

Nº 66603

1  
V855e  
2013



Universidad de Valparaíso  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil



**Estimación de perfiles de lluvia y contraste de hietogramas de tormentas de diseño para las regiones XV, I, II y III de Chile.**

por

**Pablo Marcelo Vivanco Barahona**

Trabajo de Título para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Yerel Morales

Profesor Correferente: Gustavo Calle Vásquez

Mayo, 2013

- Tormentas  
- Hidrología  
- ISOYETAS

R. 16056

*...Ante el desaliento, la desesperanza y la desmotivación,  
solo piensa en que  
esto ya pasará y verás cómo reirás...*

*...Llegó mi momento de reír.*

## Dedicatoria

*Quisiera dedicar este trabajo de título a quienes hicieron que fuese posible llegar hasta la última etapa de este proceso, principalmente a mis padres; Raúl Vivanco M. y Marcela Barahona B. quienes han sido, son y serán pilares fundamentales en mi vida, mis hermanos Rodrigo, Raúl y Marcela quienes brindan la alegría diaria en mí.*

*A la familia Barahona-Gutiérrez quienes han estado en todos los momentos de altos y bajos que he tenido, brindándome su apoyo en todos los procesos que he pasado.*

*A Leslie, por todo su apoyo incondicional, sus consejos acertados y su cariño en la última etapa de este proceso.*

*A mis compañeras y amigas, Paulina, Valeria y María Jesús, quienes nos hemos apoyado en los buenos y malos momentos saliendo airosos de este último, gracias a la fiel amistad que hemos forjado.*

*Por último quiero dedicarles este trabajo a todos quienes han sido parte de este importante proceso y que de alguna manera han estado en algún minuto de este periodo apoyándome y alentándome a seguir hasta el final.*

### *Agradecimientos*

*En este trabajo de título quiero agradecer principalmente a quien fue el gestor de la idea de esta memoria, Don Gustavo Calle V., gracias por todos sus consejos, tiempo y ayuda para haber tenido como resultado esta memoria.*

*A mi profesora guía, Yerel Morales, por su disposición y su pronta disponibilidad para que llegara a buen puerto este trabajo.*

*Finalmente quiero agradecer a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad de Valparaíso, quienes de alguna u otra manera aportaron con su sabiduría y experiencia, para que fuese mejor persona como también un buen profesional.*

## ÍNDICE.

Glosario.....	6
Lista de abreviatura o siglas.....	7
Lista de símbolos.....	8
Lista de Figuras.....	9
Resumen del trabajo de título.....	16
1. Introducción.....	17
2. Planteamiento del problema.....	18
3. Objetivos.....	19
3.1 General.....	19
3.2 Específicos.....	19
4. Alcances de la Investigación.....	20
5. Marco Teórico.....	21
5.1 Ciclo hidrológico.....	21
5.2 Precipitación.....	23
5.3 Finalidad del análisis de datos pluviográficos.....	26
5.4 Tormentas de diseño.....	27
5.5 Clima.....	28
6. Metodología.....	32
6.1 Datos de Precipitaciones.....	32
6.2 Tormentas.....	33
6.3 Agrupación de Tormentas.....	34
6.4 Análisis de los parámetros de la tormenta.....	34
6.5 Distribución temporal de lluvia.....	37
6.5.1 Agrupamiento de las tormentas.....	37
6.5.2 Estandarización del porcentaje de tiempo.....	38
6.6 Curvas de probabilidades de tormentas.....	39
6.7 Evaluación por dependencia de duración.....	42
6.8 Evaluación por dependencia geográfica.....	43
6.9 Evaluación de la duración de las tormentas.....	43
6.10 Contraste de hietograma.....	44
7. Estaciones y datos meteorológicos.....	45
7.1 XV Región de Arica y Parinacota.....	46

7.1.1	Estación Caquena.....	46
7.1.2	Estación Parinacota.....	47
7.1.3	Estación Putre.....	48
7.1.4	Estación Central Chapiquiña.....	49
7.2	II Región de Antofagasta.....	50
7.2.1	Estación Linzor.....	50
7.2.2	Estación Salado Embalse.....	51
7.2.3	Estación El Tatio.....	52
7.2.4	Estación Toconce.....	53
7.2.5	Estación Lequena.....	54
7.3	III Región de Atacama.....	55
7.3.1	Estación Iglesia Colorada.....	55
7.3.2	Estación Conay.....	56
7.3.3	Estación Santa Juana.....	57
8.	Análisis y desarrollo.....	58
8.1	Datos totales.....	58
8.2	Datos por grupo y regionalizados.....	61
8.2.1	Grupo 1.....	61
8.2.2	Grupo 2.....	74
8.2.3	Grupo 3.....	87
8.2.4	Grupo 4.....	100
9.	Procedimiento para el uso de los perfiles de lluvias.....	113
10.	Probabilidades de ocurrencia de las duraciones de tormentas.....	117
10.1	XV Región de Arica y Parinacota.....	117
10.2	II Región de Antofagasta.....	125
10.3	III Región de Atacama.....	134
11.	Contraste de Hietogramas de Tormentas de Diseño.....	141
12.	Conclusiones.....	152
13.	Referencias bibliográficas.....	154

## Glosario.

Cuartil	=	Distribución de datos en cuatro subdivisiones.
Hidrología	=	Área que estudia la distribución espacial y temporal del agua.
Hietograma	=	Gráfico que muestra la distribución temporal de la precipitación.
Precipitación	=	Caída de agua de la atmósfera en estado líquido.
Tormenta	=	Fenómeno que reúne las características necesarias para que llueva.
Isoyetas	=	Línea que une puntos de un mapa que presentan el mismo índice de pluviosidad durante un periodo determinado.
Pluviógrafo	=	Instrumento meteorológico que además de registrar la cantidad de agua precipitada, registra la hora de inicio y fin de este evento.
Probabilidad de excedencia	=	Probabilidad de que una magnitud dada de un evento sea igualada o excedida.
Profundidad de lluvia	=	Cantidad de agua precipitada en un evento de lluvia, medida por pluviómetros.

### Lista de abreviatura o siglas.

BNA	=	Banco Nacional de Aguas.
$CD_t$	=	Coefficiente de duración de tiempo t (en horas).
D.G.A	=	Dirección General de Aguas.
Hrs.	=	Horas.
i	=	Intensidad de lluvia.
MINVU	=	Ministerio de vivienda y urbanismo.
mm	=	Milímetros.
Mm/hrs.	=	Milímetros por hora.
n	=	Número total de datos.
N	=	Número de datos favorables para el caso a analizar.
$P_{24}^{10}$	=	Precipitación máxima en 24 horas con un período de retorno de 10 años.
P.E	=	Probabilidad de excedencia.
Pi	=	Precipitación incremental.
P.O	=	Probabilidad de ocurrencia.
Pt	=	Precipitación total.
$P_t$	=	Precipitación en el tiempo t.
t	=	Tiempo en horas.
Tt	=	Tiempo total.
z	=	Total tormentas registradas.

## Lista de símbolos.

	=	Ubicación de la estación meteorológica Caquena.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Parinacota.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Putre.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Central Chapiquiña.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Linzor.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Salado Embalse.
	=	Ubicación de la estación meteorológica El Tatío.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Toconce.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Lequena.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Iglesia Colorada.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Conay.
	=	Ubicación de la estación meteorológica Santa Juana.
$i$	=	Número de orden de la tormenta.
$\Delta$	=	Diferencia entre valores.
%	=	Porcentaje.

## Lista de Figuras.

Figura 5.1- Ciclo Hidrológico [16].	22
Figura 5.2- Precipitación orográfica [17].	24
Figura 5.3- Hietograma de precipitación.	25
Figura 5.4- Tormentas de diseño de Floyd Huff [5].	27
Figura 5.5- Zonas Climáticas de Chile [14].	28
Figura 5.6- Variación de precipitación media anual con altitud en las regiones XV y I [15].	30
Figura 5.7- Variación de precipitación media anual con altitud en la II Región [15].	30
Figura 5.8- Variación de precipitación media anual con altitud en la III Región [15].	31
Figura 6.1- Grupos de tormentas según su mayor porcentaje de lluvia en cuartos de tiempo.	37
Figura 7.1- Mapa de ubicación de la Estación Caquena.	46
Figura 7.2- Mapa de ubicación de la Estación Parinacota.	47
Figura 7.3- Mapa de ubicación de la Estación Putre.	48
Figura 7.4- Mapa de ubicación de la Estación Central Chapiquiña.	49
Figura 7.5- Mapa de ubicación de la Estación Linzor.	50
Figura 7.6- Mapa de ubicación de la Estación Salado Embalse.	51
Figura 7.7- Mapa de ubicación de la Estación El Tatío.	52
Figura 7.8- Mapa de ubicación de la Estación Toconce.	53
Figura 7.9- Mapa de ubicación de la Estación Lequena.	54
Figura 7.10- Mapa de ubicación de la Estación Iglesia Colorada.	55
Figura 7.11- Mapa de ubicación de la Estación Conay.	56
Figura 7.12- Mapa de ubicación de la Estación Santa Juana.	57
Figura 8.1- Gráfico de las Curvas de Precipitaciones.	59
Figura 8.2- Representación de las características del "Grupo 1".	61
Figura 8.3- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Arica y Parinacota.	63
Figura 8.4- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Antofagasta.	63
Figura 8.5- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Atacama.	64
Figura 8.6- Cuartiles de duración del "Grupo 1".	65
Figura 8.7- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.	66
Figura 8.8- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.	66

Figura 8.9- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	67
Figura 8.10- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	67
Figura 8.11- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	68
Figura 8.12- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	68
Figura 8.13- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, .....	69
Figura 8.14- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 1".	70
Figura 8.15- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama. "Grupo 1".....	70
Figura 8.16- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	71
Figura 8.17- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	72
Figura 8.18- Curvas de probabilidades de excedencia para el "Grupo 1". ....	73
Figura 8.19- Representación de las características del "Grupo 2". ....	74
Figura 8.20- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Arica y Parinacota. ....	76
Figura 8.21- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Antofagasta.....	76
Figura 8.22- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Atacama. ....	77
Figura 8.23- Cuartiles de duración del "Grupo 2".....	78
Figura 8.24- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota. ....	79
Figura 8.25- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota. ....	79
Figura 8.26- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	80
Figura 8.27- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	80
Figura 8.28- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	81
Figura 8.29- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	81
Figura 8.30- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, .....	82
Figura 8.31- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 2".	83
Figura 8.32- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama, "Grupo 2".....	83
Figura 8.33- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	84
Figura 8.34- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	85

Figura 8.35- Curvas de distribución para el "Grupo 2".....	86
Figura 8.36- Representación de las características del "Grupo 3".....	87
Figura 8.37- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Arica y Parinacota.....	89
Figura 8.38- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Antofagasta.....	89
Figura 8.39- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Atacama. ....	90
Figura 8.40- Cuartiles de duración del "Grupo 3".....	91
Figura 8.41- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.....	92
Figura 8.42- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.....	92
Figura 8.43- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	93
Figura 8.44- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	93
Figura 8.45- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	94
Figura 8.46- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	94
Figura 8.47- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, .....	95
Figura 8.48- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 3".	96
Figura 8.49- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama, "Grupo 3".....	96
Figura 8.50- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	97
Figura 8.51- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	98
Figura 8.52- Curvas de distribución para el "Grupo 3".....	99
Figura 8.53- Representación de las características del "Grupo 4".....	100
Figura 8.54- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Arica y Parinacota.....	102
Figura 8.55- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Antofagasta.....	102
Figura 8.56- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Atacama. ....	103
Figura 8.57- Cuartiles de duración del "Grupo 4".....	104
Figura 8.58- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.....	105
Figura 8.59- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.....	105
Figura 8.60- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	106

Figura 8.61- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.....	106
Figura 8.62- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	107
Figura 8.63- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.....	107
Figura 8.64- Gráfico de datos del “Grupo 4” para la Región de Arica y Parinacota.....	108
Figura 8.65- Gráfico de datos del “Grupo 4” para la Región de Antofagasta.....	109
Figura 8.66- Gráfico de datos del “Grupo 4” para la Región de Atacama. ....	109
Figura 8.67- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	110
Figura 8.68- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones. ....	111
Figura 8.69- Curvas de distribución para el “Grupo 4”.....	112
Figura 10.1- Mapa de la XV Región de Arica y Parinacota.....	117
Figura 10.2- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Caquena.....	118
Figura 10.3- Cuartiles de las duraciones en Estación Caquena. ....	118
Figura 10.4- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Parinacota. ....	119
Figura 10.5- Cuartiles de las duraciones en Estación Parinacota.....	119
Figura 10.6- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Putre.....	120
Figura 10.7- Cuartiles de las duraciones de Estación Putre.....	120
Figura 10.8- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Central Chapiquiña. ....	121
Figura 10.9- Cuartiles de las duraciones de Estación Central Chapiquiña.....	121
Figura 10.10- Probabilidades de ocurrencia Región de Arica y Parinacota. ....	123
Figura 10.11- Cuartiles de duraciones de la XV Región de Arica y Parinacota.....	124
Figura 10.12- Mapa de la II Región de Antofagasta.....	125
Figura 10.13- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Linzor.....	126
Figura 10.14- Cuartiles de las duraciones de Estación Linzor.....	126
Figura 10.15- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Salado Embalse. ....	127
Figura 10.16- Cuartiles de las duraciones de Estación Salado Embalse. ....	127
Figura 10.17- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación El Tatio. ....	128
Figura 10.18- Cuartiles de las duraciones de Estación El Tatio.....	128
Figura 10.19- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Toconce.....	129
Figura 10.20- Cuartiles de las duraciones de Estación Toconce.....	129
Figura 10.21- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Lequena. ....	130

Figura 10.22- Cuartiles de las duraciones de Estación Lequena. ....	130
Figura 10.23- Probabilidades de ocurrencia Región de Antofagasta. ....	132
Figura 10.24- Cuartiles de duraciones de la II Región de Antofagasta. ....	132
Figura 10.25- Mapa de la III Región de Atacama. ....	134
Figura 10.26- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Iglesia Colorada. ....	135
Figura 10.27- Cuartiles de las duraciones de Estación Iglesia Colorada. ....	135
Figura 10.28- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Conay. ....	136
Figura 10.29- Cuartiles de las duraciones de Estación Conay. ....	136
Figura 10.30- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Santa Juana. ....	137
Figura 10.31- Cuartiles de las duraciones de Estación Santa Juana. ....	137
Figura 10.32- Probabilidades de ocurrencia Región de Atacama. ....	139
Figura 10.33- Cuartiles de duraciones de la III Región de Atacama. ....	139
Figura 11.1. Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 6 horas. ....	146
Figura 11.2- Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 12 horas. ....	148
Figura 11.3- Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 24 horas. ....	151

## Lista de Tablas.

Tabla 5.1- Tabla de datos de precipitaciones. ....	25
Tabla 6.1 Estaciones meteorológicas a usar en el estudio. ....	32
Tabla 6.2- Tabla de ordenamiento de tormentas según su duración. ....	34
Tabla 6.3- Tabla de obtención de porcentajes de tiempo y precipitación caída. ....	35
Tabla 6.4- Obtención de porcentajes acumulados de tiempo y precipitación. ....	36
Tabla 6.5- Tabla de porcentajes de precipitaciones por porcentaje de tiempo transcurrido. ....	39
Tabla 6.6- Datos de porcentajes de tiempo a utilizar para el ordenamiento de las precipitaciones. ....	40
Tabla 6.7- Ordenamiento creciente de datos de porcentaje de precipitaciones, usando como ejemplo el tiempo 10%. ....	41
Tabla 7.1- Contabilización de Registros. ....	45
Tabla 7.2- Características de la Estación Caquena. ....	46
Tabla 7.3- Registro de tormentas en la Estación Caquena. ....	46
Tabla 7.4- Características de la Estación Parinacota. ....	47
Tabla 7.5- Registro de tormentas en la Estación Parinacota. ....	47
Tabla 7.6- Características de la Estación Putre. ....	48
Tabla 7.7- Registro de tormentas en la Estación Putre. ....	48
Tabla 7.8- Características de la Estación Central Chapiquiña. ....	49
Tabla 7.9- Registro de tormentas en la estación Central Chapiquiña. ....	49
Tabla 7.10- Características de la Estación Linzor. ....	50
Tabla 7.11- Registro de tormentas en la Estación Linzor. ....	50
Tabla 7.12- Características de la Estación Salado Embalse. ....	51
Tabla 7.13- Registro de tormentas en la Estación Salado Embalse. ....	51
Tabla 7.14- Características generales de la Estación El Tatio. ....	52
Tabla 7.15- Registro de tormentas en la Estación El Tatio. ....	52
Tabla 7.16- Características generales de la Estación Toconce. ....	53
Tabla 7.17- Registro de tormentas en la estación Toconce. ....	53
Tabla 7.18- Características generales de la Estación Lequena. ....	54
Tabla 7.19- Registro de tormentas en la Estación Lequena. ....	54
Tabla 7.20- Características generales de la Estación Iglesia Colorada. ....	55
Tabla 7.21- Registro de tormentas en la Estación Iglesia Colorada. ....	55
Tabla 7.22- Características generales de la Estación Conay. ....	56
Tabla 7.23- Registro de tormentas en la Estación Conay. ....	56

Tabla 7.24- Características generales de la Estación Santa Juana.....	57
Tabla 7.25- Registro de tormentas en la Estación Santa Juana.....	57
Tabla 8.1- Total de tormentas según su tiempo de duración.....	58
Tabla 8.2- Probabilidad de ocurrencia de las tormentas analizadas.....	60
Tabla 8.3- Datos del "Grupo 1" por región y horas de duración.....	62
Tabla 8.4- Porcentajes de curvas de las probabilidades de excedencia para el "Grupo 1".....	73
Tabla 8.5- Datos de "Grupo 2" por región y horas de duración.....	75
Tabla 8.6- Porcentajes de precipitación de curvas de distribución para el "Grupo 2".....	86
Tabla 8.7- Datos de "Grupo 3" por región y horas de duración.....	88
Tabla 8.8- Porcentajes de precipitación de curvas de distribución para el "Grupo 3".....	99
Tabla 8.9- Datos del "Grupo 4" por región y horas de duración.....	101
Tabla 8.10- Porcentajes de precipitación de curvas de distribución para el "Grupo 4".....	112
Tabla 9.1- Distribución de la precipitación total acumulada a través del tiempo.....	114
Tabla 9.2- Distribución de la precipitación a través del tiempo.....	115
Tabla 9.3- Distribución del tiempo acumulado.....	116
Tabla 9.4- Hietograma de tormenta de diseño.....	116
Tabla 10.1- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Arica y Parinacota.....	122
Tabla 10.2- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Antofagasta.....	131
Tabla 10.3- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Atacama.....	138
Tabla 11.1- Coeficiente de duración por Grunsky, para una tormenta de 6 horas.....	142
Tabla 11.2- Precipitaciones acumuladas para una tormenta de 6 horas.....	142
Tabla 11.3- Precipitación incremental de la tormenta de 6 horas de duración en Putre.....	143
Tabla 11.4- Distribución temporal de la lluvia para una tormenta de 6 horas en Putre.....	143
Tabla 11.5- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 6 horas en Putre.....	144
Tabla 11.6- Distribución temporal de lluvia acumulada del "Grupo 2" con 10% de probabilidad de excedencia.....	144
Tabla 11.7- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 6 horas de duración.....	145
Tabla 11.8- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 12 horas en Putre.....	147
Tabla 11.9- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 12 horas de duración.....	147
Tabla 11.10- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 24 horas en Putre.....	149
Tabla 11.11- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 24 horas de duración en Putre.....	150

## Resumen del trabajo de título.

La distribución temporal a nivel horario de la lluvia es un dato primordial al momento de diseñar elementos que ayuden a encauzar los caudales producidos por las precipitaciones en algún lugar del planeta.

Los distintos manuales y libros indican que la distribución temporal de la precipitación es fundamental como información primaria para el diseño, pero no existen investigaciones que apliquen para la zona norte de Chile. A partir de esto, este trabajo de título estudiara algunas características de la precipitación para formar así un perfil de lluvia de la zona analizada.

Para este trabajo de título se analizaron como primera parte 1.301 tormentas distribuidas de la siguiente manera, 747 tormentas fueron registradas en la XV región de Arica y Parinacota, 481 tormentas registradas en la II región de Antofagasta y 73 tormentas registradas en la III Región de Atacama.

Como primer intento para observar algún patrón de lluvia se graficó la totalidad de las tormentas, observando que no se registra algún tipo de distribución que represente a todas las tormentas analizadas. A partir de esto se crean 4 grupos, donde estos representan a cada cuarto del tiempo de duración de cada tormenta, dónde se evaluó a cada evento y en qué cuarto de tiempo se encontraba la máxima profundidad de lluvia y así ubicándola en su respectivo grupo.

Con este análisis se determinó que la característica principal de la lluvia en la zona norte de nuestro país es que tienden a concentrar una mayor precipitación en el segundo cuarto del tiempo de la lluvia, esto debido a que al agrupar las tormentas este cuarto de tiempo tiene una mayor probabilidad de ocurrencia que el resto. Al contrario de lo expuesto, es posible indicar que el cuarto de tiempo con menor probabilidad de ocurrencia es el último cuarto de tiempo, infiriendo así que las tormentas en esta zona de Chile tienden a concentrar una mayor precipitación al inicio de la tormenta que al término de ésta.

En cada grupo analizado se diseñó curvas de distribución que permiten visualizar los porcentajes de lluvia que pueden caer en alguna tormenta, asignándoles a cada una de estas curvas una probabilidad de excedencia.

Teniendo analizado el perfil típico que existe en la zona estudiada se contrastó la distribución del grupo con mayor probabilidad de ocurrencia y menor probabilidad de excedencia con la distribución obtenida con el método de "Bloques alternantes" expuesto por Ven Te Chow [3], dándonos como resultado que el método simplificado expuesto no coincide con la distribución registrada de ningún grupo y dónde la distribución obtenida obedece a lo que sucede en las tormentas registradas en este estudio. Este perfil no requiere de alguna fórmula empírica para obtener tal distribución, si no que se entregan porcentajes que representan la profundidad de lluvia que existe en cada intervalo de tiempo.

## 1. Introducción.

En todos los diseños de ingeniería es necesario modelar las características de la naturaleza de la manera más cercanamente posible en base a lo que realmente sucede, para obtener como resultado un diseño óptimo en su uso.

Para diseñar tales obras, en el ámbito de la hidráulica, es necesario tener como dato fundamental los caudales que se producen como consecuencia de la precipitación. Este dato es posible conocerlo a partir de un modelo de lluvia-escorrentía, donde el dato base para este modelo es la profundidad de la lluvia y la distribución que ésta tenga a través del tiempo.

La distribución temporal de la lluvia es considerada como dato fundamental para el conocimiento del caudal que se pueda producir a consecuencia de la precipitación. Para determinar dicha distribución, se han creado métodos simplificados que tratan de simular la distribución temporal.

Además, a lo largo del tiempo se han realizado estudios que representan los perfiles de lluvia de algunas ciudades, tales como: Illinois y Texas, para el caso de EE.UU. [5], y para la zona centro sur en el caso de Chile [10]. Ahora, si bien se han podido establecer ciertos perfiles de lluvia, en base a las investigaciones hechas, estos sólo representan a las ciudades en las que se realizó la investigación; lo que impide que sean aplicables a la zona norte de nuestro país.

A partir de lo anteriormente expuesto, surge la necesidad de estudiar la distribución temporal de la precipitación para así crear un perfil típico de lluvia para las regiones XV, I, II y III de Chile, la que permita acercarse a la distribución real de esta al momento de diseñar obras hidráulicas, aspecto que se desarrollará en el presente trabajo de título.

## 2. Planteamiento del problema.

En toda obra de ingeniería de gran magnitud, un adecuado manejo y drenaje de aguas lluvias permite mitigar el riesgo de problemas como inundaciones, aluviones y hasta el colapso de la obra causadas por las precipitaciones. Estos problemas pueden traer como consecuencia graves pérdidas humanas para el caso de aluviones e inundaciones, y pérdidas económicas para el caso en zonas industriales

Es por ello que el proyectista debe preocuparse de que las estructuras que componen las obras, técnica, económica y ambientales, cumplan con sus fines de uso. Estos fines contemplan la restitución del caudal al cauce natural, sin causar daños e impidiendo la inutilización de las obras cercanas a las proyectadas [1].

Para que todo lo anterior se cumpla a cabalidad, es necesario anticipar los sucesos que puedan ocurrir en la zona donde se encuentran ubicadas las obras. Para el conjunto del manejo de caudales producidos por la lluvia, es necesario predecir la cantidad de agua que puede caer en la zona de proyección y observar la distribución que ésta tiene a través del tiempo, para así poder diseñar la red de aguas lluvias, sin que ésta sea subdimensionada (lo que puede generar inundaciones, aluviones y colapso de las redes de aguas lluvias), o sobredimensionada (lo que puede determinar que un proyecto no sea viable desde el punto de vista económico).

Para poder anticipar los sucesos de lluvias, existen técnicas de diseño hidrológico que permiten tener parámetros de la cantidad de agua que puede caer en el tiempo en alguna zona en estudio. Entre dichas técnicas se encuentra un registro denominado hietograma, que corresponde a un gráfico que muestra la precipitación caída en un intervalo de tiempo. A partir de este gráfico es posible saber cuál es la distribución que tiene la lluvia, y así conocer además el caudal que puede formarse a través del tiempo, lo que da origen a un gráfico llamado hidrograma.

La manera en que hoy en día se realiza la distribución temporal de la lluvia, es llevada a cabo mediante técnicas simplificadas, las cuales pueden arrojar resultados que no correspondan a la distribución real de la lluvia, aumentando las probabilidades de error al momento de diseñar un proyecto.

De lo expuesto, surge la necesidad de analizar las distribuciones temporales de lluvias caídas a través del tiempo, con la finalidad de realizar un perfil típico de lluvia para las distintas probabilidades de ocurrencia en las zonas en estudio.

### **3. Objetivos.**

#### **3.1 General**

- Obtener la distribución temporal de las tormentas que caracteriza a la zona del Norte Grande de Chile, para contrastarla con el método de bloques alternantes en el uso como tormenta de diseño.

#### **3.2 Específicos**

- Analizar la distribución temporal a nivel horario de las tormentas registradas en las regiones en estudio.
- Definir los patrones de variación temporal de las tormentas con sus respectivas probabilidades de ocurrencia y excedencia.
- Estudiar las probabilidades de ocurrencia de las duraciones de las tormentas.
- Contrastar los hietogramas obtenidos a partir de las curvas diseñadas en el estudio, con algún método simplificado para realizar el hietograma.

#### **4. Alcances de la Investigación.**

El presente trabajo de título se focaliza en el análisis y obtención de perfiles de lluvias de la Zona Norte de Chile, específicamente comprenderá las siguientes regiones:

- XV Región de Arica y Parinacota.
- I Región de Tarapacá.
- II Región de Antofagasta.
- III Región de Atacama.

Además se expondrá un método para la aplicación de las distribuciones obtenidas, donde tal variación temporal será contrastada con la distribución obtenida a través del método de "Bloques Alternantes" expuesta por Ven Te Chow [3].

## 5. Marco Teórico.

### 5.1 Ciclo hidrológico.

En nuestro planeta, el agua que se encuentra sobre y bajo la superficie conforma una capa llamada hidrósfera. En la hidrósfera, el agua circula a través de una serie de sucesos que no tienen ni un principio ni un fin, ya que el proceso es de forma continua, que en conjunto se denomina ciclo hidrológico.

Durante su ciclo, el agua experimenta diferentes cambios de estado, comenzando por su evaporación desde el océano. Bajo las condiciones adecuadas, el vapor de agua se condensa formando las nubes. Este gas condensado se eleva y se convierte en parte importante de la atmósfera, donde será transportado por masas móviles de aire.

Luego de reunir las condiciones necesarias para ser condensado y transportado, el vapor de agua puede ser transformado en sólido (para el caso del granizo o hielo en las nubes), o líquido (para las gotas de agua llamadas lluvia). En ambos estados, sólido o líquido, el agua tiende a precipitar hacia la corteza terrestre u océanos, dependiendo de dónde se reúnan las condiciones necesarias para esto.

Si la precipitación ocurre sobre el suelo, el agua líquida puede dispersarse de distintas maneras por la superficie de éste; pudiendo ser interceptada por la vegetación existente en la corteza terrestre o infiltrarse en el suelo. El agua que se infiltra en el suelo comienza a llenar los vacíos y a escurrir hacia el interior de la corteza hasta saturar los huecos del suelo. Al ser totalmente llenados los vacíos de la parte superior del manto, el agua que excede de la precipitación comienza a escurrir, convirtiéndose en un flujo superficial de agua. Por su parte, el líquido que alcanza a ser infiltrado fluye hacia las napas subterráneas recargando de agua los mantos freáticos existentes en la parte inferior de la corteza terrestre. Por causa de la gravedad, esta agua tiende a fluir hacia zonas más bajas, creando un flujo subsuperficial, que luego puede crear un flujo superficial a través de la proliferación de agua a través de manantiales o ríos, dependiendo de la geomorfología del lugar donde ésta escurra [2][3].

Al fluir superficial o subsuperficialmente, parte de estos flujos vuelven a la atmósfera a causa de la evaporación y transpiración, y el agua restante (proveniente tanto del flujo superficial como del subsuperficial) vuelve al mar, donde comenzará un nuevo ciclo, a causa de la evaporación.

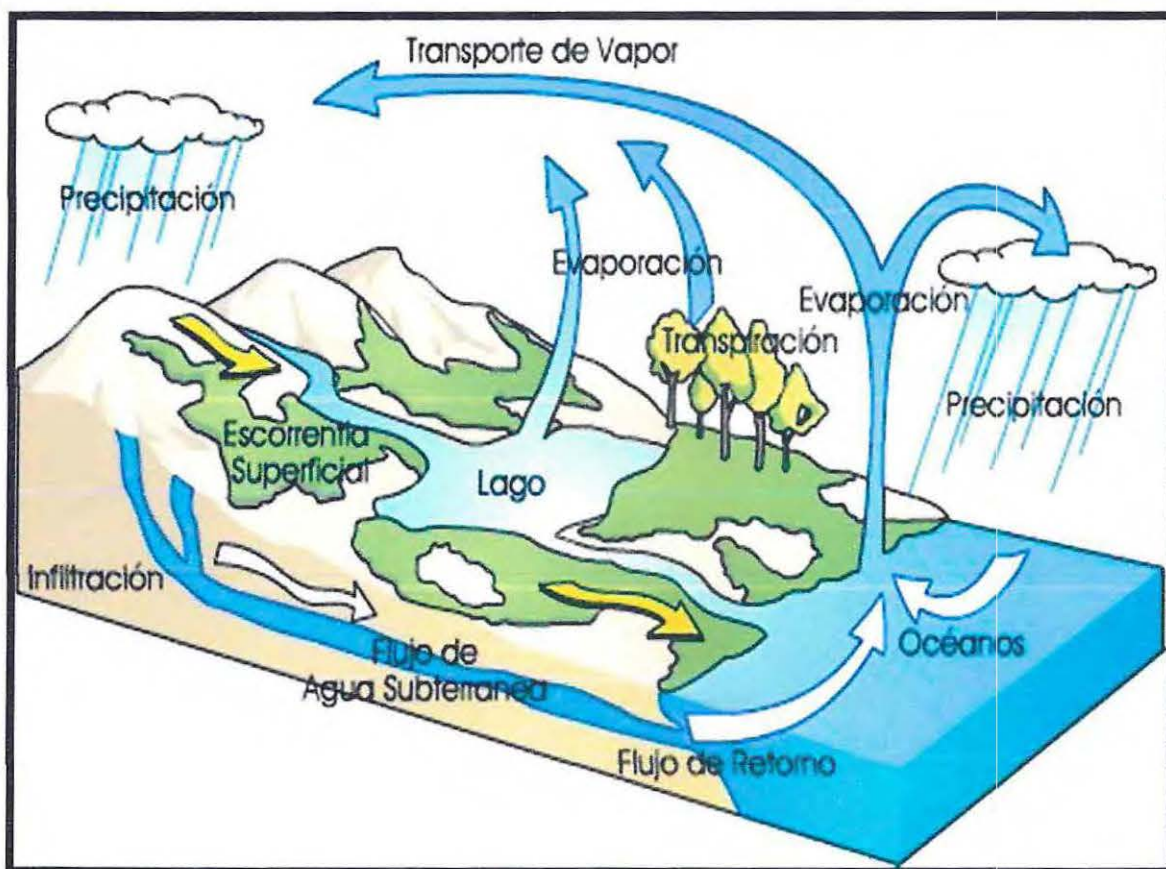


Figura 5.1- Ciclo Hidrológico [16].

## 5.2 Precipitación.

Las precipitaciones, comúnmente llamadas lluvia, son parte importante del ciclo hidrológico, y corresponden a todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre a causa de su condensación. Las precipitaciones pueden ser en forma de nieve, neblina, rocío, granizo o lluvia [2].

Las precipitaciones se forman debido a que el aire húmedo de los estratos bajos de la atmósfera es calentado, tornándose mucho más liviano que el aire que lo rodea, experimentando una ascensión adiabática. Al elevarse, y como a mayor altura más frío se torna el ambiente por el cual se encontrará rodeado, su temperatura descenderá (a una razón de un grado Celsius por cada cien metros de altura). Producto del enfriamiento al cual se ve sometido, el gas comienza a saturarse hasta llegar a la condensación. En este instante, las partículas que se condensan tienden a unirse al núcleo higroscópico, partículas de sal mayoritariamente que existen en la atmósfera, a causa de la diferencia de cargas eléctricas que contienen ambos átomos, formando así pequeñas gotas de agua. Cuando las gotas alcanzan un tamaño suficientemente grande para que la fuerza de gravedad sobrepase la fuerza de fricción, comienzan a precipitar lentamente hacia la faz de la tierra, aumentando su tamaño por el choque e unión entre partículas de la misma especie a medida que van cayendo.

Si la temperatura a la cual se produce la condensación está por debajo del punto de congelamiento, comenzarán a formarse cristales o sólidos, formando así nieve o granizos según sea el caso; de lo contrario, la precipitación se mantendrá de manera líquida.

Según las condiciones que producen el movimiento vertical del aire, las precipitaciones pueden ser de tres tipos:

- A) **Precipitación convectiva.** Este tipo de precipitación se produce cuando una masa de aire cercana a la superficie terrestre aumenta su temperatura. Producto de esto su densidad disminuye y la masa de aire tiende a ascender y ser reemplazada por otra de aire más denso. Este tipo de precipitación es de gran intensidad y de corta duración, concentrada en pequeñas áreas. Por lo general, la precipitación convectiva se caracteriza por ser parte de las zonas cercanas al trópico.
- B) **Precipitación por convergencia.** Este tipo de precipitación puede subdividirse en tres tipos:
  - 1) Por convergencia. Esta forma de precipitación se produce a causa del viaje de dos masas de aire en sentido contrario, las que además se encuentran al mismo nivel. Estas masas chocan entre si, causando su elevación unidas, para luego seguir el proceso de condensación y posteriormente precipitar.
  - 2) Por ciclón. Este tipo de precipitación corresponde a una masa de aire circular con baja presión, que gira en sentido contrario del reloj en el hemisferio norte. Tiene en su centro un ojo de ciclón, parte que tiene una presión baja comparada con la de la masa de aire, lo que hace que el aire comience a ascender a capas superiores, llegando así hasta el punto de condensación al elevarse.

- 3) Por frente. Este fenómeno se produce cuando una masa de aire en movimiento se encuentra con otra de diferente temperatura. Si la masa de aire en movimiento es fría y en su camino encuentra otra de temperatura mayor, tiende a elevarse por sobre la masa de aire caliente. Para ello debe precipitar y así tener menor peso para elevarse, formando un frente frío. Por el contrario, si una masa de aire de mayor temperatura se encuentra con una de aire frío, se producen los mismos fenómenos descritos, pero se forma un frente cálido.

La precipitación por convergencia es en general de larga duración y de intensidad baja a moderada, y se esparce por grandes áreas.

- C) **Precipitación orográfica.** Este tipo de precipitación se forma como resultado de la ascensión mecánica de corrientes de aire húmedo con movimiento horizontal. Al verse encerradas producto del choque con barreras naturales, como las montañas, estas corrientes comienzan a ascender, tendiendo a enfriarse hasta alcanzar su punto de condensación, y así comenzar a precipitar.

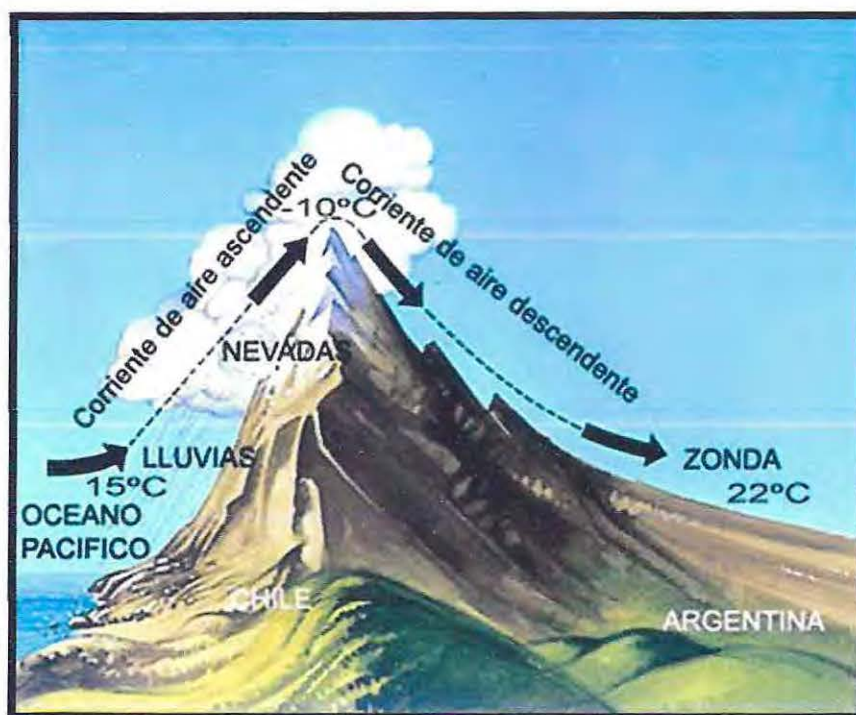


Figura 5.2- Precipitación orográfica [17].

Como los tipos de precipitación varían tanto en el tiempo como en el espacio, es importante poder cuantificar la cantidad de agua caída, con la intención de saber los valores característicos de agua que cae en un período de tiempo. Por lo general, al gestionar los datos se crean curvas de lluvia llamadas isoyetas, donde éstas nos muestran los valores característicos de las distintas zonas de nuestro país.

Como los registros obtenidos por los pluviógrafos muestran la cantidad de agua caída en un período de tiempo, se obtiene como resultado la intensidad de la lluvia:

$$i = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta P}{\Delta t}; \text{ donde si } \Delta t \rightarrow 0 \Rightarrow i = \frac{\partial P}{\partial t}$$

Tabla 5.1- Tabla de datos de precipitaciones.

Tiempo (hrs.)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación parcial (mm)	Tiempo parcial (hrs.)	Intensidad (mm/hrs.)
t1	P1	P1 - 0	t1 - 0	i1
t2	P2	P2 - P1	t2 - t1	i2
t3	P3	P3 - P2	t3 - t2	i3
t4	P4	P4 - P3	t4 - t3	i4
t (n)	P (n)	P (n) - P (n-1)	t (n) - t (n-1)	i (n)

Al graficar la profundidad de la lluvia o precipitación parcial en función del tiempo, se obtiene un hietograma de lluvia [3], como el que se muestra a continuación.

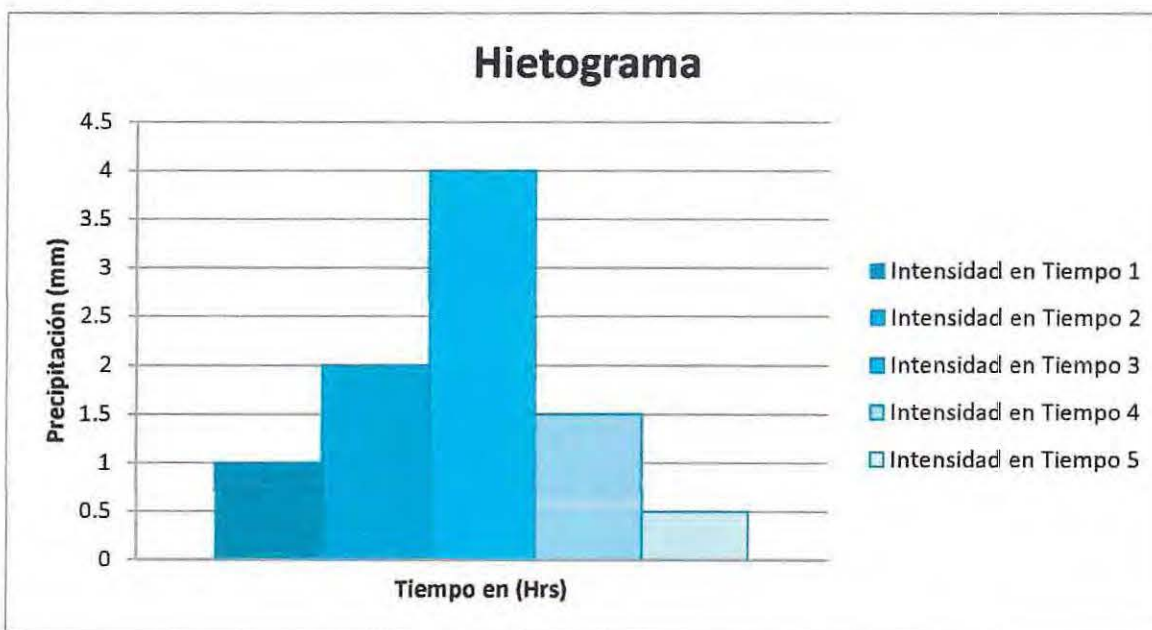


Figura 5.3- Hietograma de precipitación.

### **5.3 Finalidad del análisis de datos pluviográficos.**

El estudio de datos generados sirve para analizar y sintetizar valores que sean más manejables y fáciles de utilizar en un futuro [4]. Para comenzar el manejo de estos datos es necesario recurrir, inevitablemente, a la estadística. A partir de esta base puede elegirse un modelo matemático que permita representar total o mayoritariamente el comportamiento de algún fenómeno, como la lluvia, que dependerá primordialmente del lugar en que se concentre el estudio.

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros [2]. La aplicación de la estadística en la hidrología, permite inferir las características con las que debe ser esperado un fenómeno en estudio.

Los fenómenos en los que se concentrará este trabajo de título serán las precipitaciones en forma líquida, comúnmente denominadas lluvia. La importancia de conocer con cierto grado de exactitud un evento futuro, como por ejemplo la distribución a través del tiempo de la lluvia, sirve y es un factor primordial para la planificación y diseño de obras de drenaje o redes de aguas lluvias.

## 5.4 Tormentas de diseño.

Una de las grandes problemáticas que se presentan hoy en día en las grandes ciudades o en lugares donde se interviene el estado natural de un ambiente, es cómo lograr que los desagües de aguas lluvias mantengan su cauce natural.

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para ser utilizado en el diseño de un sistema hidrológico [3]. A partir de esta denominación, se infiere que este tipo de patrón puede ser usado como base para el diseño de redes de aguas lluvias, donde esta tormenta de diseño, que tiene asignada una probabilidad de ocurrencia, puede ser la información de entrada para el diseño de tales redes. Si se lleva a la práctica, la tormenta de diseño puede definirse como un valor de profundidad de precipitación en un punto, lugar o zona, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, y el patrón espacial de la precipitación.

La principal fuente para la elaboración de las tormentas de diseño se basa en los registros históricos de las precipitaciones en alguna cuenca o lugar de estudio, o en la información de regiones adyacentes. Además de la información histórica, es necesario considerar la magnitud, duración, frecuencia o probabilidad de ocurrencia del fenómeno, la porción de área que abarca la tormenta y la distribución de la lluvia en el tiempo.

Muchos hidrólogos se han interesado en el estudio del comportamiento de las tormentas, tratando de ajustarse a la realidad. Uno de los primeros que comenzó con tales investigaciones es Floyd Huff, quien se concentró en investigar y desarrollar una tormenta de diseño para la zona de Illinois, EE.UU. Huff desarrolló los patrones de distribuciones temporales para cuatro grupos de probabilidades, basados en cuartiles, representando la intensidad en el tiempo peak que se tiene en alguna tormenta.

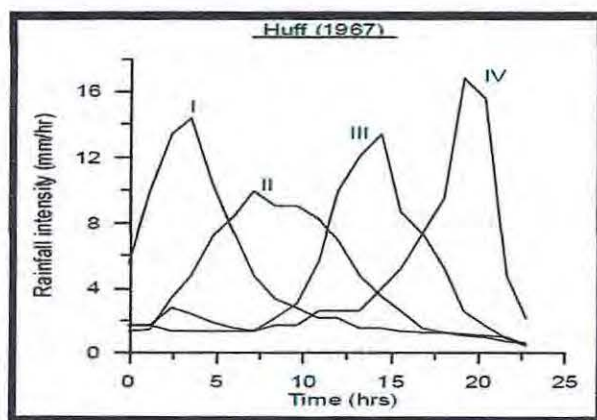


Figura 5.4- Tormentas de diseño de Floyd Huff [5].

## 5.5 Clima.

Para el desarrollo de este trabajo de título, la zona considerada para el análisis corresponde a la zona norte de Chile, específicamente las regiones:

- XV Región de Arica y Parinacota.
- I Región de Tarapacá.
- II Región de Antofagasta.
- III Región de Atacama.

Si bien Chile presenta una gran variedad de climas entre las diferentes zonas geográficas, es posible señalar que todas tienen un patrón común de lluvia, el que se rige por la proximidad al Océano Pacífico y al Polo Sur, y cuya mayor característica es la precipitación a causa del efecto orográfico.

Para separar las respectivas zonas climáticas del país, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) [14], indica que es posible delimitar zonas que tienen comportamientos similares con respecto al clima.

Desde el punto de vista climático, se acostumbra considerar a Chile continental en seis zonas, como muestra la Figura 5.5.

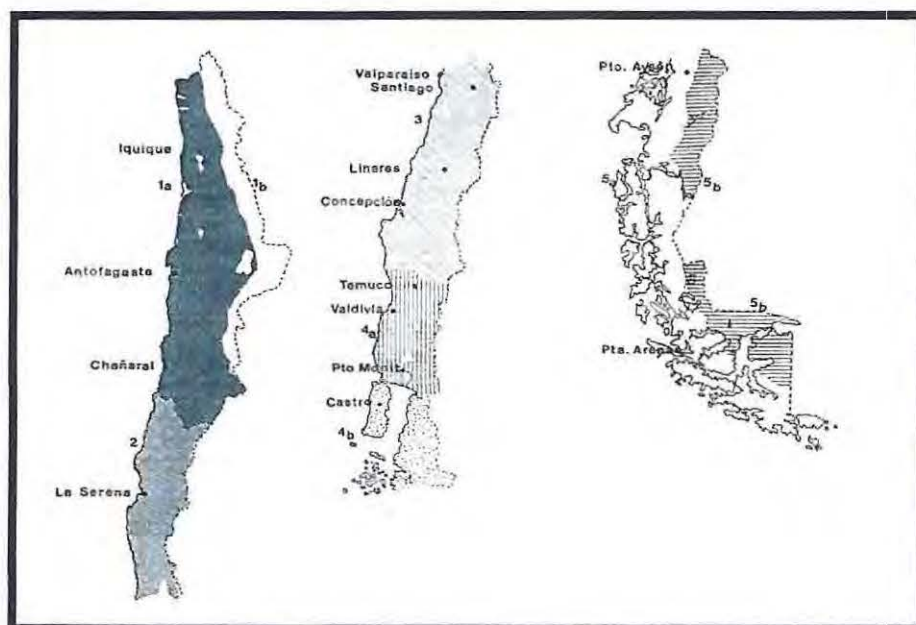


Figura 5.5- Zonas Climáticas de Chile [14].

En el trabajo del levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile [15], se explica y analiza el comportamiento del clima de las regiones en estudio de este trabajo de título, donde se expone que las regiones XV, I y II muestran una fuerte influencia tropical a causa de las influencias anticiclónicas cálidas permanentes, teniendo como consecuencia que el 80% de la precipitación anual se registra entre los meses de Diciembre a Marzo, por el contrario en la III Región de Atacama la fecha más lluviosa se encuentra en el periodo de Abril a Noviembre, teniendo entre estos meses el 90% de la precipitación anual, la cual indica que esta última tiene un comportamiento similar a la que ocurre en la zona central de Chile.

Como complemento al análisis anteriormente extraído, éste entrega 4 zonas identificadas con distribuciones mensuales de precipitaciones similares, las cuales son:

- Zona 1: Desde Visviri a Tignamar, que corresponde a la zona donde las precipitaciones se concentran fundamentalmente en enero, pero con el mes de diciembre muy húmedo.
- Zona 2: Desde Chilcaza a Ascotán, que corresponde a la zona donde el mes de diciembre deja de ser húmedo y las precipitaciones se desplazan más hacia el mes de febrero.
- Zona 3: Desde Quinchamale a Socaire, que corresponde a la zona donde el mes de diciembre pasa a ser seco (menos del 5% de las precipitaciones) y las precipitaciones se distribuyen entre enero, febrero y parte de marzo.
- Zona 4: desde Las Vegas a Iglesia Colorada, donde el clima cambia completamente al respecto a las zonas anteriores y las precipitaciones pasan a concentrarse en los meses de invierno de la zona central (Junio, Julio y Agosto).

Como Chile presenta en todo su territorio la Cordillera de los Andes, también la altura es una variable que modifica las cantidades de precipitaciones, es por esto que, si se evalúan de poniente a oriente éstas, se tiene que el comportamiento bajo los 2.000 m.s.n.m. la cantidad de agua precipitada es prácticamente nula para las regiones XV, I y II, en cambio para la III Región las precipitaciones medias anuales pueden llegar a alcanzar valores de hasta 50 mm de agua. En lugares que se encuentren entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m. las precipitaciones son constantes en toda la región de estudio y sobre los 3.000 m.s.n.m. la cantidad de agua caída en las regiones XV y I son muy superiores que en las regiones de Antofagasta y de Atacama, esto debido a que las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá tienen una gran influencia tropical.

Las características y variaciones anteriormente señaladas se pueden expresar en gradientes para cada región como se presenta a continuación y visualizados en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8.

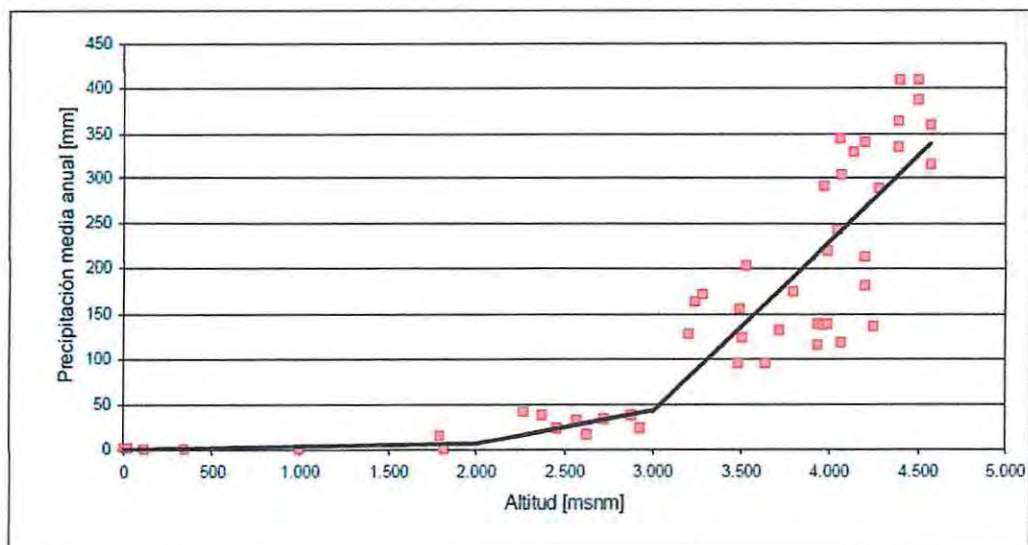


Figura 5.6- Variación de precipitación media anual con altitud en las regiones XV y I [15].

- Regiones XV y V: se estima un gradiente de 3.5 mm cada 100 metros de altitud entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m., el que aumenta a cerca de 20 mm por cada 100 metros sobre los 3.000 m.s.n.m.

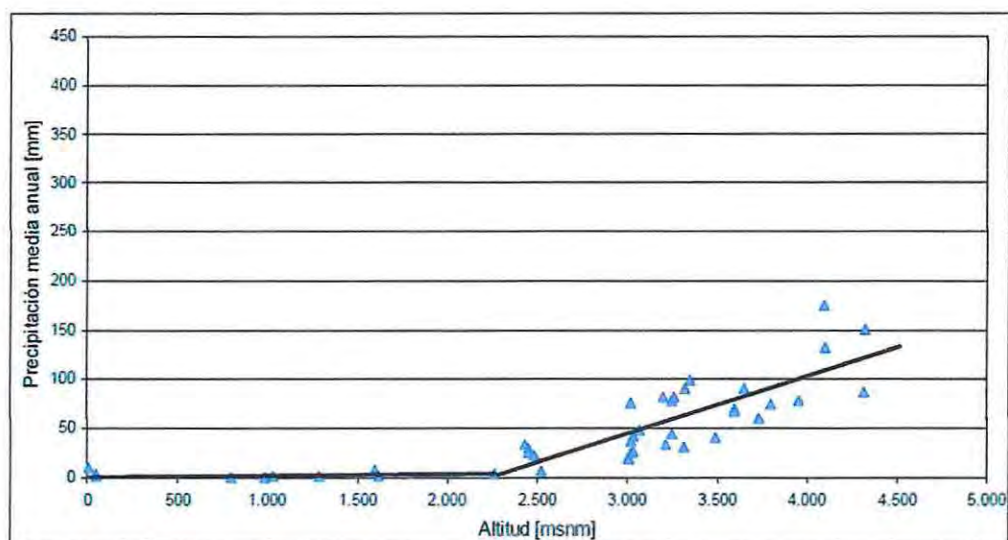


Figura 5.7- Variación de precipitación media anual con altitud en la II Región [15].

- II Región: se estima un gradiente de 6 mm cada 100 metros de altitud a partir de los 2.250 m.s.n.m.

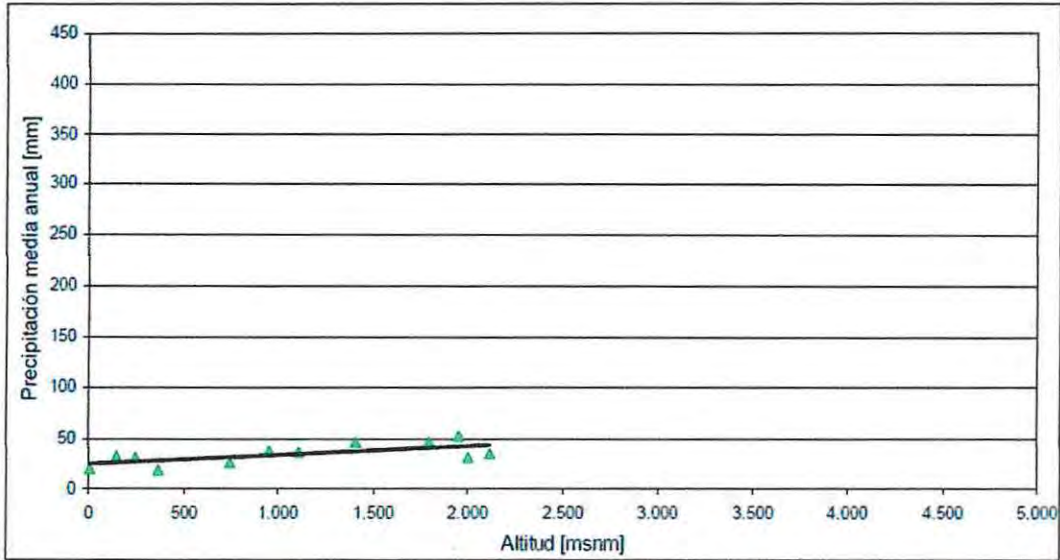


Figura 5.8- Variación de precipitación media anual con altitud en la III Región [15].

- III Región: se estima un gradiente de 1mm por cada 100 metros de altura para el rango de altitudes de 0 a 2.200 m.s.n.m.

## 6. Metodología.

### 6.1 Datos de Precipitaciones.

Para el desarrollo del presente trabajo de título, se utilizaron datos de precipitaciones a nivel horario. Estos datos fueron obtenidos directamente de la Dirección General de Aguas (DGA).

Los datos ofrecidos por la Dirección General de Aguas, dan como resultado de lluvias a nivel horario de 12 estaciones meteorológicas y con distintos años de registros para cada estación, tal como muestra la siguiente tabla.

Tabla 6.1 Estaciones meteorológicas a usar en el estudio.

REGIÓN	CÓDIGO ESTACIÓN	LETRA ASIGNADA	ESTACIÓN	ALTURA (msnm)	AÑOS	
					DESDE	HASTA
XV	01001005-5	A	CAQUENA	4400	1977	1985
	01020015-6	B	PARINACOTA	4420	1984	1999
	01202010-4	C	PUTRE	3560	1976	1998
	01300006-9	D	CENTRAL CHAPIQUIÑA	3350	1984	1993
II	02105016-4	E	LINZOR	4100	1978	1996
	02105020-2	F	SALADO EMBALSE	3200	1979	1992
	02105022-9	G	EL TATIO	4370	1979	1993
	02105017-2	H	TOCONCE	3310	1979	1998
	02101003-0	I	LEQUENA	3320	1978	1997
III	03414002-2	J	IGLESIA COLORADA	1550	1988	1999
	03802005-6	K	CONAY	1450	1988	1992
	03820004-6	L	SANTA JUANA	560	1988	1998

## 6.2 Tormentas.

Se considera como una tormenta al intervalo de lluvia producido por una situación meteorológica favorable para la precipitación, de modo que dos tormentas se encuentran separadas por un período de tiempo sin lluvias. Este período sin precipitaciones es un valor que se determina de forma arbitraria, encontrándose en estudios anteriormente desarrollados dos horas como mínima separación, para el caso de Espíldora y Echeverría [7], y seis horas para el caso de Huff [5].

Espíldora y Echeverría, explican que la mayoría de las cuencas sin control fluviométrico son las de menor extensión y, en consecuencia, para esas cuencas el considerar como lluvias independientes a las separadas por un intervalo sin precipitación mayor o igual a dos horas, constituye una hipótesis plenamente aceptable.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se determinó que para el presente trabajo de título se definirá como una tormenta a un período de precipitación que se encuentra separado por un tiempo mínimo de dos horas sin lluvias. Esta separación permitirá observar la independencia entre tormentas continuas que se presentan en los datos pluviográficos.

En caso de que existan lluvias separadas solamente por una hora sin precipitaciones, éstas se considerarán como una lluvia continua.

### 6.3 Agrupación de Tormentas.

La agrupación de tormentas se realizará para cada estación meteorológica que disponga de datos. Así, las tormentas de cada estación serán agrupadas por la duración de cada precipitación y ordenadas de menor a mayor tiempo de duración de cada evento. Es decir, si una precipitación tiene como duración 4 horas se colocará la información en la columna de 4 horas de duración de tormenta, y de la misma forma para los distintos períodos de duración. A partir de este ordenamiento, se podrá saber la cantidad de lluvias registradas por su duración y estación; y también se determinará la cantidad de eventos registrados por región, tal como muestra la Tabla 6.2.

Tabla 6.2- Tabla de ordenamiento de tormentas según su duración.

Región	Estación	Fecha de precipitación	Hora de precipitación	Precipitación (mm)	Duración de tormentas																		
					1	2	3	4							23	24							

### 6.4 Análisis de los parámetros de la tormenta.

Para el análisis de la precipitación por hora de cada tormenta, es necesario definir los parámetros que se usarán en este estudio.

En primer lugar, al tener agrupados los datos según el tiempo de duración de cada tormenta, como fue expuesto en el punto 6.3, es posible definir el tiempo total de duración de cada tormenta, es decir, el tiempo de duración desde que comienza el fenómeno hasta que ya no existe precipitación. Al mismo tiempo, es posible analizar y determinar la cantidad de precipitación a través del tiempo, es decir, se puede establecer la cantidad de agua que precipita en cada hora como la cantidad de agua acumulada en cada hora de fenómeno, hasta la cantidad de agua total caída en la tormenta. La unidad de medida que se utilizará serán milímetros (mm).

Para el análisis de las precipitaciones, se trabajará con porcentajes tanto para el agua caída como para el tiempo en el cual ésta precipitó. Así, al trabajar con un sistema adimensionado, será posible realizar comparaciones entre las distintas tormentas registradas, ya sea por las diferencias de horas de duración como también por la cantidad de agua precipitada. A partir de esto se determinará en forma de porcentaje el tiempo de una hora con respecto a la duración total de la tormenta y, en el caso de la precipitación, se determinará el porcentaje de agua caída con respecto a la cantidad total de agua precipitada en la tormenta, tal como muestra la Tabla 6.3.

Tabla 6.3- Tabla de obtención de porcentajes de tiempo y precipitación caída.

Duración de la tormenta			
4 Horas			
Tiempo (hrs.)	Precipitación (mm)	% de tiempo	% de precipitación
A	W	T1	P1
B	X	T2	P2
C	Y	T3	P3
D	Z	T4	P4

**Dónde:**

- **A, B, C, D** = Horas de duración de la tormenta, de donde se obtiene la duración total de la tormenta.
- **W, X, Y, Z** = Cantidad de agua precipitada por cada hora, medida en milímetros.
- **T1, T2, T3, T4** = Porcentajes de tiempo con respecto a la duración total de la tormenta. El siguiente ejemplo corresponde a una tormenta de 4 horas, como muestra la Tabla 6.3.

$$\blacksquare T1 = \frac{A \cdot 100\%}{(A+B+C+D)}$$

$$\blacksquare T2 = \frac{B \cdot 100\%}{(A+B+C+D)}$$

$$\blacksquare T3 = \frac{C \cdot 100\%}{(A+B+C+D)}$$

$$\blacksquare T4 = \frac{D \cdot 100\%}{(A+B+C+D)}$$

- **P1, P2, P3, P4** = Porcentajes de precipitación con respecto a la cantidad total de agua caída durante la lluvia. Al utilizar como ejemplo una tormenta de 4 horas, como muestra la Tabla 6.3, se tiene:

$$\blacksquare P1 = \frac{W \cdot 100\%}{(W+X+Y+Z)}$$

$$\blacksquare P2 = \frac{X \cdot 100\%}{(W+X+Y+Z)}$$

$$\blacksquare P3 = \frac{Y \cdot 100\%}{(W+X+Y+Z)}$$

$$\blacksquare P4 = \frac{Z \cdot 100\%}{(W+X+Y+Z)}$$

Al obtener los porcentajes individuales por período de tiempo, se podrán determinar la acumulación del porcentaje de tiempo y del porcentaje de lluvia, como muestra la siguiente tabla.

Tabla 6.4- Obtención de porcentajes acumulados de tiempo y precipitación.

Duración de la tormenta					
4 horas					
Tiempo (Hrs.)	Precipitación (mm)	% Tiempo	% Precipitación	% de tiempo acumulado	% de precipitación acumulada
A	X	T1	P1	TA1	PA1
B	Y	T2	P2	TA2	PA2
C	Z	T3	P3	TA3	PA3
D	W	T4	P4	TA4	PA4

Dónde:

- **TA1, TA2, TA3, TA4** = Porcentajes acumulados, obtenidos de la siguiente manera:
  - $TA1 = T1$
  - $TA2 = T1+T2$
  - $TA3 = T1+T2+T3$
  - $TA4 = T1+T2+T3+T4$
  
- **PA1, PA2, PA3, PA4** = Porcentajes de lluvia acumulada a medida que transcurre el tiempo, los que se obtiene así:
  - $PA1 = P1$
  - $PA2 = P1+P2$
  - $PA3 = P1+P2+P3$
  - $PA4 = P1+P2+P3+P4$

## 6.5 Distribución temporal de lluvia.

### 6.5.1 Agrupamiento de las tormentas.

Para llevar a cabo el análisis de las tormentas que ocurren en el Norte de Chile, es necesario comenzar a observar las características principales que estas precipitaciones pueden tener. Es así que surge la necesidad principal de observar en qué período de tiempo ocurre la máxima precipitación de cada tormenta en estudio.

La forma de exponer esto será a partir de la clasificación según el cuartil de tiempo en que ocurre la máxima precipitación, es decir, el tiempo de cada tormenta se dividirá en cuatro partes o en cuatro cuartiles de la duración total. De este modo se observará la cantidad de agua caída en cada cuartil de la tormenta.

Con esta subdivisión será posible determinar en qué período de tiempo ocurre la máxima precipitación de cada tormenta, creando así cuatro grupos de tormentas que guardarán directa relación con el período de tiempo de máxima lluvia, al igual como fue estipulado en los trabajos de Huff [5] y Varas [10].

De esta manera, el "Grupo 1" estará conformado por tormentas en las que la mayor parte de la totalidad de la lluvia cae en el primer cuartil del evento. El "Grupo 2" estará integrado por tormentas cuya máxima porción de lluvia cae en el segundo cuartil del tiempo total de la tormenta. El "Grupo 3" y el "Grupo 4" se conformarán por las tormentas en las que la mayor porción de la lluvia se encuentra en el tercer o cuarto cuartil, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 6.1.

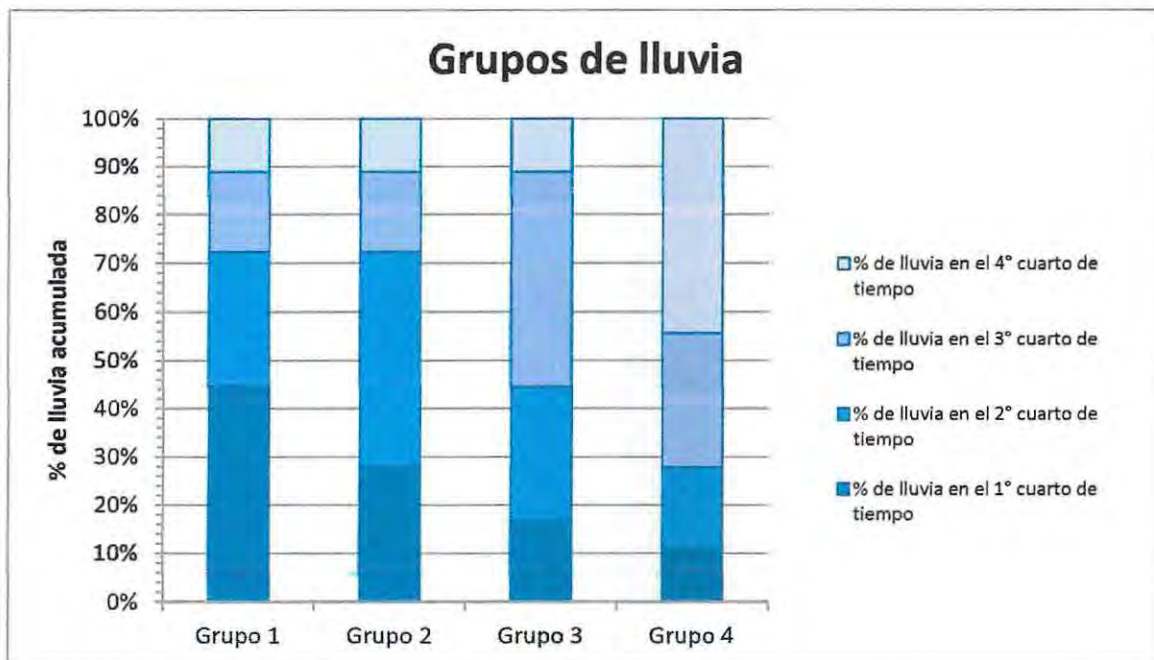


Figura 6.1- Grupos de tormentas según su mayor porcentaje de lluvia en cuartos de tiempo.

El procedimiento anteriormente descrito se aplicará a todas las tormentas de cada una de las estaciones meteorológicas, sin considerar los eventos que tengan una duración de una a tres horas. Esta exclusión se realiza debido a que en estos casos no es posible visualizar de manera correcta el cuartil donde existe la mayor precipitación. En el caso de las tormentas de una hora de duración, éstas tienen una tendencia lineal al momento de ser graficados los porcentajes acumulados, y no son de utilidad para este estudio. Para los eventos que tienen una duración de dos y tres horas no es posible determinar de manera correcta en qué momento de la tormenta existe la mayor parte de la precipitación, producto de la poca información que se recauda con dos o tres datos de precipitaciones, respectivamente, lo que puede inducir a cometer un error en el estudio.

Para aquellas tormentas en las que no sea posible identificar en qué lugar se encuentra la separación de cuartiles, se aplicará una interpolación lineal con la finalidad de estimar la cantidad de precipitación caída en cada cuarto de tiempo.

Luego de establecer la cantidad de tormentas que pertenecen a cada grupo, se obtendrán las probabilidades de ocurrencia de cada grupo.

La probabilidad de ocurrencia de un evento se obtiene como la cantidad de eventos favorables sobre la cantidad de eventos totales.

$$P.O. = \frac{N}{Z} * 100\%$$

**Donde:**

- P.O. = Probabilidad de ocurrencia.
- $N$  = Número total de datos favorables para el caso a analizar. Es decir, es la cantidad de tormentas que se registran y se caracterizan en el "Grupo  $i$ " en estudio.
- $Z$  = totalidad de tormentas registradas.

### **6.5.2 Estandarización del porcentaje de tiempo.**

La estandarización de los porcentajes de tiempo se realizará con la finalidad de comparar y analizar las distintas tormentas de cada grupo, cada cierto período de tiempo transcurrido.

Para el análisis de las tormentas se estipuló realizar intervalos de tiempo del 10% mientras ocurra el evento, es decir, el tiempo total de la tormenta se dividirá en 10 partes iguales. Así se obtendrá, a través de una interpolación lineal, el porcentaje de lluvia caída en cada instante de tiempo estandarizado.

## 6.6 Curvas de probabilidades de tormentas.

Las curvas de probabilidades de tormentas se formarán a partir de la estandarización del porcentaje de tiempo, expuesto anteriormente en el punto 6.5.2, donde para el porcentaje de tiempo 10% se tendrán "N" datos con porcentajes de lluvia caída para ese instante de tiempo. De la misma manera se hará para cada intervalo de tiempo definido, hasta llegar al 100% de acumulación de tiempo.

Tabla 6.5- Tabla de porcentajes de precipitaciones por porcentaje de tiempo transcurrido.

Tormenta número	Porcentaje de tiempo										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	P (1,0%)	P (1,10%)	P (1,20%)	P (1,30%)	P (1,40%)	P (1,50%)	P (1,60%)	P (1,70%)	P (1,80%)	P (1,90%)	P (1,100%)
2	P (2,0%)	P (2,10%)	P (2,20%)	P (2,30%)	P (2,40%)	P (2,50%)	P (2,60%)	P (2,70%)	P (2,80%)	P (2,90%)	P (2,100%)
3	P (3,0%)	P (3,10%)	P (3,20%)	P (3,30%)	P (3,40%)	P (3,50%)	P (3,60%)	P (3,70%)	P (3,80%)	P (3,90%)	P (3,100%)
N	P(N, 0%)	P(N, 10%)	P(N, 20%)	P(N, 30%)	P(N, 40%)	P(N, 50%)	P(N, 60%)	P(N, 70%)	P(N, 80%)	P(N, 90%)	P(N, 100%)

### Dónde:

- Tormenta número = Enumeración de la tormenta que se describe, desde 1, 2, 3, y hasta "N" tormentas que se registran para el grupo en estudio.
- Porcentaje de tiempo = Avance del tiempo acumulado, enumerado desde 0% hasta 100%, representando este último el término de la tormenta.
- P(N, 0%) = Porcentaje de precipitación acumulada que lleva la tormenta en "0%" del tiempo transcurrido del evento. De la misma forma, este último porcentaje varía de 0% hasta 100% según donde se observe la precipitación que lleva acumulada en esos instantes de tiempo.

Expuesto anteriormente el ordenamiento de datos, será posible crear las curvas de probabilidades de las tormentas de cada grupo, para lo cual se crearán dichas curvas con las distintas probabilidades de excedencia.

La creación de estas curvas se llevará a cabo a partir del análisis de los datos de porcentajes de precipitaciones por cada intervalo de porcentaje de tiempo, utilizando el método de asignación de probabilidad empírica de Weibul. Este método consiste en asignarle una probabilidad de no excedencia a cada porcentaje de precipitación para los distintos periodos de tiempo.

La manera en que se lleva a cabo el método de Weibul, comienza por el ordenamiento de los datos de los porcentajes de precipitaciones acumulados, de forma separada para cada intervalo de tiempo, y de manera creciente. Así, a cada uno de estos porcentajes de precipitaciones se le atribuye un número de orden. A modo de ejemplo para este punto se tomará el intervalo de tiempo de 10% que se muestra en la tabla 6.6 que aparece a continuación:

Tabla 6.6- Datos de porcentajes de tiempo a utilizar para el ordenamiento de las precipitaciones.

Tormenta Número	Porcentaje de Tiempo.		
	0%	10%	100%
1	P (1,0%)	P (1,10%)	P (1,100%)
2	P (2,0%)	P (2,10%)	P (2,100%)
3	P (3,0%)	P (3,10%)	P (3,100%)
N	P(N,0%)	P(N,10%)	P(N,100%)

Para este ejemplo se determinará que el ordenamiento de los valores de los porcentajes de precipitaciones será de la siguiente manera, lo que se representa en orden en la tabla 6.7.

$$P(2,10\%) > P(N,10\%) > P(3,10\%) > P(1,10\%)$$

Tabla 6.7- Ordenamiento creciente de datos de porcentaje de precipitaciones, usando como ejemplo el tiempo 10%.

Número orden	Tiempo 10%
1	P (1,10%)
2	P (3,10%)
3	P(N,10%)
<i>i</i>	P (2,10%)

**Dónde:**

- Número de orden = Enumeración dada a la precipitación desde el mayor al menor valor de porcentaje de precipitación, comenzando desde 1 hasta el valor *i*-ésimo de la serie de datos para este intervalo de tiempo.
- Tiempo 10% = Porcentaje de avance de tiempo. En este ejemplo se usó el 10% de avance.

Siguiendo con el método anteriormente descrito, se estipula que la probabilidad de no excedencia se refiere al valor probabilístico de sucesos que no exceden a un "X" valor. El método de Weibul dice que esta probabilidad teórica puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$F(x \leq xi) = \frac{i}{(n + 1)}$$

**Dónde:**

- $F(x \leq xi)$  = Probabilidad de que *x* no supere a *xi*.
- *i* = Número de orden del valor que deseamos obtener la probabilidad de no excedencia.
- *n* = Número total de datos.

Obtenido el valor de probabilidad de no excedencia será posible determinar la probabilidad de excedencia, que indica la probabilidad de que un valor sea superado. Aplicándolo a este trabajo, esto quiere decir que las curvas de probabilidad serán desarrolladas para determinar la probabilidad de que un evento exceda a la curva que será elegida para el uso de algún proyecto hidrológico.

Esta probabilidad de excedencia es posible determinarla con el complemento de la probabilidad de no excedencia, como muestra la siguiente fórmula:

$$\text{Probabilidad de excedencia} = 1 - \text{Probabilidad de no excedencia}$$

De acuerdo a lo anteriormente descrito, se determinó la creación de curvas con distintas probabilidades de excedencia para cada grupo de lluvias, la que serán del 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90% de probabilidad de excedencia.

## **6.7 Evaluación por dependencia de duración.**

Para comenzar a evaluar la distribución temporal de la precipitación, se analizará la relevancia que tiene la duración de las tormentas en estudio. Es decir, se observará si el tiempo de duración del fenómeno es una variable que se deba contemplar.

Este análisis consistirá en dividir la muestra total de las tormentas en cuartiles, usando como límites divisorios las duraciones de las tormentas.

Con lo anteriormente expuesto se determinó que se crearan 4 bloques que consisten en que en el primer bloque se considerarán el 100% de las tormentas, es decir, la totalidad de datos registrados, el segundo bloque se encuentra confeccionado con el 75% de las muestras, es decir, las precipitaciones que se encuentren entre el percentil 25% hasta el 100%. En el tercer bloque de separación se encuentran agrupadas desde el percentil 50% hasta el 100% de las precipitaciones y el cuarto bloque representa al cuartil de muestra ubicada entre los percentiles 75% hasta el 100%, manteniendo la separación por región a la que representan cada uno de los registros.

Cada grupo de tormenta, ya sea "Grupo 1", "Grupo 2", "Grupo 3" y "Grupo 4" será subdividido para realizar el análisis de la variable de duración.

El primer bloque a analizar será el de 100% de las tormentas, donde se le aplicará el procedimiento expuesto en el punto 6.6.- de la metodología, con respecto a las curvas de probabilidades de tormentas, obteniendo como resultado las curvas de probabilidades de excedencia para el presente bloque y cada región.

El proceso anteriormente descrito será replicado para los tres siguientes bloques descritos con anterioridad, obteniendo así las curvas de probabilidades de excedencia en todos los bloques por analizar.

Al obtener las distintas probabilidades de excedencia, será posible comparar entre los 4 bloques con las curvas obtenidas con el procedimiento descrito, donde la finalidad de este proceso es eliminar la dependencia de duración de las tormentas registradas, donde si se obtiene como resultado curvas con un comportamiento similar entre los distintos bloques para las distintas probabilidades de excedencias, esto demostrará que la variable duración no debe ser considerada para el análisis de la distribución temporal de la lluvia.

## **6.8 Evaluación por dependencia geográfica.**

El segundo análisis al cual serán sometidos los datos, será determinar si existe alguna dependencia geográfica entre las regiones que se encuentran en estudio. Si se encuentra que existen diferencias significativas en los gráficos realizados de porcentajes acumulados, tanto de lluvia como de tiempo, se determinará estudiar separadamente los patrones que estos puedan tener, es decir, se analizará el patrón de lluvia por cada región.

En caso contrario, si se analiza y se obtiene que las tendencias que siguen estos datos sean similares y se conforman como un patrón de lluvia único, se realizará una curva única para cada probabilidad de excedencia.

## **6.9 Evaluación de la duración de las tormentas**

Anexo a la metodología expuesta para obtener los perfiles de lluvia de la zona norte se realizará el análisis de las duraciones de las tormentas.

Esto se comenzará a realizar separando por región y por horas de duración las tormentas registradas, para darle una probabilidad de ocurrencia a las distintas duraciones, esto es, hacer el cociente entre la cantidad de tormentas para una determinada duración con la totalidad de tormentas registradas para la región en estudio.

Además de obtener las probabilidades de ocurrencia de las duraciones se expondrán gráficos que muestren los cuartiles de las duraciones en cada estación meteorológica, para obtener así una noción del comportamiento de las duraciones de las tormentas por la región en que se encuentre la estación.

## 6.10 Contraste de hietograma.

Los Hietogramas de las precipitaciones tienen múltiples variables que la componen, estas pueden ser como la magnitud de la precipitación, la duración de la tormenta o la distribución temporal que tenga el evento. En este trabajo de título la principal variable que se define es la distribución temporal de la tormenta, a causa de esto se contrastará la distribución temporal obtenida contra la distribución dada por un método tradicional.

A partir de los perfiles obtenidos se va a elegir una curva de distribución temporal con la menor probabilidad de excedencia del grupo que mayor probabilidad de ocurrencia tenga para poder contrastarla con la distribución obtenida a través de un método tradicional.

El método tradicional que se ocupará para el contraste será el método expuesto por Ven Te Chow [3] llamado "Bloques alternantes", la cual consiste en reordenar el incremento de la cantidad de precipitación en un período de tiempo, ubicando al centro del tiempo de la tormenta la máxima precipitación para luego colocar alternadamente de derecha a izquierda del bloque central y en forma descendente los siguientes bloques de profundidades de lluvias.

Este contraste de hietograma se aplicará a los casos de tormentas que tengan duraciones de 6, 12 y 24 horas y con datos de precipitaciones de la Estación Putre de la XV Región de Arica y Parinacota.

## 7. Estaciones y datos meteorológicos.

Para el presente trabajo de título se han obtenido datos de precipitaciones a través de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA), teniendo como resultado el registro de 4.659 tormentas distribuidas desde 1 hasta 44 horas de duraciones. La contabilización de estas tormentas se puede observar en la Figura 7.1, la cual muestra la distribución de los registros anteriormente nombrados.

Tabla 7.1- Contabilización de Registros.

Duración de Tormentas (hrs)	Cantidad de tormentas registradas en:											
	XV Región				II Región					III Región		
	Caquena	Parinacota	Putre	Central Chapiquiña	Linzor	Salado Embalse	El Tatio	Toconce	Lequena	Iglesia Colorada	Conay	Santa Juana
1	217	100	382	228	175	122	158	191	127	19	28	39
2	133	84	225	79	77	58	93	102	66	11	7	21
3	107	82	138	61	42	29	58	53	30	4	6	7
4	63	42	101	27	45	23	28	32	19	9	6	7
5	37	30	65	27	26	14	19	30	14	2	5	1
6	22	17	50	20	19	11	20	13	6	1	3	3
7	24	8	35	10	16	9	11	12	4	2	1	3
8	13	6	23	6	13	4	8	12	1	1	1	1
9	8	3	14	10	8	3	10	2	0	1	3	0
10	5	3	6	8	7	2	2	7	0	2	2	2
11	6	0	8	2	3	1	3	0	0	1	0	0
12	4	3	5	4	4	1	4	1	2	0	0	2
13	1	0	7	1	1	1	0	1	0	0	1	2
14	0	0	2	3	2	0	1	0	1	2	0	0
15	1	0	3	0	1	1	1	0	0	1	0	1
16	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
17	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
18	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0
19	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	643	378	1070	492	439	279	417	456	270	58	66	91

Siguiendo la metodología expuesta en el punto 6.5.1., se apartarán de este estudio las precipitaciones que tengan una duración entre 1 a 3 horas, teniendo como consecuencia la disminución de los datos de 4.659 a 1.301 tormentas en estudio, las cuales se presentarán por región y estación donde fue registrada, como se muestra en los puntos que siguen a continuación.

## 7.1 XV Región de Arica y Parinacota.

En la XV Región de Arica y Parinacota fue posible obtener datos de precipitaciones a nivel horario para cuatro estaciones meteorológicas, variando los años de registro para cada una de ellas.

### 7.1.1 Estación Caquena.

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la Provincia de Parinacota, Comuna de Putre. Las características generales de la estación son presentadas en la Tabla 7.2., y su mapa de ubicación en la Figura 7.1.

Tabla 7.2- Características de la Estación Caquena.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
01001005-5	-18.0574416	-69.2036231	4400



Figura 7.1- Mapa de ubicación de la Estación Caquena.

De la Estación Caquena fue posible obtener datos entre los años 1977 hasta 1985. Si bien las tormentas registradas varían entre 1 y 19 horas de duración, en el presente estudio se analizarán aquellas desde un mínimo de 4 horas de duración, según lo descrito anteriormente, como muestra la Tabla 7.3.

Tabla 7.3- Registro de tormentas en la Estación Caquena.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	17	19
Cantidad	63	37	22	24	13	8	5	6	4	1	1	1	1

### 7.1.2 Estación Parinacota.

La estación meteorológica de Parinacota se encuentra situada en la Provincia de Parinacota, más exactamente en la Comuna de Putre. La Tabla 7.4 muestra las características generales de esta estación, y la Figura 7.2, su mapa de ubicación.

Tabla 7.4- Características de la Estación Parinacota.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
01020015-6	-18.204666	-69.27029315	4420



Figura 7.2- Mapa de ubicación de la Estación Parinacota.

Para la estación anteriormente presentada se obtuvo registros de tormentas entre los años 1984 hasta 1999. La Tabla 7.5 muestra la cantidad de precipitaciones desde un mínimo de 4 horas de duración.

Tabla 7.5- Registro de tormentas en la Estación Parinacota.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)							
	4	5	6	7	8	9	10	12
Cantidad	42	30	17	8	6	3	3	3

### 7.1.3 Estación Putre.

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la Provincia de Parinacota, Comuna de Putre. Sus características generales se muestran en la Tabla 7.6, y su mapa de ubicación en la Figura 7.3.

Tabla 7.6- Características de la Estación Putre.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
01202010-4	-18.202433	-69.56222949	3560



Figura 7.3- Mapa de ubicación de la Estación Putre.

De la Estación Putre, ha sido posible obtener datos entre los años 1976 y 1998. La Tabla 7.7 muestra la cantidad de tormentas registradas que varían entre 4 y 44 horas de duración.

Tabla 7.7- Registro de tormentas en la Estación Putre.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)																	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	21	24	44
Cantidad	101	65	50	35	23	14	6	8	5	7	2	3	1	1	1	1	1	1

#### 7.1.4 Estación Central Chapiquiña.

Se encuentra ubicada en la Provincia de Parinacota, Comuna de Putre. Las características generales de esta estación son presentadas en la Tabla 7.8 y su mapa de ubicación en la Figura 7.4.

Tabla 7.8- Características de la Estación Central Chapiquiña.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
01300006-9	-18.3754809	-69.55000892	3350



Figura 7.4- Mapa de ubicación de la Estación Central Chapiquiña.

De la Estación Central Chapiquiña se recabó información de precipitaciones de los años 1984 hasta 1993. La Tabla 7.9 muestra las cantidades de lluvias por horas de duración.

Tabla 7.9- Registro de tormentas en la estación Central Chapiquiña.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)															
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18	19	20	22
Cantidad	27	27	20	10	6	10	8	2	4	1	3	1	2	1	1	1

## 7.2 II Región de Antofagasta.

En la Segunda Región fue posible recopilar datos de cinco estaciones meteorológicas, las cuales varían en la cantidad de años de registro y se encuentran ubicadas en distintos puntos geográficos de la región.

### 7.2.1 Estación Linzor.

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la Comuna de Calama, Provincia de El Loa. Sus características generales se presentan en la Tabla 7.10, y su mapa de ubicación se muestra en la Figura 7.5.

Tabla 7.10- Características de la Estación Linzor.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
02105016-4	-22.232931	-68.0247748	4100



Figura 7.5- Mapa de ubicación de la Estación Linzor.

De la estación descrita, se obtuvo información de precipitaciones situadas entre los años 1978 y 1996. La Tabla 7.11 muestra la cantidad de tormentas registradas para los distintos tiempos de duración.

Tabla 7.11- Registro de tormentas en la Estación Linzor.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cantidad	45	26	19	16	13	8	7	3	4	1	2	1

### 7.2.2 Estación Salado Embalse.

Está ubicada en la Comuna de Calama, Provincia de El Loa. La Tabla 7.12 representa sus características generales, y su mapa de ubicación aparece en la Figura 7.6.

Tabla 7.12- Características de la Estación Salado Embalse.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
02105020-2	-22.2887623	-68.2047833	3200

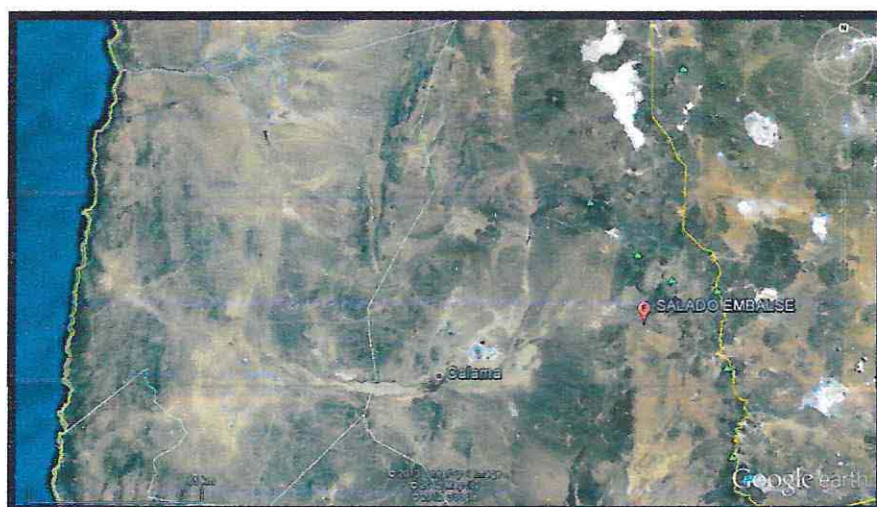


Figura 7.6- Mapa de ubicación de la Estación Salado Embalse.

De la Estación Salado Embalse se obtuvo información de registros de precipitaciones de los años 1979 hasta 1992. La Tabla 7.13 muestra la cantidad de eventos registrados para cada tiempo de duración.

Tabla 7.13- Registro de tormentas en la Estación Salado Embalse.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15
Cantidad	23	14	11	9	4	3	2	1	1	1	1

### 7.2.3 Estación El Tatio.

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la Comuna de Calama, más específicamente en la Provincia de El Loa. Sus características generales se muestran en la Tabla 7.14, y su mapa de ubicación está representado en la Figura 7.7.

Tabla 7.14- Características generales de la Estación El Tatio.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
02105022-9	-22.3743148	-68.0153333	4370



Figura 7.7- Mapa de ubicación de la Estación El Tatio.

Para la Estación El Tatio, las tormentas registradas se sitúan entre los años 1979 hasta 1993. En la Tabla 7.15 se presenta la cantidad de eventos para cada tiempo de duración.

Tabla 7.15- Registro de tormentas en la Estación El Tatio.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16
Cantidad	28	19	20	11	8	10	2	3	4	1	1	1

#### 7.2.4 Estación Toconce.

Se encuentra ubicada en la Comuna de Calama, en la Provincia de El Loa. Las características generales de esta estación son presentadas en la Tabla 7.16, y su mapa de ubicación se observa en la Figura 7.8.

Tabla 7.16- Características generales de la Estación Toconce.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
02105017-2	-22.2623732	-68.17534246	3310

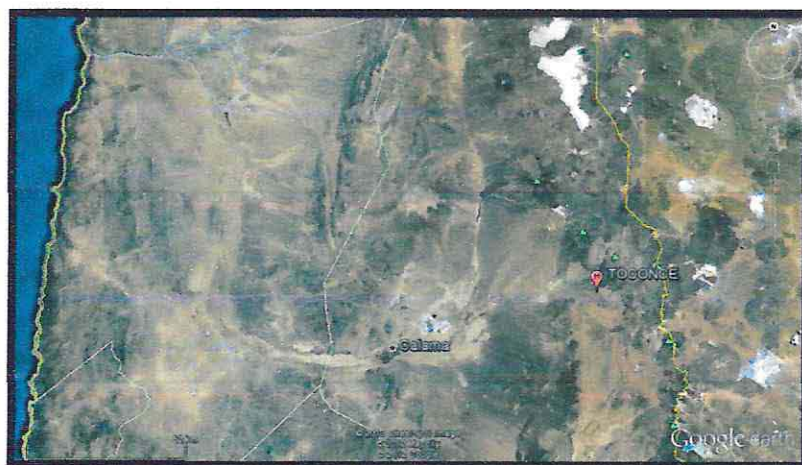


Figura 7.8- Mapa de ubicación de la Estación Toconce.

De la estación Toconce ha sido posible obtener datos registrados entre los años 1979 y 1998, los cuales han sido cuantificados según su tiempo de duración en la Tabla 7.17.

Tabla 7.17- Registro de tormentas en la estación Toconce.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)									
	4	5	6	7	8	9	10	12	13	19
Cantidad	32	30	13	12	12	2	7	1	1	1

### 7.2.5 Estación Lequena.

Esta estación se encuentra ubicada en la Comuna de Calama, Provincia de El Loa, y sus características generales se presentan en la Tabla 7.18. Su mapa de ubicación se muestra en la Figura 7.9.

Tabla 7.18- Características generales de la Estación Lequena.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
02101003-0	-21.6584815	-68.6631129	3320



Figura 7.9- Mapa de ubicación de la Estación Lequena.

De la estación meteorológica Lequena se obtuvo datos entre los años 1988 hasta 1999, los cuales varían en su duración como muestra la Tabla 7.19.

Tabla 7.19- Registro de tormentas en la Estación Lequena.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)						
	4	5	6	7	8	12	14
Cantidad	19	14	6	4	1	2	1

### 7.3 III Región de Atacama.

Para la Tercera Región se recopilieron datos de tres estaciones meteorológicas, situadas en distintas zonas de esta región.

#### 7.3.1 Estación Iglesia Colorada.

Esta estación meteorológica está ubicada en la Comuna de Tierra Amarilla, Provincia de Copiapó. Sus características generales pueden ser vistas en la Tabla 7.20 y su mapa de ubicación en la Figura 7.10.

Tabla 7.20- Características generales de la Estación Iglesia Colorada.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
03414002-2	-28.1602539	-69.88294285	1550

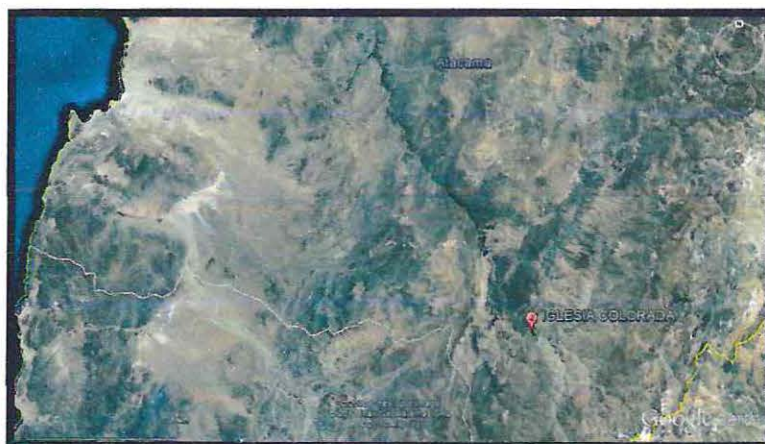


Figura 7.10- Mapa de ubicación de la Estación Iglesia Colorada.

De la Estación Iglesia Colorada fue posible recabar información de precipitaciones entre los años 1988 y 1999. La cantidad de tormentas registradas para cada tiempo de duración se muestran en la Tabla 7.21.

Tabla 7.21- Registro de tormentas en la Estación Iglesia Colorada.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	14	15	18	19
Cantidad	9	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1

### 7.3.2 Estación Conay.

Se encuentra ubicada en la Comuna de Alto del Carmen, Provincia de Huasco. En la Tabla 7.22 se representan las características generales de esta estación, y su mapa de ubicación aparece en la Figura 7.11.

Tabla 7.22- Características generales de la Estación Conay.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
03802005-6	-28.9780084	-70.1554557	1450

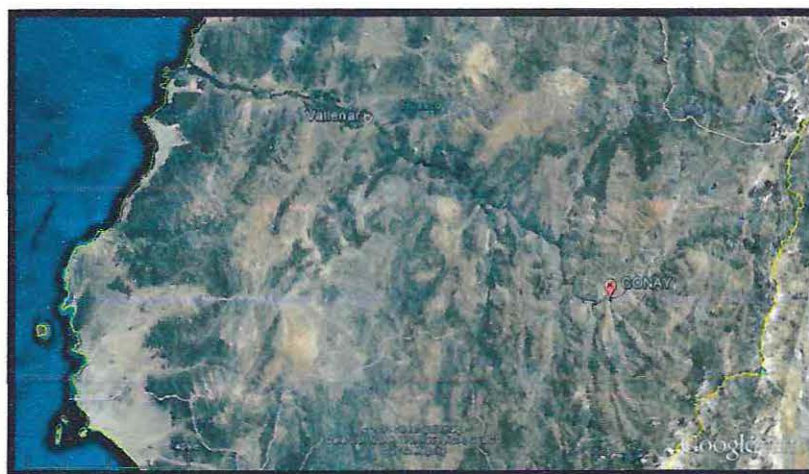


Figura 7.11- Mapa de ubicación de la Estación Conay.

Para la Estación Conay se encontraron datos de los años 1988 hasta 1992. La Tabla 7.23 muestra la cuantificación de tormentas con respecto a su duración.

Tabla 7.23- Registro de tormentas en la Estación Conay.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)										
	4	5	6	7	8	9	10	13	17	18	24
Cantidad	6	5	3	1	1	3	2	1	1	1	1

### 7.3.3 Estación Santa Juana.

Esta estación meteorológica está ubicada en la Comuna de Vallenar, Provincia de Huasco. En la Tabla 7.24 es posible observar sus características generales, y en la Figura 7.12 su mapa de ubicación.

Tabla 7.24- Características generales de la Estación Santa Juana.

Código BNA	Ubicación		Altura (msnm)
	Latitud:	Longitud:	
03820004-6	-28.6696858	-70.6553703	560

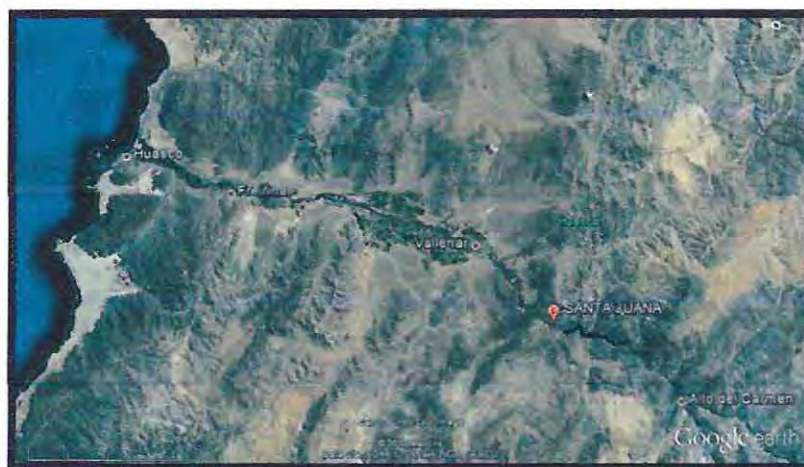


Figura 7.12- Mapa de ubicación de la Estación Santa Juana.

Para la Estación Santa Juana, en la Tabla 7.25 se presenta la cantidad de tormentas registradas para los distintos tiempos de duración, entre los años 1988 hasta 1998.

Tabla 7.25- Registro de tormentas en la Estación Santa Juana.

Tormentas	Duración de las tormentas (horas)										
	4	5	6	7	8	10	12	13	15	17	28
Cantidad	7	1	3	3	1	2	2	2	1	1	1

## 8. Análisis y desarrollo.

### 8.1 Datos totales.

A partir de los datos totales recabados de las doce estaciones meteorológicas anteriormente señaladas, es posible analizar las precipitaciones en su totalidad. La cantidad total de tormentas obtenidas fue de 1.301. En la Tabla 8.1 es posible visualizar la distribución de estas según su tiempo de duración.

Tabla 8.1- Total de tormentas según su tiempo de duración.

Tormenta	Duración de las tormentas (hrs.)																			Total			
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		24	28	44
Cantidad	402	270	185	135	89	62	46	24	30	15	11	9	3	4	4	5	1	1	1	2	1	1	1.301

En la metodología expuesta en el punto 6.5.2 del presente trabajo de título se describe cómo se realizará la estandarización de porcentajes, tanto para el tiempo transcurrido de lluvia como de las precipitaciones caídas en los intervalos de tiempo.

A partir de esto es posible analizar, como primer intento, un perfil que resulte del análisis total de las precipitaciones obtenidas, sin importar la cantidad de horas de duración de cada tormenta, ni la región a la cual pertenece cada una de éstas. Este análisis es posible visualizarlo en la Figura 8.1, que se presenta a continuación.

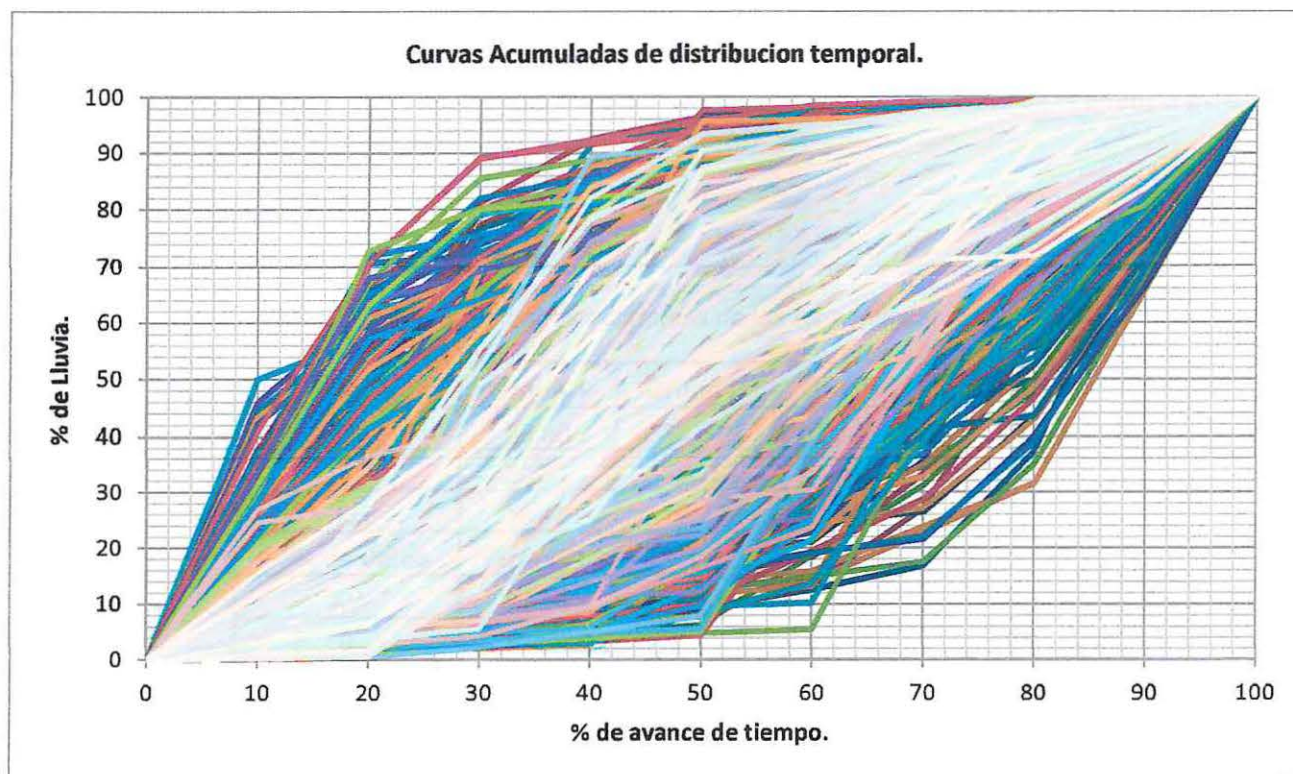


Figura 8.1- Gráfico de las Curvas de Precipitaciones.

A partir del gráfico de la Figura 8.1 es posible concluir que no existe un patrón único definido de lluvias para la zona norte de nuestro país, por lo cual se deberá hacer un análisis desde otra perspectiva.

El análisis que se determinó en la metodología consiste en individualizar cada tormenta registrada, diferenciando tanto el tiempo de duración de cada una y la región en la que ésta cae. Esto se llevará a cabo para observar si existe algún patrón de lluvia y ver de qué manera caracterizarlo.

Además, se crearán 4 grupos, los que se caracterizarán según el período de tiempo durante el cual caiga el mayor porcentaje de lluvia, es decir, el porcentaje de tiempo acumulado será dividido en cuatro partes: de 0% hasta 25%, de 25% hasta 50%, de 50% hasta 75% y de 75% hasta 100%. Así, para cada tormenta individualizada se observará el porcentaje de lluvia caída y se le clasificará según el grupo donde se presente su mayor porcentaje de precipitación.

De lo expuesto, es posible individualizar las precipitaciones tanto por bloques de datos, por región y por grupo a la cual pertenece, esto se puede visualizar en la Tabla 8.2, que muestra las características de las tormentas analizadas con sus respectivas probabilidades de ocurrencia para las separaciones indicadas anteriormente.

Tabla 8.2- Probabilidad de ocurrencia de las tormentas analizadas.

<b>100% de datos</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
<b>XV</b>	23.96	36.01	29.05	10.98
<b>II</b>	29.31	35.76	24.95	9.98
<b>III</b>	19.18	39.73	34.25	6.85
<b>75% de datos</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
<b>XV</b>	27.24	33.85	27.04	11.87
<b>II</b>	22.66	23.49	17.26	6.03
<b>III</b>	13.70	28.77	21.92	5.48
<b>50% de datos</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
<b>XV</b>	30.42	29.86	27.32	12.39
<b>II</b>	36.36	34.20	21.65	7.79
<b>III</b>	18.60	41.86	32.56	6.98
<b>25% de datos</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
<b>XV</b>	34.96	29.27	23.98	11.79
<b>II</b>	38.89	33.95	19.14	8.02
<b>III</b>	19.44	44.44	27.78	8.33

## 8.2 Datos por grupo y regionalizados.

Como anteriormente se analizó la cantidad de tormentas en su totalidad, sin dar como resultado algún tipo de patrón, se estudiarán las precipitaciones por el grupo de mayor precipitación, manteniéndose seccionadas por región y por su tiempo de duración.

### 8.2.1 Grupo 1.

En el "Grupo 1" se han seleccionado aquellas precipitaciones registradas para las cuales la mayor precipitación se presenta en el primer cuarto de la duración de la tormenta, tal como muestra la Figura 8.2.

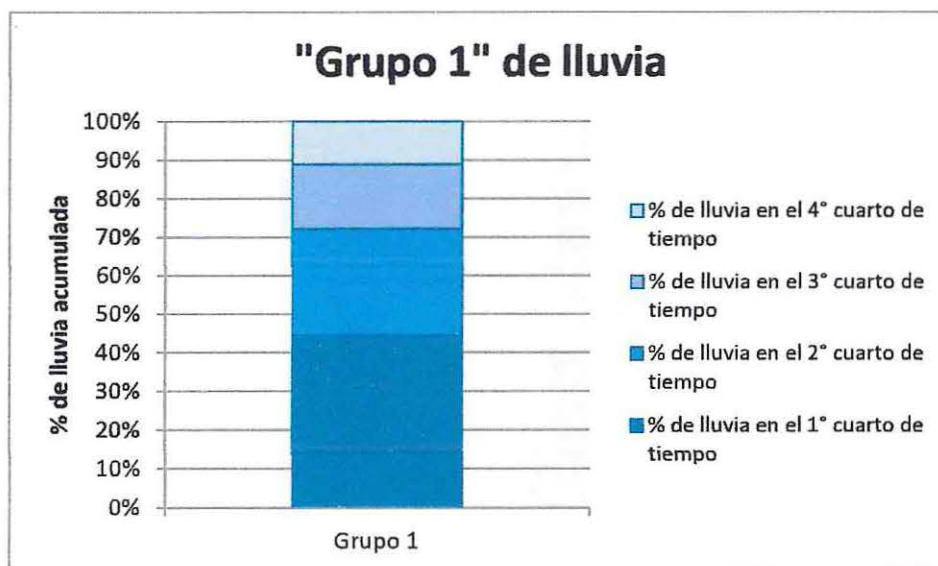


Figura 8.2- Representación de las características del "Grupo 1".

La individualización y agrupamiento, da como resultado la cantidad de 334 tormentas, de un total de 1.301 precipitaciones, que pertenecen a este grupo. Éstas se distribuyen por región y tiempo de duración, como muestra la Tabla 8.3.

La probabilidad de ocurrencia (P.O.) para el "Grupo 1", fue determinado como se expuso en el punto 6.5.1 de la metodología de este trabajo de título, dando como resultado una probabilidad de ocurrencia que se muestra a continuación.

$$P.O. (\text{Grupo 1}) = 25.67\%$$

Tabla 8.3- Datos del "Grupo 1" por región y horas de duración.

Duración de las tormentas del "Grupo 1"	Región			TOTAL
	XV Arica y Parinacota	II Antofagasta	III Atacama	
4	39	32	4	75
5	32	25	2	59
6	22	21	1	44
7	20	12	3	35
8	18	10	1	29
9	15	12	1	28
10	5	8	1	14
11	8	1	1	10
12	4	12	0	16
13	4	3	0	7
14	3	2	0	5
15	2	1	0	3
16	1	1	0	2
17	1	0	0	1
18	1	0	0	1
19	1	1	0	2
20	1	0	0	1
21	1	0	0	1
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	1	0	0	1
TOTAL	179	141	14	334

Al tener identificadas las precipitaciones que pertenecen al "Grupo 1", es posible observar las características generales que éste puede tener. En primer lugar, se puede visualizar que al graficar las tormentas existentes para las regiones que se encuentran en estudio, éstas tienen un patrón de lluvia para este grupo. Lo anterior se muestra en las figuras 8.3. (Región de Arica y Parinacota), 8.4. (Región de Antofagasta) y 8.5. (Región de Atacama).

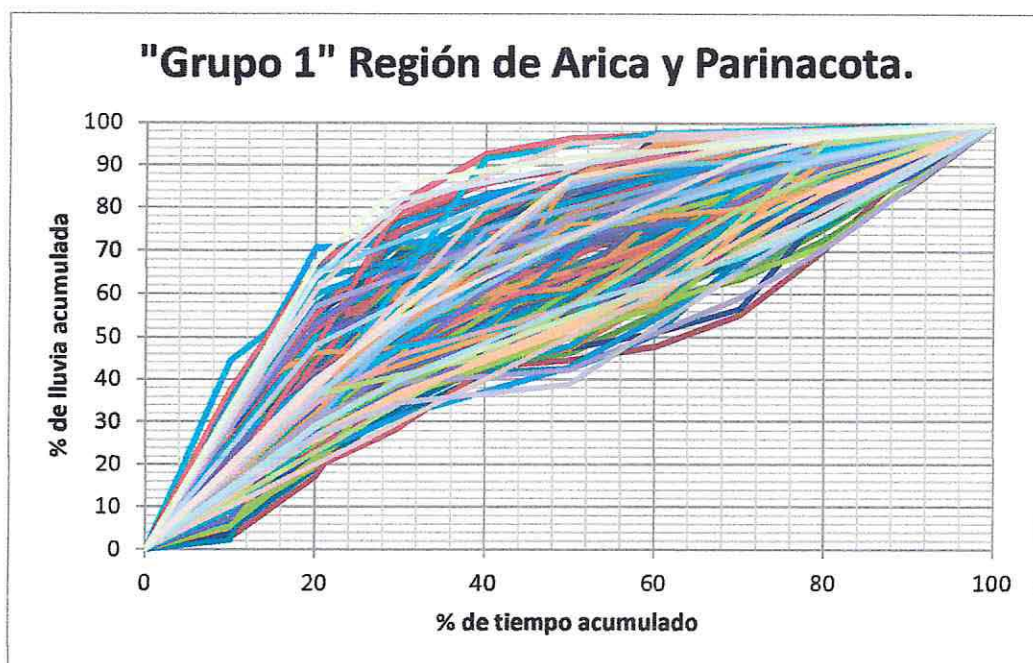


Figura 8.3- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Arica y Parinacota.

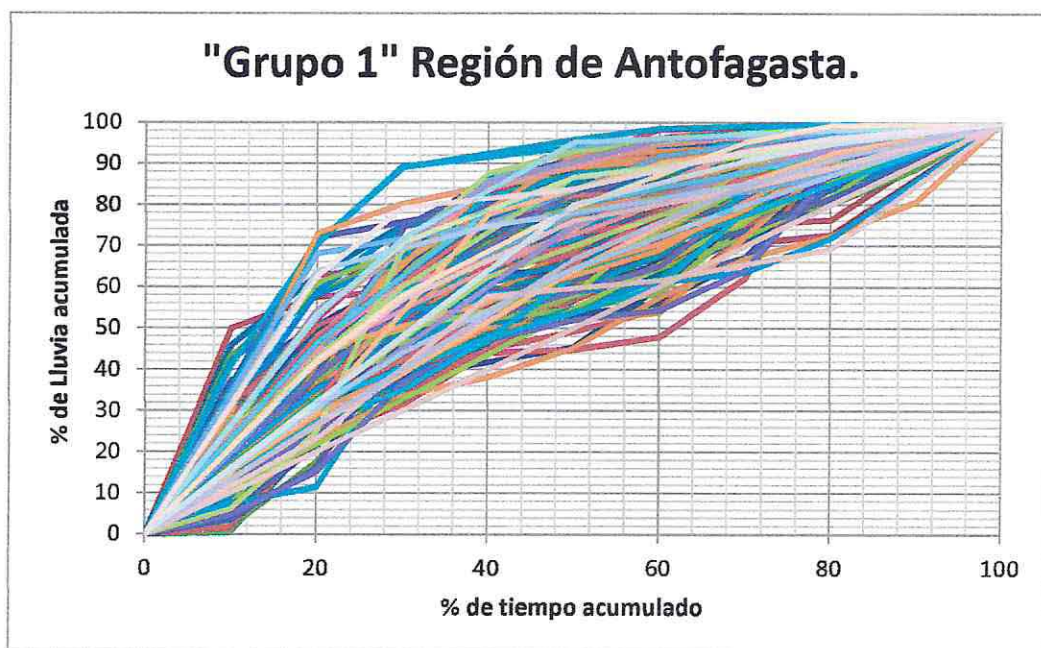


Figura 8.4- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Antofagasta.

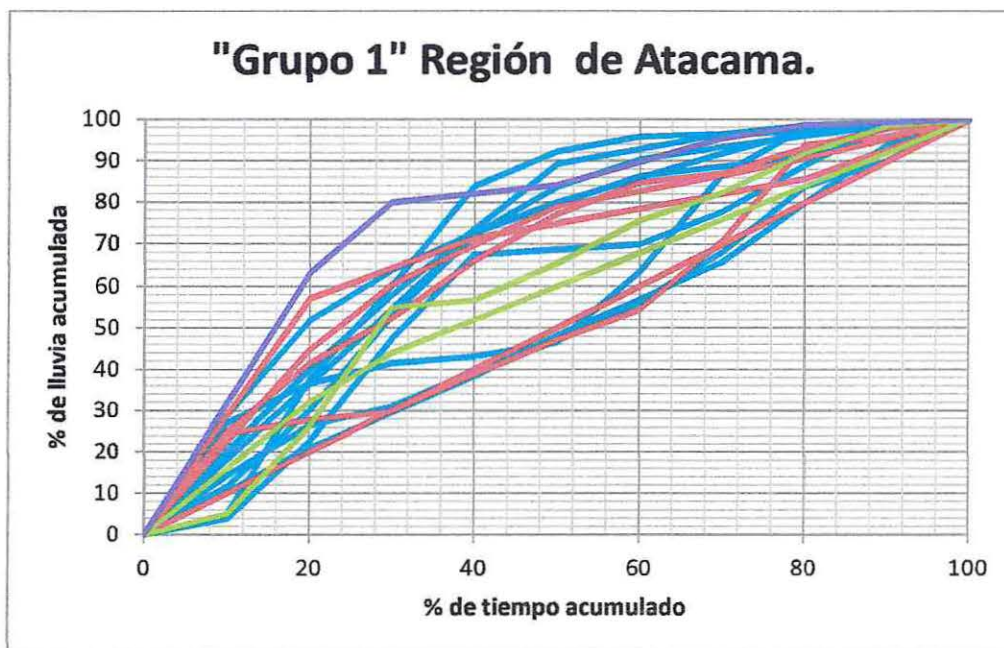


Figura 8.5- Gráfico de datos del "Grupo 1" para la Región de Atacama.

A partir de las similitudes existentes entre los datos del "Grupo 1" se comenzará a analizar la relevancia de las variables de tiempo de duración de los datos y el de la dependencia geográfica.

La primera variable a analizar será la dependencia de duración de la tormenta, es decir, se observará la relevancia de la variable de duración, aplicando la metodología expuesta en el punto 6.7.

Para este análisis se determinarán las horas donde se encuentran los cuartiles de las muestras obtenidas para este grupo en estudio. La Figura 8.6 muestra dichos cuartiles de las duraciones de cada región para el "Grupo 1", donde a partir de esta figura es posible obtener los bloques del 100%, 75% 50% y 25% de los datos para cada región.

Con lo anteriormente descrito será posible obtener las curvas de probabilidades de excedencia de cada bloque de datos, donde estas curvas ayudaran a visualizar la real importancia de la variable de duración.

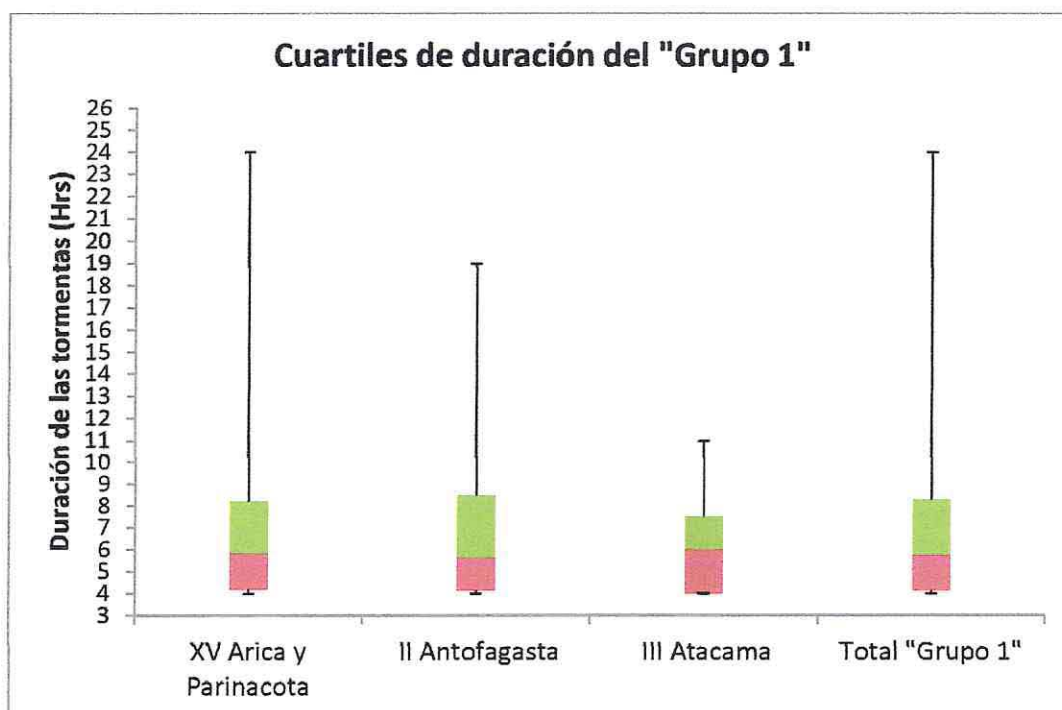


Figura 8.6- Cuartiles de duración del "Grupo 1"

Al obtener las curvas de distintas probabilidades de excedencia de cada bloque de datos (100%, 75%, 50% y 25%), es posible comparar si existen similitudes de comportamiento entre dichos bloques de datos que se dieron a conocer en el punto 6.7 de la metodología, obteniendo las figuras para las regiones en estudio como se presentan a continuación.

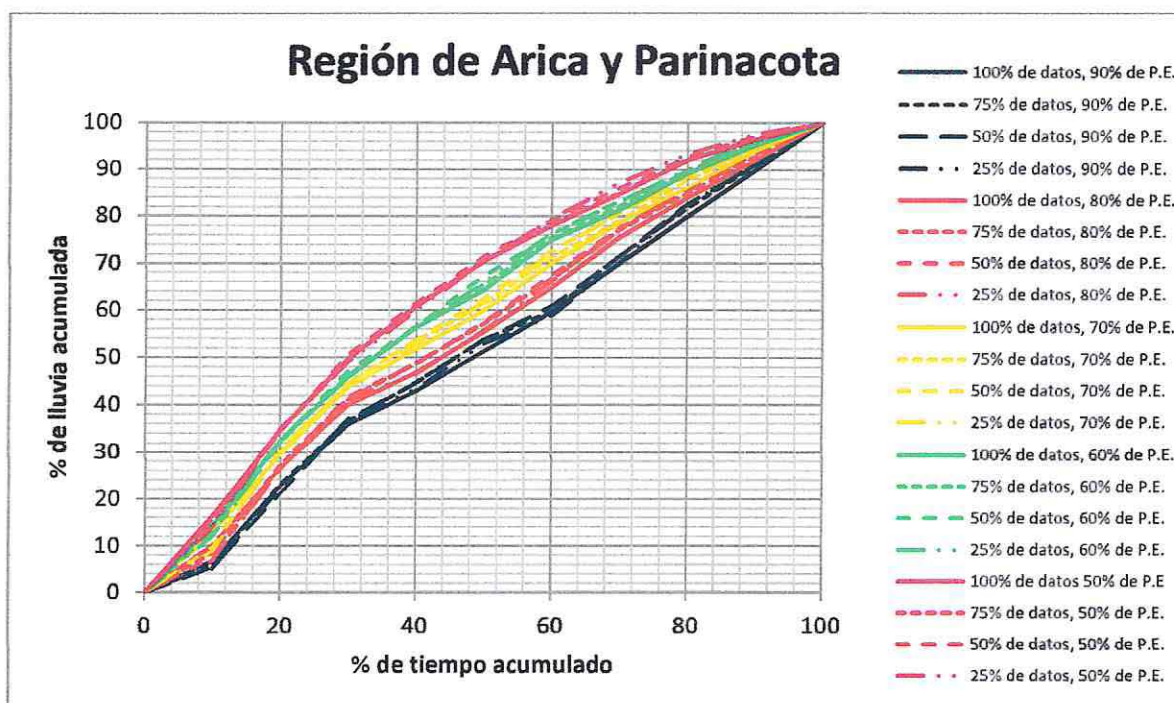


Figura 8.7- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

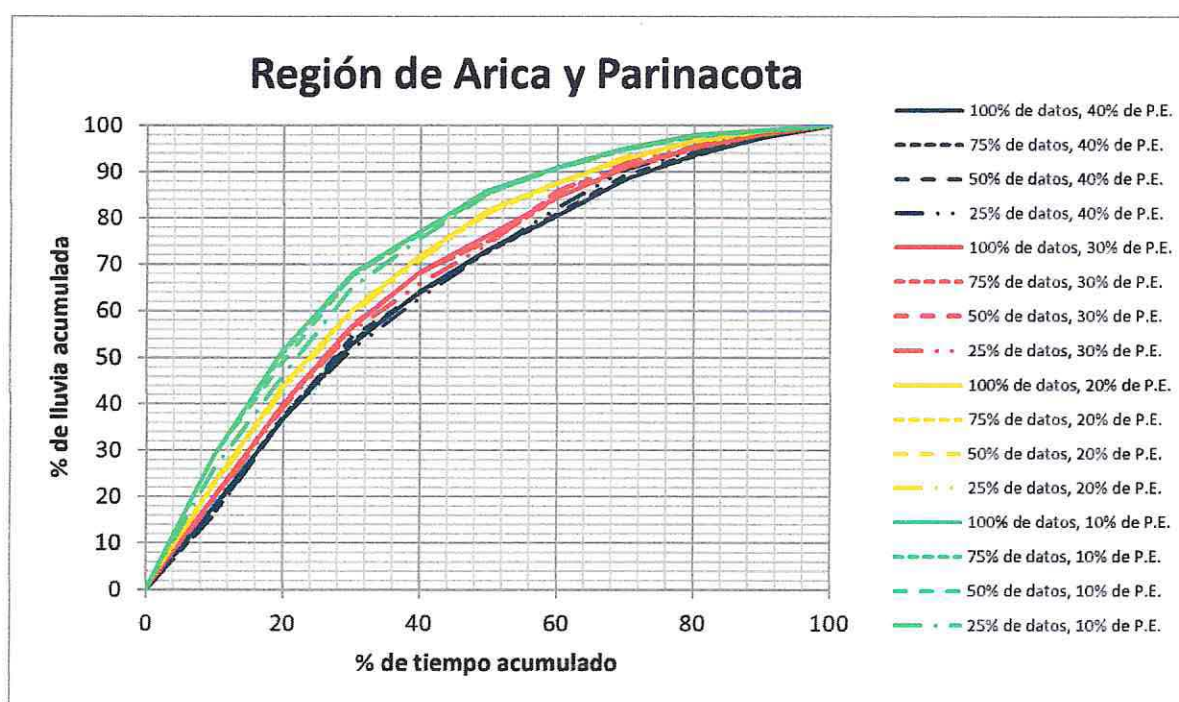


Figura 8.8- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

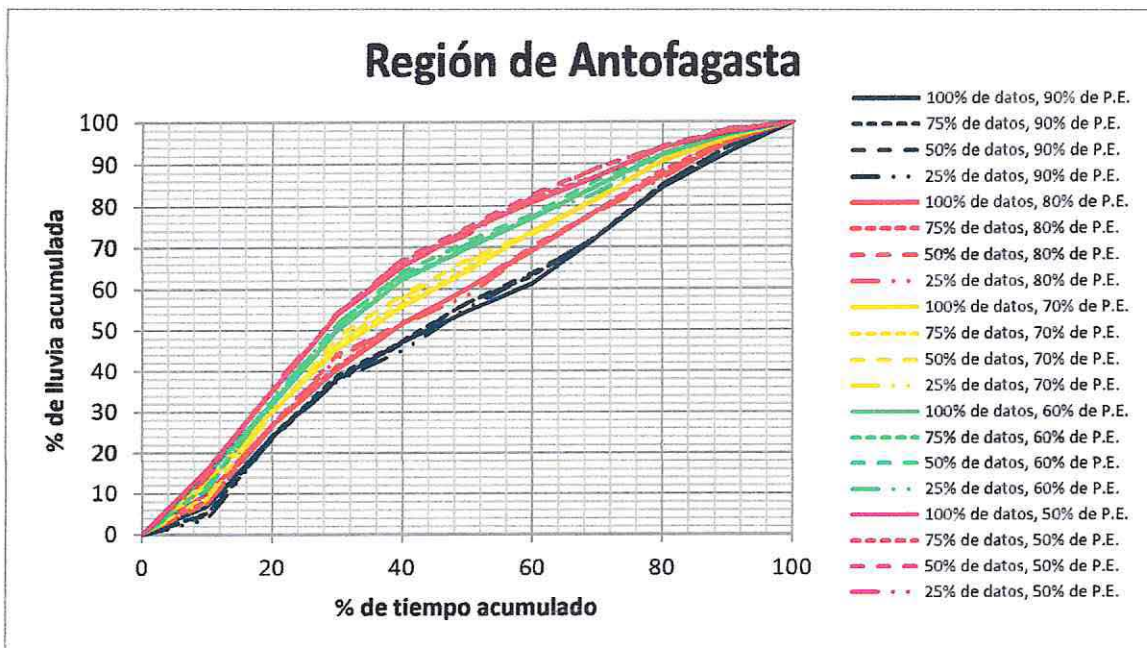


Figura 8.9- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

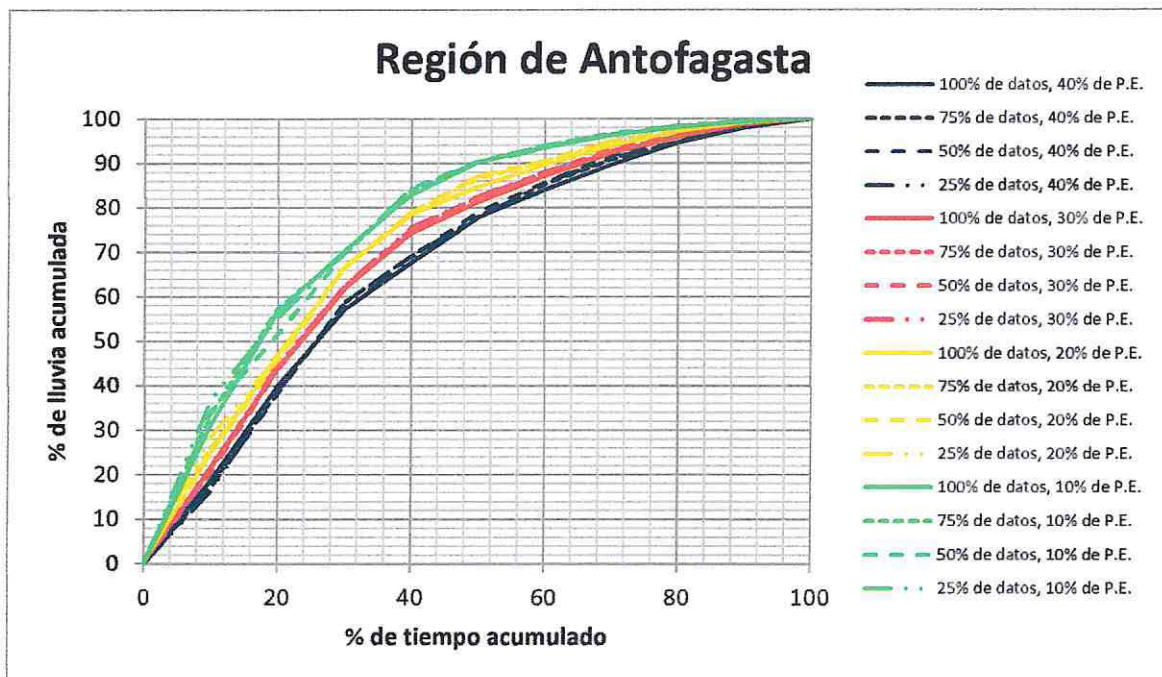


Figura 8.10- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

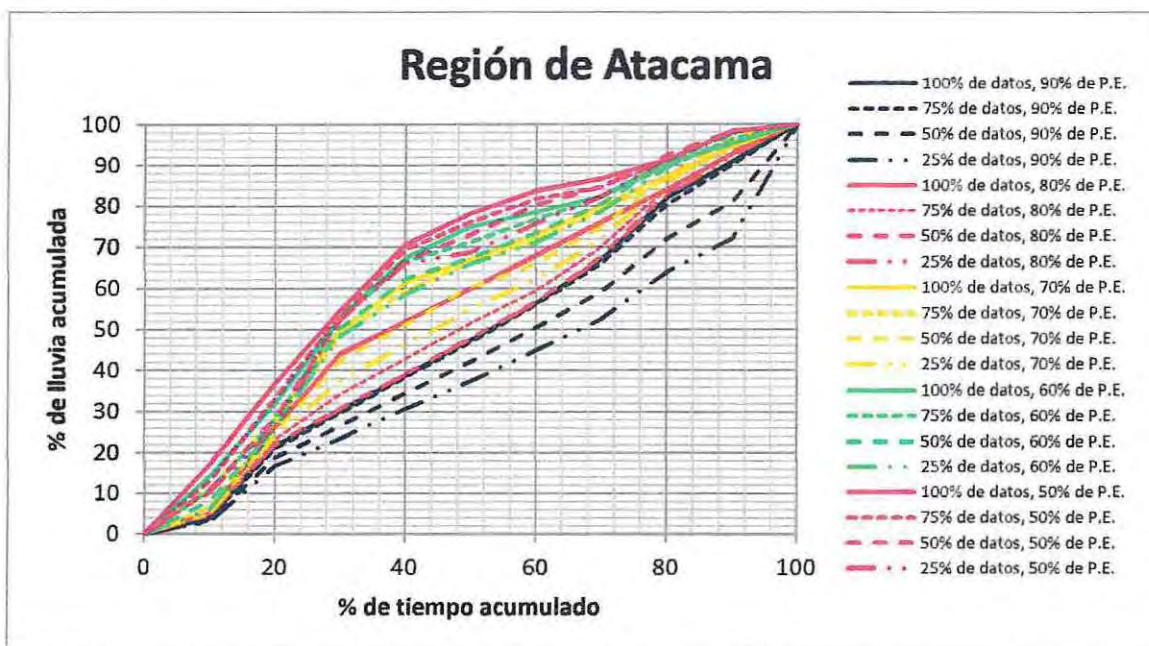


Figura 8.11- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

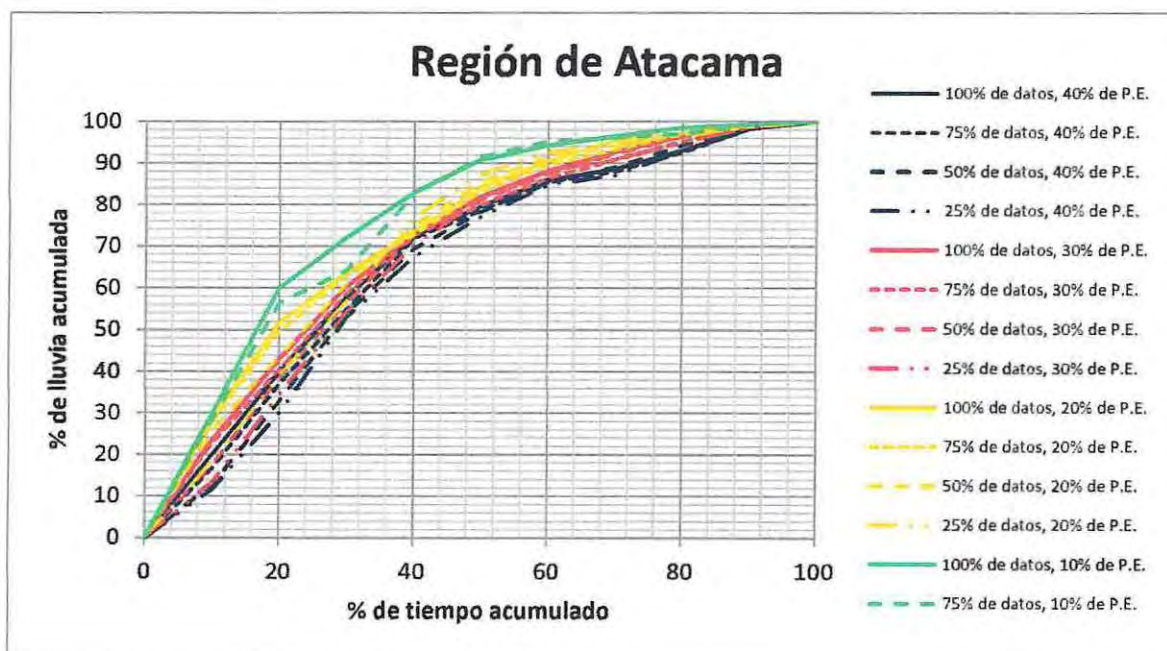


Figura 8.12- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

A partir de las similitudes existentes entre las curvas de probabilidades de excedencia para los distintos bloques de datos, es posible obtener las curvas de probabilidades de excedencia para cada región en el "Grupo 1" tratando los datos regionalizados y sin importar la duración, como fue expuesto en la metodología de este trabajo, eliminando la variable de duración de la tormenta. Lo anteriormente descrito se puede visualizar en las figuras 8.13, 8.14 y 8.15, correspondientes a las Regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, respectivamente.

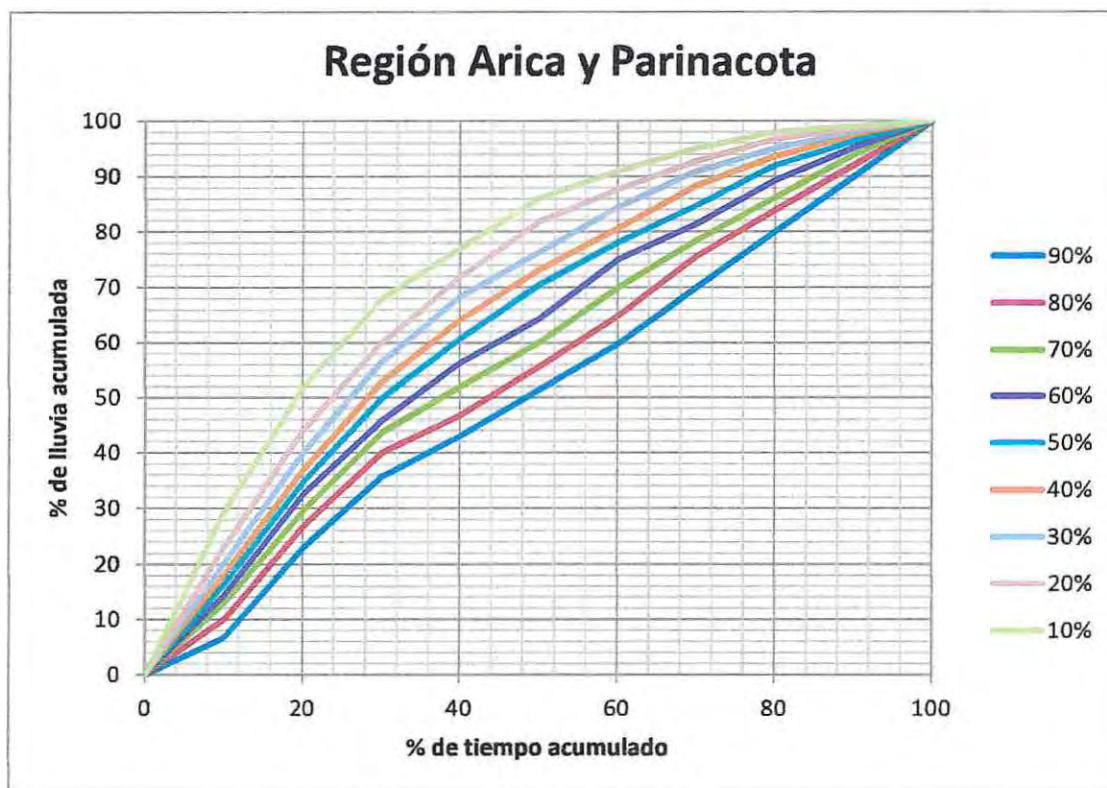


Figura 8.13- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, "Grupo 1".

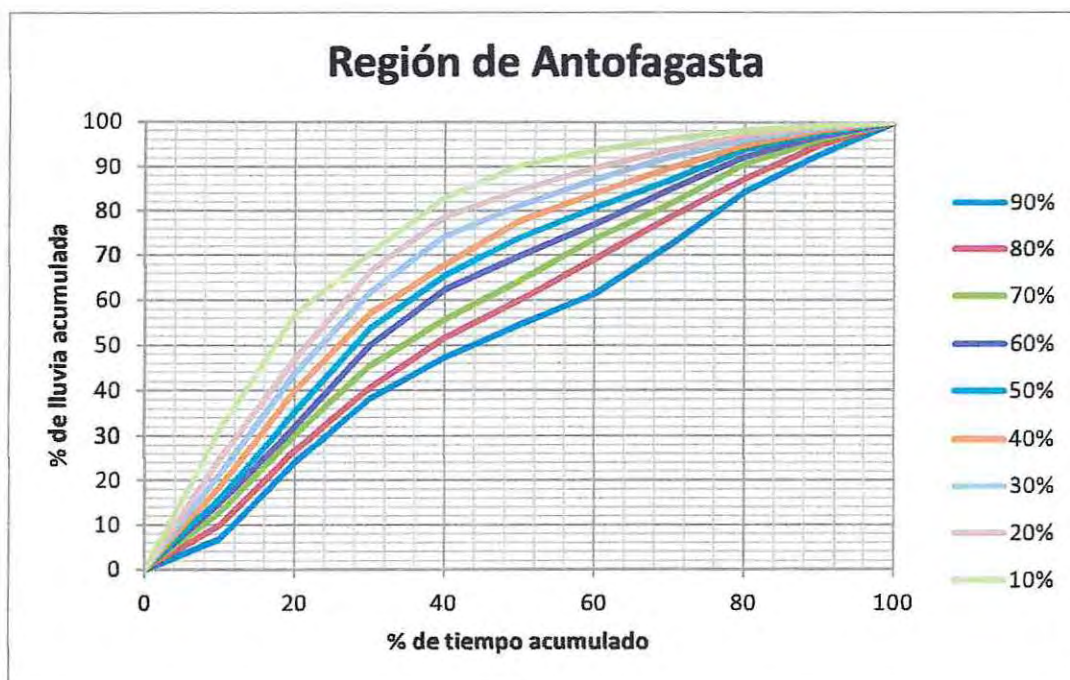


Figura 8.14- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 1".

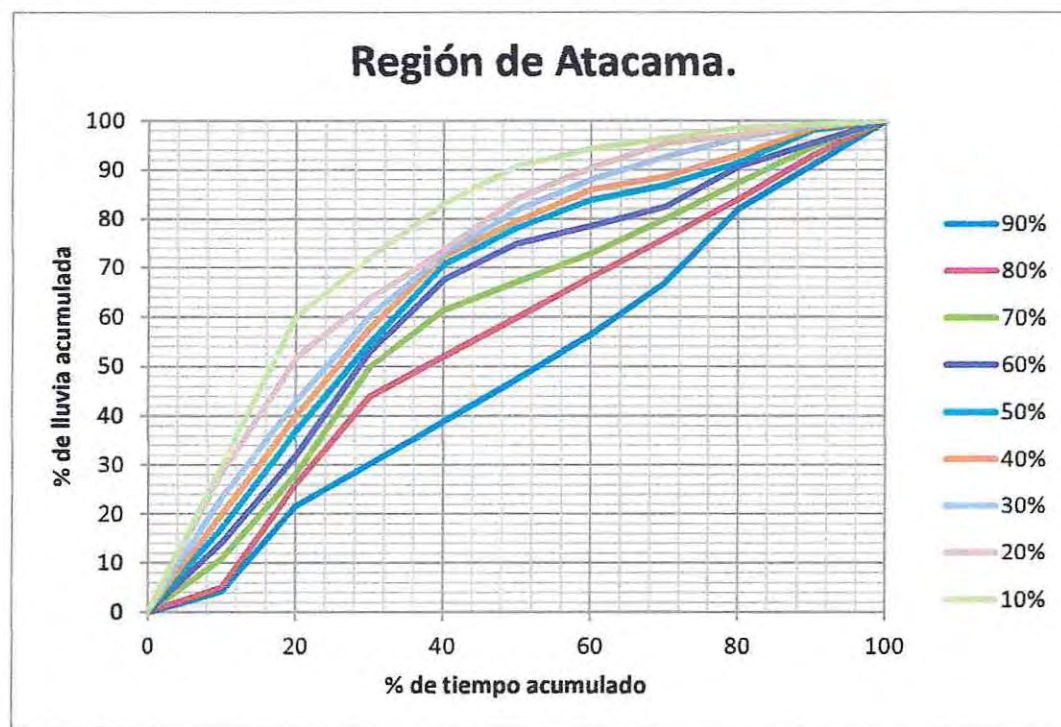


Figura 8.15- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama. "Grupo 1"

Para eliminar la dependencia geográfica de los hietogramas de cada una de las regiones, se ha graficado el total de las curvas con las distintas probabilidades de excedencia de cada región, con la finalidad de visualizar las características similares que puedan tener.

En las figuras 8.16. y 8.17. se observa que las curvas graficadas para una determinada probabilidad de excedencia tienen una misma tendencia entre las tres regiones en estudio.

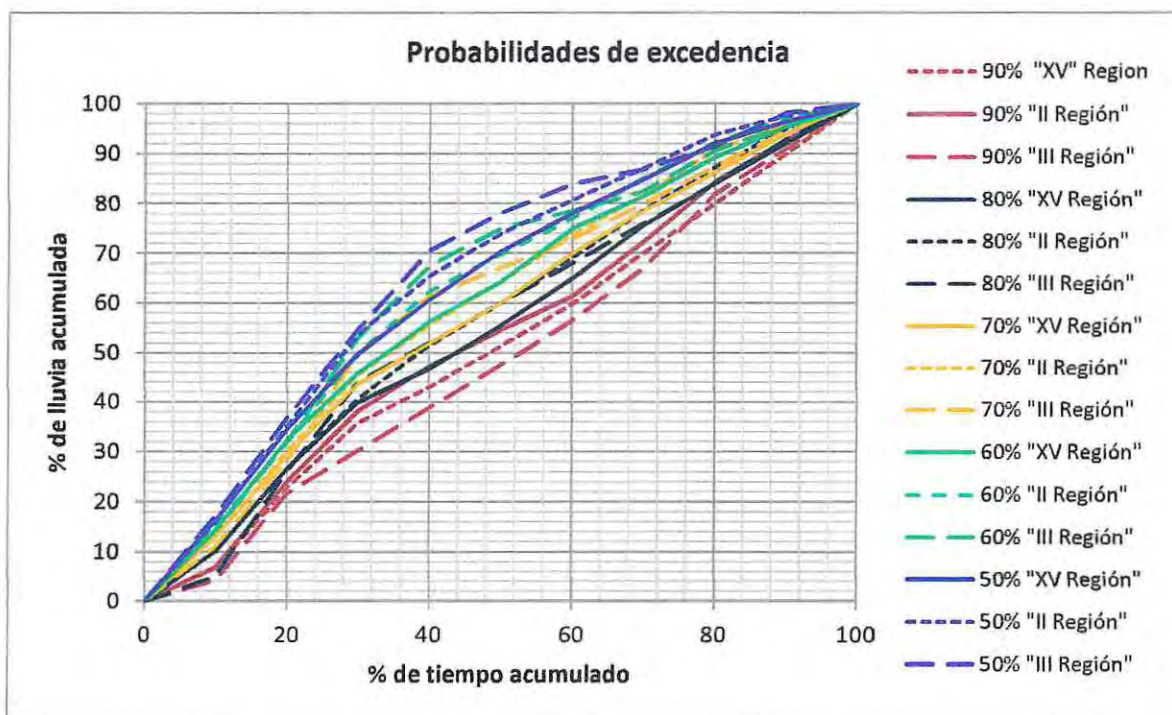


Figura 8.16- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

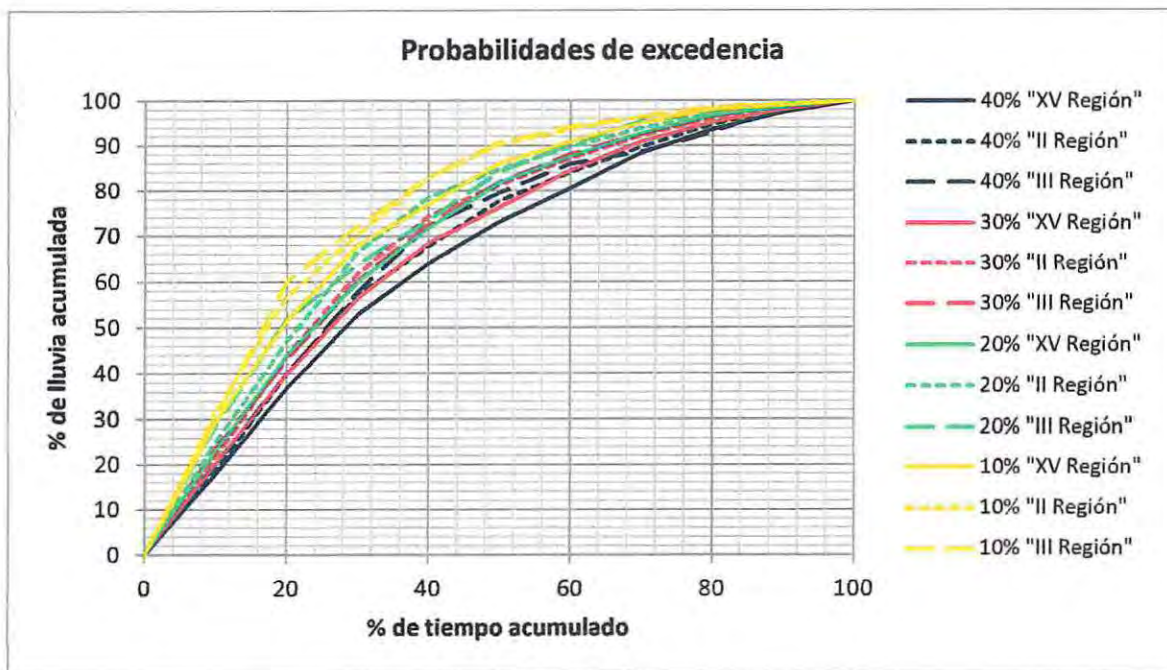


Figura 8.17- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

A partir de lo anteriormente descrito, y con ayuda de las figuras 8.16 y 8.17, fue posible demostrar que de acuerdo a las curvas obtenidas para las distintas probabilidades de excedencia, con respecto a la región que representaban, era posible unir todas las muestras de las tormentas como una muestra única, sin subdividir de acuerdo a las regiones de las cuales fueron obtenidas dichas muestras.

Como resultado de la unión de todas las muestras de tormentas, a causa de las similitudes, puede obtenerse un patrón o perfil único de lluvia para el grupo en estudio. La Figura 8.18 muestra las curvas de distribución para las distintas probabilidades de excedencia para el "Grupo 1" y la Tabla 8.4 muestra la tabla con los porcentajes de precipitación para las curvas anteriormente nombradas.



### 8.2.2 Grupo 2.

En este grupo se seleccionaron las tormentas cuya mayor precipitación se encuentra en el segundo cuartil del porcentaje de tiempo acumulado, como se muestra en la Figura 8.19.

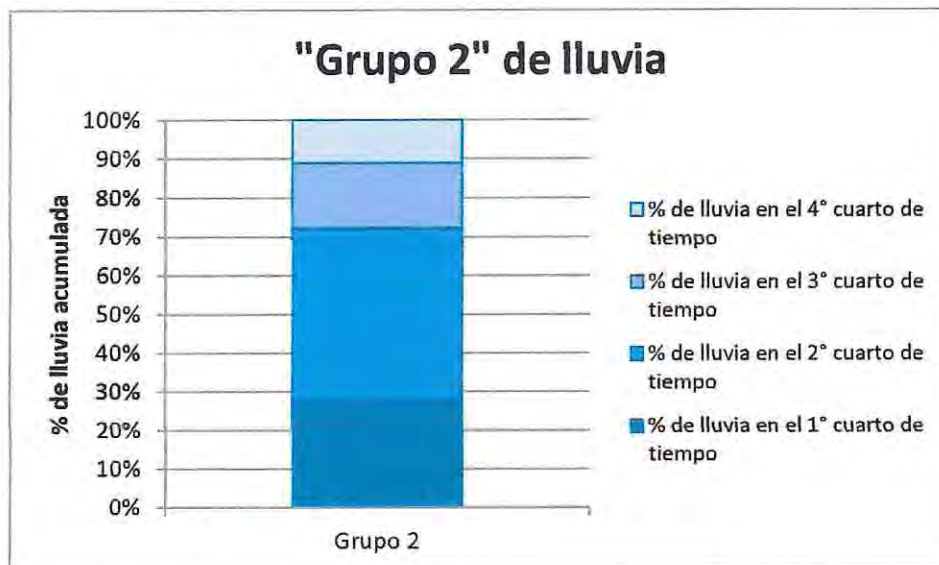


Figura 8.19- Representación de las características del "Grupo 2".

Como resultado de la individualización y agrupamiento, se obtiene la cantidad de 470 tormentas, de un total de 1.301 precipitaciones, pertenecientes a este grupo, las que se distribuyen por región y tiempo de duración, como muestra la Tabla 8.5.

Es posible determinar la probabilidad de ocurrencia (P.O.) para el "Grupo 2" tal como fue expuesto en el punto 6.5.1 de la metodología de este trabajo de título, obteniendo una probabilidad de ocurrencia como se visualiza a continuación.

$$P.O.(\text{Grupo 2}) = 36.13\%$$

Tabla 8.5- Datos de "Grupo 2" por región y horas de duración.

Duración de las tormentas del "Grupo 2"	Región			TOTAL
	XV Arica y Parinacota	II Antofagasta	III Atacama	
4	95	59	8	162
5	68	34	3	105
6	34	24	2	60
7	23	19	2	44
8	13	16	1	30
9	9	6	2	17
10	11	7	3	21
11	3	4	0	7
12	6	0	1	7
13	1	0	2	3
14	2	1	1	4
15	1	2	1	4
16	0	0	0	0
17	1	0	2	3
18	1	0	0	1
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	1	0	0	1
23	0	0	0	0
24	0	0	1	1
TOTAL	269	172	29	470

Una vez identificadas las precipitaciones que pertenecen al "Grupo 2", pueden determinarse las características generales que éste puede tener. Al graficar las tormentas registradas para las regiones que se encuentran en estudio, se observa que éstas tienen un patrón de lluvia para el grupo en estudio. Lo anterior se observa en las figuras 8.20, 8.21 y 8.22, correspondientes a las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, respectivamente.

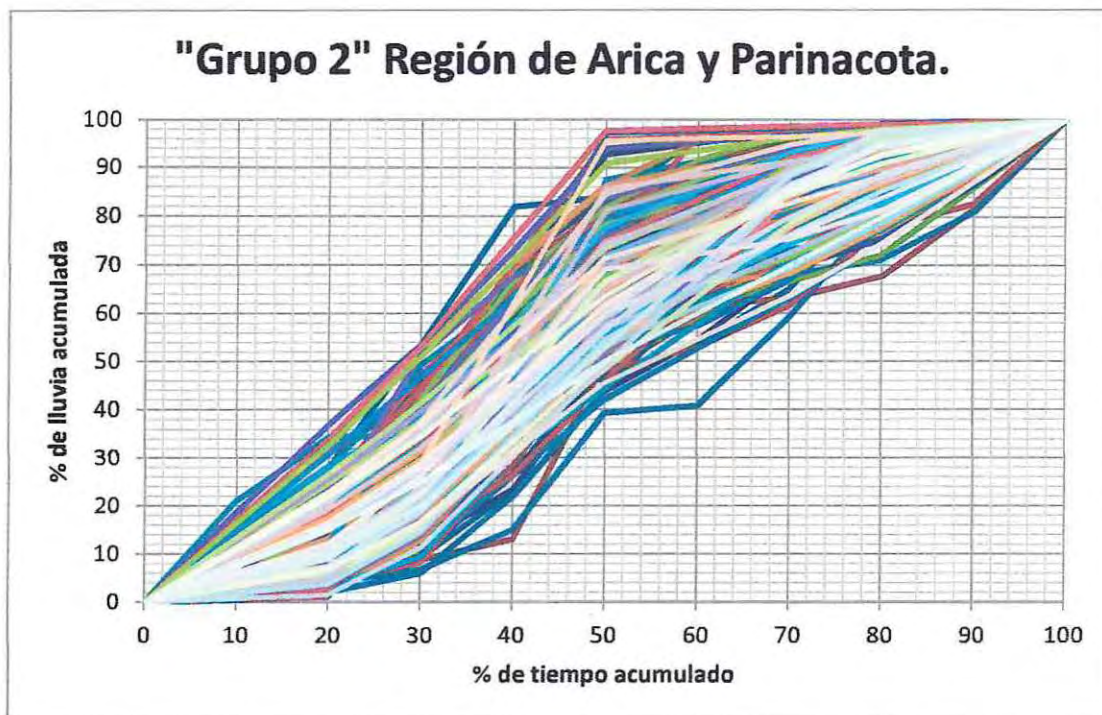


Figura 8.20- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Arica y Parinacota.

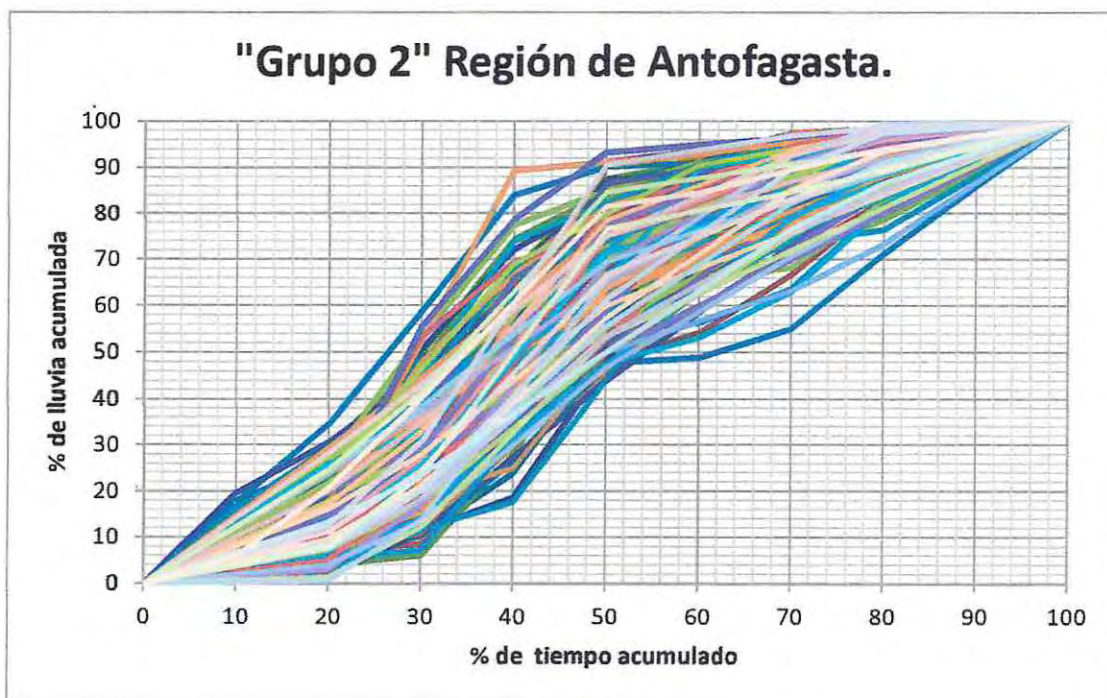


Figura 8.21- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Antofagasta.

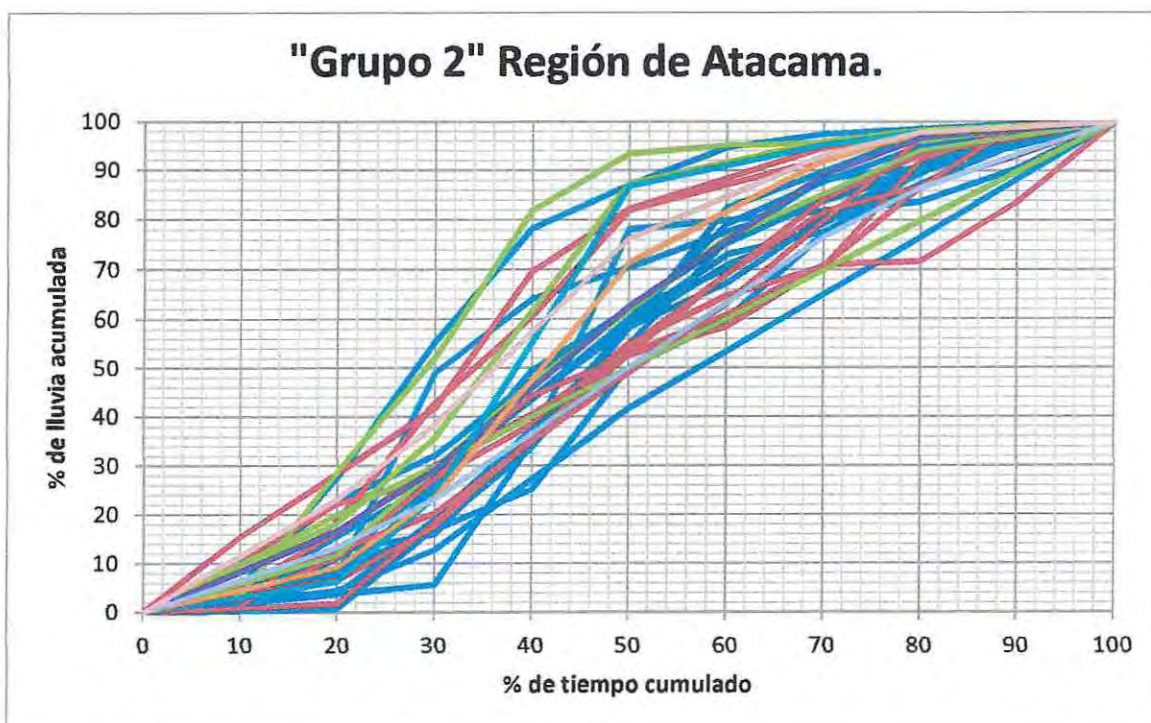


Figura 8.22- Gráfico de datos del "Grupo 2" para la Región de Atacama.

A partir de las tendencias similares entre los datos del "Grupo 2" se comenzará a analizar la relevancia de las variables de tiempo de duración de los datos y el de la dependencia geográfica.

La primera variable a analizar será la de dependencia de duración de la tormenta, es decir, se observará la relevancia de la variable de duración, aplicando la metodología expuesta en el punto 6.7.

Para este análisis se determinó las horas en las que se encuentran los cuartiles de las muestras obtenidas para este grupo en estudio. En la Figura 8.23 se observan cuartiles de las duraciones de cada región para el "Grupo 2". A partir de esta figura se obtienen los bloques del 100%, 75% 50% y 25% de los datos para cada región.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se obtendrán las curvas de probabilidades de excedencia de cada bloque de datos. Estas curvas permitirán evaluar la importancia de la variable de la duración de las tormentas.

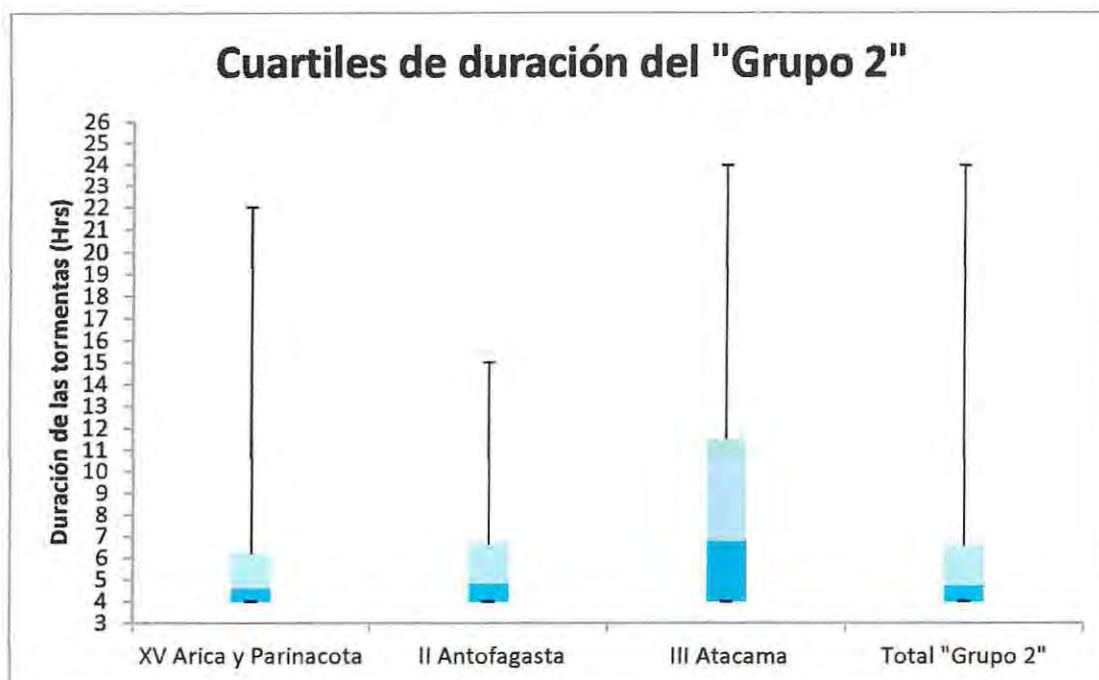


Figura 8.23- Cuartiles de duración del "Grupo 2"

Una vez obtenidas las curvas de distintas probabilidades de excedencia de cada bloque de datos (100%, 75%, 50% y 25%), es posible determinar la existencia de similitudes de comportamiento entre dichos bloques dados a conocer en el punto 6.7 de la metodología. Así se obtienen las figuras que se presentan a continuación, para las distintas regiones en estudio.

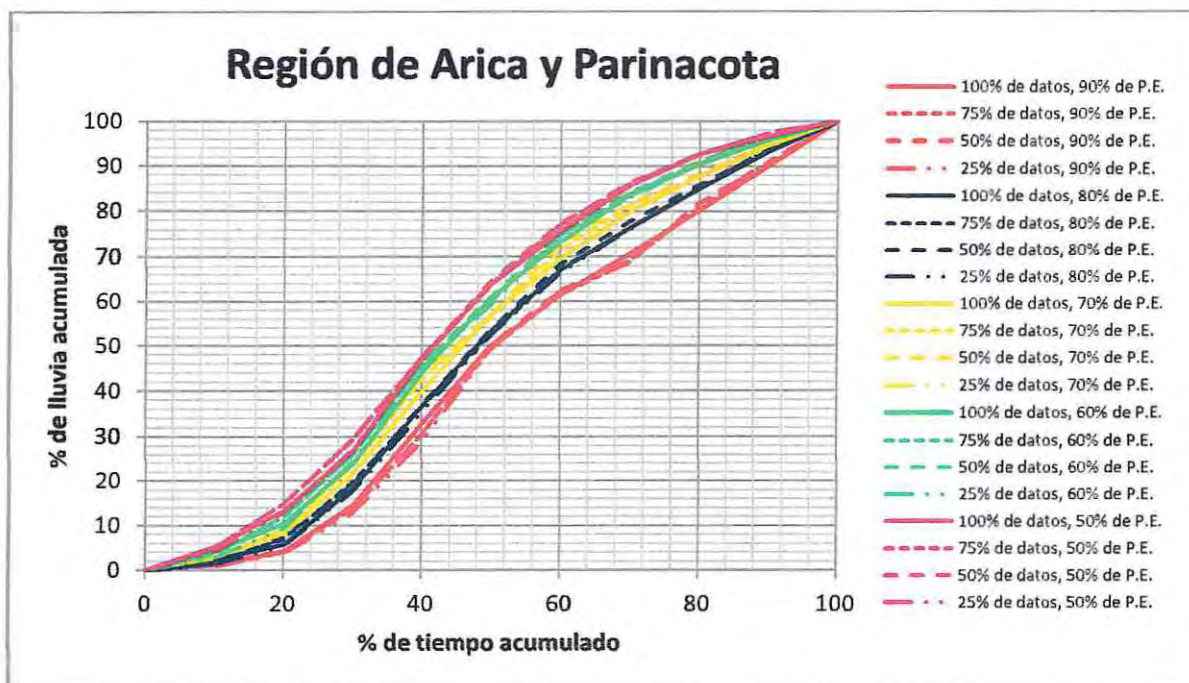


Figura 8.24- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

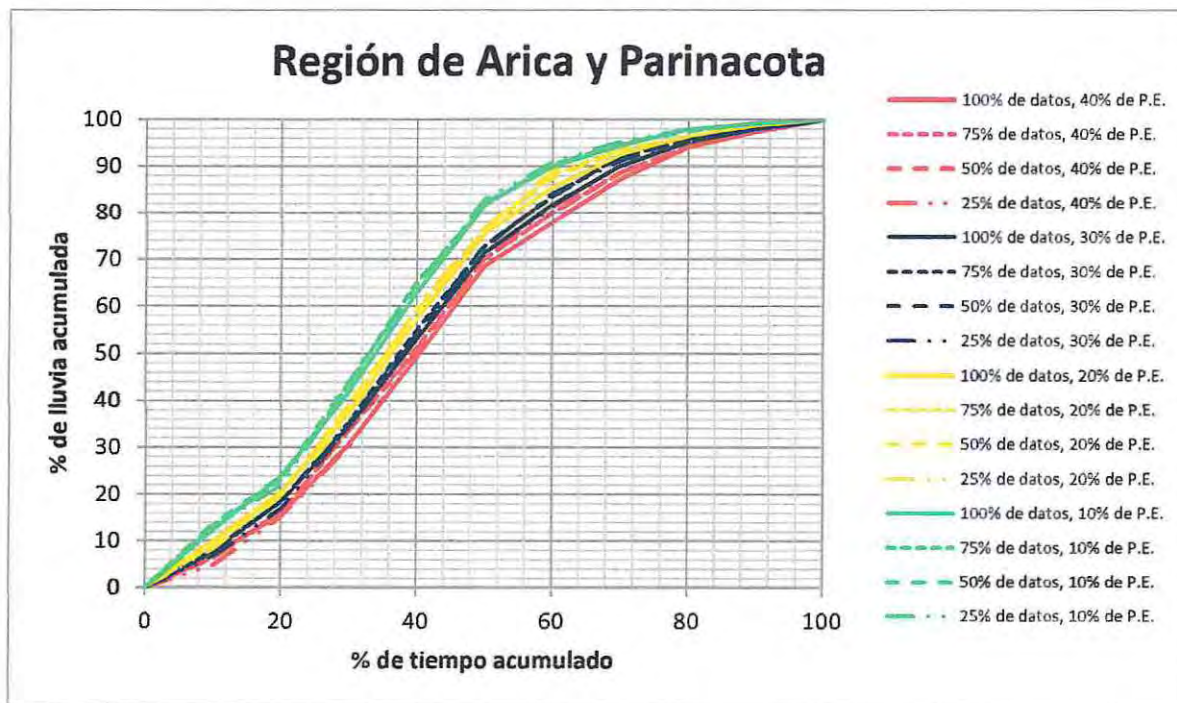


Figura 8.25- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

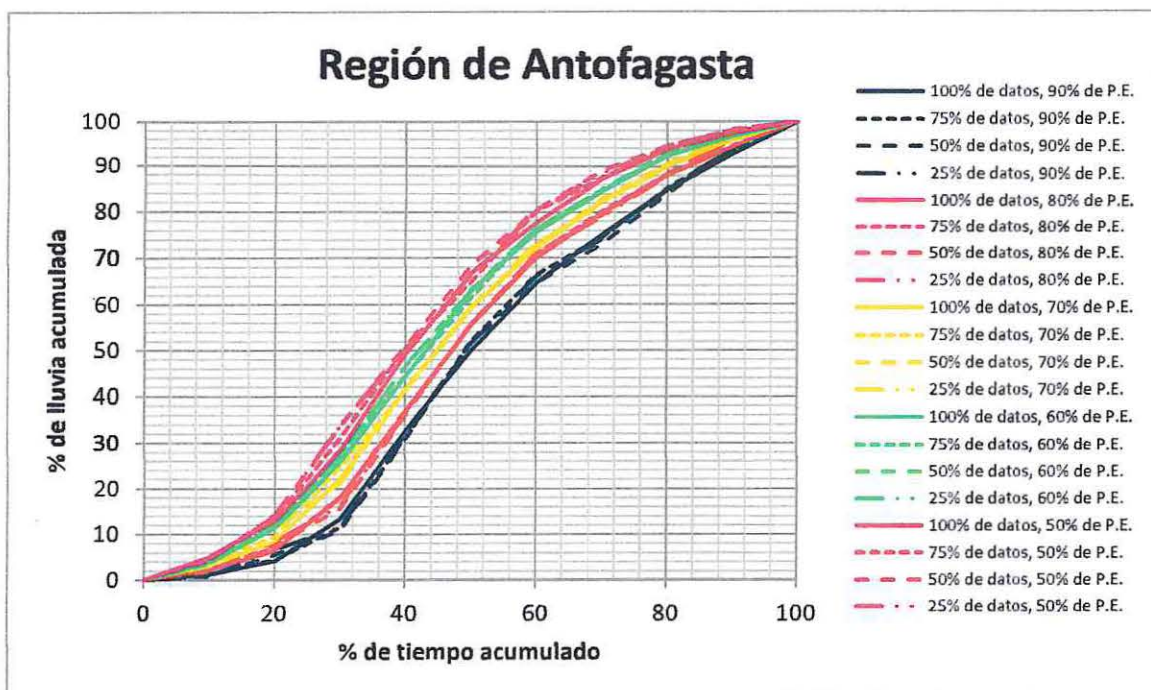


Figura 8.26- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

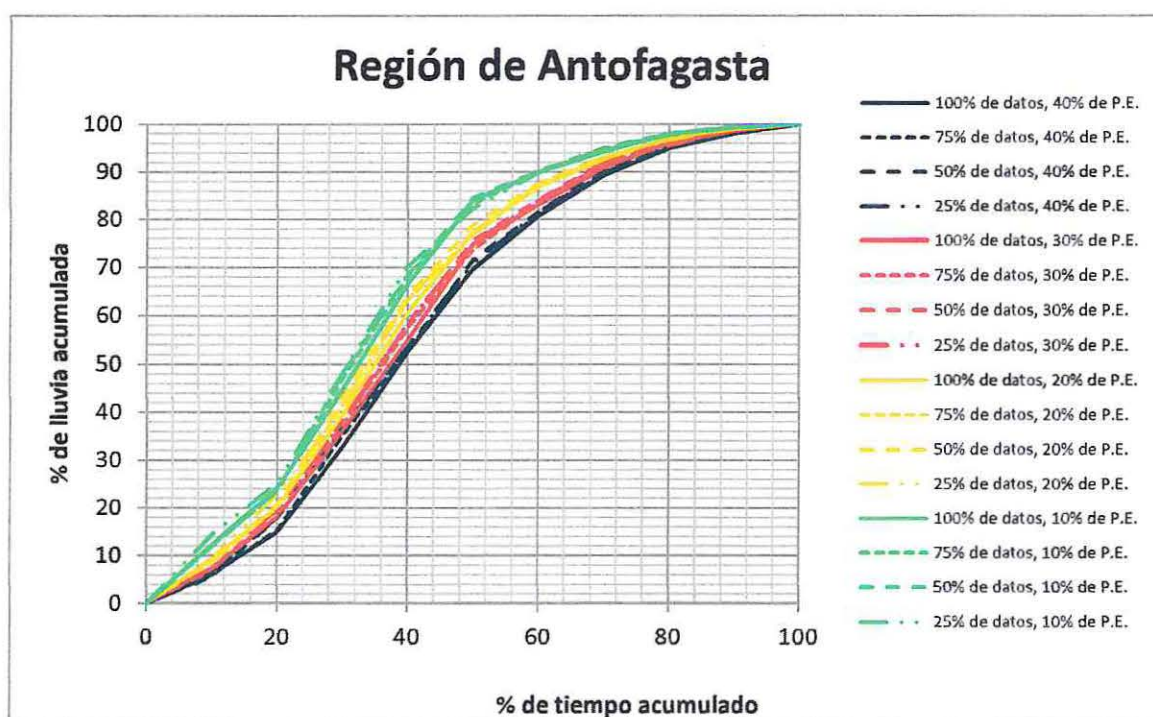


Figura 8.27- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

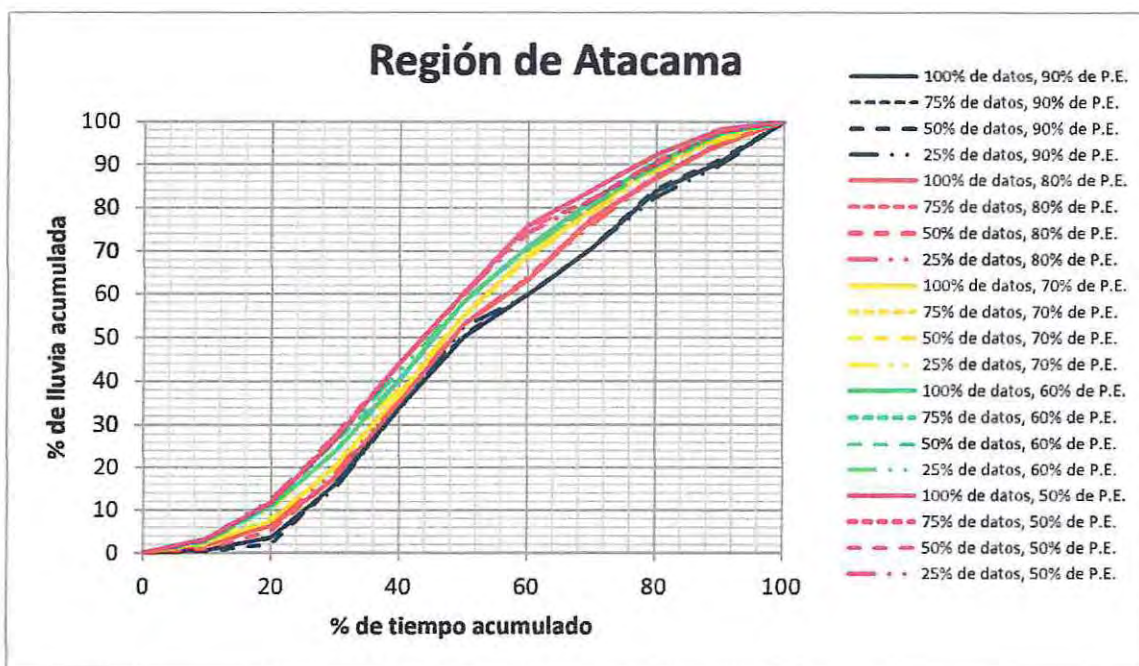


Figura 8.28- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

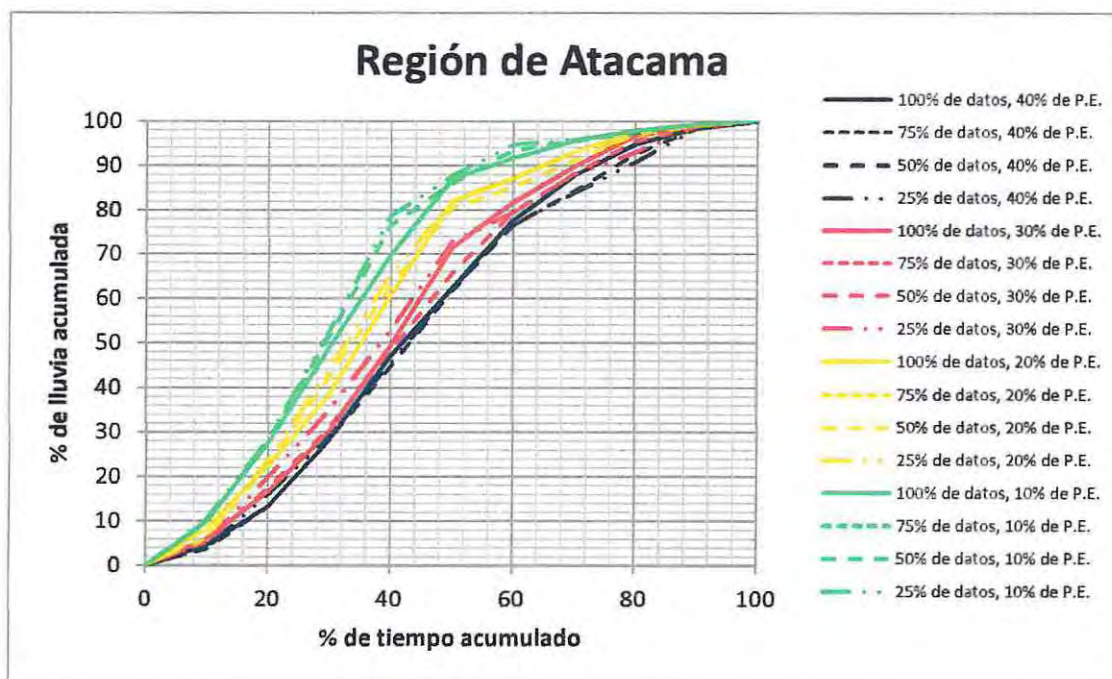


Figura 8.29- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

A partir de las similitudes existentes entre las curvas de probabilidades de excedencia para los distintos bloques de datos, es posible obtener las curvas de probabilidades de excedencia para cada región en el "Grupo 2", según fue expuesto en la metodología de este trabajo, eliminando la variable de duración de la tormenta. Lo anteriormente descrito se puede visualizar en las figuras 8.30, 8.31 y 8.32, correspondientes a las Regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, respectivamente.

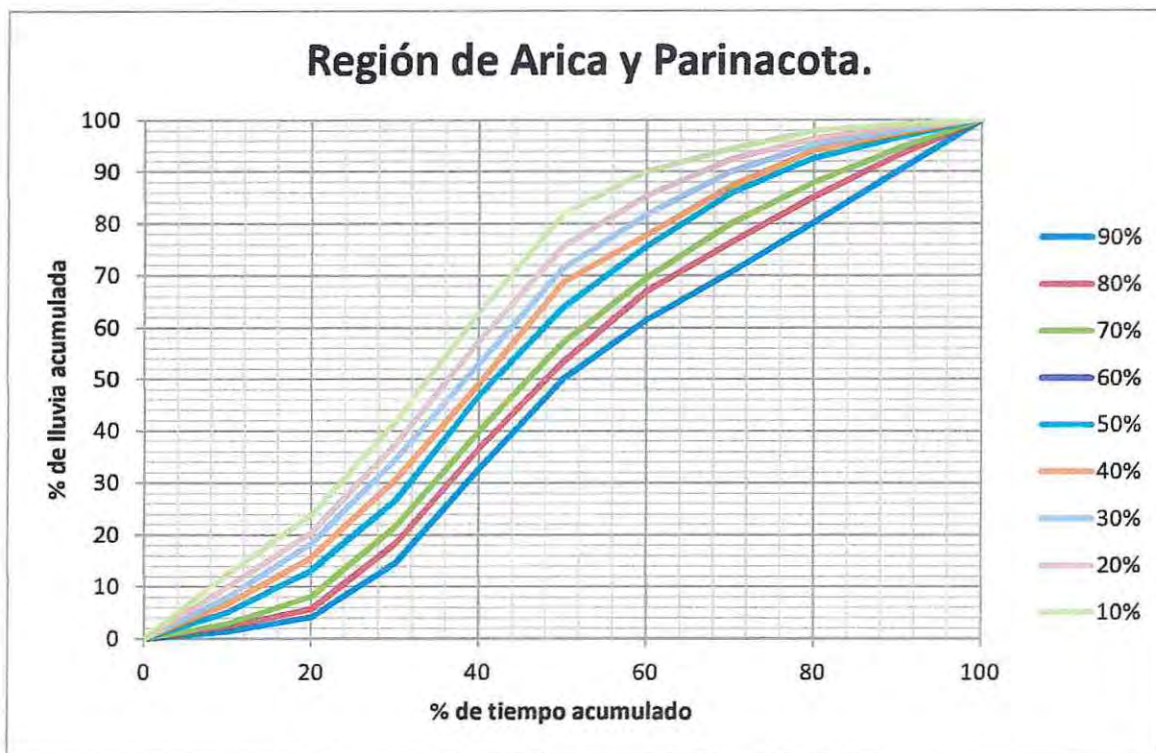


Figura 8.30- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, "Grupo 2".

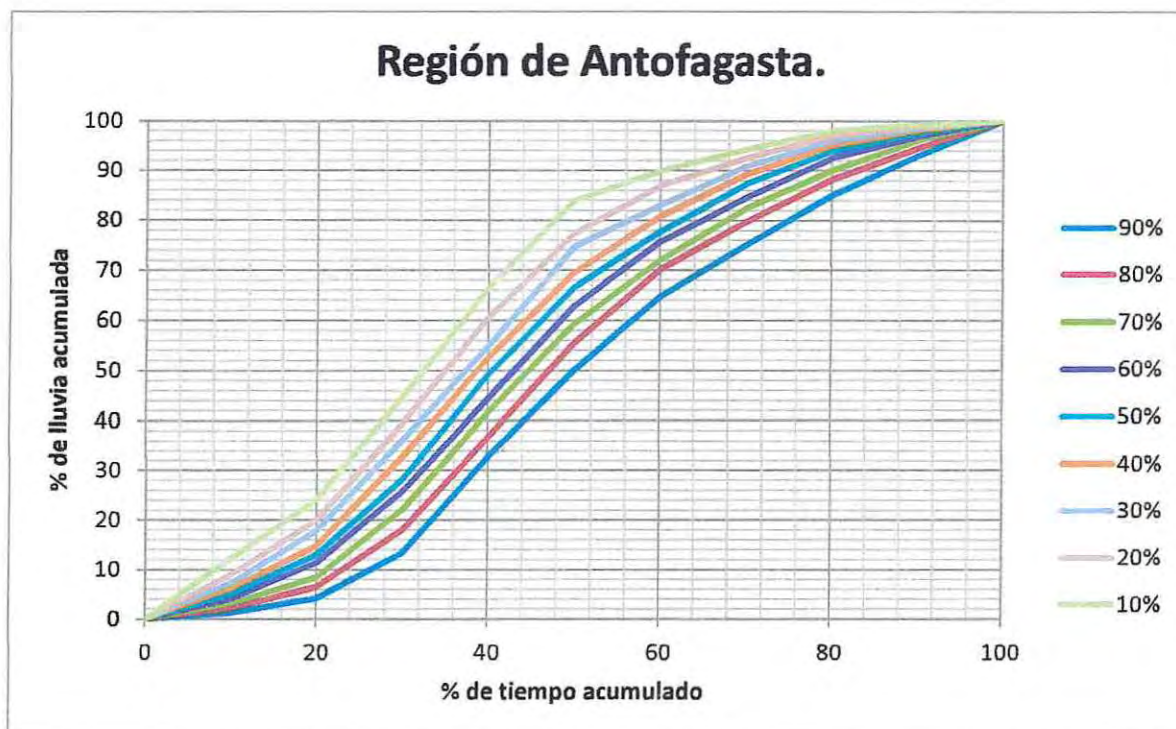


Figura 8.31- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 2".

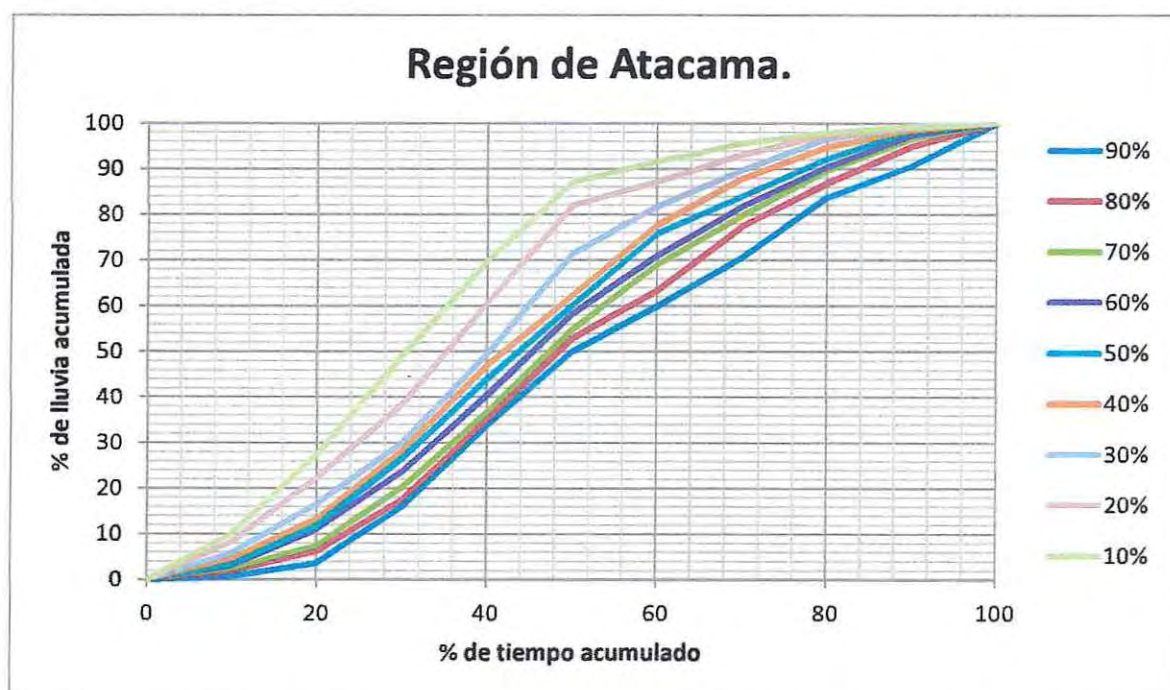


Figura 8.32- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama, "Grupo 2".

Con la finalidad de eliminar la dependencia geográfica de los hietogramas de cada una de las regiones, se han graficado las distintas curvas con las distintas probabilidades de excedencia para cada región, lo que permite visualizar las características similares que puedan tener.

En las figuras 8.33 y 8.34 se puede observar que las curvas graficadas para una determinada probabilidad de excedencia tienen una tendencia similar entre las tres regiones en estudio.

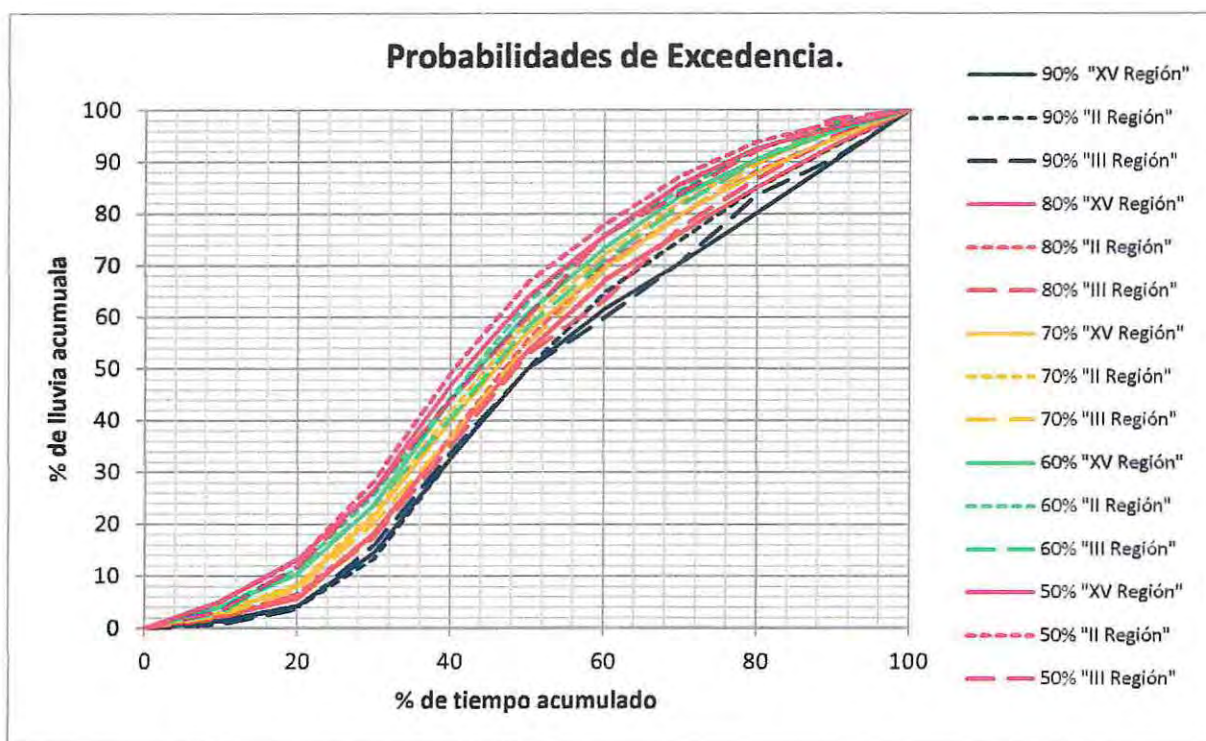


Figura 8.33- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

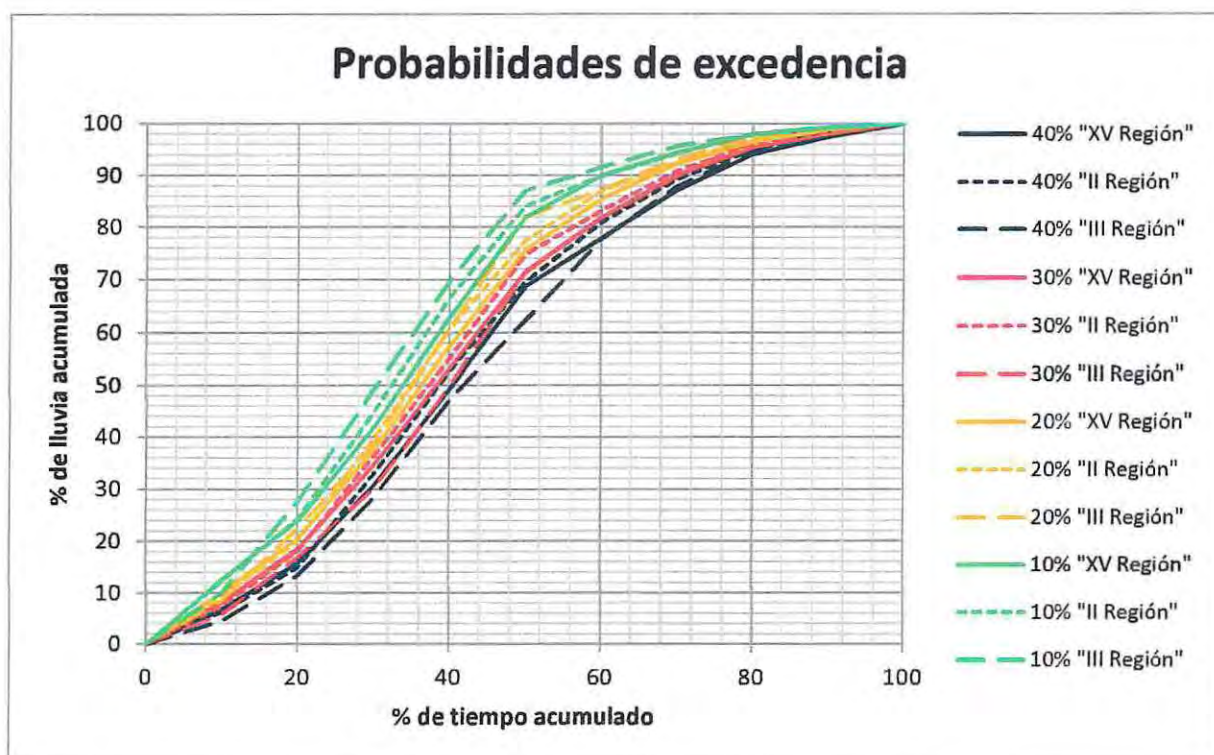


Figura 8.34- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

Según lo anteriormente descrito, y analizando las figuras 8.33 y 8.34, se demuestra que de acuerdo a las curvas obtenidas para las distintas probabilidades de excedencia, con respecto a la región que representaban, pueden unirse todas las muestras de las tormentas como una muestra única, sin subdividirlas por las regiones de las cuales fueron obtenidas.

Como resultado de la unión de todas las muestras de tormentas, puede determinarse un perfil o patrón único de lluvia para el "Grupo 2". La Figura 8.35 muestra las curvas de distribución para las distintas probabilidades de excedencia para el grupo señalado y la Tabla 8.6 nos muestra los porcentajes de precipitación de las curvas anteriormente nombradas.



### 8.2.3 Grupo 3.

A este grupo pertenecen las tormentas que presentan una mayor precipitación en el tercer cuartil del porcentaje de tiempo acumulado (ver Figura 8.36).

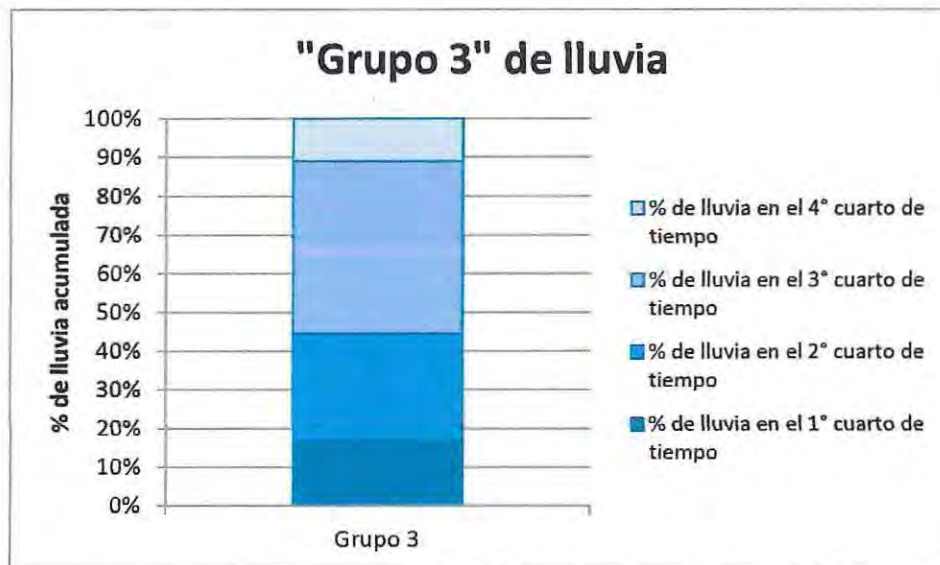


Figura 8.36- Representación de las características del "Grupo 3".

La individualización y agrupamiento da, como resultado, la cantidad de 362 tormentas pertenecientes a este grupo, de un total de 1.301 precipitaciones. Estas se distribuyen por región y tiempo de duración, tal como muestra la Tabla 8.7.

Para el "Grupo 3", la probabilidad de ocurrencia (P.O.) fue obtenida con la metodología expuesta en el punto 6.5.1, dando como resultado la siguiente probabilidad.

$$P.O.(\text{Grupo 3}) = 27.82\%$$

Tabla 8.7- Datos de "Grupo 3" por región y horas de duración.

Duración de las tormentas del "Grupo 3"	Región			TOTAL
	XV Arica y Parinacota	II Antofagasta	III Atacama	
4	78	37	9	124
5	42	33	2	77
6	38	19	4	61
7	23	15	1	39
8	12	9	1	22
9	6	3	1	10
10	4	2	1	7
11	5	1	0	6
12	3	0	0	3
13	4	0	1	5
14	0	1	1	2
15	1	0	1	2
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	1	1
19	0	0	1	1
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0
28	0	0	1	1
44	1	0	0	1
TOTAL	217	120	25	362

Teniendo identificadas las precipitaciones pertenecientes al "Grupo 3", es posible observar las características generales que éste puede tener. Al graficar las tormentas existentes para las regiones en estudio, se observa que éstas tienen un patrón de lluvia para el grupo señalado, independiente de su duración. Esto se observa en las figuras 8.37 (Región de Arica y Parinacota), 8.38 (Región de Antofagasta) y 8.39 (Región de Atacama).

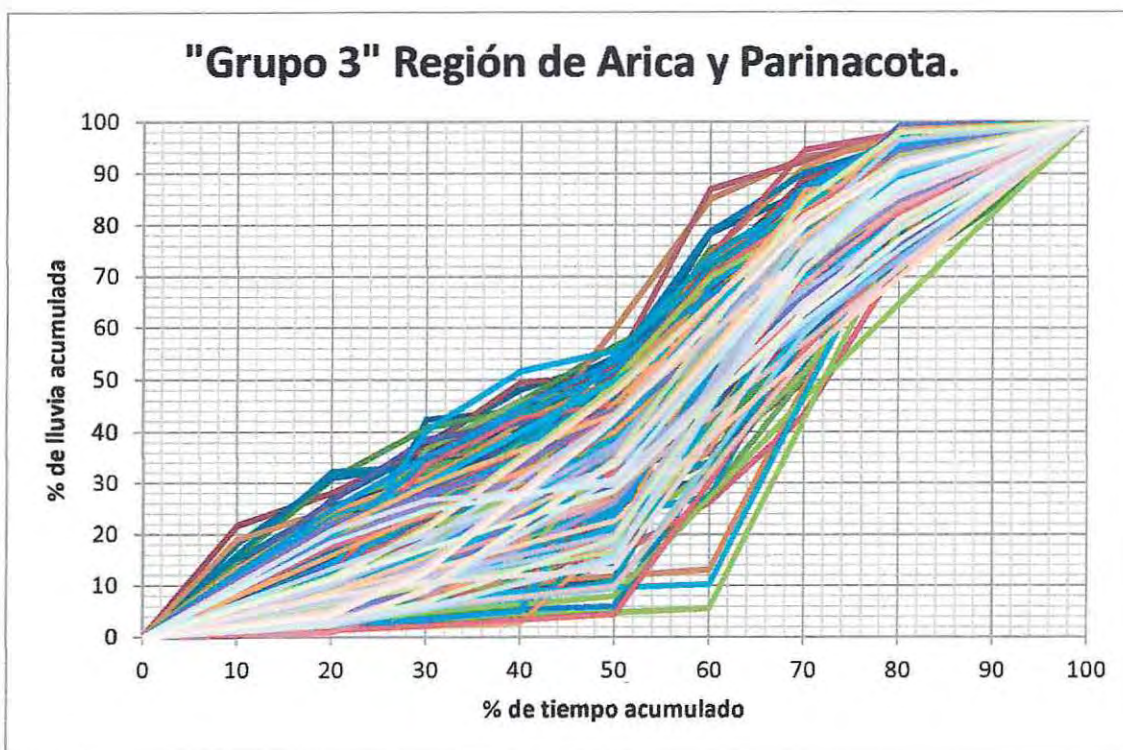


Figura 8.37- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Arica y Parinacota.

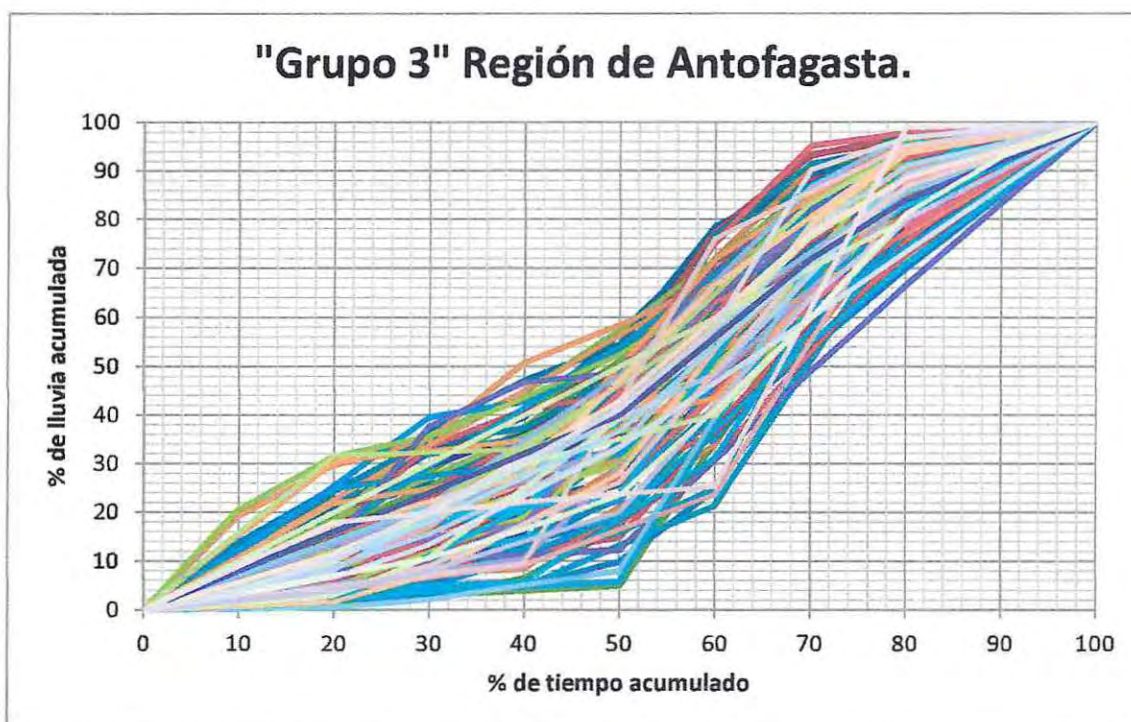


Figura 8.38- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Antofagasta.

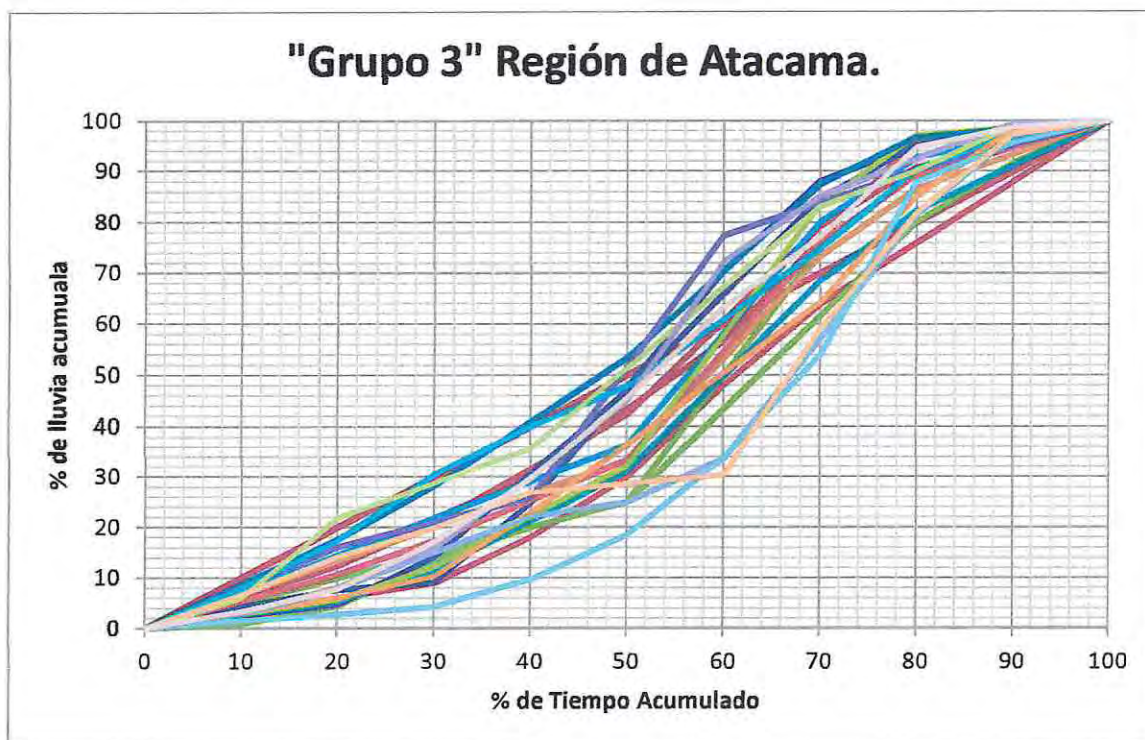


Figura 8.39- Gráfico de datos del "Grupo 3" para la Región de Atacama.

Considerando las similitudes existentes entre los datos del "Grupo 3" se comenzará a analizar la relevancia de las variables de tiempo de duración de los datos y de la dependencia geográfica.

La primera variable que se analizará será la de dependencia de duración de la tormenta. Esto quiere decir que, aplicando la metodología expuesta en el punto 6.7, se observará la relevancia de la variable de duración.

Para realizar este análisis se determinó las horas en las que se encuentran los cuartiles de las muestras obtenidas para el "Grupo 3". La Figura 8.40 muestra los cuartiles de las duraciones de cada región para el grupo en estudio, a partir de la cual se obtienen los bloques del 100%, 75% 50% y 25% de los datos para las regiones estudiadas.

A partir de lo anteriormente descrito será posible obtener las curvas de probabilidades de excedencia de cada bloque de datos, las cuales permitirán evaluar la importancia de la variable de duración de las tormentas.

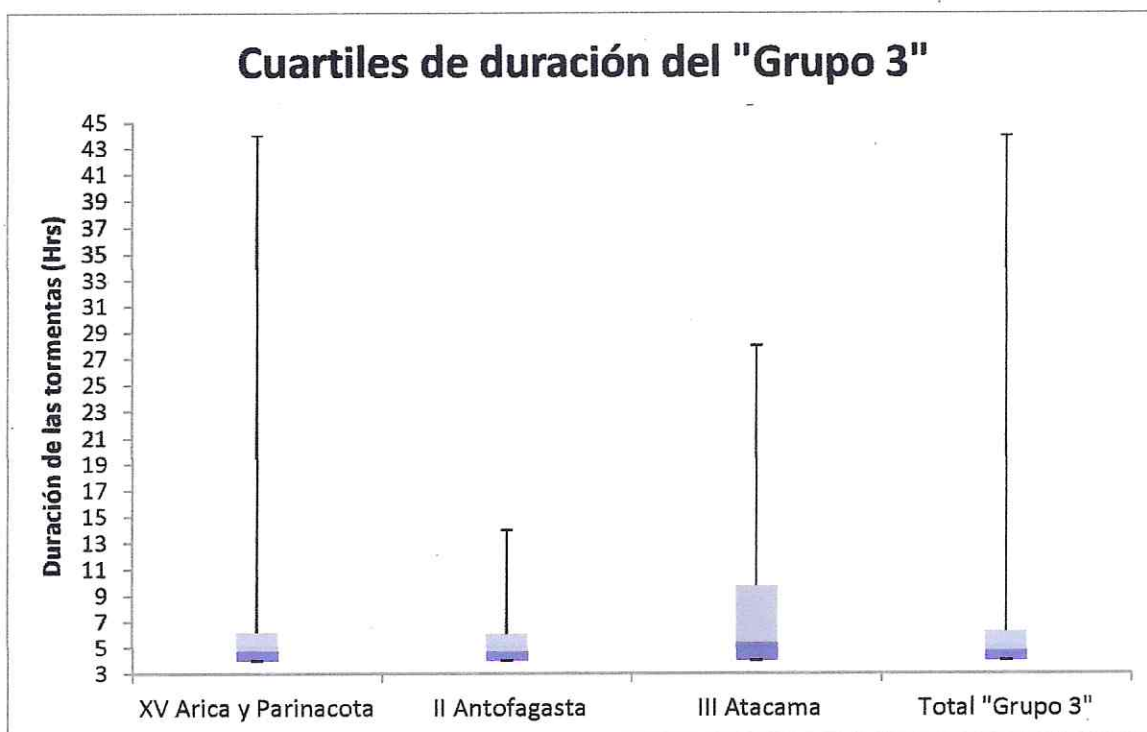


Figura 8.40- Cuartiles de duración del "Grupo 3"

A partir de las curvas de distintas probabilidades de excedencia de cada bloque de datos (100%, 75%, 50% y 25%), puede establecerse si existen similitudes de comportamiento entre dichos bloques de datos que se dieron a conocer en el punto 6.7 de la metodología. De esta manera se obtienen, para las regiones en estudio, las figuras que se presentan a continuación.

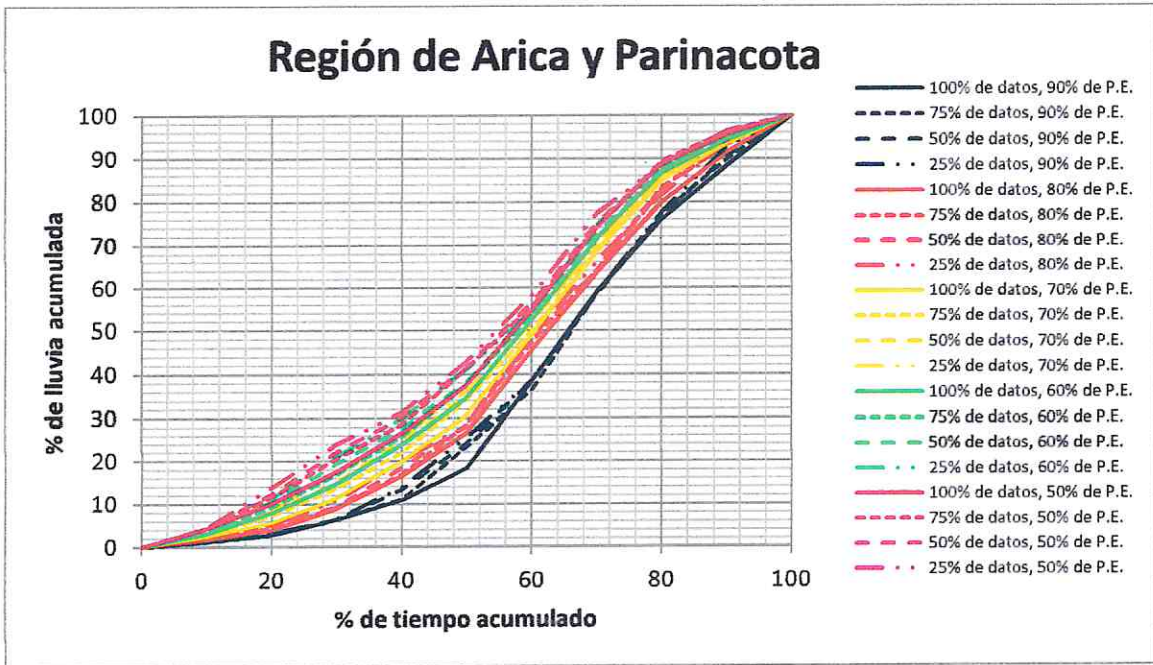


Figura 8.41- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

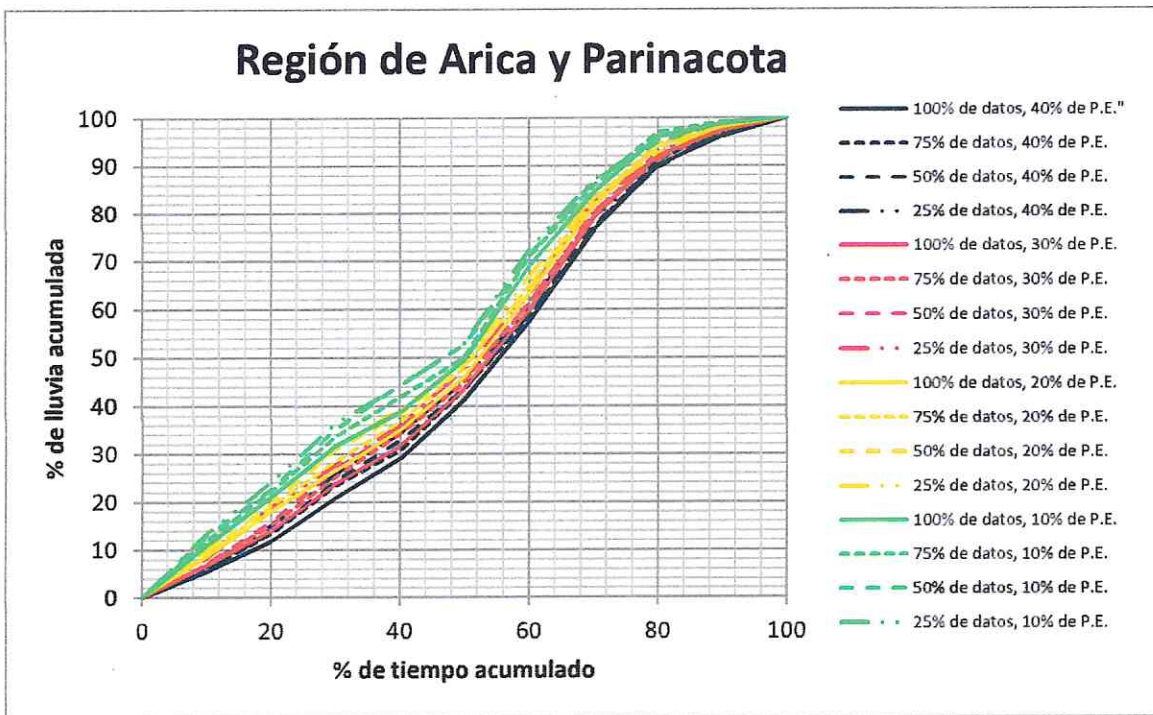


Figura 8.42- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinacota.

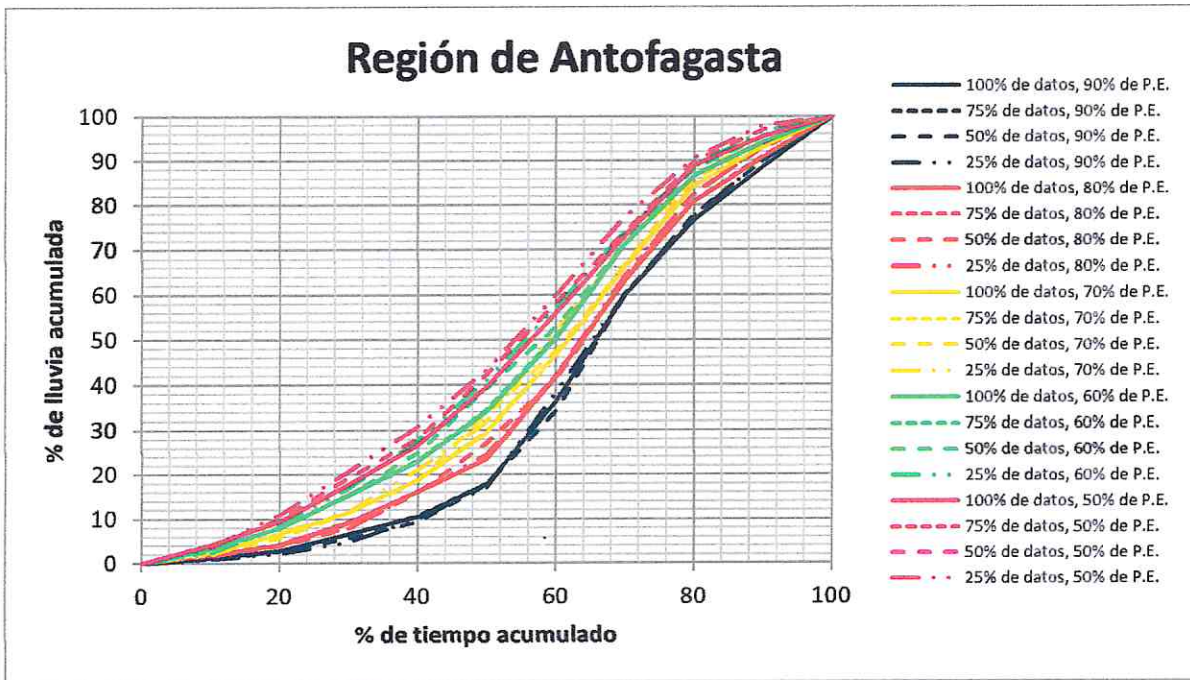


Figura 8.43- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

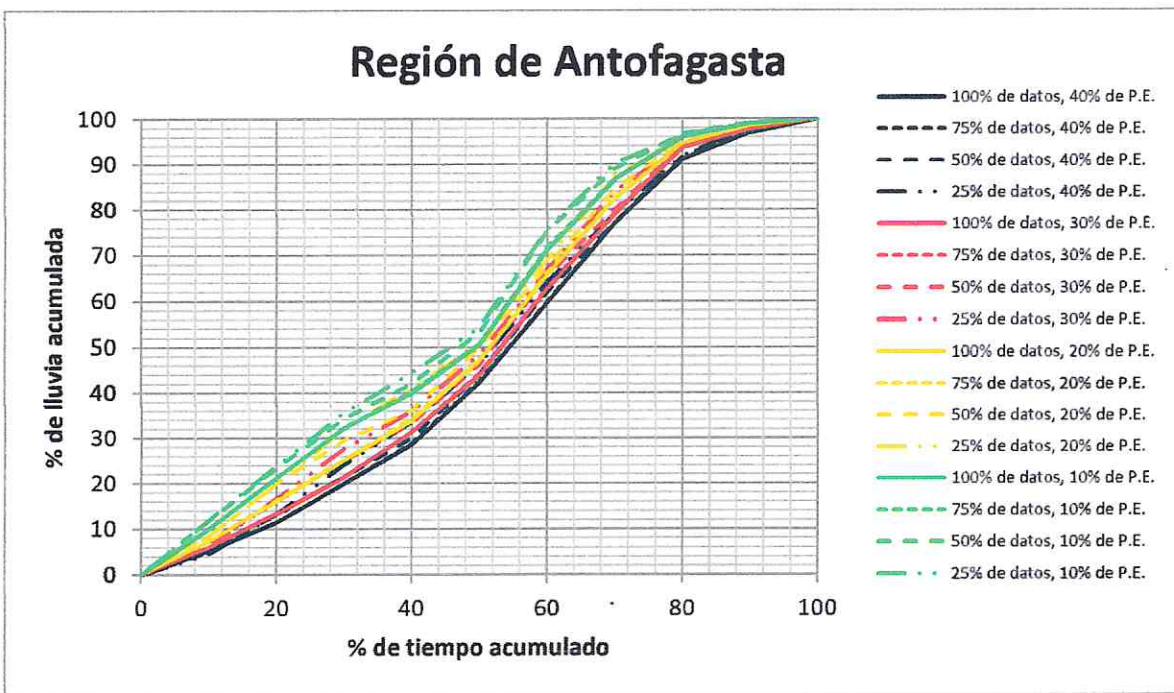


Figura 8.44- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

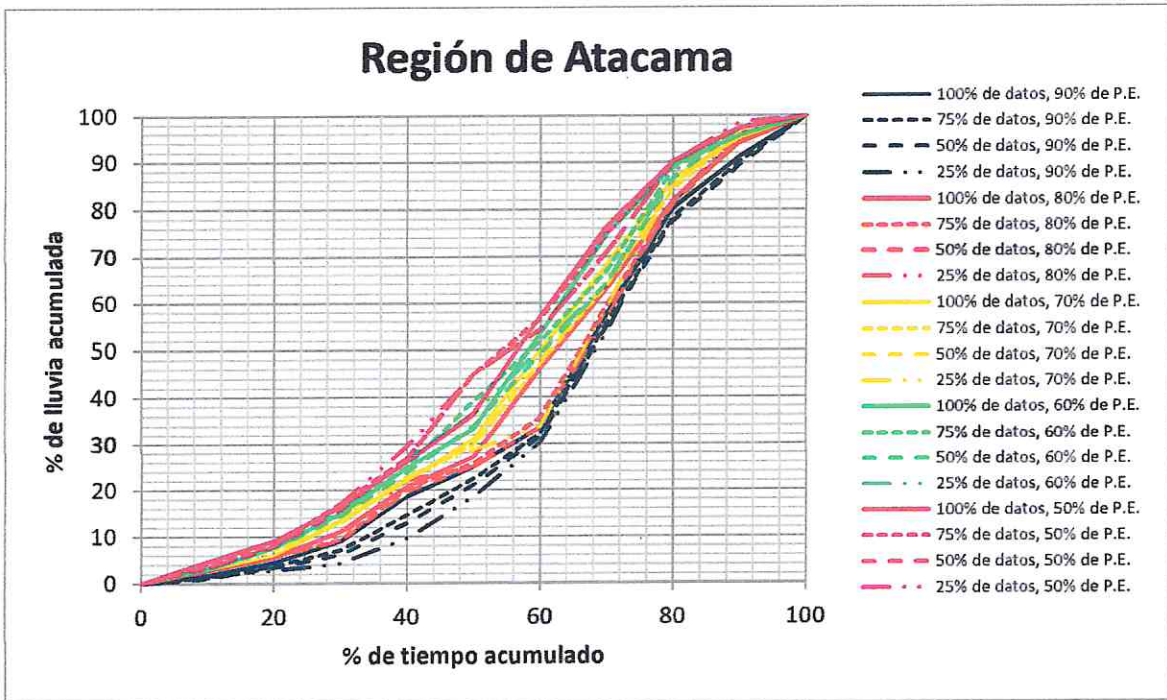


Figura 8.45- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

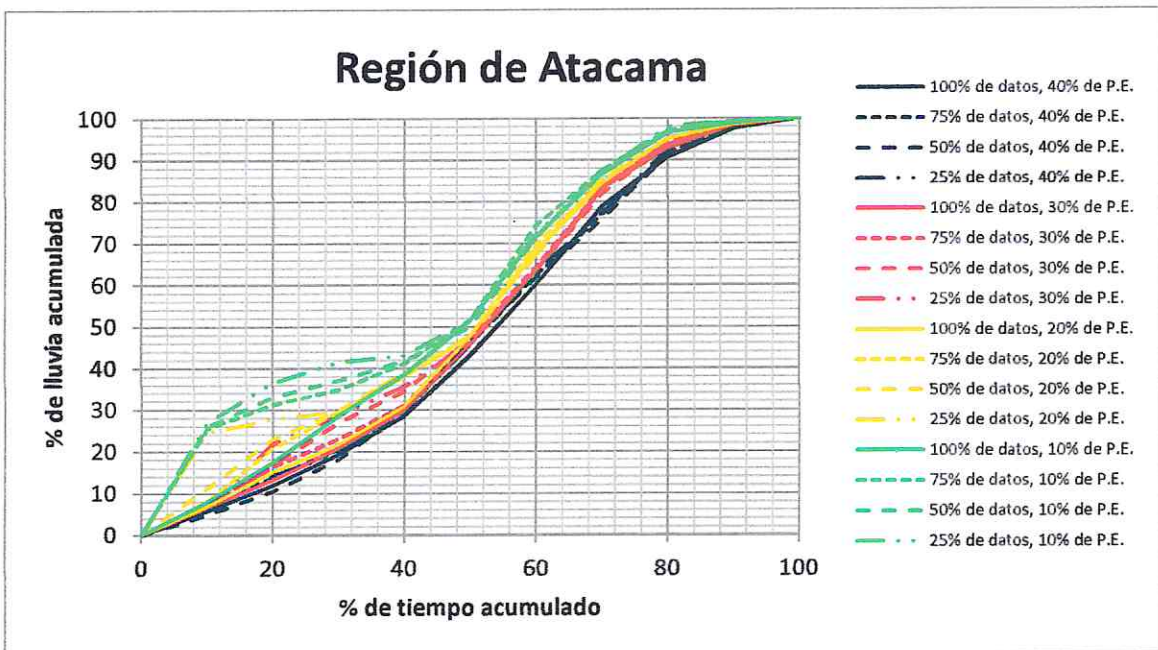


Figura 8.46- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

Considerando las similitudes existentes entre las curvas de probabilidades de excedencia para los distintos bloques de datos, es posible obtener las curvas de probabilidades de excedencia para cada región en el "Grupo 3", según lo descrito en la metodología del presente trabajo, eliminando la variable de duración de la tormenta. Lo anteriormente descrito puede visualizarse en las figuras 8.47, 8.48 y 8.49, que corresponden a las Regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, respectivamente.

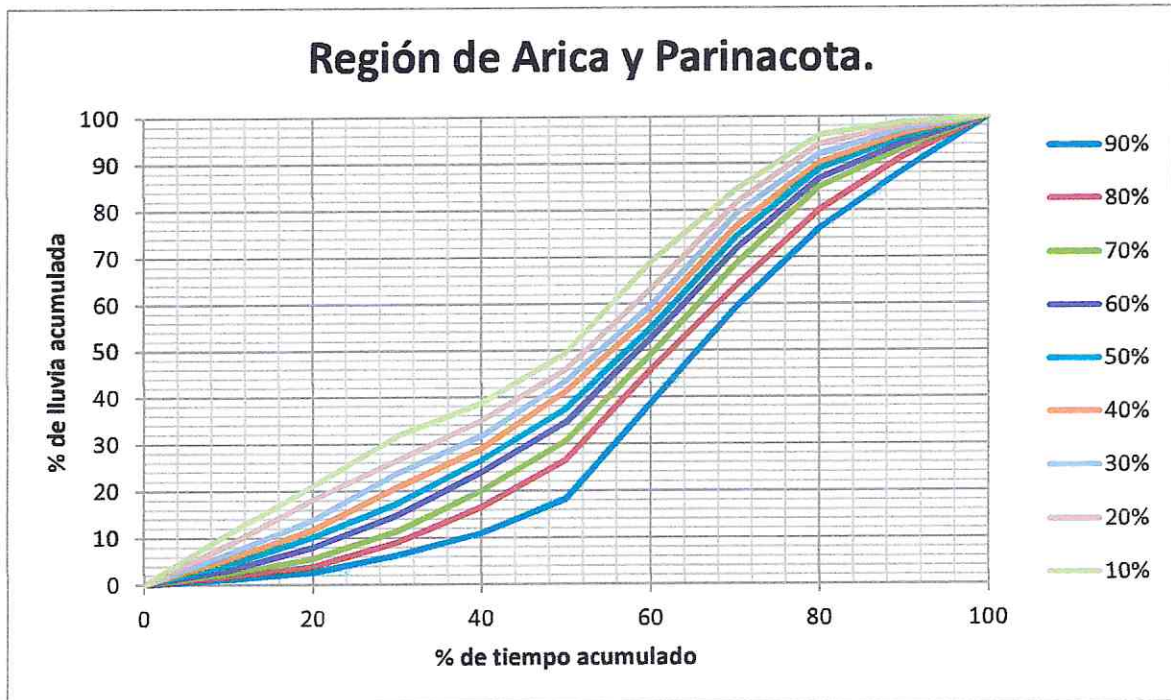


Figura 8.47- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Arica y Parinacota, "Grupo 3".

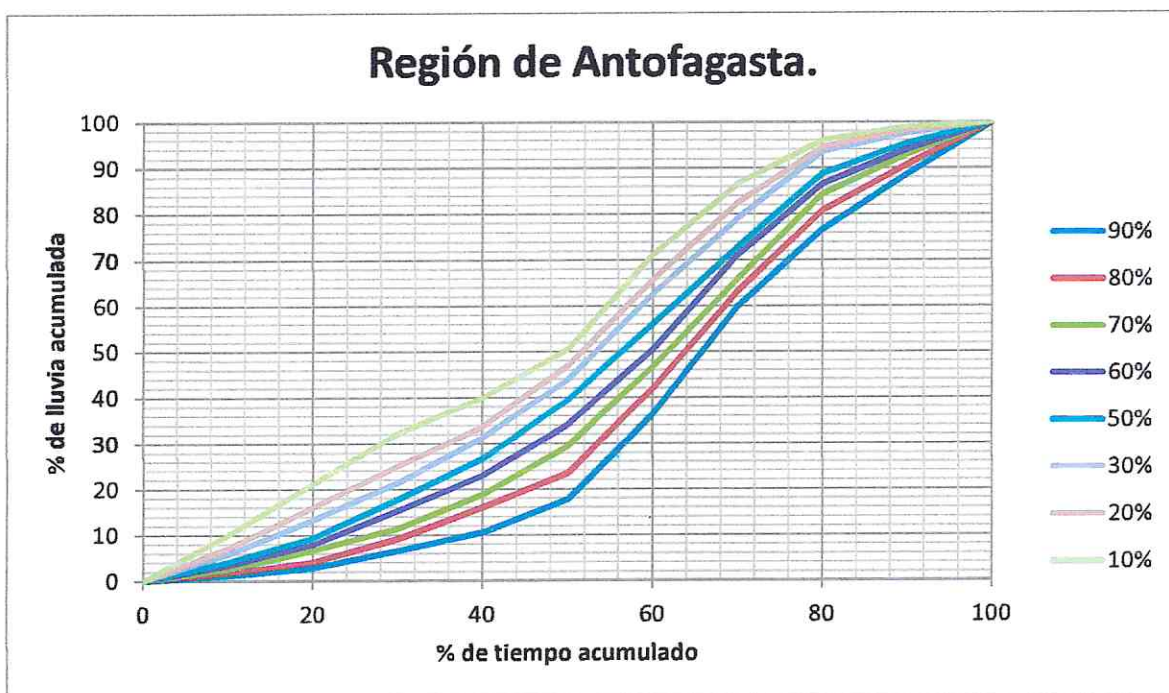


Figura 8.48- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Antofagasta, "Grupo 3".

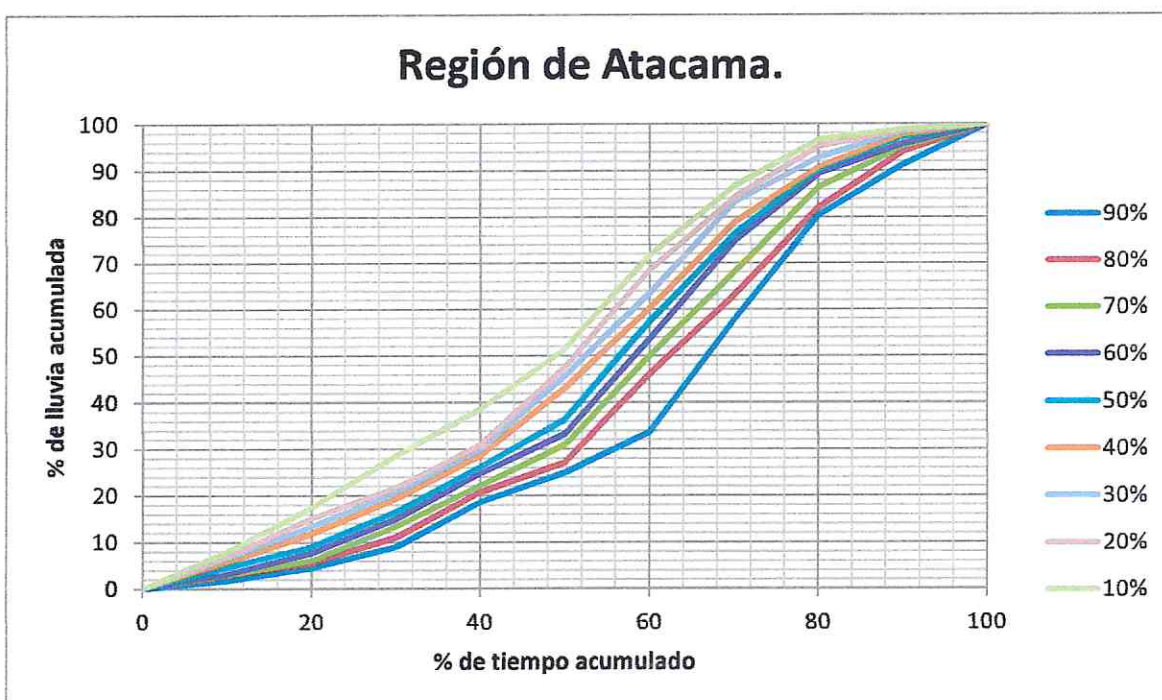


Figura 8.49- Curvas de probabilidades de excedencia para la Región de Atacama, "Grupo 3".

Para eliminar la dependencia geográfica de los hietogramas de cada región, se graficaron las distintas curvas con las distintas probabilidades de excedencia para las regiones en estudio. Esto permite visualizar las características similares que puedan tener.

Las figuras 8.50 y 8.51 muestran que las curvas graficadas para una probabilidad de excedencia determinada, tienden a ser similares entre las tres regiones en estudio.

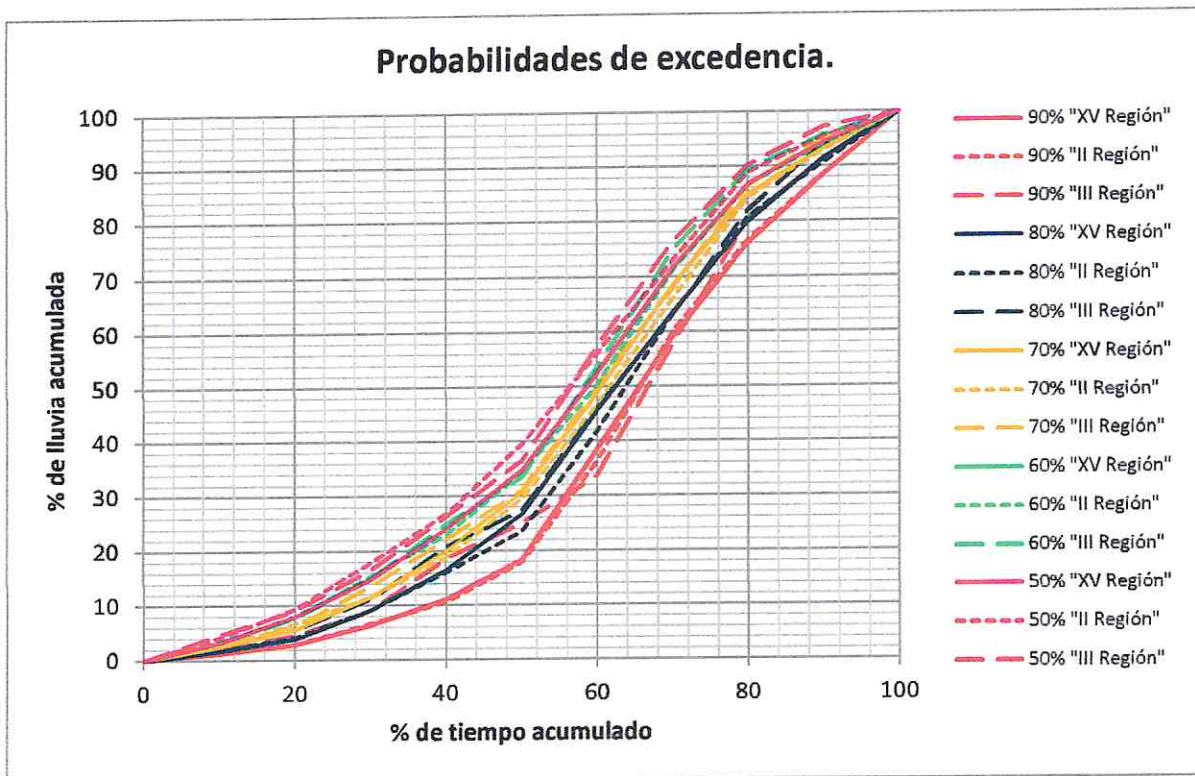


Figura 8.50- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

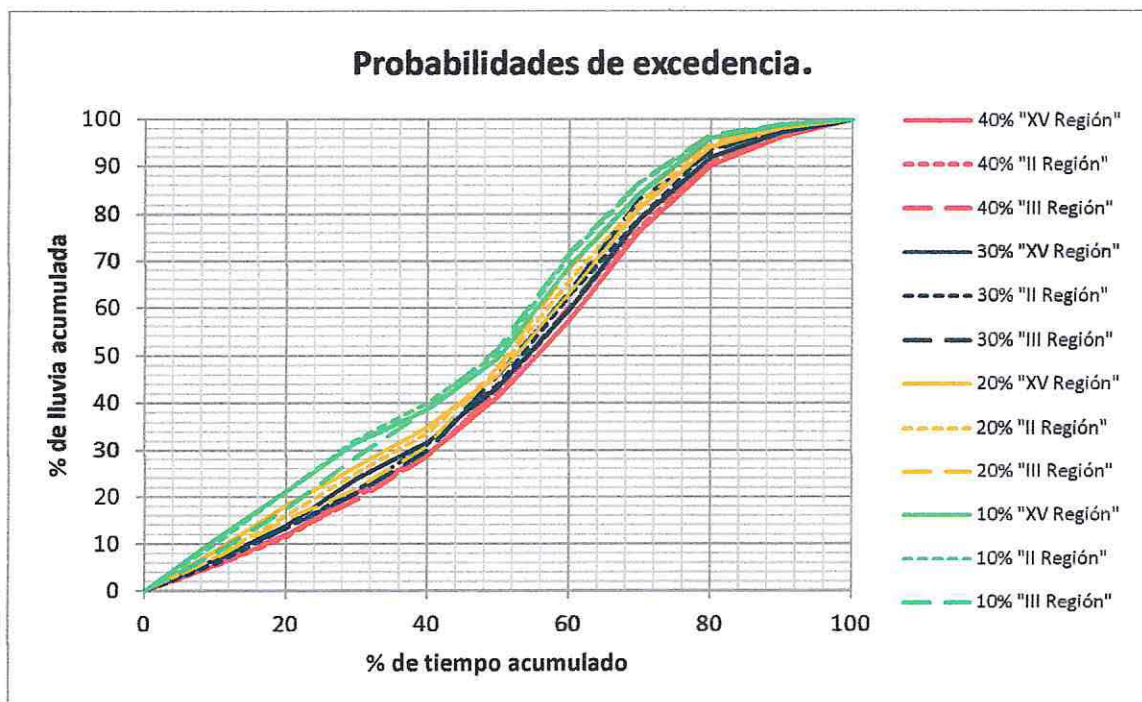


Figura 8.51- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

A partir de las figuras 8.50 y 8.51, y de lo anteriormente descrito, pudo demostrarse que según las curvas desarrolladas para las distintas probabilidades de excedencia, con respecto a la región que representaban, es posible unir todas las muestras de las tormentas como una muestra única, sin subdividir las de acuerdo a las regiones de las cuales fueron obtenidas.

Producto de la unión de todas las muestras de tormentas, a causa de las similitudes, puede determinarse un patrón o perfil único de lluvia para el grupo en estudio. En la Figura 8.52 se presentan las curvas de distribución para las distintas probabilidades de excedencia para el "Grupo 3", y la Tabla 8.8 muestra los porcentajes de precipitación de las curvas señaladas anteriormente.



### 8.2.4 Grupo 4.

En este grupo se seleccionaron las tormentas cuya mayor precipitación se encuentra en el cuarto cuartil del porcentaje de tiempo acumulado, como muestra la Figura 8.53.

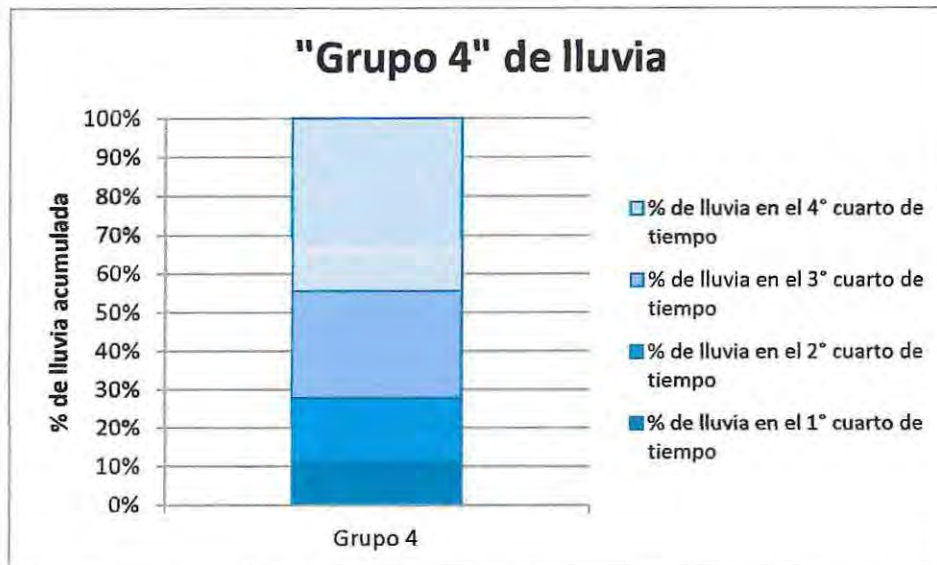


Figura 8.53- Representación de las características del "Grupo 4".

Como resultado de la individualización y agrupamiento se obtienen 135 tormentas pertenecientes a este grupo, de un total de 1.301 precipitaciones. Estas se distribuyen por región y tiempo de duración, tal como se observa en la Tabla 8.9.

La probabilidad de ocurrencia (P.O.) para el "Grupo 4", fue determinada en base de la metodología expuesta en el punto 6.5.1 del presente trabajo de título, dando el resultado expuesto a continuación.

$$P.O.(\text{Grupo 4}) = 10.38\%$$

Tabla 8.9- Datos del "Grupo 4" por región y horas de duración.

Duración de las tormentas del "Grupo 4"	Región			TOTAL
	XV Arica y Parinacota	II Antofagasta	III Atacama	
4	21	19	1	41
5	17	11	1	29
6	15	5	0	20
7	11	6	0	17
8	5	3	0	8
9	5	2	0	7
10	2	1	1	4
11	0	1	0	1
12	3	0	1	4
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	1	0	0	1
17	0	0	0	0
18	0	0	1	1
19	2	0	0	2
TOTAL	82	48	5	135

Después de identificar las precipitaciones que pertenecen al "Grupo 4", es posible observar las características generales que éste puede tener. En primer lugar, puede visualizarse que al graficar las tormentas registradas para las regiones en estudio, éstas tienen un patrón de lluvia para el grupo señalado. Lo anterior se evidencia en las figuras 8.54, 8.55 y 8.56, correspondientes a las Regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, respectivamente.

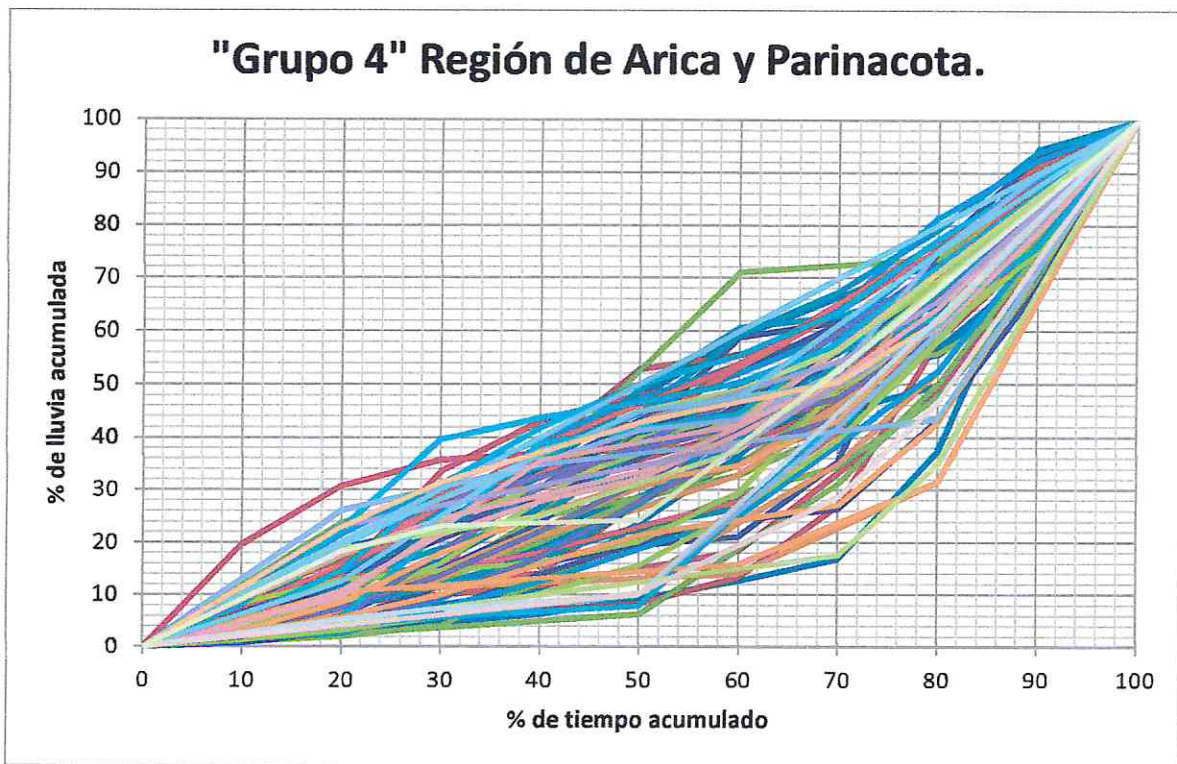


Figura 8.54- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Arica y Parinacota.

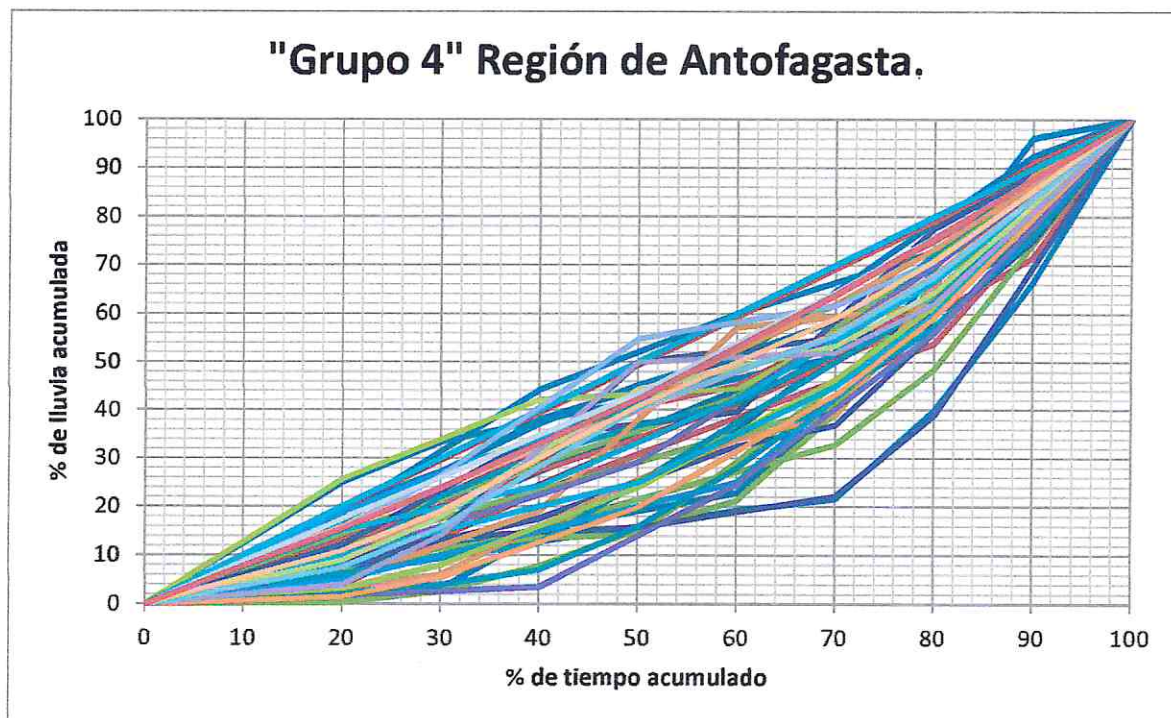


Figura 8.55- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Antofagasta.

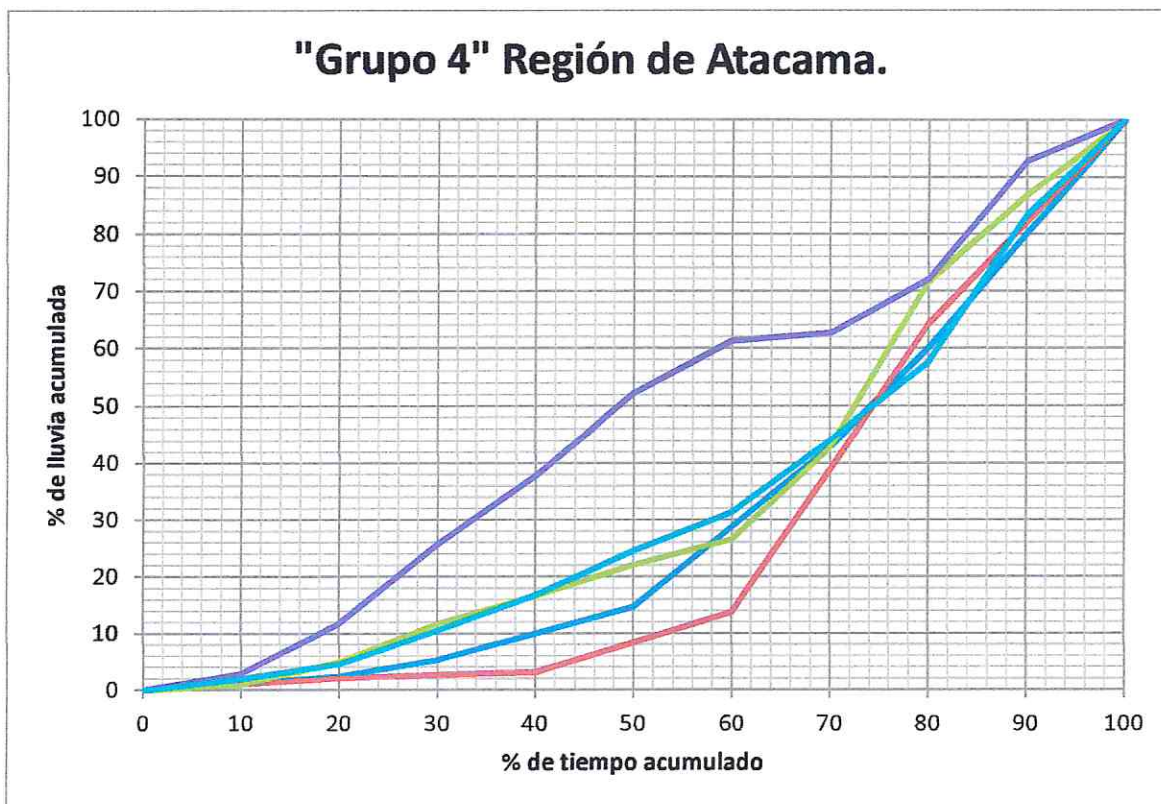


Figura 8.56- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Atacama.

A partir de las similitudes que presentan los datos del "Grupo 4", se analizará la relevancia de las variables de tiempo de duración de los datos y de la dependencia geográfica.

En primer lugar se analizará la variable de dependencia de duración de la tormenta, es decir, se determinará la relevancia que tiene la variable de duración, aplicando la metodología descrita en el punto 6.7.

Para efectuar este análisis se determinó las horas en las que se encuentran los cuartiles de las muestras obtenidas para este grupo. En la Figura 8.57 se observan los cuartiles de las duraciones de cada región para el "Grupo 4", a partir de la cual se obtienen los bloques del 100%, 75%, 50% y 25% de los datos para cada región.

Teniendo presente lo anteriormente descrito, se obtendrán las curvas de probabilidades de excedencia de cada bloque de datos. Dichas curvas permitirán evaluar la importancia de la variable de duración de las tormentas.

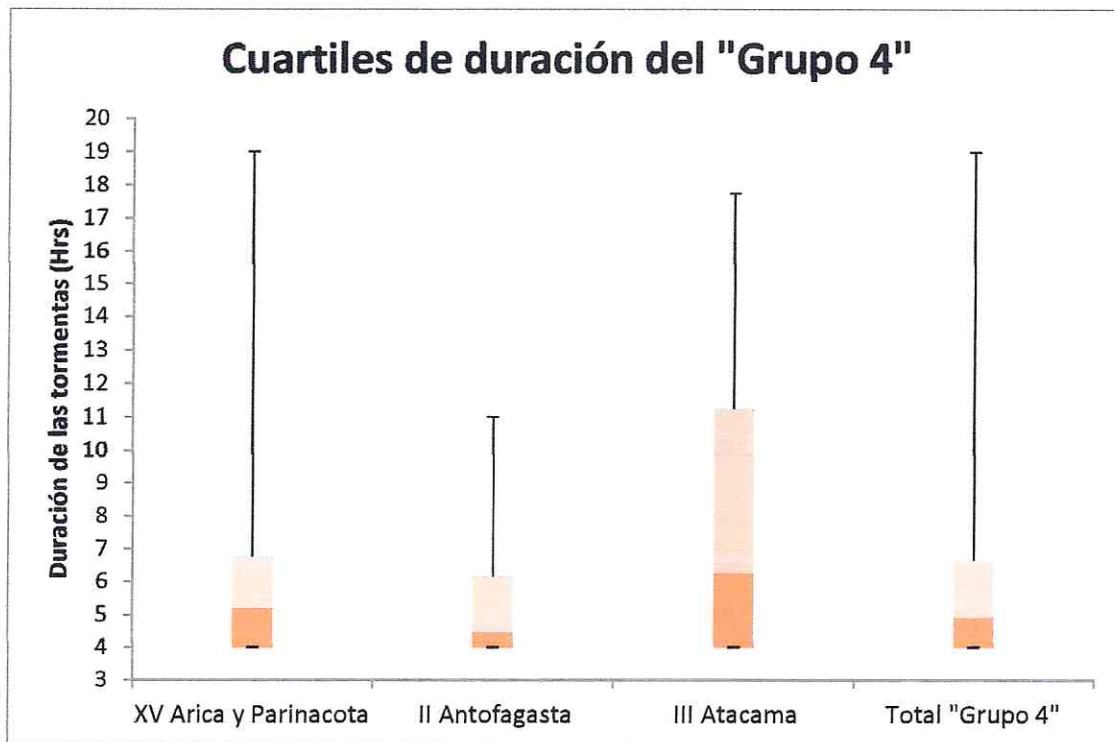


Figura 8.57- Cuartiles de duración del "Grupo 4"

Al obtener las curvas de distintas probabilidades de excedencia de cada bloque de datos (100%, 75%, 50% y 25%), es posible comparar si existen similitudes de comportamiento entre dichos bloques de datos que se dieron a conocer en el punto 6.7 de la metodología, obteniendo las figuras para las regiones en estudio como se presentan a continuación.

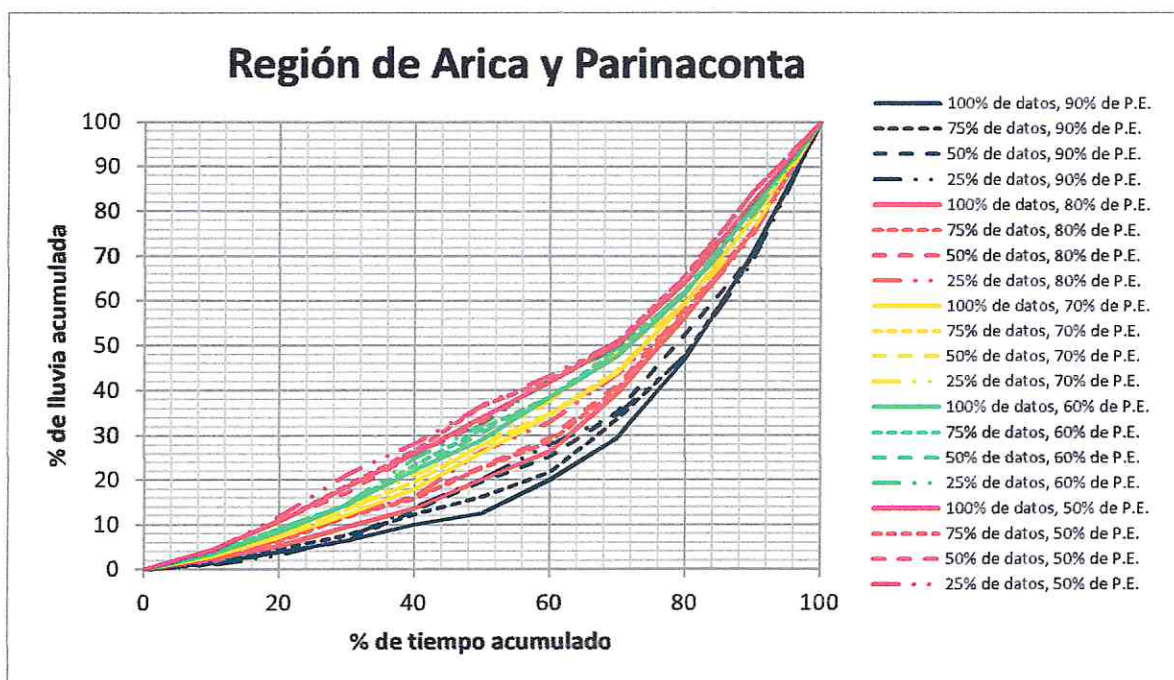


Figura 8.58- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinaconta.

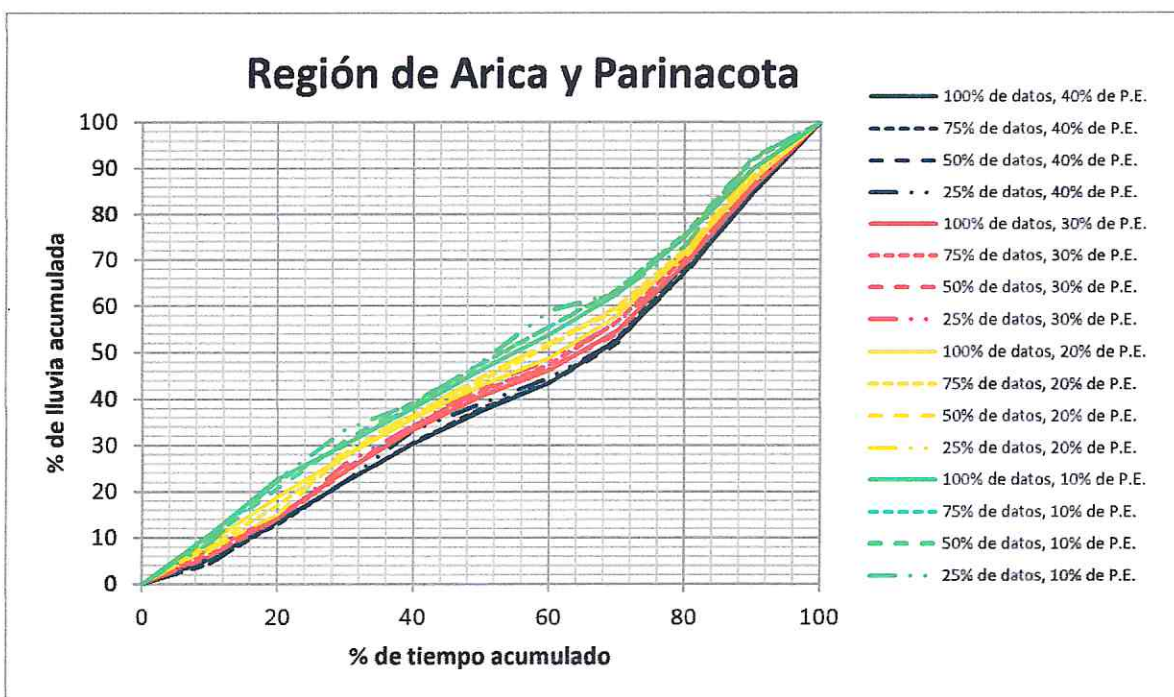


Figura 8.59- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Arica y Parinaconta.

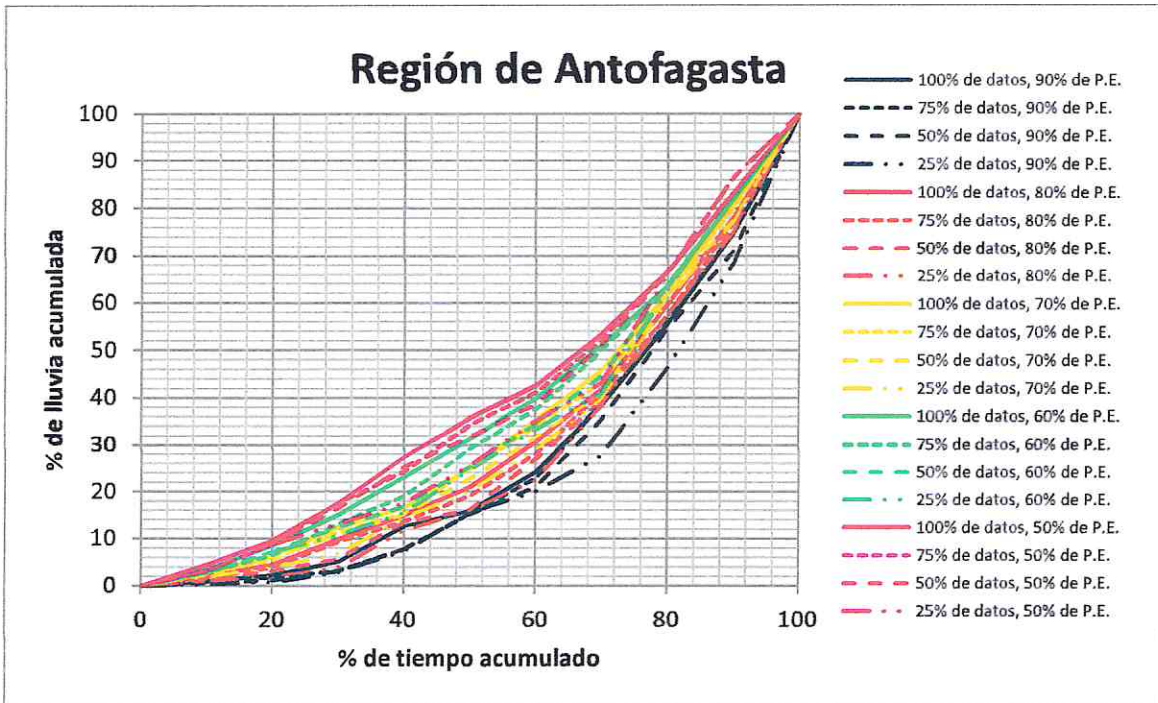


Figura 8.60- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

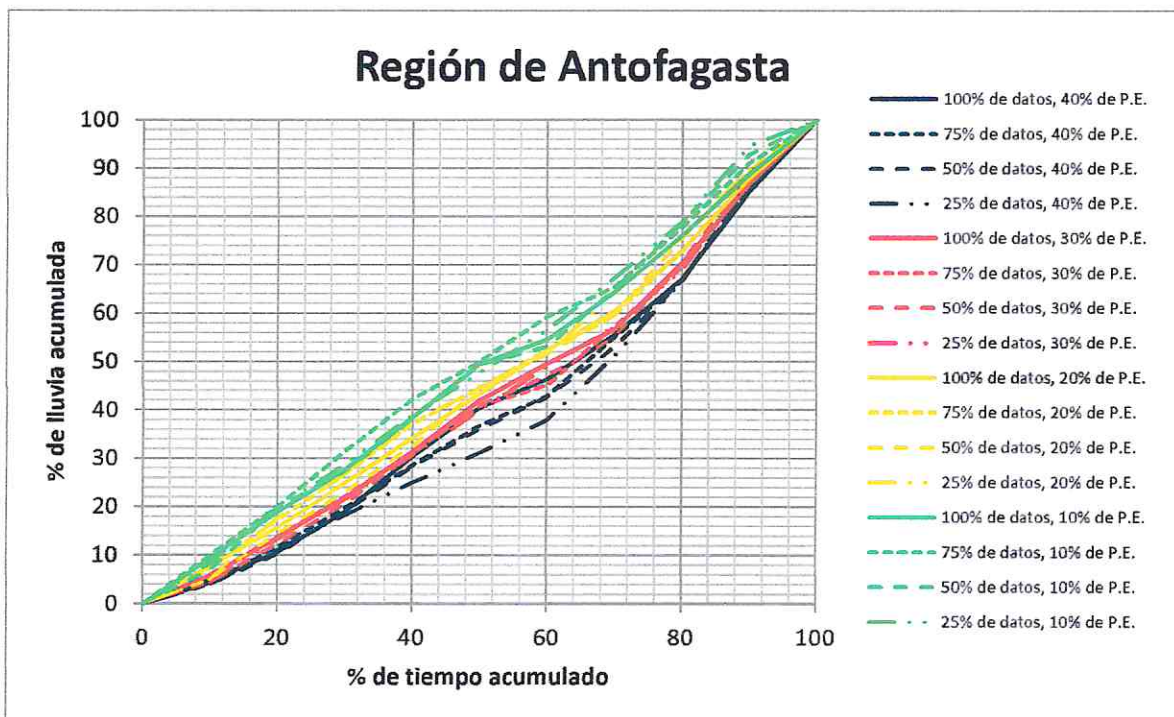


Figura 8.61- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Antofagasta.

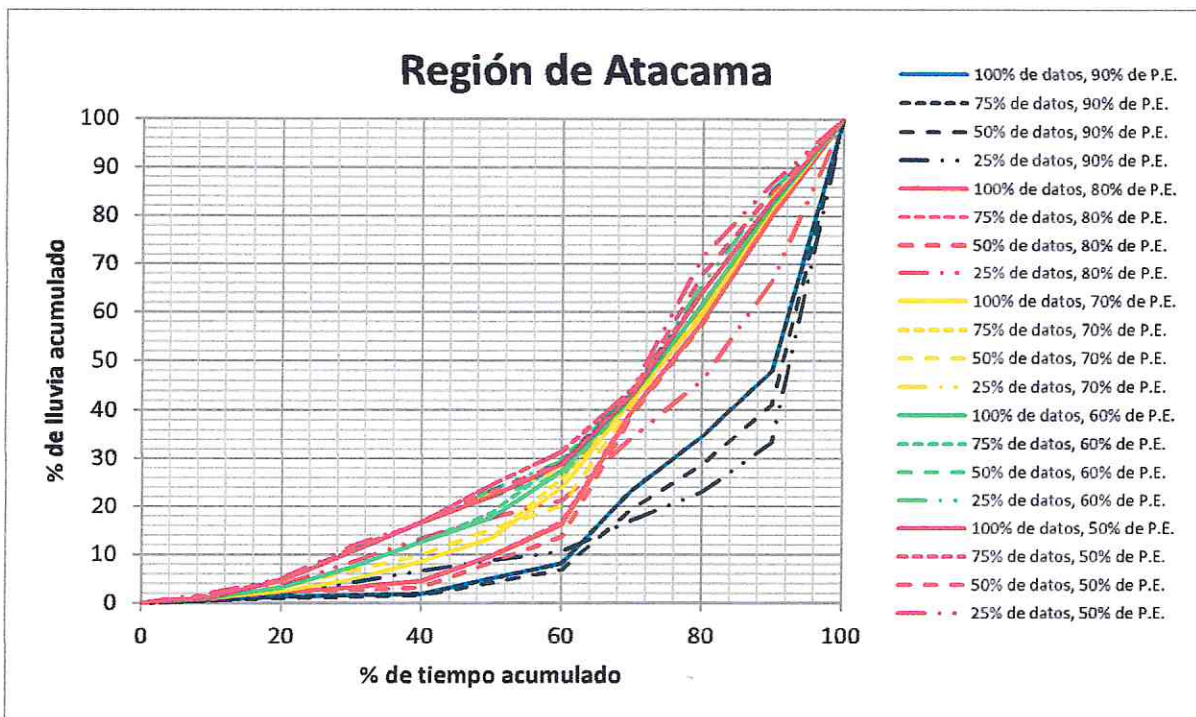


Figura 8.62- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

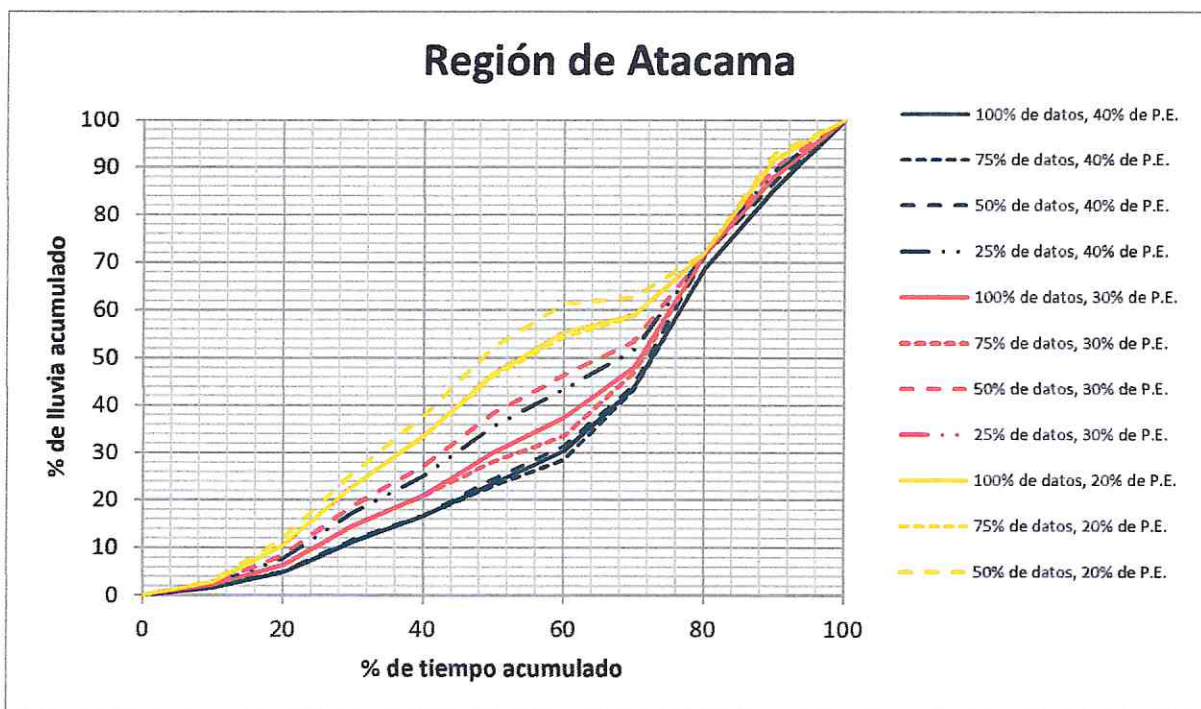


Figura 8.63- Curvas de probabilidades para los bloques de 100%, 75%, 50% y 25% de los datos, Región de Atacama.

Cabe destacar que para la Región de Atacama, producto de la poca cantidad de tormentas situadas en este grupo, no es posible determinar la probabilidad de excedencia del 10%. Si al comparar las demás probabilidades de excedencia con respecto a la región que representan, éstas presentan una forma similar, se asumirá que el 10% de probabilidad de excedencia también tendrá un comportamiento similar. Según lo anteriormente descrito, será posible obtener las curvas de probabilidades para las distintas regiones, como muestran las figuras 8.64, 8.65 y 8.66.

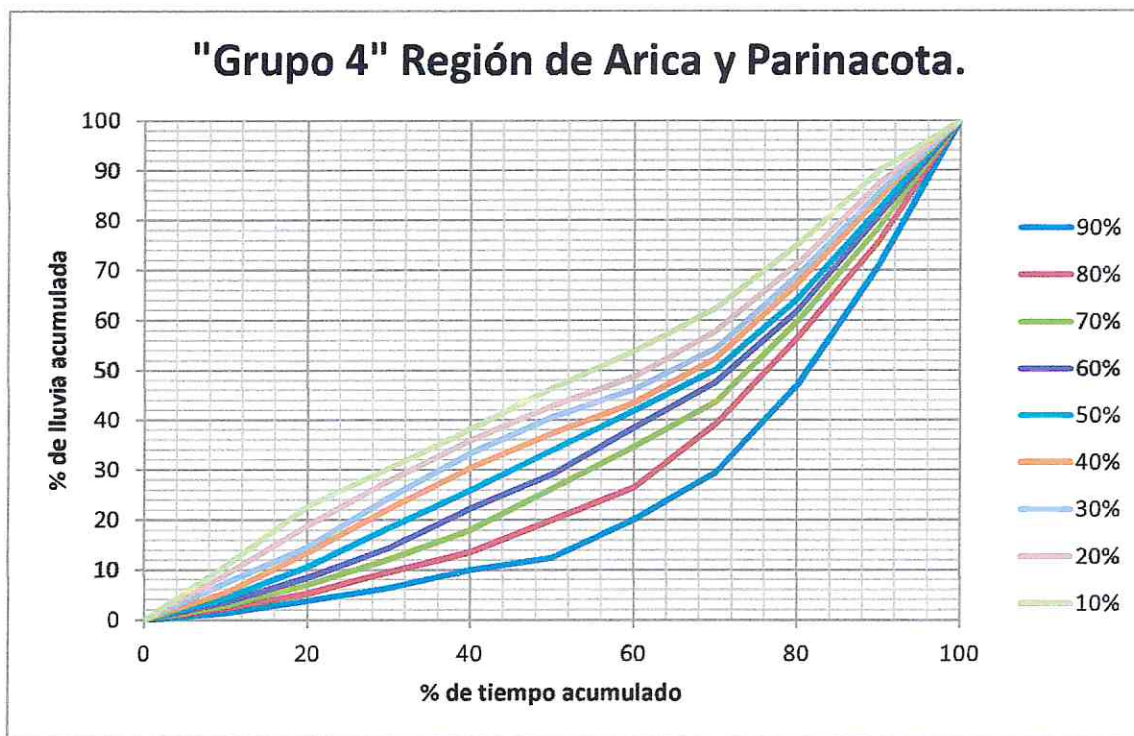


Figura 8.64- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Arica y Parinacota.

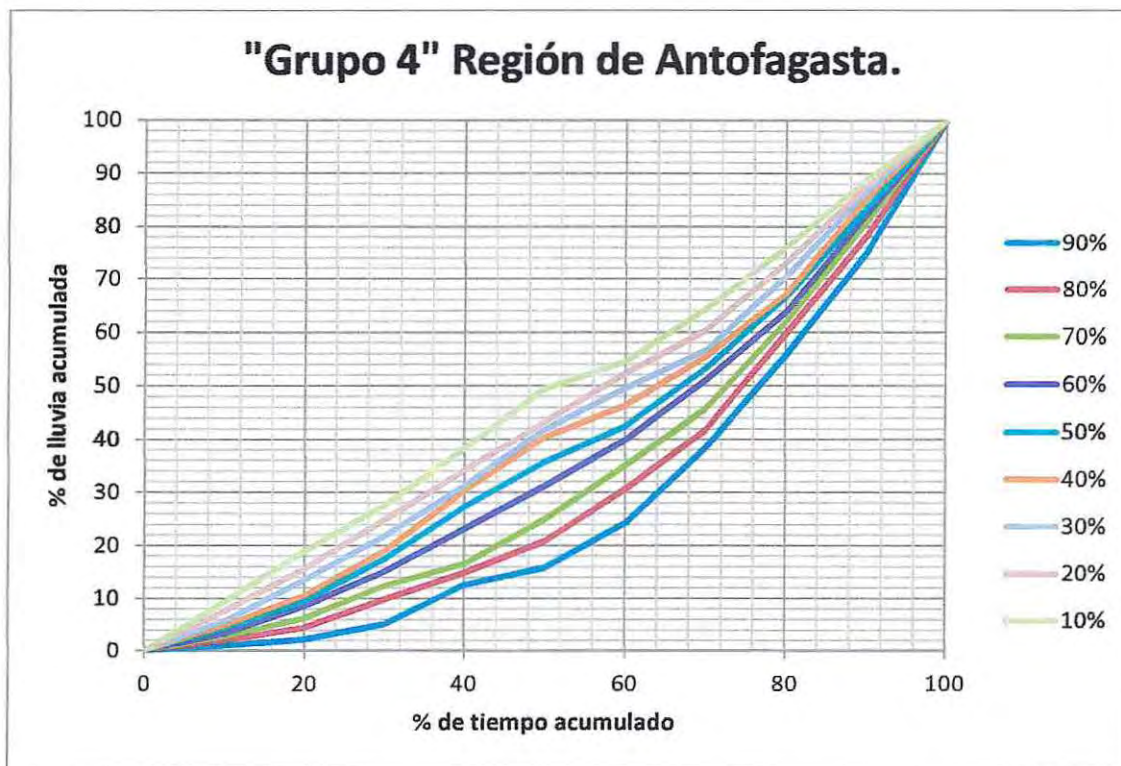


Figura 8.65- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Antofagasta.

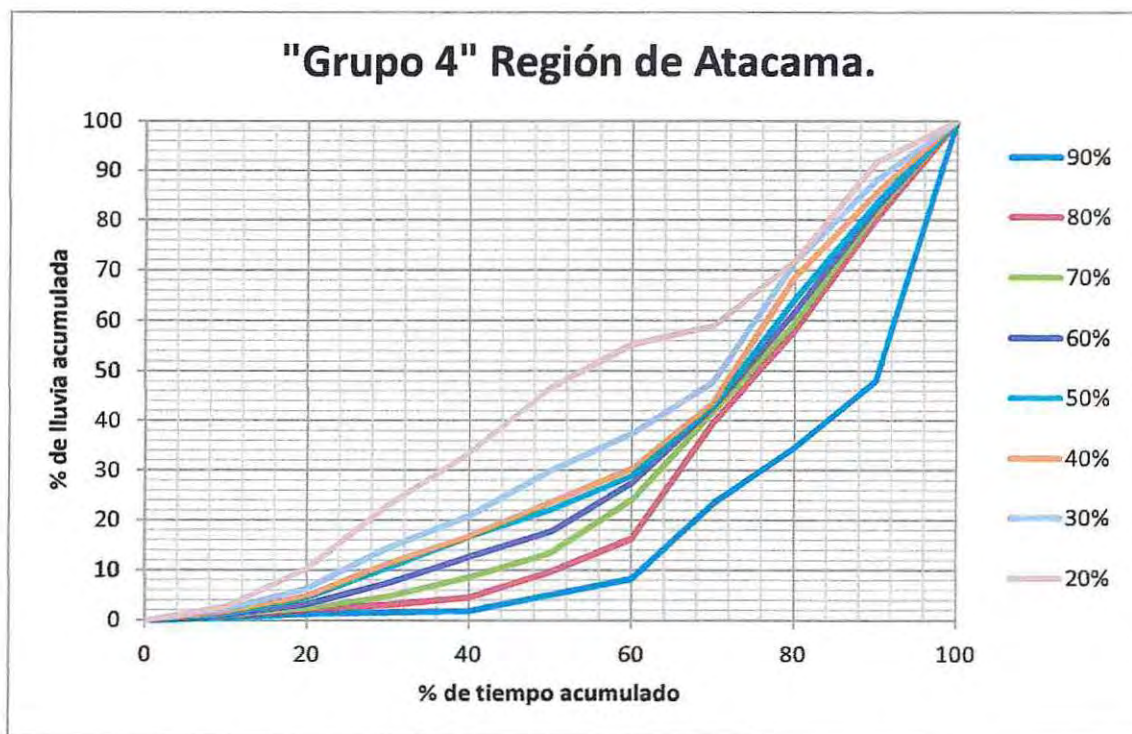


Figura 8.66- Gráfico de datos del "Grupo 4" para la Región de Atacama.

Con el objeto de eliminar la dependencia geográfica de los hietogramas de cada una de las regiones, se han graficado las distintas curvas con las diferentes probabilidades de excedencia para cada región, de modo de visualizar las características similares que puedan tener.

En las figuras 8.67 y 8.68 se observa que las curvas graficadas para una determinada probabilidad de excedencia forman una misma tendencia entre las tres regiones que se encuentran en estudio.

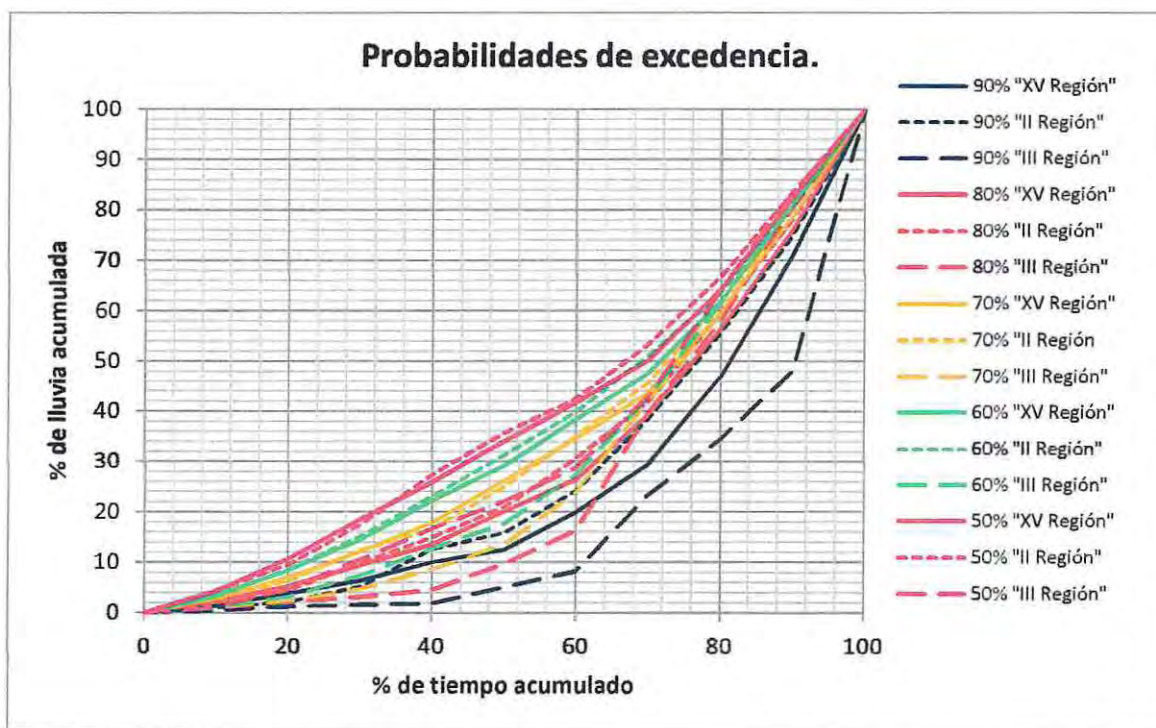


Figura 8.67- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

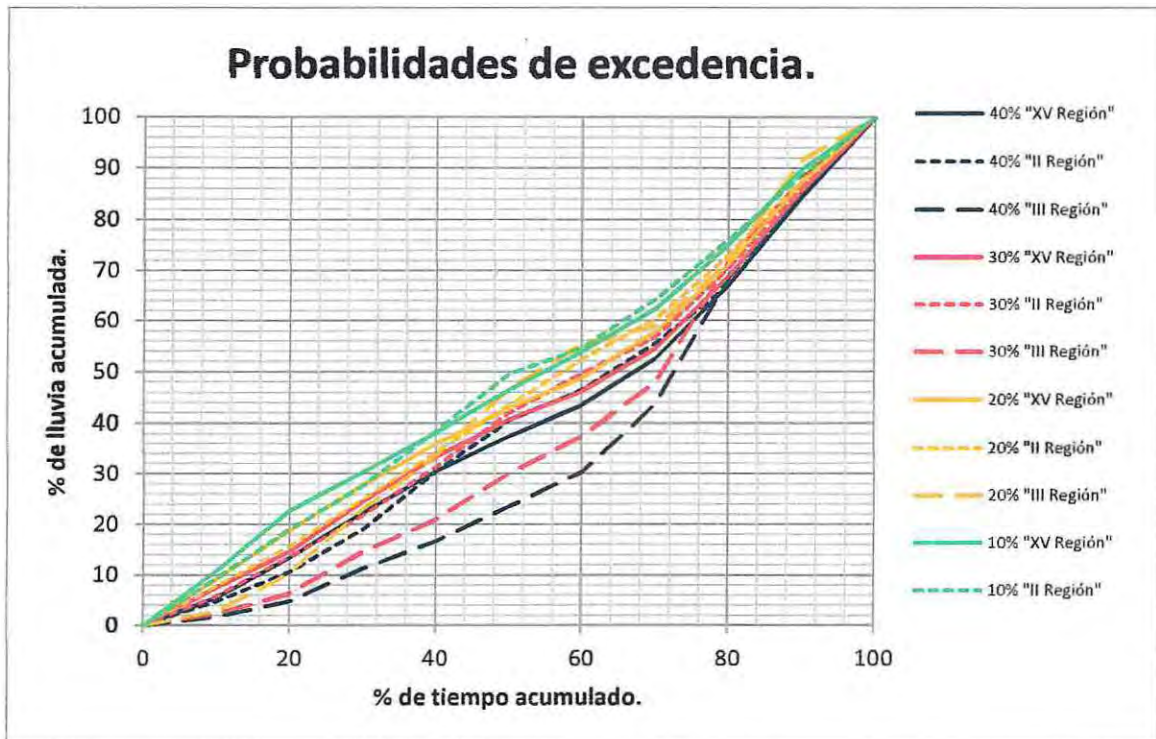


Figura 8.68- Curvas de probabilidades de excedencia para las distintas regiones.

A partir de lo anteriormente descrito, y analizando las figuras 8.67 y 8.68, queda demostrado que de acuerdo a las curvas obtenidas para las distintas probabilidades de excedencia, con respecto a la región que representaban, es posible unir todas las muestras de las tormentas como una muestra única, sin subdividir por regiones.

Como resultado de la unión de todas las muestras de tormentas, producto de las similitudes, es posible determinar un perfil o patrón único de lluvia para el grupo en estudio. La Figura 8.69 muestra las curvas de distribución para las distintas probabilidades de excedencia para el "Grupo 4", y en la Tabla 8.10 se presentan los porcentajes de precipitación de las curvas anteriormente señaladas.



## 9. Procedimiento para el uso de los perfiles de lluvias.

Para comenzar con el diseño del hietograma de tormenta de diseño, es necesario obtener los datos base que se utilizan generalmente en los distintos métodos que existen para elaborar el hietograma en la zona en la que se quiere observar la distribución temporal de la lluvia.

Estos parámetros básicos son los siguientes:

- a) Período de retorno del evento.
- b) Tiempo de duración del evento.

Con los datos señalados, es posible obtener la profundidad total de la lluvia que se da para las condiciones de diseño mencionadas. Esta cantidad de precipitación se puede obtener a través del Manual de Carreteras en el Volumen 3, Tabla 3.702.402.A, o mediante otros métodos adecuados que garanticen que la precipitación total sea óptima para las características nombradas.

Luego de obtener la precipitación total del fenómeno para las condiciones dadas, es posible elaborar el hietograma siguiendo los siguientes pasos:

- 1) **Elegir un grupo de perfil de lluvia.** Esta elección se debe hacer según el criterio del diseñador, siendo lo más lógico la utilización del grupo que tenga la mayor probabilidad de ocurrencia.
- 2) **Elegir la curva de probabilidad de excedencia del grupo seleccionado.** Esta curva de probabilidad de excedencia será elegida dependiendo de la seguridad que se quiera tener en el diseño, es decir, a mayor seguridad se deberá elegir la curva con menor probabilidad de excedencia.
- 3) **Distribuir la precipitación total.** La distribución temporal acumulada de la lluvia puede realizarse multiplicando los porcentajes acumulados de las curvas de probabilidades de excedencia del grupo elegido, con la precipitación total obtenida al principio de este punto, tal como muestra la Tabla 9.1.

Tabla 9.1- Distribución de la precipitación total acumulada a través del tiempo.

% de tiempo acumulado	% de lluvia para "X" % de probabilidad de excedencia	Lluvia acumulada para "X" % de probabilidad de excedencia
0%	A%	A% * Pt
10%	B%	B% * Pt
20%	C%	C% * Pt
30%	D%	D% * Pt
40%	E%	E% * Pt
50%	F%	F% * Pt
60%	G%	G% * Pt
70%	H%	H% * Pt
80%	I%	I% * Pt
90%	J%	J% * Pt
100%	K%	K% * Pt

**Dónde:**

- **A%, B%, C%, D%, E%, F%, G%, H%, I%, J% y K%** = Porcentajes de precipitaciones acumuladas para sus respectivos porcentajes acumulados de tiempo.
- **Pt** = Precipitación total del evento medida en milímetros de agua caída (mm), y determinada por el período de retorno del evento y la duración que se requiere para el diseño.

La descripción recientemente estipulada arrojará hietogramas con curvas acumuladas, de las cuales se puede obtener, de manera simple, el hietograma de tormenta de diseño, restando la lluvia acumulada que antecede al tiempo en que se quiere obtener la lluvia caída en ese período, con el valor de lluvia acumulada del tiempo en que se desea obtener la precipitación, como se muestra en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2- Distribución de la precipitación a través del tiempo.

% de tiempo acumulado	% de lluvia para "X" % de probabilidad de excedencia	Lluvia acumulada para "X" % de probabilidad de excedencia	Lluvia para "X" % probabilidad de excedencia
0%	A%	$A\% * Pt$	$A\% * Pt - 0$
10%	B%	$B\% * Pt$	$B\% * Pt - A\% * Pt$
20%	C%	$C\% * Pt$	$C\% * Pt - B\% * Pt$
30%	D%	$D\% * Pt$	$D\% * Pt - C\% * Pt$
40%	E%	$E\% * Pt$	$E\% * Pt - D\% * Pt$
50%	F%	$F\% * Pt$	$F\% * Pt - E\% * Pt$
60%	G%	$G\% * Pt$	$G\% * Pt - F\% * Pt$
70%	H%	$H\% * Pt$	$H\% * Pt - G\% * Pt$
80%	I%	$I\% * Pt$	$I\% * Pt - H\% * Pt$
90%	J%	$J\% * Pt$	$J\% * Pt - I\% * Pt$
100%	K%	$K\% * Pt$	$K\% * Pt - J\% * Pt$

- 4) **Distribuir el tiempo acumulado.** La distribución del tiempo acumulado se obtiene al multiplicar el tiempo de duración del evento elegido por el diseñador (señalado en el punto b), con el "% de tiempo acumulado", como se observa en la Tabla 9.3. Este parámetro debe estar en dimensión de horas.

Tabla 9.3- Distribución del tiempo acumulado.

% de tiempo acumulado	Tiempo acumulado	% de lluvia para "X" % de probabilidad de excedencia	Lluvia acumulada para "X" % de probabilidad de excedencia	Lluvia para "X" % probabilidad de excedencia
0%	$0\% * Tt$	A%	$A\% * Pt$	$A\% * Pt - 0$
10%	$10\% * Tt$	B%	$B\% * Pt$	$B\% * Pt - A\% * Pt$
20%	$20\% * Tt$	C%	$C\% * Pt$	$C\% * Pt - B\% * Pt$
30%	$30\% * Tt$	D%	$D\% * Pt$	$D\% * Pt - C\% * Pt$
40%	$40\% * Tt$	E%	$E\% * Pt$	$E\% * Pt - D\% * Pt$
50%	$50\% * Tt$	F%	$F\% * Pt$	$F\% * Pt - E\% * Pt$
60%	$60\% * Tt$	G%	$G\% * Pt$	$G\% * Pt - F\% * Pt$
70%	$70\% * Tt$	H%	$H\% * Pt$	$H\% * Pt - G\% * Pt$
80%	$80\% * Tt$	I%	$I\% * Pt$	$I\% * Pt - H\% * Pt$
90%	$90\% * Tt$	J%	$J\% * Pt$	$J\% * Pt - I\% * Pt$
100%	$100\% * Tt$	K%	$K\% * Pt$	$K\% * Pt - J\% * Pt$

- 5) **Realizar el hietograma de tormenta de diseño.** El hietograma de tormenta de diseño puede obtenerse graficando los parámetros de "Tiempo acumulado" v/s "Lluvia para "X" % de probabilidad de excedencia", como se muestra en la Tabla 9.4. Esto permitirá observar de manera gráfica el comportamiento de la distribución de la lluvia a través del tiempo.

Tabla 9.4- Hietograma de tormenta de diseño.

Tiempo acumulado	Lluvia para "X" % de probabilidad de excedencia
$0\% * Tt$	$A\% * Pt - 0$
$10\% * Tt$	$B\% * Pt - A\% * Pt$
$20\% * Tt$	$C\% * Pt - B\% * Pt$
$30\% * Tt$	$D\% * Pt - C\% * Pt$
$40\% * Tt$	$E\% * Pt - D\% * Pt$
$50\% * Tt$	$F\% * Pt - E\% * Pt$
$60\% * Tt$	$G\% * Pt - F\% * Pt$
$70\% * Tt$	$H\% * Pt - G\% * Pt$
$80\% * Tt$	$I\% * Pt - H\% * Pt$
$90\% * Tt$	$J\% * Pt - I\% * Pt$
$100\% * Tt$	$K\% * Pt - J\% * Pt$

## 10. Probabilidades de ocurrencia de las duraciones de tormentas.

### 10.1 XV Región de Arica y Parinacota.

En la Región de Arica y Parinacota, se encuentran en estudio de la probabilidad de ocurrencia de las duraciones las siguientes estaciones meteorológicas:

- A) **Estación Caquena:** Para la presente estación se registraron 643 tormentas, donde sus duraciones se encuentran desde 1 hasta 19 horas.
- B) **Estación Parinacota:** Para esta estación se tienen 378 tormentas registradas, donde sus duraciones varían entre 1 y 12 horas.
- C) **Estación Putre:** En la Estación Putre se registraron 1070 tormentas distribuidas según su tiempo de duración, donde éstas varían entre 1 y 44 horas.
- D) **Estación Central Chapiquiña:** en la presente estación se pudo registrar 492 tormentas, con duraciones desde 1 a 22 horas.

La Figura 10.1 muestra la distribución de las estaciones dentro de la XV Región.



Figura 10.1- Mapa de la XV Región de Arica y Parinacota.

Es posible visualizar en forma de probabilidad de ocurrencia la distribución de las tormentas registradas, en la Figura 10.2 que corresponde a la Estación Caquena; Figura 10.4, la cual representa a la Estación de Parinacota; Figura 10.6, correspondiendo a la Estación de Putre y la Figura 10.8, representando a la Estación de Central Chapiquiña. Además, en las figuras 10.3, 10.5, 10.7 y 10.9 se representa en forma de cuartiles la distribución de las duraciones de las estaciones anteriormente nombradas.

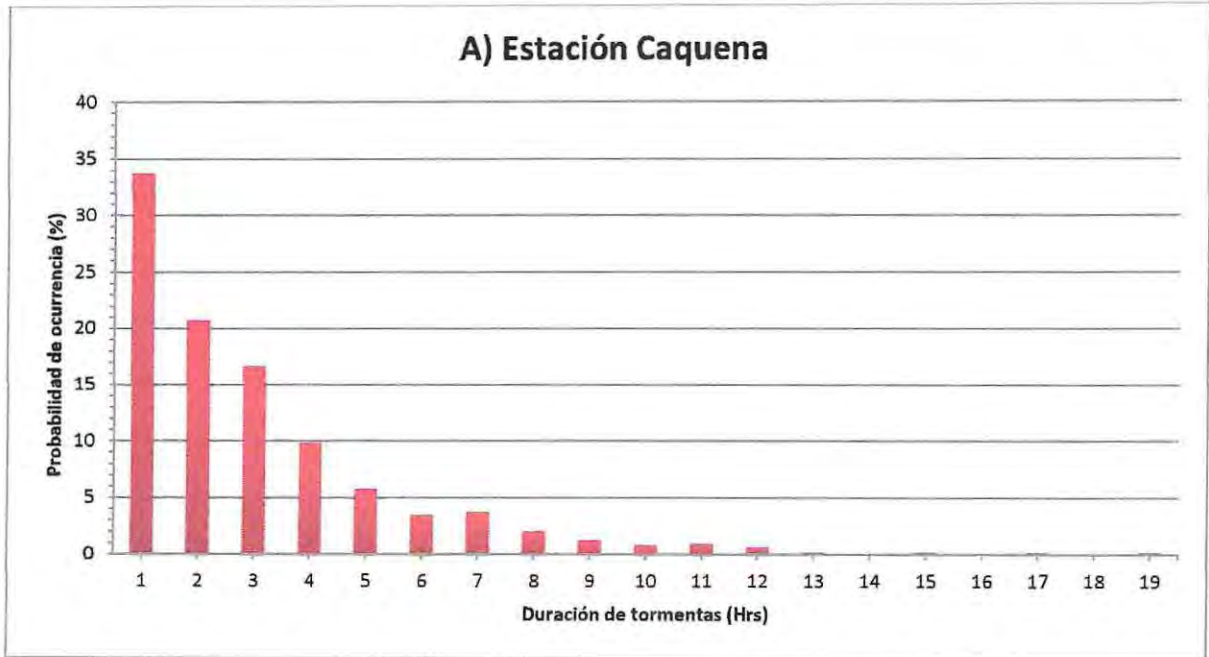


Figura 10.2- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Caquena.

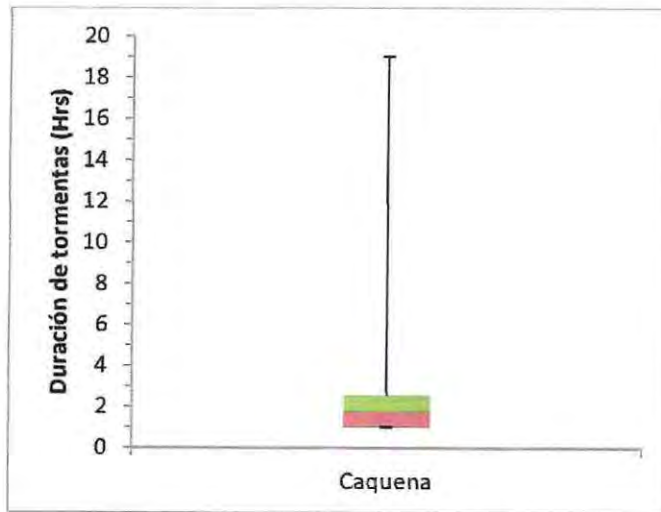


Figura 10.3- Cuartiles de las duraciones en Estación Caquena.

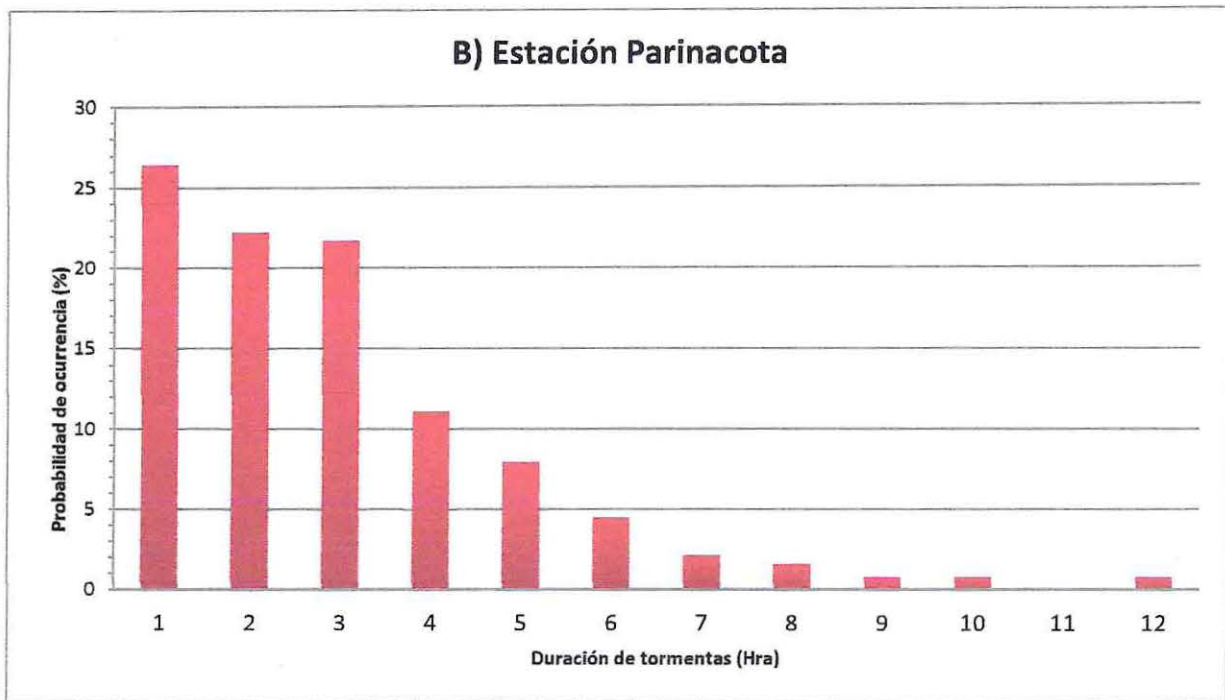


Figura 10.4- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Parinacota.

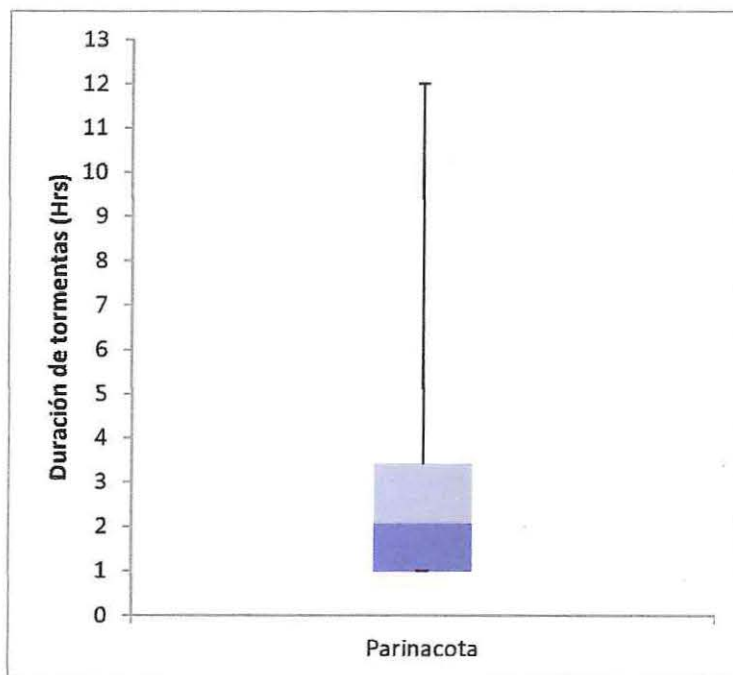


Figura 10.5- Cuartiles de las duraciones en Estación Parinacota.

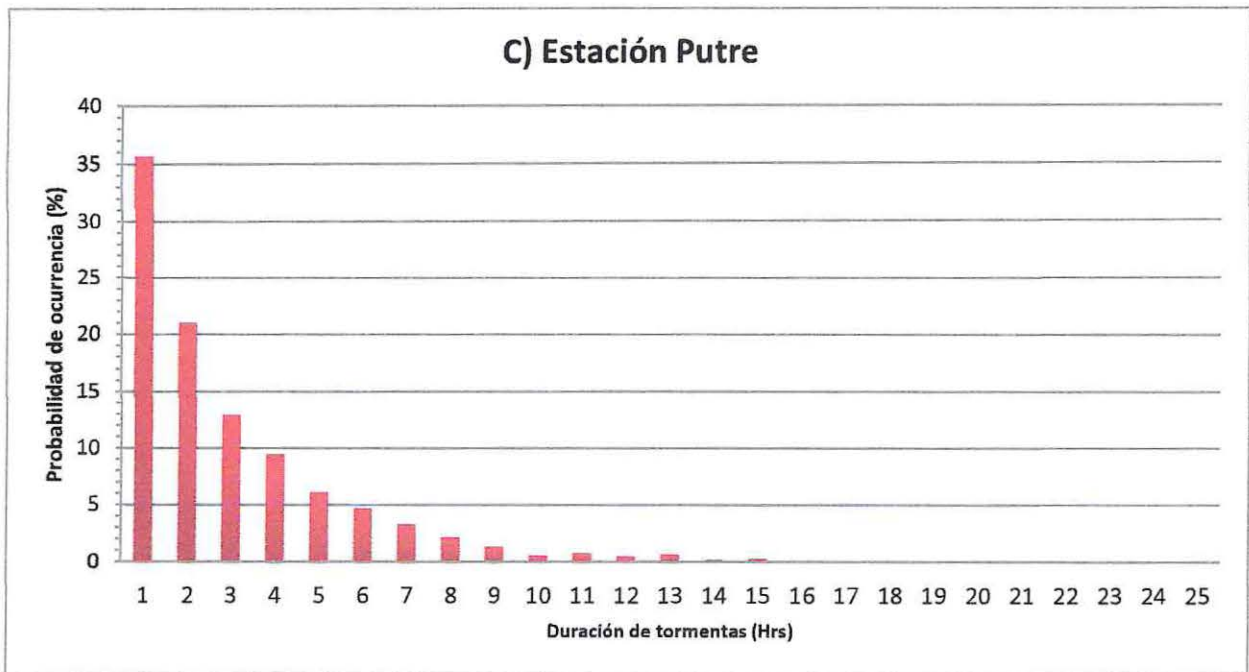


Figura 10.6- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Putre.

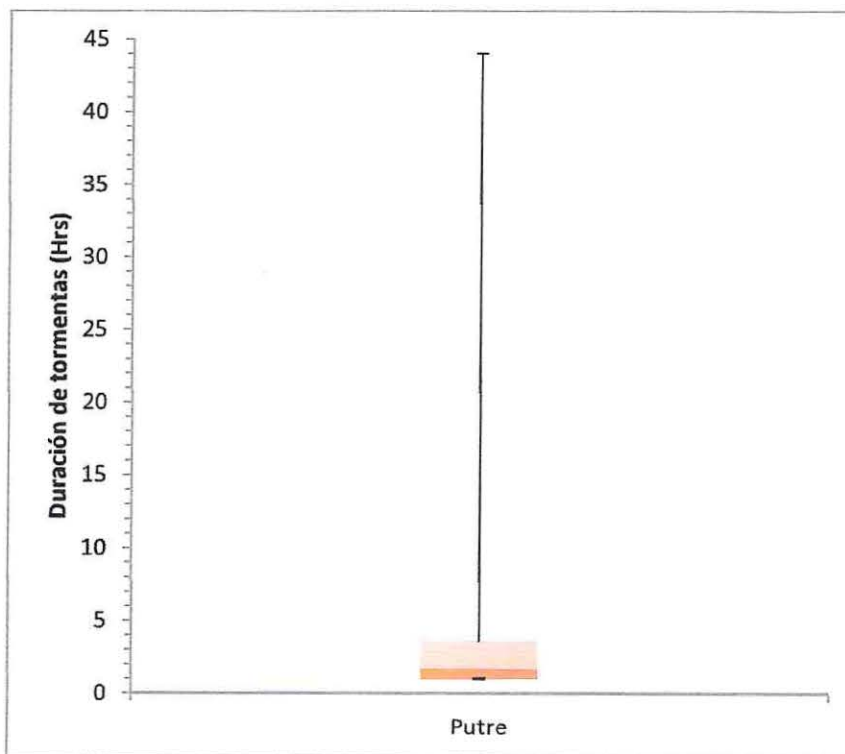


Figura 10.7- Cuartiles de las duraciones de Estación Putre.

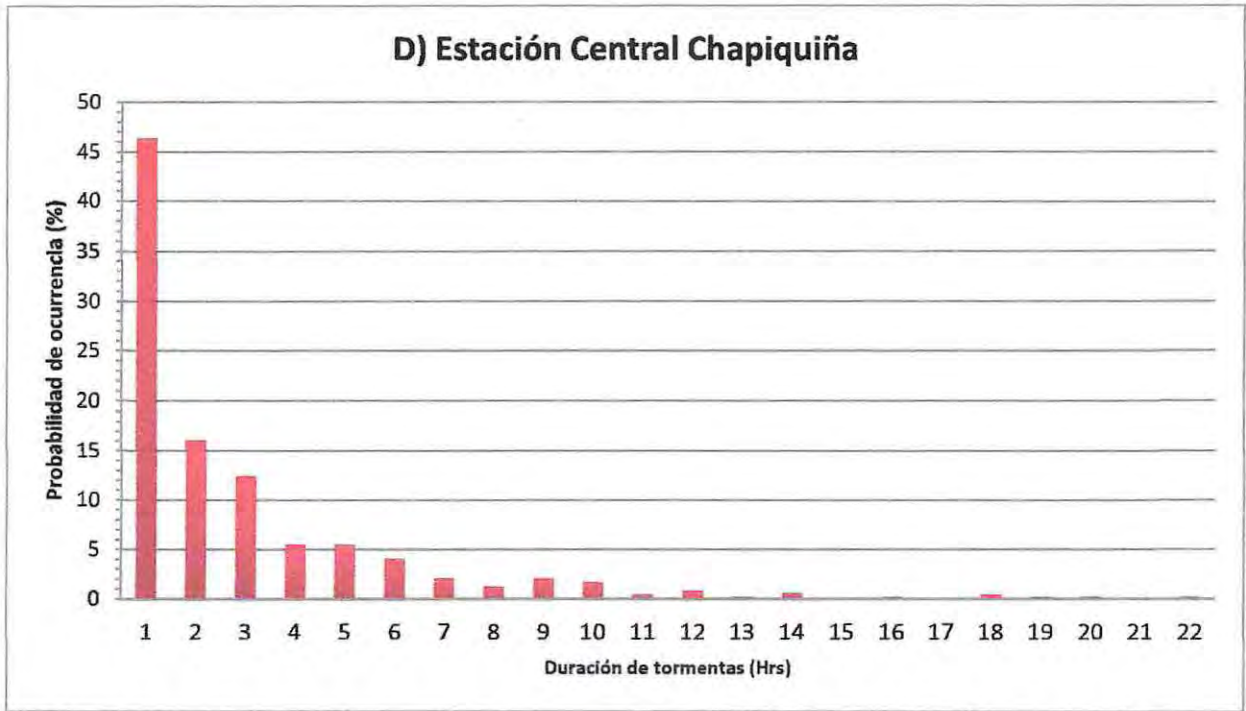


Figura 10.8- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Central Chapiquiña.

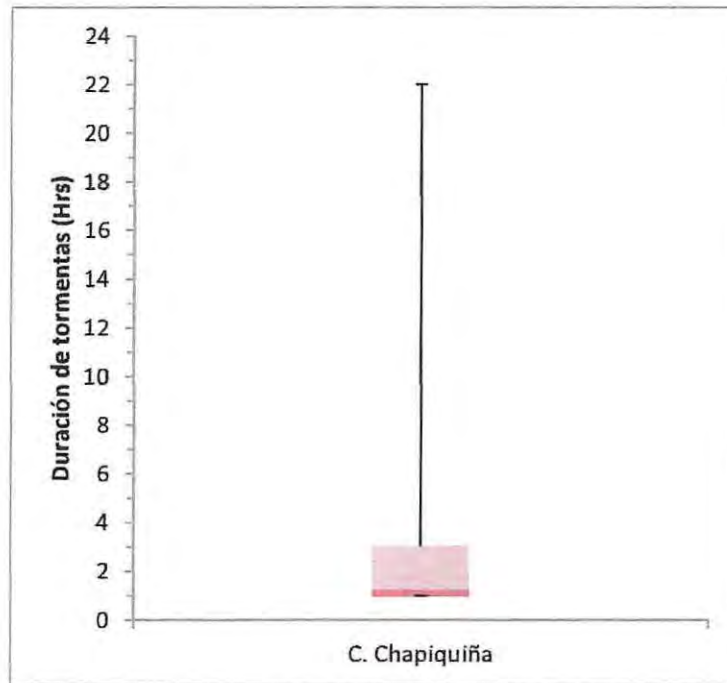


Figura 10.9- Cuartiles de las duraciones de Estación Central Chapiquiña.

El comportamiento de las distribuciones de las duraciones de las tormentas tiende a ser de formas similares, independiente de la estación en que se encuentran los registros, donde al agrupar todas las tormentas se puede obtener como dato regionalizado las duraciones de estos eventos tal como se muestra en la Figura 10.10 que representa la probabilidad de ocurrencia de las duraciones en la XV Región y en la Figura 10.11 que muestra los cuartiles de las duraciones de la región de Arica y Parinacota.

A continuación, en la Tabla 10.1, se observan las probabilidades de ocurrencia de las duraciones a nivel regional.

Tabla 10.1- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Arica y Parinacota.

Duración	Probabilidad de ocurrencia
1	35.889
2	20.170
3	15.021
4	9.021
5	6.156
6	4.220
7	2.981
8	1.858
9	1.355
10	0.852
11	0.619
12	0.619
13	0.348
14	0.194
15	0.155
16	0.077
17	0.077
18	0.077
19	0.116
20	0.039
21	0.039
22	0.039
24	0.039
44	0.039

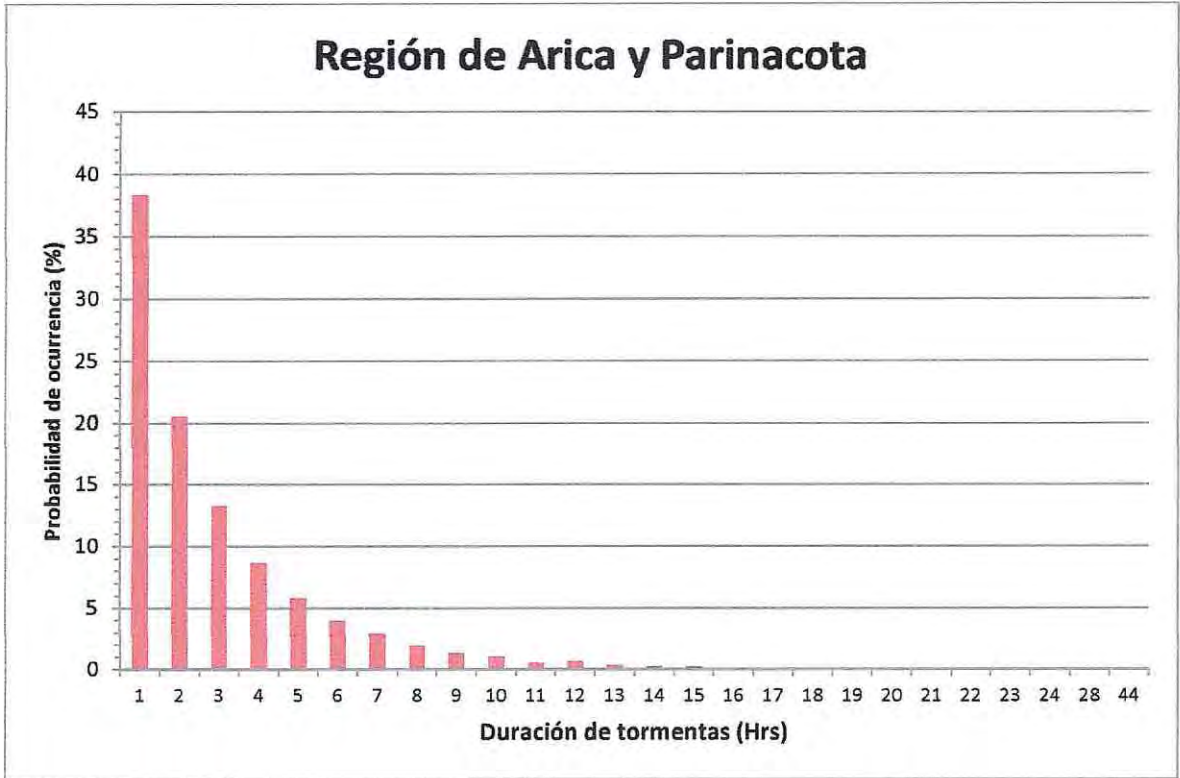


Figura 10.10- Probabilidades de ocurrencia Región de Arica y Parinacota.

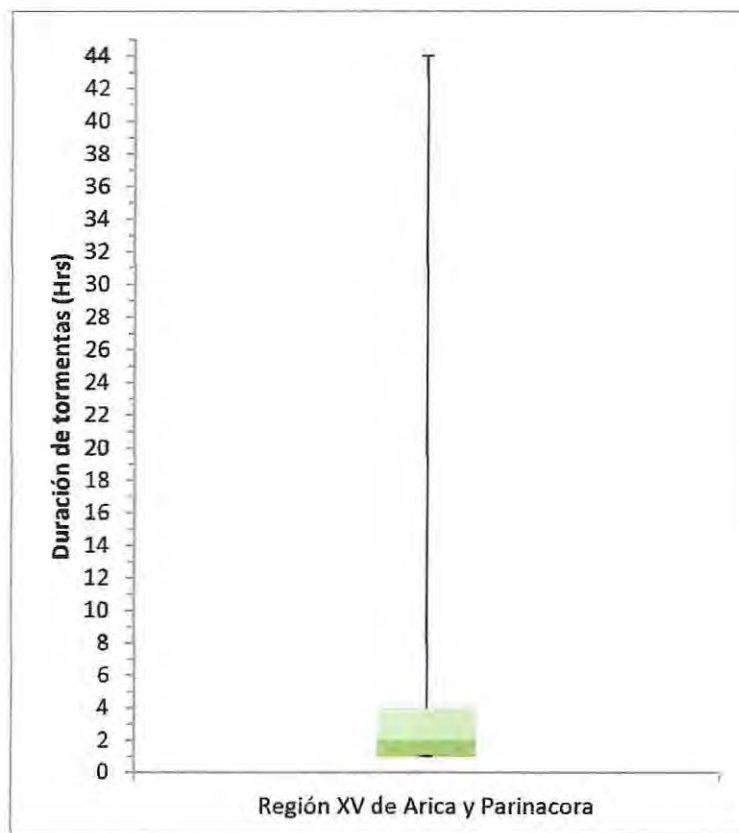


Figura 10.11- Cuartiles de duraciones de la XV Región de Arica y Parinacota.

Es posible visualizar en la Figura 10.11 que aproximadamente el 75% de los datos registrados se encuentran dentro de 1 hasta 4 horas de duración de las tormentas. Este dato puede dar una noción de que las precipitaciones de esta región son mayoritariamente de duraciones cortas y que sólo el 25% de estos datos supera las 4 horas de duración.

## 10.2 II Región de Antofagasta.

En la Región de Antofagasta, fue posible recopilar información de tormentas en las siguientes estaciones meteorológicas:

- E) **Estación Linzor:** en la estación meteorológica fue posible registrar 439 tormentas, donde sus duraciones varían entre 1 a 15 horas.
- F) **Estación Salado Embalse:** en la estación meteorológica se registraron 279 tormentas y su duración varía entre 1 a 15 horas.
- G) **Estación El Tatio:** en esta estación se registraron 417 tormentas, las que se distribuyen según su duración. Estas duraciones van desde 1 hasta 16 horas.
- H) **Estación Toconce:** para la presente estación se han registrado 456 tormentas, donde las duraciones se distribuyen entre 1 hasta 13 horas.
- I) **Estación Lequena:** en la estación meteorológica se registraron 270 tormentas, y su duración varía entre 1 a 14 horas.

La Figura 10.12 muestra las ubicaciones de las estaciones anteriormente nombradas de la Región de Antofagasta.

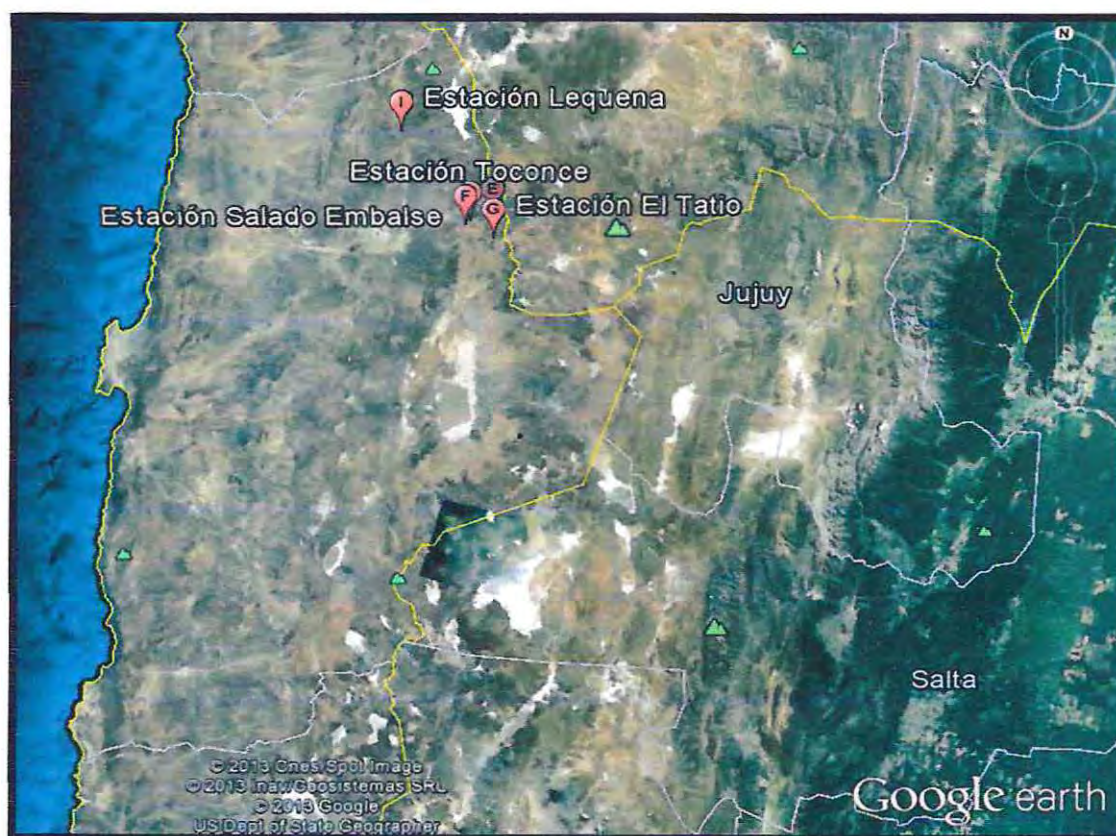


Figura 10.12- Mapa de la II Región de Antofagasta.

Las cantidades de registros de tormentas anteriormente expuestas se distribuyen por la duración que éstas puedan tener. Esto se puede observar en la Figura 10.13, que representa a la Estación Linzor; la Figura 10.15, que corresponde a la Estación Salado Embalse; la Figura 10.17, que representa a la Estación El Tatio. La Figura 10.19, correspondiendo a la distribución de la Estación Toconce y la Figura 10.21, que representa a la Estación Lequena. Por otro lado, en las figuras 10.14, 10.16, 10.18, 10.20 y 10.22 se muestra los cuartiles en que se dividen las duraciones de las tormentas.

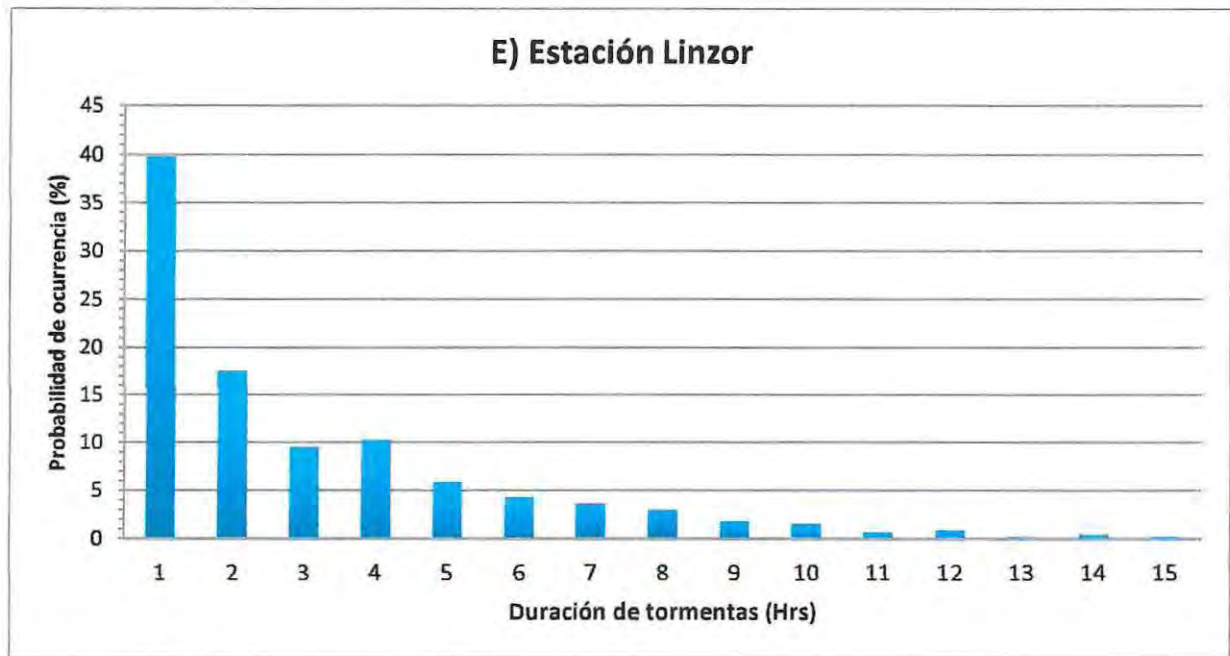


Figura 10.13- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Linzor.

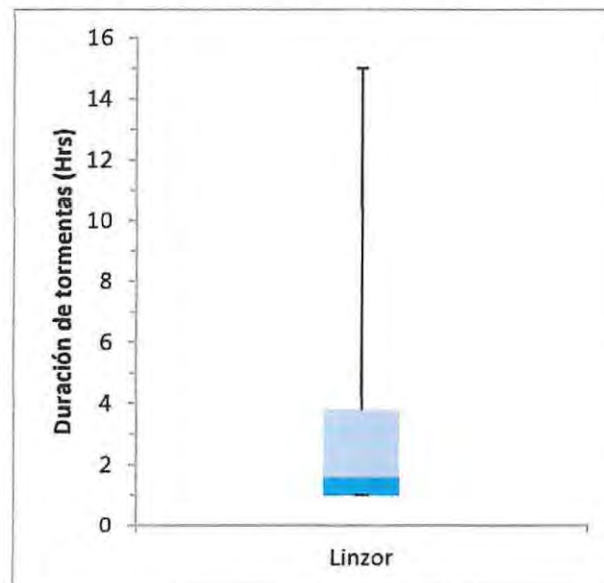


Figura 10.14- Cuartiles de las duraciones de Estación Linzor.

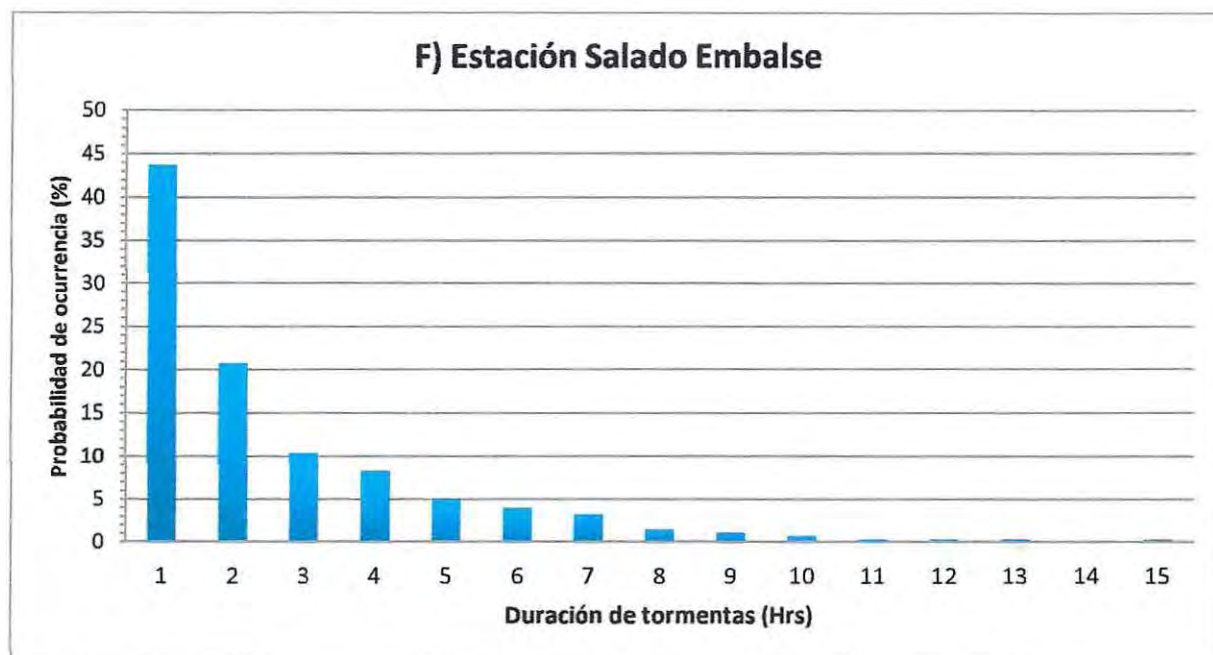


Figura 10.15- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Salado Embalse.

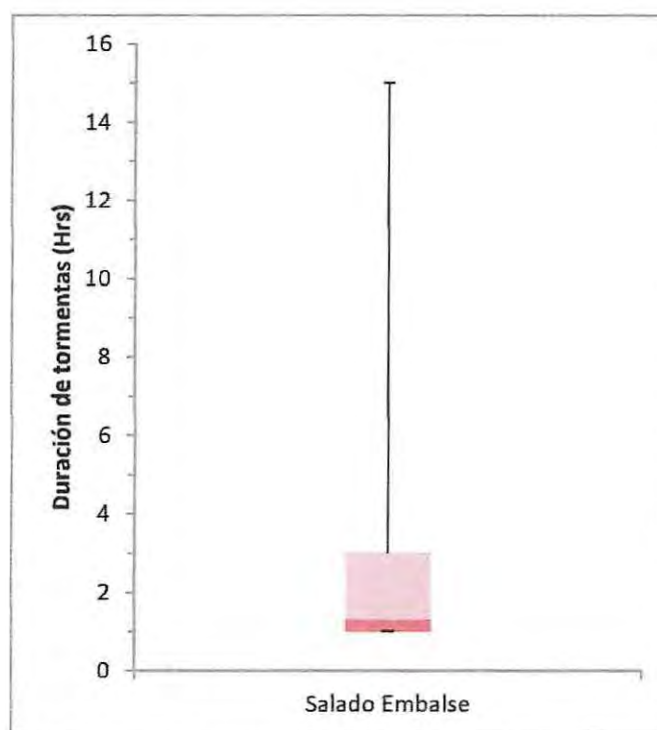


Figura 10.16- Cuartiles de las duraciones de Estación Salado Embalse.

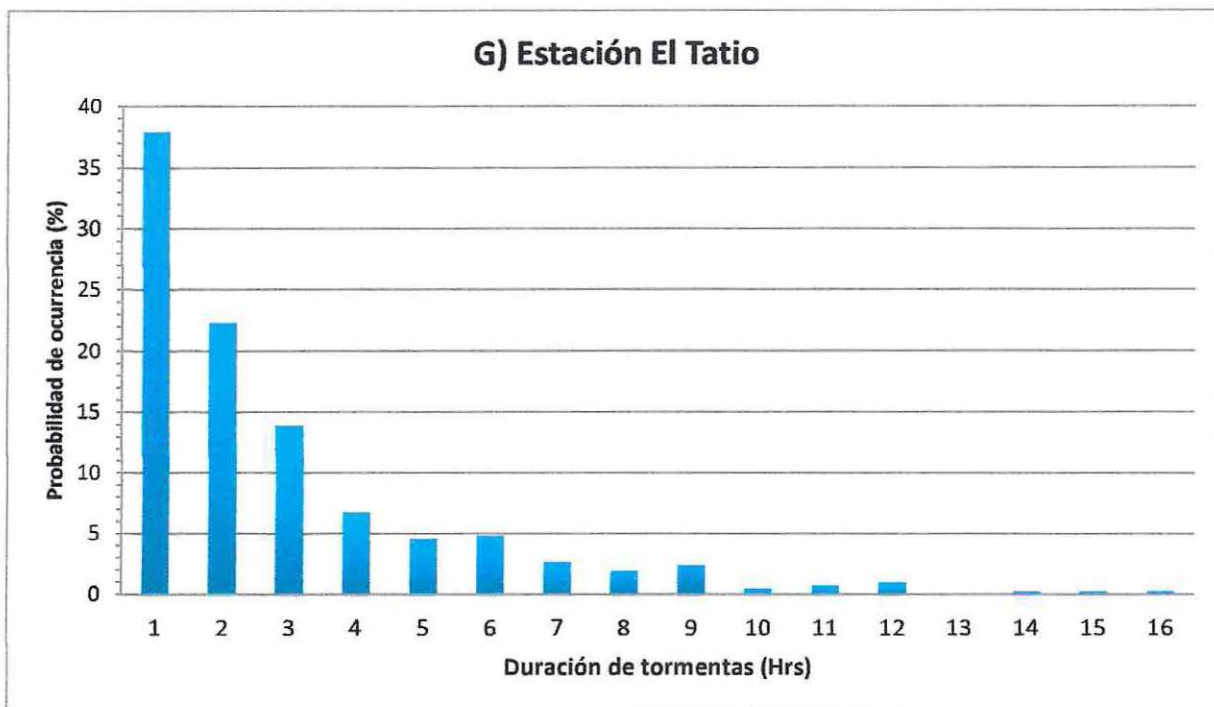


Figura 10.17- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación El Tatio.

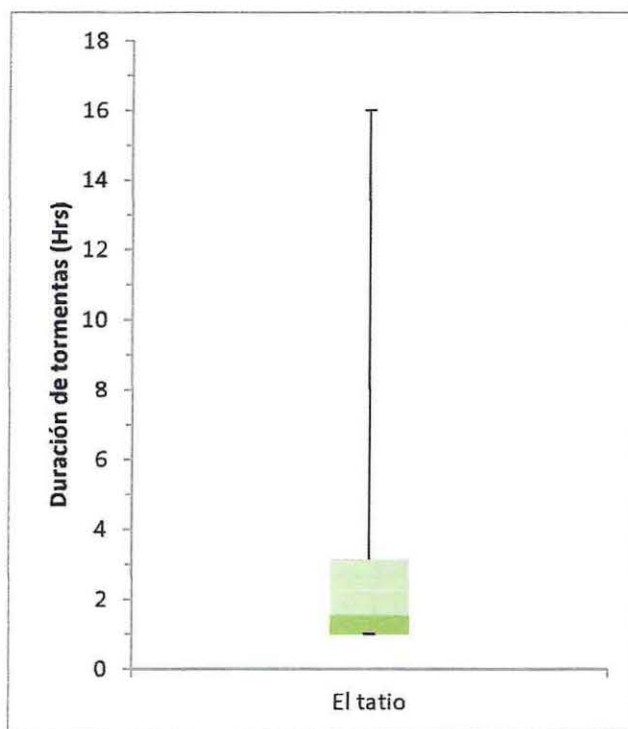


Figura 10.18- Cuartiles de las duraciones de Estación El Tatio.

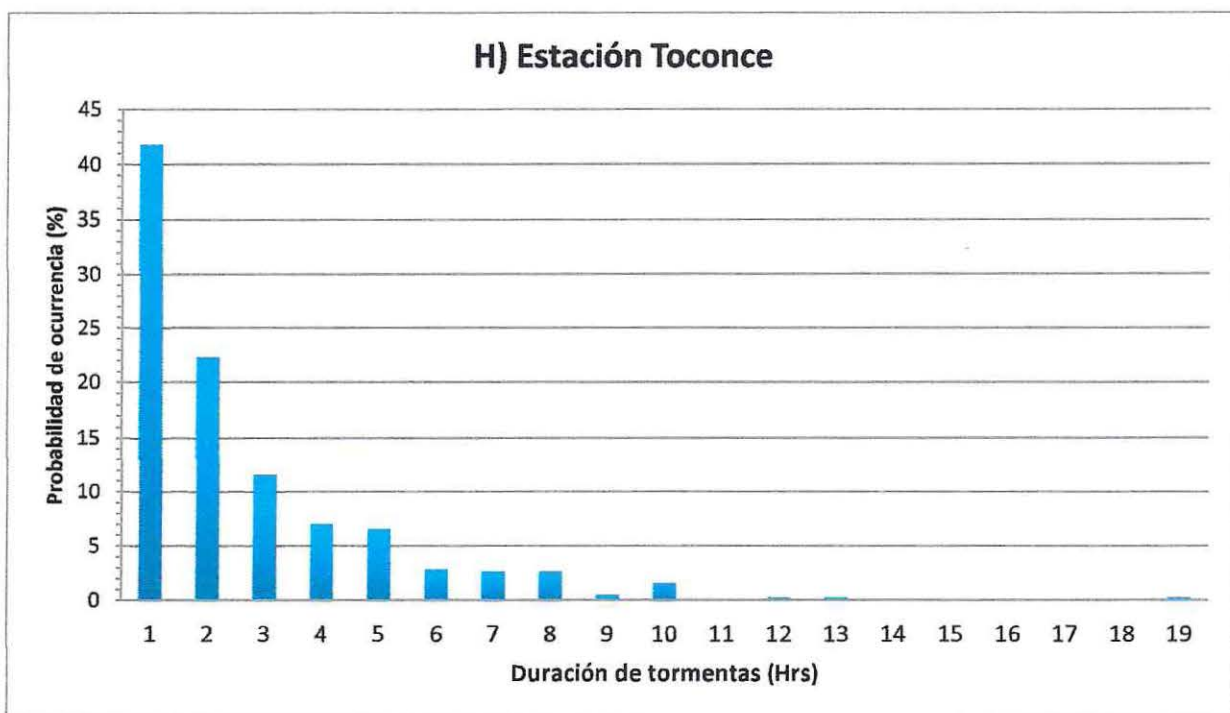


Figura 10.19- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Toconce.

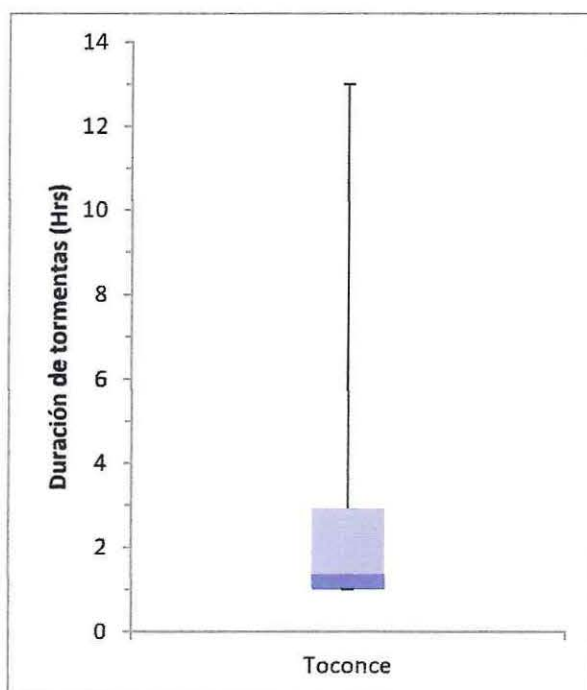


Figura 10.20- Cuartiles de las duraciones de Estación Toconce.

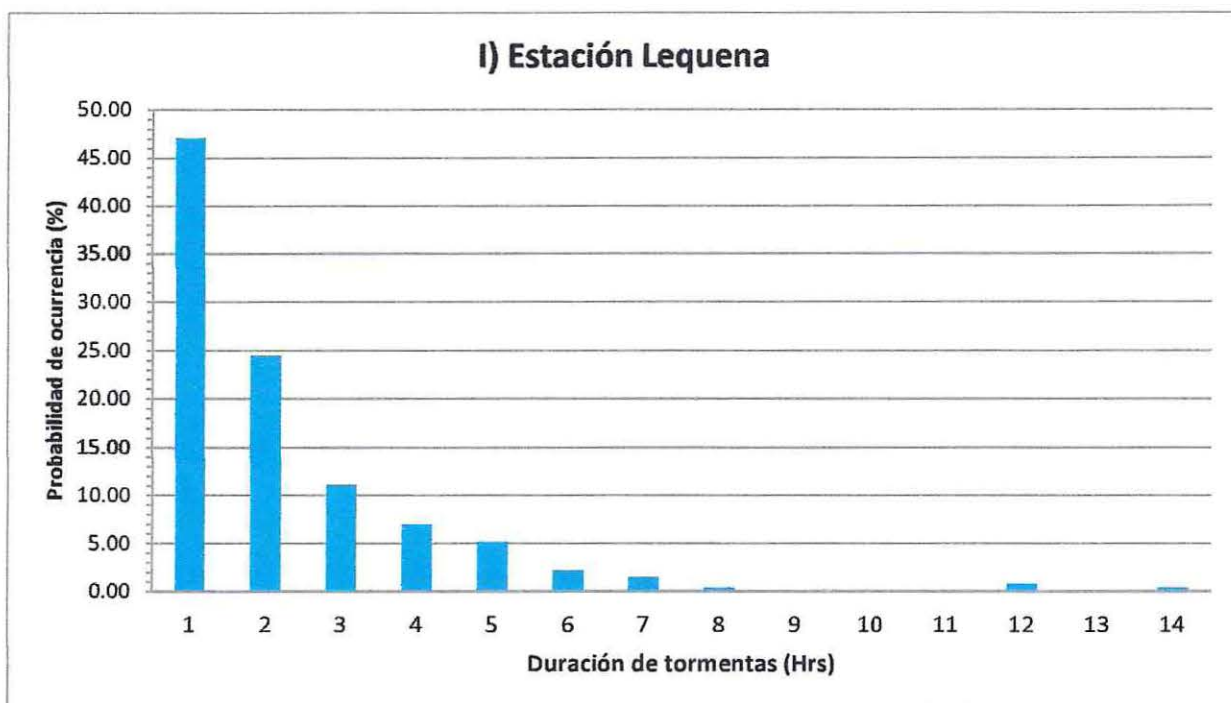


Figura 10.21- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Lequena.

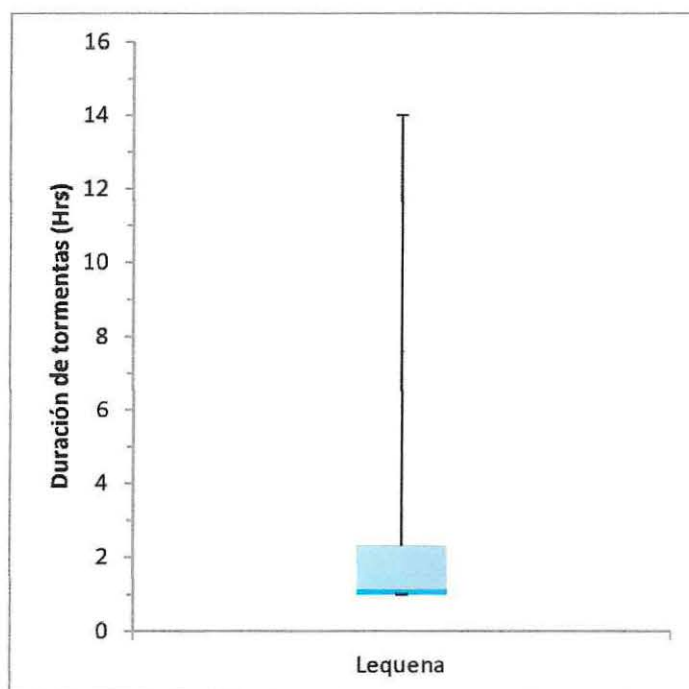


Figura 10.22- Cuartiles de las duraciones de Estación Lequena.

El comportamiento de las distribuciones de las duraciones de las tormentas tiende a tener formas similares, independiente de la estación que representen, donde al agrupar todas las tormentas se puede obtener como dato regionalizado las duraciones de estos eventos, tal como se muestra en la Figura 10.23, que representa la probabilidad de ocurrencia de las duraciones en la II Región y en la Figura 10.24, que muestra los cuartiles de las duraciones de la Región de Antofagasta.

Es posible observar a continuación, en la Tabla 10.2, las distintas probabilidades de ocurrencia para las duraciones de las tormentas a nivel de región.

Tabla 10.2- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Antofagasta.

Duración	Probabilidad de ocurrencia
1	41.537
2	21.279
3	11.392
4	7.899
5	5.535
6	3.708
7	2.794
8	2.042
9	1.236
10	0.967
11	0.376
12	0.645
13	0.161
14	0.215
15	0.161
16	0.054

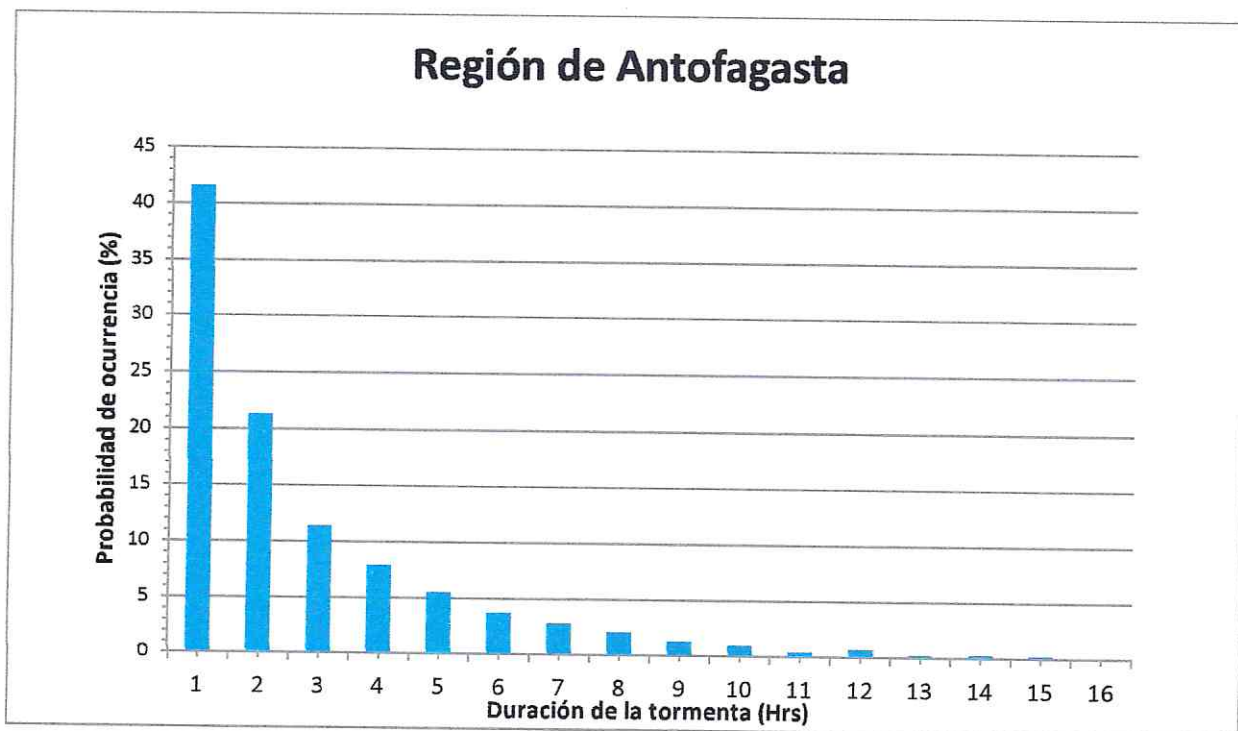


Figura 10.23- Probabilidades de ocurrencia Región de Antofagasta.

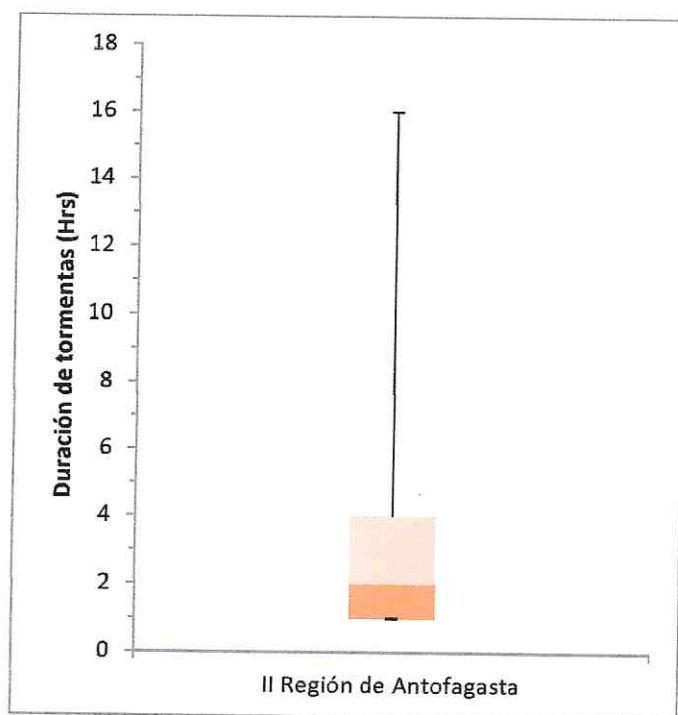


Figura 10.24- Cuartiles de duraciones de la II Región de Antofagasta.

De lo expuesto anteriormente, es posible visualizar que, al igual que en la XV Región, la mayor cantidad de registros se encuentran entre 1 hasta 4 horas de duración de las tormentas, es decir, el 75% del registro total que presenta esta región y a medida que se avanza en las horas de duración disminuyen en forma exponencial las probabilidades de ocurrencia, donde el máximo valor registrado ha sido de 16 horas de duración.

### 10.3 III Región de Atacama.

En la región de Atacama, fue posible recopilar información de tormentas en las siguientes estaciones meteorológicas:

- J) **Estación Iglesia Colorada:** para la presente estación se han recopilado 58 tormentas, distribuidas por las duraciones que tienen. Estas duraciones van desde 1 hasta 19 horas.
- K) **Estación Conay:** en esta estación fue posible registrar 66 tormentas, donde se distribuyen entre duraciones que van de 1 hasta 24 horas.
- L) **Estación Santa Juana:** para esta estación se han registrado 91 precipitaciones, las cuales se dividen según su tiempo de duración. Estas duraciones varían desde 1 hasta 28 horas.

Las ubicaciones de las estaciones recientemente nombradas se pueden visualizar en la Figura 10.25, la cual muestra el mapa de ubicación de la región con sus respectivas estaciones meteorológicas.



Figura 10.25- Mapa de la III Región de Atacama.

Las distribuciones de las tormentas registradas en las estaciones anteriormente nombradas se pueden visualizar en forma de probabilidades de ocurrencia: en la Figura 10.26, que representa a la Estación de Iglesia Colorada; Figura 10.28, que corresponde a la distribución de la Estación Conay y la Figura 10.30, la cual muestra las distribuciones de las tormentas en la Estación Santa Juana y en las figuras 10.27, 10.29 y 10.31 se muestra los cuartiles de las duraciones de dichas estaciones.

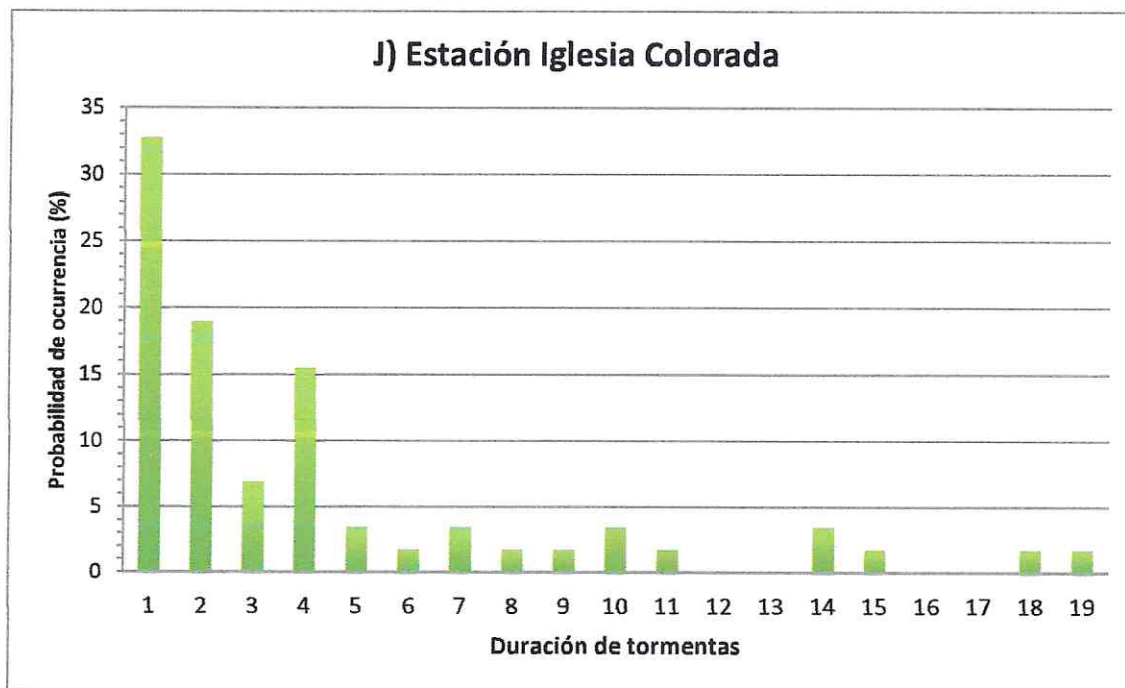


Figura 10.26- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Iglesia Colorada.

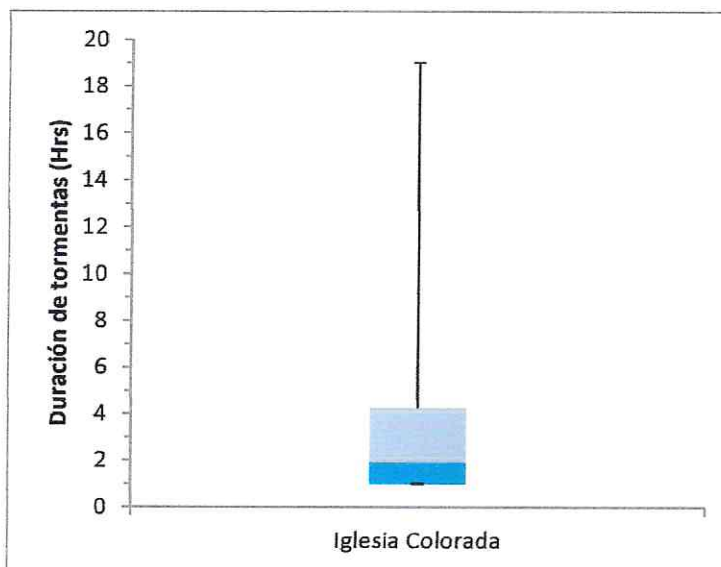


Figura 10.27- Cuartiles de las duraciones de Estación Iglesia Colorada.

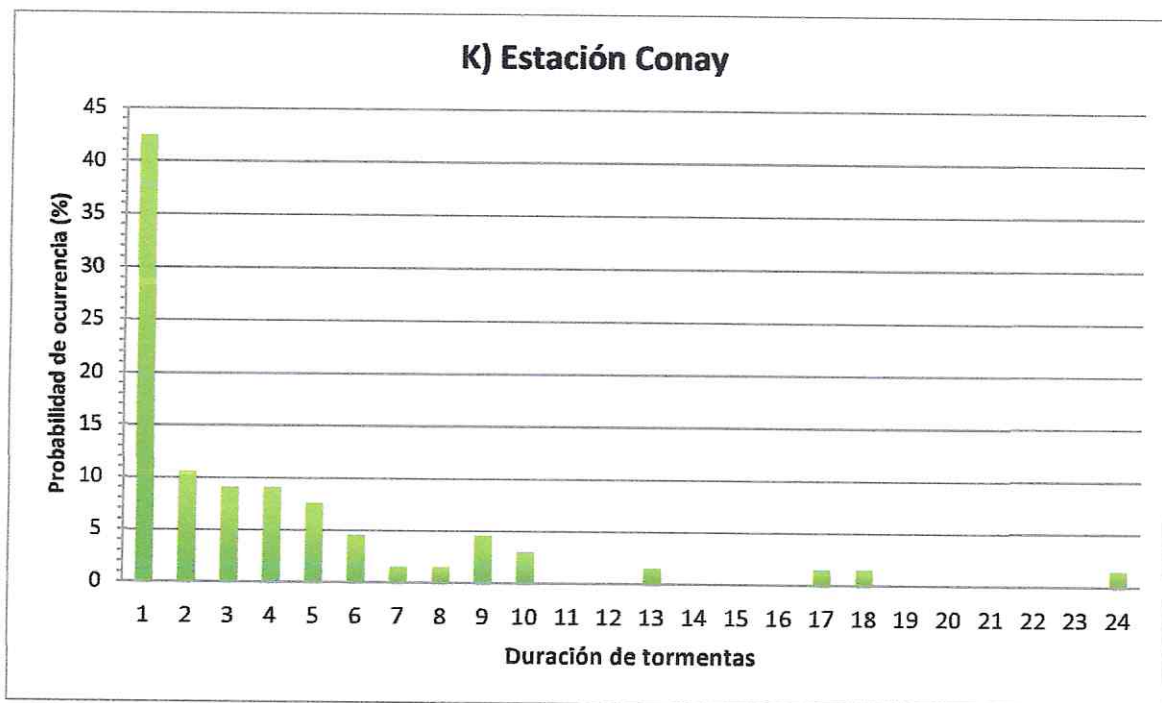


Figura 10.28- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Conay.

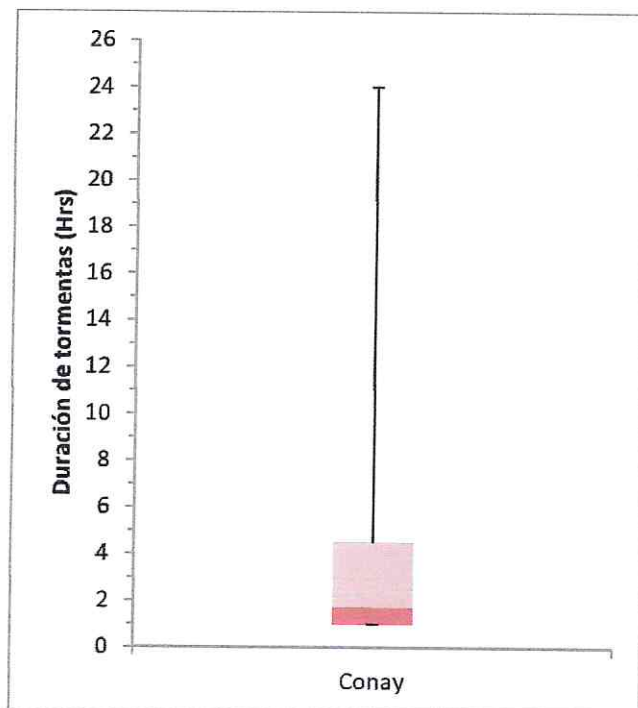


Figura 10.29- Cuartiles de las duraciones de Estación Conay.

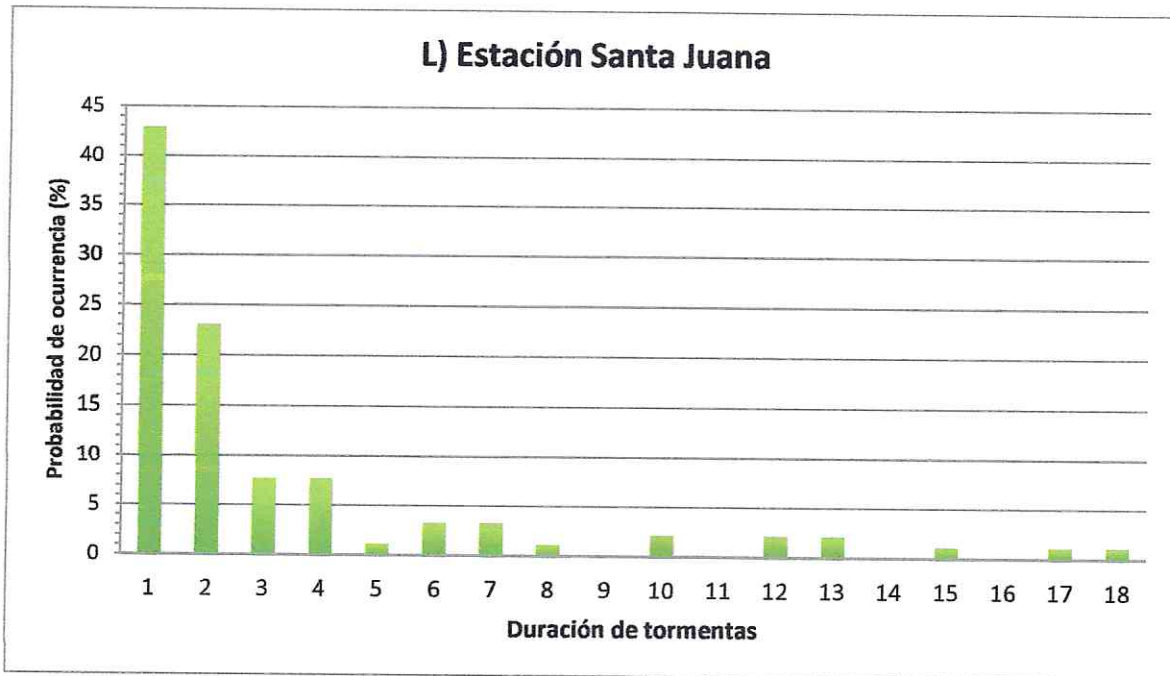


Figura 10.30- Probabilidad de ocurrencia de duraciones de tormentas en Estación Santa Juana.

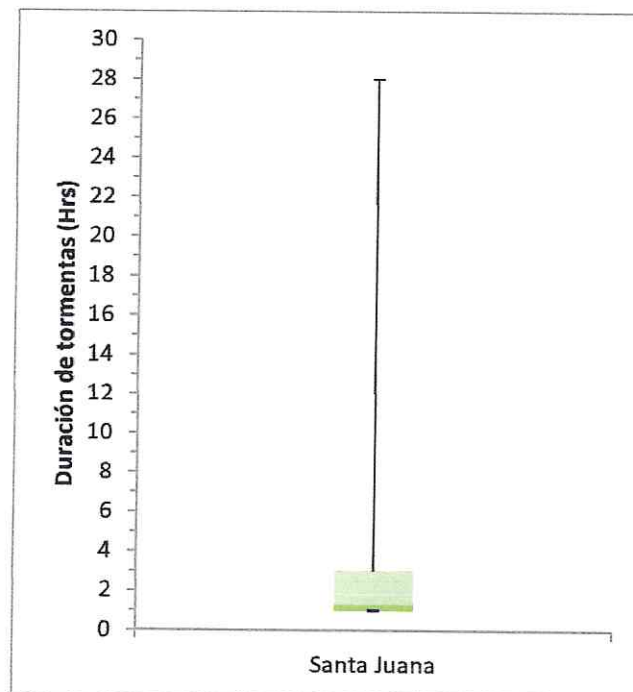


Figura 10.31- Cuartiles de las duraciones de Estación Santa Juana.

El comportamiento de las distribuciones en las duraciones de los eventos en estudio, tienden a tener un comportamiento similar entre las distintas estaciones de la III Región, donde al agrupar todas las tormentas se obtendrán datos regionalizados, como se presentan en las siguientes figuras y tabla.

A continuación, en la tabla 10.3, se pueden observar las probabilidades de ocurrencia de las duraciones a nivel regional.

Tabla 10.3- Probabilidades de ocurrencia en la Región de Atacama.

Duración	Probabilidad de ocurrencia
1	40
2	18.140
3	7.907
4	10.233
5	3.721
6	3.256
7	2.791
8	1.395
9	1.860
10	2.791
11	0.465
12	0.930
13	1.395
14	0.930
15	0.930
17	0.930
18	0.930
19	0.465
24	0.465
28	0.465

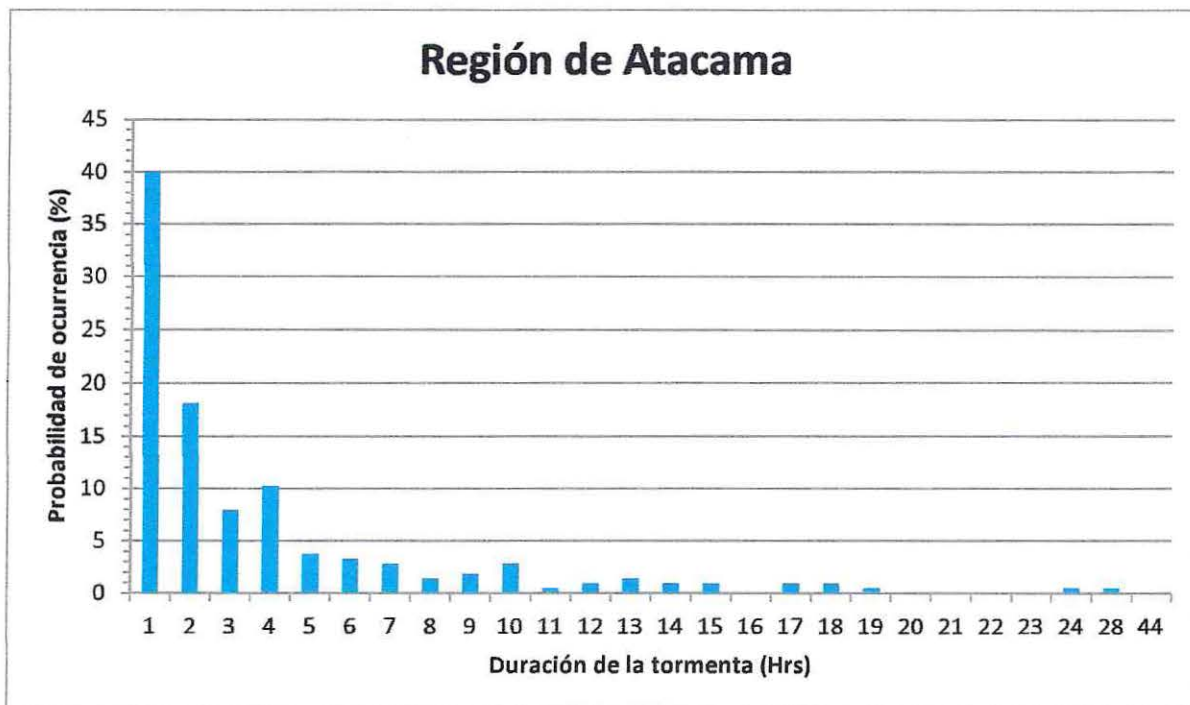


Figura 10.32- Probabilidades de ocurrencia Región de Atacama.

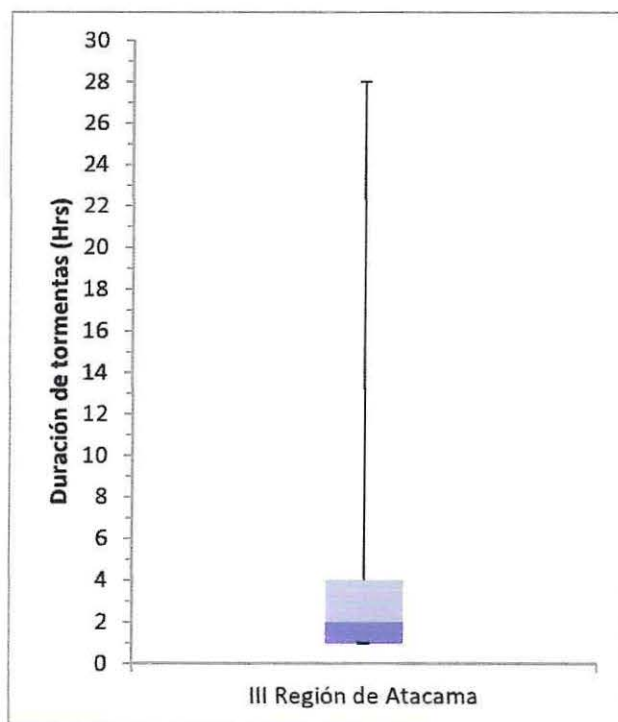


Figura 10.33- Cuartiles de duraciones de la III Región de Atacama.

Se visualiza en la Figura 10.33 que alrededor del 75% de los datos usados en esta región y al igual que las regiones XV y II, se encuentran dentro de 1 hasta 4 horas de duración de las tormentas, es decir para todas las regiones en estudio las tormentas tienden a ser de pequeñas duraciones.

Luego de obtener todas las figuras que indiquen las distribuciones de las distintas duraciones de un evento para cada una de las regiones, se puede observar que en las Regiones de Arica y Parinacota y de Antofagasta tienen una tendencia similar en la distribución de sus duraciones de las tormentas, no así en la III Región de Atacama, donde en su distribución tiende a ser un poco más dispersa en los valores registrados de las duraciones de las precipitaciones

## 11. Contraste de Hietogramas de Tormentas de Diseño.

El contraste de las tormentas de diseño será posible realizarlo teniendo un método a través del cual sea factible obtener la distribución temporal de la tormenta, para luego compararla con la distribución de la lluvia estimada en este trabajo de título.

El método a aplicar para obtener la distribución será el método de "Bloques Alternantes". Este consiste en especificar la profundidad de precipitación que ocurre en "n" intervalos de tiempos sucesivos, para luego reordenarlos en una secuencia temporal de modo que la máxima precipitación ocurra en el centro de la duración requerida y que las demás profundidades queden en orden descendente, alternándolos hacia la derecha e izquierda del bloque central, formando así el Hietograma de Diseño.

Como primer paso se debe obtener la precipitación máxima en 24 horas, con un período de retorno de 10 años, dato que es posible obtener al multiplicar el valor de la intensidad dada por el Manual de Carreteras (Volumen 3), tabla 3.702.402.A, por la cantidad de horas de la duración, es decir, por las 24 horas.

Para este contraste se ha determinado utilizar los valores que se otorgan para la estación pluviográfica de Putre, ubicada en la Región de Arica y Parinacota, donde la intensidad obtenida para el período de retorno de 10 años y 24 horas de duración es de 1.17 (mm/hr), con esto será posible obtener la profundidad total del evento, teniendo como resultado una precipitación de 28.08 (mm).

La elección de esta estación meteorológica es sólo a modo de ejemplo, ésta servirá para observar la distribución temporal del evento, donde la única variación que se verá, si se eligen otras regiones de la zona en estudio, será la precipitación total de la tormenta y la profundidad que alcance en las distintas horas de duración. Por esto se ha determinado adimensionar el tiempo y las profundidades de la precipitación, para lograr así una mejor comparación entre los métodos, como será posible observarlo más adelante.

Las duraciones de las tormentas a analizar serán de 6, 12 y 24 horas. Para poder obtener las precipitaciones totales de 6 y 12 horas se aplicará la fórmula de Grunsky:

$$P_t = CD_t * P_{24}^{10}$$

**Dónde:**

- $P_t$  = Precipitación en el tiempo t.
- $CD_t$  = Coeficiente de duración de tiempo t (en horas), el que se puede obtener de la expresión:

$$CD_t = \sqrt{\frac{t}{24}}$$

- $P_{24}^{10}$  = Precipitación máxima en 24 horas con un período de retorno de 10 años.

Expuestas las fórmulas de Grunsky, será posible comenzar con el procedimiento para la distribución de 6 horas de tormenta.

**Información general:**

- Lugar = Putre, XV Región de Arica y Parinacota.
- Período de retorno = 10 años.
- Intensidad = 1.17 (mm/hr).
- Precipitación máxima en 24 horas = 28.08 (mm).

La aplicación de la fórmula de Grunsky es posible observarla en la Tabla 11.1, que se presenta a continuación.

Tabla 11.1- Coeficiente de duración por Grunsky, para una tormenta de 6 horas.

Horas	CDt
1	0.204
2	0.289
3	0.354
4	0.408
5	0.456
6	0.500

La obtención de la precipitación total o acumulada para cada una de las duraciones se realizará multiplicando la precipitación máxima en 24 horas con los coeficientes de duración obtenidos anteriormente, tal como muestra la Tabla 11.2.

Tabla 11.2- Precipitaciones acumuladas para una tormenta de 6 horas.

Horas	CDt	Pt (mm).
1	0.204	5.732
2	0.289	8.106
3	0.354	9.928
4	0.408	11.464
5	0.456	12.817
6	0.500	14.040

Para obtener la precipitación incremental por cada hora de lluvia basta con calcular la diferencia entre la hora que se desea saber la profundidad de lluvia y quien la antecede, como por ejemplo, para obtener la precipitación de la hora 3 de lluvia, se debe restar la precipitación acumulada de la hora 3 de lluvia con la profundidad de lluvia de la hora 2 del evento. Esto es posible visualizarlo en la Tabla 11.3, que muestra la precipitación incremental (Pi) de cada rango de tiempo.

Tabla 11.3- Precipitación incremental de la tormenta de 6 horas de duración en Putre.

Horas	CDt	Pt (mm)	Pi (mm)
1	0.204	5.732	5.732
2	0.289	8.106	2.374
3	0.354	9.928	1.822
4	0.408	11.464	1.536
5	0.456	12.817	1.353
6	0.500	14.040	1.223

Una vez obtenidas las precipitaciones incrementales de los intervalos de tiempo es posible realizar el ordenamiento del bloque alterno. Para esta tormenta de duración de 6 horas se comenzará a ubicar la mayor precipitación en la parte central de la duración de lluvia, es decir, se ubicará la precipitación incremental de 5.732 (mm) en la parte central de la tormenta, en este caso en la hora 3, para luego seguir con la precipitación de 2.374 (mm), ubicándola hacia la derecha del bloque central, en la hora 4. La siguiente precipitación incremental de 1.822 (mm) debe ir hacia la izquierda del bloque central, en la hora 2 y así sucesivamente con las siguientes profundidades, obteniendo una tabla de valores como se muestra a continuación en la Tabla 11.4.

Tabla 11.4- Distribución temporal de la lluvia para una tormenta de 6 horas en Putre.

Tiempo (hrs.)	Precipitación (mm)
0 - 1	1.353
1 - 2	1.822
2 - 3	5.732
3 - 4	2.374
4 - 5	1.536
5 - 6	1.223

Esta distribución temporal del evento se comparará con la distribución de mayor probabilidad de ocurrencia y con la menor probabilidad de excedencia expuesta en este trabajo, es decir, se comparará con el "Grupo 2" de lluvia y con la curva de probabilidad de excedencia del 10%. Estos valores de la curva recién expuesta se pueden extraer directamente de la Tabla 8.6.

Para realizar este análisis y hacer la respectiva comparación, se llevaran a porcentajes las horas y las profundidades de la tormenta, a partir de esto la Tabla 10.5 muestra cada uno de los valores expuestos anteriormente de la Tabla 11.4, llevados a porcentajes.

Tabla 11.5- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 6 horas en Putre.

Porcentaje de Tiempo acumulado	Porcentaje de lluvia
0	0
16.667	9.637
33.333	12.976
50	40.825
66.667	16.910
83.333	10.939
100	8.713

Los valores de porcentajes de tiempo y precipitaciones del "Grupo 2" con una probabilidad de excedencia de 10% se pueden visualizar a continuación.

Tabla 11.6- Distribución temporal de lluvia acumulada del "Grupo 2" con 10% de probabilidad de excedencia.

Porcentaje de tiempo acumulado	Porcentajes de precipitación acumulada.
0	0
10	12.15
20	23.87
30	43.18
40	64.41
50	83.13
60	90.00
70	94.54
80	97.95
90	99.25
100	100

Para poder realizar la comparación entre estas distribuciones, se debe tener un mismo patrón de comparación, por lo tanto se debe interpolar las precipitaciones de la Figura 11.6 para los mismos tiempos de la Tabla 11.5, obteniendo así la siguiente tabla de distribución de la lluvia.

Tabla 11.7- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 6 horas de duración.

Porcentaje de tiempo acumulado	Porcentaje de lluvia acumulada	Porcentaje de precipitación no acumulada
0	0	0
16.667	19.962	19.962
33.333	50.257	30.295
50.000	83.131	32.874
66.667	93.025	9.894
83.333	98.383	5.358
100	100	1.617

Luego de obtener las precipitaciones por el método del bloque alterno y el método estipulado por este trabajo de título es posible realizar la comparación de los Hietogramas de diseño, reflejada en la Figura 11.1, que muestra la distribución temporal de la precipitación para una tormenta de 6 horas de duración.

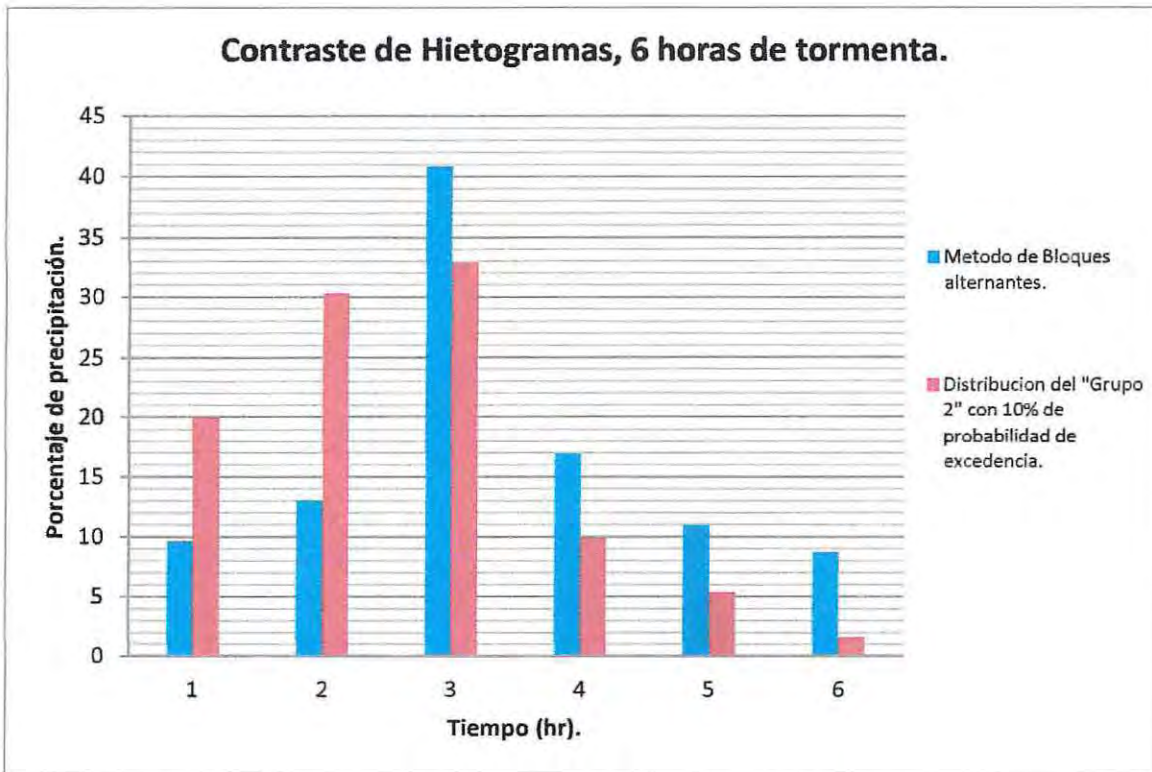


Figura 11.1. Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 6 horas.

El procedimiento expuesto anteriormente para 6 horas de tormenta, será el mismo procedimiento que se realizará tanto para las 12 horas de tormenta como las de 24 horas, por lo que a continuación sólo se presentarán los porcentajes de distribución de la precipitación para ambos métodos. A partir de esto es posible obtener los resultados de 12 horas de precipitación como se presenta en la Tabla 11.8, donde ésta indica la distribución temporal a través del método de bloques alternantes y la Tabla 11.9 muestra la distribución temporal de la lluvia para el "Grupo 2" con un 10% de probabilidad de excedencia.

Tabla 11.8- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 12 horas en Putre.

Porcentaje de Tiempo Acumulado	Porcentaje de lluvia
0	0
8.333	4.456
16.667	4.953
25	5.666
33.333	6.815
41.667	9.175
50	28.868
58.333	11.957
66.667	7.735
75	6.161
83.333	5.273
91.667	4.685
100	4.257

Tabla 11.9- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 12 horas de duración.

Porcentaje de tiempo acumulado	Porcentaje de lluvia acumulada	Porcentaje de precipitación no acumulada
0	0	0
8.333	10.125	10.125
16.667	19.962	9.838
25	33.526	13.563
33.333	50.257	16.731
41.667	67.526	17.269
50	83.131	15.605
58.333	88.855	5.724
66.667	93.025	4.170
75	96.243	3.218
83.333	98.383	2.140
91.667	99.377	0.994
100	100	0.623

Al tener las distribuciones temporales a través de los dos métodos, es posible realizar los Hietogramas, para luego hacer las respectivas comparaciones, esto puede ser observado en la Figura 11.2, dónde se encuentran ambos hietogramas graficados.

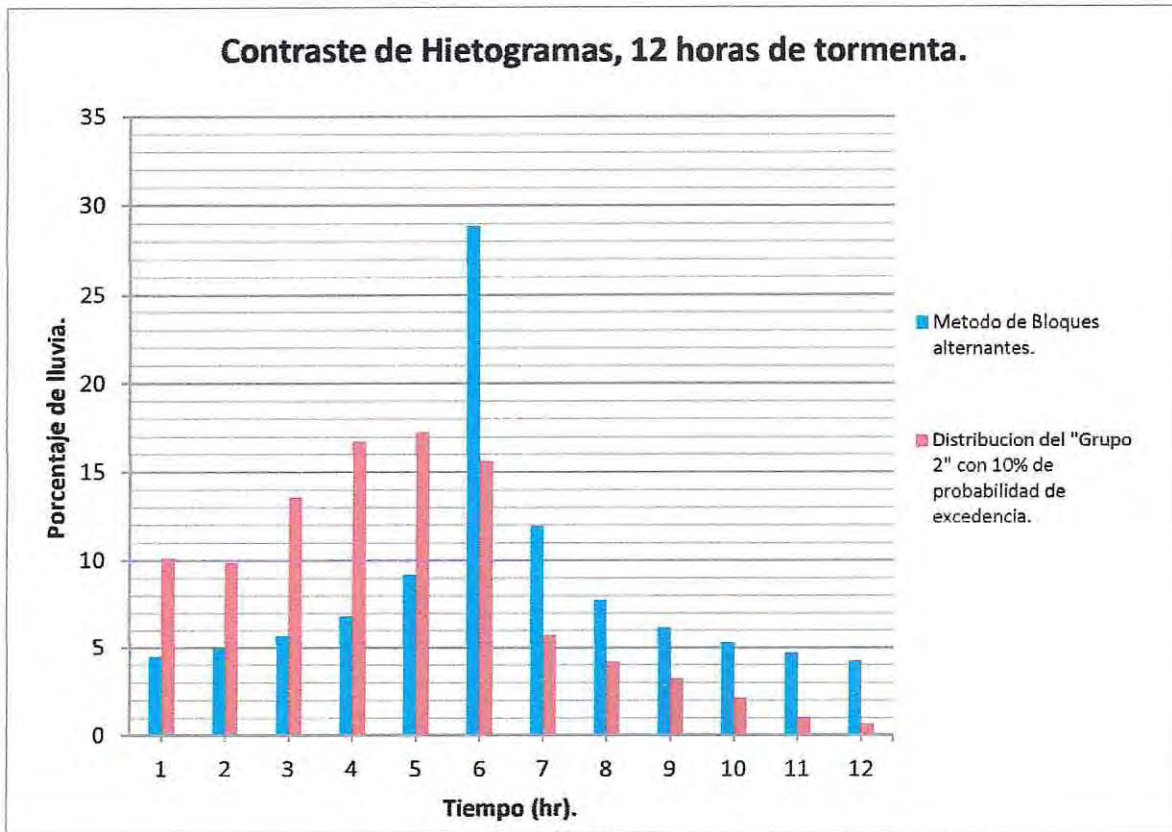


Figura 11.2- Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 12 horas.

La última comparación de hietogramas se le aplicará a la tormenta de 24 horas, como anteriormente se expuso, se realizará el mismo procedimiento descrito tanto como para las tormentas de 6 y 12 horas.

Al haber aplicado los procedimientos descritos anteriormente a una tormenta de 24 horas, da como resultado los valores que se muestran en la Tabla 11.10 para un hietograma obtenido a través del método de bloques alternantes y la Tabla 11.11, donde los datos representan la distribución de la precipitación para el "Grupo 2" con una probabilidad de excedencia del 10%.

Tabla 11.10- Porcentajes de la distribución temporal de una tormenta de 24 horas en Putre.

Porcentaje de Tiempo Acumulado	Porcentaje de lluvia
0	0
4.167	2.152
8.333	2.254
12.5	2.373
16.667	2.513
20.833	2.681
25	2.887
29.167	3.151
33.333	3.502
37.5	4.006
41.667	4.819
45.833	6.488
50	20.412
54.167	8.455
58.333	5.469
62.5	4.356
66.667	3.729
70.833	3.312
75	3.010
79.167	2.778
83.333	2.593
87.5	2.440
91.667	2.311
95.833	2.201
100	2.105

Tabla 11.11- Distribución temporal de la lluvia del "Grupo 2" para una tormenta de 24 horas de duración en Putre.

Porcentaje de tiempo acumulado	Porcentaje de lluvia acumulada	Porcentaje de precipitación no acumulada
0	0	0
4.167	5.062	5.062
8.333	10.125	5.062
12.5	15.079	4.955
16.667	19.962	4.883
20.833	25.478	5.516
25	33.526	8.048
29.167	41.573	8.048
33.333	50.257	8.684
37.5	59.100	8.843
41.667	67.526	8.427
45.833	75.329	7.803
50	83.131	7.803
54.167	85.993	2.862
58.333	88.855	2.862
62.5	91.134	2.279
66.667	93.025	1.891
70.833	94.822	1.797
75	96.243	1.421
79.167	97.664	1.421
83.333	98.383	0.719
87.5	98.927	0.543
91.667	99.377	0.451
95.833	99.689	0.311
100	100	0.311

Las distribuciones temporales expuestas, son retratadas gráficamente en la Figura 11.3, dónde se pueden observar los hietogramas de tormentas de diseño de ambos métodos que se encuentran en estudio, para una tormenta de 24 horas de duración.

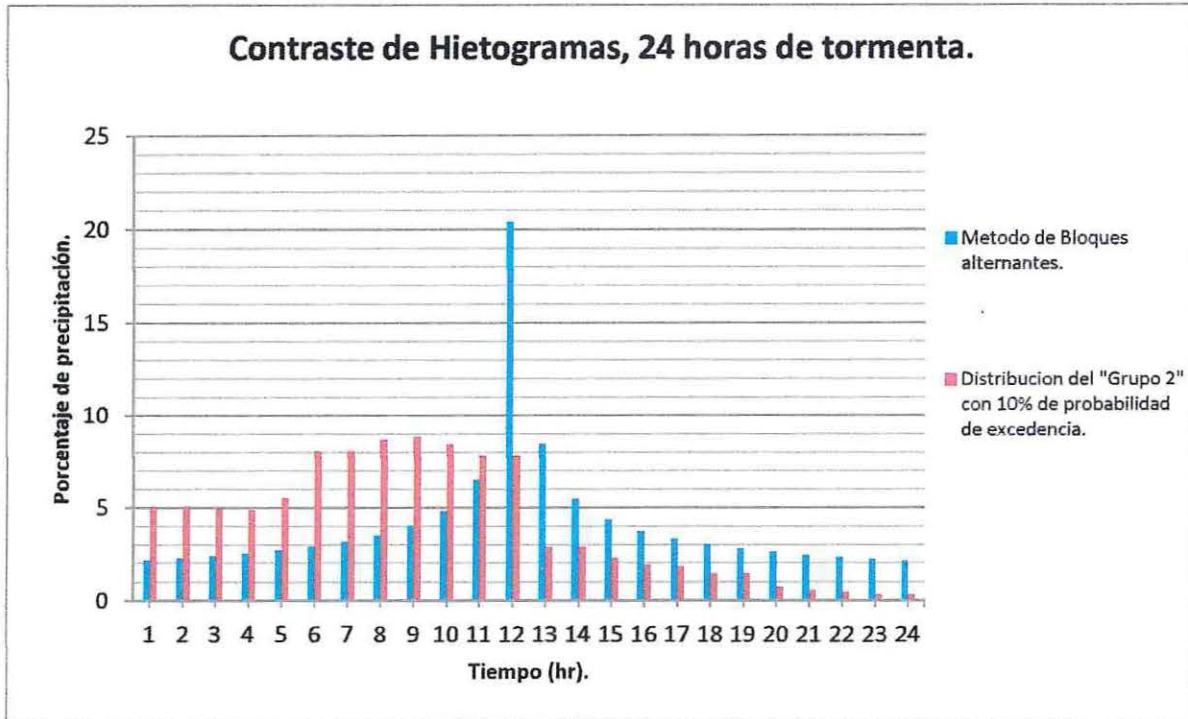


Figura 11.3- Contraste de hietogramas para una tormenta de duración de 24 horas.

Al observar las comparaciones de 6, 12 y 24 horas de tormenta, es posible visualizar que el método de bloques alternantes tiende a sobre estimar la precipitación central, teniendo como consecuencia una precipitación que en la realidad no sucede. Además, la mayor precipitación no ocurre en la parte central, como indica el método expuesto por Chow, si no que ésta se produce mayoritariamente en el segundo cuarto de tiempo de la tormenta.

## 12. Conclusiones.

Las primeras conclusiones que se comenzaban a obtener fueron que la variable de la duración de la tormenta no es un dato a considerar para la obtención de los perfiles de lluvias, es decir, si la precipitación tiene una larga o pequeña duración, ambas tendrán la misma distribución de la lluvia en los distintos grupos obtenidos. Además, se puede observar que la variable del lugar donde precipite tampoco es un factor que deba ser considerado, esto fue posible observar en los distintos grupos obtenidos, analizando la variable de dependencia geográfica.

Para el estudio de las precipitaciones se obtuvieron datos de lluvias a nivel horario de las Regiones de Arica y Parinacota (XV), Antofagasta (II) y Atacama (III), faltando así, datos de la (I) Región de Tarapacá. A partir del presente estudio, se puede inferir que la división de la antigua Región de Tarapacá fue solo una división política y que no afecta la inexistencia de datos de la I Región a los resultados obtenidos en este estudio. A partir de esto, los perfiles de lluvias obtenidos aplican para las regiones XV, II y III de Chile, incluyendo a la I Región de Tarapacá.

Es posible que en alguno de los grupos analizados, exista una superposición de tormentas registradas. Esto se debe a que en algunas de las regiones estudiadas, las estaciones se encuentran relativamente cerca unas de otras por lo tanto no es posible asegurar si se contabiliza la misma tormenta más de una vez, por esto se decidió considerar todas las tormentas registradas de manera independiente, con el fin de no eliminar información en las estaciones.

Al momento que se subdividían las tormentas según el tiempo de mayor precipitación, se observaba que las mayores probabilidades de ocurrencia se producen en el segundo cuarto de la duración de la tormenta ("Grupo 2"). Por el contrario, el cuartil que menos tormentas representaba era el cuarto cuartil de tiempo, es decir, el "Grupo 4" es el menos representado dentro de los grupos restantes. Como consecuencia se puede inferir que la principal característica de las tormentas de la zona norte de Chile, es que en su mayoría éstas tienen una mayor cantidad de lluvia en el inicio de la tormenta que al final de su duración.

Luego de haber obtenido los perfiles de lluvia, se analizó la distribución de las duraciones de las tormentas. Estas distribuciones fueron analizadas en cada estación, divididas por su respectiva región, donde los resultados que entrega este análisis muestran como primer indicio que la XV Región de Arica y Parinacota, sus duraciones de las tormentas tienden a ser de corta duración debido a que alrededor del 75% de los datos registrados se sitúan entre 1 hasta 4 horas. En la III Región de Antofagasta, al igual que en la XV Región, la distribución que presenta es de forma descendente de manera exponencial, a medida que las duraciones son de mayores horas de precipitación, donde sólo el 25% de los datos analizados supera las 4 horas de duración.

Distinta es la III Región de Atacama, donde la distribución no es similar en el orden que presentaban las anteriores regiones descritas. La similitud que presenta esta región con las anteriores es que alrededor del 75% de los datos se encuentran entre las duraciones de 1 hasta 4 horas, lo que implica que en toda la zona en estudio la característica general que presenta es que sus precipitaciones son de corta duración.

La distribución temporal de la lluvia del grupo con mayor probabilidad de ocurrencia expuesto en este trabajo fue comparado con la distribución obtenida de un método tradicional como lo es el del "Método de Bloques Alternantes".

Para comenzar esta comparación se eligió la curva del 10% de probabilidad de excedencia del grupo con mayor probabilidad de ocurrencia, es decir, el "Grupo 2", con la curva de menor riesgo a que la excedan, donde al contrastar se pudo demostrar que el peak de lluvia no ocurre en el centro de la lluvia, si no que la mayor precipitación ocurre en la primera parte de la tormenta, siendo más exacto en el segundo cuarto del tiempo de la precipitación. Además fue posible obtener, con esto, la distribución natural que tiene, para poder así tener como dato una distribución que representa a la mayoría de los datos de este trabajo de título y no modelando con términos simplificados este parámetro, la cual, si se diseña con el método obtenido en este trabajo, ya se está diseñando de una manera más segura, teniendo como consecuencia un diseño con menor riesgo a que sea sobredimensionada.

Para finalizar, se entregan perfiles de lluvias para la Zona Norte de Chile (XV, I, II y III Región), que identifican los patrones de la precipitación, los cuales pueden ser aplicados como dato inicial para los distintos estudios o diseños hidráulicos.

### 13. Referencias bibliográficas.

- [1] "Manual de Carreteras", Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, Volumen 2 y 3, Dirección de Vialidad (2002).
- [2] German Monsalve Sáenz; "Hidrología en la Ingeniería", Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio de 1995, Colombia.
- [3] Ven Te Chow; David R. Maidment; Larry W. Mays; "Hidrología Aplicada", McGraw Hill, 1995.
- [4] Wendor Chereque Morán; "Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Civil", Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- [5] Floyd A. Huff; "Time Distribution of Rainfall in Heavy Storm", Water Resources Research, Vol. 3 1007-1019 (1967).
- [6] Gustavo Manríquez; "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días", Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile.
- [7] Basilio Espildora C.; Alfredo Echeverría.; "Metodología para Caracterizar la Distribución Temporal de las Precipitaciones de Santiago y su Aplicación en la Selección de Precipitaciones de Diseño para el Estudio de Crecidas", Centro de Recursos Hidráulicos (1979), Universidad de Chile.
- [8] Linsley; Kholen; Paulhus; "Hidrología para Ingenieros", Segunda edición, McGraw Hill, 1975.
- [9] Eduardo Varas C.; Philippe Bois; "Hidrología Probabilística", Universidad Católica de Chile.
- [10] Eduardo Varas C.; "Hietogramas de Tormentas de Diseño"; VII Congreso Nacional; Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (1985).
- [11] Rawaa Al-Saadi.; "Hyetograph Estimation for the State of Texas"; Texas Tech University, December 2002.
- [12] Predrag Prodanovic.; Slobodan P. Simonovic.; "Generation of Synthetic Design Storm for the Upper Thames River Basin", November 2004.
- [13] Antonio García Rojas.; "Hietogramas de Diseño en Zonas Urbanas", Noviembre 2006.
- [14] Ministerio de Vivienda y Urbanismo.; "Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño", Santiago, Noviembre de 1996.
- [15] Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile.; "Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III", Santiago, Diciembre de 2008.
- [16] "El Ciclo del Agua"; [En Línea]; Disponible en: [http://www.laescolar.com/frame\\_builder.html](http://www.laescolar.com/frame_builder.html) (Consultado el 16 de Febrero del 2013).

[17] Sol Cáceres; Sol Tibaldi; Julieta de Goycochea; Sara Iglesias; "Viaje a la Región de Cuyo"; [En Línea]; Disponible en: <http://blogmendoza2010.blogspot.com/p/webquest-de-geografia.html> (Consultado el 16 de Enero del 2013).