



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

**DETERMINACIÓN GRÁFICA Y MATEMÁTICA DE LAS CURVAS
INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA (IDF), EN CUATRO
ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DEL SUR DE CHILE**

JOSÉ TOMÁS CARRASCO BARROS

Memoria para optar al título de
INGENIERO FORESTAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. ROBERTO PIZARRO TAPIA

**TALCA – CHILE
2010**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a Dios, por haberme dado la familia que tengo especialmente a mi madre Maria Barros, quien lo ha dado todo para darme la posibilidad de estar hoy terminado mi carrera y a días de recibir mi título como Ingeniero Forestal, mi abuelita Maria Contreras y mi Tía Isabel Barros quienes han estado mis 25 años de vida a mi lado, brindándome todo su cariño y apoyo, y también a los demás integrantes de la familia Barros ya que todos han aportado con un granito de arena para que yo pueda estar hoy aquí.

Agradezco también a mi profesor guía don Roberto Pizarro Tapia, por su apoyo incondicional en la realización de esta memoria y sus sabios consejos tanto en lo académico como en lo personal. Quisiera agradecer también a La Dirección General de Aguas (D.G.A) por haberme facilitado los datos de precipitaciones necesarios para realizar mi memoria.

Por último aprovecho la oportunidad para agradecer a una persona muy importante dentro de la Facultad tanto para mí, como creo que lo es para los demás alumnos, y lo será también para los que vendrán, María Eliana Reyes, quién me ha brindado todo su cariño y apoyo en los momentos mas difíciles que he tenido en el paso por esta universidad, preocupándose siempre por mi situación académica, y sobre todo por mi salud, lo cual valoro muchísimo y espero que Díos le de las fuerzas y energías necesarias para seguir haciendo su trabajo. Agradezco además a mis compañeros y amigos de la facultad por todo su apoyo y los inolvidables momentos junto a ellos, los cuales permanecerán en mi mente por siempre.

RESUMEN

Este estudio contempló la construcción de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), en cuatro estaciones del sur del país, a saber, Estación Llancahue y Lago Calafquén presentes en la región de Los Ríos, Puelo en la región de Los Lagos y Punta Arenas en la región de Magallanes.

Mediante la metodología de Témez (1978), se determinaron las alturas e intensidades máximas de precipitación anual en duraciones de 1, 2, 6, 12, 24 y 48 horas. Estos datos de intensidades máximas generados fueron ajustados a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, para posteriormente obtener las graficas de las curvas IDF asociadas a los períodos de retorno de de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 años. Luego de determinaron las expresiones matemáticas generadas para cada estación por medio del modelo analítico de Bernard y Yarnell (1932), el cual responde a la formula $I=(K*T^m)/d^n$ y que entrega una estimación de la intensidad de precipitación máxima en mm/h asociada a una duración y período de retorno determinados y donde k, m y n son constantes de regresión.

Junto con la gráfica de las curvas IDF, se obtuvieron también las tablas del parámetro K, las cuales permiten la extrapolación de la información pluviográfica a zonas cercanas que presenten características climáticas similares y que solo cuenten información de carácter pluviométrico.

Se concluyo que fue posible obtener las expresiones de las curvas IDF en las cuatro estaciones en estudio, bajo marcos de calidad estadística, aunque la estación Punta Arenas podría presentar ciertas falencias de estimación, porque los datos de invierno no presentaron una adecuada calidad. Asimismo y en base a los resultados obtenidos por estudios anteriores a este, se visualiza que las intensidades aumentan en Chile con la latitud, pero esa tendencia parece verse disminuida desde la Región de la Araucanía hasta la de Magallanes, aunque es necesario que a futuro se incorpore un mayor número de estaciones al estudio, para corroborar lo anteriormente expuesto.

ABSTRACT

The study included of the construction of Intensity – Duration – Frequency (IDF) curves at four stations, namely Llancahue and Lake Calafquén in the Region of Los Ríos, Puelo in the Region of Los Lagos and Punta Arenas in the Magellan Region.

Using the Témez (1978) method, the heights and annual precipitation intensities were identified of 1, 2, 6, 12, 24 and 48 hours. These generated intensity data were adjusted to the Gumbel probability distribution function, to later obtain the graph of the IDF curves associated with return periods of 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 years. The mathematical expression generated for each station were determined using the analytical model proposed by Bernard and Yarnell (1932), which responds to the formula $I = K \cdot T^m / d^n$, and delivering an estimate of the intensity of maximum rainfall in (mm/h) associated with a determined duration and return period and where k, m y n are regression constant.

Along with the graph of IDF curves K parameter tables, were also obtained, which allow extrapolation of pluviograph information in nearby that present similar climatic characteristic and only have information for over 24 hours.

It was concluded that it was possible to obtain expression of IDF curves in the four seasons under study, with statistical quality frameworks, although the Punta Arenas station could have some flaws in estimation, because the winter data did not provide adequate quality. Likewise, and based on the results of previous studies it is shown that the intensities increase with latitude in Chile, but the trend seems to be diminished from the Araucanía Region to the Magellan Region, but it is necessary that future study incorporate a greater number of stations, to corroborate the above.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. ANTECEDENTES GENERALES	4
3.1 Antecedentes del Área de Estudio.....	4
3.1.1 Región de los Ríos	4
3.1.2 Región de los Lagos.....	7
3.1.3 Región de Magallanes y la Antártica Chilena	12
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	18
4.1 Definición de las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF).....	18
4.2 Aplicación de las curvas IDF	18
4.3 Definición de elementos técnicos de las curvas IDF	20
4.3.1 Intensidad de Precipitación (i)	20
4.3.2 Frecuencia o Período de Retorno (T)	20
4.3.3 Probabilida de excedencia.....	21
4.4 Construcción de las curvas IDF	22
4.5 Parámetro K	25
4.6 Curvas IDF en el Mundo	26
4.7 Antecedentes en Chile.....	28

5. METODOLOGÍA	31
5.1 Etapas del estudio.....	31
5.1.1 Revisión Bibliográfica.	31
5.1.2 Recolección de la Información Requerida	31
5.1.3 Selección de las Estaciones Pluviográficas.....	31
5.1.4 Selección de Intensidades Máximas de Precipitación.....	32
5.1.5 Ajuste de los Datos a una Función de Distribución de Probabilidad.....	33
5.1.6 Medidas de Bondad de Ajuste.	33
5.1.6.1 Coeficiente de Determinación R^2	34
5.1.6.2 Test de Kolmogorov-Smirnov	34
5.1.7 Construcción de las curvas IDF para Distinto Períodos de Retorno.....	36
5.1.8 Construcción de Tablas del Parámetro K.....	36
5.1.9 Determinación Matemática de las curvas IDF	37
5.1.10 Análisis de Regresión.....	38
5.1.11 Medidas de Bondad de Ajuste del Modelo	38
5.1.11.1 Coeficiente de Determinación R^2	38
5.1.11.2 Prueba U de Mann-whitney	39
5.1.11.3 Error Éstandar de Estimación.....	41
5.1.12 Presentación de Resultados.....	41
5.1.13 Análisis y Discusión de Resultados	42
5.1.14 Conclusiones y Recomendaciones Materiales y Equipos.....	42
5.2 Materiales y Equipos.....	42
6. PRESENTACION DE RESULTADOS	44
6.1 Alturas Máximas de Precipitación	44
6.2 Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación.....	49
6.3 Ajuste de los Datos a una Función de Distribución de Probabilidad	54
6.4 Determinación de las Pruebas de Bondad de Ajuste	54

6.5 Diseño Gráfico de las Curvas IDF para cada una de las Estaciones Seleccionadas.	56
6.6 Determinación del Parámetro K.....	59
6.7 Determinación de las Expresiones Matemáticas de las Curvas IDF	63
6.8 Medidas de Bondad de Ajuste.	64
7 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
7.1 Selección de la Información Pluviográfica	66
7.2 Captura de la Información Pluviográfica.....	66
7.3 Análisis de Intensidades Máximas	67
7.4 Ajuste de los Datos a la Función de Gumbel.	69
7.5 Diseño Gráfico de las Curvas IDF	70
7.6 Modelos de Regresión Lineal Múltiple y Pruebas de Bondad de Ajuste.....	72
7.7 Comparación de Intensidades Máximas a nivel País.	72
8.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
8.1 Conclusiones.	76
8.2 Recomendaciones.....	77
BIBLIOGRAFÍA	79
APÉNDICE 1	83
APÉNDICE 2	87
APÉNDICE 3	91
APÉNDICE 4.....	95

ANEXO 1.....99

ANEXO 2.....101

ANEXO 3.....103

ANEXO 4.....105

ANEXO 5.....109

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Región de Los Ríos.....	5
Figura 2. Región de Los Lagos	9
Figura 3. Región de Magallanes y la Antártica Chilena	13
Figura 4. Diseño típico de las curvas Intensidd Duración Frecuencia (IDF).....	23
Figura 5. Equipo de pluviógrafo y su banda milimetrada	43
Figura 6. Bandas pluviográficas y registro de alturas de precipitación.....	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Curvas IDF Estación Llancahue.	57
Gráfico 2. Curvas IDF Estación Puelo.....	57
Gráfico 3. Curvas IDF Estación Lago Calafquen	58
Gráfico 4. Curvas IDF Estación Llancahue.	58
Gráfico 5. Comparación de las Curvas IDF Generadas.....	71
Gráfico N°6. Latitud v/s Intensidad Máxima de Precipitación para duraciones de 1 y 24 horas.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Período de estudio y ubicación de las estaciones a analizar.....	32
Tabla 2. Alturas Máximas de Precipitación Estación Llancahue.....	45
Tabla 3. Alturas Máximas de Precipitación Estación Puelo.....	46
Tabla 4. Alturas Máximas de Precipitación Estación Lago Calafquén.....	47
Tabla 5 Alturas Máximas de Precipitación Estación Punta Arenas..	48
Tabla 6. Intensidades Máximas de Precipitación Estación Llancahue	50
Tabla 7. Intensidades Máximas de precipitación Estación Puelo.....	51
Tabla 8. Intensidades Máximas de Precipitación Estación Lago Calafquén.....	52
Tabla 9. Intensidades Máximas de Precipitación Estación Punta Arenas	53
Tabla 10. Parámetros α y μ para cada duración y estaciones en estudio.....	54
Tabla 11. Determinación del nivel de ajuste del test de Kolmogorov – Smirnov para cada estación y duración.....	55
Tabla 12. Valores del Coeficiente de Determinación (R^2) para cada estación y duración	55
Tabla 13. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Llancahue.....	59
Tabla 14. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Puelo.....	60
Tabla 15. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Lago Calafquén.....	60
Tabla 16. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Punta Arenas.....	61
Tabla 17. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Llancahue.....	61
Tabla 18. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Puelo.	62

Tabla 19. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Lago Calafquén.....	62
Tabla 20. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Punta Arenas.....	63
Tabla 21. Modelos propuestos y pruebas de bondad de ajuste.....	64
Tabla 22. Rango de intensidades de precipitación para cada estación.	67
Tabla 23. Intensidades promedios para las últimas décadas.....	69

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos naturales de mayor relevancia dentro de la economía de un país como Chile, tanto por su uso en actividades agrícolas o industriales, como en obras de ingeniería y producción energética. Es aquí donde radica la importancia de la búsqueda de formas para optimizar el uso de este recurso hídrico, el cual es aportado al territorio nacional, tanto por las precipitaciones, como por los deshielos y derretimientos glaciares.

En este marco es que resulta importante conocer el comportamiento de las precipitaciones extremas, ya que aportan decisivamente al análisis hidrológico y al diseño de obras hidráulicas.

Las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), que son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferentes duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno (Témez, 1978), permiten relacionar la intensidad de la precipitación para una duración definida en un periodo de retorno dado, con lo cual es posible determinar patrones que pudieran seguir las precipitaciones en un determinado lugar, lo cual determina una mayor probabilidad de prevención de los daños provocados por las inundaciones y la conducción de aguas superficiales y subterráneas. Asimismo, las curvas IDF permiten entre otras instancias, realizar un adecuado diseño de obras como zanjas de infiltración, canales de evacuación de aguas lluvias, puentes y alcantarillas, entre otras, tal que posibilitan una mayor y mejor evacuación de las aguas lluvias.

El objetivo de este trabajo, es poder determinar de forma tanto gráfica como matemática, las curvas Intensidad - Duración – Frecuencia (IDF), en 5 estaciones de la zona sur del país, presentes en las regiones de Los Ríos, Los Lagos y Magallanes. La relevancia de este estudio es que puede entregar antecedentes acerca del comportamiento de las intensidades, en una zona que presenta cifras que se ubican entre las mayores

precipitaciones anuales a nivel mundial, y que en general denota situaciones climáticas extremas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Contribuir al diseño de obras de ingeniería hidrológica y al conocimiento de las precipitaciones extremas, a través de la generación y caracterización de algunas Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, válidas para la zona sur del país.

2.2 Objetivos Específicos

Obtener las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF) en términos gráficos y matemáticos, para cuatro estaciones pluviográficas presentes en las regiones de Los Ríos, Los Lagos y Magallanes.

Establecer comparaciones numéricas, entre los valores de intensidad de precipitación obtenidos para la zona sur del país, con los valores registrados en la zona central de Chile.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Antecedentes del Área de Estudio.

3.1.1 Región de los Ríos

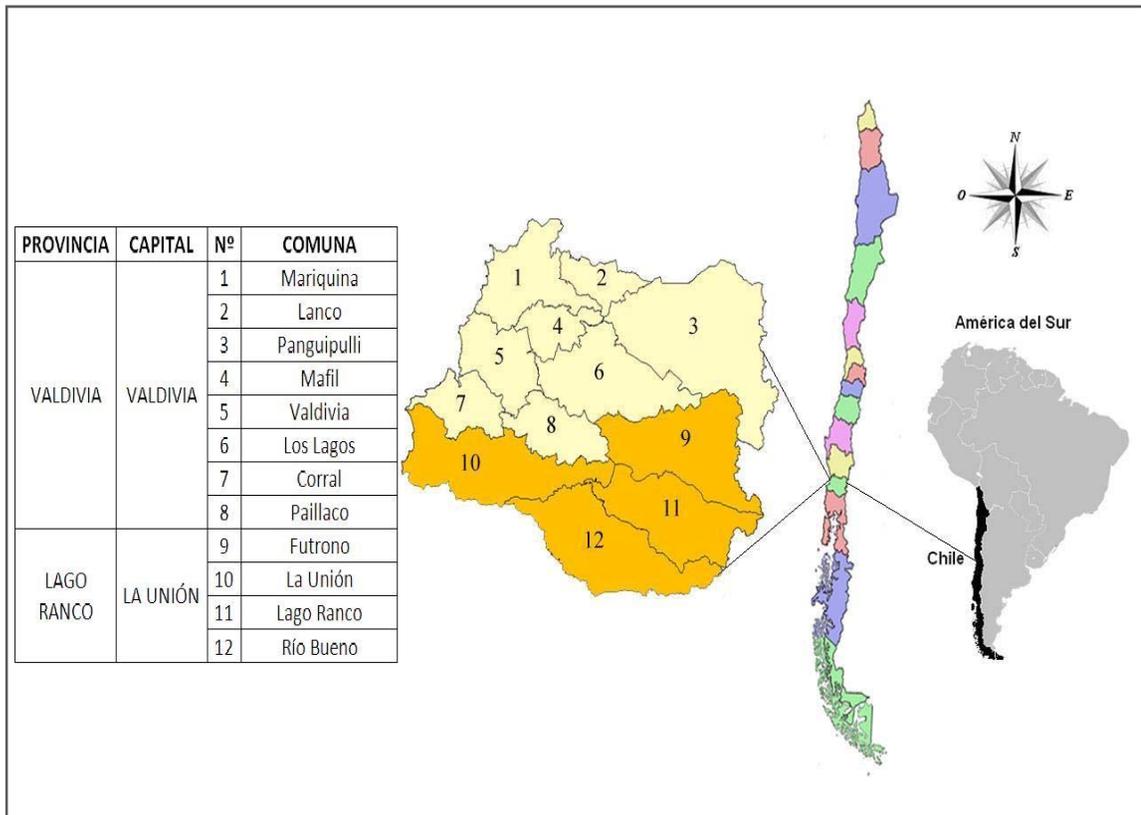
La Región de los Ríos se ubica entre los 39°15' y los 40°33' de latitud sur, y desde el límite con la República Argentina hasta el Océano Pacífico. El relieve es definido por agentes que actuaron en el pasado, especialmente los hielos y las actividades volcánicas, que han generado una gran cantidad de procesos y formas orográficas (Gobierno de Chile, 2009).

El clima que presenta esta región es del tipo templado oceánico o lluvioso, con ausencia de período seco. La hidrografía se distingue por la presencia de una gran cantidad de ríos, caracterizados por sus suaves pendientes. La vegetación es definida por el bosque lluvioso y la selva valdiviana.

En cuanto a la población, se puede señalar que en el año 2002, la Región tenía 356.396 habitantes, concentrados mayoritariamente en áreas urbanas. La capital regional es Valdivia, ciudad de fuerte relación con inmigrantes y colonización, principalmente alemana, que durante fines del siglo XIX comenzaron a asentarse en la zona, generando una ciudad de rasgos tradicionales respecto de su arquitectura, gastronomía y estilos de vida (Gobierno de Chile, 2009).

Las actividades económicas se involucran principalmente con la industria forestal, el comercio y la prestación de servicios. El turismo y la gastronomía son también rubros asociados al sector terciario de la economía.

Figura N°1. Región de los Ríos



a) Relieve

La Cordillera de los Andes, se caracteriza por presentar una baja altitud, con pendientes suaves y una fuerte presencia de actividad volcánica en reposo. Las mayores alturas corresponden a los volcanes Choshuenco, a 2.415 msnm y Puyehue, con 2.240 msnm.

La precordillera, de gran presencia en la Región, tiene su origen en la acumulación de sedimentos glacio-fluvio-volcanicos, emitidos por la Cordillera de los Andes. Su altitud promedio fluctúa entre los 600 y 1.000 metros.

Según la Dirección Meteorológica de Chile, en esta región la depresión intermedia recobra su característica de valle longitudinal, luego de haber sido interrumpido al norte de Valdivia por el cordón transversal que le quita a los valles su continuidad. Sus suelos están formados por la depositación de sedimentos glaciales y fluviales. La mayor característica es que se encuentra cortada por numerosos lagos de una enorme belleza paisajística, de gran interés para los visitantes.

Producto de una antigua actividad conjunta de volcanes y glaciares, se produjeron obstrucciones de algunos de los cursos de agua que nacen en la cordillera, lo que originó numerosos lagos, tales como Calafquén, Panguipulli, Piriñueico, Riñihue, Ranco y Maihue.

La Cordillera de la Costa se presenta baja y ondulada, descendiendo en altura hacia el sur hasta ser interrumpida por el río Valdivia. Desde aquí al sur, y proyectándose a la región de Los Lagos, la cordillera se presenta un poco más robusta, lo cual va a generar un importante efecto de biombo climático sobre las localidades de la depresión intermedia (Gobierno de Chile, 2009).

b) Clima

La Dirección Meteorológica de Chile define para la Región, un clima templado lluvioso, con un régimen de precipitaciones y ausencia de períodos secos, distribuidas a lo largo de todo el año; sin embargo, al igual que en otras regiones presenta variaciones por efecto del relieve.

En este caso por la presencia de la Cordillera de la Costa y de los Andes, se producen significativas diferencias de precipitaciones. Así, mientras al occidente de los macizos andino y costero presentan las más altas precipitaciones, hacia la depresión intermedia éstas disminuyen. Esta condición comienza a variar hacia el límite sur,

fundamentalmente en el sector de Chiloé continental, donde el ingreso de las masas de aire es levemente atenuado por los últimos vestigios de la Cordillera de la Costa, sin poder producir alteraciones significativas en ellas.

c) Hidrografía

A pesar de la evidencia de su nombre, la región se caracteriza por presentar una gran cantidad de ríos de régimen mixto, lo que a su vez se ve regulado por la fuerte importancia que generan los lagos en su caudal. Así, resulta notable la capacidad de navegación del río Valdivia en su parte baja (Dirección Meteorológica de Chile, 2009) Las hoyas hidrográficas más importantes son el río Valdivia, conformado por la confluencia de los ríos Calle Calle y Cruces, y el río Bueno.

3.1.2 Región de los Lagos

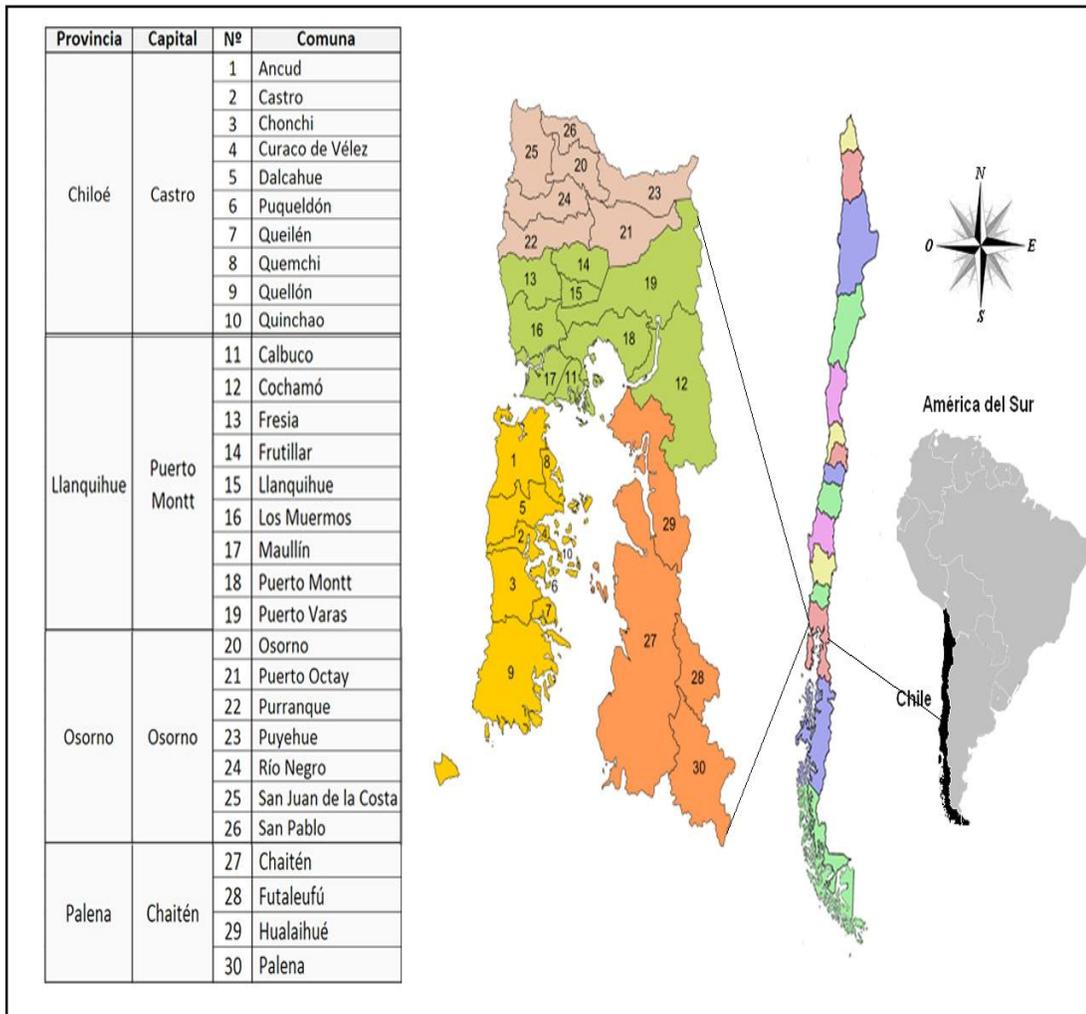
La Región se localiza entre los 40°15' y los 44°14' de latitud sur, y desde el límite con la República Argentina hasta el Océano Pacífico. Las características del relieve de la Décima Región presentan una gran cantidad de procesos y formas orográficas. Los diferentes agentes que actuaron en el pasado, especialmente los hielos y la actividad volcánica, originaron la mayoría de las formas que se encuentran en la actualidad. Es por esta razón que hoy la Región se encuentra dividida en dos sectores diferentes: Puerto Montt al norte con formas fuertemente influidas por los aspectos lacustres y la otra mitad, al sur de la Región, con islas y canales (Gobierno de Chile, 2009).

El clima que presenta esta región es templado oceánico o lluvioso, con la ausencia de período seco. Desde el punto de vista hidrográfico, esta región se distingue por la presencia de una gran cantidad de ríos cuyas características generales son las suaves pendientes que deben enfrentar en su escurrimiento. La vegetación está dada principalmente por el bosque lluvioso.

Objeto de fuerte y constante crecimiento durante la última década del siglo XX, la población regional durante el año 2002 llegó a 716.739 habitantes. La capital regional es Puerto Montt, ciudad de gran pujanza e importancia como puerta de ingreso al Chile austral y patagónico. Debido a la gran diversidad de paisajes que presenta Los Lagos, es posible distinguir diversos y muy ricos tipos de elementos culturales: en el norte de la región, una gran tradición colonial y de inmigrantes; en la Isla grande de Chiloé se pueden encontrar las manifestaciones folclóricas y sociológicas más patentes del sur de Chile; mientras que los canales e islas generan una impronta de serenidad y naturaleza en sus habitantes (Gobierno de Chile, 2009).

Importantes actividades económicas se desarrollan en Los Lagos, ligadas principalmente al sector primario de la economía, a saber, la ganadería, la acuicultura y la industria forestal. En todas ellas, la Región de Los lagos posee un rol de importancia, destacándose principalmente la salmonicultura, la producción de astillas, el ganado bovino y la extracción de mariscos.

Figura N°2. Región de los Lagos



a) Relieve

Una de las características más importantes de esta región, es que es la última en la cual se pueden apreciar las franjas tradicionales del relieve en Chile. Desde Puerto Montt al sur, desaparece la depresión intermedia, invadida por las aguas. Los volcanes y la ocupación de la depresión intermedia por parte de los lagos son los rasgos más importantes.

En la sección norte de la región, la Cordillera de los Andes se presenta de baja altura, con pendientes suaves, debido a su formación de origen volcánico. Las mayores altitudes que se encuentran corresponden a los volcanes Antillanca, con 1.990 m.; cerro Puntagudo, con 2.490 m.; Volcán Osorno, con 2.660 m; y Volcán Calbuco, con 2.015 m. En el sector sur la cordillera recibe el nombre de Cordillera Patagónica y se presenta cerrada y abrupta; es atravesada por profundos cañones erosionados en una primera parte por glaciares y en la actualidad por los ríos de Chiloé continental, tales como lo los ríos Puelo, Futaleufú y Palena. Las alturas mayores que se pueden observar son las de los volcanes Michimahuida, con 2.404 metros, y el Corcovado, con 2.300 metros (Dirección Meteorológica de Chile, 2009).

En esta Región la depresión intermedia recobra su característica de valle longitudinal, luego de haber sido interrumpida, al norte de Valdivia por el cordón transversal que le quita a los valles su continuidad. Sus suelos están formados por el acarreo glacial y fluvial con depositación de gran cantidad de sedimentos. Una de sus mayores características es que se encuentra cortada por numerosos lagos de una belleza paisajística enorme y de gran interés para los visitantes.

Las coladas de lava y cenizas volcánicas han producido la obstrucción de algunos de los cursos de agua que nacen en la cordillera, dando origen en la zona de contacto con la depresión intermedia, a numerosos lagos, tales como Rupanco, Llanquihue y Todos los Santos.

En la parte sur, la depresión intermedia se encuentra sumergida, posibilitando una navegación en la cual los accidentes geográficos encuentran sus más variados ejemplos, como fiordos, canales y el imponente golfo de Corcovado que hace más difícil las comunicaciones con la parte continental de Chiloé.

La Cordillera de la Costa se presenta baja y ondulada en la parte norte, recibiendo diferentes denominaciones desde el límite regional norte y hasta Maullín, como Cordillera Pelada y de Zarao. En la zona norte de la Región se presenta un poco más robusta, lo cual va a ejercer un importante efecto de biombo climático sobre las localidades de la depresión intermedia, particularmente La Unión, Osorno y Río Negro. Al sur del canal de Chacao, en la isla de Chiloé, la Cordillera de la Costa recibe el nombre de Piuché. Las planicies litorales tienen escaso desarrollo a lo largo de la región, solo alcanzan importancia en las cercanías de Maullín, para posteriormente desaparecer en las aguas del Canal de Chacao (Dirección Meteorológica de Chile, 2009).

Las planicies litorales se caracterizan por ser angostas debido a la presencia de la cordillera costera; aun así se hace posible la formación de pequeñas caletas ocupadas por pescadores y mariscadores. Al acercarse al río Maullín vuelve a alcanzar un desarrollo considerable, a través de una franja de unos 60 kilómetros de longitud aproximadamente, hasta desaparecer en el Canal de Chacao.

b) Clima

El monto de las precipitaciones, es el principal factor que define un clima lluvioso para la Región, con totales anuales de agua caída superiores a 1.300 mm y y algunos sectores específicos (Panguipulli, Corral), que sobrepasan los 2.200 mm. Aunque el período más lluvioso es el de mayo a agosto, el total de precipitación caída en ese período alcanza al 60% o menos del total anual, como en Puerto Montt y Quellón, donde sólo llega al 50%. Esto indica que el resto del año caen más de 1.000 mm en gran parte de la Región. Las temperaturas continúan disminuyendo con la latitud, pero sus valores medios todavía se mantienen sobre los 10°, por lo que las características de clima templado persisten (Dirección Meteorológica de Chile, 2009).

En la Región se presentan dos subtipos climáticos: el templado lluvioso con influencia mediterránea y el templado frío de costa occidental, con máximo invernal de lluvias.

c) **Hidrografía.**

La Región se caracteriza por presentar una gran cantidad de ríos de régimen mixto y con caudal constante mantenido por las precipitaciones permanentes. La mayoría de las veces, en gran parte de sus cursos inferiores, se hace posible la navegación por la presencia de lagos pre cordilleranos en su curso superior, los cuales regulan sus cursos de agua en forma natural y además son receptores de los sedimentos arrastrados desde las montañas. Estos ríos también presentan una gran potencialidad hidroeléctrica con los desniveles que existen entre la cordillera y la depresión intermedia.

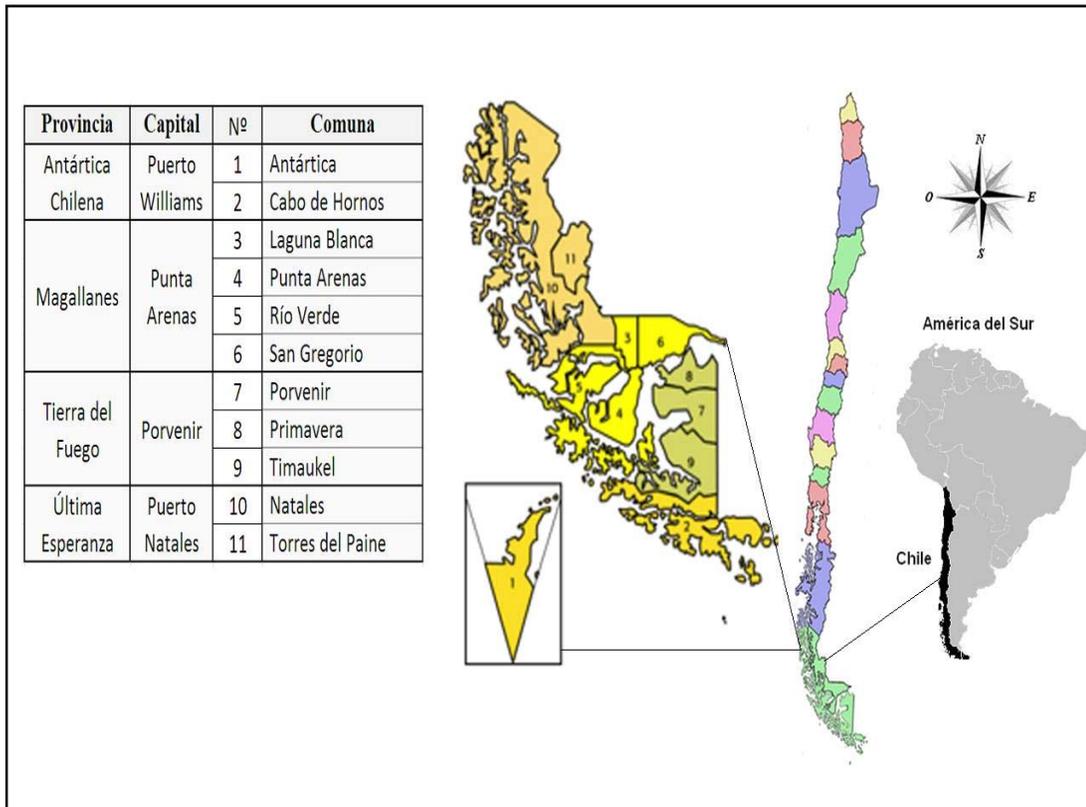
La existencia de grandes cuerpos de agua, caracterizan la sección norte de la Región, en tanto que los elevados caudales son la principal manifestación de la hidrografía en la zona sur de esta unidad. Las hoyas hidrográficas más importantes son los ríos Maullín, Petrohue, Puelo y Yelcho.

3.1.3 Región de Magallanes y la Antártica Chilena

La Región de Magallanes se encuentra ubicada en el extremo sur del territorio nacional, siendo la más extensa del país. Abarca los territorios sudamericano y antártico. Su sector sudamericano se localiza en la parte sudoccidental del continente desde los 48°36' a los 56°30' de latitud sur y entre los meridianos 66°25' y 75°40' de longitud oeste. Posee una superficie de 1.382.033,5 km², correspondiendo 132.033,5 km² a su parte continental y 1.250.000 km² al Territorio Chileno Antártico, representando en total al 68,8% de la superficie nacional. A su vez el área sudamericana representa el 6,57% de

la superficie nacional, ocupando el primer lugar en superficie, seguida por las regiones de Antofagasta y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Gobierno de Chile, 2009).

Figura N°3. Región de Magallanes y la Antártica Chilena



a) Relieve

Esta Región presenta características muy particulares. Sus costas recortadas forman un gran número de islas, archipiélagos, penínsulas, canales y fiordos, conformando una situación topográfica irregular que corre en torno a un eje en dirección norte–sureste con un ancho variable, que alcanza su máxima expresión entre Punta Dungenes en el extremo oriente del estrecho de Magallanes y grupo Evangelistas en el Pacífico (Dirección Meteorológica de Chile, 2009).

Las dos fajas longitudinales características del resto del país, la Cordillera de la Costa y la depresión intermedia, desaparecen en la Península de Taitao y en las profundidades del Golfo de Penas, respectivamente (Dirección Meteorológica de Chile, 2009).

Las unidades de relieve de la Región de Magallanes son, de oriente a poniente Patagonia Oriental o Transandina, Cordillera de los Andes Patagónicos; Cordillera Occidental Archipiélica.

La Patagonia Oriental presenta una topografía plana o semiplana con una altura promedio de 500 msnm. La Cordillera de los Andes Patagónicos muestra alturas superiores a 2.000 m, donde destacan las cumbres más altas de la Región, a saber, el cerro Fitz-Roy de 3.340 m en el límite norte; la Cordillera del Paine cuyas torres alcanzan alturas de 3.000 m; cerro Bolador de 2.940 m; y cerro Cervantes de 2.380 m. En su parte norte se localiza el Campo de Hielo Sur de 30 km de ancho cubierto de hielos permanentes, de donde se desprenden ventisqueros. La Zona Cordillerana Occidental Archipiélica, se manifiesta muy fragmentada por la acción permanente del hielo y se presenta formada por numerosos archipiélagos e islas de baja altura (inferiores a 1.000 m).

b) Clima

Esta Región es continuamente afectada por vientos del oeste y el paso de frecuentes sistemas frontales, debido a que se encuentra próxima a la latitud 60°, zona en la que se ubica el cinturón de bajas presiones o ciclones subpolares, donde confluyen masas de aire subtropical y polar y por lo tanto es una zona de alta formación de sistemas frontales.

Para la Dirección Meteorológica de Chile 2009, las últimas demostraciones de la Cordillera de los Andes en la parte central de la Región y la altura de las cumbres del Campo de Hielo sur, son algunos de los factores que definen 5 tipos climáticos.

i) Clima templado frío de costa occidental con un máximo invernal de lluvias

Es el mismo tipo de clima que se desarrolla a partir de la parte sur de la X Región y que en la XII Región continúa correspondiendo a la zona de los canales hasta el Estrecho de Magallanes. En esta Región se han registrado las máximas cantidades de precipitación del país, precisamente en la Isla Guarello, con registros cercanos a 9.000 mm anuales en años particularmente lluviosos. La nubosidad atmosférica también es alta; la cantidad de días despejados es muy escasa y la cercanía del océano y los vientos hacen que las amplitudes térmicas sean reducidas. La oscilación anual es del orden de 4°C con una temperatura media de 9°C.

Las precipitaciones ocurren durante todo el año y existe una tendencia a un desplazamiento de la época más lluviosa hacia el otoño (marzo o abril). Lo que precipita en los 4 meses más lluviosos es equivalente a un 35% ó 40% del total anual

ii) Clima trasandino con degeneración esteparia

Este clima se localiza al oriente de la Cordillera de la Patagonia, extendiéndose desde la Cordillera del Paine hacia el sur y sureste, cubriendo la Península de Brunswick y el sector sur de Tierra del Fuego.

Las precipitaciones disminuyen notoriamente en relación a las laderas occidentales de la cordillera patagónica y región de los canales, pues las masas de aire llegan con poco contenido de humedad después de atravesar las cumbres cordilleranas. Éstas ocurren todo el año, pero sus montos anuales son del orden de 250 a 400 mm, o

sea un 10% de los registros de la costa occidental. La distribución de las precipitaciones durante el año es aproximadamente homogénea, pero se pueden identificar los meses de otoño (abril y mayo) como los más lluviosos. Un segundo máximo puede presentarse entre noviembre y enero. En el invierno las precipitaciones son casi exclusivamente de nieve.

La continentalidad hace que las temperaturas en general desciendan encontrándose valores medios anuales de 6°C a 7°C. A pesar de la latitud, las temperaturas de invierno no son exageradamente bajas, por cuanto las temperaturas medias de los meses de invierno son superiores a 1°C, con lo que la permanencia de suelos cubiertos de nieve no es muy prolongada en los sectores más bajos cercanos al mar. Las temperaturas mínimas medias sí son inferiores a 0°C entre junio y agosto.

iii) Clima de hielo por efecto de la altura

Corresponde a la zona del Campo de Hielo Sur y la cordillera patagónica que se ubica sobre los 700 m de elevación, donde las bajas temperaturas existentes por efecto de la altura hacen que existan hielos eternos. La descripción climática es similar a la del mismo clima de la XI Región, diferenciándose principalmente por temperaturas algo menores, debido a la mayor latitud.

iv) Clima de estepa fría

Las precipitaciones continúan disminuyendo a medida que la zona se aleja de la cordillera patagónica, generándose montos anuales que varían entre 500 mm en el sector norte cercano a la cordillera, hasta unos 250 mm en el extremo oriental del estrecho de Magallanes y en la parte norte de Tierra del Fuego. Éstas se distribuyen homogéneamente durante el año, con máximos que ocurren en verano y otoño. Lo que

llueve en los 4 meses más lluviosos es equivalente al 40% del total anual y las precipitaciones invernales son de carácter nival.

Entre diciembre y marzo la temperatura media supera los 10°C y en los meses de invierno sólo es del orden de 2°C. Las cantidades de precipitación, definen entre 6 y 12 meses secos, con totales de agua caída inferiores a 40 mm, lo que sumado a las bajas temperaturas, le dan el carácter de estepa, asociándose al tipo de suelo que sólo permite un tipo de vegetación propio de este clima.

v) Clima de tundra

Corresponde a toda la zona ubicada al sur del Estrecho de Magallanes y de Tierra del Fuego. Es una zona que está muy influenciada por el océano Pacífico, por el sector oeste y suroeste y por el mar de Drake por el sur.

Las precipitaciones continúan siendo abundantes, superiores a 1.000 mm como total anual, aunque en algunos sectores protegidos, como Puerto Williams (por las tierras más altas de la Isla Navarino), no alcanzan a los 600 mm. En la época de verano son más abundantes que en invierno y en esta última estación son de carácter nival.

Las temperaturas medias son del orden de 5°C a 7°C, pero por la influencia oceánica y los vientos, son muy homogéneas, determinando una diferencia de sólo 4°C entre el mes más cálido y el más frío y ligeramente superior entre las temperaturas máximas y las mínimas. Este comportamiento de escasa variabilidad térmica, hace que a este clima de tundra se le suela designar también con el término de "isotérmico" (temperatura constante).

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Definición de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Según Témez (1978), las curvas IDF son aquellas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno. Para Badiant y Huber (1992), son representaciones gráficas que muestran la probabilidad de que una cierta intensidad media pueda ocurrir, dada una determinada duración.

Por otra parte, López Cadenas (1998) señala que la estimación de la intensidad de precipitación, se realiza en base a las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, que representan duraciones de lluvia en abscisas y alturas de precipitación en ordenadas. Cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal manera que las gráficas de las curvas IDF, representan la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes, todos los de una misma curva, a un período de retorno o frecuencia idéntico.

Las curvas IDF representan las condiciones más críticas de precipitación que pueden ocurrir en un determinado lugar, para una probabilidad dada. El cálculo de estas puede realizarse de dos maneras: haciendo cálculos independientes para cada duración, o bien realizando una regresión múltiple para la intensidad, la duración y la frecuencia.

4.2 Aplicación de las curvas IDF

Un gran número de proyectos hidrológicos, como el control de inundaciones, el diseño de un evacuador de crecidas, los puentes, las redes de drenaje, etc., se definen en relación a una precipitación tipo que posee ciertas características predefinidas. A partir de este episodio lluvioso, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y riesgo (Llamas, 1993)

Para dimensionar el tamaño de una obra hidráulica, se requiere conocer el caudal máximo de diseño, o en términos hidrológicos la crecida de diseño. Sin embargo el proyectista no solo debe calcular la magnitud del o de los valores de diseño, sino que además debe proporcionar una indicación de su probabilidad de excedencia, con el fin de fijar la seguridad de funcionamiento de la obra, lo cual significa una respuesta no solo de lo que puede ocurrir, sino también un pronunciamiento sobre su probabilidad de excedencia. (Varas 1998).

Uno de los primeros pasos que se debe seguir en muchos proyectos de diseño hidrológico (diseños de drenaje urbano, construcción de grandes represas para el aprovechamiento del recurso hídrico, o el diseño de obras de ingeniería, entre otros), es determinar los eventos de lluvias que serán utilizados. Una forma de hacerlo es a través de las curvas IDF, las cuales son diseñadas para cada lugar en particular (Chow *et al*, 1994).

Cuadrat y Pita (2000), señalan también que uno de los rasgos característicos de las precipitaciones es su irregularidad tanto espacial como temporal, y la posibilidad de que se alcancen valores extremos, ya sean máximos o mínimos, que por sus consecuencias catastróficas y su impacto sobre la sociedad formen parte importante de los riesgos naturales. Los episodios de lluvias extraordinarias pueden constituir uno de estos acontecimientos, como son por ejemplo las inundaciones, las cuales provocan importantes daños materiales y hasta humanos en algunos casos.

Es precisamente por todo esto que se advierte la importancia del diseño de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, que si bien es cierto, autores como Macaya (2004), Labra (2005) y Cornejo (2004), ya han obtenido algunos diseños de éstas para la zona centro sur del país, es necesario también obtener los modelos de diseño para las regiones australes, más aún considerando la gran variabilidad climatológica y de precipitaciones posibles se encontrar a lo largo del territorio nacional.

4.3 Definición de Elementos Técnicos de las Curvas IDF

Con la definición de las curvas IDF, surgen algunos términos necesarios de considerar como, la intensidad de precipitación, la frecuencia o periodo de retorno y la probabilidad de excedencia.

4.3.1 Intensidad de Precipitación (*i*)

Según Chow *et al.* (1994), la intensidad se define como la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h), y se expresa como:

$$i = \frac{P}{D}$$

Donde *P* es la profundidad de la lluvia (mm o pulg) y *D* la duración en horas.

4.3.2 Frecuencia o Período de Retorno (T)

Los conceptos de frecuencia y período de retorno se encuentran estrechamente relacionados, ya que según Chow *et al.* (1994), la frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, que es el intervalo de tiempo promedio para eventos de precipitación, que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Para Aparicio (1997), el número de años en que, en promedio se presenta un evento puntual, se llama periodo de retorno, intervalo de recurrencia o simplemente frecuencia, y se acostumbra a denotar como T.

Espíldora (1971), define el período de retorno como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual cierta magnitud de intensidad se iguala o excede una sola vez.

El concepto de “Período de Retorno” de un evento con magnitud x_i , se asocia con eventos máximos que se presentan en un determinado intervalo de tiempo y se define como “*El tiempo promedio entre la ocurrencia de dos eventos iguales o mayores que x_i* ”, de tal forma que puede ser calculado mediante la siguiente igualdad:

Donde:

$T(x_i)$ = Período de retorno de un evento x_i

N = Número de datos

m = Número de orden en una lista de mayor a menor de los datos (Pérez, 1999).

4.3.3 Probabilidad de Excedencia

Es la probabilidad de que el valor de un evento sea superado en un año cualquiera (Bedient y Huber, 1992). Por su parte Viessman *et al* (2002), señalan que la probabilidad que un evento sea igualado o excedido en algún año, se expresa de la forma:

—

Donde:

P(E) es la probabilidad de excedencia y T es el período de retorno.

4.4 Construcción de las curvas IDF

Debido a que en la construcción de las curvas IDF, se trabaja con series de datos pluviográficos máximos para distintas duraciones, Mintegui y Robredo (1993) afirman que la distribución de valor extremo tipo I o Gumbel, ha logrado ajustes muy precisos.

Dicha distribución presenta la siguiente expresión.

Donde $F(x)$ es la probabilidad de no excedencia de la variable x , e la base de los logaritmos neperianos, y α y μ parámetros a determinar a partir de la media y la desviación estándar de la serie datos extremos disponibles, por medio de las siguientes fórmulas:

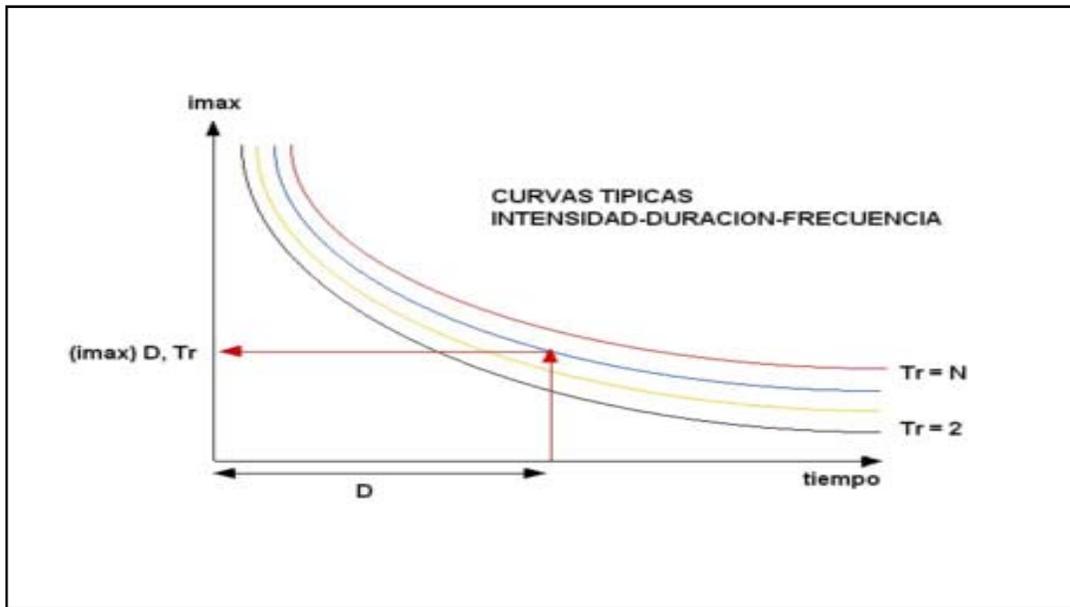
Donde:

\bar{x} = Media de la muestra.

S = Desviación estándar de la muestra.

La relación existente entre las variables de intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones, se representa mediante las curvas IDF como se aprecia en la figura nº4 de la siguiente forma.

Figura N° 4. Diseño típico de las curvas Intensidad- Duración- Frecuencia (IDF)



Fuente: Silva 2003.

En la figura nº4, se aprecia que el valor de la intensidad (I) aumenta al disminuir la duración (D), por lo cual presenta una forma exponencial negativa. En cuanto a esto Témez (1978) sostiene que la probabilidad de encontrar intensidades mayores aumenta a medida que las duraciones disminuyen; por el contrario, las menores intensidades se vinculan a duraciones mayores.

Como una forma de evitar las lecturas de intensidades de lluvia de diseño en una gráfica, es que se han diseñado muchas fórmulas que puedan representar la relación intensidad-duración de una lluvia puntual. Respecto a esto, López Cadenas (1998) señala que la construcción de las curvas IDF se realiza a partir de datos aportados por los pluviogramas de una determinada estación. Un adecuado análisis de estos pluviogramas lleva a obtener expresiones de las alturas de precipitación en función de la duración, las cuales son características para cada zona.

Sheng (1992) sostiene que para las intensidades de lluvia, se deben analizar los datos de los pluviógrafos, para obtener intensidades de distintos períodos de tiempo y frecuencia. Si los únicos datos disponibles son las precipitaciones diarias, es posible

emplear la siguiente expresión para determinar intensidades en períodos cortos y distintos.

— —

Donde:

I = Intensidad de precipitación en mm/h

R = Precipitación máxima en 24 hrs en un periodo de retorno de 10 años en mm

t = Duración o tiempo de concentración en horas.

Autores como Kennison (1940), Wenzel (1982) y Chen (1983), han propuesto diversas ecuaciones para distintas ciudades del mundo. Entre éstos, Chen (1983) propuso una fórmula general para representar la relación intensidad - duración - frecuencia de las precipitaciones en Estados Unidos, generando así un método de gran potencial en el uso de drenajes de aguas lluvias. Dicha ecuación responde a la forma:

Donde:

= Intensidad de lluvia en mm/h, correspondiendo a un período de retorno de T años y una lluvia de t minutos en duración.

y = Corresponden a las precipitaciones asociadas a una duración de t horas y un período de retorno de 100 y 10 años.

X = Relación de las frecuencias $\frac{R_t^{100}}{R_t^{10}}$

Otra fórmula muy utilizada para obtener la intensidad de precipitación es la presentada por Bernard (1932), la cual posee la siguiente expresión:

$$I = \frac{K * T^m}{(d + c)^n}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación en mm

d = Duración de la precipitación en horas

T= Período de retorno en años.

K, m, n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión.

Si en esta última fórmula se asume un valor cero para la constante c, se obtiene la expresión de Bernard y Yarnell.

Esta ecuación de Bernard y Yarnell, ha sido usada en Chile por diversos autores, entre ellos Abarza (2001) y Cornejo (2004), para generar las curvas IDF en estaciones pertenecientes a las regiones de Coquimbo y del Maule, obteniendo muy buenos ajustes que validan esta fórmula.

4.5 Parámetro K

Según Pizarro *et al.* (2002), existe un método para la construcción de las curvas IDF en estaciones pluviométricas, a partir de estaciones pluviográficas, denominado método K. Así y considerando los datos de la estación pluviográfica, se relaciona cada intensidad de precipitación a la duración i, para un período de retorno j, con la intensidad de precipitación en 24 horas, para el mismo período de retorno j, lo que define un cociente que se expresa como sigue.

$$k = \frac{I_d}{I_{24}}$$

Éste cociente se define como parámetro k , donde I_d es la intensidad de precipitación horaria e I_{24} es la intensidad de precipitación para una duración de 24 horas, y ambos valores para un período de retorno dado.

Con este parámetro definido para distintas duraciones y períodos de retorno, y los valores de intensidades de la estación pluviométrica, para 24 horas y distintos períodos de retorno, se establecen los valores de intensidades en la estación pluviométrica para cada una de las duraciones consideradas.

Según Cereceda (2008), las tablas con el parámetro K calculado, permiten la extrapolación a zonas o estaciones que carezcan de registros pluviográficos, es decir a estaciones que presentan registros pluviométricos. Para la extrapolación a otra estación de carácter pluviométrico, sólo se deberá multiplicar la precipitación de 24 horas de la estación, a un determinado período de retorno, por el factor K ligado a la duración horaria que se quiere obtener. Para ello, se asume un comportamiento similar entre ambas estaciones, además de considerar que las características climatológicas deben ser también similares.

4.6 Curvas IDF en el Mundo

En general, son diversos los autores que desde hace ya varios años se han dedicado al estudio de las precipitaciones extremas a nivel mundial, entre ellos, Bell (1969) citado por Pizarro *et al* (2007), quién estudio las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual período de retorno, como también, para lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración. Para ello utilizó datos de estaciones presentes en diversos países del mundo como Estados Unidos Continental, Australia, Alaska, Rusia, Hawái, Puerto Rico y África. Dicho autor concluyó a partir de su estudio que las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual período de retorno y la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración, son muy constantes en todos los puntos

estudiados debido a que las grandes intensidades se producen en tormentas convectivas, las cuales tienen gran independencia geográfica y regional (Varas y Sánchez, 1988).

En estos días las curvas IDF denotan una gran importancia a nivel mundial, más aún para países que presentan condiciones climáticas extremas, ya que permiten entre otras cosas, la prevención de aluviones e inundaciones mediante un adecuado diseño de obras de ingeniería como puentes y alcantarillas; en cuanto a esto, Kothyari y Garde (1992) sostienen que en India las curvas IDF son utilizadas en la planificación y diseño de proyectos relacionados con los recursos hídricos. Las curvas IDF permiten además un diseño adecuado para la construcción de obras de recuperación de suelos y/o control de la erosión como zanjas de infiltración, canales de evacuación de aguas lluvias y diques entre otras.

Actualmente son variados los países que cuentan con una amplia red de curvas IDF. Dentro de los estudios más recientes destaca el realizado por Puentes (2000), quién generó una serie de curvas IDF en el contexto de un estudio de caracterización hidrológica de cuencas tropicales, específicamente en la cuenca del río San Diego en el poblado de San Andrés, Cuba. Para esto se basó en los datos pluviográficos de la estación “República de Chile”, considerando una serie de tiempo de 10 años y seleccionando las series de máximos anuales para las duraciones de 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 150, 300, 720 y 1440 minutos.

Por otra parte en el área del Milano, Italia, De Michele *et al* (2002) estudiaron las curvas Intensidad Duración Frecuencia en precipitaciones extremas y determinaron las curvas para la evaluación de tormentas. La variabilidad de la intensidad de precipitación máxima anual y la duración fue representada a través del tiempo, obteniendo así mediante los conceptos de escalamiento dinámico y autoafinidad estadística las relaciones de aumento de la intensidad de precipitación. Walkins *et al.* (2005), actualizaron las curvas Intensidad Duración Frecuencia para el Estado de Michigan, obteniendo además puntos de riesgo de inundaciones. Con ello se obtuvo un mapa isopluvial, donde se ven representadas las curvas IDF. Por su parte, en México

Gutiérrez-López y Ramírez (2005), también actualizaron y ampliaron variables para la construcción de índices de inundaciones, generados en el año 1960 por Dalrymple.

Minh Nhat *et al* (2006), en su estudio titulado “Establecimiento de Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las precipitaciones en el área de Monzón, Vietnam”, Construyeron las curvas IDF para siete estaciones en el monzón del área y propusieron además una fórmula generalizada que usa la intensidad de precipitación y el período de retorno, la cual puede ser utilizada para la construcción de las curvas IDF en otras estaciones aledañas a la zona.

Otro estudio es el realizado por Langousi y Veneziano (2006), quienes generaron algunas representaciones escalares de precipitación, dando a conocer así el desarrollo de métodos para estimar las curvas Intensidad Duración Frecuencia para tres modelos de precipitación. Estos modelos usan la noción clásica del proceso exterior e interior, respectivamente, para la variación de intensidad de precipitación en la tormenta. El modelo basado en las curvas IDF puede ser obtenido a partir de pocos años de datos de precipitación. En una validación con un registro de precipitación de 24 años de Florencia, Italia, los modelos reproducen estrechamente las curvas IDF empíricas y hacen extrapolaciones similares durante períodos de retorno más largos que el registro histórico.

4.7 Antecedentes en Chile

En Chile, las precipitaciones se caracterizan por presentar cierto grado de torrencialidad, principalmente en las zonas áridas y semiáridas, siendo los fenómenos hidrometeorológicos extremos, una constante que se repite cada cierto tiempo, y cada vez con mayor frecuencia, provocando grandes flujos desde los sectores altos hacia los sectores bajos, lo que se refleja en el aumento de los caudales y en la generación de posibles inundaciones y otros desastres provocados por el agua. Estos acontecimientos, ocurren principalmente en los sectores más urbanizados, generando pérdidas económicas asociadas, así como también problemas sociales (Pizarro *et al* 2007).

Es por esto mismo, que el contar con un buen diseño de curvas IDF cobra una vital importancia en un país como Chile. En cuanto a esto, diversos autores han diseñado algunas curvas IDF para algunos sectores del país, entre estos Pizarro *et al* (2002), desarrolló una metodología que permite la estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para lugares con escasa o ninguna información pluviográfica, basándose en coeficientes generalizados de duración y de frecuencia, los cuales permiten estimar dichas curvas con sólo conocer las precipitaciones máximas anuales en 24 horas. Por su parte Espildora (1971) comparó los valores de coeficientes de duración y de frecuencia obtenidos con los de un estudio realizado por Bell en 1969, donde concluyó que los coeficientes de duración y frecuencia generalizados, calculados a partir de información pluviográfica de Santiago, Chillán, Talcahuano y Valdivia, presentaron una aproximada constancia dentro de las diferencias comúnmente aceptadas.

Por otra parte, De Fraja (1993) determinó curvas IDF para las ciudades de Concepción y Talcahuano, utilizando la información de la estación “Carriel Sur” para un período de retorno de 10 años, a partir de la metodología propuesta por Varas y Sánchez en 1983. Estos autores realizaron un estudio de curvas generalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia similar al realizado por Espildora (1971), en donde propusieron una metodología para estimar las intensidades de lluvias de corta duración asociadas a distintos períodos de retorno, en función de las observaciones de lluvias máximas diarias. El método propuesto se basó en la utilización de coeficientes de duración y de frecuencia generalizados, los que fueron definidos en base al análisis de los registros pluviográficos de 13 estaciones ubicadas en la zona central y sur de Chile, distribuidas desde La Serena a Puerto Montt.

Stappung (1999), realizó una recopilación de intensidades horarias para Chile y otros países como Argentina, Venezuela, Brasil, Estados Unidos, Francia y Canadá, generando las curvas IDF para períodos de retorno de dos, diez y cien años, separadas por duraciones entre 2 y 24 horas y entre 10 y 120 minutos. Realizó también, una recopilación de intensidades máximas de precipitación entre 10 y 120 minutos que

corresponde al rango usual en drenaje urbano de colectores primarios, para períodos de retorno de dos, cinco, diez, veinticinco, cincuenta y cien años para varias ciudades de Chile a partir de información extraída de los estudios de planes maestros de aguas lluvias de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). En el caso de la ciudad de Santiago, encontró valores asociados a un período de retorno de dos años que fluctúan entre 17 mm/h y 6 mm/h para duraciones de 10 y 120 minutos respectivamente; y para un período de retorno de cien años los valores encontrados en duraciones de 10 y 120 minutos de precipitaciones máximas, alcanzaron los 40 mm/h y los 12 mm/h respectivamente.

En general, en el país se ha desarrollado un gran número de proyectos en torno a las intensidades máximas de precipitación, pero estos sólo comprenden la elaboración aislada de curvas en zonas puntuales, no abarcando grandes superficies. Es por esto que desde hace algunos años atrás, diversos autores nacionales han diseñado, de manera tanto gráfica, mediante la metodología propuesta por Témez (1978), como también matemática, por medio de la ecuación de Bernard y Yarnell (1932), las curvas Intensidad- Duración-Frecuencia para un gran número de estaciones inmersas en el país y que hoy alcanza a las 50 estaciones distribuidas desde la cuarta a la novena Región. Entre estos autores Labra (2005), encontró intensidades que fluctúan entre los 36,5 mm/h (Estación Embalse Coihueco,) y los 22,1 mm/h (Estación Chillán Viejo), para una hora de duración. Labra señala además que las mayores intensidades se presentaron en estaciones cercanas a cuerpos de agua, lo cual puede ser un punto interesante a analizar en futuros estudios.

Si bien, los diversos estudios realizados hasta ahora abarcan un gran número de estaciones del centro sur del país, aún queda una superficie importante del país que comprende las regiones extremas, las cuales denotan situaciones climáticas muy distintas a la zona centro sur, en las cuales es necesario obtener un diseño de curvas IDF que aporte a los estudios ya realizados.

5. METODOLOGÍA

5.1 Etapas del Estudio

Este estudio se basa en el método gráfico propuesto por Témez (1978), el cual extrae las precipitaciones máximas horarias registradas en los pluviogramas, según las duraciones determinadas en dicho estudio. Estas precipitaciones se ajustan a una función de probabilidad, para luego graficarlas de acuerdo a períodos de retorno y duraciones ya establecidas. En este marco, las etapas del estudio son las siguientes.

5.1.1 Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica consistió en la recopilación de la mayor cantidad posible de información referente al tema en estudio, que pudiese encontrarse tanto en textos de hidrología, hidráulica y estadística, como en internet y revistas especializadas.

5.1.2 Recolección de la Información Requerida

La información necesaria para este estudio fue proporcionada por la Dirección General de Aguas (D.G.A), entidad dependiente del Ministerio de Obras Públicas (M.O.P). Esta información corresponde a las precipitaciones diarias y horarias contenidas en las bandas pluviográficas de las cuatro estaciones seleccionadas y el período correspondiente para cada una de éstas.

5.1.3 Selección de las Estaciones Pluviográficas

La zona de estudio, comprende las regiones de Los Ríos, Los Lagos y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena en la zona sur del país; cuenta con diez estaciones

pluviográficas administradas por la Dirección General de Aguas, las cuales se encuentran diversamente distribuidas en las regiones de estudio.

El criterio de selección de dichas estaciones, fue definido básicamente por los registros históricos con que cuenta cada estación. A continuación en la tabla N°1 se dan a conocer las estaciones, con su ubicación y período de estudio.

Tabla N°1. Período de estudio y ubicación de las estaciones a analizar.

Estación	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas		Período de Estudio
	Este	Norte	Latitud	Longitud	
Llancahue	143.484m	5.580.505m	39° 51'	73° 10'	1977-2007
Puelo	227.887m	5.385.692m	41° 38'	72° 16'	1997-2008
Lago Calafquén	220.792m	5.615.218m	39° 34'	72° 15'	1997-2008
Pta. Arenas	372.982m	4.107.378m	53° 10'	70° 54'	1983-2008

5.1.4 Selección de Intensidades Máximas de Precipitación

Para obtener los datos necesarios para la construcción de las curvas (IDF), se analizaron las bandas pluviográficas, tomando como punto de referencia las 08:00 horas de un día hasta las 08:00 horas del día siguiente, y se determinaron las alturas máximas de precipitación para una duración horaria de 1, 2, 6, 12, 24 y 48 horas.

Con los valores extremos de precipitación seleccionada para cada año y distintas duraciones, se calculó la intensidad horaria, mediante la división de cada una de las series por su duración, obteniendo así la intensidad en mm/h.

5.1.5 Ajuste de los Datos a una Función de Distribución de Probabilidad

Una vez calculadas las intensidades horarias de precipitación para cada duración, se realizó el ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad, que para este estudio fue la función de Gumbel. Ésto, debido a que según la literatura consultada es la que mejor se adapta a datos hidrológicos. Dicha función se encuentra definida por la siguiente expresión:

$$F(X) = P\{x \leq X\} = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}$$

Con, $-\infty \leq X \leq \infty$

En donde:

- X = Valor a asumir por la variable aleatoria.
- α y μ = Parámetros a ajustar en función de la muestra.
- e = Base de los logaritmos neperianos.

Para la determinación de los parámetros α y μ se utilizaron las siguientes expresiones:

y

Donde S es la desviación estándar y \bar{X} la media de la muestra.

5.1.6 Medidas de Bondad de Ajustes

Como medida de bondad de ajuste, para la distribución de probabilidad se utilizarán el coeficiente de determinación R^2 y el test de Kolmogorov – Smirnov.

5.1.6.1 Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación señala que proporción de la variación total de las frecuencias observadas es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas (Pizarro, 1986).

Este coeficiente se define por la expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Fn(X)_i - F(X)_i)^2}{\sum (Fn(X)_i - \overline{Fn(X)})^2}$$

Donde:

$F_n(X)_i$ = Frecuencia observada acumulada.

$F(X)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.

$\overline{Fn(X)}$ = Media de las frecuencias observadas.

5.1.6.2. Test de Kolmogorov – Smirnov.

Corresponde a una prueba de bondad de ajuste aplicable, cuando $F_n(X)_i$ es continua; no necesita que los datos estén agrupados, además de ser aplicable a muestras pequeñas (Canavos, 1995).

Este test de Kolmogorov – Smirnov es una prueba no paramétrica que se basa en el valor absoluto de la máxima diferencia entre la distribución acumulada observada y la esperada, y se utiliza para verificar la hipótesis de que una muestra procede de una distribución particular (Labra, 2005).

Para realizar este test, se deben obtener tanto la frecuencia observada acumulada como la frecuencia teórica acumulada. Para obtener la frecuencia observada acumulada, es necesario ordenar los datos de menor a mayor, para luego aplicar la siguiente fórmula:

$$Fn(X) = \frac{n}{N + 1}$$

Donde:

$Fn(X)$ = Frecuencia observada acumulada.

n = Número total de orden.

N = Número total de datos.

La frecuencia teórica acumulada se obtiene a partir de la función de Gumbel.

$$F(X) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}$$

Así, una vez determinadas ambas frecuencias, es posible obtener el supremo de las diferencias entre ambas, en la i -ésima posición de orden, denominada D .

$$Fn(X)_i - F(X)_i$$

Posteriormente, utilizando un 95% de confianza, se procedió a comparar los valores obtenidos para D_c , con los valores mostrados en la tabla de valores críticos de D_t , del test de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov. De esta forma se establecieron las hipótesis:

H_0 : $D_c < D_t$ (el ajuste es adecuado).

H_a : $D_c > D_t$ (ajuste no es adecuado).

5.1.7 Construcción de las Curvas IDF para Distintos Períodos de Retorno

Una vez ajustados los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, se graficó la intensidad de precipitación y su duración, para cada uno de los períodos de retorno definidos. Estos períodos de retorno fueron de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 años, con lo cual fue posible obtener nueve curvas para cada una de las estaciones pluviográficas de la zona de estudio.

Para obtener las curvas definitivas, es necesario reemplazar cada período de retorno en cada una de las funciones de distribución de probabilidad ajustadas a cada duración; posteriormente se unen los puntos y se dibujan las curvas.

5.1.8 Construcción de las Tablas del Parámetro K.

Una vez generadas las curvas IDF, se procedió a la construcción de las tablas del parámetro K, las cuales permiten la extrapolación de valores, para las distintas duraciones, a estaciones pluviométricas cercanas a alguna de las estaciones en estudio y que, por su carácter pluviométrico, sólo cuentan con datos para duraciones de 24 horas. Dicha extrapolación es posible empleando el parámetro k, mediante la fórmula:

$$K = \frac{I_d}{I_{24}}$$

Donde I_d es la intensidad de precipitación para una duración en horas, I_{24} la intensidad de precipitación para una duración de 24 horas.

5.1.9 Determinación Matemática de las Curvas IDF.

Con el objetivo de obtener una función matemática que represente la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, en cada una de las estaciones en estudio, se procedió a analizar el comportamiento de dichas variables.

Para representar matemáticamente la relación intensidad, duración, frecuencia de las precipitaciones, se utilizó la ecuación de Bernard y Yarnell, la cual ha sido utilizada por diversos autores en Chile para representar las curvas IDF, de las regiones de la zona central. Dicha ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$I = \frac{k * T^m}{D^n}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación expresada en mm/h.

T = Periodo de retorno expresado en años

D = Duración de la precipitación expresada en horas.

k, m y n = Constantes obtenidas mediante regresión lineal múltiple.

Para poder realizar el análisis de regresión lineal múltiple, es necesario aplicar logaritmos, obteniendo la expresión:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D$$

Expresión que responde a la forma:

$$y = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2$$

Donde:

$$\begin{array}{ll} y = \log I & a_0 = \log k \\ X_1 = \log T & a_1 = m \\ X_2 = \log D & a_2 = -n \end{array}$$

Una vez calculados los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 , es posible encontrar el valor de los parámetros k , m y n .

5.1.10 Análisis de Regresión.

Según Gujarati (1992), si el único objetivo de una investigación es la investigación puntual de los parámetros de regresión, será suficiente desarrollar el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el cual no hace supuestos sobre la distribución de los residuos. Si el objetivo no es sólo la estimación, sino además la inferencia, será necesario determinar si los residuos siguen alguna distribución de probabilidad.

Por lo anteriormente expuesto, en el presente estudio no se desarrollaron los supuestos de regresión (Normalidad, Homocedasticidad y Autocorrelación). Como medidas de bondad de ajuste se utilizaron el Coeficiente de Determinación, el Error Estándar de Estimación y la prueba U de Mann Whitney.

5.1.11 Medidas de Bondad de Ajuste del Modelo

5.1.11.1 Coeficiente de Determinación R^2 .

El coeficiente de determinación R^2 es un estadístico que indica la proporción de la variación de los datos reales que es explicada por el modelo de regresión seleccionado.

El valor de este coeficiente de determinación, fue obtenido mediante la expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(I_r - I_{est})^2}{\sum(I_r - \bar{I}_r)^2}$$

Donde:

I_r = Intensidad real determinada por las curvas IDF

I_{est} = Intensidad estimada a partir del modelo $I = \frac{k * T^m}{D^n}$

5.1.11.2 Prueba U de Mann-Whitney.

La prueba U se basa en una combinación de las n1 y n2 observaciones para formar un solo conjunto de n1+n2 observaciones arregladas en orden creciente de magnitud. Luego se le asigna un rango a cada observación en la secuencia ordenada que comienza con 1 y termina con n1+n2. Si las muestras aleatorias provienen de poblaciones con la misma distribución, se acepta que los rangos se encuentran lo suficientemente dispersos. Es decir, determina si un agregado de rangos observados posee características suficientes para concluir que las dos muestras aleatorias provienen de una misma población, o no (Canavos, 1990 citado por Cornejo 2004).

Mendhall y Sincich (1997), definen esta prueba como:

$$U(A) = \left[n_1 * n_2 + \left(n_1 * \frac{n_1 + 1}{2} \right) - W(A) \right]$$

$$U(B) = \left[n_1 * n_2 + \left(n_1 * \frac{n_1 + 1}{2} \right) - W(B) \right]$$

En donde:

n_1 = Número de observaciones en la muestra A.

n_2 = Número de observaciones en la muestra B.

$U_A + U_B = n_1 \times n_2$

$W(A)$ = La suma de los rangos para la muestra A.

$W(B)$ = La suma de los rangos para la muestra B.

Para muestras mayores a 10, la prueba U se distribuye en forma normal con:

$$E(U) = \frac{n_1 * n_2}{2} \quad \text{Var}(U) = \sqrt{\frac{n_1 * n_2 * (n_1 + n_2 + 1)}{12}}$$

Por lo tanto, la variable aleatoria está dada por:

$$Z_c = \frac{U - E(U)}{\sqrt{\text{Var}(U)}}$$

Y la región de rechazo por $Z_c \geq Z_{\alpha}$ con $\alpha = 0,05$

Las hipótesis nula y alternativa para este caso, son las siguientes:

Hipótesis nula H_0 : Las distribuciones de frecuencias relativas de las poblaciones A y B son idénticas.

Hipótesis alternativa H_a : Las distribuciones de frecuencias relativas de las poblaciones, están desfasadas con respecto a sus ubicaciones relativas.

Luego, para tomar una decisión se considera que para una prueba de dos colas y un valor dado de α , se rechaza H_0 si $U \leq U_0$, donde $P(U \leq U_0) = \alpha/2$, considerando que el valor U es el valor más pequeño entre U_A y U_B .

5.1.11.3 Error Estándar de Estimación

Este estimador determina la disparidad promedio entre las intensidades observadas y las estimadas, donde los valores cercanos a cero indican que el modelo hace una buena descripción de las intensidades, de acuerdo a la fórmula del indicador que se presenta a continuación:

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

Donde:

y: Intensidades observadas

\hat{y} : Intensidad modelada

n: Número de pares de datos de intensidad considerados.

5.1.12 Presentación de Resultados

En esta etapa del estudio se pone a disposición, mediante el empleo de tablas y gráficos, los resultados obtenidos para cada una de las estaciones pluviográficas, a saber: Las alturas máximas de precipitación y las intensidades máximas de precipitación anuales correspondientes a una duración respectiva.

Los parámetros ajustados correspondientes a la función de Gumbel, con sus respectivos valores asociados a las pruebas de bondad de ajuste aplicadas.

Se enseñan de manera gráfica las Curvas IDF, obtenidas para cada una de las estaciones en estudio.

Las tablas de uso práctico que relacionan la intensidad de precipitación con una duración y un periodo de retorno respectivo, que contienen el parámetro k correspondiente a cada estación.

Los modelos matemáticos ajustados correspondientes a una familia de Curvas IDF, para cada estación en estudio. Se incluyen además los resultados de los análisis de regresión y pruebas de bondad de ajuste aplicadas en cada caso.

5.1.13 Análisis y Discusión de Resultados

Una vez obtenidos los resultados, fue posible analizar el comportamiento de las precipitaciones dentro de la zona comprendida en el estudio. Mediante el análisis de cada una de las curvas y las tablas de determinación del parámetro k , fue posible definir un patrón de comportamiento que pudiesen seguir las precipitaciones de acuerdo a su intensidad- duración y frecuencia.

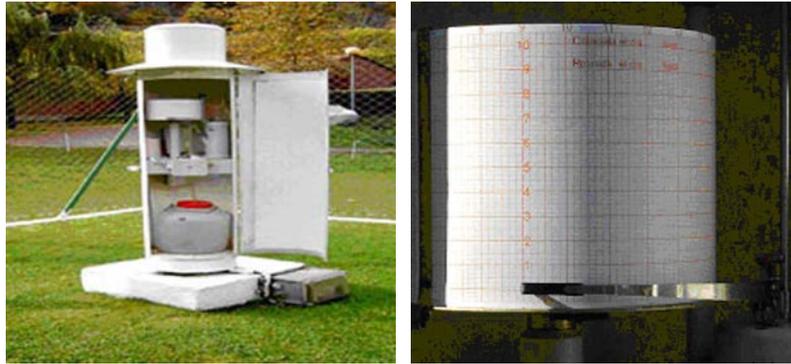
5.1.14 Conclusiones y Recomendaciones.

A partir de los valores y las curvas obtenidas, se determinaron las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

5.2 Materiales y Equipos.

Para realizar este estudio, se necesitaron los siguientes materiales y equipos: Las bandas pluviográficas de las estaciones incluidas en este estudio, las cuales contaban con el máximo de años disponibles, material que fue puesto a disposición del estudio, por la Dirección General de Aguas (DGA).

Figura N°5 Equipo de pluviógrafo y su banda milimetrada.



Fuente: www.meteochile.cl

Cartografía de la zona (Regiones de Los Ríos, Los Lagos y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena).

Equipos de computación (PC e impresoras) y programas computacionales como Microsoft Excel 2007, Microsoft Word 2007, Statgraphics Centurión.

6. Presentación de Resultados

6.1 Alturas Máximas de Precipitación

Si bien este estudio comprendía el análisis y posterior determinación gráfica de las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF), para cinco estaciones pluviográficas del sur del país, sólo se hizo el análisis para cuatro de éstas, debido a la ausencia de datos de la estación correspondiente a la Región de Aysén.

La información necesaria para la elaboración de las curvas, se extrajo de las bandas pluviográficas de cada estación, las cuales fueron proporcionadas por la Dirección General de Aguas (D.G.A), en su oficina central en la ciudad de Santiago. A partir de esta información se obtuvieron las precipitaciones máximas anuales registradas para cada duración establecida.

Es necesario mencionar que para la obtención de las precipitaciones máximas para cada duración, dentro de cada una de las estaciones, se consideraron las series completas con años de registros que posee la D.G.A, salvo aquellos en que la información pluviográfica era incompleta.

Las alturas máximas de precipitación para cada duración seleccionada y año de registro se presentan a continuación en los cuadros 2, 3, 4, 5.

Tabla N° 2. Alturas Máximas de Precipitación. Estación Llancahue.

Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1977	18,6	26,6	37,1	40,8	54,8	78,5
1978	12,9	22,5	56,3	82,5	110,7	139,2
1979	14,6	24,2	46,2	62	67,6	74,7
1980	17,5	24,5	39,1	61,4	65,8	88,4
1981	11,1	14,1	22,2	34,4	42,4	76,7
1982	26,4	31,4	34,4	38,5	54,4	75,5
1983	12	19,5	35,9	56,6	70	93,5
1984	22,7	38,9	69,5	90,3	121,1	150,9
1985	12,5	20,5	49,2	67,6	85,8	91,1
1986	13,6	17,2	33	53,6	77,2	82,8
1987	14,8	17,2	23,3	36,8	69	76
1988	15,7	20,2	31,6	37,6	47,1	48,4
1989	13,4	20,6	24,5	34,9	44,7	54,2
1990	14,3	18,4	35,9	43,4	58,8	60,5
1991	9,1	11,9	25,1	27,7	30	39,4
1992	17,6	22,3	37,2	43,6	63,3	64,5
1993	15,5	28,7	66,1	90,1	132,9	177,8
1994	18,7	24,5	38,1	41,7	47,7	59,5
1995	9,5	18,2	34,2	47,5	59,4	77,1
1996	9,9	13,5	31,7	45,7	53,9	54,8
1997	14,4	24,2	35,1	47,9	77,5	129,2
1998	10,5	13,6	27	41,1	47,6	65,2
1999	16,5	20,9	44,7	74,2	89,6	112,2
2000	16,4	25,5	63,8	104,2	162,8	284,7
2001	10,4	17,3	28,3	34,5	35,4	37,9
2002	10	16,4	29,1	36,6	38,3	61,2
2003	15,3	21,7	46,2	66,6	84,1	97,9
2004	10,3	16,9	32,8	53,4	72,4	82,4
2005	14,1	19,8	38,1	46,4	76,7	115,7
2006	11,8	17,3	25,3	37,8	39,9	47,2
2007	19,7	24,5	30	34,6	38,2	51,1

Tabla Nº 3. Alturas Máximas de Precipitación. Estación Puelo.

Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1997	14,6	17,1	42,1	74	138	168,4
1997	12,4	16,8	39,2	73,1	132,5	163,9
1998	8,1	14	30,0	34,8	48,6	80,2
1998	7,5	13,1	27,5	34,2	48,2	76,4
1999	12,5	22,4	50,0	70,7	88,6	128,2
1999	11,6	20,4	47,3	67,5	86,1	123,4
2000	13,9	22,8	52,1	93,8	129,8	204,1
2000	13,6	21,2	51,0	92,9	129,4	200
2001	14,1	24,8	56,3	73,4	91,6	104,4
2001	13,4	22,9	53,4	72,3	90,0	103,4
2002	9,0	16,2	34,6	56,9	84,7	130,4
2002	7,5	15,2	33,1	45,2	75,9	126,7
2003	11,9	20,6	28,6	46,1	77,8	85,0
2003	9,1	19,4	26,6	39,9	73,4	75,3
2004	16,1	22,8	50,0	78,2	126	174,5
2004	15,5	21,1	48,2	77,3	125,1	152,9
2005	7,2	13,8	33,5	58,2	100,0	130,6
2005	6,8	13,1	29,8	55,9	95,4	127,2
2006	8,5	11,6	28,1	51,2	68,8	110,7
2006	7,8	10,9	26,3	48,5	67,2	104,1
2007	7,6	13,4	34	60	73,6	83,7
2007	7,1	11,8	31,4	56,2	69,8	81,3
2008	8,5	15,3	37,8	58,4	97,9	172
2008	8,2	13,9	36,1	55,1	92,5	155,8

Tabla N° 4. Alturas Máximas de Precipitación. Estación Lago Calafquén.

Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1997	12,3	18,7	39,6	58,2	87	137,1
1997	11,4	16,8	38	56,1	82,8	123,2
1998	13,4	20	39,5	68	98,1	113,2
1998	12,1	18,9	38,1	67,9	93,7	109,8
1999	12	15,1	32,9	45,4	85,7	110
1999	10,8	14	31,6	43,2	82,9	102
2000	12	19,1	48,5	73,7	143,5	227,1
2000	11,2	17,8	45,1	72,5	136,7	222,3
2001	15,2	20,6	37,5	53,7	80	89,8
2001	13,7	18,7	35,2	51,6	78,5	89,5
2002	12,9	24,8	43,1	47,2	76	137
2002	10,6	23,3	41,2	45,3	72,9	130,8
2003	17,8	21,9	33,1	50,2	92,6	115,3
2003	16,3	20,5	30	48,7	90,2	111,6
2004	13,7	17,8	39,4	64,3	98,9	116,8
2004	13	16,8	37,3	61,9	96,7	112,2
2005	15,4	21,4	33,7	53,2	87,6	131,3
2005	14,3	20	31,5	52,4	85,1	130,2
2006	11	19,1	46,3	71,6	111,8	136,2
2006	10,6	17,9	43,2	70,9	110,2	134,4
2007	13,3	20,4	33,2	44,6	83,8	107,3
2007	12,7	18,8	30,7	42,5	75,2	92,5
2008	10	17,1	41,9	59,3	93	166,2
2008	9,5	15,4	38,6	56,8	92,1	142,3

Tabla Nº 5. Alturas Máximas de Precipitación. Estación Punta Arenas

Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1983	7,6	8,1	12,1	22	34,5	39,6
1984	4,1	6,2	11,2	19,5	23,2	23,2
1985	3,5	5,9	10,1	12,7	15,1	16,8
1986	3,2	6,1	11,7	17,4	17,4	17,4
1987	6,4	11,4	17,5	18,8	23,4	23,8
1988	4,8	5,9	14,5	17,8	24	25,9
1989	7,1	11,3	17,8	20,3	22,1	22,1
1990	5,9	9,6	10,2	19	30	49,8
1991	6	9,4	19,6	24,1	24,5	24,5
1992	3,8	7,4	13,8	21,9	21,9	29,8
1993	13	23,3	26,4	33,8	39,9	39,8
1994	8,9	12,9	13,8	15,2	15,2	17
1995	6,8	10,9	15,1	15,1	15,1	15,1
1996	8,7	10,9	16,4	24,5	33,5	34,3
1997	7	13	23,1	24,7	27,1	27,1
1998	4,4	7,3	14,6	17,9	17,9	23
1999	5,2	10	18,6	23,3	32,7	38,6
2000	7,9	9,8	16,6	21,9	27,9	27,9
2001	4,8	9,3	13,7	15,1	15,4	16,8
2002	6,3	9,7	11	17,8	24,4	24,4
2003	6,2	9,6	17,8	18	18	18
2004	6,5	11,6	11,8	19,5	19,5	19,5
2005	4,7	8,9	11,7	14,6	17,8	18,1
2006	6,9	8,8	19,5	19,5	19,5	20
2007	3,3	5,1	14,5	16,6	16,6	16,6
2008	3,6	4,7	8	12,9	15,9	17,5

6.2 Cálculo de las Intensidades Máximas de Precipitación

Una vez obtenidas las alturas máximas de precipitación para cada duración, se procedió a realizar el cálculo de las intensidades máximas de precipitación, aplicando para ello el método propuesto por Témez para cada estación y año de registro. Esto resulta de dividir cada altura de precipitación por su duración respectiva, se obtuvo además la media (\bar{x}) y la desviación estándar de las intensidades para cada duración, datos necesarios para los cálculos de los parámetros de la ecuación de Gumbel. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 6, 7, 8 y 9 para cada una de las estaciones en estudio.

Tabla N° 6. Intensidades Máximas de Precipitación. Estación Llancahue.

INTENSIDADES en mm/h						
Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1977	18,60	13,30	6,18	3,40	2,28	1,64
1978	12,90	11,25	9,38	6,88	4,61	2,90
1979	14,60	12,10	7,70	5,17	2,82	1,56
1980	17,50	12,25	6,52	5,12	2,74	1,84
1981	11,10	7,05	3,70	2,87	1,77	1,60
1982	26,40	15,70	5,73	3,21	2,27	1,57
1983	12,00	9,75	5,98	4,72	2,92	1,95
1984	22,70	19,45	11,58	7,53	5,05	3,14
1985	12,50	10,25	8,20	5,63	3,58	1,90
1986	13,60	8,60	5,50	4,47	3,22	1,73
1987	14,80	8,60	3,88	3,07	2,88	1,58
1988	15,70	10,10	5,27	3,13	1,96	1,01
1989	13,40	10,30	4,08	2,91	1,86	1,13
1990	14,30	9,20	5,98	3,62	2,45	1,26
1991	9,10	5,95	4,18	2,31	1,25	0,82
1992	17,60	11,15	6,20	3,63	2,64	1,34
1993	15,50	14,35	11,02	7,51	5,54	3,70
1994	18,70	12,25	6,35	3,48	1,99	1,24
1995	9,50	9,10	5,70	3,96	2,48	1,61
1996	9,90	6,75	5,28	3,81	2,25	1,14
1997	14,40	12,10	5,85	3,99	3,23	2,69
1998	10,50	6,80	4,50	3,43	1,98	1,36
1999	16,50	10,45	7,45	6,18	3,73	2,34
2000	16,40	12,75	10,63	8,68	6,78	5,93
2001	10,40	8,65	4,72	2,88	1,48	0,79
2002	10,00	8,20	4,85	3,05	1,60	1,28
2003	15,30	10,85	7,70	5,55	3,50	2,04
2004	10,30	8,45	5,47	4,45	3,02	1,72
2005	14,10	9,90	6,35	3,87	3,20	2,41
2006	11,80	8,65	4,22	3,15	1,66	0,98
2007	19,70	12,25	5,00	2,88	1,59	1,06
\bar{x}	14,51	10,53	6,30	4,34	2,85	1,85
S	4,00	2,82	2,06	1,61	1,26	1,02

Tabla N° 7. Intensidades Máximas de Precipitación. Estación Puelo.

INTENSIDADES en mm/h						
Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1997	14,60	8,55	7,02	6,17	5,75	3,51
1997	12,40	8,40	6,53	6,09	5,52	3,41
1998	8,10	7,00	5,00	2,90	2,03	1,67
1998	7,50	6,55	4,58	2,85	2,01	1,59
1999	12,50	11,20	8,33	5,89	3,69	2,67
1999	11,60	10,20	7,88	5,63	3,59	2,57
2000	13,90	11,40	8,68	7,82	5,41	4,25
2000	13,60	10,60	8,50	7,74	5,39	4,17
2001	14,10	12,40	9,38	6,12	3,82	2,18
2001	13,40	11,45	8,90	6,03	3,75	2,15
2002	9,00	8,10	5,77	4,74	3,53	2,72
2002	7,50	7,60	5,52	3,77	3,16	2,64
2003	11,90	10,30	4,77	3,84	3,24	1,77
2003	9,10	9,70	4,43	3,33	3,06	1,57
2004	16,10	11,40	8,33	6,52	5,25	3,64
2004	15,50	10,55	8,03	6,44	5,21	3,19
2005	7,20	6,90	5,58	4,85	4,17	2,72
2005	6,80	6,55	4,97	4,66	3,98	2,65
2006	8,50	5,80	4,68	4,27	2,87	2,31
2006	7,80	5,45	4,38	4,04	2,80	2,17
2007	7,60	6,70	5,67	5,00	3,07	1,74
2007	7,10	5,90	5,23	4,68	2,91	1,69
2008	8,50	7,65	6,30	4,87	4,08	3,58
2008	8,20	6,95	6,02	4,59	3,85	3,25
\bar{x}	10,52	8,64	6,44	5,12	3,84	2,66
S	3,09	2,16	1,65	1,35	1,09	0,81

Tabla N° 8. Intensidades Máximas de Precipitación. Estación Lago Calafquén.

INTENSIDADES en mm/h						
Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1997	12,30	9,35	6,60	4,85	3,63	2,86
1997	11,10	8,40	6,33	4,68	3,45	2,57
1998	13,40	10,00	6,58	5,67	4,09	2,36
1998	11,80	9,45	6,35	5,66	3,90	2,29
1999	12,00	7,55	5,48	3,78	3,57	2,29
1999	9,40	7,00	5,27	3,60	3,45	2,13
2000	12,00	9,55	8,08	6,14	5,98	4,73
2000	11,20	8,90	7,52	6,04	5,70	4,63
2001	15,20	10,30	6,25	4,48	3,33	1,87
2001	13,60	9,35	5,87	4,30	3,27	1,86
2002	12,90	12,40	7,18	3,93	3,17	2,85
2002	10,60	11,65	6,87	3,78	3,04	2,73
2003	17,80	10,95	5,52	4,18	3,86	2,40
2003	16,30	10,25	5,00	4,06	3,76	2,33
2004	13,70	8,90	6,57	5,36	4,12	2,43
2004	11,10	8,40	6,22	5,16	4,03	2,34
2005	15,40	10,70	5,62	4,43	3,65	2,74
2005	14,80	10,00	5,25	4,37	3,55	2,71
2006	11,00	9,55	7,72	5,97	4,66	2,84
2006	10,60	8,95	7,20	5,91	4,59	2,80
2007	13,30	10,20	5,53	3,72	3,49	2,24
2007	12,70	9,40	5,12	3,54	3,13	1,93
2008	10,00	8,55	6,98	4,94	3,88	3,46
2008	9,50	7,70	6,43	4,73	3,84	2,96
\bar{x}	12,57	9,48	6,31	4,72	3,88	2,68
S	2,17	1,26	0,86	0,84	0,73	0,72

Tabla N° 9. Intensidades Máximas de Precipitación. Estación Punta Arenas.

INTENSIDADES en mm/h						
Año	Duración en horas					
	1	2	6	12	24	48
1983	7,60	4,05	2,02	1,83	1,44	0,83
1984	4,10	3,10	1,87	1,63	0,97	0,48
1985	3,50	2,95	1,68	1,06	0,63	0,35
1986	3,20	3,05	1,95	1,45	0,73	0,36
1987	6,40	5,70	2,92	1,57	0,98	0,50
1988	4,80	2,95	2,42	1,48	1,00	0,54
1989	7,10	5,65	2,97	1,69	0,92	0,46
1990	5,90	4,80	1,70	1,58	1,25	1,04
1991	6,00	4,70	3,27	2,01	1,02	0,51
1992	3,80	3,70	2,30	1,83	0,91	0,62
1993	13,00	11,65	4,40	2,82	1,66	0,83
1994	8,90	6,45	2,30	1,27	0,63	0,35
1995	6,80	5,45	2,52	1,26	0,63	0,31
1996	8,70	5,45	2,73	2,04	1,40	0,71
1997	7,00	6,50	3,85	2,06	1,13	0,56
1998	4,40	3,65	2,43	1,49	0,75	0,48
1999	5,20	5,00	3,10	1,94	1,36	0,80
2000	7,90	4,90	2,77	1,83	1,16	0,58
2001	4,80	4,65	2,28	1,26	0,64	0,35
2002	6,30	4,85	1,83	1,48	1,02	0,51
2003	6,20	4,80	2,97	1,50	0,75	0,38
2004	6,50	5,80	1,97	1,63	0,81	0,41
2005	4,70	4,45	1,95	1,22	0,74	0,38
2006	6,90	4,40	3,25	1,63	0,81	0,42
2007	3,30	2,55	2,42	1,38	0,69	0,35
2008	3,60	2,35	1,33	1,08	0,66	0,36
\bar{x}	6,02	4,75	2,51	1,62	0,95	0,52
S	2,18	1,82	0,71	0,37	0,29	0,19

6.3 Ajuste de los Datos a una Función de Distribución de Probabilidad.

Obtenidos los datos de intensidades máximas de precipitación, se procedió a realizar el ajuste de éstos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel. Con los valores de promedio aritmético y distribución estándar, de la serie de datos para cada duración, se obtuvieron los parámetros μ y α . Los valores de estos parámetros se dan a conocer en la tabla 10.

Tabla N° 10. Parámetros α y μ para cada duración y estaciones en estudio.

Estación	Llancahue		Puelo		Lago Calafquén		Punta Arenas	
	α	μ	α	μ	α	μ	A	μ
1	0,32	12,71	0,42	9,13	0,59	11,59	0,59	5,04
2	0,45	9,26	0,6	7,67	1,02	8,91	0,7	3,93
6	0,62	5,37	0,78	5,7	1,49	5,93	1,82	2,19
12	0,8	3,61	0,95	4,51	1,52	4,34	3,42	1,45
24	1,02	2,28	1,18	3,35	1,76	3,55	4,47	0,82
48	1,25	1,39	1,57	2,29	1,77	2,36	6,87	0,43

6.4 Determinación de las Pruebas de Bondad de Ajuste

Una vez ajustados los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, se validó el ajuste de éstos a la función. Esta validación se realizó a través de la prueba de Kolmogorov – Smirnov y el Coeficiente de Determinación R^2 . Los valores que arrojó esta prueba y el coeficiente, se presentan en las tablas 11 y 12.

Tabla N° 11. Determinación del nivel de ajuste del test de Kolmogorov – Smirnov para cada estación y duración.

Estación	Llancahue Dt=0,2404		Punta Arenas Dt=0,2540		Puelo Dt=0,2700		Lago Calafquén Dt=0,2700	
	Horas	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste	Dc
1	0,0876	A	0,1023	A	0,1672	A	0,0765	A
2	0,0717	A	0,1168	A	0,1612	A	0,1278	A
6	0,1064	A	0,0789	A	0,1537	A	0,1227	A
12	0,1167	A	0,0809	A	0,1236	A	0,1139	A
24	0,0668	A	0,1160	A	0,1350	A	0,1078	A
48	0,1090	A	0,1057	A	0,1368	A	0,1371	A

Donde:

Dt = Estadístico de Kolmogorov – Smirnov para n datos y 95% de confianza.

Dc = Estadístico de Kolmogorov – Smirnov calculado a partir de la función de Gumbel.

A = Se acepta el ajuste.

Tabla N° 12. Valores del Coeficiente de Determinación (R^2) para cada estación y duración.

Estación	Llancahue	Pta. Arenas	Puelo	Lago Calafquén
Duración(h)	R2	R2	R2	R2
1	0,986	0,975	0,873	0,925
2	0,987	0,960	0,918	0,964
6	0,979	0,983	0,932	0,873
12	0,959	0,983	0,959	0,960
24	0,989	0,969	0,971	0,968
48	0,951	0,962	0,949	0,951

6.5 Diseño Gráfico de las Curvas IDF para cada una de las Estaciones Seleccionadas

Una vez validado el ajuste para cada una de las estaciones y las duraciones respectivas, se realizó el diseño gráfico de las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia a través del método propuesto por Témez (1978). Éste consiste en representar de manera gráfica cada uno de los períodos de retorno, a partir de la función de distribución de probabilidad de Gumbel anteriormente ajustada.

Para obtener el diseño definitivo de las curvas IDF, para cada estación, el cual pudiese representar de mejor manera las situaciones extremas de las precipitaciones presentes en la región de estudio, fue necesario realizar más de un muestreo por estación.

Uno de los mayores problemas para realizar el muestreo, lo presentó la estación Punta Arenas, debido a su ubicación geográfica, caracterizada por las bajas temperaturas que provocaron un congelamiento del instrumental de medición durante los meses de invierno. Esto produjo que los datos muestreados se concentraran en los meses de octubre a marzo de cada año, lo cual puede inducir a errores en las futuras estimaciones de las intensidades máximas.

Curvas IDF Generadas para las Estaciones en Estudio

Figura N° 6. Curvas IDF Estación Llancahue.

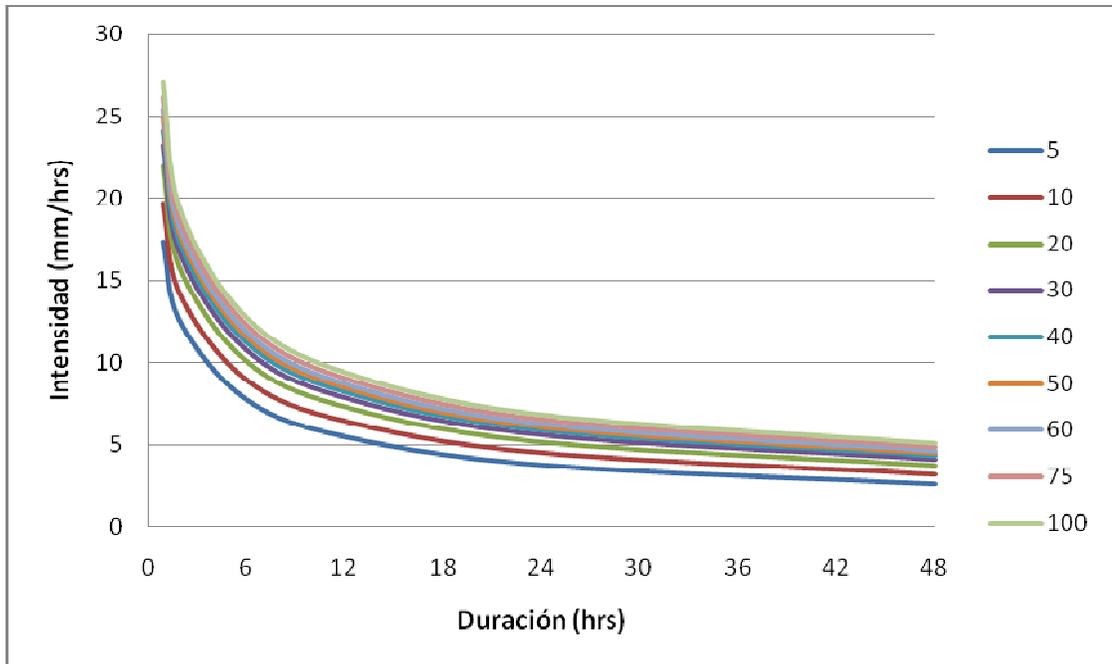


Figura N° 7. Curvas IDF Estación Puelo.

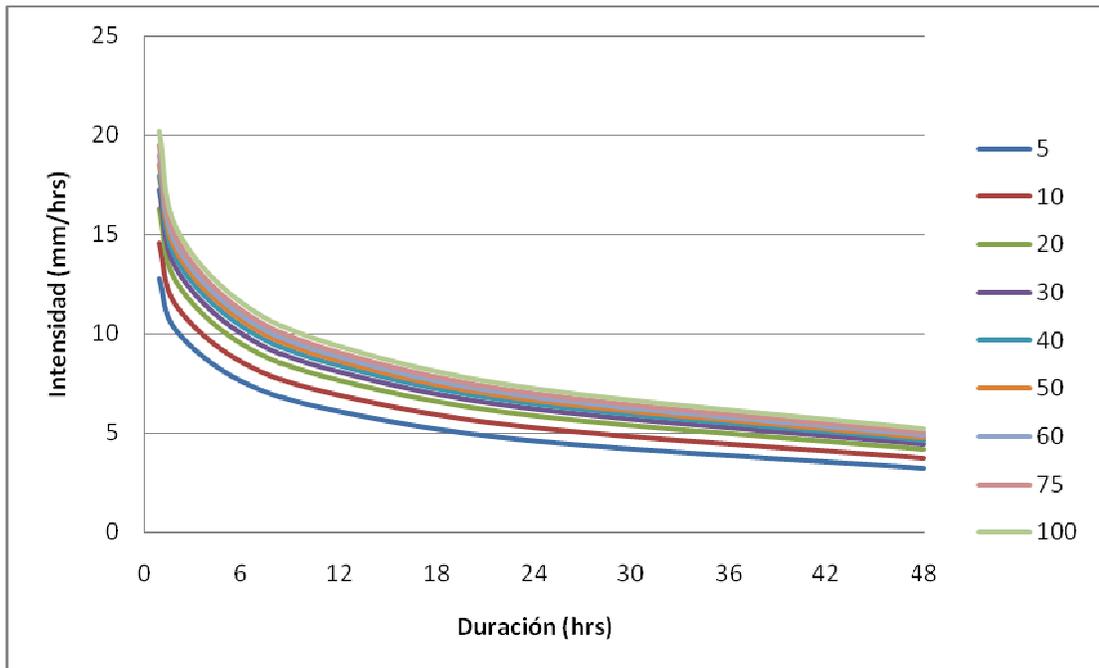


Figura N° 8. Curvas IDF Estación Lago Calafquén.

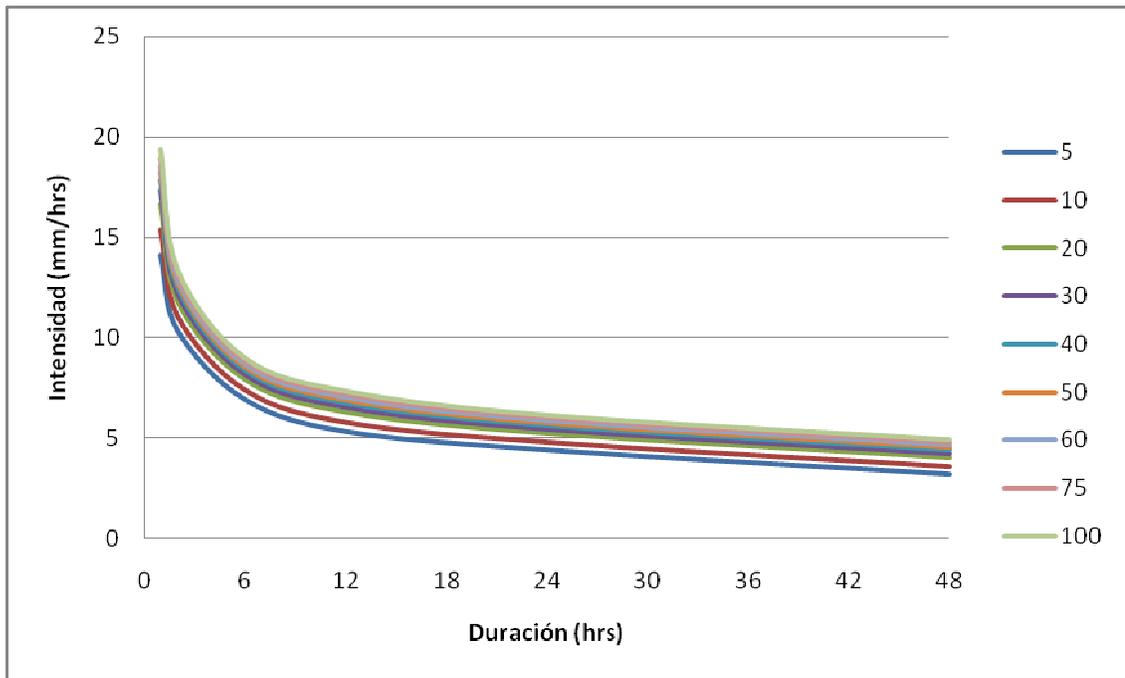
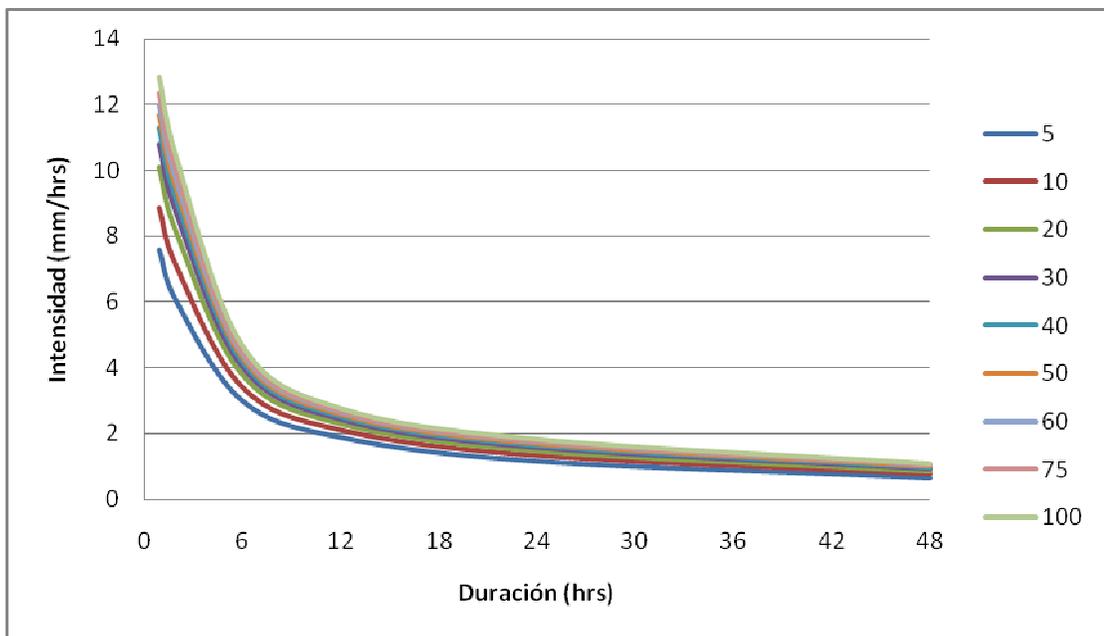


Figura N° 9. Curvas IDF Estación Punta Arenas.



6.6 Determinación del Parámetro K.

La determinación del parámetro K tiene por objetivo transferir información del comportamiento de las estaciones pluviográficas, a estaciones pluviométricas. El parámetro K muestra la relación existente entre la intensidad de precipitación para cada duración y la intensidad de precipitación en 24 horas, para sus respectivos períodos de retorno.

La obtención de estas relaciones, permite la extrapolación a zonas que carezcan de registros pluviográficos, pero que cuenten con registros de precipitación en 24 horas, es decir estaciones pluviométricas, y siempre y cuando se haya validado su uso, como lo plantea Cereceda, 2008.

Para desarrollar esta etapa se deben conocer los valores de intensidad de precipitación calculados para cada duración y período de retorno de cada una de las estaciones estudiadas, información que aparece en las tablas 13, 14, 15 y 16. A partir de éstas se generaron las tablas del parámetro k, disponibles en las tablas 17, 18, 19 y 20.

Tabla N° 13. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Llancahue.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	17,39	19,73	21,97	23,26	24,17	24,87	25,45	26,15	27,05
2	12,56	14,21	15,80	16,71	17,35	17,85	18,25	18,75	19,39
6	7,78	8,99	10,15	10,81	11,28	11,65	11,94	12,30	12,77
12	5,50	6,44	7,34	7,86	8,23	8,51	8,74	9,03	9,39
24	3,75	4,49	5,20	5,61	5,89	6,11	6,30	6,52	6,80
48	2,58	3,18	3,76	4,09	4,32	4,50	4,65	4,83	5,06

Tabla N° 14. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Puelo.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	12,74	14,55	16,29	17,28	17,99	18,53	18,97	19,52	20,21
2	10,19	11,45	12,66	13,36	13,85	14,23	14,53	14,91	15,40
6	7,62	8,58	9,51	10,04	10,41	10,70	10,94	11,23	11,60
12	6,09	6,88	7,64	8,08	8,39	8,63	8,82	9,06	9,37
24	4,62	5,26	5,87	6,22	6,46	6,66	6,81	7,00	7,25
48	3,24	3,72	4,18	4,44	4,63	4,77	4,89	5,03	5,21

Tabla N° 15. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Lago Calafquén.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	14,13	15,41	16,63	17,33	17,82	18,21	18,52	18,90	19,39
2	10,38	11,12	11,83	12,23	12,52	12,74	12,92	13,14	13,43
6	6,93	7,44	7,92	8,20	8,40	8,55	8,67	8,82	9,02
12	5,33	5,82	6,29	6,57	6,76	6,91	7,03	7,18	7,37
24	4,41	4,83	5,24	5,48	5,64	5,77	5,88	6,00	6,17
48	3,20	3,62	4,03	4,26	4,43	4,55	4,66	4,78	4,95

Tabla N° 16. Intensidades Máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Estación Punta Arenas.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	7,59	8,86	10,08	10,79	11,28	11,67	11,98	12,36	12,85
2	6,06	7,13	8,16	8,74	9,16	9,48	9,74	10,06	10,47
6	3,01	3,43	3,82	4,05	4,21	4,34	4,44	4,56	4,72
12	1,88	2,10	2,31	2,44	2,52	2,59	2,64	2,71	2,79
24	1,16	1,32	1,49	1,58	1,64	1,69	1,73	1,79	1,85
48	0,65	0,76	0,87	0,93	0,97	1,00	1,03	1,06	1,10

Tablas del Parámetro K

Tabla N° 17. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Llancahue.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	4,63	4,39	4,23	4,15	4,10	4,07	4,04	4,01	3,98
2	3,35	3,16	3,04	2,98	2,94	2,92	2,90	2,88	2,85
6	2,07	2,00	1,95	1,93	1,91	1,90	1,90	1,89	1,88
12	1,46	1,43	1,41	1,40	1,40	1,39	1,39	1,39	1,38
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
48	0,69	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,74

Tabla N° 18. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Puelo.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	2,76	2,77	2,78	2,78	2,78	2,78	2,79	2,79	2,79
2	2,21	2,18	2,16	2,15	2,14	2,14	2,13	2,13	2,12
6	1,65	1,63	1,62	1,61	1,61	1,61	1,61	1,60	1,60
12	1,32	1,31	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,29	1,29
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
48	0,70	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72

Tabla N° 19. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Lago Calafquén.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	3,21	3,19	3,17	3,16	3,16	3,15	3,15	3,15	3,14
2	2,36	2,30	2,26	2,23	2,22	2,21	2,20	2,19	2,18
6	1,57	1,54	1,51	1,50	1,49	1,48	1,48	1,47	1,46
12	1,21	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,19
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
48	0,73	0,75	0,77	0,78	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80

Tabla N° 20. Parámetro k asociado a cada duración y período de retorno. Estación Punta Arenas.

Duración (hrs)	Periodo de Retorno T								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
	Intensidades de precipitación en (mm/h)								
1	6,56	6,69	6,79	6,84	6,87	6,89	6,90	6,92	6,95
2	5,25	5,39	5,49	5,54	5,57	5,60	5,62	5,64	5,66
6	2,61	2,59	2,57	2,57	2,56	2,56	2,56	2,56	2,55
12	1,63	1,59	1,56	1,54	1,53	1,53	1,52	1,52	1,51
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
48	0,56	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,60

6.7 Determinación de las Expresiones Matemáticas para las Curvas IDF

Con el fin de evitar la lectura de las intensidades de lluvia de diseño en una gráfica, es que Bernard y Yarnell (1932), proponen un modelo matemático que relaciona las intensidades de precipitación con la duración y período de retorno determinado, expresión que responde a la forma:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n}, \text{ donde todos los términos son conocidos}$$

Al transformar dicha expresión aplicando logaritmos, se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple, de la forma:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D$$

Décima de hipótesis para los coeficientes de regresión.

Ho : B = 0 (El coeficiente de regresión poblacional es cero)

$H_0 : B \neq 0$ (El coeficiente de regresión poblacional es distinto de cero)

Décima de hipótesis para la constante de regresión.

$H_0 : A = 0$ (El intercepto poblacional es cero)

$H_0 : A \neq 0$ (El intercepto poblacional es distinto de cero)

Observando los resultados entregados en los apéndices, se puede verificar que los valores -p asociados a los coeficientes a_1 y a_2 de cada modelo son cero. Por lo tanto es posible rechazar la hipótesis nula para todos los casos, asumiendo que las variables explicativas tienen una relación lineal entre ellas.

Así también el valor -p relacionado a las constantes, es cero en todos los modelos desarrollados, lo que indica el rechazo de la hipótesis nula.

6.8 Medidas de Bondad de Ajuste

En esta etapa, los modelos de cada estación fueron sometidos a tres pruebas de bondad de ajuste, a saber, el coeficiente de determinación R^2 , el Error Estándar de Estimación y la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. Los resultados de estas pruebas se presentan a continuación, junto con el modelo propuesto para cada estación.

Tabla N° 21. Modelos propuestos y pruebas de bondad de ajuste.

Estación	Modelo	R ² (%)	EEE (mm/h)	U V _c =1,96	Ajuste
Llancahue	$I = \frac{79,80 * T^{0.1746}}{D^{0.4481}}$	99,58	0,4603	0,0369	Acepta H ₀
Puelo	$I = \frac{41,86 * T^{0.1461}}{D^{0.3361}}$	99,16	0,4270	0,0492	Acepta H ₀
Lago Calafquén	$I = \frac{47,58 * T^{0.1068}}{D^{0.3526}}$	98,54	0,5656	0,0184	Acepta H ₀
Punta Arenas	$I = \frac{100,54 * T^{0.1603}}{D^{0.6504}}$	94,62	0,9073	0,3502	Acepta H ₀

Donde:

I = Intensidad en mm/h.

T = Periodo de retorno en años.

D = Duración en minutos.

R² = Coeficiente de determinación.

U = Prueba U-de Mann-whitney, con un nivel de confianza del 95%.

EEE = Error estándar de estimación.

V_c = Valor crítico.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Selección de la Información Pluviográfica

En la actualidad Chile cuenta con un gran número de estaciones meteorológicas, administradas en estos momentos por la Dirección General de Aguas, las cuales se encuentran distribuidas entre las regiones de los Ríos y Magallanes, regiones que comprenden la zona de estudio. De estas estaciones sólo algunas poseen pluviógrafo, instrumento que mide la precipitación horaria caída para cada una de las tormentas registradas en la zona desde su puesta en marcha en la estación.

Es precisamente el período de funcionamiento de este instrumento, el principal criterio utilizado al momento de la selección de las estaciones más apropiadas para el diseño de las curvas IDF, ya que para obtener un buen diseño es necesario contar con un período de registro mayor o igual a 10 años. Cabe destacar, que las estaciones Lago Calafquén y Puelo presentan dos datos de intensidades máximas por año, por lo cual esta información debe ser considerada cuidadosamente al momento de su utilización en futuros estudios.

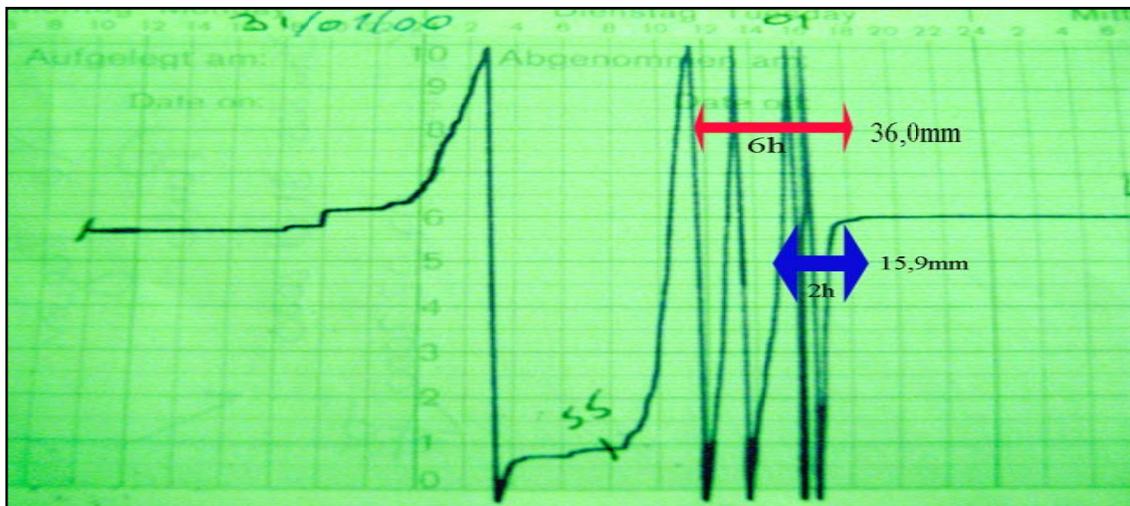
En un principio la información seleccionada de acuerdo a los criterios antes expuesto comprendía un total de cinco estaciones, de las cuales la estación Puerto Puyuhuaqui, presente en la región de Aysén, no pudo ser analizada porque la información correspondiente a esa estación no se encontraba disponible, por lo cual las estaciones seleccionadas para cada región y su período de estudio, se encuentran restringidas a la información expuesta en la Tabla N° 1.

7.2 Captura de la Información

Si bien en general, las curvas finales presentan un muy buen diseño, fue necesario realizar un mínimo de tres muestreos para poder obtener un ajuste adecuado entre la relación intensidad y duración de las precipitaciones, lo cual se debió a algunos errores de lectura de las bandas pluviográficas en las primeras mediciones; por esto fue necesario realizar un exhaustivo análisis en cada una de ellas y así, llegar al diseño final de las curvas IDF para cada estación analizada.

En la figura N° 10 se muestra una banda pluviográfica a modo de ejemplo del trabajo que se realizó para obtener la información necesaria.

Figura 10. Bandas pluviográficas y registro de alturas de precipitación



7.3 Análisis de las Intensidades Máximas.

En la tabla N° 22, se entregan los valores máximos y mínimos de intensidades de precipitación encontrados para una duración de una hora y los años de registro señalados, generando un rango de intensidades máximas de precipitación para cada estación.

Tabla N° 22. Rango de intensidades de precipitación para cada estación.

Estación	Intensidades de precipitaciones en (mm/h) para una duración de 1 hora			
	Valor máximo	Año	Valor mínimo	Año
Llancahue	26,4	1982	9,1	1991
Lago Calafquén	17,8	2003	9,4	1999
Puelo	16,1	2004	6,8	2005
Pta. Arenas	13,0	1993	3,2	1986

Como era de esperarse y según lo planteado por diversos autores, las máximas intensidades para cada estación se encontraron en duraciones de una hora con un valor máximo de 26,4 (mm/h) en la estación Llancahue, y un mínimo de 3,2 (mm/h) en la estación Punta Arenas. En cuanto al valor máximo, éste no superó los 36,5 (mm/h) de la estación Embalse Coihueco en la Octava Región, o los 38,5 (mm/h) encontrados en la estación Melipilla en la Región Metropolitana, que son, hasta ahora los máximos valores registrados para todo el territorio nacional, en estudios anteriores hechos bajo similares características.

En cuanto a la estación Punta Arenas, en la cual se encontró el menor valor de intensidad, es necesario resaltar, como ya se ha mencionado, que ésta presentó graves problemas de congelamiento del instrumental debido a las bajas temperaturas características de la zona, lo cual puede haber provocado algunos errores en los registros de precipitaciones analizados.

A modo de observar el comportamiento que han presentado las precipitaciones en las últimas décadas, se realizó un análisis comparativo entre las estaciones Llancahue y Punta Arenas, en el cual se obtuvo la media para cada duración, la cual se da a conocer en la tabla n°23.

Tabla N° 23. Intensidades máximas promedios para las últimas décadas

Estación Llancahue			Estación Punta Arenas		
Duración (Horas)	Período (1986-1996)	Período (1997-2007)	Duración (Horas)	Período (1986-1996)	Período (1997-2007)
1	13,83	13,58	1	6,58	5,75
2	9,67	9,91	2	5,41	4,69
6	5,77	6,07	6	2,68	2,72
12	3,81	4,37	12	1,73	1,58
24	2,59	2,89	24	1,01	0,90
48	1,51	2,05	48	0,57	0,47

En la estación Llancahue, se observa una leve disminución en la última década de las intensidades en una hora, lo cual no es así para las demás duraciones; sin embargo las diferencias tampoco parecen ser significativas. Por otra parte la estación Punta Arenas, muestra una clara tendencia a la disminución para cada una de las duraciones, aunque las diferencias no son muy altas, no superando el mm de intensidad. Asimismo y para Punta Arenas, si bien esto puede ser una primera aproximación del comportamiento de las intensidades a través del tiempo en esta zona, para obtener un análisis más exhaustivo y claro, se recomienda incorporar un mayor número, tanto de estaciones como de períodos, dadas las falencias que presenta la información de esta zona.

7.4 Ajuste de los Datos a la Función de Gumbel

Los valores de intensidades máximas de precipitación (mm/h), fueron ajustados a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, obteniendo excelentes resultados para los datos extraídos de las estaciones pluviográficas en estudio.

Lo anterior se puede confirmar analizando los resultados obtenidos para cada estación y duración en las medidas de bondad de ajuste como el test de Kolmogorov-

Smirnov, en el cual los valores D calculados eran mucho menores que los D de tabla. El Coeficiente de Determinación, también obtuvo muy buenos resultados para cada estación y duración, presentando un valor promedio de 95,5%, un máximo de 98,8% y un mínimo del 87,2%, con lo cual se corrobora la buena calidad del ajuste.

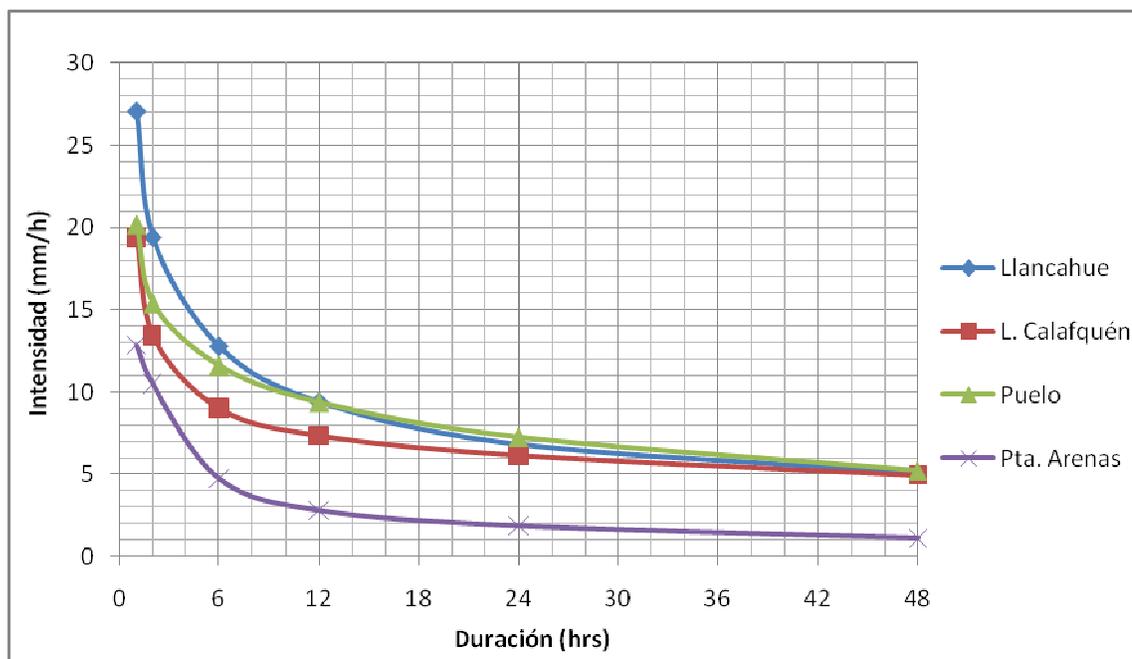
Con lo anterior se verifica lo expuesto por Stol (1971), citado por Dickinson (1977), Témez (1978), Pizarro *et al* (1986), Linsley *et al* (1988), Ponce (1989), Mintegui *et al* (1993), Chow *et al* (1994), Monsalve (1999), Abarza (2001) y Román (2003), quiénes señalan a la función de Gumbel como apropiada para ser utilizada en eventos de valores extremos.

7.5 Diseño Gráfico de las Curvas IDF

Siguiendo la metodología propuesta por Témez (1978), se generó una serie de curvas para el conjunto de estaciones pluviográficas correspondientes a cada región en estudio. Las curvas obtenidas para cada estación en general, se ajustaron a la forma exponencial negativa esperada, ajuste validado a través de los estadísticos Kolmogorov-Smirnov y Coeficiente de Determinación R^2 . Una vez ajustados los valores de intensidades máximas, a la función de distribución de probabilidad de Gumbel para las distintas duraciones, se obtuvieron los gráficos de dichas variables ajustadas a un determinado período de retorno (curvas IDF).

Para poder entregar un análisis completo del comportamiento de las curvas IDF, se compararon los grupos de curvas generadas asociadas todas a un mismo período de retorno de 100 años y cada una de las duraciones definidas, lo cual se observa en la figura n° 11.

Figura N°11. Comparación de las curvas IDF generadas.



En la figura N°11, el diseño de las curvas, deja de manifiesto un comportamiento similar en las primeras tres estaciones, a saber, Llancahue, Lago Calafquén y Puelo. Ello no se repite para la estación Punta Arenas, en la cual se observa un abrupto descenso en las intensidades de precipitación, entre las horas 1 y 6, lo cual tiende a equilibrarse pasadas las 6 horas. Esto puede deberse a que las precipitaciones poseen un componente nival, también puede deberse a la presencia de una tendencia en esta zona a la disminución de agua caída por unidad de tiempo, o más bien, al hecho de que los datos son escasos o simplemente en esa zona las intensidades son menores.

Al analizar los datos tabulados para cada duración y período de retorno, se observa un comportamiento similar en cada una de las estaciones, ya que para los períodos de retorno de 5 y 100 años, las intensidades máximas registradas en una hora, superan ampliamente el promedio horario. Por ejemplo, en la estación Llancahue se obtuvieron valores de 17,39 y 27,05 (mm) para períodos de retorno de 5 y 100 años, superando claramente al valor promedio de 8,26 y 13,41 (mm) respectivamente. Esta tendencia se observa también en la estación Punta Arenas, encontrándose valores de

7,59 y 12,85 para una hora de duración, lo que contrasta con los valores promedios horarios de 3,39 (mm/h) y 5,53 (mm/h), para períodos de retorno de 5 y 100 años respectivamente.

7.6 Modelos de Regresión Lineal Múltiple y Pruebas de Bondad de Ajuste

Como se mencionó anteriormente, si el único objetivo de la regresión es la estimación puntual de los parámetros de la misma, entonces es suficiente con desarrollar el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el cual no hace supuestos sobre la distribución de los residuos. Por ello para validar los modelos de regresión, sólo se utilizaron las medidas de bondad de ajuste mediante la prueba U de Mann-Whitney, el Error Estándar de Estimación y el Coeficiente de Determinación R^2 .

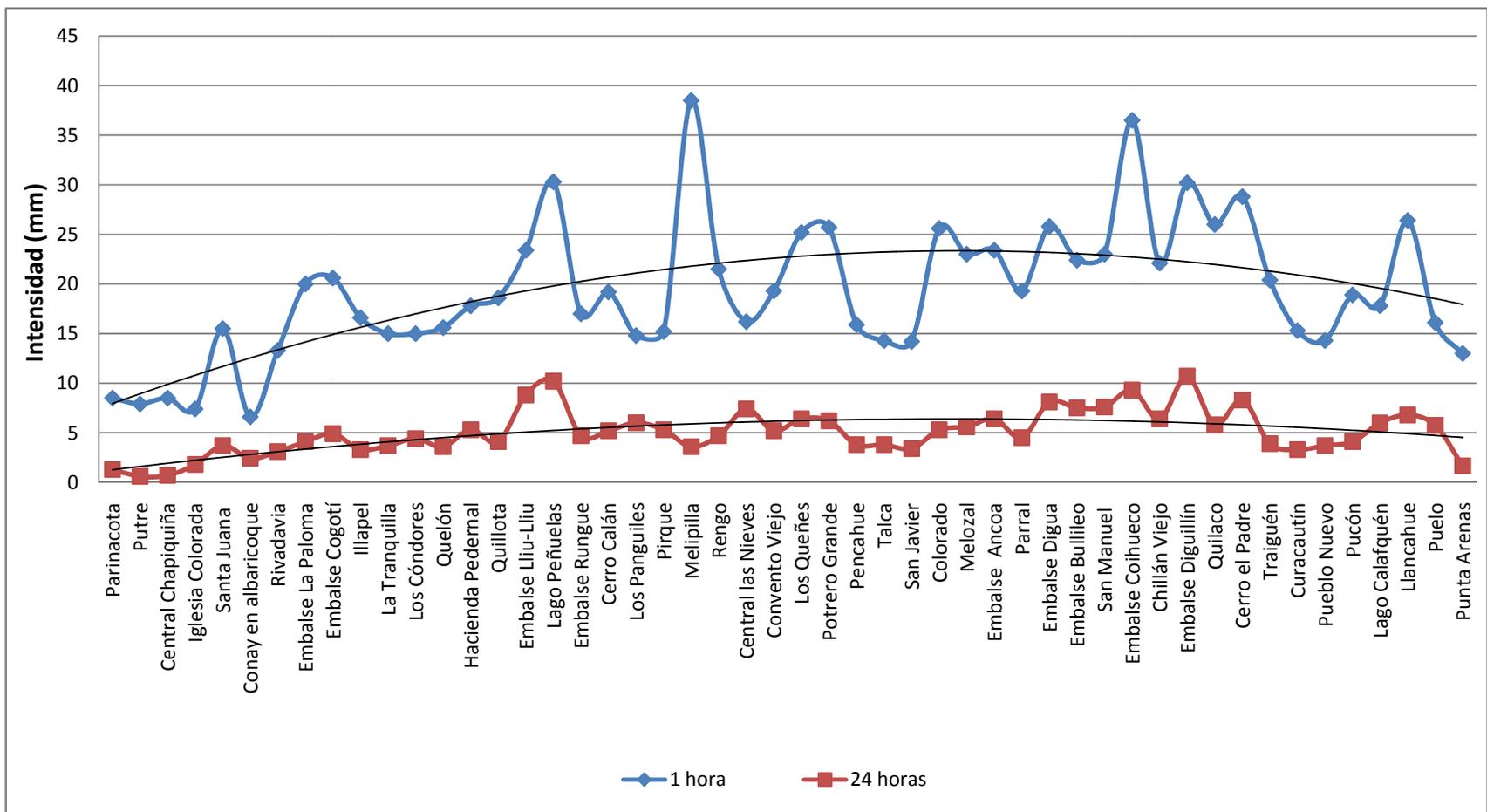
En cuanto a la prueba U de Mann-Whitney, el valor calculado para cada uno de los modelos generados fue superior al valor de tabla, lo cual indica que el valor estimado del modelo ajustado proviene de la misma población que el valor real del modelo adimensional. De igual modo, los valores del Coeficiente de Determinación aprueban cada uno de los modelos propuestos, con valores que fluctúan entre un 99,58% y un 94,62%, lo cual confirma la buena calidad del ajuste. Para el Error Estándar de Estimación, el mayor valor lo presentó la estación Punta Arenas con 0,9073 (mm/h) y el menor la estación Puelo, con 0,4270 (mm/h), valores que ratifican lo dicho anteriormente.

7.7 Comparación de Intensidades Máximas a nivel País

La zona de estudio en la cual se encuentran presentes las estaciones pluviográficas analizadas, se caracteriza por presentar los mayores índices de precipitación anual del país, lo cual puede inducir al pensamiento de que las mayores intensidades horarias debiesen encontrarse también en esta zona, comprendida entre las regiones de los Ríos y Magallanes. Para comprobar esta hipótesis, se realizó un análisis de las intensidades máximas a nivel país, en base a la información obtenida en el

presente estudio, además de un estudio similar realizado en paralelo para la zona altiplánica por Vallejos (2009) y la recabada anteriormente por otros autores como Cornejo (2004), Macaya (2004) y Labra (2005) entre otros.

Gráfico N°6. Latitud v/s Intensidad Máxima de Precipitación para duraciones de 1 y 24 horas.



Como se puede ver en la figura N°12, hay una tendencia al aumento de las intensidades de norte a sur, tendencia que se ve mayormente reflejada para duraciones de una hora; sin embargo, en la zona sur éstas disminuyen, tendencia ratificada por las cuatro estaciones analizadas en este estudio y las presentes en la Región de la Araucanía. Si bien la disminución de las intensidades en la zona sur se ve claramente reflejada en las estaciones presentes en ella, la estación Llancahue se escapa un poco por sobre las demás, por lo cual no necesariamente esta tendencia es la que debe dominar en esta zona, hecho que ratifica aún más la necesidad de que sería conveniente incorporar un mayor número de estaciones una vez que se cuente con la información necesaria.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el estudio para el diseño de las curvas IDF de las cuatro estaciones pertenecientes a la zona sur del país, es posible establecer las siguientes conclusiones.

- La metodología propuesta por Témez (1978), resultó ser adecuada para generar las curvas IDF, lo cual corrobora lo expuesto en otros estudios, donde se generaron las curvas para diversas estaciones de la Zona Centro Sur de Chile.
- El modelo matemático de Bernard y Yarnell, entregó un excelente nivel de ajuste para las cuatro estaciones analizadas, posibilitando así la estimación de intensidades máximas de precipitación para una duración y período de retorno determinados, con un alto grado de precisión.
- Tal y como se pensaba, se demostró mediante la construcción de las curvas IDF, la relación existente entre la intensidad, la duración y la frecuencia o período de retorno, y que a mayor duración, menor es la intensidad de la precipitación.
- Para las intensidades máximas obtenidas en las distintas estaciones, el mayor valor observado lo presentó la estación Llancahue con una intensidad de 27,05 (mm/h) para un período de retorno de 100 años y una hora de duración. Por el contrario, la menor intensidad de los máximos obtenidos en las cuatro estaciones, la alcanzó la estación Punta Arenas con 12,85 (mm/h) para igual duración y período de retorno.
- En cuanto a los valores de la estación Punta Arenas, cabe destacar que las mediciones realizadas se vieron fuertemente influenciadas por las bajas temperaturas características de la zona, provocando en varias ocasiones un

congelamiento del instrumental de medición, debido a cual las mediciones se concentraron entre los meses de Octubre a Marzo de cada año y, por ende, la información generada para esta estación debe ser utilizada con precaución.

- El análisis de intensidades máximas de precipitación, el cual hizo una comparación de las intensidades con la latitud en que éstas se presentan, arrojó y tal como se esperaba, una tendencia al aumento de las intensidades de norte a sur para duraciones tanto de 1 como 24 horas, lo cual se observa sólo hasta la octava Región, ya que desde ahí en adelante, se observa una caída en el valor de las intensidades.

8.2 Recomendaciones

- Se recomienda el uso de los modelos ajustados en esta investigación, para cada una de las estaciones analizadas en este estudio, las cuales pueden ser utilizadas en lugares cercanos a las estaciones de origen. Dichos modelos son los siguientes:

Estación Llancahue

$$I = \frac{79,80 * T^{0,1746}}{D^{0,4481}}$$

Estación Lago Calafquén

$$I = \frac{47,58 * T^{0,1068}}{D^{0,3526}}$$

Estación Puelo

$$I = \frac{41,86 * T^{0,1461}}{D^{0,3361}}$$

Estación Punta Arenas

$$I = \frac{100,54 * T^{0.1603}}{D^{0.6504}}$$

Se recomienda también la utilización de las tablas que contienen los valores del parámetro k, para las distintas duraciones y períodos de retorno. Esto con el fin de estimar precipitaciones máximas en lugares cercanos a las estaciones contenidas en este estudio, y que sólo cuenten con datos pluviométricos (precipitación en 24 horas).

Se recomienda completar este estudio, considerando desarrollar las curvas IDF para algunas estaciones pluviográficas presentes en la región de Aysén, las cuales al momento de realizar este estudio, no contaban con los datos suficientes para generar las curvas. Se recomienda también incluir un mayor número de estaciones para las regiones analizadas en esta investigación, para evaluar de mejor manera la posible existencia de un patrón de distribución de las máximas intensidades de precipitación.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio más acabado acerca de la distribución geográfica y/o espacial de las intensidades, para así obtener un posible patrón de distribución nacional de éstas.

BIBLIOGRAFÍA

Abarza, A. 2001. Análisis comparativo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en seis estaciones pluviográficas distribuidas en la zona cordillerana andina y el valle central de la VII región de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca. Talca. Chile. 105 p.

Aparicio, F. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. Balderas. Limusa. D.F. México. 303 p.

Badient, P.; Huber, W. 1992. Hydrology and foodplain analysis. Editorial Prentice Hall. Tercera edition. U.S.A. 751 p.

Bell, F. 1969. Generalized rainfall – duration – frequency relationships. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95, N° 1, pp. 311-327.

Bernard, M. M. 1932. Formulas for rainfall intensities of long durations. Trans. ASCE, Vol 96, p 592 – 624.

Canavos, G. 1995. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana. México. 651 p.

Cereceda, R. 2008. Propuesta de un método para la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en estaciones pluviométricas de Chile central. Tesis Ing. Forestal. Talca. Universidad de Talca. 99p.

Chen, C. L., 1983. Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. Journal Hydraulic Engineering, ASCE, 109(12), 1603-1621 p.

Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Santa Fé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.

Cornejo, M. 2004. Determinación gráfica y matemática de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en siete estaciones pluviográficas de la Región de Coquimbo. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca. 82 p.

Cuadrat, J.; Pita, M. 2000. Climatología. Segunda edición. Ediciones Cátedra. Madrid. España. 469 p.

De Fraja, E. 1993. Saneamiento de la cuenca hidrológica del río Bío-Bío y del área costera adyacente. Estudio de prefactibilidad. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 600 p.

De Michele, C; Kottegoda, N; Rosso, R. 2002. IDAF (Intensity-Duration area frequency) curves of extreme storm rainfall: a scaling approach. Water science and technology. Vol. 45 N°2. 83 – 90 pp.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Disponible en <http://www.dga.cl>. Consultado el 10 de agosto 2009.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. Climas de Chile. Disponible en <http://www.meteochile.cl/climas.htm>. Consultado el 18 de agosto de 2009.

Espildora, B. 1971. Estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia mediante coeficientes generalizados. Memorias I Coloquio Nacional Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Chile. 274 p.

Gujarati, D. 1992. Econometría. Segunda edición. McGraw – Hill Latinoamericana. D.F. México. 597p.

Gutiérrez-López A, Ramírez A. 2005. Predicción hidrológica mediante el método de la avenida, índice para dos poblaciones. Revista Ingeniería Hidráulica en México, IMTA Vol. XX No.2 .57-65 p.

Kennison, K. 1940. Hydraulics of the New Pressure Aqueduct of the Metropolitan Water District. USA. 193p.

Kothyari, C.; Garde, J. 1992. Rainfall intensity-duration-frequency formula for India. Journal of Hydraulic Engineering. Vol.118, N° 2. USA. 323 – 336 p.

Labra, M. 2005. Construcción Gráfica y Matemática de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (Curva IDF) en Cinco Estaciones Pluviográficas de la Región del Bio Bio y Cuatro Estaciones Pluviográficas de la Región de la Araucanía. Tesis Ing. Forestal. Talca. Universidad de Talca. 104p.

Langousi, A; Veneziano, D. 2006. Intensity-Duration-Frequency curves from scaling representations of rainfall. En línea. Disponible en <http://web.mit.edu/people/andlag/LVIDF2007.pdf>. Consultado el 26 de Diciembre de 2009.

Llamas, J. 1993. Hidrología general. Principios y aplicaciones. Madrid, España. 635p.

López Cadenas, F. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Tragsa, Tragsatec y Ministerio del medio ambiente. Segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. 902 p.

Macaya, K. 2004. Construcción de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para estaciones pluviográficas de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, y análisis comparativo con algunas estaciones de las regiones Metropolitana y del Maule. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca. Talca. Chile. 94 p.

Mendhall, W.; Sincich, T. 1997. Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias. Editorial Prentice-Hall. D. F., México. 1182 p.

Minh Nhat, L; Tachikawa, Y; Takara, K. 2006. Establishment of intensity-duration-frequency curves of precipitation in the monsoon area of Vietnam. En línea. Disponible en <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/dat/nenpo/no49/49b0/a49b0p09.pdf>. Consultado el 23 de Diciembre de 2009.

Mintegui, J; Robredo, J. 1993. Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Madrid, España. 88 p.

Pérez, S. 1999. Modelo Estacionario – Dinámico para el pronóstico de variables meteorológicas escalares. México. Disponible en [www.met.inf.cu/memorias/paginas/articulos/extranjeros\(PDF\)/Salvador_Pérez.pdf](http://www.met.inf.cu/memorias/paginas/articulos/extranjeros(PDF)/Salvador_Pérez.pdf). Consultado el 07 de Septiembre de 2009.

Pizarro, R. 1986. Elementos técnicos de Hidrología. Corporación Nacional Forestal (CONAF). La Serena, Chile. 78 p.

Pizarro, R. Flores, J. Sangüeza, C. Martínez, E. 2002. Estándares de Ingeniería para aguas y suelos. Modulo 2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Disponible en

http://eias.atalca.cl/2publicaciones/3manuales/b_modulo_IDF.pdf. Consultado el 10 de septiembre 2009.

Pizarro, R; Aravena, D; Macaya, K; Abarza, A; Cornejo, M; Labra, M; Pavez, M; Román, L.. 2007. Curvas Intensidad Duración Frecuencia para la zona centro sur de Chile. Unesco. Universidad de Talca. 130p.

Puentes, A. 2000. Caracterización hidrológica de cuencas tropicales. La cuenca del río San Diego en la Provincia de Pinar del Río. (Cuba). Universidad de Córdoba. España.

Sheng, T. 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. Guía de conservación FAO 13/6. Roma, Italia. 185p.

Stappung, G. 1999. Lluvias de diseño de sistemas de aguas lluvias en Chile. XIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Chile.

Silva, G. 2003. Elementos y estructuras de drenaje. Disponible en <http://www.geocities.com/gsilvam/hidrologia.htm>.

Témez, J. 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111 p.

Varas, E.; Bois, P. 1998. Hidrología probabilística. Primera edición. Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile. 156 p.

Varas, E.; Sánchez, S. 1988. Curvas generalizadas de intensidad - duración-frecuencia de lluvias. Hidrología y drenaje vial. Chile. 332 p.

Viesman, W.; Lewis, G. 2002. Introduction to hidrology. Editorial Pearson education, Inc. Quinta edición. U.S.A.

Wenzel, H.G., 1982. Rainfall for urban stormwater design, in Urban Storm Water Hydrology. Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union. Washington, D.C., USA. 786p.

Watkins, D.; Johnson, D. 2005. Mapping regional precipitation intensity duration frequency estimates. U.S.A.

APÉNDICE 1
Análisis de Regresión Estación Llancahue

Total de datos 53.

Tabla N° 1. Análisis de Regresión. Modelo Lineal Múltiple: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1,90203	0,0129002	147,442	0,0000
LOG T	0,174576	0,00540743	32,2845	0,0000
LOG D	-0,448067	0,00371119	-120,734	0,0000

Tabla N° 2. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3,97137	2	1,98568	7809,51	0,0000
Residuo	0,0129675	51	0,000254265		
Total (Corr.)	3,98433	53			

R-cuadrada = 99,6745 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,6618 porciento

Error estándar del est. = 0,0159457

Error absoluto medio = 0,0112488

Estadístico Durbin-Watson = 1,428 (P=0,0100)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,27928

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre LOG I y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{LOG I} = 1,90203 + 0,174576 \cdot \text{LOG T} - 0,448067 \cdot \text{LOG D}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Ajuste del Modelo.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 99,6745% de la variabilidad en LOG I. El estadístico R-Cuadrado ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,6618%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0159457. El error absoluto medio (MAE) de 0,0112488 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

Gráfico Componente+Residuo para LOG I

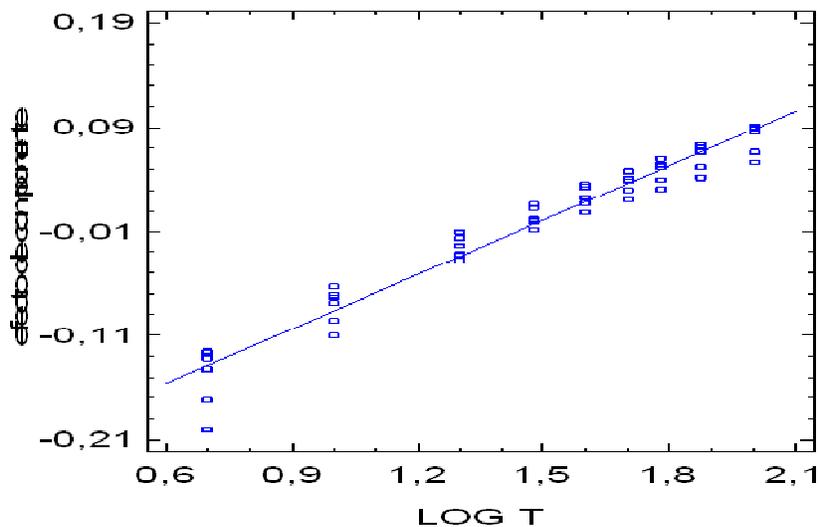


Tabla N° 3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para RESIDUOS

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Normal</i>
DMAS	0,0830806
DMENOS	0,16051
DN	0,16051
Valor-P	0,123788

Esta tabla muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si RESIDUOS puede modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

APÉNDICE 2
Análisis de Regresión Estación Lago Calafquén

Total de datos 53.

Tabla N° 1. Análisis de Regresión. Modelo Lineal Múltiple: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1,67746	0,0167736	100,006	0,0000
LOG T	0,106807	0,00703107	15,1908	0,0000
LOG D	-0,352568	0,00482551	-73,0633	0,0000

Tabla N° 2. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Gl Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2,394	2	1,197	2784,50	0,0000
Residuo	0,0219239	51	0,00042988		
Total (Corr.)	2,41593	53			

R-cuadrada = 99,0925 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,0569 porciento

Error estándar del est. = 0,0207335

Error absoluto medio = 0,0185805

Estadístico Durbin-Watson = 1,555 (P=0,0332)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,196126

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre LOG I y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{LOG I} = 1,67746 + 0,106807 \cdot \text{LOG T} - 0,352568 \cdot \text{LOG D}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Ajuste del Modelo.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 99,0925% de la variabilidad en LOG I. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,0569%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0207335. El error absoluto medio (MAE) de 0,0185805 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

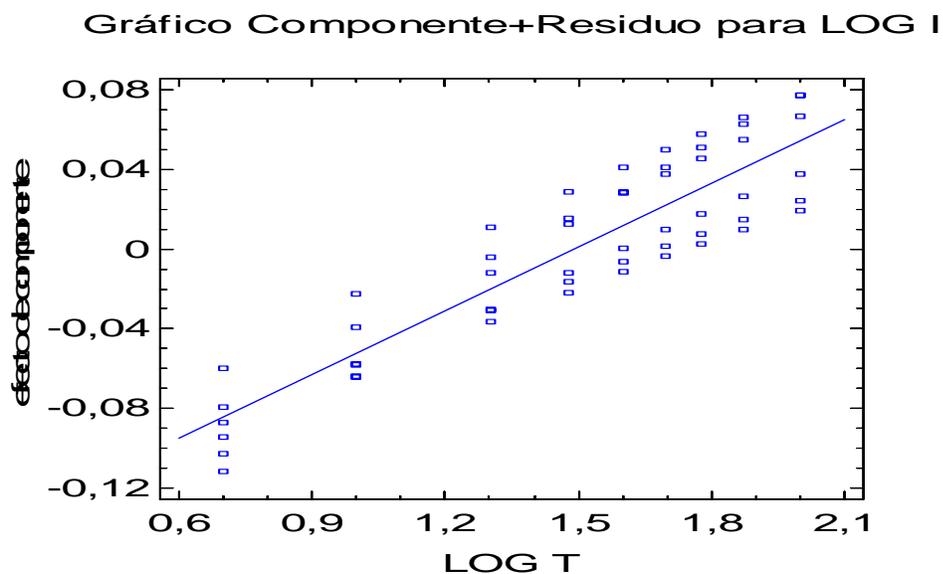


Tabla N° 3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para RESIDUOS

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Normal</i>
DMAS	0,167403
DMENOS	0,159278
DN	0,167403
Valor-P	0,0969703

Esta tabla muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si RESIDUOS puede modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

APÉNDICE 3
Análisis de Regresión Estación Puelo.

Total de datos 53.

Tabla N° 1. Análisis de Regresión. Modelo Lineal Múltiple: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1,62184	0,0178699	90,7586	0,0000
LOG T	0,1461	0,00749059	19,5045	0,0000
LOG D	-0,336097	0,00514089	-65,3773	0,0000

Tabla N° 2. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2,27102	2	1,13551	2327,31	0,0000
Residuo	0,0248832	51	0,000487906		
Total (Corr.)	2,2959	53			

R-cuadrada = 98,9162 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,8737 por ciento

Error estándar del est. = 0,0220886

Error absoluto medio = 0,0190792

Estadístico Durbin-Watson = 1,59754 (P=0,0471)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,168843

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre LOG I y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{LOG I} = 1,62184 + 0,1461 \cdot \text{LOG T} - 0,336097 \cdot \text{LOG D}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Ajuste del Modelo.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98,9162% de la variabilidad en LOG I. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,8737%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0220886. El error absoluto medio (MAE) de 0,0190792 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

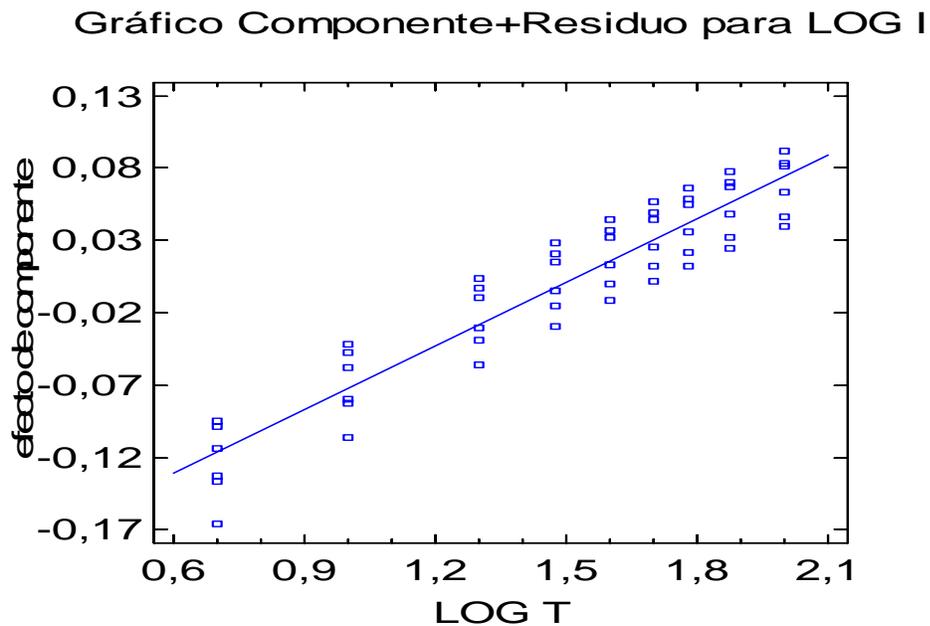


Tabla N° 3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para RESIDUOS

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Normal</i>
DMAS	0,0823913
DMENOS	0,153267
DN	0,153267
Valor-P	0,158247

Esta tabla muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si RESIDUOS puede modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

APENDICE 4

Análisis de Regresión Estación Punta Arenas.

Total de datos 53.

Tabla N° 1. Análisis de Regresión. Modelo Lineal Múltiple: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	2,00233	0,0294397	68,0146	0,0000
LOG T	0,160324	0,0123404	12,9918	0,0000
LOG D	-0,650415	0,00846935	-76,7963	0,0000

Tabla N° 2. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	8,03336	2	4,01668	3033,23	0,0000
Residuo	0,0675354	51	0,00132422		
Total (Corr.)	8,10089	53			

R-cuadrada = 99,1663 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,1336 por ciento

Error estándar del est. = 0,0363899

Error absoluto medio = 0,0296915

Estadístico Durbin-Watson = 1,90856 (P=0,3032)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,00570203

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre LOG I y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{LOG I} = 2,00233 + 0,160324 \cdot \text{LOG T} - 0,650415 \cdot \text{LOG D}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Ajuste del Modelo.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 99,1663% de la variabilidad en LOG I. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,1336%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0363899. El error absoluto medio (MAE) de 0,0296915 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Gráfico Componente+Residuo para LOG I

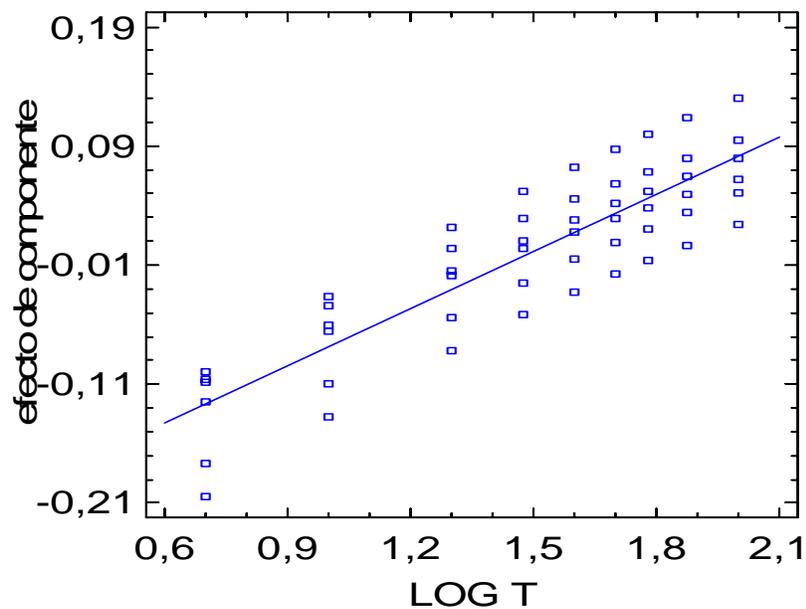


Tabla N° 3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para RESIDUOS

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Normal</i>
DMAS	0,10337
DMENOS	0,087294
DN	0,10337
Valor-P	0,611015

Esta tabla muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si RESIDUOS puede modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

ANEXO 1

PRUEBA U DE MANN – WHITNEY PARA MUESTRAS PEQUEÑAS ($n \leq 20$)

Esta prueba consta de cuatro pasos:

Paso 1: Se combinan las dos muestras n_1 y n_2 para formar un solo conjunto de $(n_1 + n_2)$ datos.

Paso 2: Se ordenan los datos en orden ascendente y se les asigna un rango de 1 hasta $(n_1 + n_2)$.

Paso 3: Se calculan dos estadísticos, U_A y U_B de la siguiente manera:

$$U_A = n_1 n_2 + \frac{n_1 (n_1 + 1)}{2} - T_A \qquad U_B = n_1 n_2 + \frac{n_2 (n_2 + 1)}{2} - T_B$$

Donde:

U_A y U_B = Valores U calculados de la prueba U de Mann – Whitney para las muestras A y B respectivamente.

n_1 y n_2 = Cantidad de datos para las muestras A y B respectivamente.

T_A y T_B = Suma de los rangos para las muestras A y B respectivamente.

Paso 4: Se selecciona el menor valor entre U_A y U_B , el cual es comparado con el valor U obtenido de la tabla de valores críticos de U en la prueba de Mann – Whitney. Si U es menor al valor calculado se acepta la hipótesis nula.

Fuente: Mason *et al* (1992); Mendenhall *et al* (1997).

ANEXO 2

PRUEBA U DE MANN – WHITNEY PARA MUESTRAS GRANDES ($n > 20$)

Paso 1: Se calculan dos estadísticos, U_A y U_B , de la forma explicada en el Anexo anterior de muestras pequeñas. Se selecciona el mayor de ellos.

Paso 2: Se realiza una aproximación a una distribución normal de la siguiente manera:

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

Donde:

$$E(U) = \frac{n_1 * n_2}{2} \quad \text{y} \quad V(U) = \frac{n_1 * n_2 * (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

Paso 3: Se busca el valor correspondiente a la probabilidad (valor P) asociada al Z calculado y de acuerdo al nivel de significancia escogido.

Paso 4: Para $\alpha = 0.05$, los valores críticos son ± 1.96 . Por lo tanto, si el valor P calculado cae dentro de esta región, se acepta la hipótesis nula.

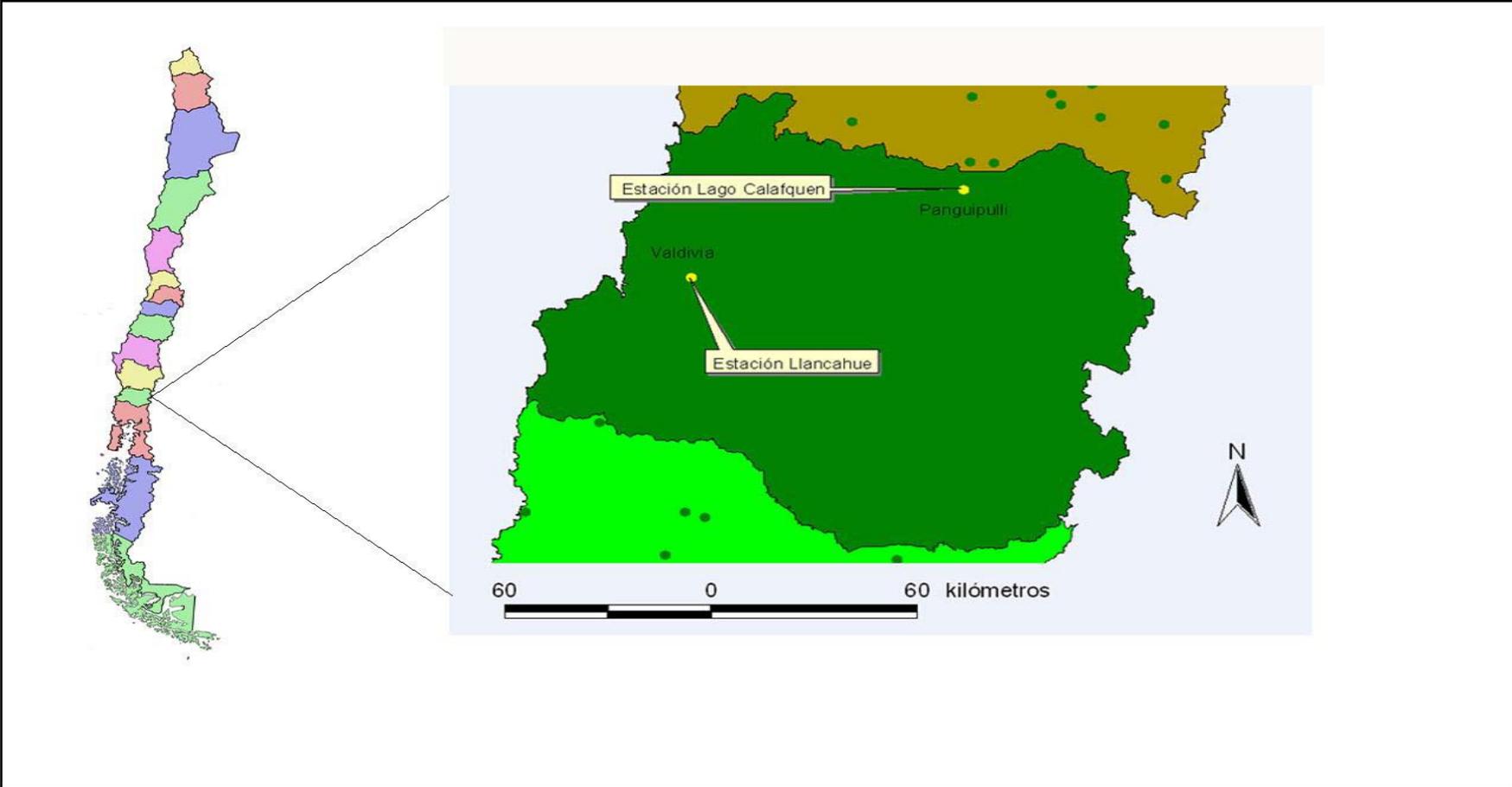
Fuente: Mason *et al* (1992); Jordán (2002).

ANEXO 3
DATOS FALTANTES

Estación	Período	Año
Llancahue	02 junio - 21 octubre	1980
	29 diciembre - 05 enero	1986- 1987
	04 febrero - 26 marzo	1992
	02 mayo - 06 junio	1994
	08 julio - 15 julio	1996
	06 mayo - 03 junio	1996
	08 septiembre - 15 septiembre	1996
	26 noviembre - 03 diciembre	2001
	05 febrero - 05 marzo	2007
	21 mayo -04 junio	2007
	02 julio - 01 octubre	2007
	26 noviembre -31 diciembre	2007
	01 enero - 06 octubre	2008
Puelo	22 marzo - 29 marzo	2004
	13 marzo - 03 abril	2006
	05 junio - 03 julio	2006
	25 junio - 16 julio	2007
	01 diciembre - 31 diciembre	2008
Lago Calafquén	17 noviembre - 03 diciembre	1997
	23 noviembre 02 diciembre	1998
Punta Arenas	01 enero - 03 noviembre	1982
	06 febrero - 13 febrero	1984
	12 marzo - 26 marzo	1984
	24 septiembre - 31 septiembre	1984
	24 diciembre - 31 diciembre	1984
	01 enero - 31 enero	1997
	27 noviembre - 04 diciembre	2000
	24 septiembre - 29 octubre	2007

ANEXO 4
MAPAS DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS

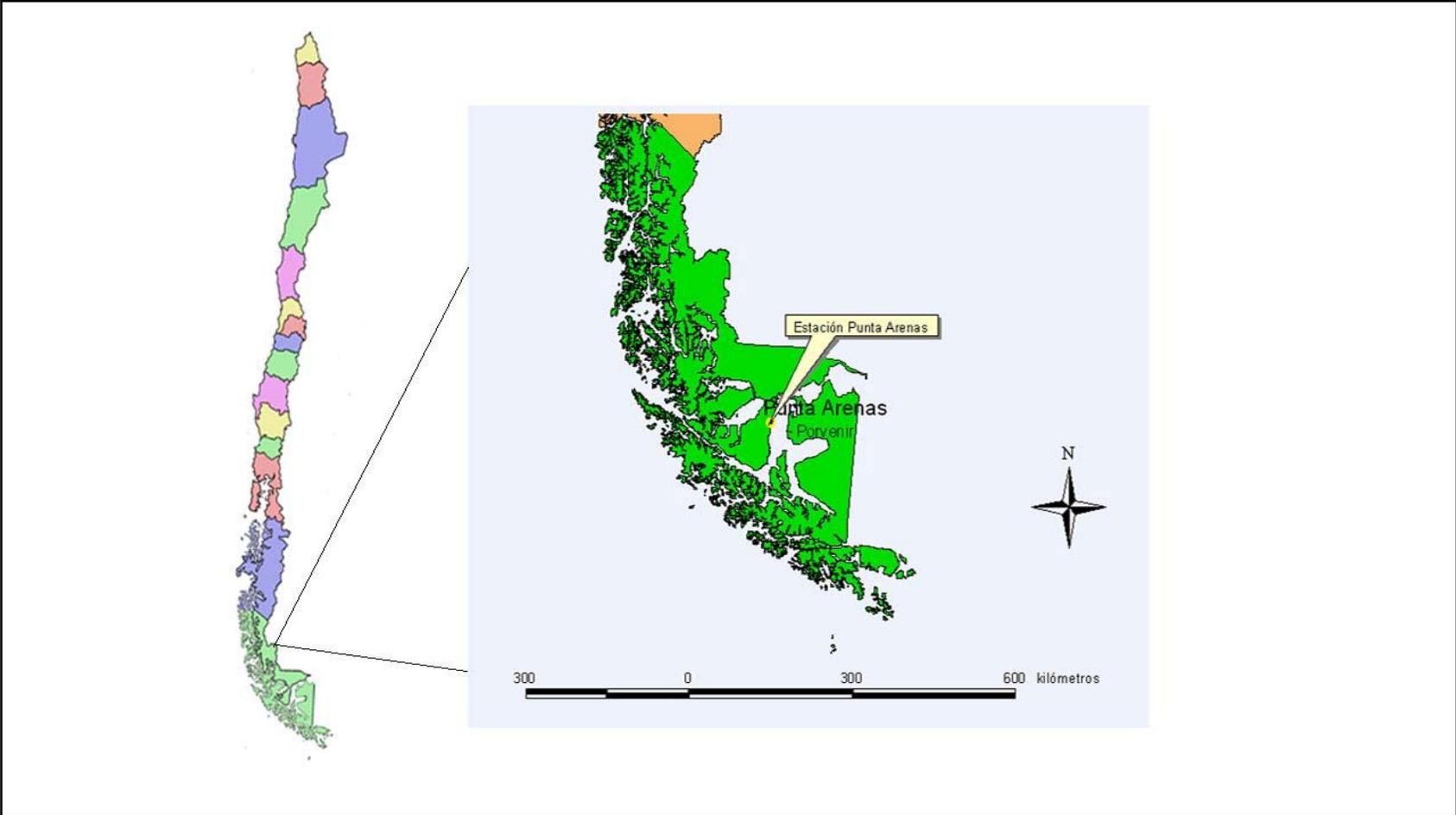
Ubicación de las Estaciones Llancahue y Lago Calafquén. Región de Los Ríos.



Ubicación de la Estación Puelo. Región de Los Lagos.



Ubicación de la Estación Punta Arenas. Región de Magallanes y la Antártica Chilena.



ANEXO 5
UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS ANALIZADAS EN EL
ANÁLISIS A NIVEL PAÍS

Región	Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Serie (años)	Años
Arica	Parinacota	18°12´	69°16´	3	2004 - 2007
	Putre	18°12´	69°34´	4	2004 - 2008
	Central Chapiquiña	18°23´	69°33´	3	2005 - 2008
	Iglesia Colorada	28°10´	69°52´	20	1988 - 2008
	Santa Juana	28°40´	70°39´	17	1988 - 2005
	Conay en albaricoque	28°56´	70°09´	20	1988 - 2008
Coquimbo	Rivadavia	29°58'	70°34'	25	1976 - 2001
	Embalse La Paloma	30°41'	71°02'	40	1962 - 2002
	Embalse Cogotí	31°00'	71°05'	33	1966 - 2002
	Illapel	31°38'	71°11'	27	1976 - 2002
	La Tranquilla	31°54'	70°40'	34	1966 - 2002
	Los Cóndores	32°07'	71°19'	22	1978 - 2002
	Quelón	32°09'	71°10'	27	1973 - 2002
Valparaíso	Hacienda Pedernal	32°05'	70°48'	10	1978 - 2001
	Quillota	32°54'	71°13'	12	1979 - 2002
	Embalse Lliu-Lliu	33°06'	71°13'	14	1979 - 2002
	Lago Peñuelas	33°09'	71°32'	21	1974 - 2001
Metropolitana (RM)	Embalse Rungue	33°02'	70°54'	16	1984 - 2000
	Cerro Calán	33°23'	70°32'	17	1983 - 2000
	Los Panguiles	33°26'	71°00'	15	1985 - 2000
	Pirque	33°40'	70°36'	17	1984 - 2000
	Melipilla	33°42'	71°13'	17	1984 - 2000
Lib. Gral. Bernardo	Rengo	34°24'	70°52'	26	1970 - 2002
O'Higgins	Central las Nieves	34°29'	70°45'	27	1971 - 2002
	Convento Viejo	34°46'	71°06'	21	1972 - 2002
Maule	Los Queñes	34°59'	70°48'	15	1988 - 2002
	Potrero Grande	35°10'	71°05'	15	1988 - 2002
	Pencahue	35°23'	71°48'	17	1982 - 1998
	Talca	35°26'	71°38'	17	1982 - 1998
	San Javier	35° 35'	71° 39'	15	1988 - 2002
	Colorado	35°37'	71°16'	14	1982 - 1998
	Melozal	35°44'	71°48'	17	1982 - 1998
	Embalse Ancoa	35°55'	71°17'	15	1988 - 2002
	Parral	36°11'	71°50'	17	1982 - 1998

	Embalse Digua	36°15'	71°32'	15	1988 - 2002
	Embalse Bullileo	36°17'	71°16'	16	1982 - 1998
	San Manuel	36°21'	71°38'	7	1996 - 2002
Bío-Bío	Embalse Coihueco	36° 39'	71° 49'	20	1984 - 2003
	Chillán Viejo	36° 38'	72° 06'	29	1974 - 2003
	Embalse Diguillín	36° 52'	71° 38'	38	1965 - 2003
	Quilaco	37° 41'	72° 00'	39	1965 - 2003
	Cerro el Padre	37° 47'	72° 52'	28	1976 - 2003
La Araucanía	Traiguén	38° 15'	72° 40'	16	1988 - 2003
	Curacautín	38° 26'	71° 53'	13	1991 - 2003
	Pueblo Nuevo	38° 44'	72° 34'	15	1989 - 2003
	Pucón	39° 16'	71° 58'	20	1984 - 2003
Los Ríos	Lago Calafquén	39° 34'	72° 15'	11	1997 - 2008
	Llancahue	39° 51'	73° 10'	30	1977 - 2007
Los Lagos	Puelo	41° 38'	72° 16'	11	1997 - 2008
Punta Arenas	Punta Arenas	53° 10'	70° 54'	25	1983 - 2008