



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

**ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA
DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN NIRIVILLO, PERÍODO 1970-1990**

CRISTÁN ANDRÉS JORDÁN DÍAZ

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

PROFESOR GUÍA: DR. ROBERTO PIZARRO TAPIA

TALCA – CHILE

2002

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

El alumno Sr. Cristián Andrés Jordán Díaz, ha realizado la memoria "ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA PARA LA CUENCA DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN NIRIVILO, PERIODO 1970 - 1990" como uno de los requisitos para optar al título de Ingeniero Forestal con el profesor Dr. Roberto Pizarro Tapia como Profesor Guía.

La comisión de Calificación de la memoria conformada por los profesores Dr. Roberto Pizarro Tapia y Dr. Mauricio Ponce Donoso, la evaluó con nota 6,5 (seis coma cinco).



CRISTIAN LÓPEZ MONTECINOS
DIRECTOR ESCUELA
INGENIERÍA FORESTAL

TALCA-CHILE

2002

**Memoria apoyada por el Programa de Financiamiento de Memorias Gobierno
Regional del Maule - Universidad de Talca.**

**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"**

DEDICATORIA

**A mis PADRES, Fabio (q.e.d) y Teresa.
A mis HERMANOS, Fabio, Rodrigo, Sandra,
María Teresa y Tomás.**

AGRADECIMIENTOS

- Al Ingeniero forestal, Dr. Roberto Pizarro Tapia, profesor guía de esta memoria, por los consejos, la amistad y la paciencia entregada durante el desarrollo de esta investigación.
- A la Dirección General de Aguas VII Región, en especial al Ingeniero forestal Claudio Ramírez B., por la facilitación de la base de datos e información necesaria para la ejecución de esta memoria.
- Al proyecto FONDECYT N^o 1010590, en cuyo marco se emplaza la presente memoria, por la posibilidad de iniciar esta línea de investigación.
- A Kame house y Chicken house, por la amistad, la convivencia y las experiencias vividas durante el paso por la Universidad.
- Y a todas las personas que de algún modo contribuyeron en el desarrollo de esta memoria.

RESUMEN

En la presente memoria se hizo un análisis temporal, mensual y anual, de los coeficientes de escorrentía, para la cuenca del río Purapel, VII Región, la cual presenta importantes superficies bajo forestación. El coeficiente de escorrentía, (C), es aquella porción de las precipitaciones que produce escurrimiento superficial. Éste se determinó relacionando las precipitaciones efectivas con las precipitaciones medias de la cuenca.

Las precipitaciones efectivas se obtuvieron del análisis de hidrogramas, previa determinación de los escurrimientos directos. Las precipitaciones medias se determinaron mediante el método de los polígonos de Thiessen. La serie consideró los periodos 1962-1968 y 1970-1990.

De los resultados obtenidos, los mayores C se produjeron en la década del 80, con una media mensual de 0,06. A nivel anual, el mayor C se obtuvo para el año 87/88, con 0,21 y el menor valor fue de 0,02 para el año 64/65. Mensualmente, Julio fue el mes con el valor medio más alto, 0,13. Los meses de Enero y Febrero presentaron los valores más bajos, muy cercanos a 0.

Según la prueba U de Mann-Whitney y los promedios móviles, se presentó un incremento de C en la década del '80, con respecto a las del '60 y '70. Ello, al parecer fue función de las cantidades e intensidades de las precipitaciones y no fue una función directa de las superficies forestadas, aunque ésto debe ser corroborado por mayores antecedentes del uso del suelo de la cuenca.

Finalmente, los C presentaron valores bajos a nivel mensual y anual y, se recomienda ampliar el estudio a la década del '90.

SUMMARY

In this study a temporal analysis (monthly and yearly) of runoff coefficient for the Purapel river basin, VII region, Chile, is made. This basin presents important areas with forest. The runoff coefficient (C), is the part of rainfalls that define the surface runoff. Relationing the net and average rainfalls of the basin, the runoff coefficient was determinated.

At first, through the hydrographs analysys the direct runoff and the net rainfalls were determinated. Then, through "Thiessen polygons method" the average rainfalls were determinated. The information was obtained from two periods: 1962-1968 and 1970-1990.

Analyzing the results, the highest C was produced in the 80's, with a monthly average of 0.06. Annually, the highest C (0.21) was obtained in 1987/1988, and the lowest value was 0.02 in 1964/1965. Monthly, the highest average value (0.13) was produced in July. The lowest value was 0, in January and February.

An increase of C was presented in the 80's in comparision with 60's and 70's, according to the Mann-Whitney U test and moving averages. This increase, may be explained as a function of the quantities and rainfalls intensities, and not a direct function of the forested areas, although this must be confirmed with more information about the use of land basin.

Finally, monthly and yearly values for the C were low, and it is recommended to enlarge the data base to the 90's.

ÍNDICE

1.0. INTRODUCCIÓN	1
2.0. OBJETIVOS	3
3.0. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Precipitaciones.	4
3.2. Precipitación efectiva.	5
3.3. Hidrogramas.	6
3.3.1. Componentes de un hidrograma.	7
3.3.2. Características de un hidrograma de crecida.	8
3.3.3. Forma de un hidrograma de crecida.	9
3.3.4. Análisis de hidrogramas.	10
3.4. Coeficiente de escorrentía.	11
3.5. Vegetación y las relaciones precipitación-escorrentía.	14
3.5.1. El bosque y el ciclo hidrológico.	14
3.5.2. Investigación realizada en Chile.	19
4.0. ANTECEDENTES GENERALES	21
4.1. La cuenca hidrográfica del río Purapel.	21
4.2. Estación fluviométrica Purapel en Nirivilo.	23
5.0. METODOLOGÍA	24
5.1. Materiales.	24
5.2. Metodología.	24
5.2.1. Revisión bibliográfica.	25
5.2.2. Captura de datos.	26
5.2.3. Confección de hidrogramas.	27

5.2.4. Separación de hidrogramas.	28
5.2.4.1. Diferenciación de crecidas.	31
5.2.5. Cálculo de los volúmenes de escorrentía directa.	31
5.2.5.1. Cálculos de los volúmenes mensuales y anuales.	34
5.2.6. Determinación de las precipitaciones efectivas.	35
5.2.7. Cálculo de las precipitaciones medias mensuales.	36
5.2.7.1. Corrección y completación de datos faltantes.	36
5.2.7.2. Cálculo de las precipitaciones medias.	38
5.2.7.3. Diferenciación de meses húmedos y secos.	39
5.2.8. Cálculo de los coeficientes de escorrentía.	40
5.2.9. Análisis de resultados.	40
5.2.9.1. Análisis estadístico.	41
5.2.9.1.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.	41
5.2.9.1.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.	43
5.2.9.2. Análisis gráfico.	44
5.2.10. Síntesis de la metodología expuesta.	45
6.0. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	47
6.1. Selección de la información y confección de hidrogramas de crecida.	47
6.2. Determinación de las precipitaciones medias areales.	48
6.2.1. Completación de datos faltantes, estación Nirivilo.	48
6.2.2. Completación de datos faltantes, estación Constitución.	49
6.2.3. Estimación de las precipitaciones medias mensuales y anuales.	51
6.3. Determinación de las escorrentías directas.	53
6.4. Determinación de las precipitaciones efectivas.	54
6.5. Determinación de los coeficientes de escorrentía.	55
6.6. Análisis estadístico.	56
6.6.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.	56
6.6.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.	57

6.6.3. Análisis gráfico.	58
7.0. ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
7.1. Obtención de la información y su registro.	63
7.2. Selección y completación de la información.	64
7.3. Confección y separación de hidrogramas.	66
7.4. Precipitaciones medias.	68
7.4.1. Estimación de precipitaciones medias a través de los Polígonos de Thiessen.	68
7.4.2. Precipitaciones medias.	69
7.5. Escorrentías directas y precipitaciones efectivas.	71
7.6. Coeficientes de escorrentía.	77
7.7. Análisis global de las precipitaciones medias, las escorrentías directas, las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía.	82
7.8. Análisis estadístico de los coeficientes de escorrentía.	84
7.8.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney .	84
7.8.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.	85
7.8.3. Análisis mediante promedios móviles.	85
7.9. Elementos de gestión forestal en la cuenca del río Purapel.	86
8.0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
8.1. Conclusiones.	89
8.2. Recomendaciones.	91
9.0. BIBLIOGRAFÍA	92
APÉNDICES	98
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones pluviométricas y fluviométricas seleccionadas.	47
Tabla 2. Años utilizados por década, total de crecidas y metodología utilizada en la separación de hidrogramas.	48
Tabla 3. Precipitaciones mensuales y anuales para la estación Nirivilo (mm).	49
Tabla 4. Completación de precipitaciones estación Constitución (mm).	50
Tabla 5. Superficies de influencia de cada estación y asignación de pesos relativos.	51
Tabla 6. Precipitaciones medias areales para la cuenca del Río Purapel (mm)	52
Tabla 7. Escorrentías directas mensuales y anuales para el periodo en estudio (Millones de m ³).	53
Tabla 8. Precipitaciones efectivas para la cuenca del Río Purapel (mm).	54
Tabla 9. Coeficientes de escorrentía mensuales y anuales para el periodo en estudio.	55
Tabla 10. Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho.	56
Tabla 11. Valores resultantes de la prueba de comparación de medianas y decisión con respecto a Ho.	57
Tabla 12. Precipitaciones extremas y variación con respecto al promedio normal estimado (mm).	70
Tabla 13. Modelo seleccionado (logarítmico de base 10).	99
Tabla 14. Análisis de varianza modelo logarítmico.	99
Tabla 15. Precipitaciones mensuales y anuales de la estación Constitución 92-00 (mm).	101
Tabla 16. Precipitaciones mensuales y anuales de la estación Nirivilo 92-00 (mm).	101
Tabla 17. Modelo seleccionado, completación de precipitaciones.	101
Tabla 18. Análisis de varianza modelo seleccionado, completación de precipitaciones.	101
Tabla 19. Escorrentías totales mensuales y anuales para el periodo total (Millones de m ³).	104
Tabla 20. Escorrentías subterráneas mensuales y anuales para el periodo total (Millones de m ³).	104
Tabla 21. Términos de cálculo para el tiempo de concentración de Kirpich.	105

Tabla 22. Estadísticas básicas de los coeficientes de escorrentía.	106
Tabla 23. Datos de origen de los promedios móviles obtenidos.	107
Tabla 24. Reglas de decisión para el test Durbin-Watson.	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrograma de crecida y sus componentes.	9
Figura 2. Mapa de ubicación del río Purapel.	21
Figura 3. Limnigrama registrado para una crecida del río.	27
Figura 4. Forma típica de un hidrograma de crecida y sus características.	28
Figura 5. Gráfica semilogarítmica $\log(q)$ v/s t utilizada en la determinación del segundo punto de quiebre.	29
Figura 6. Trazado hipotético de los polígonos de Thiessen.	39
Figura 7. Resultado de la aplicación de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca del río Purapel.	51
Figura 8. Promedios móviles de los coeficientes de escorrentía para el periodo total.	58
Figura 9. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Abril.	59
Figura 10. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Mayo.	59
Figura 11. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Junio.	60
Figura 12. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Julio.	60
Figura 13. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Agosto.	61
Figura 14. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Septiembre.	61
Figura 15. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Octubre.	62
Figura 16. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Noviembre.	62
Figura 17. Hidrograma de crecidas.	67

Figura 18. Precipitaciones totales anuales y su comparación con respecto al promedio normal.	70
Figura 19. Comportamiento mensual promedio de las precipitaciones medias.	71
Figura 20. Comportamiento mensual promedio de las precipitaciones efectivas.	73
Figura 21. Precipitaciones efectivas en comparación con las precipitaciones medias.	74
Figura 22. Nube de puntos correspondiente a la correlación entre precipitaciones efectivas y precipitaciones medias.	76
Figura 23. Comportamiento mensual e intervalo de confianza de los coeficientes de escorrentía promedio.	78
Figura 24. Coeficientes de escorrentía para la década del 60 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década.	79
Figura 25. Coeficientes de escorrentía para la década del 70 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década.	80
Figura 26. Coeficientes de escorrentía para la década del 80 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década.	80
Figura 27. Coeficientes de escorrentía anual v/s precipitación media anual.	83
Figura 28. Histograma de frecuencias.	109
Figura 29. Patrones hipotéticos de comportamiento de los residuos en presencia de heterocedasticidad.	110
Figura 30. Gráfico de autocorrelación de residuos.	111

1.0. INTRODUCCIÓN

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

Debido a la importancia que cobra el agua para la existencia humana y la vida natural, surge la necesidad de desarrollar investigaciones acerca de este recurso y su disponibilidad, con el fin de obtener un mayor conocimiento del mismo y de las variables que se interrelacionan, así como también poder desarrollar un mejor uso y gestión.

Una de las herramientas de mayor importancia para poder analizar el comportamiento de las aguas es el uso de los hidrogramas de crecida, que muestran la variación de los caudales con relación al tiempo. A partir de ellos es posible hacer inferencias sobre las características de los elementos constituyentes de una cuenca como son la vegetación y los suelos y, conocer las cantidades de agua provenientes de los distintos tipos de escurrimiento, a partir de un determinado hidrograma.

En este plano, el obtener información acerca de los coeficientes de escorrentía para una cuenca a partir de lo expuesto cobra gran importancia, ya que a través de ellos se puede establecer una relación entre las precipitaciones caídas y las que realmente generan el escurrimiento directo, determinando qué proporción del total produce escorrentía superficial. Esta relación sirve de soporte técnico para la investigación y ejecución de obras de carácter hidráulico, civil, forestal, etc.

De acuerdo a lo anterior, esta memoria se realiza sobre la base del estudio de los coeficientes de escorrentía para la cuenca del río Purapel, VII Región de Chile, durante

el periodo 1960-1990, con el fin de determinar diferencias y variaciones en el tiempo de los escurrimientos directos y las variables que lo afectan.

2.0. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Aportar al conocimiento del comportamiento de las precipitaciones efectivas en áreas costeras de la VII Región de Chile.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los coeficientes de escorrentía a nivel mensual y anual para la cuenca del Río Purapel, en el periodo 1970-1990.
- Establecer un análisis temporal de los coeficientes de escorrentía, que permita inferir elementos de gestión forestal en la cuenca.

3.0. REVISIÓN BIBIOGRÁFICA

3.1. Precipitaciones.

Las precipitaciones son definidas por UNESCO-ROSTLAC (1982), citado por Ramírez (1998), como el agua que proviene de la humedad atmosférica y que cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve).

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

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre (Aparicio, 1997) y es la principal entrada de agua en una cuenca (González y García, 1995), siendo el elemento más importante del ciclo hidrológico. Según Fernández (1995), la precipitación, junto con la temperatura, es el elemento climático más influyente en el medio natural, ya que influyen en la distribución de las especies vegetales y animales, además de las actividades del hombre, como son las agrícolas y económicas, entre otras.

Sheng (1992), citado por Ramírez (1998), señala que los datos de las precipitaciones son probablemente el factor más importante en cuanto a la evaluación de recursos hídricos, producción de cultivos, escorrentía y erosión.

Las mediciones de las precipitaciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1997). Pizarro *et al* (1993), señalan la importancia en la estimación de las precipitaciones medias para un área geográfica determinada, sobre la cual se realizan actividades de investigación y/o ejecución

de obras técnicas. Así por ejemplo, el análisis volumétrico de una tormenta caída sobre una cuenca, puede permitir la inferencia de elementos técnicos de importancia a ser considerados en el proceso precipitación-escorrentía.

En la literatura respectiva existe una gran variedad de métodos para la estimación de precipitaciones medias de una cuenca. Ramírez (1998); Fernández (1995); Chow *et al* (1994) y Pizarro *et al* (1993), señalan una diversidad de métodos de estimación de precipitaciones medias como son la media aritmética, los polígonos de Thiessen, Thiessen modificado e Isoyetas, entre otros. El uso de una u otra metodología depende, según Ramírez (1998), de la distribución de las precipitaciones, la densidad de la red de medición, la disponibilidad de datos y la posibilidad de ejecución del método.

Ramírez (1998), plantea que el método más recomendable para la estimación de las precipitaciones medias areales son los Polígonos de Thiessen en la VII Región del Maule, pues sus resultados son seguros y confiables para este tipo de estimación.

3.2. Precipitación efectiva.

La precipitación efectiva (Pe), también conocida como exceso de precipitación, es aquella porción de la precipitación total que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo (Chow *et al*, 1994). El mismo autor agrega que esta precipitación, luego de fluir sobre la superficie del terreno, se convierte en escorrentía directa.

Mintegui y López (1990), señalan que las precipitaciones efectivas se obtienen al sustraer de la precipitación total, las pérdidas iniciales y las de infiltración a lo largo del tiempo, siendo sus montos siempre menores o iguales a los montos de las precipitaciones totales.

La determinación de la precipitación efectiva para una tormenta y/o una cuenca es de suma importancia, ya que ella es la generadora de la escorrentía directa. Algunos métodos para la estimación de la precipitación efectiva son el método del Po, y el Número de curva, ambos del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (U.S.S.C.S); y el método de Horton, relacionado con la capacidad de infiltración del suelo. El método del Número de curva es ampliamente usado para la determinación de las escorrentías directas (precipitaciones efectivas) a partir de las características de los suelos, del uso del mismo y de la cobertura vegetal. Su gran inconveniente es el requerimiento de los pluviogramas de las precipitaciones, los cuales en un país como Chile, no están presentes en todas las cuencas.

Existen también algunos métodos más sencillos, como el análisis de los componentes de los hidrogramas que consiste en analizar y separar del hidrograma los volúmenes de agua causantes de la escorrentía directa y los correspondientes al caudal base del río. Luego, midiendo las superficies se pueden obtener los volúmenes de la escorrentía directa (Mintegui y López, 1990; Chow *et al.*, 1994; López, 1998) y al relacionarlos con la superficie de la cuenca, se determinan los montos de precipitación efectiva.

3.3. Hidrogramas.

Un hidrograma representa la evolución del caudal a lo largo del tiempo y es obtenido por medio del registro continuo de niveles (limnigrama) y su posterior transformación mediante la correspondiente curva de gastos (Ferrer, 1993).

Chow *et al.* (1994), se refiere a un hidrograma como 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), agregan que un hidrograma es una relación funcional del gasto v/s tiempo, en que se verifica que el área bajo la curva determinada, define el volumen de agua generado en una crecida. La relación caudal-tiempo se obtiene a través de las estadísticas fluviométricas que generan las redes hidrológicas, que consisten en una serie de estaciones equipadas con los instrumentos necesarios, como es el caso del limnógrafo (Pizarro *et al*, 1993).

3.3.1. Componentes de un hidrograma.

El hidrograma obtenido de una estación de aforo es el resultado de las diversas formas de escurrimiento existentes en la cuenca. Estas formas representan los distintos componentes del caudal total de un hidrograma de crecidas (Remenieras, 1971).

Linsley *et al* (1988); Maidment (1993) y Aparicio (1997), señalan que el agua sigue diversos caminos hasta llegar al cauce de una corriente. Estos caminos se dividen en tres clases: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escorrentía subterránea.

La escorrentía superficial corresponde al volumen de agua que avanza sobre la superficie de la tierra hasta alcanzar un cauce (Linsley *et al*, 1988). Remenieras (1971), agrega que dicho volumen fluye por gravedad, según la pendiente del terreno. La escorrentía subsuperficial es la porción de agua que infiltra a través de la superficie de la tierra y se mueve lentamente sobre las capas superiores del suelo. La escorrentía subterránea corresponde al agua que infiltra hasta los niveles freáticos.

En este contexto, de los tres tipos de escurrimiento señalados, el superficial es el que llega más rápido a la salida de la cuenca. Está relacionado con una lluvia particular (aislada) y proviene de la precipitación efectiva. La escorrentía subterránea es la de llegada más lenta a la salida de la cuenca y es difícil de relacionar con una lluvia aislada. Es la que

alimenta los cauces cuando no hay lluvias formando el caudal base (Aparicio, 1997). El escurrimiento subsuperficial es de flujo más lento que la escorrentía superficial (Linsley *et al*, 1988).

Debido a la dificultad de establecer qué caudal corresponde a cada tipo de escorrentía, Remenieras (1971) y Pizarro y Novoa (1986), señalan que se ha dividido en escurrimiento directo y base, correspondiendo el primero al flujo superficial y subsuperficial, y el segundo al flujo subterráneo.

3.3.2. Características de un hidrograma.

En un hidrograma se ven reflejadas las aguas provenientes de la escorrentía directa y base (Pizarro *et al*, 1993). La forma general de un hidrograma se puede ver en la figura 1. Pizarro *et al* (1993), señala que en él se distinguen los siguientes componentes:

- Curva ascendente o de crecida: en esta sección del hidrograma se inicia la crecida y se alcanza el caudal punta. En la figura corresponde a la sección comprendida entre los puntos A y B.
- Curva descendente o de bajada: corresponde al tramo comprendido entre el caudal punta y el fin de la afluencia de aguas superficiales. Está comprendida entre los puntos B y D.
- Curva recesiva o de agotamiento: es la sección del hidrograma en donde las aguas provienen teóricamente de alimentación subterránea. Comprende la sección que sigue al punto D.

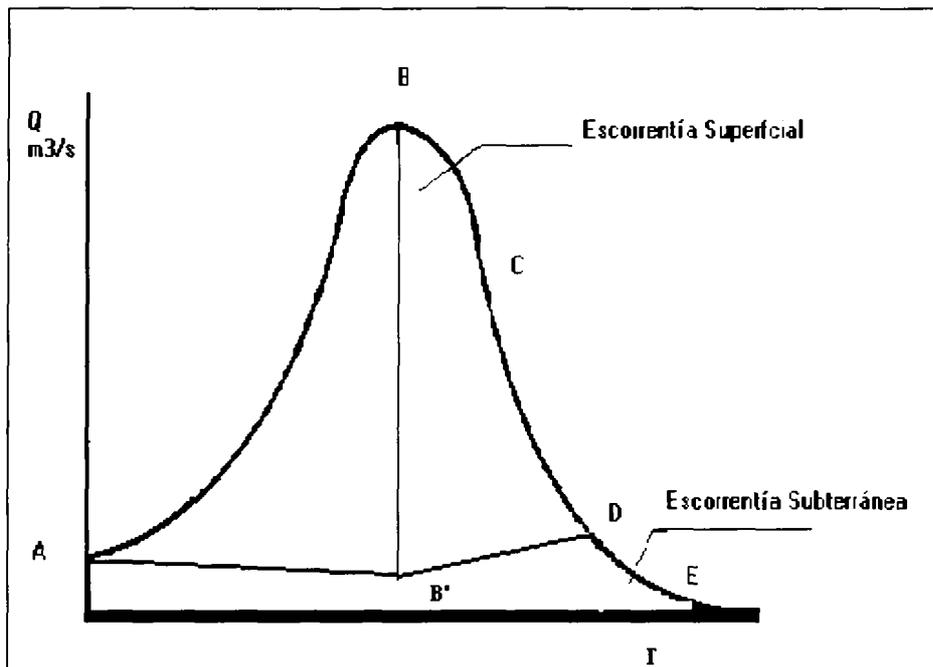


Figura 1. Hidrograma de crecida y sus componentes.

El punto A en la figura corresponde al punto de levantamiento o comienzo del hidrograma. Éste indica que el agua proveniente de la lluvia comienza a llegar a la salida de la cuenca. El punto B representa al caudal máximo que se produce en una tormenta; el punto C es donde aproximadamente se termina el flujo sobre el terreno, siendo el punto D el que marca el comienzo del escurrimiento exclusivamente subterráneo (Aparicio, 1997).

3.3. Forma de un hidrograma de crecida.

Para tener una noción de la forma de un hidrograma en relación con la cuenca que lo provoca, es necesario conocer los factores que influyen en ello. Según Wisler-brater, citado por Vilaró (1976), existen dos tipos de factores. Unos son los factores climáticos: en ellos se agrupan los relacionados con las precipitaciones como el tipo, intensidad, duración de las

precipitaciones, su distribución en la cuenca, etc. y los otros corresponden a factores fisiográficos como el uso del suelo, el tipo de suelo, la superficie, la forma, la altitud, la pendiente de la cuenca, el tipo de red de drenaje, etc.

En este marco, Remenieras (1971) considera una combinación de estos dos tipos de factores, que influyen en las condiciones iniciales de la cuenca. Éstos son la humedad precedente del suelo y el estado de la cobertura vegetal; así se genera un hidrograma de mayor magnitud, si las condiciones del suelo muestran signos altos de humedad.

Llamas (1976), señala que las cuencas de suelos permeables y con acuíferos importantes que tengan igualdad de aportación anual y con un régimen de precipitaciones, temperaturas y vegetación similares, presentarán una distribución de caudales uniformes. Lo contrario sucede en aquellas cuencas en las que predominen los suelos poco permeables y las formaciones acuíferas sea poco extensas. El hidrograma de éstas últimas cuencas presentará un aspecto irregular, de formas de dientes de sierra, ya que los caudales del río responderán de un modo mucho más inmediato a las precipitaciones.

3.3.4. Análisis de hidrogramas.

Según Linsley *et al* (1988), el análisis de hidrogramas corresponde a la división de un hidrograma en sus componentes. López (1998), señala que este método solo se puede aplicar en lugares donde se disponga de aforos con detalle suficiente, que permitan la obtención de hidrogramas de crecida.

Maidment (1993) plantea que para realizar el análisis de hidrogramas es necesario diferenciar previamente en el hidrograma los componentes del flujo. Además señala la necesidad de identificar tres características del hidrograma total: el comienzo, el fin de la escorrentía directa y la forma del hidrograma de flujo base.

El comienzo (punto A en la figura 1), se determina en el punto que diverge de la declinación constante del flujo base previo (Maidment, 1993). El fin del hidrograma de crecidas es el segundo quiebre en la curva de bajada del hidrograma.

Para determinar la forma del flujo base existen numerosos métodos citados en la literatura respectiva. Según Pizarro *et al* (1993), el método más utilizado en Chile es el que, definido el punto de inicio, se sigue la tendencia imaginaria que traía el hidrograma antes de la crecida, hasta la proyección del caudal punta y desde ahí hasta interceptar el segundo quiebre de la curva de bajada. Toda el área bajo esta separación corresponde al aporte subterráneo y el área sobre ella corresponde al hidrograma superficial. Luego de separar un hidrograma en sus distintos componentes, se pueden obtener los volúmenes de agua generados por cada tipo de escurrimiento. Los volúmenes generados por la escorrentía directa pueden obtenerse midiendo directamente sobre el hidrograma generado (Mintegui y López, 1990; López, 1998).

3.4. Coeficiente de escorrentía.

Para Témez (1978), el coeficiente de escorrentía está representado en sentido estricto por las variaciones de las precipitaciones efectivas con respecto a las variaciones de las precipitaciones en un tiempo dado. De este modo es posible obtener coeficientes de escorrentía máximos para una lluvia particular. Matemáticamente queda expresado como:

$$C = \frac{dPe}{dP} \cdot \frac{dt}{dt}$$

Según Chow *et al* (1994), el coeficiente de escorrentía es la relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad promedio de precipitación en una lluvia particular.

Ferrer (1993), lo define como la precipitación de intensidad de lluvia i que genera escorrentía superficial.

Chow (1994), señala que un coeficiente de escorrentía puede definirse también como la relación entre la escorrentía y la precipitación en un periodo de tiempo dado. Agrega que estos coeficientes se aplican a precipitaciones y escorrentía de una tormenta, pero también pueden utilizarse para la información de precipitaciones y caudales mensuales o anuales.

Mintegui y López (1990) afirman que el coeficiente de escorrentía depende de la magnitud de las precipitaciones. Chow *et al* (1994) agrega otros factores que afectarían una mayor o menor magnitud del coeficiente de escorrentía como las características y condiciones de suelo, la vegetación, la pendiente y el área de la cuenca, entre otros.

Según Chow *et al* (1994), si P es la precipitación y P_e la correspondiente altura de precipitación o precipitación efectiva, el coeficiente de escorrentía (C) puede definirse como:

$$C = \frac{P_e}{P}$$

El monto de la precipitación efectiva, precipitación que genera la escorrentía directa, se puede obtener de separación de hidrogramas, siendo el cociente entre el volumen escurrido y el área total de la cuenca (Pizarro y Novoa, 1986). De esta manera:

$$Pe = \frac{V}{A}$$

donde V representa el caudal producido por el escurrimiento directo (m³) y A es el área de la cuenca (m²).

Otras formas de cálculo del coeficiente de escorrentía es a través de modelos y tablas. En general todas estas formas de cálculo relacionan algunas características de la cuenca, como el relieve, pendiente, permeabilidad y tipo de suelo, cubierta vegetal, capacidad de almacenamiento, entre otras. Existen citadas en la bibliografía una serie de formas, entre las que están las fórmulas de Nadal, de Keler y las tablas de Molchanov y de Prevert. Una de las más utilizadas y aceptadas es la forma de cálculo que recomienda el manual de carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España, la cual aparece en forma idéntica en el mismo manual, pero perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de Chile. Éstos presentan una tabla de doble entrada en las que relacionan algunas características de la cuenca dándoles una cierta ponderación, cuya suma determina un parámetro K, que según su valor determina el coeficiente de escorrentía.

Mintegui y López (1990), señalan que no basta con la estimación de C solo para una lluvia particular, sino que se deben realizar estimaciones de dicho coeficiente para lluvias de diferente magnitud, con el fin de obtener una relación matemática entre la precipitación y la precipitación efectiva.

Finalmente, Critchley y Siegert (1996) señalan que debe evitarse el uso de coeficientes de escorrentía obtenidos para cuencas de distinta ubicación geográfica, como también la aplicación de dichos coeficientes determinados para cuencas grandes, en cuencas de menor tamaño.

3.5. Vegetación y las relaciones precipitación-escorrentía.

Hoy en día, bajo el concepto de hidrología forestal se acoge una variada gama de investigaciones científicas relacionadas con la influencia de la vegetación en el ciclo hidrológico y más específicamente sobre el proceso precipitación-escorrentía.

Según Pizarro *et al* (2001), las relaciones y/o influencias de la vegetación y la escorrentía, han sido motivo de estudio desde hace más de 100 años, pero más intensamente estudiadas en los últimos 50 años, dentro de los cuales se han realizado experiencias por todo el mundo relacionados con la remoción de la vegetación y procesos como la escorrentía misma, además de otros como la erosión y la sedimentación.

En este marco la vegetación y más específicamente los bosques, se relacionan con una serie de factores que permiten el desarrollo de un microclima particular si se le compara con un sitio descubierto. Así, un bosque resulta menos luminoso, con una reducción de hasta el 90% de la luminosidad; es menos caluroso, con una disminución de unos 4^o C en la temperatura media anual, produciendo una rebaja de las temperaturas máximas en los periodos estivales y un aumento en las mínimas, para los periodos más fríos. También provoca efectos sobre el viento, reduciendo su velocidad hasta una cuarta parte y produce un aumento de la humedad con un incremento medio cercano al 10 % (Gandullo, citado por López, 1998).

3.5.1. El bosque y el ciclo hidrológico.

Las precipitaciones son partícipes de una serie de sucesos durante el desarrollo del ciclo hidrológico. Si se toma como base el balance hídrico de una cuenca y la ecuación que lo describe para periodos suficientemente largos, se tiene que las entradas son iguales a las

salidas; esto quiere decir que $P = Q + E \pm \Delta R$, donde P es la precipitación, E involucra a la evaporación, intercepción y transpiración, Q representa a la escorrentía y ΔR representa la variación de reservas e infiltración; se encuentra que la presencia de vegetación, afecta de uno u otro modo a cada uno de los componentes de la ecuación descrita (Pizarro *et al*, 1993).

- **La vegetación y la precipitación**

El efecto que provoca la vegetación sobre las precipitaciones está relacionado principalmente con los orígenes de ésta y el proceso de intercepción. En cuanto a los orígenes de estas, la vegetación influencia mayormente a las de tipo orográficas, de dos formas. Por un lado los bosques acrecientan la altura efectiva que deben remontar los vientos, lo que puede provocar un aumento entre un 0.8% y un 1.2% de las precipitaciones, según experiencias centroeuropeas; y por otro está el efecto de fricción de los bosques tendiendo a disminuir la velocidad y favorecer los movimientos ascensionales de los vientos, lo que produciría un aumento de las precipitaciones entre un 2 y 3 %. Con respecto a la intercepción por parte de las masas arbóreas, estas retienen en sus hojas y ramillas parte de las precipitaciones que no llegan al suelo, además de disminuir la intensidad de los aguaceros y distribuir las aguas en un intervalo más amplio en el tiempo (López, 1998). El mismo autor señala que influyen en ésto el tipo de especie y su edad, el tipo de bosque y las circunstancias del medio (temperatura y presión atmosférica).

En este contexto y en virtud de diversas experiencias, se puede señalar a modo general que las especies de hoja perenne, especialmente coníferas, interceptan mayores volúmenes de agua que las latifoliadas, y que esta intercepción aumenta con la edad de los árboles hasta llegar a un límite donde empieza a decrecer (López, 1998).

- **La vegetación y la infiltración**

La influencia sobre la infiltración, es según Pizarro *et al* (2001), decisiva sobre todo si la cobertura vegetal es boscosa. Ello se debe al continuo aporte de materia orgánica lo que origina una estructura más granular del suelo que favorece la infiltración.

En general se pueden establecer una serie de apreciaciones con respecto a la infiltración, como que es mayor en bosques adultos que en bosques jóvenes, y en montes densos que en montes rasos. También se encuentran 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 (López, 1998).

- **La vegetación y la evapotranspiración**

Con respecto a la evapotranspiración, los efectos principales que provoca sobre ella la vegetación son variados. Así, la evaporación difiere según el tipo de cubierta vegetal; al aumentar la edad y disminuir la espesura de la masa forestal y también la evaporación, ésta tiende a aumentar. En suelos cubiertos con hojarasca sin descomponer, la evaporación es menor que la producida en suelos desnudos. En cuanto a la transpiración, ésta está influenciada por la luz solar, la temperatura, el contenido de humedad, la fertilidad del suelo y la composición de la vegetación. En función de la temperatura media anual para latifoliadas la evapotranspiración es de 200 a 300 mm anuales, mientras que para coníferas es del orden de 100 a 150 mm. También cabe señalar que las especies arbóreas poseen una transpiración inferior a las herbáceas y arbustos, y en cuanto a la edad, la mayor transpiración aumenta hasta un límite, para luego decrecer (López, 1998).

- **La vegetación y la escorrentía**

Por otra parte, es menester señalar la influencia de la vegetación sobre la producción de escorrentía, que es donde se centra el presente estudio. Pizarro *et al* (2001) citando a López (1994), señala que la importancia de la vegetación y principalmente de los bosques sobre la escorrentía, es la de modificar la forma en que estas aguas acceden a los cauces, disminuyendo drásticamente las aportaciones superficiales y aumentando correspondientemente las subterráneas.

En este marco, López (1998) determina que las masas forestales tienen una gran eficacia en la reducción de la escorrentía, conjugándose diferentes factores para producir este efecto. Así, las masas forestales dotan a los suelos de una mayor capacidad de infiltración con respecto a los suelos agrícolas. Ello es producto de la intercepción realizada sobre las precipitaciones, la mayor rugosidad superficial, la transpiración de las plantas y la gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas de restos vegetales y húmicos, propia de los bosques, las cuales al actuar en conjunto retrasan el punto de saturación o encharcamiento y por tanto el comienzo del flujo superficial o escorrentía directa.

Lo anterior se ve corroborado por las experiencias realizadas por diversos investigadores en el mundo entero. Una de las más interesantes es la realizada en Coweeta, Estados Unidos, en donde desde los años '30 se ha llevado a cabo uno de los más importantes programas de investigación sobre cuencas controladas, siendo la base de datos más detallada en el mundo para cuencas forestales, tanto en longitud como en calidad de registros. Hibbert (1966), citado por Pizarro *et al* (2001), en función de las experiencias de Coweeta planteó que la deforestación incrementa los caudales y que la forestación los disminuye, aunque la magnitud de respuesta es altamente variable e impredecible.

Reinhart *et al* (1963) analizaron los efectos de la vegetación sobre la escorrentía producto de las explotaciones forestales, determinando que el caudal punta y el total de

volumen escurrido se incrementaron en seis y cuatro veces respectivamente. Douglas (1981), destaca que los efectos de las cortas y de la explotación forestal sobre el hidrograma de crecidas son acumulativos. Ello, porque el volumen de la crecida, el caudal punta y la duración del hidrograma, se ven incrementados con las explotaciones forestales, siendo el efecto más grande durante la ejecución de las faenas, para declinar en el tiempo producto del crecimiento de la vegetación.

Singh (1982) citado por Pizarro *et al* (2001), cita estudios desarrollados en el Valle de Tennessee, Estados Unidos, en los cuales se analizó el efecto de la reforestación sobre los hidrograma de crecidas y el caudal punta. Así, se determinó que los caudales punta del verano que antes alcanzaban a 3 m³/s, se redujeron a la mitad entre los 6 y 10 años posteriores a la reforestación; entre los 10 y 15 años alcanzaron un valor promedio de 0,5 m³/s y entre los 15 y 20 años que siguieron a la reforestación, los caudales punta llegaron a un valor de 0,2 m³/s. Singh (1988), señala que el efecto inmediato de las actividades forestales es el cambio de cobertura vegetal. Si un área es explotada, la intercepción de la precipitación es eliminada. La remoción de la hojarasca cambia la capacidad de infiltración del suelo y posee un impacto directo sobre el efecto erosivo resultante.

Rodier (1985), afirma que la forestación o la deforestación, afectan directamente la generación de escorrentía a través de la presencia o ausencia del bosque indirectamente como resultados de las prácticas de manejo forestal. Calder (1992) afirma que en términos generales un incremento de un 10% de la cobertura forestal de pinos y cucalipos en recemplazo de zonas cubiertas de pastos, determinan una rebaja de 40 mm en el caudal anual.

Lindholm y Stenheck (1993) citados por Pizarro *et al* (2001), llevaron a cabo un estudio para determinar la influencia de las forestaciones sobre la escorrentía superficial, entre otros aspectos. Así determinaron la disminución estadísticamente significativa de la escorrentía del lugar, producto de la forestación.

3.5.2. Investigación realizada en Chile.

Chile es un país sobre el cual se han llevado a cabo intensos procesos de forestación en vastas regiones en los últimos 30 años. Esto ha producido un cambio notorio en la vegetación, como también en los componentes de la ecuación del balance hídrico ya señalados.

No obstante, Pizarro *et al* (2001) señala que en el país no existen mayores experiencias desde la perspectiva del estudio cuantitativo de las relaciones precipitación-escorrentía y la vegetación. Salvo contadas situaciones, en su mayoría estas investigaciones corresponden a tesis de grado y memorias de títulos desarrolladas por las distintas universidades del país.

Se pueden citar los trabajos realizados por Huber y Oyarzún (1983), que analizaron la distribución de las precipitaciones en un bosque de *Pinus radiata* (D. Don). Determinaron que el agua que llega a la superficie del suelo constituyó el 87% del total por precipitaciones directas y un 13% por escurrimiento fustal. Oyarzún *et al* (1985) estudiaron la redistribución de las precipitaciones directas, el escurrimiento fustal y la intercepción en bosque de *Pinus radiata* (D. Don) con distintos tipos de manejo, encontrando una relación directa entre la cobertura del dosel y la intercepción.

Huber y López (1993) determinaron la variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo y el consumo de agua por evapotranspiración de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don) antes y después de la tala, comparándose con los de una pradera natural. Se registraron cambios a favor del bosque en cuanto a la intercepción y evapotranspiración con respecto a la pradera, y ésta tuvo un mayor consumo de agua que la superficie talada.

Además, se pueden señalar estudios realizados por Iroumé (1992), quién midió precipitaciones, escorrentía y arrastre de sedimentos en una cuenca cercana a Valdivia en dos periodos, encontrando coeficientes de escorrentía anual de 0,53 para el primero, el cual puede considerarse como normal y de 0,44 para el periodo considerado como seco.

4.0. ANTECEDENTES GENERALES

4.1. La cuenca hidrográfica del río Purapel.

El área de estudio en que se centra la presente memoria se emplaza en la VII Región de Chile, específicamente en la zona geográfica de la cuenca del río Purapel. La cuenca nace en la cordillera de la costa, desarrollándose entre este cordón montañoso y la depresión intermedia formando parte de la cuenca del río Maule. Posee una superficie aproximada de 259 km² hasta la estación fluviométrica de Nirivilo. La ubicación y la forma de la cuenca se puede apreciar en la figura 2.

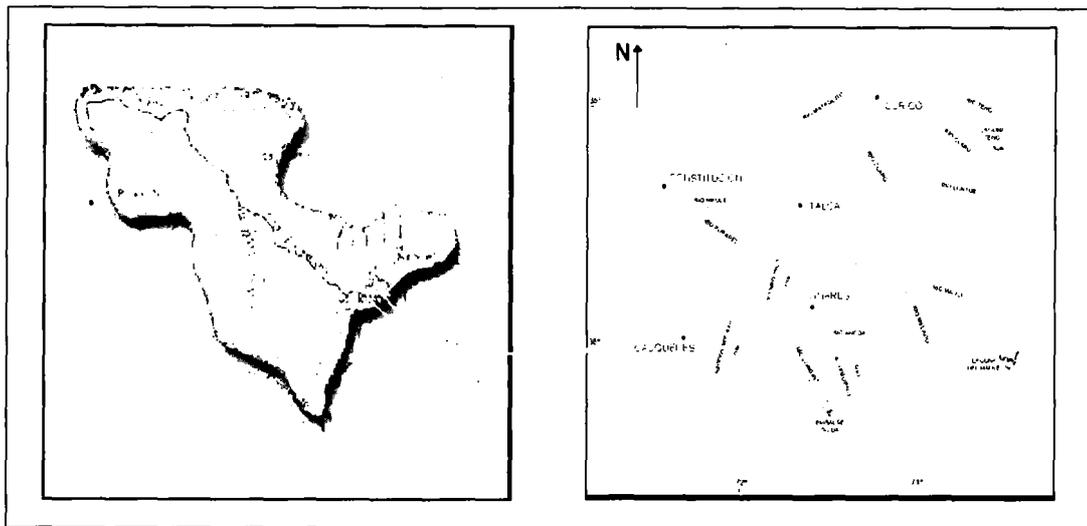


Figura 2. Mapa de ubicación de la cuenca del río Purapel.

Su cauce principal es el río Purapel, el cual se origina a 325 m.s.n.m en los 35° 26' Latitud Sur y los 72° 19' Longitud Oeste. En su inicio recibe los aportes de numerosas quebradas como las de Casas Quemadas, Cachaño, del Difunto y el Malulo; para luego en

su recorrido recibir afluentes de esteros como los del Toro, las Vegas, Hualli, Ranchillo, Sauzal, entre otros. Después de recorrer aproximadamente 77 km en sentido Sur y Sureste, desemboca en las aguas del río Perquilauquén.

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

El relieve de la cuenca está conformado por lomajes suaves y áreas planas especiales para asentamientos humanos y una agricultura de secano. La vegetación de la cuenca cuenta actualmente con vastas extensiones de plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don) producto de las forestaciones masivas ocurridas en los últimos años, además de vegetación nativa representada principalmente por especies asociadas a la llamada estepa de *Acacia caven* o espinal y a especies del tipo forestal esclerófilo, como quillay, peumo, entre otras.

El clima es de tipo mediterráneo, su régimen climático que lo caracteriza posee dos estaciones semejantes, con seis meses secos y seis meses h

úmedos. El régimen térmico de la cuenca presenta temperaturas máximas promedio de 28,5^o C en Enero y temperaturas mínimas promedio de 5,4^o 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.

Los suelos de la cuenca presentan una granulometría media a fina. Como consecuencia de roca impermeable existente muy cerca de la superficie, en los sectores inferiores del valle y que aflora en las lomas existentes, cabe la existencia de acuíferos compuestos por arena y grava entre los flancos del valle y los umbrales rocosos. Dichas

características hacen que la cuenca posea una permeabilidad catalogada por el MOP y DGA (1986) de baja a ausente, teniendo como consecuencia la casi nula existencia de aguas subterráneas.

Este estudio hidrogeológico determinó propiedades hidráulicas en el área del río Purapel, que indican una potencia de sedimentos de 50 m, una transmisibilidad estimada de 500 m²/día, valor que es mucho menor en los valles de la cordillera de la costa, que para la misma profundidad presentan 100 m²/día (MOP y DGA, 1986).

4.2. Estación fluviométrica Purapel en Nirivilo.

La cuenca del río Purapel cuenta con dos estaciones de registro fluviométrico: Purapel en Nirivilo y Purapel en Sauzal. Para el desarrollo de este estudio la estación utilizada fue la de Nirivilo.

Esta estación se encuentra ubicada a una altura de 96 m.s.n.m, entre los 35° 33' Latitud Sur y los 72° 05', Longitud Oeste. Funciona desde 1957 y está bajo el control de la Dirección General de Aguas, VII región. Desde el inicio de su funcionamiento cuenta con limnímetros y limnígrafos mecánicos, y actualmente también cuenta con un limnígrafo electrónico (datta logger).

5.0. METODOLOGÍA

5.1. Materiales.

En la elaboración del presente estudio se necesitaron los siguientes materiales y equipos:

- Base de datos, correspondiente a linmigramas, curvas de gastos y precipitaciones.
- Cartografía IGM de la cuenca, escala 1:50000, correspondiente a las cartas de Constitución, Pichamán, Sauzal y Melozal.
- Planímetro digital y red de puntos.
- Regla graduada.
- Equipos computacionales (Pc e impresoras).
- Programas computacionales para el desarrollo y análisis de la información y elaboración del informe final: Microsoft Word 97, Microsoft Excel 97 y el software estadístico Statgraphics plus v 1.4.

5.2. Metodología.

En este capítulo se presentan los pasos necesarios realizados para obtener los montos de las precipitaciones medias y las precipitaciones efectivas, con el fin de determinar los coeficientes de escorrentía y establecer la presencia de diferencias entre las décadas que abarcó la investigación.

Las fases metodológicas inherentes a la consecución de los resultados se dividieron en distintos tipos. En primer lugar estuvieron aquellas que permitieron la selección y depuración de la información lo que posibilitó la creación de la información base utilizada posteriormente. Éstas comprenden entre la sección 5.2.2. y 5.2.4. Las fases involucradas en los cálculos de las precipitaciones medias, escorrentías directas, precipitaciones efectivas y coeficientes de escorrentía abarcan desde 5.2.5. hasta 5.2.8. y finalmente se desarrolla la fase relacionada con el análisis estadístico de los resultados obtenidos, correspondiendo a la sección 5.2.9.

5.2.1. Revisión Bibliográfica.

En esta etapa se realizó una revisión y recopilación de la información necesaria para desarrollar este estudio. Esta comprendió básicamente dos áreas: hidrología y estadística. La información hidrológica está referida a temas relacionados con las precipitaciones, la escorrentía, los hidrogramas, los coeficientes de escorrentía y a las relaciones de la vegetación con las precipitaciones y la escorrentía, la cual es utilizada para desarrollar los capítulos 3, 5 y 7. La información estadística se basó esencialmente en el método de regresión lineal, el análisis de varianza y pruebas estadísticas de comparación de medias; la cual es utilizada básicamente en la elaboración del capítulo 5 y utilizada en los capítulos 6 y 7.

Junto con lo anterior se realizó una recopilación general de antecedentes sobre la zona de estudio, con el fin de caracterizar y contextualizar el lugar de desarrollo de la presente memoria.

5.2.2. Captura de datos.

La información requerida para la ejecución del presente estudio fue del tipo pluviométrica y fluviométrica. La información pluviométrica correspondió a las precipitaciones mensuales para las estaciones seleccionadas durante el periodo 1970 – 1990. La información fluviométrica utilizada fueron los limnigramas y curvas de gastos o descarga para el mismo periodo.

En esta etapa se procedió a seleccionar las estaciones pluviométricas y fluviométricas a utilizar, para posteriormente acceder a la información entregada para dichas estaciones. La selección de las estaciones pluviométricas y fluviométricas se realizó según los criterios expuestos por Cepeda (1982), citado por Marabolí (2000). Éstos se refieren a: a) representatividad de la cuenca en estudio, relacionado con la ubicación geográfica de las estaciones preseleccionadas; b) calidad de la información, prefiriendo a aquellas que posean menos vacíos y/o errores y c) el periodo observado, relacionado con los años y la confiabilidad de los registros.

La VII Región cuenta en la actualidad con alrededor de 40 estaciones meteorológicas para el control de las precipitaciones, de las cuales no más de 25, según Marabolí (2000), presentan un periodo de registros superior a 20 años; además posee 32 puntos de control fluviométrico. Ambos tipos de estaciones se encuentran bajo la custodia de la Dirección General de Aguas. Bajo estas circunstancias y, basándose en los criterios anteriores, además de su ubicación geográfica, de las tres estaciones pluviométricas preseleccionadas, fueron utilizadas dos y, de las estaciones de control fluviométrico, sólo se seleccionó una.

5.2.3. Confección de hidrogramas.

Para obtener la totalidad de hidrogramas del periodo en estudio, se procedió a la recopilación de la información contenida en los limnigramas y curvas de gastos, y posteriormente a partir de ambos, se confeccionaron los hidrogramas.

En primer lugar, se midió con regla sobre los limnigramas (como el de la figura 3), las alturas de agua correspondientes a cada hora. Las mediciones se terminaban de hacer para cada crecida cuando se estabilizaba la curva de bajada. Posteriormente, estas alturas se asociaron a las curvas de gastos, las cuales indican el valor del caudal para una determinada altura de agua. Así, teniendo a la altura de agua como factor común, se obtiene la relación de caudal (Q) v/s tiempo (t), necesaria para la confección de los hidrogramas.

Cada hidrograma resultó de la gráfica de la relación descrita en el párrafo anterior, correspondiendo al hidrograma total de la crecida.

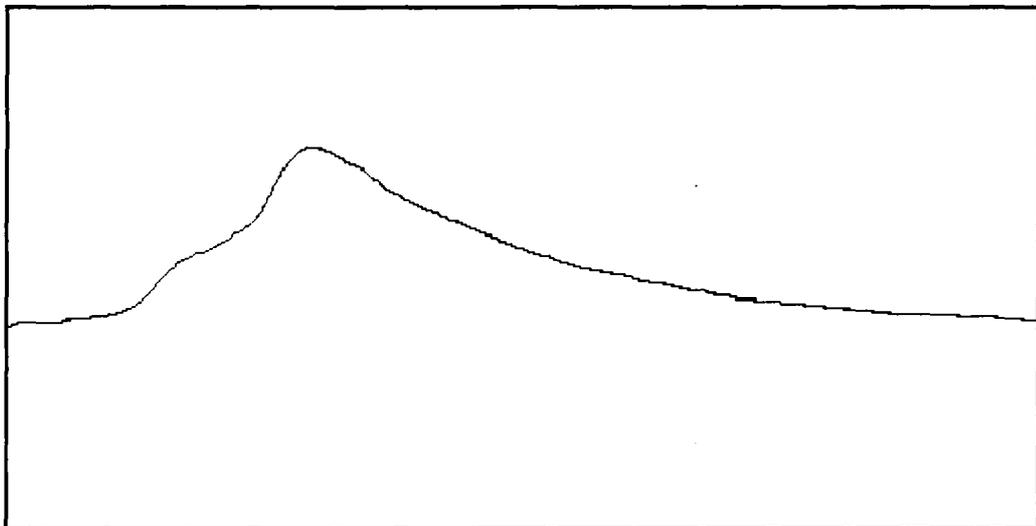


Figura 3. Limnigrama registrado para una crecida del río. El eje "x" representa al tiempo y el eje "y", las alturas de agua.

Es importante señalar que, y como se estipuló en el anteproyecto, el periodo inicial de estudio abarcaría las décadas del '70 y '80. No obstante la mala calidad de la información contenida por los limnigramas para algunos años de este periodo, determinó la decisión de extender la serie de años, abarcando 6 años de la década del '60, más específicamente entre los años 62/63 y 67/68.

5.2.4. Separación de hidrogramas.

El procedimiento de separación de los hidrogramas consistió en identificar y separar los distintos tipos de esorrentía que componen el hidrograma total de una crecida. Este proceso comenzó determinándose previamente en el hidrograma, el punto de inicio de cada crecida (punto A en la figura 4), que corresponde a aquel punto que difiere de la declinación del caudal recesivo previo.

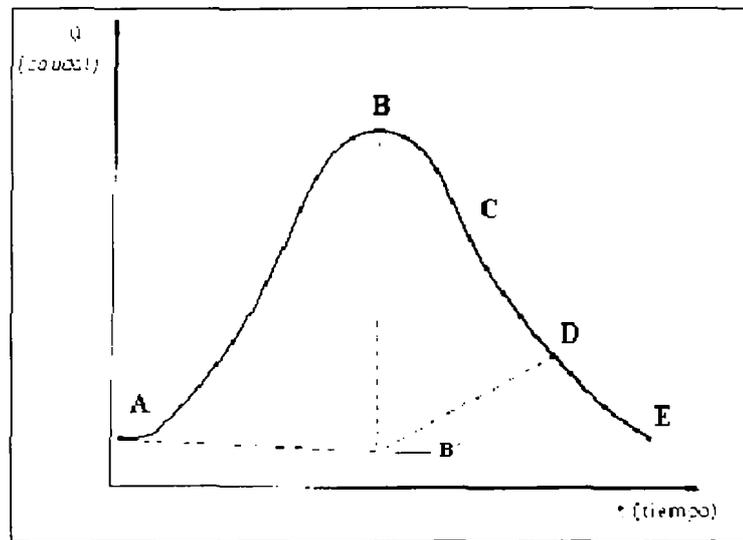


Figura 4. Forma típica de un hidrograma de crecida y sus características.

Luego, se procedió a determinar el punto donde cesaban los aportes de la escorrentía directa. Se tomaron los caudales, a partir del caudal punta, graficándolos como $\log(Q)$ v/s t . El resultado de este tipo de gráfico es una línea recta que presenta dos puntos de quiebre de la pendiente notorios (punto D en la figura 5), siendo el segundo punto el correspondiente al término de la escorrentía directa y del hidrograma de crecidas. Finalmente, luego de determinar los puntos de inicio y término del hidrograma, se hizo necesario separar los componentes de éste y definir la forma del caudal base. Para ello se siguió la tendencia que traía el caudal recesivo previo hasta antes de cada crecida, proyectándolo hasta unirlo con la proyección del caudal punta sobre el eje t (punto B' en la figura 4). Desde ahí se proyectó una línea recta hasta unirla con el segundo punto de quiebre de la curva de bajada del hidrograma, representado por el punto D en las figuras 4 y 5.

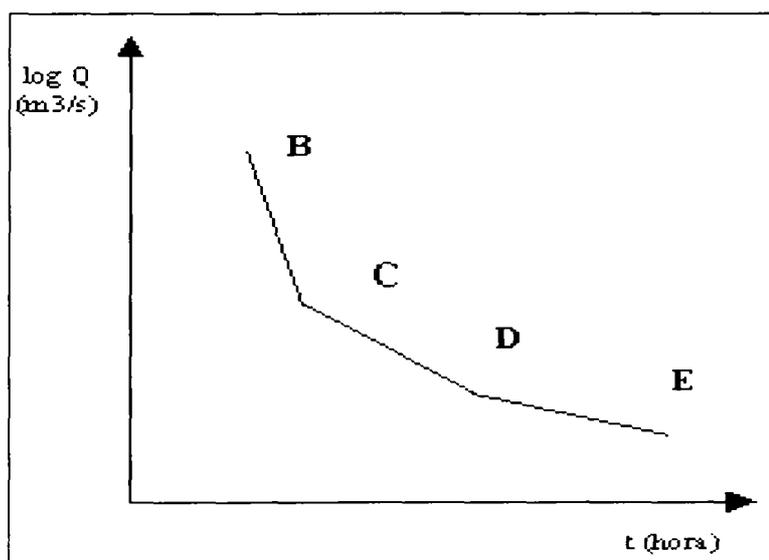


Figura 5. Gráfica semilogarítmica $\log(q)$ v/s t utilizada en la determinación del segundo punto de inflexión.

De la totalidad de los hidrogramas, hubo un gran número (170) en que no fue posible obtener el segundo punto de inflexión, por lo que se decidió estimarlo a través de los ya obtenidos, mediante el método de regresión lineal. Para ello se estableció una

correlación entre el punto de término del hidrograma, en horas, y el caudal máximo de la crecida (m^3/s). Este punto de término permitió estimar el punto de cese de la escorrentía directa. A las regresiones realizadas se les aplicaron algunos supuestos del método de mínimos cuadrados, como Normalidad, Homocedasticidad y Autocorrelación, junto con probar la significancia de los parámetros.

Supuestos de Regresión Lineal

- ***Normalidad***

Este supuesto supone que los residuos (errores) de la regresión están normalmente distribuidos (Gujarati, 1997). El cumplimiento de la normalidad se evaluó mediante un análisis gráfico (histograma de frecuencias y gráfico de probabilidad normal de residuos) y el test de Kolmogorov – Smirnov (K-S).

- ***Homocedasticidad***

La Homocedasticidad está referida a que los residuos generados por la función de regresión poseen varianza constante (Cid *et al.*,1990). La evaluación de este supuesto se realizó mediante el gráfico de residuos y el test de Goldfeld-Quandt.

- ***No autocorrelación***

Este supuesto se refiere a que no existe autocorrelación o correlación serial entre los residuos considerados en la función de regresión (Gujarati, 1997). Por lo tanto no debería existir una dependencia entre una serie de observaciones ordenadas con respecto al tiempo. La verificación se hizo a través de un gráfico de serie de tiempo y el test de Durbin-

Watson.

También existió la posibilidad de realizar una depuración estadística de la información, eliminando los puntos más influyentes que perjudicaban un mejor ajuste, pudiendo eliminar hasta el 5% de la información según la literatura técnica (Cid *et al*, 1990; Gujatari, 1997).

La elección del modelo seleccionado se hizo sobre la base del cumplimiento de los supuestos y al mayor R^2 .

5.2.4.1. Diferenciación de crecidas.

Las crecidas se separaron según las magnitudes de sus caudales máximos y la dificultad de determinar el segundo punto de inflexión, que comúnmente fueron a la par. Así se clasificaron en tres grupos: a) las grandes crecidas, con caudales punta generalmente sobre los 50 m³/s y segundo punto determinado según la metodología tradicional; b) crecidas medianas, entre 25 y 50 m³/s, para las cuales se utilizó tanto la metodología tradicional como el método de regresión lineal y, c) las pequeñas, con caudales punta menores a 25 m³/s, y determinado el punto de cese de la escorrentía directa en su gran mayoría, por el método de regresión lineal.

5.2.5. Cálculo de los volúmenes de escorrentía directa.

Con la separación de los hidrogramas ya hecha, se calcularon para cada crecida, y luego para cada mes y año, los volúmenes de escorrentía directa. Para ello se calcularon previamente los volúmenes totales y subterráneos correspondientes a cada hidrograma.

El volumen total para una crecida fue obtenido mediante la suma de todos los valores horarios de caudal Q (m^3/s), entre el inicio y el término de la escorrentía superficial. De esta manera:

$$V_T = \Delta t * \sum_{i=1}^n Q_i * 3600$$

donde:

V_T : Volumen de escorrentía total de la crecida (m^3).

Q_i : Caudal correspondiente a la hora i del hidrograma de crecida (m^3/s).

Δt : Intervalo de tiempo (1 hr).

Para obtener el volumen de escorrentía subterránea se procedió a dividirlo en dos volúmenes, A y B. El volumen de A corresponde al aporte subterráneo entre el inicio del hidrograma y la proyección del caudal punta en el eje t , y el de B entre esta proyección y el término del hidrograma. Estos volúmenes se determinaron en forma matemática, asemejando su forma a la de un trapecio. Así:

$$VolA = [(Q1 + Q2) / 2] * \Delta t1 * 3600$$

$$VolB = [(Q2 + Q3) / 2] * \Delta t2 * 3600$$

donde:

$VolA$: Volumen de escorrentía correspondiente hasta la proyección del caudal punta (m^3).

$VolB$: Volumen de escorrentía correspondiente luego de la proyección del caudal punta (m^3).

$Q1$: caudal de inicio del hidrograma (m^3/s).

$Q2$: caudal resultante del punto de intersección (m^3/s).

$Q3$: caudal de término del hidrograma (m^3/s).

$\Delta t1$: intervalo de tiempo transcurrido entre $Q1$ y $Q2$ (hr).

$\Delta t2$: intervalo de tiempo transcurrido entre $Q2$ y $Q3$ (hr).

El volumen total de la escorrentía subterránea (V_{sub}) queda dado por la suma de los dos volúmenes, $VolA$ y $VolB$.

Finalmente se determinó el volumen generado por la escorrentía directa. Este volumen se obtiene al sustraer del volumen total de la crecida, el volumen perteneciente a la escorrentía subterránea. Así, el volumen para cualquier crecida quedó dado como:

$$Ved_{ijk} = (Vtotal_{ijk} - Vsub_{ijk})$$

donde:

Ved_{ijk} : Volumen de escorrentía directa para una crecida i , en el mes j , durante el año k (m^3).

$Vtotal_{ijk}$: Volumen de escorrentía total para una crecida i , en el mes j , durante el año k (m^3).

$Vsub_{ijk}$: Volumen de escorrentía subterránea para una crecida i , en el mes j , durante el año k (m^3).

con:

$i=1, \dots, n$.

$j=1, \dots, 12$.

$k=1, \dots, 26$.

5.2.5.1. Cálculo de volúmenes mensuales y anuales.

Luego de obtener los volúmenes asociados a cada crecida, se procedió a agruparlos por mes y por año, con el fin de determinar los volúmenes totales de escorrentía directa, a nivel mensual y anual.

En este marco, el volumen total de escorrentía directa se obtuvo mediante la suma de los volúmenes de las crecidas presentes en cada año hidrológico. No todas las crecidas se desarrollaron en el intervalo de un mes, sino que hubo también casos en que éstas abarcaron dos meses, es decir, el fin de un mes y el comienzo del siguiente. Para obtener los volúmenes de escorrentía perteneciente a cada mes, fue necesario realizar una división del hidrograma para las crecidas.

Para poder determinar lo anterior se calculó el Tiempo de concentración o de retraso (T_c) para la cuenca, el cual corresponde al tiempo que demora una gota o lámina de agua desde el punto más alejado hasta el punto de salida o desagüe de la cuenca (Pizarro *et al.*, 1993; Chow *et al.*, 1994). Con su determinación se puede establecer “cuántas horas” del mes anterior están contenidas en el siguiente mes. Entre la gran variedad de T_c citados en la literatura hidrológica, se escogió, por su facilidad de uso y validez de sus resultados, el T_c de Kirpich o californiano. Matemáticamente se expresa como:

$$T_c = \frac{0.066 * L^{0.77}}{J^{0.385}}$$

con

$$J = \frac{C \text{ máx} - C \text{ mín}}{L}$$

donde:

Tc: Tiempo de concentración de Kirpich (hr).

L: Largo del cauce principal (Km).

J: Razón entre la diferencia de la cota del punto más alejado de la cuenca (Cmáx) y el punto de salida o desagüe de la cuenca (Cmín) y el largo del cauce principal (L).

Para cada mes el volumen de escorrentía directa quedó dado por la suma de los volúmenes de las crecidas en el mes y si es que lo hay, de los volúmenes de las crecidas intermensuales correspondientes a cada mes definidas por el tiempo de concentración de la cuenca, y finalmente, se procedió a calcular los volúmenes totales anuales, los que se determinaron mediante la suma de los valores mensuales de este tipo de escorrentía. Esto se expresa como:

$$V_j = \sum Vm_{ij}$$

con $i= 1, \dots, 12$.

$j= 1, \dots, 26$.

donde:

V_j : Volumen de escorrentía directa para el año j (m^3).

Vm_{ij} : Volumen mensual de escorrentía directa para el mes i , durante el año j (m^3).

5.2.6. Determinación de las precipitaciones efectivas.

Una vez calculados los volúmenes de escorrentía directa, éstos se relacionaron con el área de la cuenca, para así obtener los montos de las precipitaciones efectivas. Estos montos resultan del cociente entre el volumen de escorrentía directa y el área de la cuenca. La precipitación efectiva para un mes se calcula como:

$$Pe_{ij} = \frac{V_{ij}}{A}$$

donde:

Pe_{ij} : Precipitación efectiva para un mes i , para un año j (m)

A : Área de la cuenca (m^2).

Las precipitaciones efectivas anuales corresponden a la suma de las precipitaciones efectivas de los meses en que hubo este tipo de precipitación.

5.2.7. Cálculo de las precipitaciones medias mensuales.

Para el cálculo de las precipitaciones medias se necesitó realizar previamente una revisión de los datos pluviométricos, con el objetivo de corregir y/o completar la información para el posterior cálculo de las precipitaciones.

5.2.7.1. Corrección y completación de datos faltantes.

La corrección de inconsistencias en la información pluviométrica se hace comúnmente mediante el uso de curvas de doble masa o doble acumulada, método que contempla para su realización el contar con una estación patrón, la cual se relaciona mediante una gráfica con la estación que merece dudas de sus registros. El resultado debería ser una gráfica con una relación estable de proporcionalidad entre la estación patrón y la dudosa. Si se presenta algún tipo de error sistemático, se debe corregir con un

coeficiente, que es el cociente entre tangentes de la zona de la gráfica sin error sistemático y la zona con error sistemático.

Para el caso del presente estudio, no fue necesaria la verificación de la información mediante este método, pues la D.G.A. realiza constantemente la corrección de la información.

La completación de los datos faltantes se hizo en virtud de la información contenida por las estaciones seleccionadas y según la estación que necesitase completarse. Dado la falta de calidad de los datos pluviométricos de la estación Faro Carranza y la escasez de información de la estación Constitución, los datos faltantes de la estación Nirivilo procedieron a completarse según los promedios históricos, ya que no fue posible la aplicación de ningún otro método hidrológico. Los meses sin información fueron completados con los promedios de los meses de la serie de años que sí tenían registro pluviométrico. Del total de 312 meses que abarcó el estudio en su totalidad, sólo en 16 fue necesario completar con el método recién señalado.

La estación Constitución presentó falta de la información para todo el periodo en estudio, por lo que se debió completar en su totalidad. El método escogido fue el de completación por correlación lineal, debido a la falta de estaciones para la aplicación de otra metodología y ya que es uno de los métodos más recomendados (Pizarro *et al*, 1993; UNESCO, 1982 citado por Lucero, 1997). Para ello se utilizó la información existente de la estación Constitución desde Julio de 1992 hasta Marzo del 2000, correlacionándola con la misma información correspondiente a la estación Nirivilo.

A las regresiones probadas se les realizó la misma verificación de los supuestos y pruebas de significancia que las descritas en la sección 4 de este mismo capítulo.

5.2.7.2. Cálculo de las precipitaciones medias.

La determinación de las precipitaciones medias mensuales y anuales caídas sobre la cuenca del río Purapel, se hizo mediante el método de los Polígonos de Thiessen (Linsley *et al*, 1988; Pizarro *et al*, 1993; Aparicio, 1997). Este método asigna a cada estación una ponderación de representatividad en función de la superficie. Para ello, en primer lugar, se ubicaron las estaciones consideradas en un plano cartográfico uniéndolas mediante líneas rectas. Luego se trazaron las mediatrices hasta que se intersectaron, formando polígonos alrededor de cada estación, como los que se muestran en la figura 6. Estos polígonos determinaron las superficies de influencia de cada una de ellas. Finalmente, se midieron las superficies y se incorporaron a la fórmula de cálculo. De esta manera, las precipitaciones medias se expresan como:

$$Pm_{ij} = \frac{\sum P_{ijl} * S_l}{\sum S_l}$$

La precipitación media anual resultante es:

$$Pm_j = \sum Pm_{ij}$$

donde:

Pm_{ij} : Precipitación media mensual para un mes i , en un año j (mm).

P_{ijl} : Precipitación mensual para un mes i , en un año j ; para la estación l (mm).

Pm_j : Precipitación media anual para un año j (mm).

S_l : Superficie correspondiente a la estación l (km²).

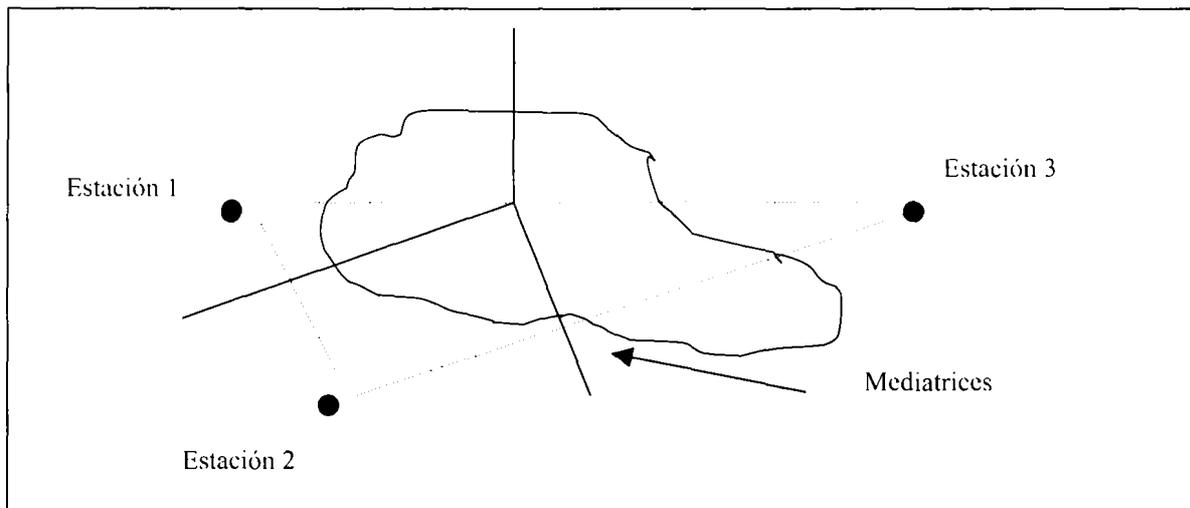


Figura 6. Trazado hipotético de lo polígonos de Thiessen.

El uso de este método se debió a que, según Ramírez (1998), es seguro y confiable para estimar las precipitaciones medias en la VII región; y además, ya ha sido utilizado en otros estudios en la misma cuenca (Tobar, 2000; Sandoval, 2000) como en otras zonas geográficas (Marabolí, 2000).

5.2.7.3. Diferenciación de meses húmedos y secos.

Luego de la estimación de las precipitaciones medias mensuales, se hizo una diferenciación de los meses entre lluviosos y secos. Esta diferenciación no se basó en ninguna especificación más que en los montos estimados y la periodicidad en que ocurrieron las precipitaciones para cada mes. Así, se diferenció como meses lluviosos a los meses entre Abril y Noviembre, y los meses secos entre Diciembre y Marzo.

5.2.8. Cálculo de los coeficientes de escorrentía.

Los resultados de los coeficientes de escorrentía (C), mensuales y anuales, se obtuvieron mediante el cuociente entre las precipitaciones efectivas y las precipitaciones medias (Pizarro *et al.*, 1986). Para un mes, el coeficiente de escorrentía esta dado como:

$$C_{ij} = \frac{Pe_{ij}}{P_{ij}}$$

donde:

C_{ij} : Coeficiente de escorrentía para un mes i , en un año j .

El coeficiente de escorrentía anual es el resultado del cuociente entre las precipitaciones efectivas anuales y las precipitaciones medias areales anuales.

5.2.9. Análisis de resultados.

El análisis de resultados se realizó en base a los coeficientes de escorrentía resultantes, con el fin de detectar a través de análisis estadísticos y gráficos la existencia de algún tipo de diferencias en el tiempo, lo que permitiría inferir acerca de una disminución de los aportes de las proporciones de escorrentía durante el periodo estudiado y de elementos de gestión forestal ejecutados sobre la cuenca. Para ello se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), pruebas t de comparación de medias y la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. El análisis gráfico se realizó mediante promedios móviles.

La extensión de la serie de años permitió realizar más comparaciones estadísticas,

junto con tener una base más amplia de decisión con respecto a la presencia de diferencias en el tiempo de los coeficientes de escorrentía.

5.2.9.1. Análisis estadístico.

Las pruebas estadísticas realizadas se evaluaron mediante pruebas de hipótesis, la cual es una regla o procedimiento para decidir la aceptación o rechazo de la hipótesis nula (H_0). Esta decisión se tomó para todas las pruebas realizadas en relación con el valor p , que corresponde al valor más pequeño que puede tomar el nivel de significancia para que se pueda rechazar H_0 (Cid *et al*, 1990; Montgomery y Rungen, 1996).

De las pruebas propuestas en un comienzo, solo fue posible utilizar la prueba U de Mann-Whitney, pues para el ANDEVA se detectó el no cumplimiento de supuestos básicos de este tipo de análisis como la normalidad de los residuos y la igualdad de las varianzas. Además, se determinaron coeficientes de variación para cada una de las muestras superiores al 100%, invalidando los resultados de las pruebas t . Por consiguiente, estas dos pruebas se eliminaron del análisis estadístico. Sin embargo, se añadió una nueva prueba no paramétrica, con el fin de tener una base más sólida de decisión. Esta prueba corresponde a una de comparación de medianas, también llamada prueba del signo de Wilcoxon.

5.2.9.1.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.

Esta prueba se utilizó para ver la presencia de diferencias entre las poblaciones comparadas (décadas). Su uso se debió a que evita las suposiciones exigidas por la prueba t , como la distribución normal de los datos, y no se concentra en ningún parámetro de la población. Las pruebas realizadas correspondieron a las de muestras grandes, con $n \geq 10$.

- **Prueba U para muestras grandes**

La forma de cálculo de los distintos U se realiza de la misma forma tanto para muestras chicas como grandes, pero cuando se está en presencia de muestras grandes ($n > 10$), la distribución de U se asemeja a una distribución normal, comparándose el menor U, entre U_a y U_b , con un valor Z de tabla. El valor Z_c , se obtiene de:

$$E(U) = \frac{n_1 * n_2}{2}$$

$$V(U) = \frac{n_1 * n_2 * (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

luego Z:

$$Z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{V(U)}}$$

Finalmente, se busca en una tabla correspondiente a la distribución normal la probabilidad (valor p) asociada al Z calculado y se compara con el nivel de significancia.

La prueba de hipótesis se establece como:

$$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$$

$$H_a: \bar{x}_1 > \bar{x}_2$$

H_0 : Los coeficientes de escorrentía de la población A son iguales a los de la población B.

H_a : Los coeficientes de escorrentía de la población A son mayores que los de la población B.

Regla de decisión (con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$):

Si $p \geq \alpha \Rightarrow$ Se acepta la Hipótesis nula.

Si $p < \alpha \Rightarrow$ Se rechaza la Hipótesis nula.

5.2.9.1.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.

Esta prueba cumple el mismo objetivo que la prueba U , es decir, verificar las diferencias de distribución de dos poblaciones. Al ser una prueba no paramétrica no se centra en ningún parámetro de la población. Esta prueba puede ser utilizada en vez de la prueba t debido a que como la distribución normal es simétrica, la media de esta distribución corresponde a la mediana (Mendenhall y Reinmuth, 1981).

La prueba utilizada corresponde a la prueba del signo para muestras grandes, con $n > 20$. Ésta funciona de la siguiente forma. En primer lugar, se juntan las muestras a comparar, siendo estas X_{1j} y X_{2j} . Luego seorean y se obtienen las diferencias para cada par, $D_j = X_{1j} - X_{2j}$. Después se clasifican estas D_j diferencias en orden ascendente, en cuanto a sus valores absolutos y se les asignan rangos, para luego asignar los signos obtenidos de las diferencias a cada rango, obteniéndose W^+ y W^- , que corresponden a la suma de rangos positivos y negativos respectivamente. Después de esto, se selecciona W , que corresponde al valor mínimo entre W^+ y W^- .

Para muestras grandes, se puede realizar una aproximación a la distribución normal donde:

$$\mu = \frac{n_1(n_1 + 1)}{4}$$

$$\sigma^2 = \frac{n_1(n_1 + 1)(2n_1 + 1)}{24}$$

Luego

$$Z = \frac{W - \mu}{\sigma^2}$$

La formulación de la prueba de hipótesis queda de la siguiente manera:

$$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$$

$$H_a: \bar{x}_1 > \bar{x}_2$$

H_0 : No existen diferencias entre los coeficientes de escorrentía para las poblaciones A y B.

H_a : Existen diferencias entre los coeficientes de escorrentía para las poblaciones A y B.

Para los Z calculados, se busca en una tabla correspondiente a la distribución normal la probabilidad (valor p) asociada al Z calculado y se compara con el nivel de significancia.

Regla de decisión (con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$):

Si $p \geq \alpha \Rightarrow$ Se acepta la Hipótesis nula.

Si $p < \alpha \Rightarrow$ Se rechaza la Hipótesis nula.

5.2.9.2. Análisis gráfico.

Este análisis se realizó mediante los promedios móviles, una técnica de suavizamiento de la información que permite cancelar el efecto de la variación aleatoria y revelar las componentes buscadas (Mendenhall y Reinmuth, 1981).

La serie resultante, presenta un punto por cada unidad de tiempo (mes, año), que es el promedio de las observaciones calculado para un periodo específico de tiempo antes y después del mes en cuestión. El efecto provocado por el tratamiento de la información es

una serie más suave, con oscilaciones menores y más susceptible de revelar tendencias o patrones en el tiempo. La forma de calcular un promedio móvil en un tiempo t sobre M periodos de tiempo es (Mendenhall y Reinmuth, 1981):

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

donde:

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

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

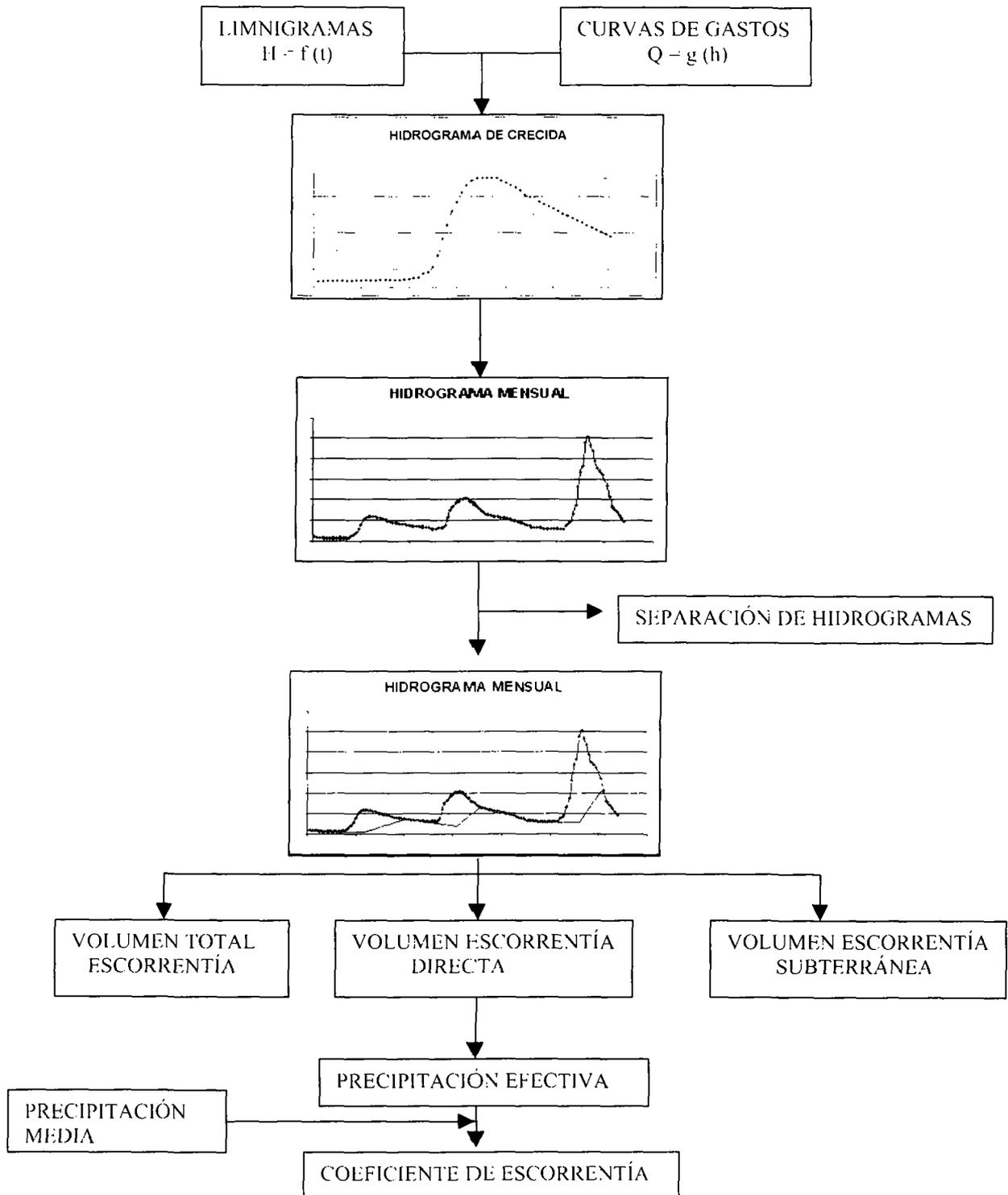
M : magnitud de agrupación de datos.

En esta memoria, para el cálculo de los promedios móviles, los coeficientes de escorrentía se agruparon de a tres ($M=3$), resultando como máximo, series de hasta 24 datos.

5.2.10. Síntesis de la metodología expuesta.

A continuación y a modo de sintetizar lo anteriormente expuesto se presenta un diagrama de flujo que representa la forma de obtención de los resultados finales. Este diagrama representa lo que se hizo para cada mes de cada año que abarcó el estudio, realizando en total 312 repeticiones del diagrama que se presenta en la página siguiente.

DIAGRAMA DE FLUJOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA



Fuente: Elaboración propia.

6.0. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del presente capítulo se muestran en el siguiente orden. Primero se muestran los resultados relacionados con la selección de la información y la confección de los hidrogramas, para luego presentar los resultados de cada una de las variables de interés. Finalmente se presentan los resultados estadísticos y gráficos de los coeficientes de escorrentía.

6.1. Selección de la información y confección de hidrogramas de crecida.

En la tabla 1, se presentan las estaciones seleccionadas según los criterios expuestos en el capítulo 4, y utilizadas para la obtención de los resultados posteriores. Junto a ello se presenta la ubicación geográfica de cada una de las estaciones.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas y fluviométricas seleccionadas.

Estaciones	Seleccionadas	Utilizadas	Ubicación geográfica	
			Latitud S	Longitud O
Pluviométricas	3	Constitución	35° 21'	72° 26'
		Nirivilo	35° 33'	72° 06'
Fluviométricas	2	Nirivilo	35° 34'	72° 05'

Fuente: Elaboración propia.

La información entregada por la tabla 2, corresponde al total de crecidas registradas por los limnigramas para el total del periodo estudiado. También se añade la información correspondiente a las metodologías utilizadas en la separación de hidrogramas y el número respectivo de crecidas.

Tabla 2. Años utilizados por década, total de crecidas y metodología utilizada en la separación de hidrogramas.

Década de estudio	Años Utilizados	Gráficos	Regresiones lineales	Total crecidas Analizadas
60	6	38	40	78
70	10	60	54	114
80	10	118	76	194
Total	26	216	170	386

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del método de regresión lineal, el modelo que mejor se ajustó a los datos, para estimar el segundo punto de quiebre de la curva de bajada, en el caso en que no fue posible hacerlo gráficamente, fue un modelo con transformación logarítmica de las variables, el cual presentó un R^2 de 0,81714. El modelo resultante fue el siguiente:

$$\text{Log}(Y) = 1,6451 - 0,2178 * \log(X)$$

donde :

Y: Hora de término de la escorrentía superficial o segundo punto de inflexión (hr).

X: Caudal máximo de la crecida (m^3/s).

La verificación de los supuestos de mínimos cuadrados se presenta en el Apéndice 1.

6.2. Determinación de las precipitaciones medias areales.

6.2.1. Completación de datos faltantes, Estación Nirivilo.

Los montos totales de precipitaciones mensuales y anuales se presentan en la página siguiente, en tabla 3. Debido a la presencia de meses con información faltante, éstos se

procedieron a completar mediante los promedios históricos. Del total de 312 meses, sólo 16 fueron completados con dicha metodología.

Tabla 3. Precipitaciones mensuales y anuales para la estación Nirivilo (mm).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	34,0	20,0	201,0	31,0	85,0	30,0	38,0	0,0	0,0	0,0	3,0	*14,6	456,6
63/64	11,0	88,0	149,0	276,0	271,0	252,0	10,5	75,0	0,0	8,0	0,0	0,0	1140,5
64/65	8,0	49,0	76,0	91,0	145,0	16,0	1,0	27,0	33,0	0,0	0,0	0,0	446,0
65/66	144,0	*153,7	101,0	15,0	376,0	7,0	45,0	24,0	9,0	0,0	0,0	0,0	874,7
66/67	109,5	54,0	424,0	173,0	158,0	27,0	18,0	13,0	92,0	3,0	18,0	0,0	1089,5
67/68	1,0	122,5	39,5	37,5	42,0	67,0	20,0	11,0	2,0	0,0	0,0	15,0	357,5
70/71	5,0	125,0	279,0	254,5	23,0	56,5	12,0	4,5	0,0	15,0	0,0	0,0	774,5
71/72	52,0	106,0	35,0	157,0	115,0	35,0	37,0	*27,1	0,0	0,0	0,0	37,0	601,1
72/73	12,0	304,0	344,0	170,0	220,0	168,0	74,0	*27,1	0,0	0,0	0,0	11,0	1330,1
73/74	64,0	205,0	106,0	223,0	19,0	3,0	49,0	*27,1	0,0	9,0	0,0	1,0	706,1
74/75	*55,4	230,0	533,0	50,0	12,0	32,0	13,0	31,0	18,0	0,0	16,0	1,0	991,4
75/76	48,0	148,0	186,5	353,0	37,0	14,0	21,5	20,5	7,5	5,0	0,0	0,0	841,0
76/77	*55,4	67,0	193,0	52,5	85,0	95,0	158,0	43,0	0,0	14,0	0,0	3,0	765,9
77/78	26,6	126,4	192,5	374,0	129,0	26,0	90,0	24,0	0,0	0,0	7,0	0,0	995,5
78/79	0,5	79,0	157,5	410,5	19,0	117,5	22,5	118,0	0,0	5,5	6,0	0,0	936,9
79/80	57,5	83,5	21,0	331,0	116,0	97,0	*41,9	41,0	37,0	0,0	57,0	4,0	886,9
80/81	291,0	242,5	276,0	224,5	72,0	56,5	*41,9	12,0	24,0	7,5	6,0	20,0	1273,9
81/82	104,5	379,5	35,0	103,5	66,0	53,0	2,0	*27,1	0,0	19,0	0,0	13,0	802,6
82/83	9,5	346,5	325,0	277,0	177,0	191,5	75,0	*27,1	0,0	16,0	4,0	0,0	1448,6
83/84	19,0	126,0	288,0	184,5	131,0	46,0	*41,9	*27,1	0,0	8,0	6,5	4,0	882,0
84/85	19,0	294,0	165,0	502,0	131,0	161,0	76,0	2,0	0,0	2,0	0,0	8,0	1360,0
85/86	37,5	133,0	133,5	190,5	17,5	46,0	34,0	8,5	0,0	3,5	0,0	22,5	626,5
86/87	138,0	311,4	297,1	63,5	169,7	16,1	13,5	110,8	0,0	0,0	5,0	35,3	1160,5
87/88	11,0	138,4	83,0	500,7	196,3	89,8	19,6	*27,1	0,0	0,0	0,0	73,0	1138,9
88/89	7,0	40,0	203,0	210,0	196,2	56,5	6,0	14,0	0,0	0,0	0,0	3,0	735,7
89/90	*55,4	25,0	138,5	185,5	101,0	30,0	12,0	*27,1	21,0	7,0	0,0	115,0	717,5

*: Valores de precipitaciones completados mediante el método de Promedios históricos.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Completación de datos faltantes, estación Constitución.

La estación Constitución es relativamente nueva, por lo que sólo cuenta con registros desde 1992. Debido a esta situación se debió estimar los valores de precipitación

para todo el periodo en estudio anterior a 1992, utilizando el método de regresión lineal. En las tablas 15 y 16 del Apéndice 2, se presentan las precipitaciones entregadas por la D.G.A. y las utilizadas para estimar el periodo total. El modelo de regresión que presentó un mejor ajuste para los datos fue un modelo con transformación de raíz y sin intercepto. Est modelo arrojó un R^2 de 0,9093, y fue el siguiente:

$$y = 0,895053 * \sqrt{x}$$

donde:

y: Precipitaciones mensuales estimadas para la estación Constitución (mm).

x: Precipitaciones mensuales de la estación Nirivilo (mm).

Tabla 4. Completación de precipitaciones estación Constitución (mm).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	27,2	16,0	161,0	24,8	68,1	24,0	30,4	0,0	0,0	0,0	2,4	11,7	365,8
63/64	8,8	70,5	119,4	221,1	217,1	201,9	8,4	60,1	0,0	6,4	0,0	0,0	913,7
64/65	6,4	39,3	60,9	72,9	116,2	12,8	0,8	21,6	26,4	0,0	0,0	0,0	357,3
65/66	115,4	123,1	80,9	12,0	301,2	5,6	36,1	19,2	7,2	0,0	0,0	0,0	700,7
66/67	87,7	43,3	339,7	138,6	126,6	21,6	14,4	10,4	73,7	2,4	14,4	0,0	872,8
67/68	0,8	98,1	31,6	30,0	33,6	53,7	16,0	8,8	1,6	0,0	0,0	12,0	286,4
70/71	4,0	100,1	223,5	203,9	18,4	45,3	9,6	3,6	0,0	12,0	0,0	0,0	620,5
71/72	41,7	84,9	28,0	125,8	92,1	28,0	29,6	21,7	0,0	0,0	0,0	29,6	451,9
72/73	9,6	243,5	275,6	136,2	176,2	134,6	59,3	21,7	0,0	0,0	0,0	8,8	1056,8
73/74	51,3	164,2	84,9	178,6	15,2	2,4	39,3	21,7	0,0	7,2	0,0	0,8	564,9
74/75	44,4	184,3	427,0	40,1	9,6	25,6	10,4	24,8	14,4	0,0	12,8	0,8	793,4
75/76	38,5	118,6	149,4	282,8	29,6	11,2	17,2	16,4	6,0	4,0	0,0	0,0	673,7
76/77	44,4	53,7	154,6	42,1	68,1	76,1	126,6	34,4	0,0	11,2	0,0	2,4	611,2
77/78	21,3	101,3	154,2	299,6	103,3	20,8	72,1	19,2	0,0	0,0	5,6	0,0	797,5
78/79	0,4	63,3	126,2	328,9	15,2	94,1	18,0	94,5	0,0	4,4	4,8	0,0	749,8
79/80	46,1	66,9	16,8	265,2	92,9	77,7	33,6	32,8	29,6	0,0	45,7	3,2	707,3
80/81	233,1	194,3	221,1	179,9	57,7	45,3	33,6	9,6	19,2	6,0	4,8	16,0	1004,5
81/82	83,7	304,0	28,0	82,9	52,9	42,5	1,6	21,7	0,0	15,2	0,0	10,4	632,6
82/83	7,6	277,6	260,4	221,9	141,8	153,4	60,1	21,7	0,0	12,8	3,2	0,0	1160,5
83/84	15,2	100,9	230,7	147,8	104,9	36,9	33,6	1,6	0,0	6,4	5,2	3,2	683,3
84/85	15,2	235,5	132,2	402,2	104,9	129,0	60,9	6,8	0,0	1,6	0,0	6,4	1088,3
85/86	30,0	106,5	106,9	152,6	14,0	36,9	27,2	88,8	0,0	2,8	0,0	18,0	565,8
86/87	110,6	249,5	238,0	50,9	136,0	12,9	10,8	21,7	0,0	0,0	4,0	28,3	834,3
87/88	8,8	110,9	66,5	401,1	157,3	71,9	15,7	11,2	0,0	0,0	0,0	58,5	843,4
88/89	5,6	32,0	162,6	168,2	157,2	45,3	4,8	21,7	0,0	0,0	0,0	2,4	597,5
89/90	44,4	20,0	111,0	148,6	80,9	24,0	9,6	12,0	16,8	5,6	0,0	92,1	473,0

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Estimación de las precipitaciones medias areales utilizando los polígonos de Thiessen.

Luego de la delimitación de la cuenca y la ubicación en el plano de las estaciones seleccionadas, se determinó las superficies de influencia para cada estación. Esta información se detalla en la siguiente página, en la tabla 5.

Tabla 5. Superficies de influencia de cada estación y asignación de pesos relativos.

Estación	Superficie de influencia (Km ²)	Peso relativo de la estación
Nirivilo	233	0.8996
Constitución	26	0.1004
Total	259	1

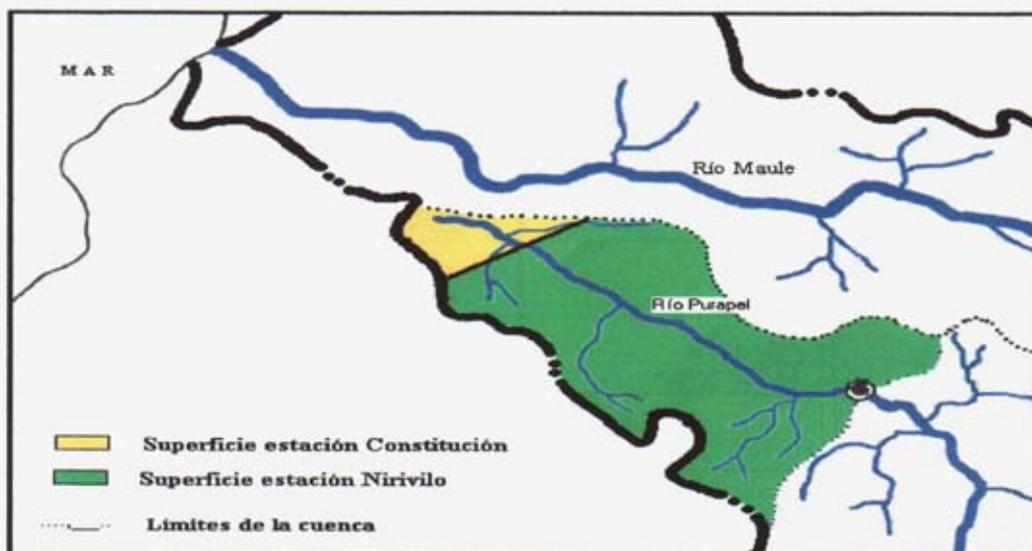


Figura 7. Resultado de la aplicación de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca del río Purapel.

La estimación de las precipitaciones medias areales para la cuenca, luego de la aplicación de los resultados obtenidos por los polígonos de Thiessen, para el periodo total mensual y anual, quedó determinada de la siguiente forma, tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Precipitaciones medias areales para la cuenca del Río Purapel (mm).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	33,3	19,6	197,0	30,4	83,3	29,4	37,2	0,0	0,0	0,0	2,9	14,3	447,5
63/64	10,8	86,2	146,0	270,5	265,6	247,0	10,3	73,5	0,0	7,8	0,0	0,0	1117,7
64/65	7,8	48,0	74,5	89,2	142,1	15,7	1,0	26,5	32,3	0,0	0,0	0,0	437,1
65/66	141,1	150,6	99,0	147,0	368,5	6,9	44,1	23,5	8,8	0,0	0,0	0,0	989,5
66/67	107,3	52,9	415,5	169,5	154,8	26,5	17,6	12,7	90,2	2,9	17,6	0,0	1067,7
67/68	1,0	120,1	38,7	36,8	41,2	65,7	19,6	10,8	2,0	0,0	0,0	14,7	350,4
70/71	4,9	122,5	273,4	249,4	22,5	55,4	11,8	4,4	0,0	14,7	0,0	0,0	759,0
71/72	51,0	103,9	34,3	153,9	112,7	34,3	36,3	26,6	0,0	0,0	0,0	36,3	589,1
72/73	11,8	297,9	337,1	166,6	215,6	164,6	72,5	26,6	0,0	0,0	0,0	10,8	1303,5
73/74	62,7	200,9	103,9	218,5	18,6	2,9	48,0	26,6	0,0	8,8	0,0	1,0	692,0
74/75	54,3	225,4	522,4	49,0	11,8	31,4	12,7	30,4	17,6	0,0	15,7	1,0	971,6
75/76	47,0	145,0	182,8	346,0	36,3	13,7	21,1	20,1	7,4	4,9	0,0	0,0	824,2
76/77	54,3	65,7	189,1	51,5	83,3	93,1	154,8	42,1	0,0	13,7	0,0	2,9	750,6
77/78	26,1	123,9	188,7	366,5	126,4	25,5	88,2	23,5	0,0	0,0	6,9	0,0	975,6
78/79	0,5	77,4	154,4	402,3	18,6	115,2	22,1	115,6	0,0	5,4	5,9	0,0	917,3
79/80	56,4	81,8	20,6	324,4	113,7	95,1	41,1	40,2	36,3	0,0	55,9	3,9	869,2
80/81	285,2	237,7	270,5	220,0	70,6	55,4	41,1	11,8	23,5	7,4	5,9	19,6	1248,5
81/82	102,4	371,9	34,3	101,4	64,7	51,9	2,0	26,6	0,0	18,6	0,0	12,7	786,6
82/83	9,3	339,6	318,5	271,5	173,5	187,7	73,5	26,6	0,0	15,7	3,9	0,0	1419,7
83/84	18,6	123,5	282,3	180,8	128,4	45,1	41,1	2,0	0,0	7,8	6,4	3,9	839,8
84/85	18,6	288,1	161,7	492,0	128,4	157,8	74,5	8,3	0,0	2,0	0,0	7,8	1339,2
85/86	36,8	130,3	130,8	186,7	17,2	45,1	33,3	108,6	0,0	3,4	0,0	22,1	714,2
86/87	135,2	305,2	291,2	62,2	166,3	15,8	13,2	26,6	0,0	0,0	4,9	34,6	1055,2
87/88	10,8	135,6	81,3	490,7	192,4	88,0	19,2	13,7	0,0	0,0	0,0	71,5	1103,3
88/89	6,9	39,2	198,9	205,8	192,3	55,4	5,9	26,6	0,0	0,0	0,0	2,9	733,9
89/90	54,3	24,5	135,7	181,8	99,0	29,4	11,8	14,7	20,6	6,9	0,0	112,7	691,3

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Determinación de las escorrentías directas.

Los valores de escorrentía directa pertenecientes a cada mes y año, son entregados por la tabla 7, los cuales son los resultantes de las diferencias entre la escorrentía total y la escorrentía subterránea. Esta tabla representa a todas las crecidas o hidrogramas del periodo, incluyendo a las crecidas que se desarrollan entre meses consecutivos. En el Apéndice 3 se muestran las cantidades de escorrentía total y subterránea mensuales y anuales. En el Apéndice 4 se presentan los valores de los términos de cálculo para el Tiempo de concentración de Kirpich, utilizado en la separación de dichas crecidas.

Tabla 7. Escorrentías directas mensuales y anuales para el periodo en estudio (Millones de m³).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	0,0	0,0437	2,3923	190,944	1,6155	0,05137	0,2476	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5415
63/64	0,0	0,1383	1,4192	-	7,4274	2,6195	-	-	0,0	0,0	0,0	-	11,6044
64/65	0,0	0,0	0,5161	0,8195	-	0,0	0,0	0,0	0,0349	0,0	0,0	0,0	1,3705
65/66	0,438	1,0257	1,3635	12,6201	10,5266	0,0	0,3224	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,2973
66/67	0,201	0,8066	14,3749	5,7311	4,8442	0,5926	0,0693	0,0	0,4896	0,0	0,0	0,0	27,1102
67/68	0,0	2,1297	1,3063	2,3580	0,3953	0,6959	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8853
70/71	0,0	4,5256	4,5587	8,5681	1,0052	0,0768	0,0527	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,7140
71/72	-	-	5,7222	2,1911	2,2087	0,3359	0,1676	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0410	10,6666
72/73	0,0	-	-	1,4321	-	-	1,1712	0,0732	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6765
73/74	-	-	-	-	-	-	0,3056	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3056
74/75	0,0	2,8272	-	0,5948	-	-	-	0,1977	0,0791	-	-	-	3,5208
75/76	0,058	0,9240	3,3508	15,9531	1,6477	0,0	0,0139	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,9468
76/77	0,0	0,3152	3,7071	0,4404	0,5581	1,8794	2,4468	0,3215	0,0	-	-	-	9,6688
77/78	-	-	-	10,8598	5,4144	0,0902	1,1631	0,0	0,0	0,0	0,0	-	17,5275
78/79	0,0	0,0835	0,7358	14,1519	0,0	1,0602	0,0373	0,9881	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0568
79/80	0,0	0,2220	0,0623	9,7319	2,6018	0,9075	0,0	0,0257	0,0	0,0	0,0097	0,0651	13,6259
80/81	1,934	6,2951	7,2166	5,6533	1,5516	0,3727	0,0	0,0	0,0384	0,0345	0,0	0,0	23,0963
81/82	0,275	7,4094	1,9941	2,3833	1,2491	0,5657	0,0	0,0	0,0	0,0281	0,0	0,0470	13,9519
82/83	0,033	5,9847	13,7666	11,5905	3,9522	6,7449	1,0449	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,1174
83/84	0,030	0,5119	6,0074	7,3390	2,8119	0,5520	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,2527
84/85	0,0	2,4563	1,6395	25,2397	3,0941	4,1999	0,7507	0,0	0,0	0,0605	0,0	0,0	37,4408
85/86	0,088	0,9157	1,3634	3,9693	0,2477	0,2638	0,0360	0,0713	0,0	0,0	0,0	-	6,9562
86/87	0,550	17,150	5,9039	2,4305	0,5921	0,2848	0,2545	3,0569	0,0	0,0	0,0	0,3503	30,5750
	0,268	-	-	33,2491	8,3800	3,4416	2,1925	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1863	47,7177
88/89	0,0	0,2381	4,4268	10,3255	11,7138	0,7487	0,0	0,0684	0,0	0,0	0,0	0,0	27,5214
89/90	0,0	0,0480	2,2140	7,8588	0,1394	0,1105	0,0615	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1222	11,5544

-: No determinadas por fallas en el registro de la información limnigráfica.

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Determinación de las precipitaciones efectivas.

La determinación de las precipitaciones efectivas mensuales y anuales se presenta en la tabla 8. Para una superficie de la cuenca de 259 km², las precipitaciones efectivas resultantes fueron las siguientes:

Tabla 8. Precipitaciones efectivas para la cuenca del Río Purapel (mm).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	0,0	0,2	9,3	0,7	6,3	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6
63/64	0,0	0,5	5,5	-	28,8	10,2	-	-	0,0	0,0	0,0	-	45,0
64/65	0,0	0,0	2,0	3,2	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	5,3
65/66	1,7	4,0	5,3	48,9	40,8	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	101,9
66/67	0,8	3,1	55,7	22,2	18,8	2,3	0,3	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	105,1
67/68	0,0	8,3	5,1	9,1	1,5	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,7
70/71	0,0	1,8	17,7	33,2	3,9	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,0
71/72	-	-	22,2	8,5	8,6	1,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	41,3
72/73	0,0	-	-	5,6	-	-	4,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4
73/74	-	-	-	-	-	-	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
74/75	0,0	11,0	-	0,1	-	-	-	0,1	0,3	-	-	-	11,3
75/76	0,2	3,6	13,0	61,8	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	85,0
76/77	0,0	1,2	14,4	1,7	2,2	7,3	9,5	1,2	0,0	-	-	-	37,5
77/78	-	-	-	42,1	21,0	0,3	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	-	67,9
78/79	0,0	0,3	2,9	54,9	0,0	4,1	0,1	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	66,1
79/80	0,0	0,9	0,2	37,7	10,1	3,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	52,8
80/81	7,5	24,4	28,0	21,9	6,0	1,4	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	89,5
81/82	1,1	28,7	7,7	9,2	4,8	2,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	54,1
82/83	0,1	23,2	53,4	44,9	15,3	26,1	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	167,1
83/84	0,1	2,0	23,3	28,4	10,9	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	66,9
84/85	0,0	9,5	6,4	97,8	12,0	16,3	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	144,9
85/86	0,3	3,5	5,3	15,4	1,0	1,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	-	27,0
86/87	2,1	66,5	22,9	9,4	2,3	1,1	1,0	11,8	0,0	0,0	0,0	1,4	118,5
87/88	1,0	-	-	128,9	32,5	13,3	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	185,0
88/89	0,0	0,9	17,2	40,0	45,4	2,9	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	106,7
89/90	0,0	0,2	8,6	30,5	0,5	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	44,8

-: No determinadas, por fallas en el registro de la información limnigráfica.

Fuente: Elaboración propia.

6.5. Determinación de los coeficientes de escorrentía.

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para los coeficientes de escorrentía mensuales y anuales. Los valores anuales marcados con (*) señalan que no fueron utilizados en los análisis estadísticos ni gráficos posteriores y no fueron considerados en el análisis de los resultados, al presentar demasiados meses con falta de información.

Tabla 9. Coeficientes de escorrentía mensuales y anuales para el periodo en estudio.

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
62/63	0,00	0,01	0,05	0,02	0,08	0,01	0,03	s/p	s/p	s/p	0,00	0,00	0,04
63/64	0,00	0,01	0,04	-	0,11	0,04	-	-	s/p	0,00	s/p	-	0,06
64/65	0,00	0,00	0,03	0,04	-	0,00	0,00	0,00	0,00	s/p	s/p	s/p	0,02
65/66	0,01	0,03	0,05	0,33	0,11	0,00	0,03	0,00	0,00	s/p	s/p	s/p	0,10
66/67	0,01	0,06	0,13	0,13	0,12	0,09	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	s/p	0,10
67/68	0,00	0,07	0,13	0,25	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	s/p	s/p	0,00	0,08
70/71	0,00	0,01	0,06	0,13	0,17	0,01	0,02	0,00	s/p	0,00	s/p	s/p	0,08
71/72	-	-	0,07	-	0,08	0,04	0,02	0,00	s/p	s/p	s/p	0,00	0,10
72/73	0,00	-	-	0,03	-	-	0,06	0,01	s/p	s/p	s/p	0,00	0,04*
73/74	-	-	-	-	-	-	0,02	0,00	s/p	0,00	s/p	0,00	0,01*
74/75	0,00	0,05	-	0,00	-	-	-	0,00	0,02	-	-	-	0,03*
75/76	0,00	0,02	0,07	0,18	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	s/p	s/p	0,10
76/77	0,00	0,02	0,08	0,03	0,03	0,08	0,06	0,03	s/p	-	-	-	0,05
77/78	-	-	-	0,11	0,17	0,01	0,05	0,00	s/p	s/p	0,00	-	0,11*
78/79	0,00	0,00	0,02	0,14	0,00	0,04	0,01	0,03	s/p	0,00	0,00	s/p	0,07
79/80	0,00	0,01	0,01	0,12	0,09	0,04	0,00	0,00	0,00	s/p	0,00	0,06	0,06
80/81	0,03	0,10	0,10	0,10	0,09	0,03	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,07
81/82	0,01	0,08	0,23	0,09	0,07	0,04	0,00	0,00	s/p	0,01	s/p	0,01	0,07
82/83	0,01	0,07	0,17	0,17	0,09	0,14	0,06	0,00	s/p	0,00	0,00	s/p	0,12
83/84	0,01	0,02	0,08	0,16	0,08	0,05	0,00	0,00	s/p	0,00	0,00	0,00	0,08
84/85	0,00	0,03	0,04	0,20	0,09	0,10	0,00	0,00	s/p	0,00	s/p	0,00	0,11
85/86	0,01	0,03	0,04	0,08	0,06	0,02	0,00	0,00	s/p	0,00	s/p	-	0,04
86/87	0,02	0,22	0,08	0,15	0,01	0,07	0,07	0,45	s/p	s/p	0,00	0,04	0,11
87/88	0,10	-	-	0,26	0,17	0,15	0,44	0,00	s/p	s/p	s/p	0,01	0,21
88/89	0,00	0,02	0,09	0,19	0,24	0,05	0,00	0,01	s/p	s/p	s/p	0,00	0,15
89/90	0,00	0,01	0,06	0,17	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	s/p	0,04	0,06

s/p: No determinados, hubo meses sin precipitaciones.

-: No determinados por fallas en el registro de la información limnigráfica.

Fuente: Elaboración propia.

6.6. Análisis Estadístico.

El análisis estadístico se ve remitido solamente a la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, debido que al efectuar la prueba de Normalidad para los coeficientes de escorrentía utilizados para análisis, ésta verificó el no cumplimiento de este supuesto (ver Apéndice 5), por lo que no fue posible utilizar el ANDEVA y las pruebas *t* en el análisis de resultados. Dado el no cumplimiento de normalidad de los coeficientes de escorrentía, se realizó en forma anexa la prueba no paramétrica de comparación de medianas, con el fin de tener más fuentes de decisión con respecto a las variaciones teóricamente esperadas.

6.6.1. Prueba no paramétrica U de Mann – Whitney.

La siguiente tabla presenta la información relacionada con la aplicación de la prueba U de Mann -- Whitney para las tres décadas en estudio.

Tabla 10. Valores de cálculo para la prueba U y decisión con respecto a Ho.

Comparación	Wa	Ua	Wb	Ub	Zc	Valor p	Decisión
70-60	2301	1225	3055	1355	-0.435	0,017	Aceptar Ho
80-60	2327	2919	5054	4462	6.726	0,499	Rechazar Ho
80-70	3649	2861	5942	1819	-2.238	0,487	Rechazar Ho

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se infiere que de las tres comparaciones realizadas, en dos se rechaza la hipótesis nula Ho. Estas son las comparaciones entre 60-80 y 70-80, lo que representa que la década del 80 muestra diferencias con respecto a las otras dos décadas que abarca el estudio, implicando un aumento de los coeficientes de escorrentía, para una confiabilidad del 95%.

6.6.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 11. Estos son los resultantes de las tres comparaciones realizadas entre las distintas décadas en estudio, para un nivel de confianza $\alpha = 0,05$.

Tabla 11. Valores resultantes de la prueba y decisión con respecto a H_0 .

Comparación	W	Valor p	Decisión
70-60	1214,5	0,3047	Aceptar H_0 .
80-60	1973,0	0,9468	Aceptar H_0 .
80-70	2894,0	0,9919	Aceptar H_0 .

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba de comparación de medianas, estarían indicando que no existe diferencia estadística entre ninguna de las décadas comparadas, lo que estaría diciendo que para una confiabilidad del 95 %, no existirían diferencias significativas entre los coeficientes de escorrentía.

6.6.2. Análisis gráfico.

Los promedios móviles resultantes para los coeficientes de escorrentía se presentan en las siguientes figuras. La figura 8 corresponde a la gráfica para el periodo anual total y de las figuras 9 a la 16 se entregan los gráficos correspondientes a los meses lluviosos, a saber, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre; y también para el periodo total. En el Apéndice 6, se muestran los valores de los promedios móviles utilizados en las gráficas correspondientes.

Al observar estas figuras se encuentra la presencia de algunos saltos en la tendencia determinada por los promedios móviles. Estos saltos, provocados por la falta de datos para los años 72/73, 73/74, 74/75 y 77/78, presentaron información incompleta de los coeficientes de escorrentía y fueron excluidos de cualquier tipo de análisis. Esta situación se produce para el gráfico del periodo total y para los meses excepto Octubre.

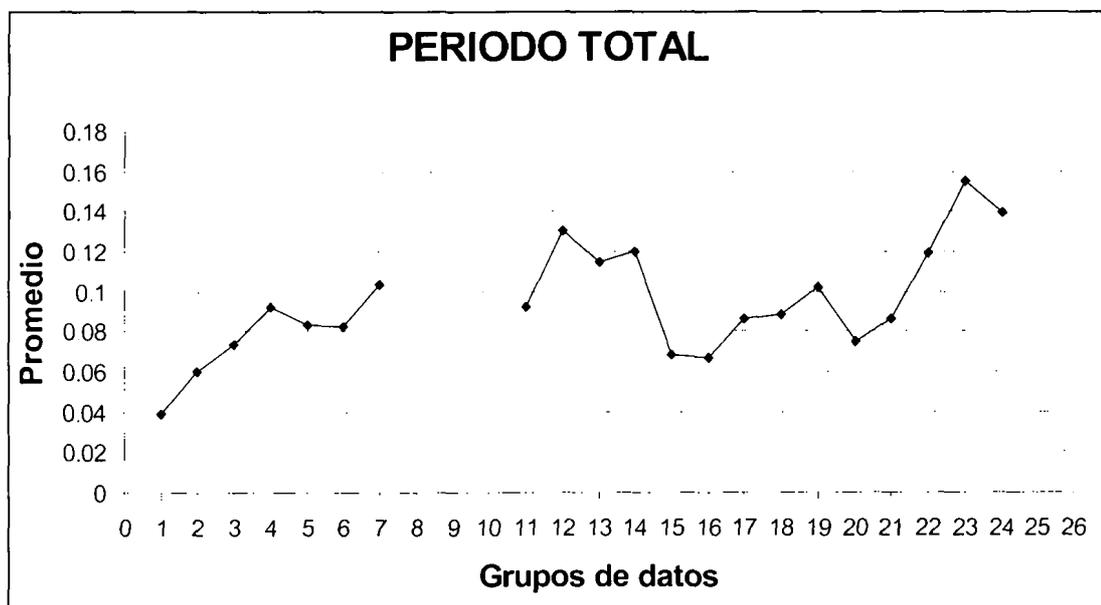


Figura 8. Promedios móviles de los coeficientes de escorrentía para el periodo total.

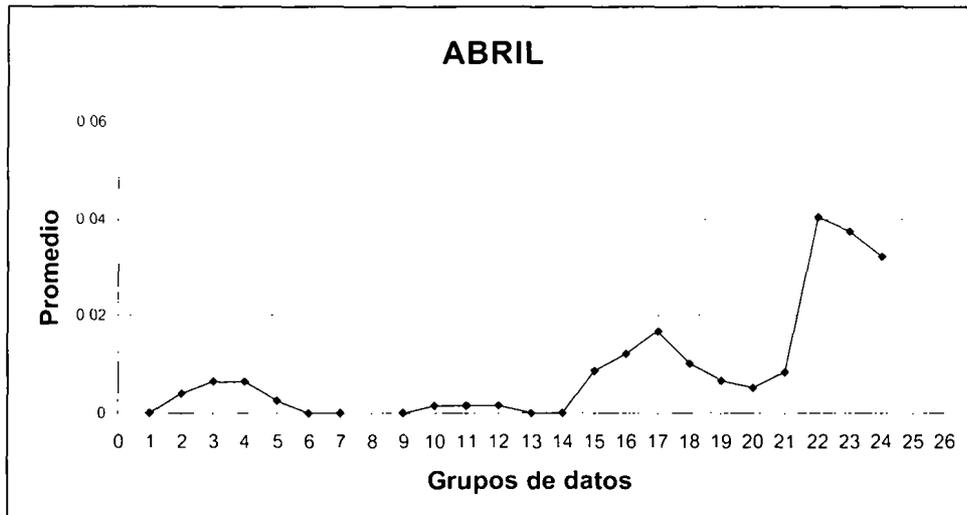


Figura 9. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Abril.

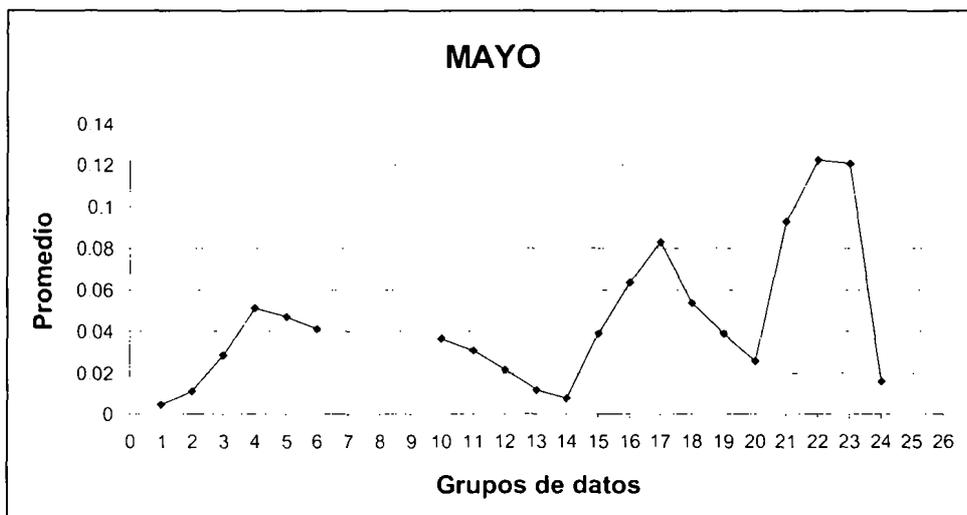


Figura 10. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Mayo.

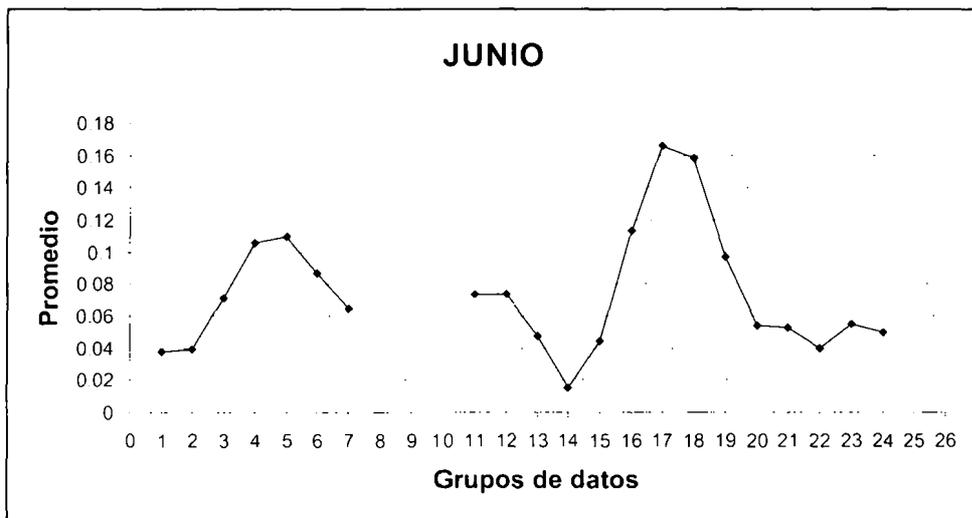


Figura 11. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Junio.

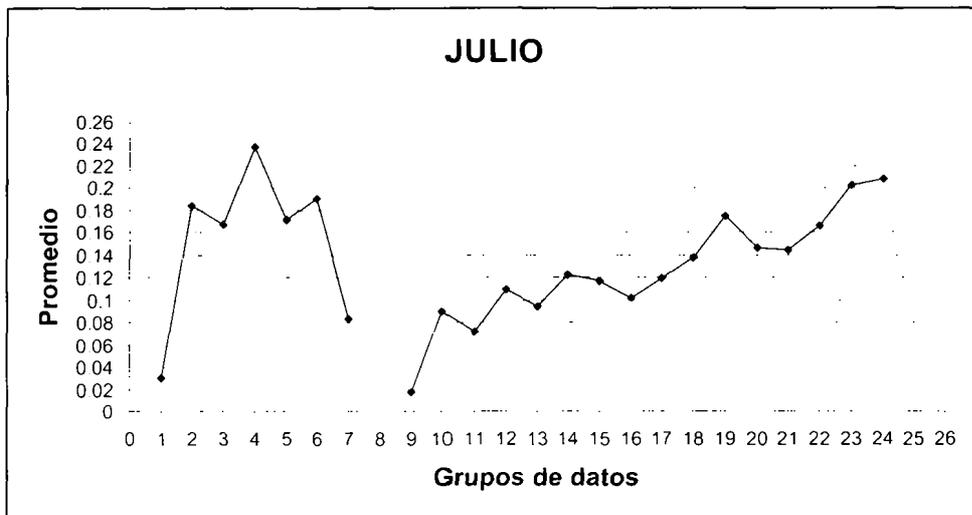


Figura 12. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Julio.

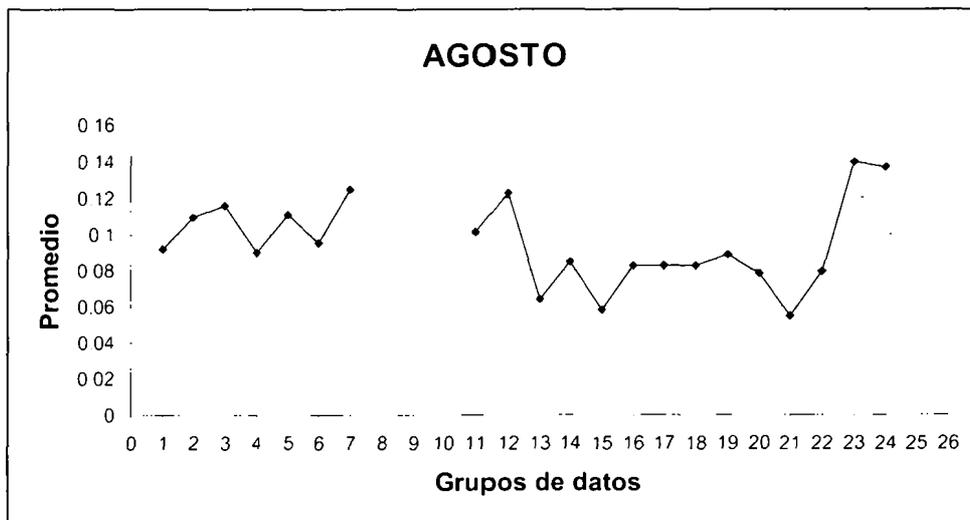


Figura 13. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Agosto.

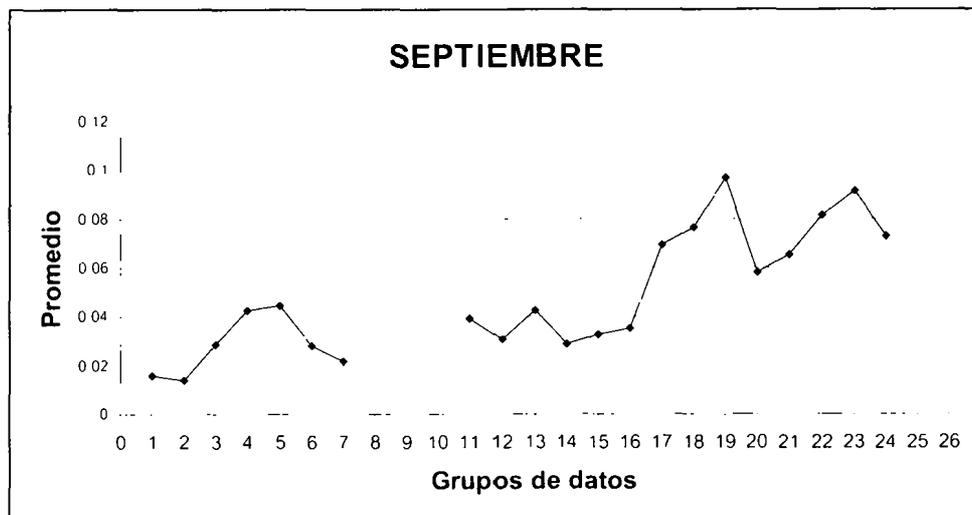


Figura 14. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Septiembre.

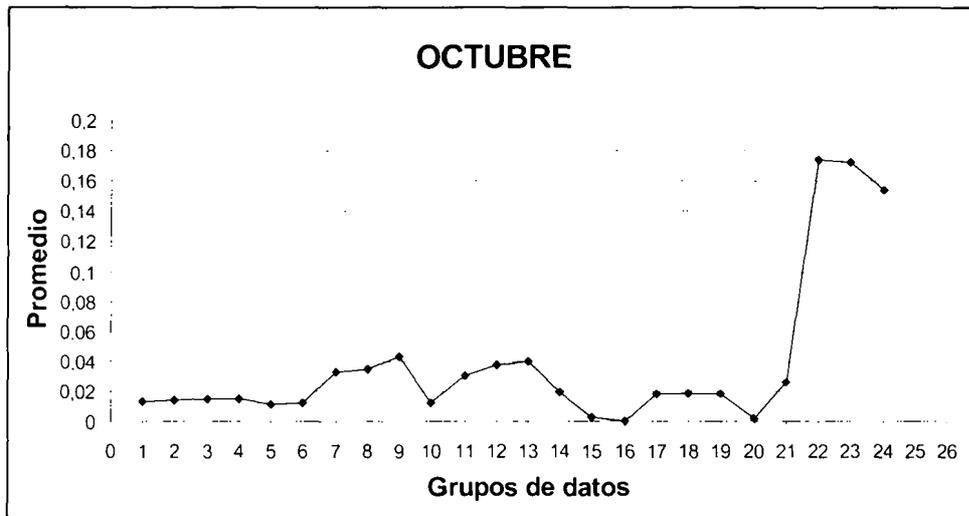


Figura 15. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Octubre.

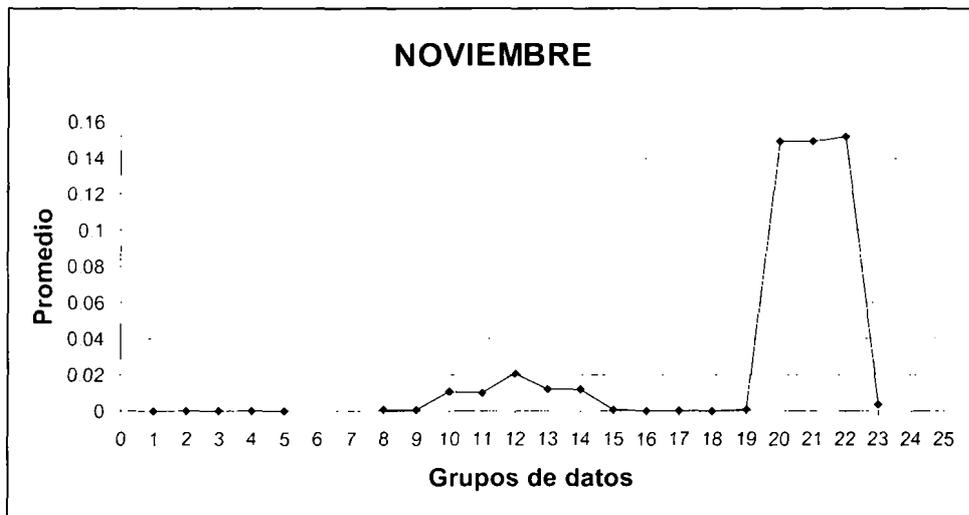


Figura 16. Promedios móviles para los coeficientes de escorrentía para el mes de Noviembre.

7.0. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos y presentados en el capítulo anterior. Los resultados se analizarán de la siguiente manera. En primer lugar se analizará todo lo concerniente a la obtención de la información base, la selección de las estaciones y la confección y separación de los hidrogramas. Luego, se hace referencia a los resultados mismos, analizando más minuciosamente los resultados de las precipitaciones, las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía. Estos últimos fueron utilizados en la aplicación de las pruebas estadísticas y gráficas para visualizar existencia de variaciones en los coeficientes de escorrentía en el tiempo, y a partir de esto, sea posible hacer inferencias respecto a elementos de gestión forestal sobre la cuenca.

7.1. Obtención de la información y su registro.

En el proceso de lectura de los limnigramas, se presentó una serie de inconvenientes que dificultaron de alguna manera el procesamiento de la información. Éstos se pueden clasificar en dos tipos; unos relacionados con el funcionamiento del aparato registrador (limnógrafo) y los otros, referidos a la manipulación y/o interpretación de la información misma.

Con respecto al limnógrafo, se puede mencionar que éste presentó fallas en el registro de las alturas de agua para algunos meses, presentando información faltante además de problemas relacionados con el embancamiento de la estación fluviométrica. Los problemas de información faltante se debieron a la inexistencia de registros y a fallas de la aguja registradora, impidiendo el registro del hidrograma en su totalidad. La información faltante provocó saltos en el tiempo, lo que imposibilitó para un cierto número de meses (29) del periodo original realizar las estimaciones de las escorrentías directas. Lo anterior

hizo que se ampliara el número de años en estudio, 70-90, a 6 años de la década del 60, entre los años 62/63 y 67/68.

Los problemas relacionados al embancamiento de la estación, se produjeron generalmente para los meses más secos, generalmente entre Octubre y Marzo. Ésto se genera como producto del arrastre de sedimentos hacia la estación, lo que obstruye el tubo de abducción. Así las precipitaciones caídas producen un aumento en el nivel de agua del cauce, provocando el mencionado arrastre de material. El embancamiento tuvo como resultante que no se registraran algunas crecidas o, si éstas eran registradas, no representaron los valores reales de caudal. Lo anterior provocó subestimaciones de las escorrentías directas, especialmente para los meses más secos.

En cuanto a los inconvenientes en la manipulación e interpretación de la información limnigráfica, ésto se refiere básicamente a las correctas lecturas de las alturas de agua y al proceso de unión de los distintos limnigramas revisados. Lo anterior se debió a que algunos limnigramas presentaron retrasos en el registro, por lo que se hizo necesario determinar los retrasos de cada crecida y luego leer en forma correcta.

7.2. Selección y completación de la información.

Como se mencionó en capítulos anteriores, las estaciones pluviométricas seleccionadas fueron las de Nirivilo, Constitución y Faro Carranza, de las cuales fueron utilizadas en la aplicación de método de los Polígonos de Thiessen las dos primeras, descartando la estación Faro Carranza, en virtud de lo señalado por Tobar (2000), quién encontró diferencias en la estimación de las precipitaciones medias. Así, por ejemplo, si se compara las precipitaciones de la estación Faro Carranza con las de la estación Constitución se encuentran diferencias por sobre el 40% en muchos casos, advirtiéndose que Faro Carranza, la cual es una estación dependiente de la Armada de Chile, se ubica en

una zona de vientos constantes y donde se presume que las estimaciones no son del todo correctas. Lo anterior no ocurre con las estaciones de Nirivilo y Constitución, pertenecientes a la D.G.A., ya que se ubican en lugares más representativos, incluso la estación Nirivilo se asume como la representativa de la cuenca.

Por otra parte, la completación de la información pluviométrica se realizó mediante dos métodos: los promedios históricos y la regresión lineal. Los promedios históricos fueron utilizados en la completación de la estación Nirivilo, método que no provocó ningún tipo de inconveniente en su aplicación, al tratarse solo de una media aritmética de los meses con información. La regresión lineal se utilizó para completar la totalidad del periodo para la estación Constitución, tomando como estación patrón la de Nirivilo. El ajuste para dicha completación arrojó un R^2 de 0,9093. El modelo seleccionado fue el siguiente:

$$Const = 0,895053 \cdot Niriv$$

Sobre el modelo seleccionado para la estimación de las precipitaciones, se puede establecer dos cosas. Una, que este modelo no presenta intercepto, lo que sería lógico de esperar si se estiman precipitaciones, pues si en una estación no se presentan precipitaciones caídas, en otra estación cercana debería ocurrir la misma situación. Lo otro se refiere a la transformación en raíz que presenta; esto se debió a la alta variabilidad de las precipitaciones producidas, siendo generalmente 0 mm en los meses más secos y sobre 150 mm en los meses más lluviosos. Esta transformación disminuyó estas diferencias y se obtuvo un rango más pequeño, lo que hizo más fácil la estimación de las precipitaciones.

Como se mencionó anteriormente, la estación Constitución comenzó su funcionamiento en 1992, por lo que su información no abarcó ningún año del periodo. A pesar de esta situación, se decidió trabajar con ella en virtud de su representatividad en la cuenca, mayor que la estación Faro Carranza, y por la calidad y confiabilidad de sus

registros, al ser una estación nueva que no presenta grandes fallas, por lo que sus datos fueron una base sólida para establecer la correlación con la estación Nirivilo.

La selección de la estación fluviométrica de Nirivilo, en vez de la de Sauzal, se debió fundamentalmente a que la segunda está ubicada aguas más abajo con respecto a la estación Nirivilo, por lo que presentaría mayores extracciones de agua para el consumo de la población y para la agricultura, lo que provocaría una subestimación de los volúmenes de caudal y de procesos posteriores, como la producción de escorrentías directas y precipitaciones efectivas, entre otros.

7.3. Confección y separación de hidrogramas.

En cuanto a la confección y separación de los hidrogramas de crecidas se puede discutir lo siguiente. El punto de inicio (A) para cada hidrograma confeccionado (figura 17), respondió de distintas maneras. Para las crecidas de mayor magnitud, éste fue claramente identificado en la gráfica, presentando diferencias notorias entre los volúmenes de caudal antes y después del inicio del hidrograma. En el resto de las crecidas tampoco presentó problemas en su identificación, y en las que sí los hubo se determinó en base a la información entregada por el limnigrama.

La determinación del punto B', en la figura 17, (proyección del caudal punta sobre la extrapolación de los caudales recesivos previos a la crecida), dependió casi exclusivamente de lo ocurrido con anterioridad al inicio de cada crecida. Cuando se produjo una crecida grande, la curva recesiva bajó rápidamente, por lo que la proyección de la tendencia hizo que los caudales, con respecto al del inicio, fueran bastante menores. Otro caso fue el de crecidas menores, en la cual la bajada de la curva recesiva fue de manera suave, provocando una proyección de menor pendiente. La diferencia de caudales entre el punto de inicio y B' no resultó muy considerable y por último se presentaron casos en que

no ocurrieron crecidas anteriores, por lo que la proyección de la línea de tendencia resultó casi una línea recta, con diferencias mínimas de volumen.

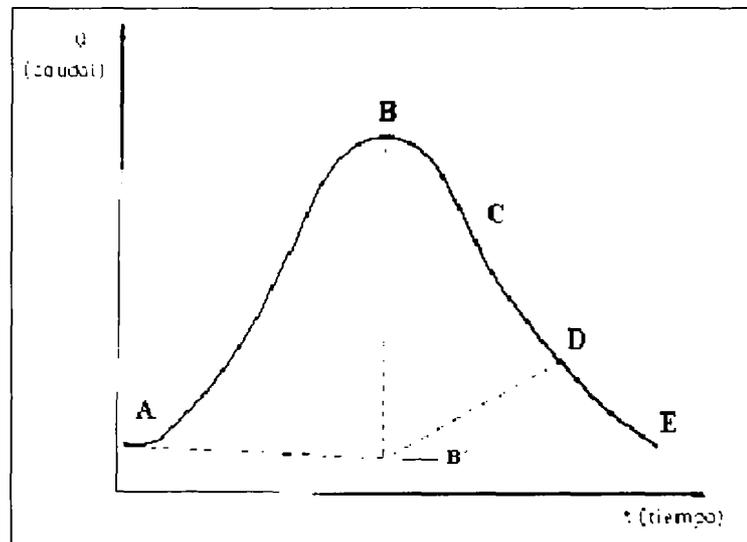


Figura 17. Hidrograma de crecidas.

En cuanto a la determinación del punto de término o segundo punto de quiebre de la pendiente en la curva de bajada del hidrograma (D), hay que tener en cuenta una serie de consideraciones con respecto a la metodología tradicional propuesta.

Las crecidas mayores presentaron claramente el punto D en las gráficas semilogarítmicas, lo que no ocurrió en una buena parte de las crecidas de tamaño medio y en la gran mayoría de las más pequeñas. Del total de crecidas analizadas (389), en el 53,4% de los casos el punto D fue determinado mediante la gráfica semilogarítmica $\log(Q)$ v/s t ; mientras que en el 46,6% restante, se utilizó regresión lineal. Lo anterior estaría indicando las dificultades en la modelación de las crecidas de la cuenca, sobre todo en crecidas provocadas por lluvias de no muy alta intensidad.

La utilización de la regresión lineal para determinar el término del hidrograma de crecidas a través de una función $t = t(Q_{\text{máx}})$ puede ser discutible, pero la calidad de los

datos entregados por la estación y el tipo de crecidas ocurridas hizo que el problema se abordara de una forma distinta, que fue la que se presenta, motivado además por la falta de metodologías alternativas expuestas en la literatura hidrológica.

Otro punto interesante de analizar es la forma que tomaron los diversos hidrogramas, presentando patrones comunes según la magnitud de las crecidas. Las mayores crecidas verificaron un levantamiento brusco, respondiendo casi de inmediato a las precipitaciones más intensas. La bajada también fue rápida pero más suavizada, lo que provocó cierta asimetría en su forma.

Los hidrogramas correspondientes a crecidas medias y pequeñas, presentaron en general la forma típica de un hidrograma, como la que se muestra en la figura 17. No obstante, la curva de bajada no se comportó de acuerdo a lo esperado teóricamente, lo que determinó la necesidad de recurrir a la relación $t = t(Q_{\text{máx}})$. Algunas crecidas menores presentaron subidas con largas prolongaciones que dificultaron en su momento su determinación.

7.4. Precipitaciones medias areales.

7.4.1. Estimación a través del método de los Polígonos de Thiessen.

La utilización del método de los Polígonos de Thiessen no presentó, en general, mayores complicaciones. Ésto porque sólo necesitó la ubicación espacial en el plano de las estaciones seleccionadas y ello se tradujo en no requerir un gasto excesivo de tiempo y de materiales, siendo la parte más engorrosa la delimitación de la cuenca. En el caso de este estudio, la delimitación no fue de gran dificultad, al presentarse cumbres de no muy gran

altitud pero sí notorias y significativas que permitieron una identificación más clara de los límites de la cuenca.

En cuanto a las ponderaciones entregadas luego de la aplicación del método (tabla 5), éstas pueden mirarse bajo dos perspectivas. Una, la alta ponderación de la estación Nirivilo (90%), demuestra que las estimaciones obtenidas están muy influenciadas por esta estación y, por otro lado, esta alta asignación manifiesta la falta o carencia de más estaciones distribuidas en el interior o en lugares cercanos a la cuenca, tal que permita una asignación de ponderaciones más representativas de la realidad. Sin embargo se asumió como válida la estimación realizada, fundamentada en los estudios de Tobar (2000), Sandoval (2000) y Soto (2000), los cuales obtienen resultados aceptables, y a lo expuesto por Ramírez (1998), quién determinó que esta metodología es segura y confiable para la estimación de precipitaciones medias areales en la VII región.

7.4.2. Precipitaciones medias.

En los 26 años que abarca el estudio, cayeron sobre la cuenca 22.993,7 mm, de los cuales 4.409,9 mm pertenecieron a la década del 60 (Dec-60), 8.652,1 mm a la década del 70 (Dec-70) y los restantes 9.931,7 mm a la década del 80 (Dec-80). La precipitación media anual estimada fue de 881,2 mm. No obstante, es menester señalar que para Dec-60 se utilizaron 6 años, y las dos décadas restantes consideraron los 10 años de registros.

En general no se aprecia un patrón de comportamiento en las precipitaciones anuales. Si se asume como precipitación normal para la cuenca los 881,2 mm estimados según los polígonos de Thiessen, se observa en la figura 18 una tendencia en los últimos años del periodo (Dec-80) a superar este valor, por lo que se estaría en presencia de un aumento en la pluviometría de la cuenca para este periodo.

En la tabla 12 se muestran las precipitaciones extremas para cada periodo del estudio y sus variaciones con respecto al promedio normal (PN). En ella, y junto con la figura 18, se puede apreciar que para las precipitaciones máximas los montos más altos se produjeron en Dec-80 y las precipitaciones mínimas se produjeron en Dec-60. Es importante señalar que dentro de las precipitaciones mínimas las cantidades más altas, y por ende las menores variaciones con respecto a PN se produjeron también en Dec-80, como también las más altas precipitaciones, por lo que se puede determinar de manera preliminar que este periodo es el de mayor generación de escorrentía.

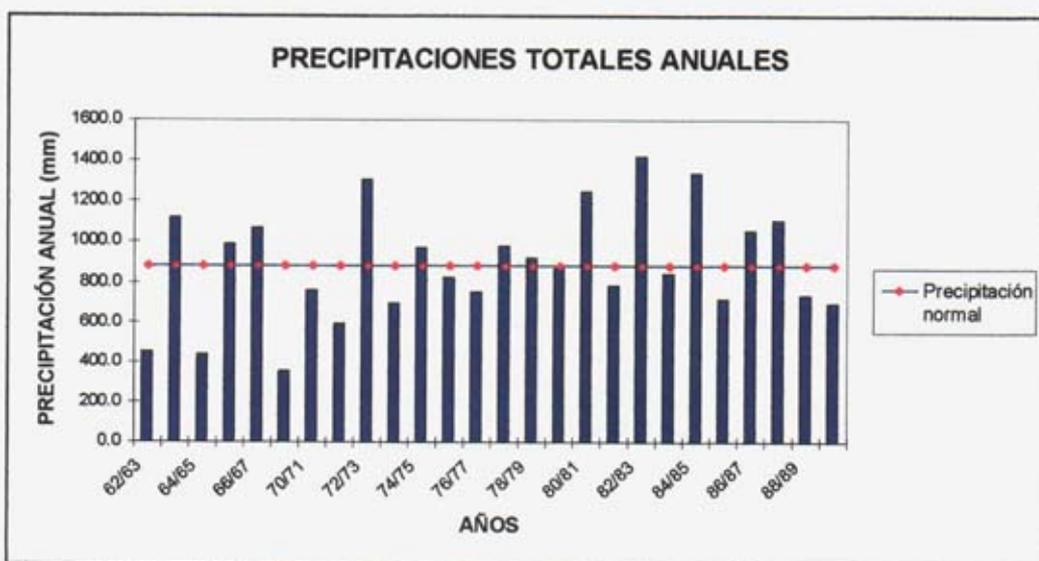


Figura 18. Precipitaciones totales anuales y su comparación con respecto al promedio normal.

Tabla 12. Precipitaciones extremas y variación con respecto al promedio normal estimado (mm).

Periodo	P máxima	P mínima	P promedio	Δ máximo	Δ mínimo
Déc60 *	1117,7	350,4	735	236,5	526,8
Déc70	1355,5	598,1	865,2	474,3	283,1
Déc80	1419,7	691,3	993,2	538,5	189,9

Δ máximo: variación de máximo superávit sobre la precipitación normal (mm).

Δ mínimo: variación de máximo déficit bajo la precipitación normal (mm).

* : No considera el año 68, de máxima sequía.

Por otro lado, a escala mensual el comportamiento promedio de distribución de las precipitaciones se puede ver en la figura 19. Ella muestra que los mayores montos de precipitaciones se producen en el mes de Julio con una media de 210,2 mm; seguido por Junio y Mayo con 187,8 mm y 153,7 mm respectivamente. De esta gráfica se observa que el periodo húmedo fluctúa entre los meses de Abril y Noviembre, los cuales aportan 848,3 mm, lo cual representa del total promedio el 96,3%, generándose los 32,9 mm restantes en el periodo entre Diciembre y Marzo, o periodo seco. En general no se presenta una gran variabilidad en los intervalos de confianza obtenidos.

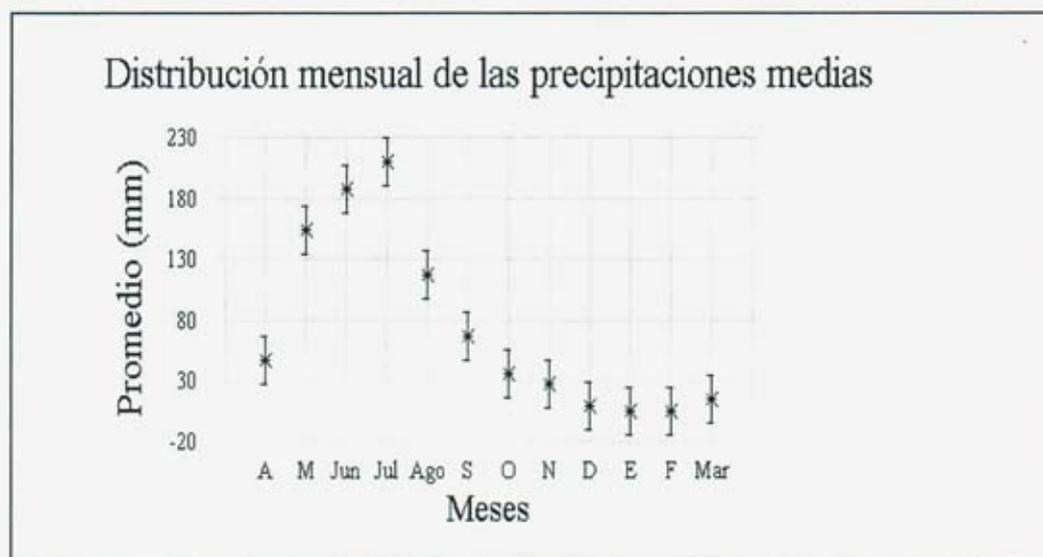


Figura 19. Comportamiento mensual promedio de las precipitaciones medias.

7.5. Escorrentías directas y precipitaciones efectivas.

Las escorrentías directas y las precipitaciones efectivas representan en sí el mismo concepto, dado que las precipitaciones efectivas estimadas derivan directamente de la escorrentía directa en su forma de cálculo. Es por ello que el análisis de estas dos variables

se realiza en forma conjunta, centrándose principalmente en las precipitaciones efectivas, siendo ello aplicable a las escorrentías directas.

La escorrentía directa (ED) estimada para el periodo total fue de 448,702 millones de m³, la cual se distribuyó de la siguiente manera: 77,8092 millones de m³ en Dec-60, 111,7093 millones de m³ en Dec-70 y 259,1838 millones de m³ en Dec-80. El promedio anual estimado para los 26 años de estudio fue de 17,2578 millones de m³/año.

De la tabla 7, se desprende la falta de estimación de escorrentías para una buena cantidad de meses, especialmente para Dec-70. Ésto se debió a la falta de registro de la información limnigráfica, haciendo que dichas estimaciones sean inferiores a las reales, dando por ejemplo, que para el año 72/73, el cual es el más lluvioso de dicha década, sólo se tengan registros de Octubre a Marzo.

A nivel anual, la máxima ED se produjo en el año 87/88, con un total de 47,7177 millones de m³, mientras el valor mínimo se produjo en el año 64/65 con solo 1,3705 millones de m³. En el caso del año 87/88, dicha cantidad corresponde a una subestimación del total, al carecer de información en los meses de Mayo y Junio, los cuales son de alta pluviometría (135,6 y 81,3 mm respectivamente), lo que indicaría una producción mayor de ED.

El comportamiento promedio mensual de ED se presentó muy similar al de las precipitaciones medias, produciéndose las mayores ED entre el periodo Mayo-Agosto, siendo Julio el mes que genera los mayores volúmenes de ED, teniendo como promedio 8,1534 millones de m³. El mes que generó los menores volúmenes de ED fue Febrero con 0,0004 millones de m³.

Por otro lado, las precipitaciones efectivas (Pc) generadas para el total del periodo fueron 1.645,8 mm, las cuales se distribuyeron en el siguiente orden: 301,6 mm corresponden a Dec-60, 339,7 a Dec-70 y los restantes 1.004,5 mm pertenecen a Dec-80.

A nivel anual el comportamiento de las Pe es igual al obtenido para las ED. Las máximas Pe para cada década se produjeron en los años 66/67,75/76 y 87/88 con 105,1 mm; 85,0 mm y 185,0 mm respectivamente. Los menores montos de Pe fueron para los años 64/65, 76/77 y 85/86 con 5,3 mm; 37,5 mm y 27,0 mm.

Las Pe anuales promedio por década fueron de 50,3 mm para Dec60, 56,6 mm para Dec70 y de 100,5 mm para Dec80. Los resultados anteriores estarían marcando notorias diferencias en la producción de Pe (ED) para la década del 80, casi duplicando los montos promedio de las décadas anteriores.

Mensualmente, el comportamiento de las precipitaciones efectivas se puede apreciar en la figura 20. En ella se observa una clara diferencia en generación de Pe para Julio, con 31,5 mm, seguidos por Junio, Agosto y Mayo con 15,5 mm 12,7 mm y 9,2 mm; respectivamente.

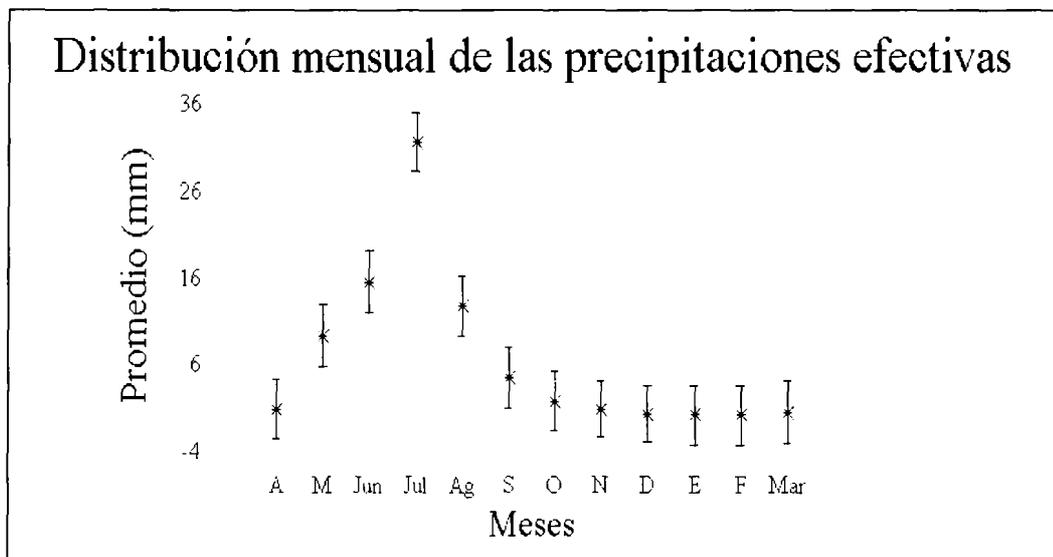


Figura 20. Comportamiento mensual promedio de las precipitaciones efectivas

Un aspecto importante de señalar son los bajos montos de Pe al compararlos con las precipitaciones medias mensuales. Si se observa la figura 21, en general no se aprecian durante todo el periodo grandes proporciones de Pe con respecto a las precipitaciones medias. Para realizar un análisis más minucioso de estos bajos montos de Pe, hay que tener en consideración algunos factores y procesos que estarían influyendo y/o alterando los montos de las Pe, además de la escala en que está realizado este estudio y la información utilizada. Si se toma como base para el análisis la ecuación del balance hídrico donde $P = Q (Pe) + E \pm \Delta R$, se está en presencia de que la gran mayoría de las precipitaciones caídas están siendo utilizadas en otros procesos como la evaporación (intercepción y transpiración), y la infiltración que está relacionada con la variación de reservas de la cuenca. La reservas de aguas subterráneas no fueron consideradas en detalle.

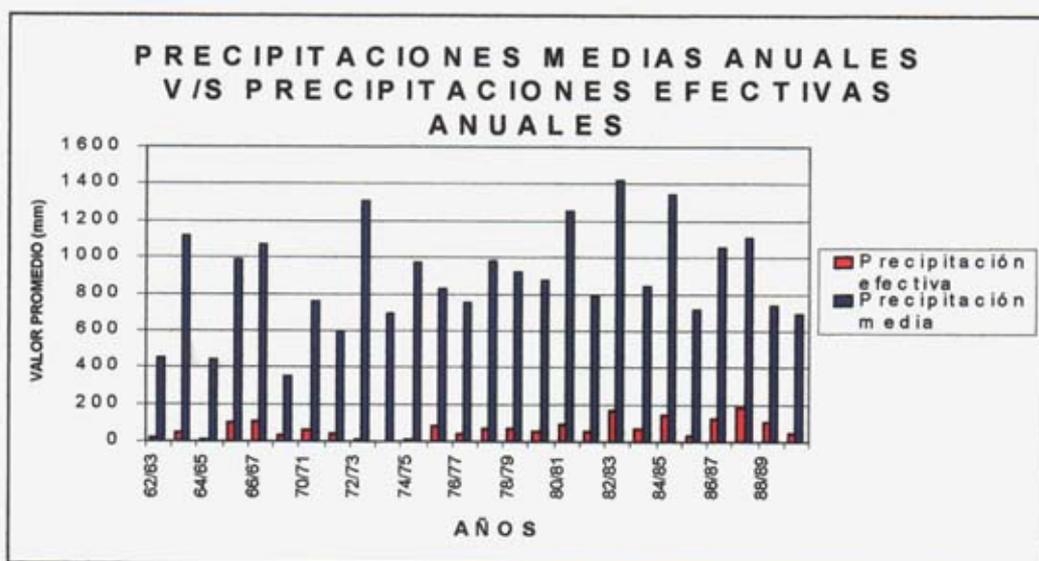


Figura 21. Precipitaciones efectivas en comparación con las precipitaciones medias.

La escala e información utilizada en el estudio hace que en el presente análisis sólo se pueda establecer una serie de inferencias a partir de los resultados obtenidos, y su interrelación. Debido al desconocimiento que se tiene de las magnitudes de los factores y procesos de la ecuación del balance hídrico, y a la información de caudales y precipitaciones utilizada, no fue posible determinar las magnitudes particulares de las

restantes variables, conociéndose sólo las entradas y salidas del proceso precipitación-escorrentía.

No obstante lo anterior, se puede establecer que las intensidades y distribución de las precipitaciones influyen directamente en los montos de Pe. Mientras mayores sean las intensidades y, su distribución esté concentrada en unas pocas horas, se tenderían a producir mayores cantidades de Pe; así también, si las intensidades fueran bajas y estuvieran más distribuidas durante la duración de un aguacero, se deberían generar menores montos de Pe.

Del total de las precipitaciones que caen sobre la cuenca, no todas llegan a la superficie del suelo, interceptándose una buena parte para luego ser evaporadas; si se toma como base el estudio desarrollado por Saunier *et al* (1968), señalado por Donoso (1981), en que se compararon dos sectores, uno descubierto y otro cubierto con plantaciones de pino insigne de 22 años en Valdivia, Chile, se encontraron diferencias de 630,1 mm entre ambos sitios, lo que corrobora lo anteriormente expuesto por López (1998), señalado en la sección 3.5.1 del capítulo 3. Esto estaría indicando, que del total de las precipitaciones caídas, una buena parte no entra en contacto con el suelo, perdiéndose un monto considerable de precipitaciones por intercepción.

Por otro lado, de aquella parte de las precipitaciones que sí toma contacto con el suelo, si se observa la figura 21 y se tiene como base la ecuación del balance hídrico, se desprende que se estarían infiltrando, evaporando y/o transpirando la gran mayoría de las precipitaciones. Según la metodología y los objetivos planteados, no es posible determinar qué cantidades corresponden a uno u otro componente de la ecuación. No obstante la evaporación y transpiración serían mayores que la infiltración, dadas las condiciones semiáridas donde se ubica geográficamente la cuenca y por los suelos delgados y pobres que se manifiestan en ella, los cuales no presentan una gran cantidad de reservas. Caro (2001) determinó capacidades de almacenamiento de $0,076 \text{ Hm}^3$ como mínimas y máximas de $0,597 \text{ Hm}^3$, las cuales son bajas comparadas con otras cuencas del país.

A partir de la figura 22, se puede visualizar algún tipo de relación entre las precipitaciones medias y las precipitaciones efectivas. Con el fin de poder caracterizar de mejor forma y obtener de un modo menos demoroso los montos las precipitaciones efectivas, es que éstas se correlacionaron a nivel mensual con las precipitaciones medias. El mejor ajuste arrojó un $R^2 = 0,801034$, siendo el modelo el siguiente:

$$\sqrt{Pe} = 0.2683 * \sqrt{Pm}$$

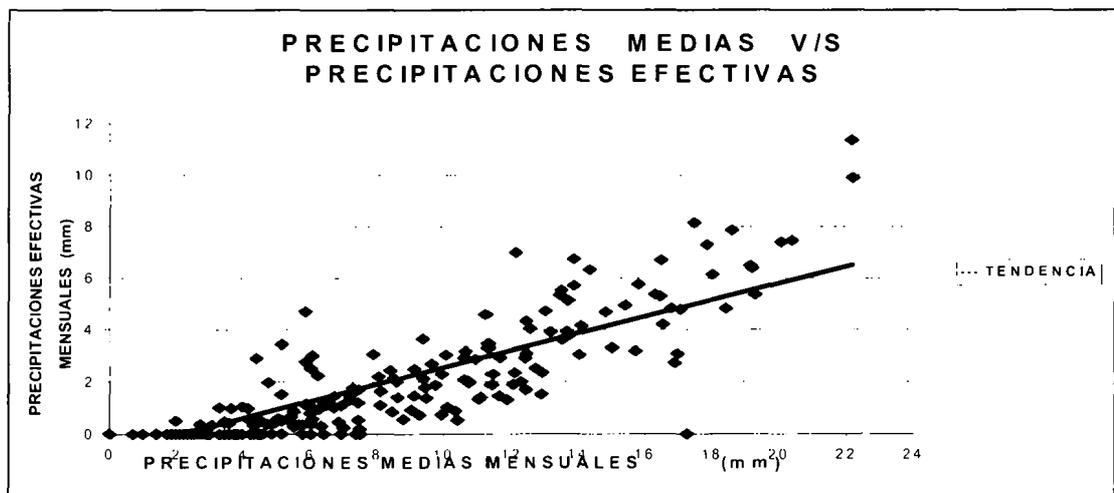


Figura 22. Nube de puntos correspondiente a la correlación entre precipitaciones efectivas y precipitaciones medias.

Es menester destacar que de la figura 22 se desprende que, a pesar que se muestran valores en raíz de cada variable, las precipitaciones de menor monto generalmente no produjeron P_e . Estos bajos montos corresponden principalmente a precipitaciones de los meses más secos, las cuales no alcanzan a producir la saturación del suelo o umbral mínimo de escorrentía, y si es que se alcanzara el punto de saturación de la superficie, estas precipitaciones podrían perderse en los procesos de evaporación y transpiración, ya mencionados anteriormente.

7.6. Coeficientes de escorrentía.

Para todo el periodo en estudio, y según la tabla 9, los coeficientes de escorrentía (C) presentaron una tendencia muy similar a las ED y las Pe, lo cual se puede apreciar en la figura 23. Para Dec-60 los mayores C se obtuvieron en los años 65/66 y 66/67, con una proporción de escurrimiento de 0,1; coincidiendo con las mayores generaciones de ED y, por ende, con los más altos montos de Pe. Los C más altos se presentaron en general en el mes de julio con valores de 0,33 y 0,25 para los años 65/66 y 67/68 respectivamente.

Es importante señalar que estos valores no coinciden con los montos más altos de Pe, el cual se determinó en 55,7 mm para junio del año 66/67. Ello se puede explicar debido a que en los meses anteriores (Abril, Mayo, Junio de 1967) cayeron en total 390,7 mm lo que aumentó la humedad del suelo y disminuyó la capacidad de infiltración del mismo.

Dec-70 es de difícil análisis, pues una gran cantidad de meses de alto registro de precipitaciones carecen de estimaciones de ED y Pe. De los meses comparables el máximo C anual correspondió al año 75/76 con un valor de 0,1; coincidente con las ED y Pe. Los C mayores a nivel mensual se obtuvieron para Julio y Agosto del mismo año con un valor de 0,18.

En Dec-80 el mayor C se obtuvo para el año 87/88 con un valor de 0,21 el cual resultó ser el mayor para todo el periodo en estudio. Los C mensuales más altos se presentaron en general en el mes de Julio, seguido por Agosto. Es necesario señalar que los más altos C se obtuvieron en meses poco lluviosos como son Octubre y Noviembre, presentando este último en el año 85/86 un C de 0,45. Esto se debería a la ocurrencia de precipitaciones de menores montos, pero que se desarrollaron en lapsos cortos y/o fueron de altas intensidades.

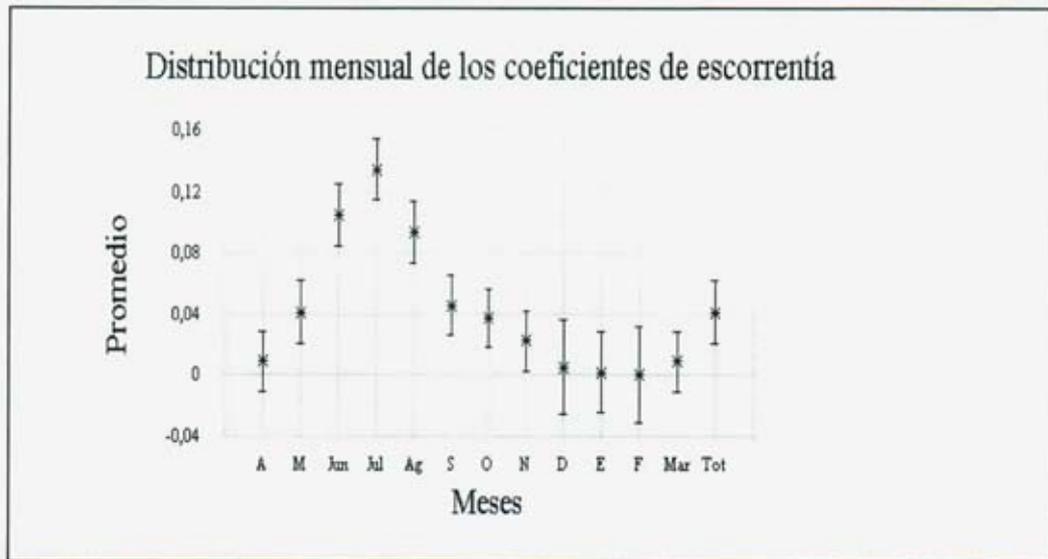


Figura 23. Comportamiento mensual e intervalo de confianza de los coeficientes de escorrentía promedio.

En este mismo marco, es posible visualizar en la figura 23 una mayor amplitud de los intervalos de confianza para los meses más secos que para los meses más lluviosos. Esto es producto de aguaceros cuyos montos son inusuales para el periodo en que ocurren, lo que provoca un aumento de las precipitaciones efectivas y también un aumento en la variabilidad de las precipitaciones para un mes particular. No obstante lo anterior, y a pesar de ser precipitaciones considerables para el periodo (según la tabla 11), las producciones de Pe (ED) no son muy altas en los meses secos, debido a las condiciones de sequedad imperantes en la cuenca durante el periodo estival, como también a la presencia de bosques en la cuenca, los cuales reducen los caudales máximos y los flujos base durante este periodo (Calder, 1992; Castillo *et al*, 1997).

En este mismo sentido, la figura 23 muestra que el bajo promedio anual obtenido (0,04) es producto de los muy bajos coeficientes de los meses correspondientes al periodo seco, los cuales generalmente fueron muy cercanos a 0. Esto se verifica al observar las

figuras 24, 25 y 26, las cuales muestran para cada década los coeficientes de escorrentía obtenidos v/s la media para cada una de las décadas.

Las figuras 24, 25 y 26 muestran que para las décadas del 60, 70 y 80 los coeficientes de escorrentía promedio fueron de 0,04; 0,05 y 0,06 respectivamente. Esto producto que Dec-60 posee la mayor cantidad de coeficientes con valor 0, y además de ser la que posee menos cantidad de coeficientes (72). Dec-80 posee el promedio más alto de coeficientes de escorrentía debido a la presencia de la mayor cantidad de valores sobre la media (35 de 120) y presenta los coeficientes más altos para todo el periodo.

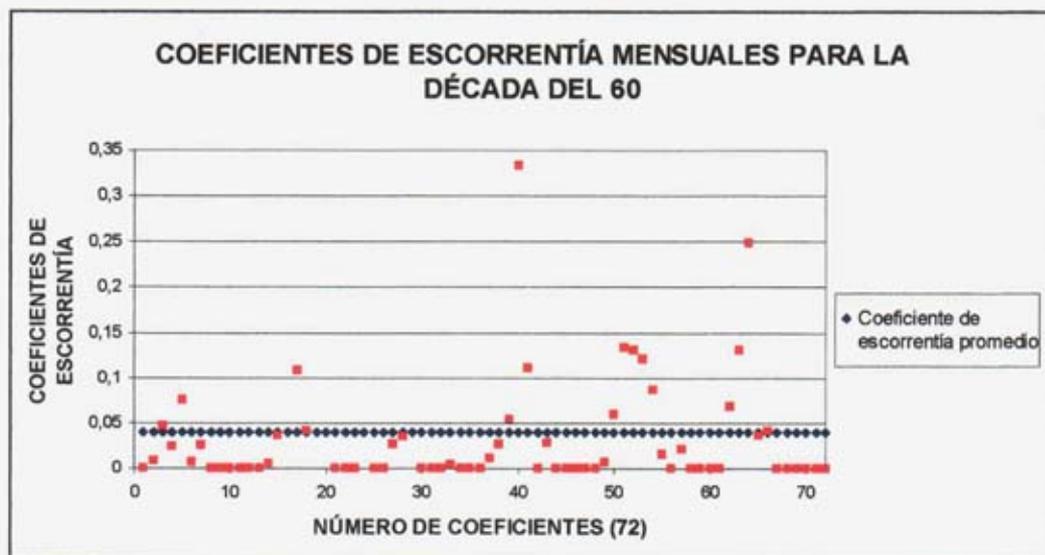


Figura 24. Coeficientes de escorrentía para la década del 60 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década.

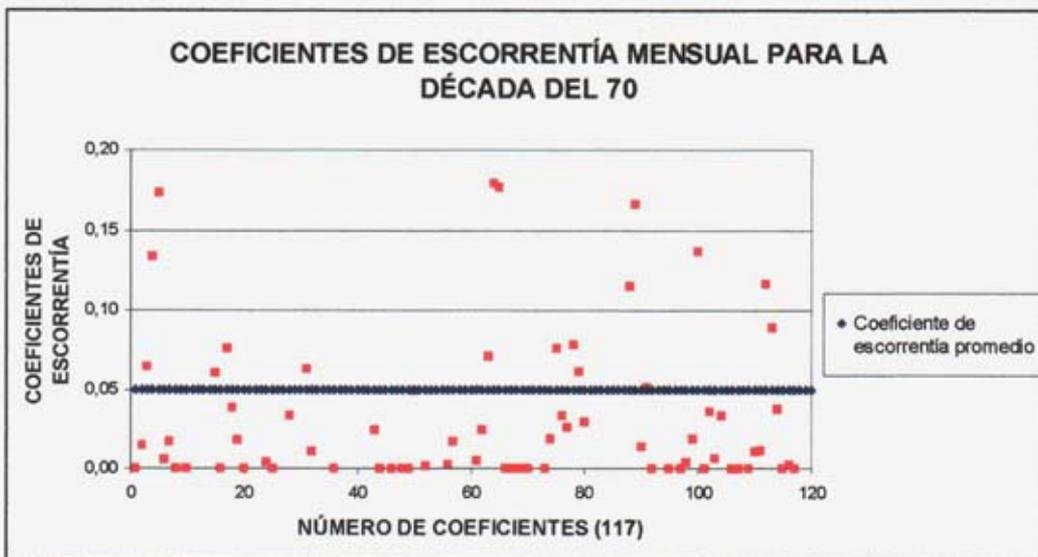


Figura 25. Coeficientes de escorrentía para la década del 70 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década .

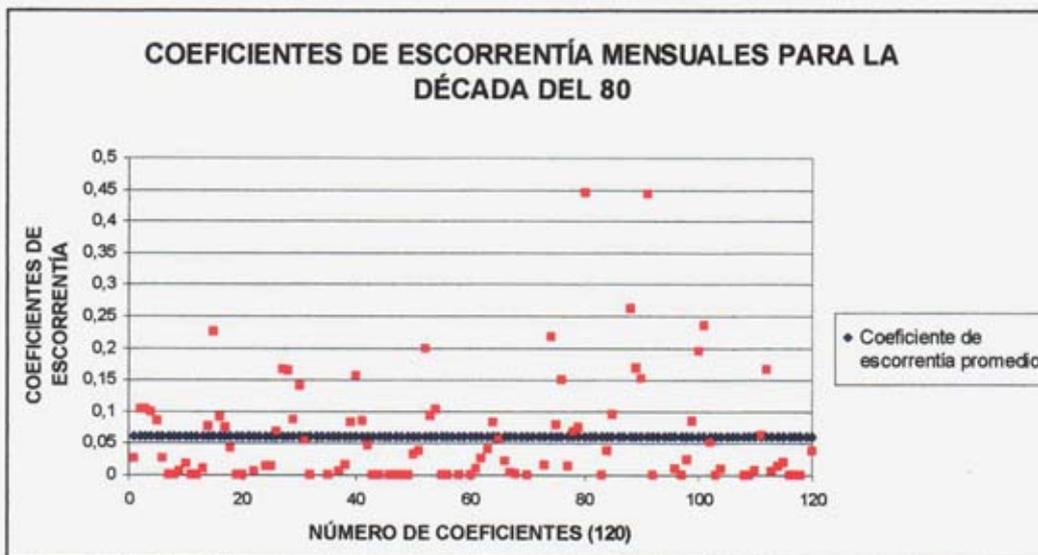


Figura 26. Coeficientes de escorrentía para la década del 80 v/s coeficiente de escorrentía promedio de la década.

Las tres figuras anteriores estarían evidenciando, y como se ha señalado anteriormente, un aumento hacia el final del periodo de las cantidades de escorrentía. A ello, si se el hecho suma a que sobre la cuenca se han producido intensas forestaciones, se estaría evidenciando que éstas no han producido un efecto reductor de las cantidades de escorrentía como se supone teóricamente, por lo que en primer término los bosques no estarían influyendo directamente sobre los montos de escorrentías directas, precipitaciones efectivas y coeficientes de escorrentía.

Un punto interesante de analizar además, es la escala en la que se realiza el estudio. Los aguaceros se agruparon de forma mensual, para luego obtener los resultados para cada año. Lo anterior estaría provocando en cierto modo un suavizamiento o subestimación de los C reales mensuales y anuales promedio, lo cual se explica porque aún existiendo una alta variabilidad, la existencia de un promedio atenúa los valores extremos obtenidos, provocando un suavizamiento del resultado final.

Otro aspecto muy importante lo constituiría el obtener coeficientes de escorrentía a una escala más pequeña, como puede ser a nivel diario o por aguacero. Así por ejemplo, al obtener un coeficiente por aguacero, se podría realizar un análisis según las magnitudes de las crecidas, generando distintos C para distintas intensidades o duraciones de precipitación o escorrentías directas y también obtener los C máximos que podrían ser incorporados al diseño de algún tipo de obra, ya sea civil, forestal, agrícola, etc., y a partir de ello podría obtenerse visiones diferentes acerca de la influencia del bosque ven la producción de escorrentías.

7.7. Análisis global de las precipitaciones medias, las escorrentías directas, las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía.

Luego de analizar cada variable individualmente, es necesario realizar un análisis del comportamiento conjunto de todas las variables descritas anteriormente, es decir, las precipitaciones medias, las escorrentías directas, las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía. De las tablas 6, 7, 8 y 9; y además del total de figuras, se pueden inferir algunos aspectos que se señalan a continuación.

A modo general se aprecia una relación directa entre las precipitaciones medias, las escorrentías directas, las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía. Ésto es que, un incremento en las precipitaciones produjo respectivos incrementos en las escorrentías directas, las precipitaciones efectivas y por ende de los coeficientes de escorrentía; así también, periodos con bajos montos de precipitaciones, provocaron bajas producciones de las variables anteriores.

A nivel anual, si se analiza el comportamiento de los coeficientes de escorrentía en relación a las precipitaciones medias caídas, sus magnitudes dependen en su mayoría de los montos de las precipitaciones caídas y de las intensidades que éstas tengan durante un aguacero. Lo anterior se corrobora en la figura 27, la cual muestra que en general para mayores montos de precipitaciones, se obtienen un valor mayor de coeficiente de escorrentía.

Otro aspecto es lo que ocurre a nivel mensual para las precipitaciones. Los meses de Mayo, Junio y Julio se presentan en promedio como los más lluviosos diferenciándose del resto, ésto no ocurre para las precipitaciones efectivas, en las cuales Julio se diferencia notoriamente del total de meses (figura 20). Esto se debería a que, dado los bajos montos de precipitaciones de los meses predecesores a Mayo (secos), éstos determinan que las precipitaciones de Mayo y Junio sean utilizadas de manera importante en la infiltración y

humectación del suelo, generando bajos montos de escorrentía directa. Como Julio es el mes de más alta pluviometría promedio y, sumado a condiciones de humedad precedentes del suelo, propicias para la escorrentía por las precipitaciones de los meses anteriores, entonces es posible advertir que en este mes se generen las más altas producciones de precipitación efectiva; arrastrando esta situación hasta Agosto, aunque este mes presente una baja de las precipitaciones caídas con respecto a Julio.

Lo anterior también es válido para los coeficientes de escorrentía. Por ejemplo, Agosto posee un coeficiente promedio más alto que otros meses como Junio, a pesar de tener menos precipitaciones caídas. Esto se debe a que Junio, como se señaló anteriormente, genera menores cantidades de precipitación efectiva que Agosto y si a esto se suma precipitaciones más altas de Junio, ello repercute en un coeficiente de escorrentía más bajo.

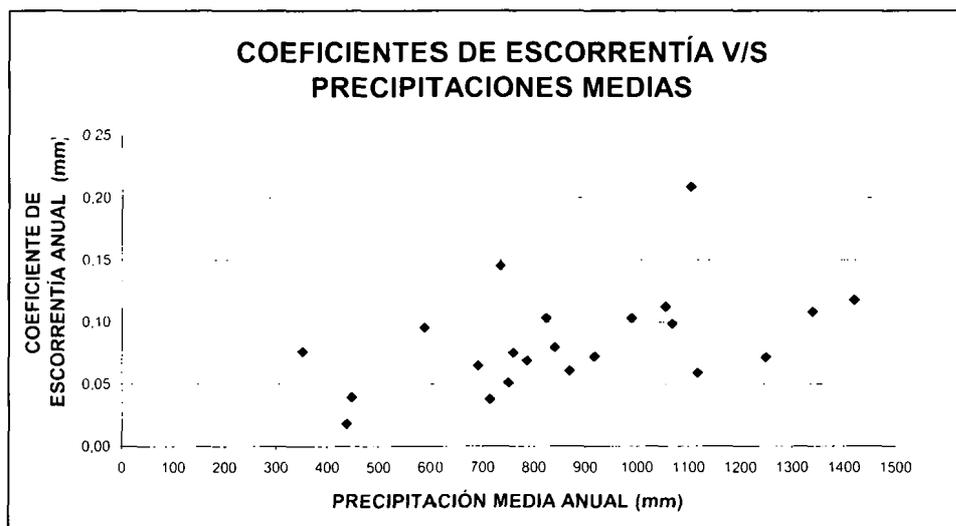


Figura 27. Coeficientes de escorrentía anual v/s precipitación media anual.

7.8. Análisis estadístico de los coeficientes de escorrentía.

El análisis estadístico se realizó basándose en los coeficientes de escorrentía obtenidos y los resultados alcanzados fueron utilizados como una herramienta de decisión e inferencia acerca de ciertos elementos de gestión forestal ejecutados sobre la cuenca.

Cabe mencionar en primer lugar que las pruebas utilizadas fueron la U de Mann-Whitney y la prueba de comparación de medianas, las cuales son enriquecidas con una serie de gráficos en relación a los coeficientes de escorrentía, sus magnitudes y distribución temporal. Esto se debe a que al realizar la verificación del supuesto de normalidad que exigen el ANDEVA y la prueba *t*, mediante el test K-S, éste no se cumplió (Apéndice 5).

7.8.1. Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.

De los resultados entregados por la prueba U, se desprende una inexistencia de diferencias significativas, a un nivel de confianza $\alpha=0,05$, para la comparación entre las décadas del '60 y '70; pero sí las hay en las comparaciones de ambas décadas con la del '80, rechazándose en este caso H_0 a favor de H_a . Estas diferencias se traducen en un escenario potencial de mayores cantidades de Pe y ED, y por lo tanto mayores proporciones de escurrimiento hacia el final del periodo, especialmente en la década del '80.

Lo anterior se podría explicar de la manera siguiente, teniendo como base que el coeficiente de escorrentía C, es un cociente entre Pe y P. Así, si se tienen altas precipitaciones (como ocurrió en Dec-80), y se asume como constante la tasa de infiltración del suelo en el tiempo, C debería tener un bajo valor ya que al no saturarse el suelo, éste está constantemente infiltrando agua y se generarían cantidades estables de ED y por lo tanto de Pe. Pero, como la infiltración del suelo no es constante, entonces ésta

disminuye en el tiempo hasta alcanzar su punto de saturación, lo que hace que se incremente gradualmente la producción de Pe en el tiempo y, al aumentar éstas, se produce un aumento de C. Por consiguiente, y según los resultados arrojados por esta prueba y la tabla 12, las magnitudes de los coeficientes de escorrentía estaría dependiendo de manera importante de los montos e intensidades de las precipitaciones caídas sobre la cuenca.

7.8.2. Prueba no paramétrica de comparación de medianas.

Los resultados arrojados por esta prueba, los cuales se presentaron en la tabla 11, muestran que no existen diferencias estadísticas, a un nivel de significancia $\alpha=0,05$; para ninguna de las comparaciones realizadas. Esto significa que no se produjeron disminuciones en el tiempo de los coeficientes de escorrentía, contradiciendo los resultados obtenidos por la prueba U y las diferentes gráficas presentadas en este capítulo.

Es importante señalar que esta prueba en comparación con la prueba U es estadísticamente más débil, según lo señalado por Aguirre (2001). En virtud de lo anterior y al observar los resultados entregados en las tablas 6, 7, 8, 9 y 12; además de las figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 18; se aprecia que éstas en general muestran y ratifican los resultados de la prueba U, infiriéndose aumentos en el tiempo de los coeficientes de escorrentía.

7.8.3. Análisis mediante promedios móviles.

Al observar la figura 8, la cual contiene los promedios móviles anuales para el total del periodo, se confirman los resultados entregados por la prueba U de Mann-Whitney. Ésto es que, no se aprecia una tendencia decreciente de la gráfica, lo que representaría una

baja de los coeficientes o proporciones de escorrentía; muy por el contrario, estas figuras muestran una tendencia creciente, representando un alza en los coeficientes de escorrentía, y en las precipitaciones efectivas, hacia el final del periodo en estudio, corroborando los resultados de la prueba U, además de los resultados que se muestran en la tabla 12, y en las figuras 18 y 21.

A nivel mensual, si se analizan los gráficos obtenidos para los meses más lluviosos, se puede afirmar que tampoco se aprecian en general patrones de comportamiento que permitan visualizar un descenso en las aportaciones de escorrentía. Para los meses de Abril, Octubre y Noviembre (figuras 9, 15, y 16), se presenta un comportamiento similar, esto es que se aprecia hacia el final del periodo, un ascenso notorio y un posterior descenso, provocados por algún mes que tuvo un coeficiente de escorrentía muy superior a los demás. Los meses de Mayo, Junio, Agosto y Septiembre (figuras 10, 11, 13 y 14) poseen un comportamiento similar entre sí, correspondiente a subidas y bajadas durante el periodo, pero siempre en términos ascendentes hacia el final. Julio (figura 12) es un mes que presenta un comportamiento un poco distinto con respecto a los demás meses, pues es el único que manifiesta, luego de una caída al comienzo, una tendencia ascendente clara, que implica aumentos de las cantidades de escorrentía en el tiempo.

7.9. Elementos de gestión forestal en la cuenca del río Purapel.

La cuenca del río Purapel es una zona geográfica que ha estado sometida a cambios en la composición vegetacional durante los últimos años. Ello es producto de un cambio en el uso del suelo en vastas áreas, pasando de cultivos agrícolas de secano y ganadería extensiva a plantaciones forestales, especialmente *Pinus radiata* (D. Don). Estos cambios deberían producir en teoría una merma en las producciones de escorrentías directas y precipitaciones efectivas, como se señaló en la sección 3.5.1 del capítulo 3.

Sin embargo, los resultados arrojados por las pruebas estadísticas y gráficas a que fueron sometidos los coeficientes de escorrentía obtenidos, no muestran un decremento de éstos, sino que más bien muestran un aumento en el tiempo de dichos valores. Esta situación se estaría debiendo principalmente a dos razones: una asociada a las precipitaciones caídas y la otra relacionada con las plantaciones forestales existentes en la cuenca.

En relación con las precipitaciones, ésta se refiere al aumento de las precipitaciones hacia el final del periodo en estudio. Como se observa en la tabla 11, las precipitaciones se incrementaron especialmente en la década del '80, lo que generó según la tabla 7 aumentos en las escorrentías directas de la cuenca. Esto provocó que las precipitaciones efectivas de esta última década presentaran diferencias con respecto a las dos anteriores, repercutiendo en unos coeficientes de escorrentía más altos.

Las relacionadas con las plantaciones forestales se refieren principalmente al consumo de agua de éstas y a los cambios que producen en el medioambiente. Las plantaciones en sus primeros años presentan un gran consumo de agua, utilizado en el crecimiento explosivo que éstas manifiestan. Esto hace que se infiltren más cantidades de agua y queden menores cantidades disponibles para la escorrentía directa. Si esto se suma a la poca cobertura de las plantaciones en edades tempranas, favoreciendo la evaporación, se produce una baja en los montos de escorrentía directa y en los coeficientes de escorrentía.

El otro aspecto está relacionado al cambio en las condiciones climáticas que generan en la zona donde están ubicadas; el bosque adulto disminuye las temperaturas dentro del dosel y aumenta la humedad, produciéndose menores cantidades de evaporación y mayores cantidades de escorrentía directa, influyendo en un aumento de los coeficientes de escorrentía, corroborando lo señalado por López (1998).

En cuanto a la relación entre los coeficientes de escorrentía y las actividades de forestación masivas ocurridas en la cuenca, en un principio sus magnitudes no estarían en

función de ésta, más bien estarían relacionadas con las precipitaciones (intensidad y montos de éstas). No obstante, el proceso de forestación tuvo su gran auge luego de la promulgación del Decreto Ley 701 de fomento forestal, por lo que las plantaciones en los setenta, y como se señaló anteriormente, presentaron un gran consumo de agua, reduciendo las cantidades de escorrentía. Luego, podría pensarse que ese consumo se estabiliza dejando más cantidades de aguas libre para el escurrimiento, no obstante que ello contradice a la literatura técnica respectiva.

Finalmente, es importante destacar la necesidad de abordar este estudio de una forma más amplia, desde el punto de vista temporal y espacial. Ello, porque el comportamiento de los coeficientes de escorrentía varía en el tiempo en función de las precipitaciones y en función de la cobertura vegetal, por lo cual deben incorporarse más elementos que permitan hacer inferencias más concretas en cuanto a las relaciones de la vegetación con el proceso precipitación-escorrentía, como por ejemplo la escala temporal, la ocupación del suelo de la cuenca por el bosque, el nivel de intercepción, la evapotranspiración real, etc., todos aspectos que deberán ser abordados por el proyecto FONDECYT N^o 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”, en cuyo marco se desarrolla esta investigación.

8.0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones.

Las conclusiones que se pueden establecer luego de la realización del presente estudio son las siguientes:

- En general se aprecia una relación directa entre las variables utilizadas en este estudio, como son las precipitaciones con las precipitaciones efectivas y los coeficientes de escorrentía. Un incremento o disminución de la primera, afectó directamente las magnitudes de las demás variables.
- Se manifiesta una carencia de estaciones pluviométricas dentro o en las cercanías de la cuenca, lo que imposibilita una estimación más certera de las precipitaciones caídas. Sobre esto mismo se puede establecer la falta de alguna estación pluviográfica, que permitiera obtener más detalles acerca del proceso precipitación-escorrentía.
- La metodología en general puede ser considerada como válida y eficiente, en función de los resultados obtenidos, además de la calidad de éstos.
- Las escorrentías directas en promedio, a nivel anual, aumentaron en el tiempo, siendo la década del '80 la de mayor generación de este tipo de escorrentía. Mensualmente las mayores escorrentías directas se produjeron en el mes de Julio, seguido por Junio y Agosto.
- Las mayores cantidades de precipitaciones efectivas en promedio a nivel anual se produjeron en la década final del periodo en estudio. A nivel mensual las más altas

cantidades de precipitaciones efectivas se produjeron en Julio, seguido por Junio y Agosto.

- Los montos estimados para las precipitaciones efectivas fueron bajos, teniendo en cuenta los montos de las precipitaciones caídas. De lo anterior se deduce que para el periodo estudiado se produjeron grandes pérdidas durante el proceso precipitación-escorrentía.
- En cuanto a los coeficientes de escorrentía, se puede concluir que más que un coeficiente de escorrentía en sentido estricto, se estimaron proporciones mensuales y anuales de escorrentía directa, por lo que sus valores estarían subestimando a los coeficientes máximos ocurridos para cada mes y año. La escala utilizada no fue la más adecuada, pues no permite conocer algunos aspectos de interés, como la intensidad y distribución de las precipitaciones.
- Según la prueba U de Mann-Whitney y los promedios móviles, no existió un decremento de las proporciones o coeficientes de escorrentía en el periodo en estudio, sino que más bien más bien hubo un incremento de éstos, inducido, al parecer, por un aumento de las precipitaciones.
- En cuanto a la gestión forestal realizada sobre la cuenca, los resultados obtenidos no permiten inferir acerca de elementos de actuación sobre la cuenca, pues no se produjeron disminuciones en las cantidades de escorrentías y precipitaciones efectivas durante el periodo de tiempo estudiado, de acuerdo a lo esperado según los trabajos y resultados obtenidos por Singh (1982), Calder (1992) y, Lindholm y Stenheck (1993), entre otros.

8.2. Recomendaciones.

Las recomendaciones que se pueden establecer luego de la ejecución de este estudio son:

- Se recomienda y sugiere la instalación de más estaciones meteorológicas, tanto pluviométricas como pluviográficas, lo que permitirá tener un mayor control y seguridad de los registros de precipitación, como también contar con registros horarios de las precipitaciones y acceder a las intensidades con que éstas ocurren.
- Para futuras investigaciones en esta línea, se sugiere ampliar la escala de estudio, esto es investigar a nivel diario y/o horario las crecidas acontecidas en un periodo, con el fin de conocer las intensidades y distribución de las precipitaciones, lo que permitirá poder obtener los coeficientes de escorrentía máximos para una crecida en particular.
- En este marco también sería favorable incluir más variables como la capacidad de infiltración del suelo y la evaporación, entre otras. Ésto permitiría tener un conocimiento más acabado del ciclo hidrológico y del proceso precipitación-escorrentía.
- Finalmente, es posible recomendar la extensión de este tipo de estudio, abarcando el total de la década del '60, y para toda la década del '90. Así se podrán tener resultados más certeros acerca de las variaciones de las escorrentías y los coeficientes de escorrentía producto de los cambios en la vegetación del lugar de estudio.

9.0. BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, M. 2001. Comunicación personal al autor. Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad de Talca. Talca, Chile.
- APARICIO, F. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- CALDER, I. 1992. Hydrologic effects of land-use change. En: Handbook of Hydrology, Editor D. Maidment. Mc Graw-Hill, Estados Unidos. p.i.
- CARO, J. 2001. Modelación de caudales recesivos para la cuenca del río Purapel, estación Nirivilo. Memoria de título. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 121 p.
- CASTILLO, V; MARTINEZ, M Y ALBALADEJO, J. 1997. Runoff and soil loss response to 'vegetation removal in a semiarid enviroment. Soil Science Society of America Journal 61(4):1116-1121.
- CHOW, V; MAIDMENT, D y MAYS, D. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 584 p.
- CID, L; MORA, A y VALENZUELA, M. 1990. Inferencia Estadística. Facultad de Ciencias. Departamento. de Matemáticas. Universidad de Concepción. Editorial Aníbal Pinto. Concepción, Chile. 319 p.
- CRITCHLEY, W y SIEGERT, K. 1996. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Tomo I: Bases técnicas y experiencias en Africa y Asia. Fao. Roma, Italia.

88 p.

- DONOSO, C.1981. Ecología forestal: el bosque y su medioambiente. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 369 p.

- DOUGLAS, J. 1981. A summary of some results from the Coweeta Hydrologic Laboratory. Appendix B. En: Tropical Forested Watersheds, editores L.S. Hamilton y P.N. King. Westview Press, Boulder, Colorado, Estados Unidos. p.i.

- FERNÁNDEZ, F. 1995. Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Madrid, España. 285 p.

- FERRER, F. 1993. Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España. 76 p.

- GONZÁLEZ, M y GARCÍA, D. 1995. Restauración de ríos y riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 600 p.

- GUJARATI, D. 1997. Econometría. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana S.A. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 824 p.

- HUBER, A y OYARZÚN, C. 1983. Precipitación neta e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). Revista Bosque (5) 1:13-20.

- HUBER, A y LÓPEZ, D. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don), Valdivia, Chile. Revista Bosque 14 (2):11-18.

- IROUMÉ, A. 1992. Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile. *Revista Bosque* 13 (2):15-23 p.
- LINDHOLM, P y STENBECK, I. 1993. Rainfall, soil loss and the effect of vegetation cover; Results of measurements in a tree plantation area in West Pokot District of Kenya. International Rural Development Centre, University of Agricultural Sciences, Working Paper N° 244. Uppsala, Suecia. 25 p.
- ⁴ LINSLEY, R; KHOLER, M y PAULUS, J. 1988. Hidrología para ingenieros. Editorial Mc Graw-Hill Latinoamericana. México. 584 p.
- LLAMAS, M. 1976. Relaciones entre las aguas subterráneas y las superficiales. Hidrología subterránea. Tomo I. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España. 1099-1153 p.
- ⁵ LLAMAS, J. 1993. Hidrología general. Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial Universidad del País Vasco. España. 635 p.
- LÓPEZ, F. 1998. Restauración hidrológico forestal y control de la erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa, Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 851 p.
- LUCERO, A. 1997. Análisis probabilístico espacial y temporal de las precipitaciones pluviales anuales de la VII región. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 69 p.
- MAIDMENT, D. 1993. Handbook of Hidrology. Mc Graw-Hill Inc. USA. p.i.
- MARABOLÍ, F. 2000. Evaluación de tres modelos precipitación-escorrentía (BUDYKO, TURC-PIKE y PIZARRO), en la cuenca del río Achibueno, VII región, Chile. Memoria de título. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca,

Chile. 79 p.

- MENDELHALL, W y REINMUTH, J. 1981. Estadística para administración y economía. Grupo editorial Iberoamericana. Tercera edición. México D.F., México. 707 p.
- MINTEGUI, J y LÓPEZ CADENAS, F. 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz, España. 306 p.
- 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.
- M.O.P. y D.G.A. 1988. Balance hídrico de Chile-1987. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 50 p.
- MONTGOMERY, C. y RUNGEN, G. 1996. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería. Mc Graw-Hill Interamericana editores, S.A. México D. F., México. 895 p.
- OYARZÚN, C.; HUBER, A. y VÁSQUEZ, S. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de Pinus radiata I: Redistribución de las precipitaciones. Bosque 6 (1): 3-14. Valdivia, Chile.
- PIZARRO, R y NOVOA, P. 1986. Elementos Técnicos de Hidrología. Instructivos Técnicos. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. La Serena, Chile. 57 p.
- PIZARRO, R; GONZÁLEZ, P; WITTERSHEIM, M; SAAVEDRA, J y SOTO, C. 1993. Elementos Técnicos de Hidrología III. Proyecto Regional Mayor sobre 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.

☞ RAMÍREZ, C. 1998. Análisis comparativo de los modelos para la estimación de precipitaciones medias areales en periodos extremos. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 78 p.

REINHART, K; ESCHNER, A. y TRIMBLE, G. 1963. Effects on streamflow of four forests practices in the mountains of West Virginia. U.S. Forest Service Research Paper, NE-1, 79 p. Washington, Estados Unidos.

REMENIERAS, G. 1971. Tratado de Hidrología Aplicada. Editores Asociados. Madrid, España. 515 p.

RODIER, J. 1990. Caracteres généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi-arides en Afrique-leurs conséquences sur les études des ingénieurs. Service Hydroligue, ORSTOM. France. 19 p.

SANDOVAL, C. 2000. Análisis comparativo de los modelos precipitación-escorrentía de Grunsky, Peñuelas, Coutagne y Turc en la cuenca del río Achibueno y en la cuenca del río Purapel. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 83 p.

SINGH, V. 1988. Hydrologic systems. Prentice Hall. Englewoods Cliffs. New Jersey, Estados Unidos. 2 Vol.

SOTO, M. 2000. Calibración de dos modelos de simulación integral de cuenca, para la hoya hidrográfica del río Purapel, estación Nirivilo. Memoria de título. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca, Chile. 122 p.

TAUCHER, E. 1997. Bioestadística. Vicerrectoría de asuntos estudiantiles, Universidad de Chile Colección textos universitarios. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 310 p.

TÉMEZ, J. 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección general de carreteras. Madrid, España. 63 p.

↳ TOBAR, M. 2000. Evaluación de tres modelos (Budiko, Turc-Pike y Pizarro) precipitación-escorrentía en la cuenca del río Purapel. Memoria de título. Universidad de Talca. Talca, Chile. 83 p.

VILARÓ, F. 1976. Elementos de Hidrología de Superficie. Hidrología Aplicada. Tomo I. Ediciones Omega S.A.. Barcelona, España. p 385-398.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. Modelo seleccionado y utilizado en la determinación del segundo punto de quiebre para los hidrogramas de crecidas.

Tabla 13. Modelo Seleccionado (logarítmico de base 10).

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico t	Valor p
Constante	1.64875	0,0108642	151,76	0,0000
Log (Q _{máx})	-0,22032	0,00724419	-30,4141	0,0000

Tabla 14. Análisis de Varianza del modelo seleccionado.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor p
Modelo	2,03635	1	2,03635	925,02	0,0000
Residuo	0,455692	207	0,002201		
Total	2,49204	208			

Coefficiente de determinación = 81.7141 %.

Coefficiente de determinación ajustado = 81.6257 %.

Error estándar de la estimación. = 0.0469192

Error absoluto medio = 0.0359001

Verificación de supuestos de mínimos cuadrados

NORMALIDAD

Test K-S

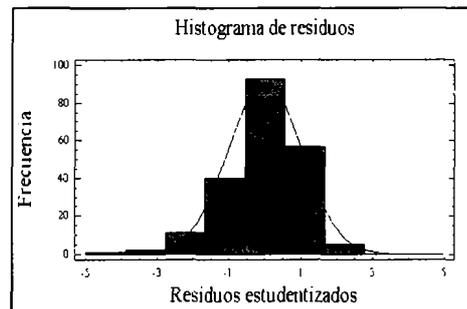
Estadístico estimado K-S plus: 0,0699801

Estadístico estimado K-S dminus: 0,0463849

Estadístico dn: 0,0699801

p-value : 0,258512

Histograma de frecuencias



* Como el **valor p estimado** es mayor a **0,05**; y la gráfica de residuos se asemeja al histograma patrón, entonces la función generada por los residuos se asemeja a una distribución normal, cumpliéndose el supuesto de **Normalidad**.

HOMOCEASTICIDAD

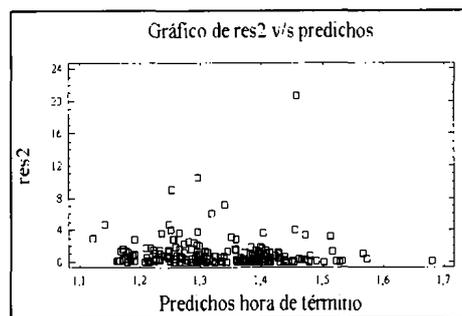
Test de Goldfeld-Quandt

Regresión 1
SCR1= 633,373
g.l. = 69

Regresión 2
SCR2= 262,793
g.l. = 69

$K(Fc) = 0,49141$
 $Ft = 1,49$

Gráfico de residuos²



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

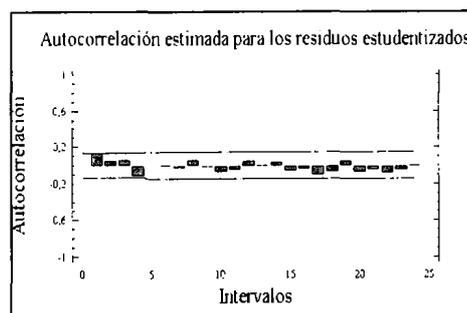
AUTOCORRELACIÓN

Test de Durbin-Watson

Estadístico d Durbin-Watson = 1,71912
 $d_l = 1,758$
 $d_u = 1,778$

Decisión
Zona de indecisión

Gráfico de Autocorrelación



* A pesar que según el test Durbin-Watson se cae en una zona de indecisión, la gráfica no muestra intervalos fuera de la línea que representa el intervalo de confianza. A pesar de lo señalado por el test D-W, se asume que no existe autocorrelación entre las variables correlacionadas.

APÉNDICE 2. Información pluviométrica y modelo seleccionado y utilizado en la completación de las precipitaciones para la estación Constitución.

*** Información pluviométrica**

Tabla 15. Precipitaciones mensuales y anuales de la estación Constitución 92-00 (mm).

AÑOS	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
92/93				26,6	91,2	74,9	10,1	1,9	5,6	0,0	0,0	0,0	
93/94	50,9	173,4	121,5	33,1	42,1	11,0	16,5	9,0	2,5	1,5	0,1	0,1	461,7
94/95	10,9	82,5	161,5	138,1	16,0	29,0	66,6	0,0	34,0	0,0	0,0	0,0	538,6
95/96	150,0	0,0	237,0	393,0	105,0	17,5	24,9	1,5	0,5	0,0	1,0	0,0	930,4
96/97	9,5	68,0	94,7	100,0	140,5	5,3	13,5	0,0	8,2	0,0	0,0	8,0	447,7
97/98	-	-	-	-	-	75,8	141,8	43,5	0,0	0,0	0,0	0,0	261,1
98/99	32,6	151,3	65,8	1,7	17,3	40,6	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	26,6	336,1
99/00	2,5	61,0	233,0	71,1	92,0	159,0	8,0	4,5	0,0	0,0	25,5	0,0	656,6

-: meses sin registro de precipitaciones.

Tabla 16. Precipitaciones mensuales y anuales de la estación Nirivilo 92-00 (mm).

AÑOS	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
92/93	65,0	515,5	353,0	35,5	138,5	76,5	7,0	7,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1200,0
93/94	95,0	200,0	198,0	83,0	87,0	5,0	11,0	27,1	7,0	0,0	3,0	3,0	988,5
94/95	112,7	98,0	150,0	273,0	3,0	119,0	76,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	833,7
95/96	111,0	3,0	0,0	0,0	23,2	20,5	33,2	0,0	0,0	0,0	7,0	4,0	201,9
96/97	27,5	34,6	144,3	103,1	125,8	18,6	12,3	0,0	0,0	5,1	7,0	1,0	479,3
97/98	100,8	118,2	317,0	79,2	79,9	119,3	152,6	40,9	4,0	0,0	0,0	0,0	1011,9
98/99	49,9	86,1	97,0	17,7	24,2	60,0	0,0	0,0	0,0	5,5	5,1	12,8	357,8
99/00	7,9	61,5	169,5	62,1	34,2	194,5	12,2	14,5	0,0	0,0	41,0	0,0	597,4

*** Modelo de regresión seleccionado y utilizado en la completación de precipitaciones**

Tabla 17. Modelo Seleccionado . $\text{raíz}(Y) = b \cdot \text{raíz}(X)$

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico t	Valor p
Raíz (Nirivilo)	0,895053	0,0435638	16,261	0,0000

Tabla 18. Análisis de Varianza modelo seleccionado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor p
Modelo	2900,85	1	2900,85	166,351	0,0000
Residuo	941,654	84	17,43803		
Total	2,49204	85			

Coefficiente de determinación = 0,9053 %.

Coefficiente de determinación ajustado = 0,9012 %.

Error estándar de la estimación. = 1,28993

Error absoluto medio = 0,004231

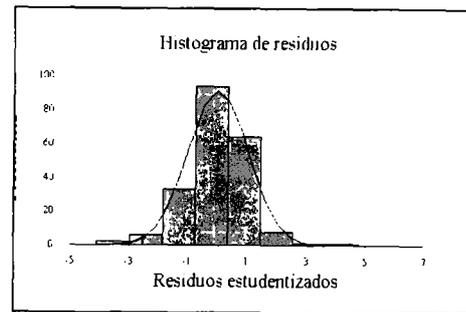
* Verificación de supuestos de mínimos cuadrados

NORMALIDAD

Test K-S

Estadístico K-S Dplus : 0,129781.
Estadístico K-S Dminus: 0,0764431.
Estadístico K-S DN: 0,129781
Valor p: 0,118079

Histograma de Frecuencias



* Según el **valor p** obtenido es mayor a 0,05; y la forma de la gráfica del histograma de frecuencias se asemeja a la curva normal, se está en presencia de un comportamiento normal de los residuos, cumpliéndose el supuesto de **Normalidad**

HOMOCEASTICIDAD

Test G-Q

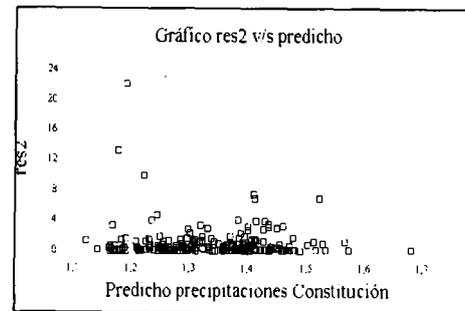
SCR1:58,9538 g.l.: 27

SCR2: 87,9842 g.l.: 27

K (Fc): 1,655326

Ft: 1,9048

Gráfico de res²



* Como el valor de Fc es menor al del Ft y la gráfica de residuos no presenta ningún patrón claro de comportamiento, se acepta el cumplimiento de **Homocedasticidad de varianzas** para los residuos.

AUTOCORRELACIÓN

Test de Durbin-Watson

Estadístico d: 2,08251

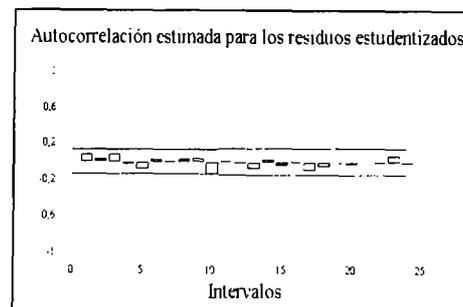
Estadístico d_L: 1,624

Estadístico d_U: 1,679

Decisión

No rechazar, no hay evidencia de autocorrelación positiva o negativa.

Gráfico de Autocorrelación



* Como la regla de decisión del test de Durbin –Watson es de no rechazar, no hay evidencia de algún tipo de autocorrelación. Esto, sumado a la gráfica, que no presenta signos de autocorrelación (las barras no sobrepasan la línea del intervalo), hace que se cumpla el supuesto de **No autocorrelación** entre las variables.

APÉNDICE 3. Escorrentías totales y subterráneas mensuales y anuales para el periodo total en estudio.

Tabla 19. Escorrentías totales mensuales y anuales para el periodo total (Millones de m³).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	0.0000	0.0000	4,0939	0,4573	2,4949	0,4010	0,4738	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7,9208
63/64	0.0000	0,2031	2,1278	-	14,8816	8,8434	0,0000	0,0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	2,3309
64/65	0.0000	0.0000	1,0709	1,2353	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.1100	0.0000	0.0000	0.0000	2,4161
65/66	0,6704	1,4974	2,1846	22,3580	17,8665	0.0000	1,1439	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21,1783
66/67	0,3734	1,1554	22,1483	10,8733	13,5714	1,22142	0,14436	0.0000	1,2678	0.0000	0.0000	0.0000	49,3895
67/68	0.0000	3,8645	2,2376	4,5557	0,7531	1,1768	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12,5877
70/71	0.0000	0,5965	6,6758	12,9594	3,1384	0,4025	0,4220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24,1947
71/72	-	-	9,0707	4,9972	4,6472	1,3020	0,4965	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1117	20,6254
72/73	0,0000	-	-	2,2278	-	-	3,0511	0,4346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5,7135
73/74	-	-	-	-	-	-	0,6580	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,6580
74/75	0.0000	3,9738	-	1,3004	-	-	-	0,0469	0,1879	-	-	-	5,2742
75/76	0,2070	1,2760	5,1331	25,7476	4,7958	0.0000	0,4125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	37,5720
76/77	0.0000	0,5210	7,2011	1,2293	1,3967	2,5322	2,6134	0,8794	0.0000	-	-	-	16,3731
77/78	-	-	-	20,8215	10,4779	0,7463	3,4827	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	35,5285
78/79	0.0000	0,2160	1,3836	31,3507	0.0000	5,0827	0,3398	1,4089	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	39,7818
79/80	0.0000	0,5795	0,2932	52,1723	7,5303	8,3612	0.0000	0,3879	0.0000	0.0000	0,0216	0,1154	69,4614
80/81	3,3450	11,2552	12,6940	10,6443	5,4981	2,7062	0.0000	0.0000	0,1129	0,1456	0.0000	0.0000	46,4013
81/82	0,5774	13,6538	4,3289	4,2724	13,6538	4,3289	0.0000	0.0000	0.0000	0,1084	0.0000	0,1161	41,0397
82/83	0,1207	8,5774	20,8074	22,2531	9,4371	11,5789	3,9224	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	76,6970
83/84	0,2159	1,1131	11,0604	13,9234	6,1374	1,7194	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	34,1695
84/85	0.0000	3,7481	4,5439	47,4919	7,3823	7,9513	1,9247	0.0000	0.0000	0,3179	0.0000	0.0000	73,3602
85/86	0,2870	1,6719	2,9030	7,9056	0,9713	0,8474	0,2389	0,2809	0.0000	0.0000	0.0000	-	15,1060
86/87	0,8793	23,8289	12,5578	5,2669	1,6442	0,9539	1,1124	3,9866	0.0000	0.0000	0.0000	0,4801	50,7104
87/88	0,4656	-	-	45,7156	18,1261	7,9117	3,0945	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,3186	75,6320
88/89	0.0000	0,3724	6,5461	13,9245	16,9363	1,7735	0.0000	0,2989	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	39,8516
89/90	0.0000	0,1971	3,0672	10,7419	7,6353	0,3957	0,2072	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1,2749	23,5194

Tabla 20. Escorrentías subterráneas mensuales y anuales para el periodo total (Millones de m³).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
62/63	0.0000	0,1603	1,7016	0,2664	0,8794	0,3496	0,2261	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3,5834
63/64	0.0000	0,0648	0,7086	-	7,4542	6,2239	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	-	0,7734
64/65	0.0000	0.0000	0,5548	0,4158	-	0.0000	0.0000	0.0000	0,0751	0.0000	0.0000	0.0000	1,0457
65/66	0,2314	0,4717	8,2116	9,7379	7,3400	0.0000	0,8215	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8,8646
66/67	0,1715	0,3488	7,7733	5,1422	8,7272	0,7035	0,0782	0.0000	0,7783	0.0000	0.0000	0.0000	22,9413
67/68	0.0000	1,7348	0,9313	2,1977	0,3579	0,4808	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5,7025
70/71	0.0000	0,1440	2,1172	4,3913	2,1332	0,3257	0,3694	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9,4807
71/72	-	-	3,3485	2,8061	2,4385	0,9661	0,3289	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,0707	9,9588
72/73	0.0000	-	-	0,7957	-	-	1,8798	0,3614	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3,0369
73/74	-	-	-	-	-	-	0,3525	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,3525
74/75	0.0000	1,1466	-	0,7056	-	-	-	0,0272	0,1089	-	-	-	1,8522
75/76	0,1490	0,3521	1,7823	9,7945	3,1481	0.0000	0,3993	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15,6252
76/77	0.0000	0,2057	3,4939	0,7888	0,8385	0,6528	0,1666	0,5579	0.0000	-	-	-	6,7043
77/78	-	-	-	9,9618	5,0635	0,6561	2,3197	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	18,0011
78/79	0.0000	0,1325	0,6478	17,1989	0.0000	4,0225	0,3026	0,4209	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22,7251
79/80	0.0000	0,3575	0,2309	42,4404	4,9285	7,4537	0,0000	0,3622	0.0000	0.0000	0,0119	0,0503	55,8355
80/81	1,4109	4,9600	5,4774	4,9911	3,9465	2,3334	0.0000	0.0000	0,0744	0,1111	0.0000	0.0000	23,3050
81/82	0,3023	6,2444	2,3348	1,8891	12,4047	3,7632	0.0000	0.0000	0.0000	0,0803	0.0000	0,0691	27,0878
82/83	0,0872	2,5927	7,0408	10,6626	5,4848	4,8340	2,8776	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33,5796
83/84	0,1855	0,6012	5,0529	6,5843	3,3255	1,1674	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	16,9168
84/85	0.0000	1,2917	2,9044	22,2522	4,2882	3,7514	1,1740	0.0000	0.0000	0,2574	0.0000	0.0000	35,9194
85/86	0,1986	0,7563	1,5390	3,9363	0,7236	0,5836	0,2029	0,2096	0.0000	0.0000	0.0000	-	8,1499
86/87	0,3285	6,6779	6,6539	2,8364	1,0521	0,6691	0,8579	0,9298	0.0000	0.0000	0.0000	0,1298	20,1354
87/88	0,1973	-	-	12,4665	9,7460	4,4702	0,9020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,1323	27,9143
88/89	0.0000	0,1343	2,1193	3,5989	5,2225	1,0248	0.0000	0,2305	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12,3302
89/90	0.0000	0,1491	0,8532	2,8831	7,4959	0,2853	0,1457	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,1527	11,9650

:- no determinadas por fallas en el registro de la información limnigráfica.

APÉNDICE 4. Términos de cálculo y determinación del Tiempo de concentración (Tc) de Kirpich para la cuenca del río Purapel.

* Términos de cálculo del tiempo de concentración

Tabla 21. Términos de cálculo para el tiempo de concentración.

Término de cálculo	Valor	Unidad
Longitud del cauce principal	36,013	Km
Cota máxima	350	m
Cota mínima	100	m
Pendiente del cauce	0.05	adimensional
Tiempo de concentración	8,02	Hr

* Determinación del Tiempo de concentración de Kirpich

J= 0.005

Tc =8,02 horas.

APÉNDICE 5. Estadísticas y pruebas de normalidad para los coeficientes de escorrentía.

Tabla 22. Estadísticas básicas de los coeficientes de escorrentía.

Década	Datos	Media	Mediana	Varianza	D. estándar	Coef. Variación
60	43	0,0493	0,03	0,0046	0,0685	138,94%
70	60	0,0401	0,02	0,0026	0,0511	127,23%
80	78	0,075	0,05	0,0082	0,0908	121,08%

* Verificación del supuesto de normalidad para modelo simple y transformaciones realizadas.

1. Simple

Test K-S (valor p): 0,000122

No cumple normalidad

2. Raíz

Test K-S (valor p): 0,01973

No cumple normalidad

3. Raíz (1+C)

Test K-S (valor p): 0,000122

No cumple normalidad

4. Log 10 (C+0,0001)

Test K-S (valor p): 2,7179E-7

No cumple normalidad

5. Ln (C-0,0001)

Test K-S (valor p): 2,71803E-7

No cumple normalidad

APÉNDICE 6. Datos de origen de los promedios móviles.

Tabla 24. Datos de origen de los promedios móviles obtenidos.

ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
0.0000	0.0050	0.0372	0.0300	0.0918	0.0160	0.0129	-	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0391
0.0040	0.0109	0.0393	0.1842	0.1096	0.0137	0.0142	0.0000	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0603
0.0064	0.0285	0.0714	0.1665	0.1160	0.0289	0.0145	0.0000	0.0084	0.0000	0.0000	0.0000	0.0731
0.0064	0.0514	0.1061	0.2375	0.0897	0.0426	0.0145	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0925
0.0024	0.0474	0.1098	0.1710	0.1104	0.0444	0.0109	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0832
0.0000	0.0415	0.0867	0.1909	0.0953	0.0281	0.0118	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0822
0.0000	-	0.0646	0.0832	0.1244	0.0217	0.0326	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.1032
-	-	-	-	-	-	0.0351	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	-
0.0000	-	-	0.0173	-	-	0.0436	0.0008	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	-
0.0016	0.0367	-	0.0900	-	-	0.0123	0.0008	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	-
0.0016	0.0306	0.0735	0.0711	0.1010	0.0391	0.0306	0.0107	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0922
0.0016	0.0216	0.0735	0.1089	0.1227	0.0307	0.0375	0.0099	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1304
0.0000	0.0114	0.0472	0.0948	0.0640	0.0425	0.0396	0.0209	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1149
0.0000	0.0073	0.0151	0.1225	0.0849	0.0288	0.0192	0.0119	0.0000	0.0000	0.0002	0.0215	0.1197
0.0088	0.0391	0.0445	0.1174	0.0580	0.0329	0.0022	0.0119	0.0021	0.0061	0.0002	0.0215	0.0682
0.0122	0.0635	0.1135	0.1023	0.0829	0.0351	0.0000	0.0008	0.0021	0.0080	0.0002	0.0262	0.0671
0.0169	0.0827	0.1654	0.1187	0.0828	0.0692	0.0184	0.0000	0.0021	0.0080	0.0000	0.0048	0.0861
0.0102	0.0539	0.1585	0.1380	0.0827	0.0763	0.0184	0.0000	0.0000	0.0020	0.0000	0.0048	0.0887
0.0068	0.0391	0.0964	0.1739	0.0889	0.0966	0.0184	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1018
0.0052	0.0254	0.0541	0.1462	0.0781	0.0578	0.0014	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0752
0.0084	0.0927	0.0528	0.1442	0.0544	0.0653	0.0263	0.1496	0.0000	0.0000	0.0000	0.0131	0.0861
0.0405	0.1225	0.0397	0.1655	0.0795	0.0814	0.1737	0.1496	0.0000	0.0000	0.0000	0.0164	0.1196
0.0374	0.1207	0.0549	0.2028	0.1396	0.0913	0.1723	0.1520	0.0000	0.0000	0.0000	0.0164	0.1554
0.0322	0.0156	0.0498	0.2082	0.1368	0.0728	0.1542	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0162	0.1396

- : Sin promedio móvil.

ANEXO

ANEXO 1. Supuestos de mínimos cuadrados evaluados en la utilización del método de regresión lineal.

1. NORMALIDAD

La Normalidad se verificó mediante el gráfico de frecuencias y el test K-S.

- **Histograma de frecuencias**

El cumplimiento de Normalidad indicaría un gráfico basado en la simetría de dichas frecuencias y dos colas livianas en ambos extremos (Cid *et al*, 1990). El gráfico resultante debería tener un aspecto semejante al que se muestra en la figura xx.

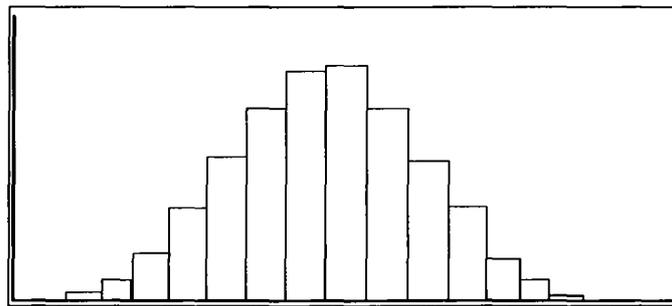


Figura 28. Histograma de frecuencias.

- **Test de Kolmogorov – Smirnov**

El test K-S permite comprobar si los residuos provienen de una distribución normal. Se basa en el estadístico D, que corresponde a la máxima diferencia entre la frecuencia observada y la frecuencia teórica (Peña, 1995; Pizarro, 1986). Es un test que no requiere la agrupación de los datos, además es válido para muestras grandes como pequeñas (Cid *et al*, 1990).

La verificación de la Normalidad para este Test se realizó según el valor p, así:

Si valor $p > 0.05$, se acepta H_0 (existe Normalidad de residuos).

Si valor $p < 0.05$, se rechaza H_0 (no existe Normalidad de residuos).

2. HOMOCEASTICIDAD

La presencia de homocedasticidad para los residuos se evaluó mediante un gráfico de residuos y el test de Goldfeld-Quandt.

- **Gráfico de residuos**

La presencia de Heterocedasticidad se detecta mediante la existencia de un comportamiento sistemático de los residuos, sobre la base de algunos patrones como los que se muestran en la figura xx (Gujarati, 1997). Para ello se deben graficar los residuos al cuadrado (res^2) contra los valores predichos de la variable dependiente (y).

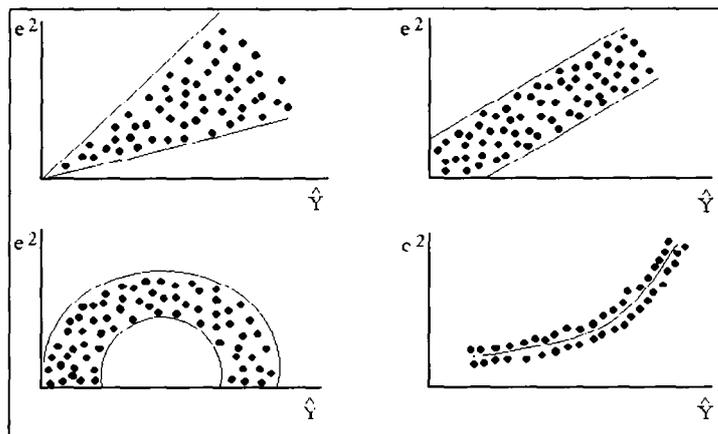


Figura 29. Patrones hipotéticos de comportamiento de los residuos en presencia de Heterocedasticidad.

- **Test de Goldfeld – Quandt (Gujarati, 1997)**

El test consta de siete pasos, los cuales se describen a continuación:

Paso 1: Construir una tabla con los datos de X e Y.

Paso 2: Ordenar los datos de las observaciones de menor a mayor, con respecto a la variable independiente X.

Paso 3: Omitir las “c” observaciones centrales, especificando a priori su magnitud.

Paso 4: Ajustar dos rectas de regresión lineal independientes (R_1 y R_2), correspondientes a los grupos de varianzas pequeñas y grandes respectivamente.

Paso 5: Calcular la Suma de Cuadrados de los Residuos (SCR) para cada recta (SCR_1 y SCR_2).

Paso 6: Calcular K, donde $K = [(SCR_2/g.l.) / (SCR_1/g.l.)]$. Este valor se distribuye como una prueba F de Snedecor con $[(n - c)/2 - 2]$ g.l. en el numerador y denominador.

Paso 7: Comparar K (F_c) con el valor F de tabla (F_t). Si $K > F_t$, para un nivel de significancia dado, se acepta H_0 , que es la Hipótesis de Homocedasticidad de varianzas.

3. AUTOCORRELACIÓN

La presencia de autocorrelación se detectó mediante una gráfica de los residuos v/s el tiempo, y la prueba d de Durbin - Watson.

- **Prueba d de Durbin – Watson.**

La prueba se utiliza de la siguiente forma:

Paso 1. Calcular estadístico d . Este valor se determina según la expresión:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n [e_{t-1} - e_t]^2}{\sum_{t=1}^n [e_t^2]}$$

Paso 2. Determinar los valores de d_L y d_U en tabla según el número de variables independientes y el número de datos de la regresión.

Paso 3. Luego de obtenido el valor de d , se compara con los valores d_L y d_U determinándose, para un nivel de confianza $\alpha = 0,05$, la presencia de autocorrelación. La comparación se realiza mediante la siguiente tabla.

Tabla 20. Reglas de decisión para la prueba Durbin – Watson.

Hipótesis Nula	Decisión	Si
No existe autocorrelación positiva	Rechazar	$0 < d < d_L$
No existe autocorrelación positiva	No hay decisión	$d_L \leq d \leq d_U$
No existe autocorrelación negativa	Rechazar	$4 - d_U < d < 4$
No existe autocorrelación negativa	No hay decisión	$4 - d_U \leq d \leq 4 - d_L$
No existe autocorrelación, positiva o negativa	No rechazar	$d_U < d < 4 - d_U$

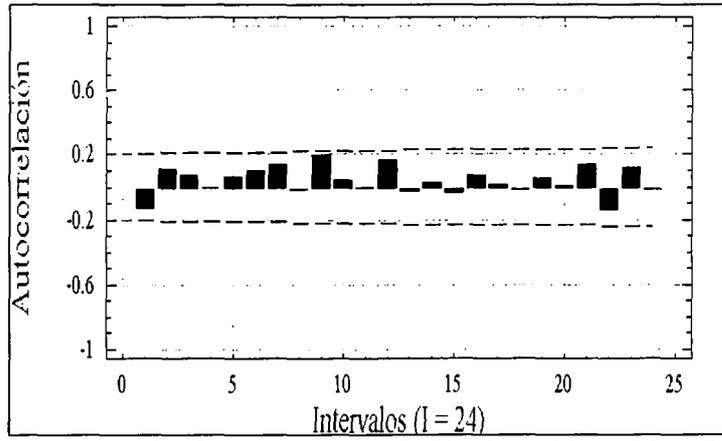
d : valor del estadístico de Durbin- Watson

d_L : valor crítico inferior;

d_U : valor crítico superior.

- **Gráfico de Autocorrelación**

Ésta se basa en un gráfico de los residuos obtenidos v/s el tiempo. Según la figura 30, existe un intervalo de confianza representado por una línea punteada y los residuos se agrupan mediante frecuencias, que está dado por I ($I=24$). La existencia de una o más frecuencias fuera del intervalo, estaría revelando la presencia de autocorrelación serial de los residuos.



Figuraxx. Grafico de autocorrelación de residuos (No existe Autocorrelación).