análisis de las series de datos de caudales punta a escala mensual y anual durante el período 1960 - 2000.
- Determinar si las variaciones de uso del suelo de la cuenca, inciden en la producción de agua del Purapel.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología; no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua (Chow *et al*, 1994).

A pesar de que el ciclo hidrológico como concepto es simple, el fenómeno es bastante complejo. Éste no es solamente un ciclo grande, sino que está compuesto de muchos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local (Chow *et al*, 1994). Aunque el volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece relativamente constante, su distribución está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales de drenaje.

La hidrología de una región, está determinada por patrones climáticos como la topografía, la geología y la vegetación. Además, a medida que la civilización progresa y las diferentes actividades humanas invaden el medio ambiente natural del agua, el equilibrio del ciclo hidrológico se ve alterado, iniciándose nuevos eventos y procesos (Chow *et al*, 1994).

Para Llamas (1993), este ciclo es el conjunto de todos los procesos de transformación del agua en la tierra. Dentro de estos procesos, los de mayor interés para la hidrología son la precipitación, la evaporación y la escorrentía (Linsley *et al*, 1988).

A lo largo de este ciclo, como lo muestra la figura 1, el agua que se encuentra en la superficie terrestre, o cerca de ella, se evapora por efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, se eleva y se transporta en forma de nubes hasta que se condensa y cae a

la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por plantas o construcciones, para luego escurrir por la superficie hasta cursos de agua o infiltrarse. El agua interceptada junto con una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie, se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y, posteriormente es transpirada casi totalmente hacia la atmósfera. Otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación), para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar.

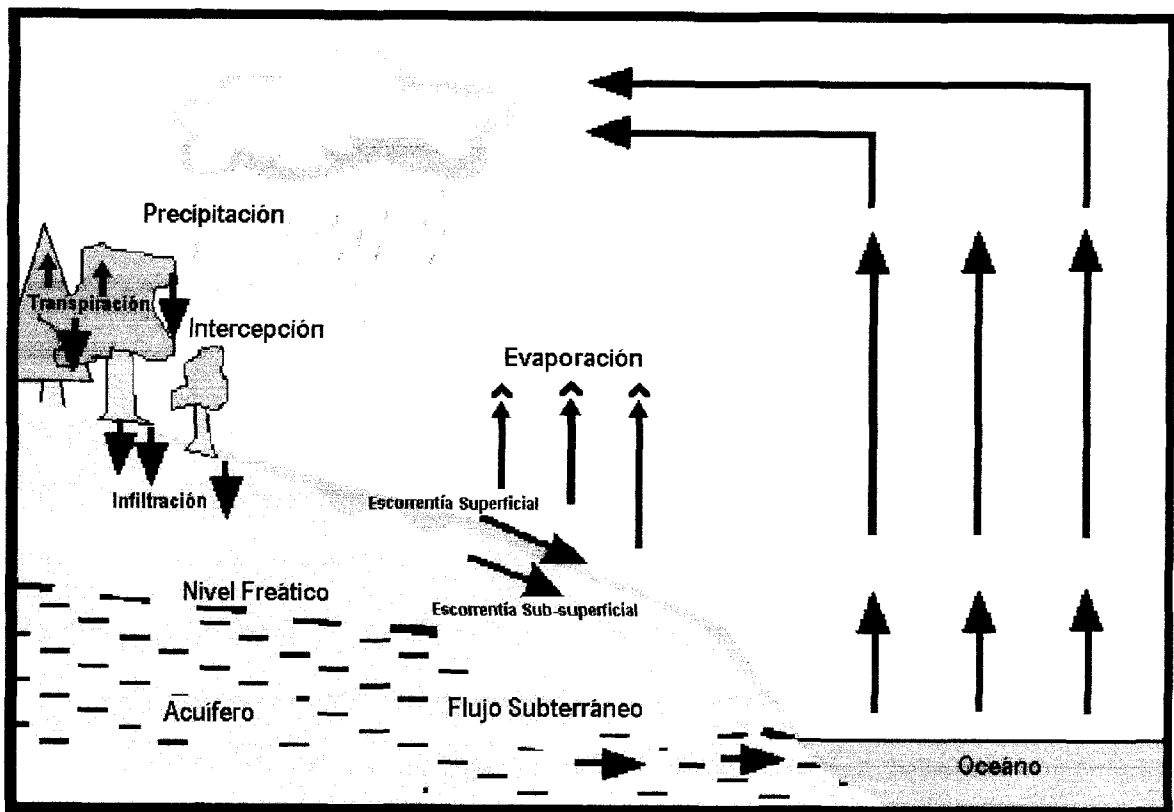


Figura 1. Ciclo hidrológico (Fuente: Elaboración propia).

### 3.2 Precipitaciones

Sin duda, las precipitaciones representan el elemento más importante del ciclo hidrológico. Estas son definidas por UNESCO - ROSTLAC (1982), citado por Ramírez (1998), como el agua proveniente de la humedad atmosférica y que cae a la superficie terrestre principalmente en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve).

Según Llamas (1993), las precipitaciones constituyen un fenómeno físico que describe la transferencia de agua, en su fase líquida (lluvia) o sólida (nieve y granizo), entre la atmósfera y el suelo.

Desde el punto de vista hidrológico, Aparicio (1997) señala que la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios relativos al uso y control del agua.

Las precipitaciones pueden clasificarse en ciclónicas, de convección y orográficas. Las primeras están asociadas al contacto entre masas de aire de temperaturas y humedad diferentes, produciendo precipitaciones importantes y prolongadas. En las convectivas, el aire se calienta por radiación solar y sube, pero durante su trayecto de ascensión se enfría hasta alcanzar su punto de condensación. Este tipo de precipitaciones, como señala Llamas (1993), tiene una duración bastante corta, pero su intensidad es muy grande. Por último, en las precipitaciones de tipo orográficas, los vientos cargados de humedad llegan a una zona montañosa y las masas de aire se elevan, enfriándose y alcanzando su punto de condensación.

En un enfoque hidrológico, Lara (1985), citado por Pizarro y Novoa (1986), señala que las precipitaciones siguen diferentes caminos. Parte de ellas alimenta la evaporación en la propia cuenca y, el resto, se convierte en aportación superficial o subterránea.

### 3.3 Hidrogramas de crecidas

Para Chow *et al* (1994), un 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 particular.

Pizarro y Novoa (1986), definen el hidrograma como la relación gráfica existente entre las variables caudal (Q) y tiempo (t) de un área determinada, obtenida en un punto del cauce, denominado punto de desagüe de la cuenca.

Al analizar el balance hídrico de una cuenca, se observa que de toda el agua caída sobre ésta, sólo parte de ella incrementa de manera inmediata el caudal, ya que existen pérdidas provocadas por fenómenos de evaporación, interceptación, transpiración e infiltración hacia las napas freáticas.

Linsley *et al* (1988), señalan que el agua sigue tres caminos hasta llegar al cauce: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo de agua subterránea.

El agua que escurre en forma inmediata, se conoce como escurrimiento superficial y determina la onda de crecida correspondiente (Pizarro y Novoa, 1986). Para Linsley *et al* (1988), la escorrentía superficial, corresponde al volumen de agua que avanza sobre la superficie de la tierra hasta alcanzar un cauce y se encuentra relacionada con eventos de lluvia particulares que generan la precipitación efectiva.

La escorrentía subsuperficial, es la parte del agua que escurre por las capas del suelo, más lentamente que la escorrentía superficial, dependiendo de las características del suelo de la cuenca. Asimismo, el flujo subterráneo es aquella precipitación que infiltra hasta los niveles freáticos. De igual forma, la escorrentía superficial es el flujo que llega más rápido al cauce y se encuentra relacionada con eventos de lluvia aisladas. Linsley *et al* (1988),



### **3.4. Caudales máximos o Caudales punta**

Una de las máximas preocupaciones de la ingeniería hidrológica, es el análisis de los volúmenes de agua generados en una cuenca, en especial los caudales máximos de cada crecida, principalmente para que esta información sea útil en el diseño de obras hidráulicas y en el uso de este recurso con fines productivos.

Al respecto, Pizarro *et al* (1986) señalan que la medición de caudales líquidos, en cauces naturales o artificiales, constituye una técnica de indudable importancia al momento de intentar definir estrategias de gestión de los recursos hídricos, toda vez que permite la cuantificación de un recurso cada vez más escaso y necesario. Por otra parte según Linsley *et al* (1988), los hidrólogos señalan que el caudal es una variable dependiente en la mayoría de los estudios puesto que la ingeniería hidrológica se dedica principalmente a estimar tasas o volúmenes de flujo, o los cambios en estos valores debido a la acción del hombre.

#### **3.4.1 Medición del nivel de aguas**

Debido a que la medición continua y directa de un caudal es muy difícil de lograr, la información base registrada en una estación para la medición de caudales corresponde a los niveles del río, ya que resulta relativamente sencillo obtener un registro continuo del nivel de agua.

El nivel de un río es la elevación del agua en una estación medida por encima de un cero arbitrario de referencia (Linsley *et al*, 1988). Generalmente, se toma como punto de referencia un lugar que se encuentre ligeramente por debajo del nivel para el cual la descarga es cero. Para el registro de los niveles de agua en los diferentes ríos y cauces, se utilizan diversos instrumentos, dentro de los cuáles destacan los Limnímetros y Limnígrafos.



- ***Limnímetros***

El limnímetro consiste en una mira, es decir, una escala colocada de tal manera que una parte de ella esté siempre sumergida en el agua (Linsley *et al*, 1988).

Llamas (1993), define este instrumento como una regla graduada que se coloca en uno de las márgenes del cauce. Esta es la forma más sencilla para medir la altura de un río, ya que la mira puede ser colocada en cualquier estructura que se prolongue de manera vertical en las partes bajas de la corriente.

La mira o escala puede pintarse sobre una estructura existente o en una lámina especial (Linsley *et al*, 1988) y, generalmente, se encuentran calibradas en metros o centímetros. Normalmente la elevación del cauce se lee cada 2 horas en época de avenidas y cada 24 horas en época de estiaje (Llamas, 1993). Sin embargo, debido a que la hora en que ocurre el gasto máximo de una crecida, no siempre coincide con el horario en que se realizan las lecturas, conviene marcar el limnímetro con alguna pintura soluble al agua, para así poder conocer el nivel máximo alcanzado por el río y por lo tanto, el pico de la avenida.

- ***Limnógrafos***

El limnógrafo es un aparato automático con el que se obtiene un registro continuo de niveles (Llamas, 1993).

El instrumento consta de un flotador unido a una plumilla, la cual va marcando los niveles del agua en un papel que se encuentra fijado a un tambor y que gira por medio de un sistema de relojería. Este se coloca junto a la corriente fijado a la pila de un puente, tomando la precaución de que no exista peligro de su destrucción por efecto de la

corriente, durante una crecida o por objetos arrastrados por el río. Cuando la pluma alcanza el borde del papel, su dirección se cambia y su registro se hace en sentido opuesto (Linsley *et al*, 1988).

El papel se cambia normalmente una vez al día, aunque esto está sujeto a la variabilidad del gasto con respecto al tiempo. El registro de niveles contra el tiempo que se obtiene de un limnógrafo, se llama limnograma (Llamas, 1993).

### **3.4.2. Caudales**

Se denomina caudal o gasto, con respecto a una superficie, a la cantidad de fluido que pasa a través de dicha superficie durante un cierto tiempo (Pizarro,1986). Para Llamas (1993), el gasto se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo.

Para el cálculo de esta variable tan importante a nivel hidráulico, científico, productivo, ambiental y social, existen diferentes metodologías que estiman volúmenes y caudales de crecida, en función de la información disponible. Según Pizarro *et al* (1993), se tienen modelos que utilizan estadísticas fluviométricas y otros que usan datos pluviométricos. En caso de contar con información fluviométrica, los caudales se determinan en forma directa, por medio del análisis de las frecuencias de los gastos medidos en el cauce. En cambio, si sólo se cuenta con información pluviométrica, la estimación de crecidas se realiza a través de modelos basados en las características morfométricas de la cuenca en estudio. Dentro de estas metodologías, se encuentra el diseño de hidrogramas unitarios sintéticos, a partir de los cuales se puede obtener información tan importante como el caudal punta de una crecida o el tiempo base de ésta, que corresponde al tiempo transcurrido desde el inicio de la crecida, hasta el punto donde cesa la escorrentía superficial.

Sin embargo, también existen variadas fórmulas y procedimientos para la determinación de caudales máximos en cuencas sin datos, algunos de los cuales son de origen empírico y otros de origen analítico (Pizarro *et al*, 1986).

### **3.4.3. Factores que influyen en los caudales punta**

Existen factores que influyen el hidrograma de un aguacero y en consecuencia los caudales punta de una crecida. Estos factores son las precipitaciones, el suelo y la cuenca. (Llamas, 1993).

- **Las precipitaciones**

Dentro de las precipitaciones, las características principales son la intensidad, la duración y el tipo de precipitación.

Una mayor intensidad significa una lluvia neta superior, un mayor volumen de escorrentía y, necesariamente, un caudal máximo superior (Llamas, 1993).

Llamas (1993), además afirma con respecto a la duración, que cuando la intensidad es mayor que la capacidad de infiltración, aumenta el tiempo de la escorrentía y la proporción de las superficies que contribuyen al flujo. Por lo tanto, una duración mayor de la lluvia neta aumenta el tiempo de base, el tiempo de subida y el caudal de punta.

Finalmente, en relación con el tipo de precipitación, éstas producen distintos efectos en el caudal punta. Mientras una fusión de nieve y tormenta corresponde a lluvias de baja intensidad, pero de larga duración y cuya forma del hidrograma suele ser muy aplastada, una tormenta suele presentar hidrogramas con puntas agudas.

- **El suelo**

Las características del suelo que más inciden en los caudales de máxima crecida son principalmente la cubierta vegetal, la permeabilidad del suelo y su profundidad.

Con respecto a la cubierta vegetal, comparándola con un suelo desnudo, disminuye la lluvia neta, el volumen de escorrentía y el caudal punta, pero incrementa la alimentación de las capas subterráneas y el flujo de base. Por lo tanto, aumenta el tiempo de base y de subida, y baja el hidrograma (Llamas, 1993).

En relación con la permeabilidad y la profundidad del suelo, cuanto más profundo y permeable sea éste, mayor será su capacidad de absorción y menor será el volumen de la escorrentía, al igual que su caudal punta, pero mejorará la alimentación de las capas freáticas.

- **La cuenca**

Las propiedades que posee una cuenca y que influyen en mayor grado en el comportamiento de los caudales punta, son la longitud de flujo y tiempo de recorrido, la superficie, la pendiente y la presencia de lagos, estanques o depresiones.

En lo referente a la longitud de flujo y el tiempo de recorrido, Llamas (1993) señala que un mayor tiempo de recorrido aumenta el tiempo de subida y el tiempo de base del hidrograma de escorrentía, disminuyendo los valores máximos, para un mismo volumen de escorrentía. Lo mismo ocurre con la superficie de una cuenca, es decir, mientras mayor sea el tamaño de ésta, aumentan las superficies tributarias y, por consiguiente, el caudal punta.

Por último, la presencia de lagos, estanques y depresiones favorecen el almacenamiento de las aguas de escorrentía sobre la cuenca; aumentan igualmente el tiempo de base y el

tiempo de subida del hidrograma y disminuyen el caudal punta, pero no modifican el volumen de escorrentía.

### **3.5 Relaciones Precipitación - Escorrentía**

El estudio de las relaciones precipitación - escorrentía es de gran importancia, ya que permite caracterizar el ciclo hidrológico, analizando el paso del agua a lo largo de una cuenca hidrográfica.

Dentro del proceso precipitación - escorrentía, existen múltiples variables que condicionan su comportamiento. Una de las más importantes corresponde al clima, ya que el grado de escorrentía está fuertemente ligado a la cantidad, intensidad y duración de la lluvia. Asimismo, de las condiciones climáticas depende en gran medida el nivel de evaporación que pueda generarse en una cuenca determinada.

Pizarro (1996) establece que la escorrentía, de forma directa o indirecta, depende de los niveles de agua caída, aunque se trate de diversos períodos de análisis, ya que los caudales registrados por una determinada estación de aforo, son producto en parte de precipitaciones caídas un año antes, debido a las aguas subterráneas presentes en una cuenca; pero en general, la escorrentía será dependiente del volumen de las precipitaciones.

Otro factor determinante en este proceso, es la infiltración o paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra (Linsley *et al*, 1988). Esta capacidad de infiltrar se encuentra condicionada por muchos factores, tales como el tipo de suelo, el contenido de humedad, la cantidad de materia orgánica, etc. De todas ellas, la porosidad es posiblemente la más importante, ya que determina la capacidad de almacenamiento y afecta la resistencia al flujo (Linsley *et al*, 1988). De esta forma, con el aumento de la porosidad tiende a aumentar la infiltración.

### **3.6 Relaciones Precipitación- Escorrentía- Vegetación**

Las relaciones entre vegetación y escorrentía han sido tratadas desde hace más de 100 años, pero intensamente estudiadas durante mucho menos tiempo (Pizarro *et al*, 2001). Específicamente durante los últimos 50 años, se han llevado a cabo numerosas observaciones relacionadas con la remoción de la vegetación y el aumento en la escorrentía, sedimentación y erosión.

Como consecuencia de las numerosas investigaciones científicas, ya nadie discute la influencia de la vegetación en la relación precipitación- escorrentía. Es más, a partir de este hecho, surgió la hidrología forestal como una rama de la hidrología clásica, cuyas áreas de estudio son básicamente las influencias de la vegetación sobre el clima y sobre el agua (régimen hidrológico y calidad) y sobre el suelo; la cuenca torrencial (escorrentías, caudales, sedimentos); la restauración hidrológico forestal de las cuencas; y la prevención y defensa contra aludes (López, 1998).

Dentro del mismo contexto, Gandullo (1990) citado por López (1998), concluye que el microclima del bosque, en comparación con el de un sitio descubierto, tiene condiciones de luminosidad menores, con una reducción de hasta un 90 %; es menos caluroso, con disminución de unos 4° C en la temperatura media anual; es menos ventoso, con una reducción de la velocidad del viento a la cuarta parte; y más húmedo, con un aumento medio del orden del 10%.

#### **3.6.1 Influencia de la Vegetación sobre la precipitación**

Las precipitaciones tienen distintos orígenes; pueden ser ciclónicas, convectivas u orográficas. Sin embargo, son las orográficas en particular, las que se ven influenciadas por

la vegetación, y en más de un aspecto, ya que por una parte, los bosques aumentan la altura efectiva que deben remontar los vientos, lo que puede incrementar las precipitaciones entre un 0,8% y un 1,2% basándose en experiencias centroeuropeas; y por otro lado, ejercen un efecto de fricción, que tiende a frenar la velocidad de los vientos, produciendo una ascensión del aire que favorece un aumento de las precipitaciones, que según datos experimentales, varía entre un 2% y un 3% (López, 1998).

En cuanto al fenómeno de intercepción, las precipitaciones, al incidir sobre una superficie boscosa, son interceptadas por sus hojas y ramillas, por lo tanto, parte de ellas no llega al suelo. Al respecto, Hamilton y Rowe (1949) citado por Donoso (1981), definen la intercepción como el proceso de infiltración a través del follaje (troughfall), el escurrimiento por los troncos (stemflow) y la absorción y evaporación en las hojas. Sin embargo, este proceso es mayor en precipitaciones débiles que en aguaceros fuertes, siendo los factores que más influyen la especie vegetal y su edad, y el tipo de bosque y las circunstancias del medio (temperatura ambiente, presión atmosférica). Ros (1992) citado por Gayoso *et al* (1995) establece que la especie *Pinus radiata* (D. Don) intercepta un 25% de la precipitación, mientras que en Eucalipto el porcentaje alcanza a un 17%, aunque el nivel de intercepción varía considerablemente con la cantidad de las precipitaciones. Según estudios realizados por Zinke (1965) citado por Donoso (1981), la intercepción de agua por coníferas varía desde 0,5 hasta 10 mm, en tanto para latifoliadas varía desde 0,03 hasta 2 mm.

Tras muchas experiencias, se puede determinar que en general las especies de hoja caduca interceptan menores volúmenes de lluvia que las especies de hoja perenne (coníferas), y que con la edad, la intercepción aumenta en los árboles, pero sólo hasta un límite, a partir del cuál empieza a disminuir (López, 1998). Además es importante señalar también, que los árboles retienen más agua que los arbustos y éstos que las hierbas y los pastos (campo abierto), siendo en cada uno de ellos mayor la retención, mientras mayor sea la altura (Donoso, 1981).

### **3.6.2 Influencia de la vegetación en la infiltración**

La influencia que pueden ejercer los bosques en el grado de infiltración de los suelos, es sin duda positiva, debido a que la continua incorporación de materia orgánica por parte de los árboles al suelo forestal, como la caída de hojas y ramillas, favorece a que su estructura sea más granular, lo que en consecuencia mejora la infiltración.

Lo anterior queda de manifiesto claramente en un experimento desarrollado por Gresillon (1994) citado por Meunier (1996), en el cual se pretendió cuantificar la función de la vegetación en la infiltración, midiendo la escurrentía sobre superficies con cubierta vegetal y sin cubierta vegetal, incluidas las raíces. Los resultados demostraron que un suelo con raíces permite una infiltración casi total (180 mm/hr con respecto a 196 mm/hr durante más de 2 horas), mientras que al eliminar la vegetación, la infiltración se reduce enormemente (hasta un valor alrededor de 10 mm/hr frente a una intensidad de la lluvia de 134 mm/hr durante 45 minutos).

Al respecto, López (1998), citado por Jordán (2002), establece que la infiltración es mayor en bosques adultos que en bosques jóvenes, además de encontrar diferencias en la capacidad de infiltración entre suelos forestales y agrícolas, las que pueden llegar a una relación de 100 a 2, por unidad de superficie.

### **3.6.3. Influencia de la vegetación sobre la evapotranspiración**

Los cambios 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).

De acuerdo a la FAO (1987), citado por Gayoso *et al* (1995), la evapotranspiración promedio de una cuenca, con plantaciones de Eucalipto, es cercana a 1000 mm/año, para un régimen de lluvias superior a los 1200 mm/año. Estudios comparativos muestran que el promedio anual de la evapotranspiración en plantaciones de pino, tiene el mismo orden de magnitud que el observado para los bosques de eucalipto. Por su parte Van Haveren (1988), citado por Huber y López (1993), afirma que la eliminación de un bosque reduce la evapotranspiración, disminuyendo con ello la cantidad de agua necesaria para lograr la recarga hídrica del suelo.

#### **3.6.4. Influencia de la vegetación sobre la escorrentía y caudales punta**

Los espacios forestales, según López (1998), son 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 más accidentado.

Ahora bien, 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. Al respecto Gayoso *et al* (1995), afirman que una

disminución de la intercepción tendrá como consecuencia un aumento de la escorrentía superficial, mientras que un aumento en la evapotranspiración tendrá un efecto contrario sobre la escorrentía. Además señalan que, la poca evidencia disponible sugiere que la escorrentía de las plantaciones es mayor que la de los pastizales o rastrojo bajo.

Dentro de los efectos ocasionados por la vegetación, tiene gran relevancia la disminución de la velocidad de escorrentía, ya que como señala López (1998), ésta llega a la cuarta parte de la velocidad en suelo raso, lo cual implica un retraso importante en el tiempo de concentración en los cauces, disminuyendo el caudal punta de la descarga, así como también su volumen, debido a la mayor infiltración y evaporación que supone este retraso.

Este control de las escorrentías superficiales por parte del bosque, resulta de gran interés cuando se requiere reducir los caudales originados por los fuertes aguaceros, que frecuentemente son causa de inundaciones catastróficas de las que se han tenido experiencias dolorosas y reiteradas, los cuales se producen en su mayor parte por escorrentías rápidas de flujo superficial, existiendo una importante reducción de los caudales en las cuencas boscosas, así como también con la presencia de cultivos agrícolas o pastizales.

En el mismo contexto, es importante señalar también, el fuerte impacto que significa la variación en el uso del suelo, es decir, la sustitución o eliminación de una cubierta vegetal, tanto en las reservas de agua como en los caudales punta, especialmente durante los meses de verano, ya que durante estos meses los caudales punta o máximos, no se encuentran influenciados por las precipitaciones, por lo tanto no corresponden a caudales punta generados por crecidas, sino que responden más bien a la existencia de reservas de agua. Por lo tanto, como señala Maunier (1996), no deben interpretarse del mismo modo los datos obtenidos durante los meses lluviosos, los cuáles dependerán principalmente del agua caída, que aquellos obtenidos cuando no llueve y, que dependen fundamentalmente de

las reservas hídricas. Esta situación adquiere una particular relevancia cuando se talan superficies forestadas con especies de rápido crecimiento y de elevado consumo de agua (Huber *et al*, 1985; Anderson *et al*, 1991; Bosch *et al*, 1991 citados por Huber y López, 1993).

Todos los antecedentes planteados, pueden verse confirmados por diversas experiencias, debido a que existen variados estudios relacionados con la influencia en la producción de agua, específicamente en la variación de caudales punta y en el proceso de escorrentía.

Dentro de éstos, la experiencia realizada en Coweeta, Estados Unidos, a partir de la década del 30, resulta ser una de las más importantes, teniendo la base de datos más detallada en el mundo para cuencas forestales.

Hibbert (1966), tomando en cuenta la investigación en Coweeta, planteó que la deforestación incrementa los caudales y que la forestación los disminuye, aunque la magnitud de respuesta es altamente variable e impredecible.

Dentro del mismo contexto, tras analizar un proyecto de reforestación en granjas del Noreste de Estados Unidos, Ayer (1968), concluyó que la reforestación incide en una considerable reducción de caudales en 3 cuencas estudiadas, ya que los caudales punta de las áreas en estudio durante el periodo Noviembre- Abril, se redujeron en un promedio superior al 40%. Además, la escorrentía total en el período Noviembre-Abril, se redujo en promedio un 26% con respecto a la media de los 24 años precedentes. Sin embargo, no hubo cambios significativos en el tiempo, en relación con las descargas punta para los meses de verano, la tasa de recesión del caudal base, el volumen de la escorrentía directa y los caudales anuales mínimos diarios.

Swank y Douglas (1974), citados por Oyarzún (1985), realizaron estudios de *Pinus strobus* concluyendo que el efecto combinado de altas pérdidas por intercepción y transpiración, provocan reducciones importantes en las reservas de agua.

Singh (1982), cita estudios desarrollados en el Valle de Tennessee, en los cuales se analiza el efecto de la reforestación sobre los hidrogramas de crecida y el caudal punta. De esta forma, se determinó que los caudales punta del verano que llegaban a 3 m<sup>3</sup>/s antes de la reforestación, se redujeron a la mitad entre los 6 y 10 años siguientes a la reforestación; entre los 10 y 15 años después de la reforestación, alcanzaron un valor promedio de 0,5 m<sup>3</sup>/s y, entre los 15 y 20 que siguieron a la reforestación, los caudales punta llegaron a un valor de 0,2 m<sup>3</sup>/s.

Lavabre *et al* (1991), estudiaron el ciclo hidrológico en una cuenca en Francia, la que sufrió un incendio en Agosto de 1990 que destruyó un 85% de la cobertura vegetal. Luego de un año de observación de la cuenca, se observó un incremento en la producción de la escorrentía de 150 mm, aumento que se observa principalmente en las crecidas.

Calder (1992), afirma que en términos generales, un incremento de un 10% de la cobertura forestal de pinos y eucaliptus, en reemplazo de zonas cubiertas de pastos, determina una rebaja de 40 mm en el caudal anual.

En Africa, Zwolinski *et al* (1995) estudiaron la variación en la capacidad de retención de agua en suelos con tratamiento de cultivos, presentándose un aumento en la cantidad de agua almacenada en los suelos, en todas las profundidades.

Meunier (1996) en Francia, comparó las crecidas entre una cuenca arbolada y otra degradada, existiendo una diferencia de 1 a 10 entre los caudales máximos de la cuenca con vegetación y los de la cuenca desprovista de vegetación.

### 3.7. Estudios realizados en Chile

Chile, a pesar de tener en los últimos 30 años un intenso proceso de forestación en grandes zonas del país, no ha desarrollado mayores experiencias con respecto al estudio cuantitativo de la influencia de la vegetación en los componentes del balance hídrico. Sin embargo, destacan los trabajos desarrollados por Huber y Oyarzún, aunque éstos se centran en microcuencas y zonas puntuales, y no en balances globales.

Dentro de estas investigaciones se encuentra un estudio realizado por Huber y Oyarzún (1983), con respecto a la precipitación neta e intercepción 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.

En otra investigación, los mismos autores junto a Vásquez (1985), estudiaron la redistribución de las precipitaciones directas, el escurrimiento fustal y la intercepción en tres plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), con distintos tipos de manejo, comprobándose una relación directa entre la cobertura del dosel y la intercepción.

Huber y López (1993) por su parte, 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 es equivalente al 96,6% y 57,7% de la precipitación total para el bosque y la pradera respectivamente.

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 de 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 nativo y oregón con valores similares.

Huber y Trecamán (2000), determinaron el efecto de una plantación de *Pinus radiata* (D.Don) en la distribución espacial del contenido de agua del suelo, comparándola con una pradera. Los resultados presentaron una reducción de un 30% de las precipitaciones que alcanzaron el suelo por intercepción y, la distribución de las precipitaciones bajo *Pinus radiata* (D.Don), fue más heterogénea con respecto a la pradera, debido a la repartición de sus raíces.

### **3.8. Bosque nativo y plantaciones forestales en Chile**

Chile es un país en el cual se han llevado a cabo intensos procesos de forestación en vastas regiones. Según los resultados del estudio “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile” concluido en 1997 (CONAF, 1997), los bosques de Chile cubren una superficie de 15,6 millones de hectáreas, lo que representa el 20,7% de la superficie del territorio nacional.

Los bosques nativos cubren en Chile una superficie aproximada de 13,4 millones de hectáreas, en tanto, las plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata* (D.Don) y especies del género *Eucalyptus*, abarcan una superficie cercana a los 2,1 millones de hectáreas equivalentes al 2,8% de la superficie del país. Aproximadamente, el 75% de esta superficie corresponde a Pino insigne, el 18% a especies del género eucalipto y el resto a otras especies. Las plantaciones se encuentran localizadas principalmente entre la V y la X Región (CONAF, 1997).

Este intenso proceso de forestación desarrollado en el país ha provocado una incidencia en los componentes del balance hídrico, dado que se afecta la intercepción, la escorrentía superficial y subterránea, la evaporación y la transpiración vegetal (Pizarro *et al*, 2001).

## 4. ANTECEDENTES GENERALES

### 4.1. Antecedentes de la Cuenca Purapel

La zona en la cual se enmarca este estudio, corresponde a la cuenca hidrográfica del río Purapel, que se encuentra ubicada en la Cordillera de la Costa de la VII Región del Maule y cuya superficie es de aproximadamente 259 Km<sup>2</sup>. Ésta es una de las dos cuencas de la región del Maule que presenta un régimen hidrológico netamente pluvial, hecho no fácil de encontrar, dado que la mayoría denota un régimen mixto pluvio- nival, además de poseer un recorrido de mar a cordillera, características que sin duda la convierten en un interesante elemento de estudio. Su forma y ubicación se puede observar en la figura 3.

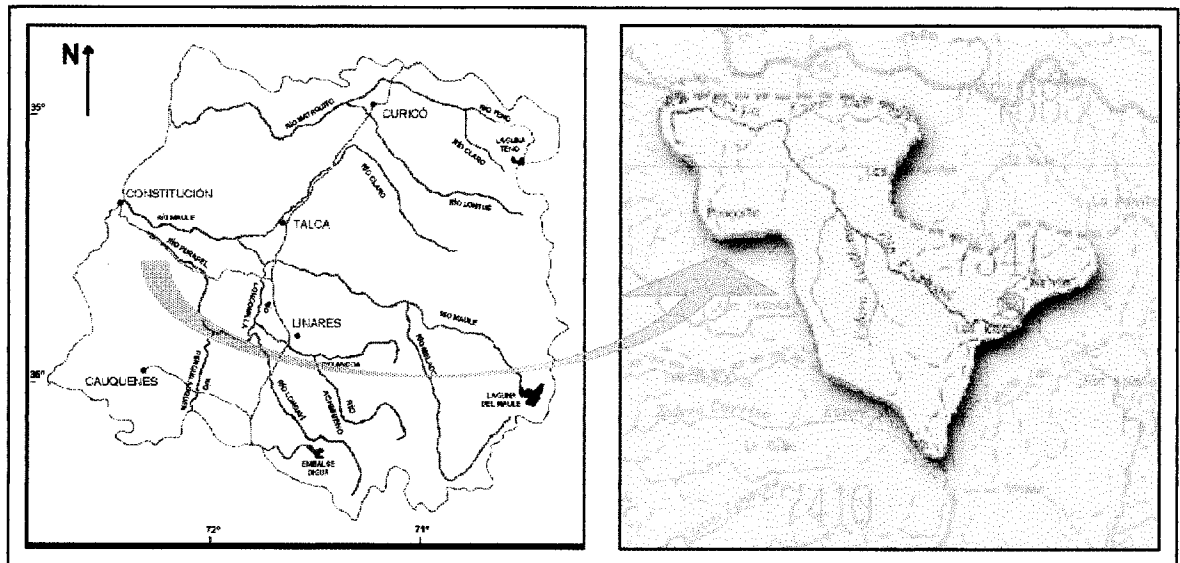


Figura 3. Croquis de ubicación de la Cuenca del Río Purapel (Fuente: Jordán, 2002).



El río Purapel, se origina a 325 m.n.s.m., en los 35° 26' 20" Latitud Sur y los 72° 19' 05" Longitud Oeste, recibiendo en su inicio aportes de quebradas pertenecientes al cordón cordillerano costero, como las quebradas Casas Quemadas, Cachaño, del Difunto y del Malulo. Posteriormente se suman a lo largo de su recorrido, aguas de los esteros El Toro, Las Vegas, Huillín, Los Niches, Ranchillo, Requegua, Sauzal y Miranda. Finalmente, luego de recorrer 77 Km en dirección Sur Este, sus aguas desembocan en el río Perquilauquén.

Con respecto a las características climáticas de la cuenca, se puede establecer que posee un clima de tipo mediterráneo, lo que determina la presencia de dos estaciones semejantes, con seis meses secos y seis meses húmedos. En cuanto al régimen térmico de la cuenca, ésta presenta temperaturas máximas promedio de 28,5 °C en Enero y temperaturas mínimas promedio de 5,4 °C en el mes de Julio. Las precipitaciones medias anuales son de 810 mm, siendo sus máximas en los meses de Julio y Agosto y, sus mínimas, en los meses de Enero y Febrero.

Su relieve se caracteriza por lomajes suaves y zonas planas que favorecen las labores agrícolas, especialmente las de secano y el establecimiento humano. A su vez, los suelos presentan una granulometría que va de media a fina. Dada la presencia de roca impermeable muy cerca de la superficie, en los sectores bajos del valle, y que asoma en las lomas que allí existen, es posible la existencia de acuíferos compuestos de arena y grava entre los flancos del valle y los umbrales rocosos. Además se establece que en esta zona de estudio, la ocurrencia de aguas subterráneas es nula, debido a que el tipo de permeabilidad es catalogado de muy bajo a ausente (MOP y DGA, 1986).

El estudio hidrogeológico de la cuenca determinó las propiedades hidráulicas en el área del Río Purapel, las cuales indican que para una potencia de sedimentos de 50 m, se tiene una transmisibilidad de 500 m<sup>2</sup> /día, valor que es mucho menor en los valles de la Cordillera de la Costa, donde para la misma profundidad se tiene una transmisibilidad de 100 m<sup>2</sup> / día (MOP y DGA, 1986).

## 4.2. Situación Vegetacional de la Cuenca Purapel

Previo a cualquier tipo de análisis realizado en esta memoria, es necesario referirse a la situación vegetacional de la cuenca en el período estudiado, es decir, entre 1960-2000.

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, entendiendo éste como un bosque maulino degradado, en términos del Dap de la especie dominante (Hualo), pero con presencia abundante de sotobosque integrado por especies del tipo forestal siempreverde. En ese mismo año, la superficie de *Pinus radiata* (D.Don) era del 0,0% 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%. El año 1997 como lo señala 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 ese 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 4,5 y 6.

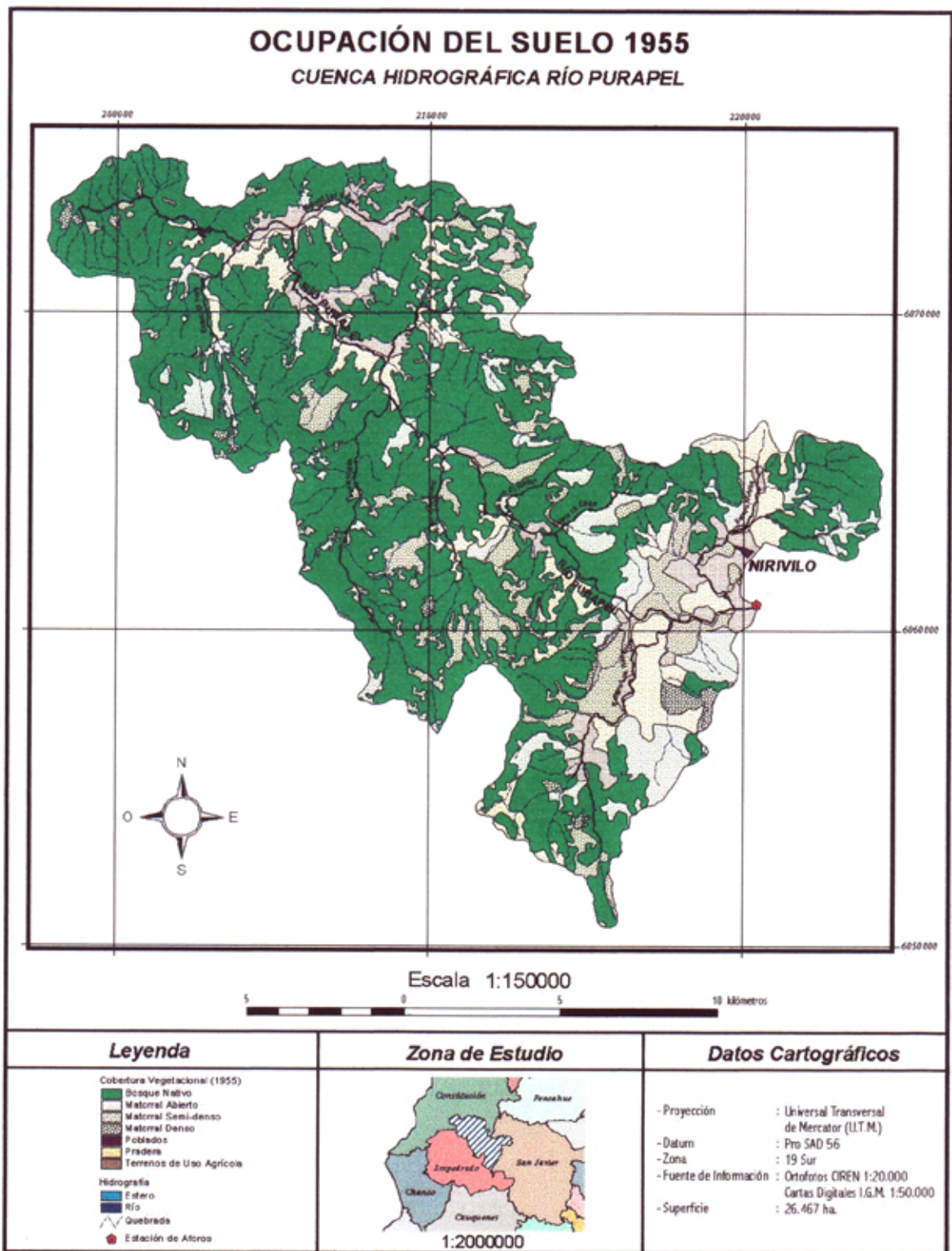


Figura 4: Mapa de ocupación del suelo cuenca río Purapel, año 1955 (Pizarro *et al*, 2003).

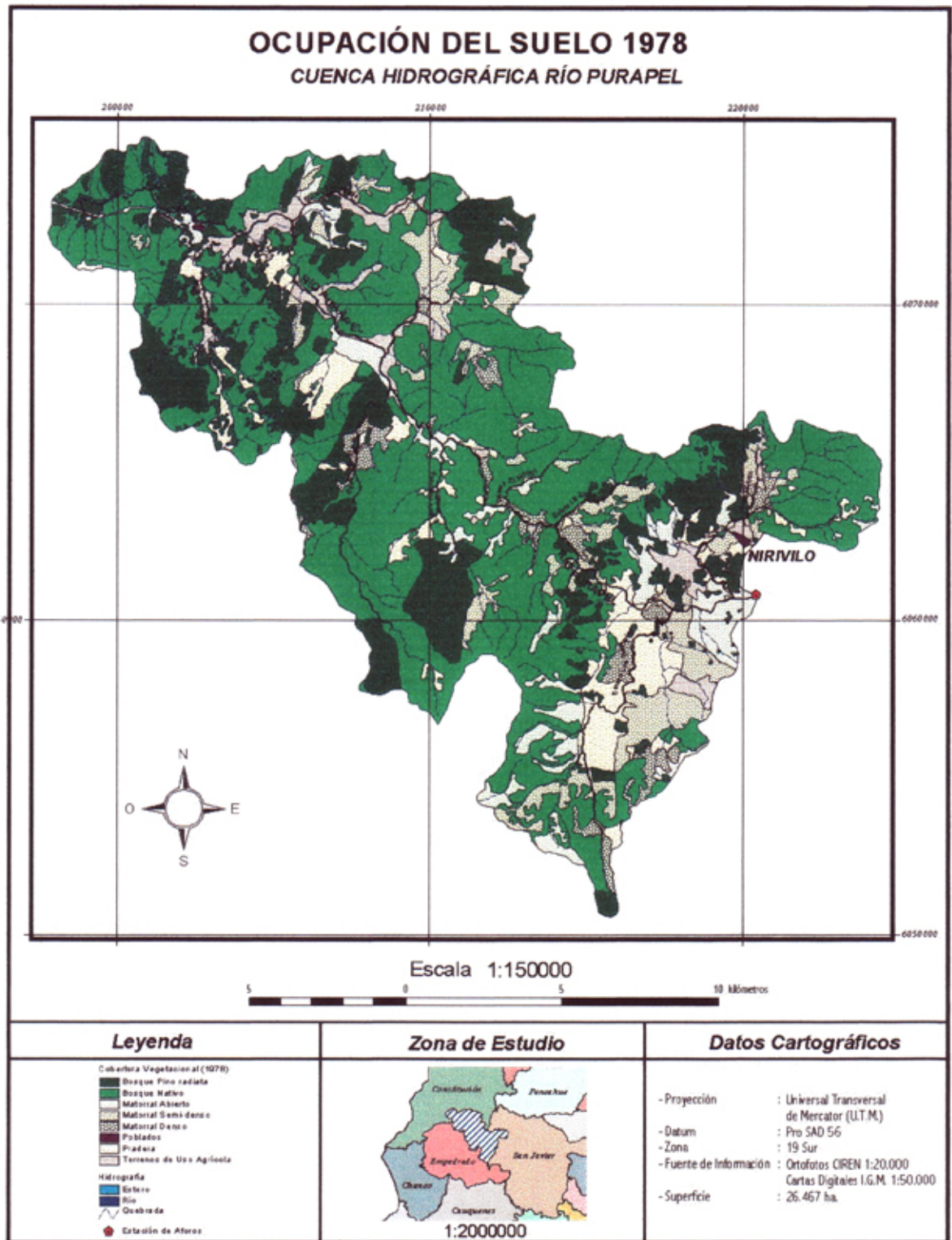


Figura 5: Mapa de ocupación del suelo cuenca río Purapel, año 1978 (Pizarro *et al*, 2003).

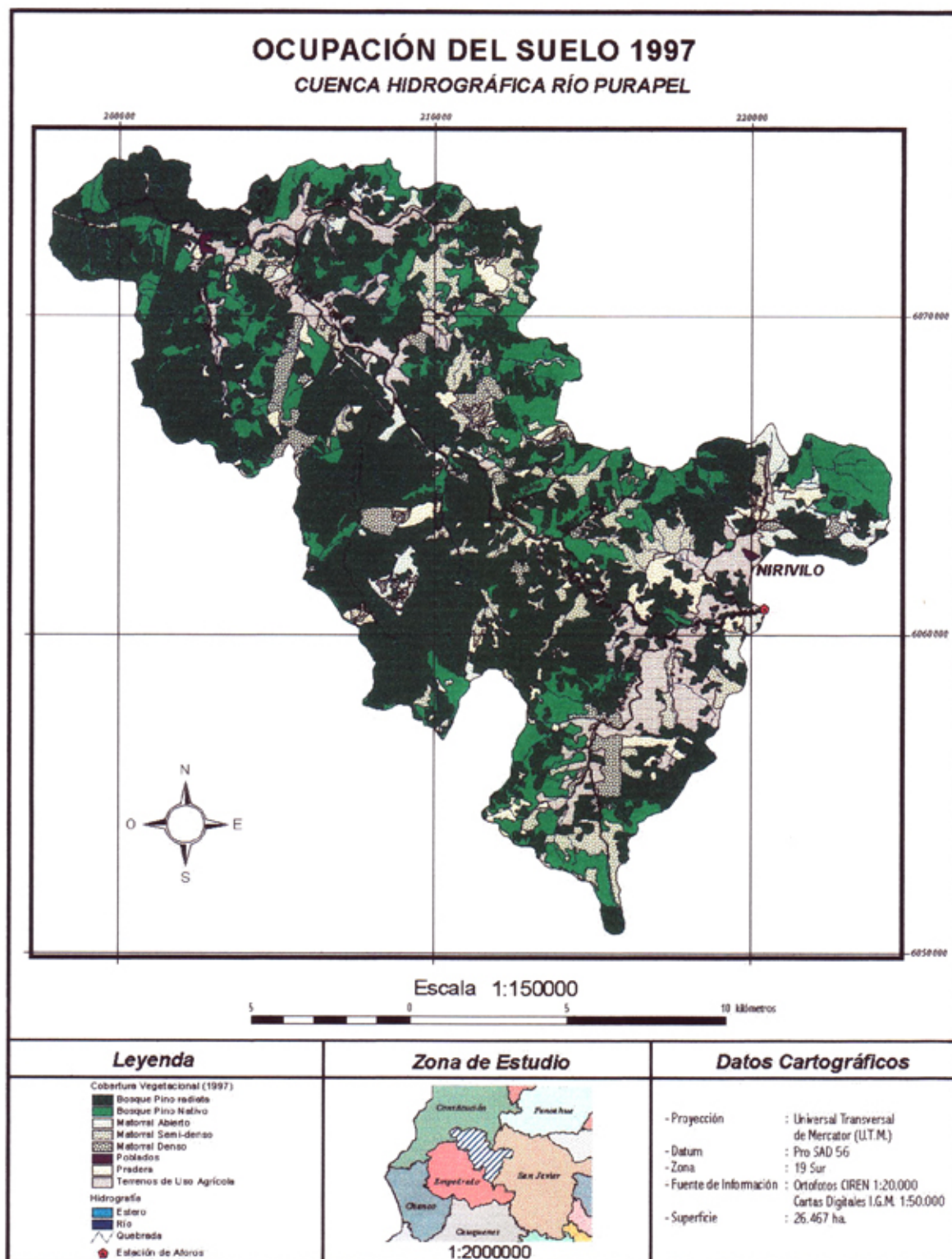


Figura 6: Mapa de ocupación del suelo cuenca río Purapel, año 1997 (Pizarro *et al*, 2003).

### **4.3. Estación Purapel en Nirivilo**

La cuenca del río Purapel posee dos estaciones de registro fluviométrico que son: Purapel en Nirivilo y Purapel en Sauzal. Sin embargo, para el presente estudio sólo se utilizó la Estación 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  $35^{\circ} 34'$  Latitud Sur y  $72^{\circ} 05'$  Longitud Oeste.

Esta estación funciona desde Abril de 1957 y es controlada por la Dirección General de Aguas (VII Región), contando desde sus inicios con limnímetros y limnígrafos mecánicos. Actualmente también cuenta con limnígrafo electrónico (Dattaloger).

## **5. MATERIALES Y METODOLOGÍA**

### **5.1 Materiales**

Para la elaboración de este proyecto, se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Curvas de gasto y limnigramas para la cuenca del río Purapel, estación Nirivilo, entre los años 1960 - 2000.
- Curvas de descarga modificadas, en función de las estadísticas presentes, para la cuenca del río Purapel.
- Equipos computacionales con los programas Statgraphics Plus, Microsoft Word 97, Microsoft Excel 97.

### **5.2 Metodología**

#### **5.2.1 Revisión Bibliográfica**

En este primer punto, se llevó a cabo una recopilación y revisión de información relevante para la elaboración del estudio, como por ejemplo temas relativos a precipitaciones, caudales punta, relaciones precipitación- escorrentía y la influencia de la vegetación en los procesos hidrológicos. Además, se analizó la información extraída desde los textos estadísticos, utilizada en esta memoria. Junto con esto, es también importante señalar, que se reunió información general sobre la cuenca del río Purapel, para poder llevar a cabo un análisis más completo y acabado.

### **5.2.2. Captura de datos**

Los datos necesarios para el estudio de los caudales punta, se obtuvieron de la estación hidrológica ubicada en la cuenca del río Purapel en Nirivilo, estación perteneciente a la Dirección General de Aguas (D.G.A), VII Región.

La información requerida fue de tipo fluviométrico, específicamente limnigramas y curvas de gasto o descarga, para el período que abarcó desde el año 1960 hasta el año 2000.

### **5.2.3 Selección de alturas máximas**

A partir de la información entregada por los limnigramas, que corresponden a registros de las alturas de agua contra el tiempo, obtenidos a partir del instrumento llamado limnígrafo, se procedió a seleccionar el valor más alto, es decir, la mayor altura de agua en el mes. Esta selección se realizó para los 12 meses del año y para el período que comprende los años entre 1960 y 2000. En consecuencia, el número total de datos en teoría, debería ser de 480 alturas, pero a consecuencia de problemas en los instrumentos, hubo meses en los cuales no existió registro de información.

### **5.2.4 Determinación de las curvas de descarga**

Las curvas de descarga, representan la relación existente entre el caudal y una altura de agua determinada para un cauce o curso de agua cualquiera. De esta forma, para poder obtener la información base de este estudio, es decir, los caudales punta de la cuenca del río Purapel, además del registro de alturas máximas a nivel mensual, se debió conseguir las curvas de descarga de la cuenca durante el período que va entre los años 1960 - 2000.



Con el fin de obtener las curvas de descarga más representativas, se contó con dos bases de datos. En primer lugar, con los antecedentes entregados por la D.G.A, relativo a curvas de gasto de la cuenca del río Purapel y, en segundo lugar, la información generada por el Proyecto Fondecyt N°1010590, con respecto a curvas de descarga de la cuenca del Purapel.

Al respecto, es relevante mencionar que las curvas entregadas por la D.G.A., debieron ser modificadas, generándose una nueva serie de curvas. Este trabajo lo llevó a cabo el Proyecto Fondecyt N° 1010590, siendo estas curvas las utilizadas en esta memoria, las cuales se presentan en el Anexo 1.

Es importante señalar también que, para la construcción de estas curvas, se siguió la metodología expuesta por Benítez (1970) citado por Pizarro *et al* (2003), 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.

### **5.2.5 Transformación a caudales punta**

Para la obtención de los caudales punta a nivel mensual y anual, en primer término se debió contar con la información base, es decir, con las curvas de descarga que mejor representaban al periodo analizado, además del registro de las mayores alturas de agua por mes.

Teniendo la información base para el cálculo de caudales, se procedió a transformar las alturas máximas en los caudales punta respectivos. Para ello, se fueron ingresando cada uno de los valores de alturas de agua, en metros, a las curvas de descarga correspondiente, según el año al que perteneciera el valor de altura. De este modo, al ingresar los valores de

altura a las distintas curvas de gasto y realizar el cálculo, se obtuvieron los caudales en  $\text{m}^3/\text{s}$  para la totalidad de meses en estudio.

#### **5.2.6. Completación de caudales punta**

Durante la toma de datos de las alturas de agua, existió el inconveniente de no poder registrar todas las alturas mensuales, debido a problemas existentes con el instrumento registrador (limnógrafo), lo que produjo una falta de información para algunos meses.

Debido a que del total de 480 meses que abarcó el estudio, solo en 20 existió falta de registro de las alturas, la completación se realizó por medio de los promedios históricos, es decir, con los promedios de los meses de la serie de años que sí tenían registro fluviométrico.

#### **5.2.7. Diferenciación de caudales estivales y caudales invernales**

Una vez estimados los caudales punta, tanto a nivel mensual como anual, se hizo una clasificación de los meses, en estivales e invernales. Esta diferenciación se realizó con el fin de hacer un mejor análisis de los caudales punta, y así poder determinar en el periodo estival, donde no existe influencia de las precipitaciones en los caudales máximos, si efectivamente existe un cambio en los valores de estos caudales a través del tiempo y, si esto se debe a las plantaciones forestales realizadas en la cuenca en el periodo 1960-2000. Así, se diferenció como meses invernales a los meses entre Abril y Octubre, y los meses estivales entre Noviembre y Marzo.

### **5.2.8. Análisis estadístico de las series de caudales punta**

Durante esta etapa, se analizaron estadísticamente los datos de caudales punta, 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 periodos (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, en un principio se planteó la idea de realizar pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas. Sin embargo, de la totalidad de pruebas propuestas, sólo se pudo utilizar pruebas no paramétricas, dado que para la aplicación del ANDEVA, 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 varianzas.

#### **5.2.8.1. Prueba no paramétrica U de Mann – Whitney**

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

Esta prueba fue utilizada para determinar la existencia de diferencias entre las poblaciones comparadas. La prueba U, presenta 2 pruebas; una para muestras pequeñas ( $n \leq 10$ ) y otra para muestras grandes ( $n > 10$ ). Para el análisis de los datos, se ocuparon ambas pruebas, las cuales se presentan en los Anexos 2 y 3.

Para la prueba U de Mann-Whitney, la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) en este estudio fueron definidas de la siguiente manera:

$H_0$ : Los caudales punta de las series A y B provienen de la misma población.

$H_a$ : Los caudales punta de las series A y B no provienen de la misma población.

Este test no paramétrico, se aplicó en primer lugar para hacer una comparación a nivel mensual entre las distintas décadas en estudio. Además, también a nivel mensual, se realizó la comparación de los periodos 1960/1978 – 1979/2000. En segundo término, se hizo una comparación para los caudales punta promedio anuales y máximos caudales punta anuales por décadas y también para los periodos 1960/1978 – 1979/2000.

Como una forma de profundizar el análisis, se aplicó la Prueba U sólo para los caudales estivales, dado que ellos podrían indicar cambios del régimen hidrológico (Singh,1982). Para ello, se determinó el caudal estival mayor para cada año y luego se aplicó la prueba U en una comparación interdécadas; finalmente, se realizó una comparación entre los periodos 1960-1978 y 1979-2000.

#### **5.2.8.2. Análisis gráfico**

Para el análisis gráfico de los datos, se utilizó uno de los métodos tradicionales para el análisis de series de tiempo, como lo son los Promedios Móviles. Este método permite suavizar los datos, intentando eliminar el efecto de la variación aleatoria y poder obtener las componentes o variables que se buscan.

Entonces, la serie de tiempo de los promedios móviles presenta un punto por cada unidad de tiempo, en este caso mes o año, que representa el promedio de las observaciones

calculado para un periodo específico de tiempo antes y después del mes en cuestión. (Mendenhall y Reinmuth, 1981).

El efecto que se pretende lograr, es transformar la serie original en una serie que resulte más suave (menos sujeta a oscilaciones rápidas) y más susceptible a mostrar tendencias a través del tiempo.

La expresión que representa el cálculo de los promedios móviles, se presenta a continuación:

$$\overline{X}_M = \frac{X_i + X_{i+1} + \dots + X_{i+n}}{n + 1}$$

Donde:

$\overline{X}_M$  : Promedio móvil obtenido para un valor  $X_i$ .

$x_i$  : Valor de la variable  $i$ , en un tiempo  $t$ .

$n$  : Número de datos.

Para el cálculo de los promedios móviles en este estudio, los caudales punta se agruparon de a tres ( $M=3$ ).

### **5.2.9 Ajuste a Funciones de Distribución de Probabilidad**

Una vez finalizado el análisis estadístico de la serie de caudales punta a nivel mensual y anual, se realizó un ajuste de los caudales a distintas funciones de distribución de probabilidad, las cuales son usadas en hidrología para predecir con cierta probabilidad los valores que puede tomar una variable hidrológica. Las funciones de distribución usadas para ajustar las series de datos fueron Gumbel, Goodrich y Pearson III.

El objetivo de realizar el ajuste de los datos a estas tres funciones de distribución es, además de establecer qué función de distribución se ajusta mejor a la serie de caudales máximos a nivel mensual y anual, poder determinar la probabilidad de caudales punta para distintos periodos de retorno (20, 30 y 40 años) y para los lapsos 1960 – 1980, 1960 – 1990 y 1960 – 2000. De esta forma, se podrán determinar los valores de caudal asociados a distintos periodos de retorno (T); así, si para el periodo 1960-1980, el valor del caudal  $i$  ( $Q_i$ ) para un periodo de retorno dado es mayor o menor que el obtenido entre 1960-1980 o 1960-2000, ello estaría señalando un cambio en la tendencia de los valores de caudal, con lo que se podría inferir si el uso de suelo ha tenido alguna influencia en los caudales punta.

### 5.2.9.1 Funciones de Distribución de Probabilidad

Antes de definir de manera breve cada una de las funciones a ajustar, es importante revisar dos conceptos previos:

- Período de Retorno: Se define como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales. Sea ese tiempo **T**.
- Probabilidad de Excedencia: Es la probabilidad asociada al período de retorno.

Así:

$$\text{Probabilidad de Excedencia} = \mathbf{P(X)} = 1 / \mathbf{T}$$

En otras palabras, la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número  $X$ , está dada por la función de distribución de probabilidad  $\mathbf{F(X)}$ . (Pizarro y Novoa, 1986).

$$\mathbf{F(X)} = \int_{-x}^x f(x) dx = \mathbf{P(x \leq X)} = 1 - \frac{1}{\mathbf{T}}$$

Luego, la probabilidad de que  $x$  sea mayor que  $X$  está dada por la función complementaria:

$$P(x > X) = 1 - F(X) = 1/T$$

- **Función de Gumbel**

Esta ley de distribución fue incluida dentro del conjunto de distribuciones a ajustar para la serie de datos en estudio, ya que ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a valores máximos de caudales, precipitaciones en periodos de tiempo, aportaciones anuales, etc. (Pizarro y Novoa, 1986). La función se define de la siguiente manera:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}}$$

Donde:

- $x$  : Valor a asumir por la variable aleatoria.
- $u, d$  : Parámetros.
- $e$  : Constante de Neper.

- **Función de Goodrich**

Esta función se utilizó en el análisis de la serie de datos, ya que ajusta muy bien a valores medios. Ésto se debe a que posee la cualidad de eliminar valores extremos, es decir, aquellos cuya probabilidad de ocurrencia es muy pequeña (Pizarro y Novoa, 1986). Su expresión es la siguiente:

$$F(x) = 1 - e^{-a(x-x_1)^{1/p}}$$

Donde:

- $x$  : Valor a asumir por la variable aleatoria.
- $x_1, a, p$ : Parámetros.
- $e$  : Constante de Neper.

- **Función de Pearson III**

El motivo para la incorporación de esta función al conjunto de distribuciones utilizadas en este análisis, se debió a que también se encuentra dentro de las funciones más usadas en hidrología, además de ocupar un lugar intermedio entre las funciones de Gumbel (ajusta mejor a valores extremos) y Goodrich (ajusta mejor a valores medios). La función está definida de la siguiente manera:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^y e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)} \left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} dx$$

Donde:

- $x$  : Valor a asumir por la variable aleatoria.
- $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$ : Parámetros.
- $e$  : Constante de Neper.

El detalle de la funciones de Gumbel, Goodrich y Pearson III, sus parámetros y el despeje para obtener el valor de  $x$ , se encuentran en el Anexo 4.



### 5.2.9.2 Medidas de Bondad de Ajuste

Se entiende por bondad de ajuste, la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de esta es posible interpolar y extrapolar información; en otras palabras, predecir el comportamiento de la variable en estudio (Pizarro y Novoa, 1986). En esta memoria, se utilizaron como pruebas de bondad de ajuste, el test de Kolmogorov- Smirnov y el Coeficiente de determinación.

- **Test de Kolmogorov- Smirnov**

Para la aplicación de este test, se necesita en primer lugar determinar la frecuencia observada acumulada:

$$F(x) = \frac{n}{N + 1}$$

Donde:

$F_n(x)$ : Frecuencia observada acumulada.

$n$ :  $N^\circ$  de orden del dato.

$N$ :  $N^\circ$  total de datos.

Luego, se debe calcular la frecuencia teórica acumulada  $F(x)$ , determinada para cada una de las funciones. Una vez obtenidas ambas frecuencias, se calcula el supremo de las diferencias entre ambas, en la  $i$ -ésima posición de orden, que se denomina  $D$ .

$$D = \text{Sup} | F_n(x)_i - F(x)_i |$$

Finalmente, asumiendo un valor de significancia, se ve la tabla de valores críticos de  $D$  en la prueba K-S, y según el tamaño de la muestra, se establece:

Si  $D_c < D_t$ , se acepta que el ajuste es adecuado, con el nivel de confiabilidad asumido.

- **Coefficiente de Determinación**

El Coeficiente de determinación, señala qué proporción de la variación total de las frecuencias observadas, es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas, y está definido por la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{\sum [F_n(x)_i - F(x)_i]^2}{\sum [F_n(x)_i - \overline{F_n(x)_i}]^2}$$

Donde:

$R^2$  : Coeficiente de determinación.

$\overline{F_n(x)_i}$  : Media de las frecuencias observadas acumuladas.

Cuando  $R^2 \geq 0,9$ , se aceptará el ajuste considerándolo bueno.

### **5.2.10. Discusión de Resultados**

Durante el desarrollo de esta etapa, se discutieron y analizaron los resultados obtenidos por el análisis estadístico, con el objeto de intentar explicar y justificar los resultados entregados.

### **5.2.11. Conclusiones y Recomendaciones**

A partir de los resultados y del análisis de resultados, se determinaron las principales conclusiones y recomendaciones posibles de obtener de este estudio.

## 6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Alturas máximas

Los datos de la Tabla 1, corresponden a las alturas máximas de agua por mes, recopiladas desde la Estación Fluviométrica Purapel, en Nirivilo, perteneciente a la D.G.A.

Tabla 1. Alturas de agua mensuales, Estación Nirivilo (metros).

Año	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
60/61	1.15	1.04	0.98	1.03	1.13	1.01	1.13	2.55	3.27	3.21	2.99	1.63
61/62	1.27	1.17	1.07	1.02	1.05	1.1	1.15	1.97	1.48	2.73	1.23	1.5
62/63	1.1	1.02	0.95	0.94	0.99	1.02	1.31	1.94	2.67	3.81	3.16	1.7
63/64	1.39	1.33	1.12	1.09	1.08	1.13	1.165	1.32	1.94	1.7	1.54	1.26
64/65	1.16	1.16	1.12	1.07	1.02	1.39	1.67	1.92	4.15	4.46	1.5	1.45
65/66	1.3	1.25	1.14	X	1.08	1.42	1.95	4.25	3.2	3.18	1.89	1.77
66/67	1.35	1.53	1.25	1.18	1.18	1.22	2	1.85	1.97	1.66	1.81	1.47
67/68	1.31	1.21	1.13	1.09	1.14	1.21	1.22	1.29	1.4	1.44	1.25	1.28
68/69	1.23	1.06	1.12	0.72	0.7	0.81	1.78	4.21	2.01	2.6	2.6	1.39
69/70	1.21	1.1	1	1	1.04	1.07	1.7	2.35	4.35	2.41	1.37	1.33
70/71	1.18	1.08	1.04	1.02	1.03	X	1.18	3.84	2.18	3.19	1.57	1.47
71/72	1.23	1.2	1.13	1.12	1.18	1.16	2.36	2.23	2.21	2.2	1.89	1.98
72/73	1.71	1.4	1.28	1.28	1.22	1.21	X	X	X	X	X	1.61
73/74	1.4	1.26	X	X	0.81	1.2	2.15	2.23	2.18	1.84	X	X
74/75	1.36	1.43	1.27	1.23	1.25	1.36	1.99	2.9	4.78	2.14	1.55	1.45
75/76	1.34	1.26	1.13	X	X	1.19	1.63	2.88	1.72	1.77	2.09	2.05
76/77	1.7	1.15	1.08	1.07	X	X	X	X	3.88	3.33	1.38	1.43
77/78	1.11	1	0.87	0.87	0.87	0.87	0.97	1.44	4.09	1.52	1.81	1.28
78/79	1.43	1.06	0.91	0.86	0.85	0.93	1.11	1	4.22	2.34	1.86	1.44
79/80	1.12	1.03	0.93	0.92	0.96	1.91	4.27	4.08	3.57	2.08	1.62	1.51
80/81	1.18	1.08	1.04	0.97	0.97	1.33	3.57	2.57	3.38	2.05	1.8	1.37
81/82	1.25	1.2	1.17	1.14	1.14	1.15	3.56	4.07	4.47	2.98	4.39	2.14
82/83	1.54	1.39	1.31	1.28	1.23	1.27	1.52	4.16	4.22	2.22	1.94	1.44
83/84	1.31	1.25	1.24	1.21	1.15	1.16	2.16	1.92	5.12	3.12	2.48	2.01
84/85	1.6	1.33	1.25	1.17	1.18	1.23	1.79	1.77	2.32	1.69	1.57	1.41
85/86	1.32	1.26	1.21	1.22	1.23	1.81	4.36	4.42	1.9	3.88	1.46	1.53
86/87	3.13	1.31	1.07	1.06	1.43	1.32	X	4.4	3.18	2.49	2.9	2.9
87/88	1.53	1.34	1.29	1.24	1.58	1.32	2.69	2.55	4.12	3.31	1.9	1.41
88/89	1.38	1.3	1.23	1.21	1.21	1.23	1.28	2.35	3.46	2.64	1.43	1.33
89/90	1.23	1.23	1.16	1.16	2.04	1.3	1.62	1.52	X	1.66	1.71	1.72
90/91	1.31	1.22	1.23	1.13	0.85	1.2	4.16	3.14	3.68	2.1	2.5	1.93
91/92	1.27	1.43	1.16	1.15	1.27	1.26	4.78	5.5	2.41	3.18	3.26	1.47
92/93	1.29	1.23	1.16	1.14	1.15	1.51	1.92	3.1	2.28	2.52	X	1.37
93/94	1.21	1.39	1.18	1.16	1.18	1.66	2.37	2.28	3.57	1.58	1.8	1.29
94/95	1.19	1.26	1.14	1.14	1.14	1.63	1.63	2.48	3.5	2.54	1.63	1.48
95/96	1.27	1.18	1.15	1.14	1.15	1.19	1.23	1.9	2.45	3.16	1.48	1.36
96/97	1.3	1.2	1.11	0.77	0.63	2.24	3.03	4.78	2.1	2.98	2.86	3.08
97/98	1.31	1.28	1.21	1.21	1.21	1.56	1.66	1.54	1.2	1.24	2.13	1.15
98/99	1.08	1.06	0.87	0.76	0.63	0.46	1.3	1.71	1.46	2.16	4.01	1.34
99/2000	1.24	1.06	0.94	1.15	1.13	1.11	1.21	4.51	1.78	1.46	4.32	1.51

X : No existe registro.

## 6.2. Caudales punta invernales

Los datos presentes en la Tabla 2, corresponden a los caudales punta por mes para los meses invernales, durante el período 1960 – 2000. Aquellos datos faltantes, fueron completados a través del método de completación por promedios históricos. Además se presentan en la misma tabla los caudales promedio anuales y los máximos invernales que coinciden con el máximo caudal del año.

Tabla 2. Caudales punta para meses invernales, Estación Nirivilo (m<sup>3</sup> / seg).

Año	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Máximo Invernal	Anual
60/61	0.04	0.59	40.10	77.34	73.80	61.50	8.10	77.34	21.91
61/62	0.39	0.73	17.41	5.038	48.34	1.46	5.41	48.34	6.83
62/63	0.001	2.08	16.10	45.51	112.76	70.91	9.34	112.76	21.43
63/64	0.44	0.67	2.20	16.10	9.34	5.77	1.51	16.10	3.52
64/65	3.24	8.89	15.83	138.35	163.91	5.18	4.25	163.91	28.42
65/66	3.73	16.78	146.37	73.22	72.06	14.91	11.49	146.37	28.54
66/67	0.37	18.13	13.34	17.12	8.16	12.16	4.04	18.13	6.88
67/68	0.26	0.37	1.19	2.81	3.49	0.70	1.06	3.49	0.98
68/69	1.57	9.91	143.13	16.93	42.32	42.32	2.08	143.13	22.07
69/70	0.01	7.87	30.12	154.60	34.18	1.83	1.38	154.60	19.23
70/71	•3.04	0.07	114.91	23.23	72.64	4.73	2.94	114.91	18.50
71/72	0.01	30.81	25.25	24.44	24.03	14.20	15.86	30.81	11.18
72/73	0.94	•31.69	•66.84	•69.75	•41.84	•29.56	7.64	69.75	21.89
73/74	0.84	23.63	26.62	24.73	13.53	•29.56	•8.87	29.56	11.15
74/75	0.77	16.10	56.78	192.50	21.71	3.84	2.04	192.51	25.10
75/76	0.16	5.55	55.75	7.77	9.13	19.77	18.27	55.75	9.91
76/77	•3.04	•31.69	•66.84	117.82	80.96	2.42	3.14	117.82	26.23
77/78	0.70	0.19	3.29	133.65	4.67	11.39	1.27	133.65	13.13
78/79	0.26	1.38	0.59	143.94	31.39	15.66	5.82	143.94	16.89
79/80	16.58	148.00	132.88	96.22	21.95	9.48	7.14	148.0	36.28
80/81	2.16	96.22	40.98	84.03	20.95	13.44	2.77	96.22	22.19
81/82	0.01	95.56	132.10	164.77	60.97	157.95	23.20	164.77	53.28
82/83	1.33	5.48	139.15	143.94	26.20	16.39	3.95	143.94	29.13
83/84	0.11	23.94	15.77	225.36	68.64	37.09	18.66	225.36	32.84
84/85	0.85	11.95	11.40	30.15	9.32	6.52	3.43	30.15	7.05
85/86	12.51	155.43	160.49	15.15	117.82	4.32	5.68	160.49	39.73
86/87	1.66	•31.69	158.80	72.06	37.51	37.94	56.78	158.80	40.86
87/88	1.66	46.45	40.10	135.99	79.74	14.68	2.99	135.99	28.07
88/89	0.50	1.28	31.78	89.07	44.13	3.97	2.12	89.07	14.80
89/90	1.61	8.13	5.83	•69.75	9.11	10.38	10.65	69.75	11.41
90/91	0.53	139.15	69.77	103.64	21.91	37.94	16.52	139.14	32.72
91/92	1.40	192.51	265.10	34.18	72.06	76.74	5.09	265.10	54.58
92/93	5.96	16.35	67.52	29.08	38.79	•29.58	3.27	67.52	16.15
93/94	9.32	32.57	29.08	96.22	7.47	12.92	1.93	96.22	16.21
94/95	8.18	8.18	37.09	91.64	39.66	8.18	4.92	91.64	16.70
95/96	0.43	0.90	15.53	35.83	70.91	4.92	2.77	70.91	11.12
96/97	27.43	63.66	192.51	22.43	60.97	54.73	66.40	192.51	40.91
97/98	7.24	9.57	6.80	0.69	1.28	23.47	0.01	23.47	4.66
98/99	4.57	1.87	9.48	4.21	23.52	127.51	2.38	127.51	14.73
99/2000	0.21	0.93	168.23	11.30	4.21	152.11	5.11	168.23	28.77

•: Valores de caudales punta mensuales completados, Estación Nirivilo.

### 6.3. Caudales punta estivales

Los datos que se presentan en la Tabla 3, corresponden a los caudales punta estivales por mes y año hidrológico para el período 1960 – 2000. Además, se presenta en la misma tabla el caudal estival mayor para cada año y los caudales promedio anuales.

Tabla 3. Caudales punta estivales, Estación Nirivilo (m<sup>3</sup> / seg).

Año	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Máximo Estival	Anual
60/61	0.734	0.084	0.032	0.045	0.586	0.734	21.912
61/62	1.899	0.896	0.221	0.009	0.126	1.899	6.827
62/63	0.388	0.009	0.027	0.022	0.035	0.388	21.432
63/64	3.164	2.328	0.377	0.226	0.183	3.164	3.525
64/65	0.629	0.629	0.111	0.038	0.020	0.629	28.423
65/66	1.937	1.323	0.261	• 0.442	0.041	1.937	28.544
66/67	2.630	5.772	0.698	0.062	0.062	5.772	6.879
67/68	1.452	0.262	0.049	0.038	0.051	1.452	0.977
68/69	0.473	0.029	0.055	2.844	3.180	3.180	22.071
69/70	0.400	0.025	0.133	0.133	0.037	0.400	19.227
70/71	0.247	0.011	0.015	0.082	0.046	0.247	18.497
71/72	0.305	0.150	0.197	0.173	0.069	0.305	11.184
72/73	7.869	1.921	1.776	1.776	1.052	7.869	21.888
73/74	3.545	1.523	• 0.467	• 0.442	0.092	3.545	11.152
74/75	2.908	4.053	0.193	0.175	0.184	4.053	25.104
75/76	0.532	0.189	0.129	• 0.442	• 1.223	0.532	9.910
76/77	7.255	0.138	0.129	0.114	• 1.223	7.255	26.230
77/78	0.199	0.123	0.689	0.689	0.689	0.689	13.127
78/79	3.135	0.103	0.196	0.084	0.070	3.135	16.885
79/80	1.472	0.768	0.262	0.228	0.383	1.472	36.279
80/81	2.070	1.130	1.053	0.756	0.756	2.070	22.194
81/82	1.083	0.510	0.203	1.479	1.479	1.479	53.277
82/83	5.886	3.092	1.872	1.464	0.845	5.886	29.133
83/84	1.872	1.083	0.962	0.618	0.013	1.872	32.842
84/85	7.184	2.159	1.083	0.203	0.302	7.184	7.045
85/86	2.014	1.207	0.618	0.730	0.845	2.014	39.734
86/87	69.203	1.872	0.379	0.334	3.318	69.203	40.864
87/88	5.169	1.931	1.277	0.709	6.214	6.214	28.075
88/89	2.514	1.401	0.498	0.202	0.202	2.514	14.805
89/90	0.498	0.498	0.098	0.098	20.224	20.224	11.405
90/91	1.774	0.349	0.954	0.112	0.051	1.774	32.725
91/92	1.556	4.311	0.251	0.223	1.556	4.311	54.581
92/93	1.870	0.954	0.057	0.194	0.223	1.870	16.151
93/94	0.733	3.627	0.321	0.057	0.321	3.627	16.214
94/95	0.456	1.464	0.230	0.230	0.230	1.464	16.704
95/96	1.426	0.317	0.001	0.398	0.001	1.426	11.120
96/97	1.849	0.543	0.311	0.086	0.037	1.849	40.913
97/98	2.390	1.901	0.836	0.836	0.836	2.390	4.655
98/99	0.224	0.165	0.482	0.536	1.842	1.842	14.732
99/2000	1.213	0.278	0.894	0.456	0.326	1.213	28.771

• : Valores de caudales punta mensuales completados, Estación Nirivilo.

## 6.4. Análisis Estadístico

En el análisis estadístico se presentan los resultados de la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney y de los promedios móviles, ya que al realizar la prueba de Normalidad a los valores de caudales punta, se confirmó el no cumplimiento de este supuesto, por lo que no se pudieron desarrollar las pruebas estadísticas ANDEVA y prueba  $t$  como se había determinado en el comienzo del estudio. En el Apéndice 1, se encuentran los resultados de las pruebas de normalidad realizadas a los datos.

### 6.4.1. Prueba no paramétrica U de Mann – Whitney

#### 6.4.1.1. Comparación Interdecadal a nivel mensual.

- *Comparación Década 60 –70*

Tabla 4: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	99	83	94	105	91	100	80	113	108	103	98	103
<b>R2</b>	111	127	116	105	119	110	130	97	102	107	112	107
<b>U1</b>	56	72	61	50	64	55	75	42	47	52	57	52
<b>U2</b>	44	28	39	50	36	45	25	58	53	48	43	48
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

- *Comparación Década 60 – 80*

Tabla 5: Valores para la prueba U regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	69	74	81	88	67	91	74	103	97	95	77	83
<b>R2</b>	141	136	129	122	143	119	136	107	113	115	133	127
<b>U1</b>	86	81	74	67	88	64	81	52	58	60	78	72
<b>U2</b>	14	19	26	33	12	36	30	48	42	40	22	28
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

- *Comparación Década 60 – 90*

Tabla 6: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	93	87	93	69	80	100	96	117	88	103	107	90
<b>R2</b>	117	123	117	141	130	110	114	93	122	107	103	120
<b>U1</b>	62	68	62	86	75	55	59	38	67	52	48	65
<b>U2</b>	38	32	38	14	25	45	41	62	33	48	52	35
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

- *Comparación Década 70 – 80*

Tabla 7: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	72	78	86	88	78	86	96	91	92	94	94	80
<b>R2</b>	138	132	124	122	132	124	114	119	118	116	116	130
<b>U1</b>	50	77	69	67	77	69	59	64	63	61	61	75
<b>U2</b>	17	23	31	33	23	31	41	36	37	39	39	25
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

- *Comparación Década 70 – 90*

Tabla 8: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	99	108	98	71	89	100	122	107	80	105	114	85
<b>R2</b>	111	102	112	139	121	110	88	103	130	105	96	125
<b>U1</b>	56	47	57	84	66	55	33	48	75	50	41	70
<b>U2</b>	44	53	43	16	34	45	67	52	25	50	59	30
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

- *Comparación Década 80 – 90*

Tabla 9: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	136	134	115	90	116	119	130	117	94	115	137	118
<b>R2</b>	74	66	95	120	94	91	80	93	116	95	73	92
<b>U1</b>	19	21	40	65	39	36	25	38	61	40	18	37
<b>U2</b>	81	89	60	35	61	64	75	62	39	60	82	63
<b>Ut (Uo)</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Decisión</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

#### 6.4.1.2. Comparación Inter- periodos (1960/1978 - 1979/2000) a nivel mensual.

Tabla 10: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>R1</b>	310	331	342	312	308	366	359	407	323	369	371	315
<b>R2</b>	551	530	519	549	553	495	502	454	538	492	464	546
<b>Zc</b>	-2.3	-1.78	-1.49	-2.27	-2.38	-0.86	-1.05	0.21	-1.99	-0.78	0.39	-2.2
<b>Zt</b>	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
<b>Decisión</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

R: Se rechaza Ho; hay diferencias interdecadales.

#### 6.4.1.3. Comparación Interdecadal para los caudales punta promedio anuales.

Tabla 11: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación n	R1	R2	U1	U2	Ut (Uo)	Decisión
<b>60 – 70</b>	104	106	51	49	24	<b>A</b>
<b>60 – 80</b>	75	135	80	20	24	<b>A</b>
<b>60 – 90</b>	99	111	56	44	24	<b>A</b>
<b>70 – 80</b>	73	137	82	18	24	<b>A</b>
<b>70 – 90</b>	106	104	49	51	24	<b>A</b>
<b>80 – 90</b>	122	88	33	67	24	<b>A</b>

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.



6.4.1.4. Comparación Inter-periodos para caudales punta promedios anuales.

Tabla 12: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación	R1	R2	Zc	Zt	Decisión
60/78 v/s 79/2000	326	535	-1.91	1.96	A

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

6.4.1.5. Comparación Interdecadal para los máximos caudales punta anuales.

Tabla 13: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación	R1	R2	U1	U2	Ut (Uo)	Decisión
60 – 70	98	112	57	43	24	A
60 – 80	108	102	47	53	24	A
60 – 90	87	123	68	32	24	A
70 – 80	92	118	63	37	24	A
70 – 90	98	112	57	43	24	A
80 – 90	108	102	47	53	24	A

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

6.4.1.6. Comparación Inter-periodos para máximos caudales punta anuales.

Tabla 14: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación	R1	R2	Zc	Zt	Decisión
60/78 v/s 79/2000	327	493	-1.69	-1.96	A

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

6.4.1.7. Comparación Interdecadal para los máximos caudales punta estivales.

Tabla 15: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación	R1	R2	U1	U2	Ut (Uo)	Decisión
60 – 70	91	99	44	55	24	A
60 – 80	69	121	66	24	24	A
60 – 90	81	109	54	36	24	A
70 – 80	91	119	64	36	24	A
70 – 90	95	115	60	40	24	A
80 – 90	121	89	34	66	24	A

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

#### 6.4.1.8. Comparación Inter-periodos para los máximos caudales punta estivales.

Tabla 16: Valores para la prueba U y regla de decisión para Ho.

Comparación	R1	R2	Zc	Zt	Decisión
60/78 v/s 79/2000	311	509	-1.58	-1.96	A

A: Se acepta Ho; no hay diferencias interdecadales.

#### 6.4.2. Análisis Gráfico

El análisis gráfico para los caudales punta, se realizó por medio de los promedios móviles, presentándose los resultados de éstos en las gráficas siguientes. La figura 7 muestra el gráfico para el periodo anual total. Luego se observa la figura 8 que presenta los promedios móviles para los meses invernales, es decir, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre. Por último, la figura 9 corresponde a los promedios móviles para los meses estivales que son Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. En el Apéndice 2 se muestran los valores de los promedios móviles que dieron origen a los gráficos.

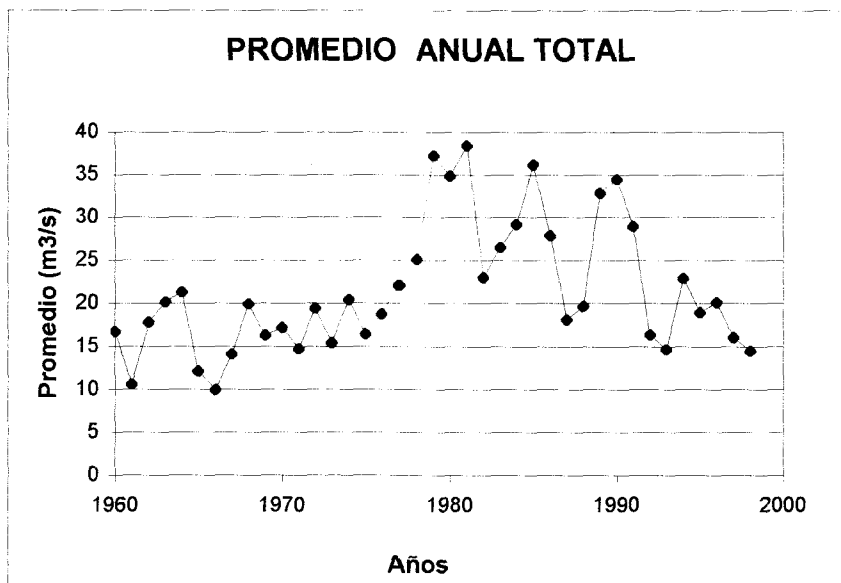


Figura 7. Promedios móviles para caudales punta anuales.

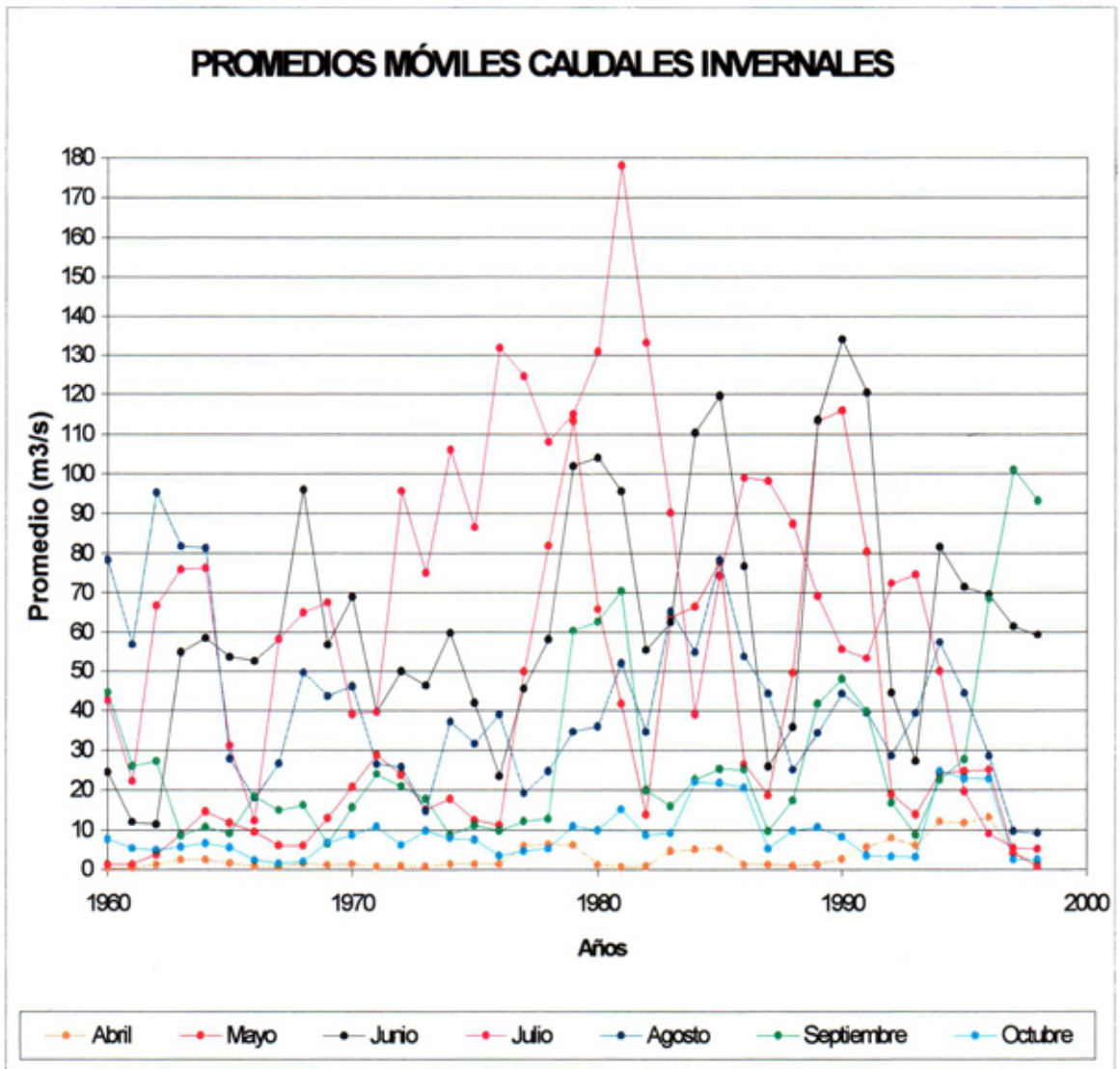


Figura 8. Promedios móviles para caudales punta invernales.

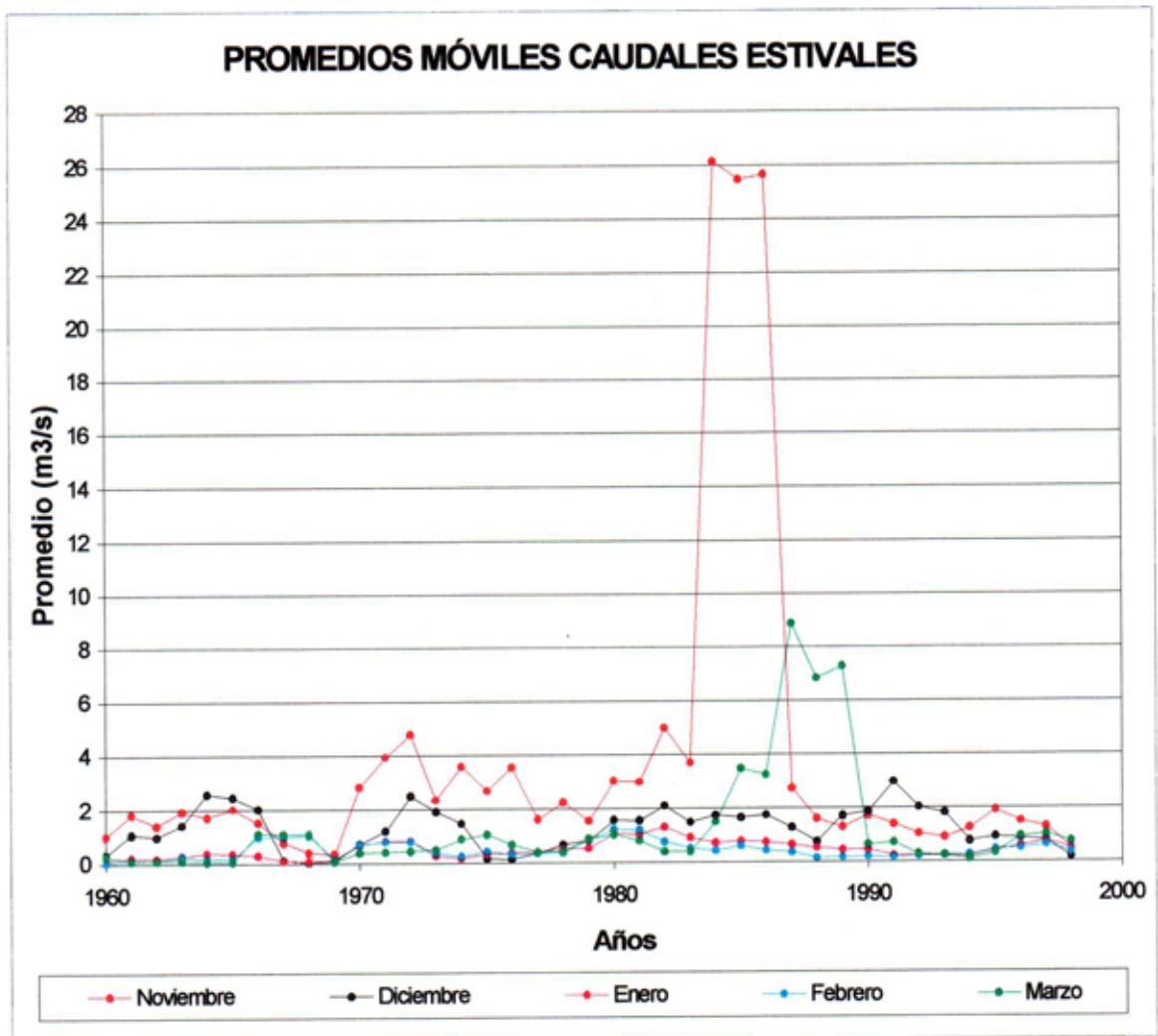


Figura 9. Promedios móviles para caudales punta estivales.

## 6.5. Ajuste a Funciones de Distribución de Probabilidad

### 6.5.1. Pruebas de Bondad de Ajuste

A continuación, se presentan los resultados del ajuste de la serie de caudales punta a nivel mensual y anual, para las funciones de distribución de probabilidad utilizadas en este estudio (Gumbel, Goodrich y Pearson III). En las tablas 17, 18 y 19, se muestran los resultados de las pruebas usadas para determinar la calidad de los ajustes, es decir, el test de K-S y el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Tabla 17. Valores de K-S y  $R^2$  para la Función Gumbel.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Dc</b>	0.132	0.2	0.367	0.273	0.26	0.148	0.14	0.086	0.203	0.276	0.399	0.114	0.061
<b>Dt</b>	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	0.218	0.212	0.215	0.215
<b>K-S</b>	A	A	R	R	R	A	A	A	R	R	R	A	A
<b>R<sup>2</sup></b>	0.95	0.9	0.57	0.76	0.76	0.93	0.94	0.98	0.87	0.76	0.45	0.95	0.99

A: Se acepta el ajuste.

R: Se rechaza el ajuste.

Tabla 18. Valores de K-S y  $R^2$  para la Función Goodrich.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Dc</b>	0.103	0.156	0.443	0.248	0.291	0.156	0.149	0.095	0.226	0.265	0.485	0.272	0.047
<b>Dt</b>	0.215	0.215	0.234	0.232	0.221	0.215	0.215	0.215	0.221	0.218	0.212	0.224	0.215
<b>K-S</b>	A	A	R	R	R	A	A	A	R	R	R	R	A
<b>R<sup>2</sup></b>	0.97	0.94	0.52	0.83	0.81	0.92	0.95	0.96	0.83	0.81	0.26	0.86	0.99

A: Se acepta el ajuste.

R: Se rechaza el ajuste.

Tabla 19. Valores de K-S y  $R^2$  para la Función Pearson III.

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Dc</b>	0.125	0.28	0.336	0.353	0.352	0.16	0.10	0.087	0.23	0.225	0.486	0.14	0.049
<b>Dt</b>	0.215	0.215	0.23	0.232	0.221	0.215	0.215	0.215	0.221	0.218	0.212	0.215	0.215
<b>K-S</b>	A	R	R	R	R	A	A	A	R	R	R	A	A
<b>R<sup>2</sup></b>	0.97	0.66	0.44	0.7	0.74	0.94	0.96	0.98	0.87	0.86	0.0	0.91	0.99

A: Se acepta el ajuste.

R: Se rechaza el ajuste.

## 6.5.2. Probabilidad de caudales punta para distintos lapsos

En las tablas que a continuación se presentan, se encuentran los montos de caudales punta, asociados a distintos periodos de retorno (10, 20, 30 y 40 años) y para los lapsos 1960-1980, 1960-1990 y 1960-2000, con el objetivo de poder determinar alguna variación en los caudales de crecida a lo largo del tiempo. La tabla 20, muestra los resultados para los caudales punta promedio a nivel anual, mientras que en las tablas siguientes (21 a la 26), se presentan los caudales a nivel de meses. Estos caudales sólo pudieron ser determinados para aquellos meses en los cuales los datos se ajustaron bien a las funciones de Gumbel, Goodrich y Pearson III. En el resto de los meses no fue posible determinar los caudales, ya que los datos no ajustaron de manera óptima a las funciones de distribución de probabilidad. Los ajustes de las distintas funciones se encuentran en el Apéndice 3.

- **Valores a nivel anual para las funciones Gumbel, Goodrich y Pearson III**

Tabla 20: Caudales punta para Gumbel, Goodrich y Pearson III, a nivel promedio anual.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	29.70	29,57	**	36.82	37,51	37,25	38.43	39,40	38,14
20	34.94	32,78	**	43.63	42,89	42,78	45.64	45,50	44,27
30	38.03	34,46	**	47.65	45,80	46,32	49.90	48,84	48,12
40	40.09	35,49	**	50.32	47,63	47,98	52.72	50,95	49,96

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\*\* : Ajuste deficiente.

- Valores a nivel mensual para las funciones Gumbel, Goodrich y Pearson III

Tabla 21: Caudales punta para Enero.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	0.82	0.80	**	1.12	1.16	1.10	1.07	1.16	1.04
20	1.05	1.10	**	1.41	1.47	1.39	1.33	1.43	1.32
30	1.18	1.28	**	1.58	1.65	1.58	1.49	1.58	1.49
40	1.27	1.41	**	1.69	1.76	1.67	1.59	1.68	1.58

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich .

\*\* : Ajuste deficiente.

Tabla 22: Caudales punta para Febrero.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)	
	Gu	Go	Gu	Go	Gu	Go
10	*	*	1.32	1.31	1.19	1.25
20	*	*	1.68	1.76	1.51	1.66
30	*	*	1.89	2.03	1.70	1.91
40	*	*	2.04	2.21	1.82	2.08

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

Tabla 23: Caudales punta para Junio.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	112.4	116.3	113.0	128.8	133.9	128.3	149.8	160.9	141.7
20	139.9	141.1	138.0	159.7	161.3	155.1	186.6	197.2	178.3
30	156.1	154.8	154.3	177.9	176.4	170.6	208.3	217.5	201.1
40	166.8	163.6	163.0	190.0	186.0	179.9	222.7	231.0	211.4

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\*\* : Ajuste deficiente.

Tabla 24: Caudales punta para Julio.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	146.8	148.2	116.7	161.6	165.0	163.1	148.3	152.0	144.4
20	180.2	173.4	142.1	196.5	192.1	200.5	181.5	180.5	172.4
30	199.9	187.1	157.8	217.1	206.8	222.0	201.1	196.1	190.0
40	213.0	195.6	165.3	230.7	216.0	235.5	214.1	206.0	198.4

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\*\* : Ajuste deficiente.

Tabla 25: Caudales punta para Agosto.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	98.42	101.0	101.8	95.90	98.28	99.18	89.72	92.79	85.92
20	121.6	125.2	126.4	117.59	120.3	121.8	110.0	113.2	106.5
30	135.3	138.9	142.0	130.38	132.7	135.8	121.9	124.8	119.5
40	144.4	147.9	148.8	138.87	140.8	142.1	129.8	132.3	125.3

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\*\* : Ajuste deficiente.

Tabla 26: Caudales punta para Diciembre.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)	
	Gu	Pe	Gu	Pe	Gu	Pe
10	*	*	2.9	3.27	2.99	3.37
20	*	*	3.65	4.1	3.75	4.23
30	*	*	4.10	4.67	4.20	4.78
40	*	*	4.39	4.93	4.50	5.05

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.



## **7. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **7.1. Obtención de la información y su registro**

La obtención de la información se realizó básicamente, haciendo las lecturas de los limnigramas. Durante este proceso se produjeron algunos problemas que obstruyeron en cierto modo el registro de datos.

Los problemas que se presentaron fueron de dos tipos; el primero se relaciona directamente con el limnígrafo, el cual presentó fallas en el registro de alturas de agua para algunos meses, además de problemas de embancamiento de la estación, lo que produjo la falta de registro para algunos meses. El segundo tipo de inconveniente, se refiere a la interpretación de la información limnigráfica, es decir, a los errores que pueden producirse en las lecturas del nivel o altura del agua, para lo cual dichas lecturas fueron hechas más de una vez.

### **7.2. Completación de la información**

La completación de la información base, para el análisis de esta memoria, es decir, los caudales punta mensuales y anuales, se realizó mediante los promedios históricos, método que no provoca inconvenientes en su aplicación, debido a que se trata de muy pocos datos en relación con el total (20 completaciones de un total de 480 datos).

### **7.3. Caudales punta o máximos**

#### **7.3.1. Caudales invernales**

El comportamiento de los caudales de máxima crecida a lo largo de las distintas décadas, y para los meses de invierno fue muy similar, registrándose los mayores caudales durante los meses de Junio, Julio y Agosto; mientras que, los valores menores se encontraron durante el mes de Abril.

Para la década del 60, el máximo caudal punta se obtuvo en Agosto con un valor de  $163,9 \text{ m}^3/\text{s}$  en el año 64/65, mientras que el mínimo caudal punta se registró en el mes de Abril del año 62/63 con un volumen de  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ . Durante la década del 70, el máximo caudal punta correspondió a  $192,5 \text{ m}^3/\text{s}$  registrado en el mes de Julio del año 74/74, en tanto que el mínimo caudal punta fue de  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de Abril del año 71/72. En la década del 80, el máximo caudal punta correspondió al año 83/84 en el mes de Julio con  $225,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . A su vez el mínimo caudal punta se obtuvo también durante el mes de Abril con un valor de  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  en el año 87/88. Finalmente, durante la década del 90, el caudal máximo se produjo en el mes de Junio del año 91/92 con  $265,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor que resultó ser el más alto para todo el periodo en estudio (1960-2000); en tanto, el mínimo caudal punta fue de  $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$  durante el mes de Abril del año 99/2000 (Ver tabla 27 y 28).

Es importante destacar que durante la década del 80, los meses de Junio y Julio presentaron caudales altos, en la mayoría de los años, y eso en comparación con el resto de las décadas, lo que confirma el hecho de que la década del 80, fue altamente lluviosa en comparación con las otras décadas en estudio.

### 7.3.2. Caudales estivales

Con respecto a los caudales estivales, éstos presentaron volúmenes menores, con respecto a los caudales punta de invierno, producto de la escasez de precipitaciones durante esta época del año. Sin embargo, también se presentan máximos caudales punta principalmente en el mes de Noviembre, producto de las últimas lluvias del año, mientras que como contraparte, los mínimos caudales punta se registran en su mayoría, durante el mes de Marzo.

Durante la década del 60, el máximo caudal punta se registró en Diciembre del año 66/67 con un volumen de  $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$  y, el mínimo caudal punta fue de  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ , durante el mes de Febrero en el año 61/62. En la década del 70 en cambio, su máximo caudal punta se obtuvo en Noviembre del año 72/73 con  $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$  y su mínimo caudal punta, fue de  $0,01 \text{ m}^3/\text{segundos}$  en Diciembre del año 62/63. En la década del 80, se registró un máximo caudal punta de  $69,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en Noviembre del año 86/87, el cual resultó ser el más alto para todo el periodo estival. A su vez, el mínimo caudal punta para esta década fue de  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de Marzo del año 83/84. Por último, en la década del 90, el máximo caudal punta se registró en Marzo del año 89/90 con un caudal de  $20,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , y su mínimo caudal punta alcanzó un volumen muy bajo, de  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$  en los meses de Enero y Marzo del año 95/96 (Ver Tablas 27 y 28).

Es importante destacar que, en relación con los mínimos caudales punta, éstos en su mayoría se presentaron durante los meses estivales, concentrándose en los meses de Febrero y Marzo, y en las décadas 60, 70 y 90, lo que reafirma lo dicho anteriormente, con respecto a que la década del 80 fue superior en cuanto a precipitaciones con respecto a las demás.

Tabla 27. Máximos caudales punta mensuales y anuales para las décadas en estudio (m<sup>3</sup>/s).

Década	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
60	0.7	2.8	3.2	3.2	18.1	146.4	138.4	163.9	61.5	11.5	2.6	5.8	25.54
70	1.8	1.8	1.2	3.0	31.7	66.8	192.5	41.8	29.6	18.3	7.9	4.1	36.28
80	1.9	1.5	20.2	16.6	155.4	160.5	225.4	117.8	158	56.8	69.2	3.1	53.28
90	0.9	0.8	20.2	27.4	192.5	265.1	103.6	72.06	76.7	66.4	2.4	4.3	54.58

Tabla 28. Mínimos caudales punta mensuales y anuales para las décadas en estudio (m<sup>3</sup>/s).

Década	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
60	0.03	0.01	0.02	0.001	0.4	1.2	2.8	3.5	0.7	1.1	0.5	0.03	0.98
70	0.02	0.08	0.04	0.01	0.1	0.6	7.8	4.7	1.8	1.3	0.2	0.01	9.91
80	0.10	0.1	0.01	0.01	1.3	5.8	15.2	9.1	4.0	2.1	0.5	0.5	7.10
90	0.001	0.1	0.001	0.21	0.9	5.8	0.7	1.3	4.9	1.9	0.2	0.2	4.70

### 7.3.3. Caudales punta como promedio anual

En un análisis más detallado de los caudales punta, se observa en la figura 10, los caudales punta promedio anual comparado con el promedio para todo el periodo en estudio.

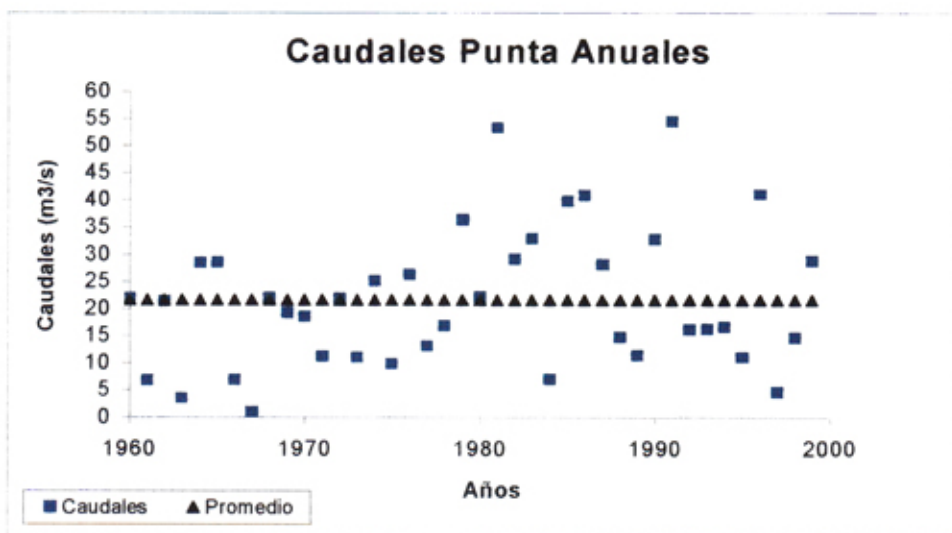


Figura 10. Caudales punta promedio anual v/s promedio del periodo.

La figura anterior muestra en primer lugar que, el promedio de los caudales punta anuales para la totalidad de los datos fue de 21,65 m<sup>3</sup>/s, y que la cantidad de datos por sobre el promedio y por debajo del promedio resultó ser relativamente similar, con 19 valores sobre el caudal punta promedio anual y 21 datos por debajo de esta cifra. Sin embargo, durante los primeros 20 años en estudio, la mayor cantidad de datos se encontró bajo el promedio anual, mientras que a partir de 1980 la mayoría de los caudales punta anuales se ubicaron sobre el valor promedio. Ésto refleja un incremento importante de los caudales punta anuales a lo largo del periodo estudiado, especialmente a partir de la década del 80, presentándose el máximo caudal punta anual en el año 91/92, con 54,5 m<sup>3</sup>/s. Es importante destacar que la década del 80 en especial, presentó niveles de precipitaciones muy elevados, en comparación con las demás décadas, hecho que influye de manera importante en los valores de caudales punta.

A su vez, los valores mínimos de caudales puntas promedio anual, se registraron durante la década del 60, siendo el año 67/68 el que registró el menor valor con 0,98 m<sup>3</sup>/s.

#### **7.3.4. Caudales punta promedio anual estivales**

Con el fin de poder observar el comportamiento de los caudales máximos, sin la influencia de las precipitaciones caídas en el periodo invernal, se determinó la tendencia de los caudales para los meses estivales, específicamente para los promedios de los caudales puntas promedio estivales a nivel anual. El resultado de estas tendencias se presenta en la figura 11. En ella se observa claramente que la tendencia de los datos es ascendente. Sin embargo, hay que destacar que el punto atípico registrado durante el año 86/87 y que fue de 15,02 m<sup>3</sup>/s, influyó en que la línea de tendencia se mantuviera en ascenso en la década del 90, a pesar de que durante este tiempo, los caudales disminuyeron con respecto a la década anterior, hecho que podría evidenciar un descenso en los caudales punta a través del tiempo, influenciado por la presencia de plantaciones forestales a partir de 1978.

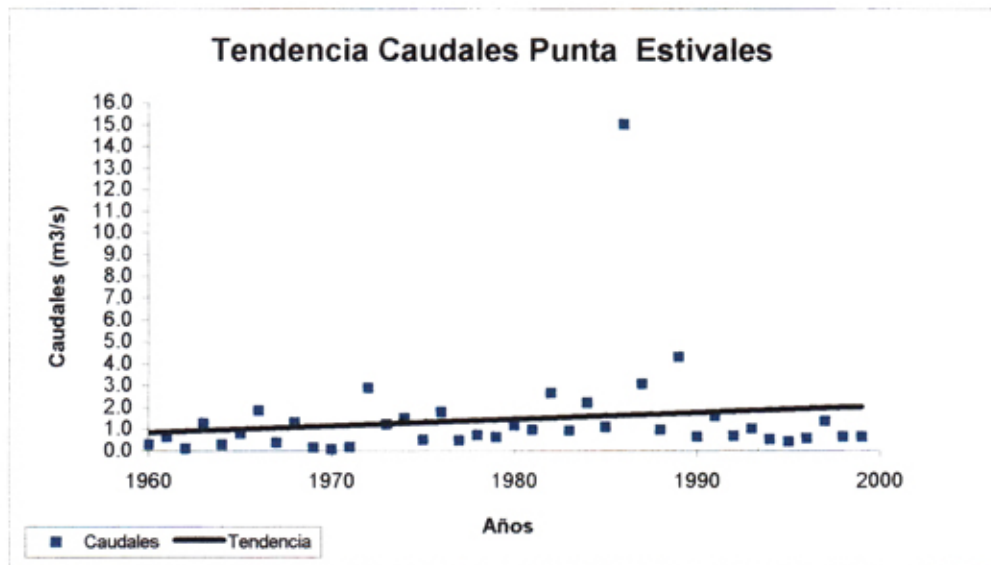


Figura 11. Tendencia de caudales punta promedio estivales.

#### 7.4. Análisis Estadístico de los caudales punta

##### 7.4.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney

La prueba U de Mann-Whitney, contempló el análisis interdecadal e intertemporal a nivel mensual, promedio anual, máximo anual y máximo estival. A partir de los resultados arrojados por la prueba U y cuyo resumen de resultados se observa en la tablas 29 y 30, pueden hacerse una serie de análisis, que a continuación se detallan.

#### **7.4.1.1. Variación interdecadal a nivel mensual**

Con respecto a las comparaciones que se realizaron entre las distintas décadas en estudio y para la totalidad de los meses (ver tabla 29), puede señalarse en primer término, que en la mayoría de los meses no existen diferencias significativas entre los datos.

Ahora bien, al analizar cada una de las comparaciones individualmente, se observa que en la comparación de las décadas 60-70 no existe variación de los datos para ningún mes del año, en tanto que para las comparaciones 60-90 y 70-90, se presentan diferencias significativas sólo en el mes de Abril. Por lo tanto, la mayor parte de las variaciones entre los caudales punta se registraron en las comparaciones restantes, es decir, 60-80, 70-80 y 80-90.

Siguiendo con el análisis mensual, para la comparación 70-80 se encontraron diferencias significativas en tres meses, a saber, Enero, Febrero y Mayo; en la comparación 80-90, también se observó variación para los datos en tres meses Enero, Febrero y Noviembre.

En cuanto a la comparación 60-80, destaca el hecho de que es la comparación donde se registró la mayor cantidad de meses con diferencias significativas, obteniéndose variaciones para Enero, Febrero, Mayo y Noviembre. Sin embargo, las diferencias producidas en las comparaciones de las décadas del 60, 70 y 90, con respecto a la década del 80, se deben principalmente a que esta década tuvo niveles de precipitación mucho mayores que el resto de las décadas en estudio, por lo que estas diferencias presentadas no tienen relación necesariamente con una disminución de los caudales punta.

Por último, es importante destacar que del total de comparaciones interdecadales hechas a nivel mensual, que correspondió a 72 comparaciones, 12 de ellas, es decir, sólo un 16% del total, presentó variaciones entre los datos, porcentaje bajo y que no revela con certeza

una variación, y menos una disminución importante de los caudales punta durante el periodo 1960-2000.

#### **7.4.1.2. Variación interdecadal a nivel anual**

A escala anual, la prueba U de Mann-Whitney se aplicó para los caudales punta promedio anual, para los máximos caudales punta anual y para los máximos caudales punta estivales.

En cuanto a los caudales punta promedio anuales, se observa que sólo existen diferencias para las comparaciones hechas entre las décadas 60-80 y 70-80, lo que reafirma lo señalado anteriormente con respecto a que las diferencias de la década del 80, en relación con las demás décadas es lo más relevante en el proceso de comparaciones, lo que sería producto de las mayores precipitaciones en los 80.

Con respecto a la prueba para los máximos caudales punta anual, no se observan diferencias significativas en ninguna de las comparaciones, lo cual indica que por lo menos los caudales máximos de cada año se han mantenido similares a lo largo del periodo 1960-2000. Lo mismo ocurre en el caso de los máximos caudales punta estivales, los que tampoco presentan diferencias significativas en sus valores al hacer las comparaciones inter-décadas.

El hecho de que para los caudales máximos estivales, no existan variaciones entre décadas constituye sin duda un dato importante, ya que como se ha señalado con anterioridad, los caudales estivales no se ven influenciados por las precipitaciones, sino más bien por las reservas subterráneas, y éstas a su vez por la mayor o menor presencia de vegetación; por lo tanto, cambios importantes de cobertura vegetal, deberían reflejar cambios de caudal estival, lo cual no se advierte en la cuenca del Purapel.



Tabla 29. Variación interdecadal para la prueba U de Mann-Whitney.

	Comparación de Décadas					
	60-70	60-80	60-90	70-80	70-90	80-90
<b>Enero</b>	No	Sí	No	Sí	No	Sí
<b>Febrero</b>	No	Sí	No	Sí	No	Sí
<b>Marzo</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Abril</b>	No	No	Sí	No	Sí	No
<b>Mayo</b>	No	Sí	No	Sí	No	No
<b>Junio</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Julio</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Agosto</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Septiembre</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Octubre</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Noviembre</b>	No	Sí	No	No	No	Sí
<b>Diciembre</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Máximo caudal punta anual</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Máximo caudal punta estival</b>	No	No	No	No	No	No
<b>Caudal punta promedio anual</b>	No	Sí	No	Sí	No	No

No: No existen diferencias entre décadas.

Si: Si existen diferencias entre décadas

#### 7.4.1.3. Variación intertemporal a nivel mensual

Por otra parte, también se realizó la prueba U de Mann-Whitney para comparar los periodos 1960/1978 v/s 1979/2000, ya que el año 1979 se asume como el año a partir del cual las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), poseen una mayor influencia en la zona, por lo que resulta de gran relevancia el poder observar cómo se comportan los datos antes y después de ese periodo.

A escala mensual, como se observa en la tabla 30, al comparar los dos periodos en estudio (60/78 – 79/2000), se presentaron diferencias significativas para los meses de Enero, Abril, Mayo, Septiembre y Diciembre. En 5 de los 12 meses analizados, hubo diferencias significativas, sin embargo, éstas diferencias, revelaron que el lapso 1979-2000 registró mayores caudales que el lapso 1960-1978, lo cual refleja que la mayor presencia de las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), no ha generado una disminución de los caudales punta y por el contrario, para los meses en que hubo diferencias, ésta fue producto de incrementos de los caudales y no de decrementos.

#### **7.4.1.4. Variación intertemporal a nivel anual**

Anualmente, al igual que para la comparación interdecadal, la prueba U de Mann-Whitney se aplicó para los caudales punta promedio anuales, para los máximos caudales punta anual y los máximos caudales punta estival.

Al realizar la comparación intertemporal, los resultados determinaron que no se presentaron diferencias significativas en ninguno de los tres casos en estudio, es decir, en primer lugar no existe variación de los datos para los promedios anuales; tampoco existen diferencias significativas para los caudales máximos anuales; y lo mismo ocurre para los máximos caudales estivales.

Estos resultados, contrastan con lo obtenido en los meses de Enero, Abril, Mayo, Septiembre y Diciembre; aunque la mayoría de los meses analizados, Febrero, Marzo, Junio, Julio, Agosto, Octubre y Noviembre, no presentaron diferencias, así como tampoco se obtuvo ninguna en el marco anual.

Lo anterior sería producto de variaciones mensuales específicas y particulares, dado que en la mayoría de los casos analizados no existen diferencias, y ellas serían más bien producto de las precipitaciones ocurridas en la década del 80.

Tabla 30. Variación intertemporal para la prueba U de Mann-Whitney.

	<b>Comparacion 1960/1978 – 1979/2000</b>
<b>Enero</b>	<b>Sí</b>
<b>Febrero</b>	<b>No</b>
<b>Marzo</b>	<b>No</b>
<b>Abril</b>	<b>Sí</b>
<b>Mayo</b>	<b>Sí</b>
<b>Junio</b>	<b>No</b>
<b>Julio</b>	<b>No</b>
<b>Agosto</b>	<b>No</b>
<b>Septiembre</b>	<b>Si</b>
<b>Octubre</b>	<b>No</b>
<b>Noviembre</b>	<b>No</b>
<b>Diciembre</b>	<b>Sí</b>
<b>Máximo caudal punta anual</b>	<b>No</b>
<b>Máximo caudal punta estival</b>	<b>No</b>
<b>Caudal punta promedio anual</b>	<b>No</b>

No: No existen diferencias entre décadas.

Si: Si existen diferencias entre décadas

## **7.4.2. Análisis por medio de Promedios Móviles**

### **7.4.2.1. Análisis para meses invernales**

En base a la figura 8, puede analizarse el comportamiento de los promedios móviles para los caudales punta durante los meses de invierno. Cabe recordar que, los caudales punta del periodo invernal, se encuentran influenciados por la gran cantidad de precipitaciones caídas durante estos meses, por lo tanto, es natural que al observar el gráfico los valores más altos se registren en el mes de Julio, mientras que los valores más bajos se registren durante Abril, mes en el cual aún no se registran precipitaciones importantes que permitan un aumento de los caudales punta.

En general, durante los meses invernales los promedios móviles presentan una gran irregularidad para todas las décadas, lo que hace difícil apreciar alguna tendencia que evidencie una variación de los caudales punta a través del tiempo. Esto puede verse sobre todo durante la década del 60, la que presenta meses como Mayo, Junio y Octubre con una tendencia ascendente, y otros como Abril, Julio y Agosto, con una disminución de los caudales punta.

Sin embargo, esta situación cambia de alguna manera a partir de la década del 70, en donde pese a la irregularidad de los datos, debido a años lluviosos y secos, los meses invernales en general, experimentan un incremento en sus valores especialmente hacia fines de la década del 70. Esta tendencia ascendente se incrementa durante la década del 80, registrándose para algunos años caudales punta con valores muy superiores en relación con el resto de las décadas. Finalmente, durante la década del 90, los valores de caudales punta vuelven a descender a niveles similares a los de la década del 60.

Para los meses de Abril, Mayo, Junio y Octubre, los promedios móviles presentan un primer periodo con niveles bajos de caudal; luego se advierte un fuerte aumento a partir del año 1980 hasta el año 1990, para finalmente volver a valores menores, pero no más bajos que los registrados durante la década del 60. Sin embargo, en el mes de Julio, el comportamiento de los promedios móviles es distinto, ya que hacia el final del periodo en estudio, éstos presentan un descenso importante con caudales muy bajos en comparación con el resto de los datos. Un caso especial resulta ser el mes de Septiembre, que hacia el final presenta un ascenso en sus valores, opuesto a la tendencia mostrada por los demás meses del año. Lo contrario ocurre con los caudales del mes de Agosto, que presenta sus máximos valores durante la década del 60 y no en la del 80, como el resto de los meses.

Luego del análisis desarrollado, puede concluirse que por lo menos para los meses invernales, no se observa un comportamiento que permita determinar con claridad si los caudales puntas presentan alguna variación en sus valores a través del periodo 1960-2000.

#### **7.4.2.2. Análisis para meses estivales**

En cuanto a los promedios móviles para los caudales estivales, se puede observar que en la década del 60 sus valores son bajos, especialmente para los meses de Enero, Febrero y Marzo. Sin embargo, se aprecia un leve aumento de éstos durante la década del 70, en especial para el mes de Noviembre. Pero, es en la década del 80 donde se presenta un alza importante de los caudales punta, sobre todo para los meses de Noviembre y Marzo. Pese a este aumento, al comenzar la década del 90, los promedios móviles vuelven a disminuir, aunque manteniéndose a niveles similares a los registrados durante la década del 60. Este hecho es relevante porque indicaría que los caudales punta no han variado, ni menos disminuido de manera significativa debido al cambio de uso del suelo en la cuenca del Purapel entre los años 1960 y 2000, sino que más bien han mantenido sus niveles a través del tiempo, no siendo influenciados por las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don).

## 7.5. Análisis de las Funciones de Distribución de Probabilidad

### 7.5.1. Análisis de pruebas de Bondad de Ajuste

Con respecto al ajuste de los datos de caudales máximos, en la Tabla 31 se presentan los resultados de las pruebas de bondad de ajuste a escala anual para las tres funciones aplicadas: Gumbel, Goodrich y Pearson III. En ella se observa que los datos se ajustan muy bien a las tres funciones, con valores de  $R^2$  de 0,99, y se acepta el ajuste para el test de Kolmogorov- Smirnov. Esto puede corroborarse al observar los resultados de la tabla 20 para los valores de  $X_i$  ( $m^3/s$ ), que resultaron tener diferencias mínimas entre los modelos, para los distintos periodos de retorno.

Tabla 31. Valores de K-S y  $R^2$ .

	<b>Gumbel</b>	<b>Goodrich</b>	<b>Pearson III</b>
<b>K-S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
<b><math>R^2</math></b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>

A: Se acepta el ajuste.

$R^2$ : Coeficiente de determinación.

Sin embargo, si se analizan los ajustes a nivel mensual, los resultados no son los mismos, ya que las funciones no lograron ajustar a todos los meses. La función de Gumbel fue la que logró ajustar a la mayor cantidad de meses: Enero, Febrero, Junio, Julio, Agosto, y Diciembre; en tanto, la función de Goodrich sólo ajustó a los meses de Enero, Febrero, Junio, Julio y Agosto. Por último, la función de Pearson III logró un buen ajuste para los meses de Enero, Junio, Julio, Agosto y Diciembre y, los meses para los cuales se rechazó el ajuste, fueron aquellos en donde el test K-S fue rechazado y, donde además el valor de  $R^2$  fue menor a 0,9. Debido a la importancia de establecer cuál de las funciones resulta más adecuada para los datos en estudio, se elaboró la Tabla 32, en la cual se determinó la cantidad de meses con ajustes rechazados y aceptados para cada función.

Tabla 32. Número de meses con ajuste aceptados y rechazados para cada función.

<b>Función</b>	<b>Aceptados</b>	<b>Rechazados</b>
<b>Gumbel</b>	<b>6</b>	<b>6</b>
<b>Goodrich</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>Pearson III</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

Al ver estos valores, se puede concluir que la función de Gumbel es la que mejor ajusta a los datos analizados en forma mensual, ya que ajusta a una mayor cantidad de meses, 6 de 12 meses, mientras que las funciones de Goodrich y Pearson III sólo ajustaron a 5 meses.

Es importante poder analizar por qué durante los meses de Marzo, Abril, Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre, ninguna función ajustó de manera óptima a los datos. La explicación, desde el punto de vista estadístico, puede estar referida a que los datos durante estos meses poseen una alta variabilidad.

En consecuencia, puede establecerse que las Funciones de Distribución de Probabilidad propuestas en esta memoria, no ajustan bien a nivel mensual para la totalidad de los meses, sin embargo, a escala anual si ajustan muy bien.

### **7.5.2. Análisis de los caudales punta para distintos lapsos**

Para analizar de mejor manera los caudales punta a nivel anual y mensual, obtenidos para los lapsos 60-80, 60-90 y 60-2000, a partir de las funciones de Gumbel, Goodrich y Pearson III, se calcularon los caudales para diferentes periodos de retorno, en base al periodo 60-80; en seguida, se agregaron los datos de la década del 80, extendiendo la serie entre 1960 y 1990; y posteriormente los de la década del 90, con una serie total entre 1960 y 2000. Con estos datos, fue posible establecer los diferenciales de caudal para los periodos

60-90 y 60-2000, tomando como base el lapso 60-80. Cuando el ajuste durante el periodo 60-80 fue deficiente, no pudiendo calcularse los caudales para ese periodo, el diferencial se determinó en base al periodo 60-90. Este diferencial permitió observar en qué proporción variaron los caudales de los lapsos 60-90 y 60-2000, con respecto al periodo 60-80, para así poder determinar si éstos aumentaron o disminuyeron a medida que se incorporaron las demás décadas.

### 7.5.2.1. Análisis de caudales máximos a nivel anual

Analizando los diferenciales de caudal promedio anual, para las tres funciones estudiadas (Gumbel, Goodrich y Pearson III) durante los distintos lapsos y, que se encuentran en la tabla 33, se observa que éstos aumentan sus valores con respecto al lapso 60-80, al incorporar las décadas del 80 y, posteriormente la década del 90, lo que evidencia un aumento en los caudales punta a través del tiempo. Para las funciones de Gumbel y Goodrich los caudales punta durante el lapso 60-90, se incrementaron entre un 24% y un 33%, mientras que durante el lapso 60-2000, lo hicieron entre un 29% y un 42%. Un caso especial es el de la función de Pearson III, ya que para el periodo base (60-80) el ajuste fue deficiente, por lo que se debió considerar como base el lapso 60-90, presentándose un aumento para el lapso 60-2000 de entre un 2% y un 4%.

Tabla 33. Diferencial de caudal máximo anual para Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	1	1	*	1.24	1.27	1	1.29	1.33	1.02
20	1	1	*	1.25	1.30	1	1.31	1.39	1.03
30	1	1	*	1.25	1.33	1	1.31	1.42	1.04
40	1	1	*	1.26	1.34	1	1.32	1.44	1.04

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.



En general, se advierte que, con la incorporación de la década del 80, la probabilidad de encontrar caudales más altos, aumenta notoriamente; con la década del 90, también se presentan incrementos, pero son menores.

### **7.5.2.2. Análisis de caudales máximos a nivel mensual**

A partir del resultado de los diferenciales a nivel mensual para las funciones de Gumbel, Goodrich y Pearson III en los lapsos 60-80, 60-90 y 60-2000 (Ver tablas 34 a la 39), puede observarse que el comportamiento de los caudales punta mensual resulta dispar para los distintos meses analizados, Enero, Febrero, Junio, Julio, Agosto y Diciembre, ya que los restantes no presentaron buena calidad de ajuste a las F.D.P. (Funciones de Distribución de Probabilidad). Así, en los meses de Enero y Julio durante el lapso 60-90, se produce un aumento de los porcentajes con respecto al lapso base 60-80; sin embargo, durante el lapso siguiente 60-2000, bajaron sus valores levemente en relación con el lapso 60-90. En cambio, para el mes de Julio se produjo un aumento sostenido a medida que se agregaron las décadas del 80 y 90, respectivamente, con un comportamiento similar a lo observado en los caudales punta promedio anual. En Agosto, mes en el cual se produjo una disminución de los porcentajes para los lapsos 60-90 y de manera más importante durante el lapso 60-2000, siendo el único mes que denota una baja con la incorporación de las décadas del 80 y 90. Para los meses de Febrero y Diciembre en los cuales el lapso 60-80 presentó un ajuste deficiente y se tomó como base el lapso 60-90, los resultados también fueron diferentes, ya que mientras en Febrero se presentó un descenso de los porcentajes para el lapso 60-2000, en el mes de Diciembre los porcentajes del lapso 60-2000 aumentaron levemente.

Todo lo anterior, corrobora el hecho de la extrema variabilidad que presentan las variables hidrológicas, a medida que los lapsos disminuyen. De esta forma, se advierten meses en los cuales no hubo ajustes de buena calidad a las F.D.P., y otros en los que

existiendo ajustes satisfactorios, denotan comportamientos disímiles a medida que se incorporan nuevos datos.

Tabla 34. Diferencial de caudal máximo de Enero para Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	1	1	*	1.37	1.45	1	1.30	1.45	0.95
20	1	1	*	1.34	1.34	1	1.27	1.3	0.95
30	1	1	*	1.34	1.29	1	1.26	1.23	0.94
40	1	1	*	1.33	1.25	1	1.25	1.19	0.95

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

Tabla 35. Diferencial de caudal máximo de Febrero para Gumbel y Goodrich.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)	
	Gu	Go	Gu	Go	Gu	Go
10	*	*	1	1	0.90	0.95
20	*	*	1	1	0.89	0.94
30	*	*	1	1	0.90	0.94
40	*	*	1	1	0.89	0.94

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente

Tabla 36. Diferencial de caudal máximo de Junio para Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 1960-1980 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-1990 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	1	1	1	1.15	1.15	1.14	1.33	1.20	1.25
20	1	1	1	1.14	1.14	1.12	1.33	1.22	1.29
30	1	1	1	1.14	1.14	1.10	1.33	1.23	1.30
40	1	1	1	1.14	1.14	1.10	1.33	1.24	1.30

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

Tabla 37. Diferencial de caudal máximo de Julio para Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 1960-1980 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-1990 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	1	1	1	1.1	1.11	1.40	1.01	1.03	1.24
20	1	1	1	1.09	1.11	1.40	1.01	1.04	1.21
30	1	1	1	1.09	1.11	1.40	1.01	1.05	1.20
40	1	1	1	1.08	1.10	1.40	1.01	1.05	1.20

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

Tabla 38. Diferencial de caudal máximo de Agosto para Gumbel, Goodrich y Pearson III.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 1960-1980 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-1990 (m <sup>3</sup> /s)			Lapso 1960-2000 (m <sup>3</sup> /s)		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
10	1	1	1	0.97	0.97	0.97	0.91	0.92	0.84
20	1	1	1	0.97	0.96	0.96	0.90	0.90	0.87
30	1	1	1	0.96	0.96	0.96	0.90	0.90	0.84
40	1	1	1	0.96	0.95	0.95	0.90	0.89	0.84

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

Tabla 39. Diferencial de caudal máximo de Diciembre para Gumbel y Goodrich.

Periodo de Retorno T (Años)	Lapso 60-80 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-90 (m <sup>3</sup> /s)		Lapso 60-2000 (m <sup>3</sup> /s)	
	Gu	Go	Gu	Go	Gu	Go
10	*	*	1	1	1.03	1.03
20	*	*	1	1	1.03	1.03
30	*	*	1	1	1.02	1.02
40	*	*	1	1	1.03	1.02

Gu: Función de Gumbel.

Pe: Función de Pearson III.

Go: Función de Goodrich.

\* : Ajuste deficiente.

## 7.6. Variación de uso del suelo en la cuenca del río Purapel

La cuenca del río Purapel es una zona que se ha visto sometida a variaciones en su composición vegetacional durante las últimas décadas, debido a cambios en el uso del suelo desde bosques nativos, matorrales y terrenos agrícolas, a vastas áreas de plantaciones forestales. En general, se puede señalar que la principal variación vegetacional de la cuenca, obedece al cambio de un bosque nativo degradado, pero con una gran variedad de especies, hacia bosques artificiales de *Pinus radiata* (D. Don). Asimismo, es importante también el hecho de que el año 1978, marca un punto de quiebre en la tendencia ya que, a partir de ese momento, se produce un aumento explosivo de las plantaciones presentes en la cuenca (Pizarro *et al*, 2003).

En función de lo anterior, estos cambios vegetacionales deberían producir en teoría una disminución en los valores de caudales punta. Sin embargo, los resultados entregados por las pruebas estadísticas y gráficas, aplicadas a los caudales punta obtenidos, no muestran un descenso de éstos, sino más bien la mantención de los valores en el tiempo, e incluso un aumento en algunas ocasiones de estos valores, contrario a lo determinado por Singh (1982), quien señaló que, tras realizar labores de reforestación en la cuenca del valle de Tennessee, los caudales punta se redujeron a medida que las plantaciones crecieron.

La mantención y más bien el aumento de los caudales punta, se debería principalmente a las precipitaciones caídas y no al cambio de cobertura vegetal en la cuenca, debido a que, como se ha dicho con anterioridad, durante la década del 80 se incrementaron de manera importante la cantidad e intensidad de lluvia caída a nivel mensual y anual, lo cual provocó un aumento en los caudales punta durante el último periodo en estudio.

Dentro del mismo contexto, y a pesar de que las plantaciones forestales durante sus primeros años presentan un gran consumo de agua, lo que provoca un aumento en la infiltración y, en consecuencia, una menor escorrentía y menores valores de caudales punta,

éstos una vez convertidos en bosques adultos, disminuyen las temperaturas dentro del bosque y aumentan la humedad, produciéndose menores cantidades de evaporación y mayores escorrentías y caudales punta, como lo señala López (1998). Sin embargo, lo más importante surge al plantear que la comparación de los caudales punta, se realiza entre dos tipos de bosque, nativo y *Pinus radiata* (D.Don), y lo que se desprende de los resultados es que presentan similares comportamientos hidrológicos con respecto a esta variable, como lo señalan las pruebas U de Mann-Whitney y los promedios móviles. Asimismo, los incrementos observados en el periodo 1979-2000, obedecerían a una mayor cantidad de lluvias y a las mayores intensidades ocurridas en este lapso, más que a cambios en la cobertura vegetal.

Por lo tanto, en un principio, los valores de caudales punta no estarían en función de las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), sino que se encontrarían relacionados con las precipitaciones y las intensidades caídas.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

De acuerdo a la investigación realizada, se puede concluir lo siguiente:

- A nivel mensual, el caudal punta más alto se registró en el mes de Junio del año 91/92 con 265,1 m<sup>3</sup>/s, en tanto que el caudal punta más bajo fue de 0,001 m<sup>3</sup>/s y se registró en Enero y Marzo del año 95/96 y en Abril del año 62/63.
- Los máximos caudales punta promedio de los meses de cada año para las décadas 60, 70, 80 y 90 se produjeron en los años 65/66, 79/80, 81/82 y 91/92, respectivamente. A su vez, los mínimos caudales punta promedio se presentaron durante los años 67/68, 75/76, 84/85 y 97/98, para las décadas 60, 70, 80 y 90, respectivamente.
- Según la prueba U de Mann- Whitney y los promedios móviles, a nivel mensual y anual existen diferencias significativas entre décadas, principalmente entre la década del 80 y las restantes. Estas diferencias se deben más a la alta variabilidad entre los meses, que a cambios en el régimen hídrico, y que tienen relación con la década del 80, la cual denotó un mayor valor de precipitación e intensidad.
- 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 y los promedios móviles, no existen diferencias significativas entre ambos periodos a nivel anual y sólo se advierten diferencias para algunos meses.

- Si bien no se puede determinar con certeza, que las plantaciones forestales de *Pinus radiata* (D.Don) inciden en un aumento de los caudales punta; tampoco es posible aseverar que el cambio en el uso del suelo de bosque nativo por plantaciones forestales produce una disminución en los niveles de caudales punta a través del periodo 1960-2000.
- El ajuste de los datos a las distribuciones de Gumbel, Goodrich y Pearson III tanto a nivel anual como mensual, y la obtención de caudales punta por medio de ellas para distintos periodos de retorno y para distintos lapsos de tiempo, confirmó la extrema variabilidad que presentaron las variables hidrológicas a medida que se incorporó una mayor cantidad de datos al estudio.
- Por otra parte, el ajuste de las distribuciones Gumbel, Goodrich y Pearson III, demostró que al incorporar las series de datos de la década del 80 en primer lugar, y del 90 en segundo lugar, la probabilidad de encontrar valores más altos de caudales punta aumenta, lo que señala que la presencia de los bosques de *Pinus radiata* (D.Don) no estaría condicionando una disminución de los caudales punta en el año o en los meses estivales.
- Lo anterior, es decir el aumento de los caudales punta, no podría atribuirse a la presencia de bosques de *Pinus radiata* (D.Don), sino que más bien ello, es función de las mayores precipitaciones e intensidades acaecidas en la década del 80 y las mayores intensidades de la década del 90.
- Finalmente, se puede concluir que para los caudales punta mensuales y anuales, no se puede atribuir que los bosques de *Pinus radiata* (D.Don) instaurados en la cuenca del río Purapel, hayan generado una disminución de los caudales y más bien, los resultados tienden a concluir que no existen diferencias significativas en el comportamiento hidrológico del bosque nativo maulino y las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don).

## 8.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que pueden hacerse para el presente estudio y para futuras investigaciones al respecto son:

- Se sugiere intentar ajustar la serie de datos de caudales punta a una mayor gama de funciones de distribución de probabilidad, para así determinar alguna función que ajuste mejor los datos a nivel mensual. Asimismo, para futuras investigaciones en este campo, se sugiere también, ampliar la serie de datos para así poder tener una mayor base de datos que permita determinar en forma más clara el comportamiento de las variables hidrológicas.
- Se recomienda mantener el estudio en el tiempo, para tener más certeza con respecto al comportamiento de las diferentes variables hidrológicas, y entre ellas, los caudales máximos.
- Sería recomendable, el poder incluir más variables en este tipo de estudio, como la evaporación, la capacidad de infiltración, la intercepción, etc., para poder tener un conocimiento más acabado del comportamiento de los caudales y de las variables hidrológicas en general.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- **APARICIO, F.** 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- **AYER, G.** 1968. Reforestation with conifers; its effects on streamflow in Central New York. Water Resources Bulletin, Vol 4, N° 2, p.13. Estados Unidos.
- **CALDER, I.** 1992. Hydrologic effects of land-use change. En: Handbook of Hydrology, Editor D. Maidment. Mc Graw- Hill, Estados Unidos. p.i.
- **CHOW, V; MAIDMENT, D y MAYS, D.** 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw- Hill. Santa Fé, Colombia. 584 p.
- **CONAF – CONAMA.** 1997. Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Santiago de Chile. 126 p.
- **DONOSO, C.** 1981. Ecología Forestal: El bosque y su medioambiente. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 369 p.
- **GAYOSO, J.; IROUMÉ, A.** 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. Revista Bosque 16 (2): 3-12.
- **HIBBERT, A.** 1966. Forest treatment effects on water yield. En: Proceedings of a National Science Foundation advanced science seminar, International symposium on forest hydrology. Pergamon Press, Estados Unidos. p 527-543.

- **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.; 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.
  
- **HUBER, A.; TRECAMAN, R.** 2000. Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. Revista Bosque 21(1): 37- 44.
  
- **IROUMÉ, A.; HUBER, A.** 2000. Intercepción de las lluvias por cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. Revista Bosque 21(1); 45-56.
  
- **JORDÁN, C.** 2002. Análisis de los coeficientes de Escorrentía para la cuenca del río Purapel, Estación Nirivilo, período 1970-1990. Memoria de Título. Universidad de Talca . Talca, Chile. 112 p.
  
- **LAVABRE, I. ; SEMPERE-TORRES, D. y CERNESSON, F.** 1991. Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant mediterraneen apres la destruction de l' ecosysteme forestier par un incendie. Journal de Hydrologie Continentale, Vol. 6, N°2, p. 121-132. Francia.
  
- **LINSLEY, R; KHOLER, M. y PAULUS, J.** 1988. Hidrología para Ingenieros. Editorial Mc Graw- Hill Interamericana. México. 385 p.
  
- **LLAMAS, J.** 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial Universidad del País Vasco. España. 635p.

- **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.
- **MASON y LIND.** 1995. Estadística para administración y Economía. Editorial Alfaomega. México.D.F. 520 p.
- **MENDELHALL, W.; REINMUTH, J.** 1981. Estadística para administración y economía. Grupo Editorial Iberoamericana. Tercera Edición. México D.F.México. 707 p.
- **MEUNIER, M.** 1996. La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. Revista Unasyva 47 (185): 29-37.
- **M.O.P y D.G.A.** 1986. Estudio del mapa hidrogeológico nacional. IPLA, Ingenieros consultores. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.164 p.
- **OYARZÚN, C.; HUBER, A. y VÁSQUEZ, S.** 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de Pinus radiata I: Redistribución de las precipitaciones, Valdivia, Chile. Revista Bosque 6 (1): 3-14.
- **OYARZÚN, C.; HUBER, A y VÁSQUEZ, S.** 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de Pinus radiata II: Humedad del suelo y evapotranspiración, Valdivia, Chile. Revista Bosque 6 (2): 74-82.
- **PIZARRO, R.** 1996. Análisis comparativo de modelos matemáticos precipitación-escorrentía en cuencas de la España peninsular. Tesis Doctoral. Departamento de

Ingeniería Forestal. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 320 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.; GONZALEZ, 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 América Latina y El Caribe. UNESCO-ORCYT. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile. 125 p.
- **PIZARRO, R; FARIÁS, C y JORDÁN, C.** 2001. Manejo forestal orientado a la producción de recursos hídricos. XVIII Jornadas Forestales. Colegio de Ingenieros de Chile. Temuco, Chile. 11 p.
- **PIZARRO, R; FARIÁS, 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 regimen 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 períodos extremos, Tesis de grado. Universidad de Talca. Talca, Chile. 78 p.
- **SINGH, V.** (Editor). 1982. Applied modeling in catchment hydrology. Water Resources Publication. Colorado, Estados Unidos. 563 p.

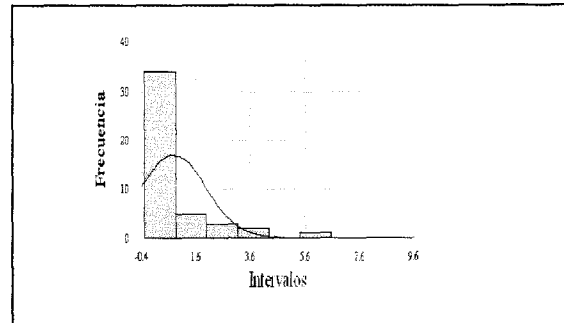
- **ZWOLINSKI, J.B.; DONALD, D.G.M.; van LAAR A., and van der Merwe L.** 1995. Water retention in cultivated forest soils of the Southern Cape. South African Forestry Journal. 174: 1-8.

# APÉNDICES

## APÉNDICE 1. Prueba de Normalidad para caudales punta por década

### • Caudales Punta Década del 60

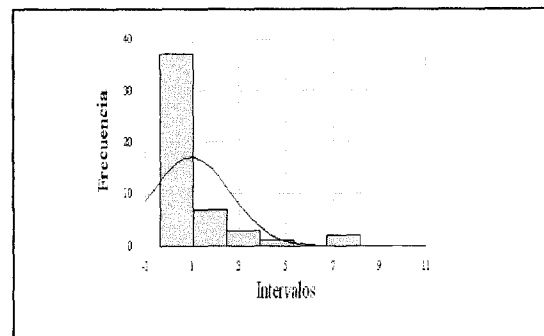
Estadístico K-S DPLUS = 0.266249  
Estadístico K-S DMINUS = 0.262891  
Estadístico K-S DN = 0.266249  
**Valor p = 0.00339035**



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma de la 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.

### • Caudales Punta Década del 70

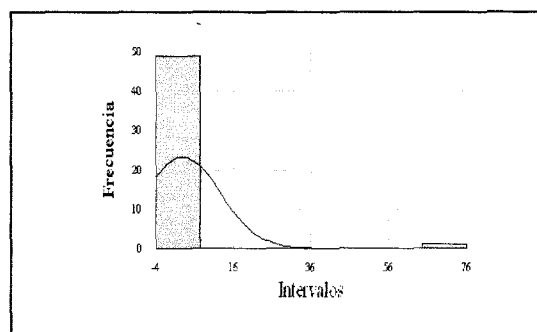
Estadístico K-S Dplus = 0.301329  
Estadístico K-S Dminus = 0.287559  
Estadístico K-S DN = 0.301329  
**Valor p = 0.00022786**



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma de la 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.

- **Caudales Punta Década del 80**

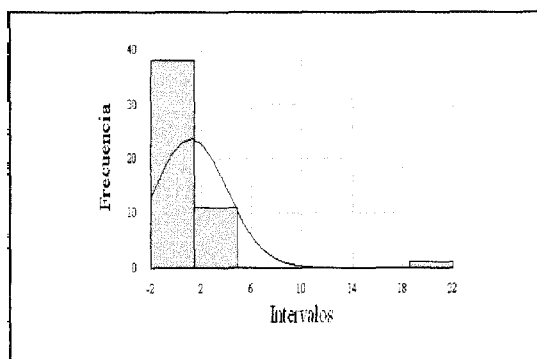
Estadístico K-S DPLUS = 0.381111  
Estadístico K-S DMINUS = 0.384685  
Estadístico K-S DN = 0.384685  
**Valor p = 7.48568E-7**



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma de la 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.

- **Caudales Punta Década del 90**

Estadístico K-S DPLUS = 0.320491  
Estadístico K-S DMINUS = 0.343178  
Estadístico K-S DN = 0.343178  
**Valor p = 0.0000153569**



Como el valor p obtenido es menor a 0,05 y la forma de la 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.



## APÉNDICE 2. Promedios Móviles

Tabla 40. Promedios móviles a nivel mensual ( $m^3/s$ ).

Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Anual
1.01	0.33	0.09	0.03	0.25	0.14	1.13	24.54	42.63	78.30	44.62	7.61	16.72
1.82	1.08	0.21	0.09	0.11	0.27	1.16	11.91	22.22	56.81	26.05	5.42	10.59
1.39	0.99	0.17	0.10	0.08	1.23	3.88	11.38	66.66	95.33	27.29	5.03	17.79
1.91	1.43	0.25	0.24	0.08	2.47	8.78	54.80	75.89	81.77	8.62	5.74	20.16
1.73	2.57	0.36	0.18	0.04	2.45	14.60	58.51	76.23	81.38	10.75	6.58	21.28
2.01	2.45	0.34	0.18	0.05	1.45	11.76	53.63	31.05	27.90	9.26	5.52	12.13
1.52	2.02	0.27	0.98	1.10	0.73	9.47	52.55	12.29	17.99	18.39	2.39	9.98
0.78	0.11	0.08	1.01	1.09	0.62	6.05	58.15	58.11	26.66	14.95	1.51	14.09
0.37	0.02	0.07	1.02	1.09	1.54	5.95	96.05	64.92	49.71	16.29	2.13	19.93
0.32	0.06	0.11	0.13	0.05	1.02	12.91	56.76	67.42	43.62	6.50	6.72	16.30
2.81	0.69	0.66	0.68	0.39	1.33	20.85	69.00	39.14	46.17	15.74	8.81	17.19
3.91	1.20	0.81	0.80	0.40	0.59	28.71	39.57	39.64	26.47	24.01	10.79	14.74
4.77	2.50	0.81	0.80	0.44	0.85	23.81	50.08	95.66	25.69	20.98	6.18	19.38
2.33	1.92	0.26	0.35	0.50	0.59	15.09	46.38	75.00	14.79	17.72	9.73	15.39
3.57	1.46	0.15	0.24	0.88	1.32	17.78	59.79	106.03	37.27	8.68	7.81	20.41
2.66	0.15	0.32	0.41	1.05	1.30	12.48	41.96	86.42	31.58	11.19	7.56	16.42
3.53	0.12	0.34	0.30	0.66	1.33	11.09	23.57	131.80	39.00	9.82	3.41	18.75
1.60	0.33	0.38	0.33	0.38	5.84	49.86	45.58	124.60	19.33	12.18	4.74	22.10
2.23	0.67	0.50	0.36	0.40	6.33	81.87	58.15	108.06	24.76	12.86	5.24	25.12
1.54	0.80	0.51	0.82	0.87	6.25	113.26	101.99	115.01	34.62	60.29	11.04	37.25
3.01	1.58	1.04	1.23	1.03	1.17	65.75	104.08	130.91	36.04	62.60	9.97	34.87
2.95	1.56	1.01	1.19	0.78	0.48	41.66	95.67	178.02	51.93	70.48	15.27	38.42
4.98	2.11	1.31	0.76	0.39	0.76	13.79	55.44	133.15	34.72	20.00	8.68	23.01
3.69	1.48	0.89	0.52	0.39	4.49	63.77	62.55	90.22	65.26	15.97	9.26	26.54
26.13	1.75	0.69	0.42	1.49	5.00	66.36	110.23	39.12	54.88	22.54	21.96	29.21
25.46	1.67	0.76	0.59	3.46	5.28	77.86	119.80	74.40	78.36	25.26	21.81	36.22
25.63	1.73	0.72	0.42	3.24	1.27	26.47	76.89	99.04	53.79	25.14	20.63	27.91
2.73	1.28	0.62	0.34	8.88	1.25	18.62	25.90	98.27	44.33	9.68	5.25	18.09
1.60	0.75	0.52	0.14	6.83	0.88	49.52	35.79	87.49	25.05	17.43	9.76	19.64
1.28	1.72	0.43	0.14	7.28	1.18	113.26	113.57	69.19	34.36	41.69	10.75	32.90
1.73	1.87	0.42	0.18	0.61	2.63	116.00	134.13	55.63	44.26	48.08	8.29	34.49
1.39	2.96	0.21	0.16	0.70	5.56	80.48	120.56	53.16	39.44	39.74	3.43	28.98
1.02	2.02	0.20	0.16	0.26	7.82	19.03	44.56	72.31	28.64	16.88	3.37	16.36
0.87	1.80	0.18	0.23	0.18	5.98	13.88	27.23	74.56	39.35	8.67	3.21	14.68
1.24	0.77	0.18	0.24	0.09	12.01	24.25	81.71	49.97	57.18	22.61	24.70	22.91
1.89	0.92	0.38	0.44	0.29	11.70	24.71	71.61	19.65	44.39	27.71	23.06	18.90
1.49	0.87	0.54	0.49	0.91	13.08	25.03	69.60	9.11	28.59	68.57	22.93	20.10
1.28	0.78	0.74	0.61	1.00	4.01	4.12	61.50	5.40	9.67	101.03	2.50	16.05
0.48	0.15	0.46	0.33	0.72	1.59	0.93	59.24	5.17	9.24	93.20	2.50	14.50

### APÉNDICE 3. Pruebas de bondad de ajuste mensuales.

Tabla 41. Pruebas de bondad de ajuste de Enero, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
K - S	A	A	R	A	A	A	A	A	A
R <sup>2</sup>	0.9	0.91	0.54	0.92	0.95	0.94	0.95	0.97	0.97

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 42. Pruebas de bondad de ajuste de Febrero, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
K - S	R	R	R	A	A	R	A	A	R
R <sup>2</sup>	0.72	0.76	0.10	0.9	0.93	0.15	0.9	0.94	0.66

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 43. Pruebas de bondad de ajuste de Marzo, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
K - S	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R <sup>2</sup>	0	0.52	0.46	0.55	0.52	0.5	0.57	0.52	0.44

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 44. Pruebas de bondad de ajuste de Abril, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
K - S	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R <sup>2</sup>	0.7	0.83	0.65	0.73	0.83	0.7	0.76	0.83	0.7

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 45. Pruebas de bondad de ajuste de Mayo, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.78	0.81	0.62	0.83	0.81	0.7	0.76	0.81	0.74

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 46. Pruebas de bondad de ajuste de Junio, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.94	0.97	0.94	0.92	0.92	0.91	0.93	0.92	0.94

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 47. Pruebas de bondad de ajuste de Julio, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9	0.99	0.93	0.94	0.98	0.94	0.94	0.95	0.96

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 48. Pruebas de bondad de ajuste de Agosto, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.97	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97	0.98	0.96	0.98

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 49. Pruebas de bondad de ajuste de Septiembre, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.83	0.86	0.7	0.84	0.86	0.80	0.87	0.83	0.87

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 50. Pruebas de bondad de ajuste de Octubre, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.87	0.81	0.75	0.85	0.81	0.8	0.76	0.81	0.86

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 51. Pruebas de bondad de ajuste de Noviembre, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.40	0.25	0	0.49	0.26	0	0.45	0.26	0

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

Tabla 52. Pruebas de bondad de ajuste de Diciembre, para Gumbel Goodrich y Pearson III.

Prueba de bondad de ajuste	Lapso 60-80			Lapso 60-90			Lapso 60-2000		
	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe	Gu	Go	Pe
<b>K - S</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>A</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.84	0.8	0.77	0.96	0.80	0.97	0.95	0.8	0.91

Gu: Función de Gumbel. Pe: Función de Pearson III. R: Se rechaza el ajuste.  
Go: Función de Goodrich. A : Se acepta el ajuste.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1. Curvas de Descarga para el Periodo 1960-2000.

Se presentan tanto la curva fundamental, como las curvas para los distintos períodos de tiempo.

- Curva Fundamental

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

Tabla 53. Curvas de Descarga para los periodos en estudio

Período de validez de la curva	MODELO (CURVA)	Coef. De Det. (R <sup>2</sup> )
1960	$Q = -1,3978 * H^3 + 21,323 * H^2 - 35,75 * H + 15,773$	99,96
1961 – 1962	$Q = -1,3978 * H^3 + 21,323 * H^2 - 35,75 * H + 15,773$	99,96
1963 – 1964	$Q = -1,7611 * H^3 + 23,94 * H^2 - 41,415 * H + 19,206$	99,94
1965 – 1966	$Q = -1,5235 * H^3 + 21,945 * H^2 - 36,26 * H + 15,335$	99,91
1967 – 1968	$Q = -1,7895 * H^3 + 23,622 * H^2 - 39,102 * H + 16,161$	99,83
1969 – 1970	$Q = -2,45 * H^3 + 29,538 * H^2 - 55,005 * H + 28,05$	99,72
1971 – 1972	$Q = -3,0014 * H^3 + 33,188 * H^2 - 62,183 * H + 32,165$	99,81
1973 – 1974	$Q = -1,13 * H^3 + 19,293 * H^2 - 30,875 * H + 12,056$	99,93
1975 – 1976	$Q = -3,2815 * H^3 + 34,717 * H^2 - 64,014 * H + 31,869$	99,68
1977 – 1978	$Q = -2,2317 * H^3 + 27,647 * H^2 - 50,192 * H + 24,9$	99,65
1979 – 1980	$Q = -0,9153 * H^3 + 17,346 * H^2 - 26,3 * H + 10,455$	98,89
1981 – 1982	$Q = -1,2287 * H^3 + 19,875 * H^2 - 31,691 * H + 12,042$	99,91
1983 – 1984	$Q = -1,2287 * H^3 + 19,875 * H^2 - 31,691 * H + 12,042$	99,91
1985 – 1986	$Q = -1,2287 * H^3 + 19,875 * H^2 - 31,691 * H + 12,042$	99,91
1987 – 1988	$Q = -1,8407 * H^3 + 24,231 * H^2 - 41,111 * H + 17,939$	99,81
1989 – 1990	$Q = -0,305 * H^3 + 12,907 * H^2 - 15,357 * H + 0,4276$	99,98
1991 – 1992	$Q = 10,904 * H^2 - 12,22 * H - 0,5117$	99,60
1993 – 1994	$Q = 11,161 * H^2 - 12,941 * H + 0,0508$	99,94
1995 – 1996	$Q = -1,1182 * H^3 + 18,849 * H^2 - 28,823 * H + 9,9204$	99,94
1997 – 1998	$Q = 11,047 * H^2 - 12,298 * H - 0,457$	99,93
1999 – 2000	$Q = -1,6118 * H^3 + 23,018 * H^2 - 39,698 * H + 18,119$	99,85

Fuente: Pizarro, R; Farías, C y Jordán, C (2003).

## 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 ( $n_A + n_B$ ) observaciones de acuerdo a su magnitud, de menor a mayor.
- Se le asigna un valor ordinal a cada uno 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:

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

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  $\alpha$ , 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 ( $n_A + n_B$ ) observaciones de acuerdo a su magnitud, de menor a mayor.
- Se le asigna un valor ordinal a cada uno 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  $\alpha$ , 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 4. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.

### 1. Funciones de Distribución de Probabilidad

#### 1.1. Definición de la Función de Gumbel

Una variable aleatoria E, sigue una distribución de probabilidad de Gumbel, si:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad \text{con } -\infty \leq x \leq \infty$$

Y donde x presenta el valor a asumir por la variable aleatoria, con **d** y **u** parámetros y **e** base de los logaritmos neperianos.

Despejando x de la función de Gumbel, queda;

$$x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$$

Para la determinación de los parámetros d y u, se utilizan las siguientes expresiones que los definen:

$$u = \bar{x} - 0.450047 * S$$

$$1/d = 0.779696 * S$$

Donde:

$\bar{x}$ : Media aritmética de la serie de datos considerados.

S: Desviación típica de la muestra de datos considerados.

## 1.2. Definición de la Función de Goodrich

Una variable aleatoria E sigue una distribución de probabilidad de Goodrich, si:

$$F(x) = 1 - e^{-a(x-x_1)^{1/p}} \quad \text{con } X_1 \leq x \leq \infty$$

Donde:

- x** : Valor a asumir por la variable aleatoria.
- X<sub>1</sub>, a, p**: Parámetros.
- e** : Base de los logaritmos neperianos.

Es preciso que  $x \geq X_1$ , para que la función matemática posea sentido, toda vez que el mínimo de ésta, se encuentra cuando  $X = X_1$ .

Despejando x de la función de Goodrich, queda:

$$X = X_1 + \frac{1}{a^p} [-\ln(1 - F(x))]^p$$

La determinación de los parámetros, se realiza por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{m_3}{S^3} = \rho(p)$$

$$a^{2p} = \frac{1}{S^2} * [\gamma(2p+1) - \gamma^2(p+1)]$$

$$X_1 = \frac{\gamma(p+1)}{a^p}$$

Donde:

$m_3$  = Momento central de orden tres.

$S_3$  = Desviación típica al cubo.

$\rho(p)$  = Función auxiliar de Goodrich.

$S^2$  = Varianza muestral.

$\gamma$  = Función Gamma.

$\bar{x}$  = Media muestral.

### 1.2.1. Momento Central de Orden Tres

Se define a través de la siguiente fórmula:

$$m^3 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n}$$

Donde:

$x_i$  = Valor de variable  $x$ .

$\bar{x}$  = Media muestral.

$n$  = Número de datos.

### 1.2.2. Funcion Auxiliar de Goodrich

La función auxiliar de Goodrich, es aquella que permite asimilar la expresión  $m^3/S^3$ , y a través de la cual es posible determinar  $p$ . Para determinar el valor de  $p$ , existe una tabla con los valores a asumir por la función  $\rho$ , auxiliar de Goodrich.

### 1.3. Definición de la Función de Pearson III

La función de Distribución de Probabilidad de Pearson III, se define por:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^y e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)} \left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} dx$$

Donde:

$x$  : Valor a asumir por la variable aleatoria.  
 $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$ : Parámetros.

Los parámetros  $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$  se evalúan, mediante el siguiente sistemas de ecuaciones (Aparicio, 1997):

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \alpha_1 * \beta_1 + \delta_1 \\ S^2 &= \alpha_1^2 * \beta_1 \\ \gamma &= 2 / \sqrt{\beta_1}\end{aligned}$$

Sustituyendo,

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \quad (1)$$

La función de Pearson III, queda:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta_1-1} e^{-y} dy$$

Esta función es una distribución ji cuadrada, con  $2\beta_1$  grados de libertad y  $X^2 = 2y$ .

$$F(y) = F(x^2 | v) = F_{x^2}(2y | 2\beta_1)$$

Despejando x de la función de (1), queda:

$$x = y \alpha_1 + \delta_1$$

## 2. Determinación de la Probabilidad

Para conseguir definir la probabilidad implícita, es preciso consignar dos conceptos previos, que son el periodo de retorno y la probabilidad de excedencia (Pizarro y Novoa, 1986).

- Período de Retorno: Se define como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales. Sea ese tiempo **T**.
- Probabilidad de Excedencia: Es la probabilidad asociada al período de retorno.

Así:

$$\text{Probabilidad de Excedencia} = \mathbf{P(X)} = 1 / \mathbf{T}$$

En otras palabras, la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número X, está dada por la función de distribución de probabilidad **F(X)** (Pizarro, 1986).

$$\mathbf{F(X)} = \int_{-\infty}^{\mathbf{x}} \mathbf{f(x)} \mathbf{dx} = \mathbf{P(x \leq X)} = 1 - \frac{1}{\mathbf{T}}$$

Luego, la probabilidad de que x sea mayor que X, está dada por la función complementaria:

$$\mathbf{P(x > X)} = 1 - \mathbf{F(X)} = 1 / \mathbf{T}$$