



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN Y SU
EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO EN CONCEPCIÓN, CARRIEL SUR**

POR

Vicente Andrés Soto Pinto

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
José Vargas

Abril 2022
Concepción (Chile)

© 2022 Vicente Andres Soto Pinto

© 2022 Vicente Andrés Soto Pinto

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres y hermanas quienes siempre me han apoyado y animado.

También sumar a mis amigas y amigos que me han acompañado en todos estos años.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Gastón Torres de la Dirección Meteorológica de Chile por gestionar la entrega de datos, así como al grupo de trabajo detrás que realizó la lectura y transformación de los pluviogramas para la entrega de los datos de precipitación.

Agradecer también al profesor José Vargas quien durante este proceso me guió y apoyó en todo momento, además de darme la confianza y motivarme a realizar esta investigación que es un tema poco trabajado. Sumar al profesor Alex Schwarz por aceptar y participar en la comisión de evaluación y entregar ideas, comentarios y sugerencias al trabajo.

Finalmente agradecer al grupo IFI-Chile, especialmente a los profesores David Poblete (PUC) y Andres Fernández (PUCV) quienes brindaron apoyo y sugerencias de análisis para el trabajo.

RESUMEN

La precipitación total anual caída en Chile ha disminuido en el último tiempo, principalmente en la última década donde se aprecia la denominada mega sequía; y pareciera ser que las lluvias que son de corta duración han aumentado en su intensidad. Debido a esto, aun sabiendo que la precipitación ha disminuido, se desea caracterizar la distribución temporal de la precipitación en Concepción (estación Carriel Sur) y ver como esta ha evolucionado en el tiempo, realizando un análisis estadístico y diagramas de Huff.

Para el desarrollo del trabajo es necesario tener datos de precipitación para los años de análisis, los cuales son obtenidos de la Dirección Meteorológica de Chile (página web y entregados). Se trabajó con registros de precipitación en intervalos de 15 minutos en tres periodos (1989 a 1991, 2000 a 2010 y 2018 a 2020). Es necesario también definir parámetros de separación de tormentas (tiempo seco, precipitación y duración mínimas), con el fin de dividir los registros continuos y obtener las tormentas individuales que ocurren por año. Luego, se separan las tormentas en grupos dependiendo de en qué porcentaje del tiempo ocurre el mayor porcentaje de precipitación, obteniendo cuatro grupos debido a la separación por cuartiles que se realiza. Finalmente, de acuerdo con la metodología que se describe se procedió a realizar los diagramas de Huff para cada periodo.

Una vez obtenidos los diagramas estos son comparados para determinar si existe o no variación en la distribución temporal de la precipitación. Se determinó primero, que los diagramas de Huff pertenecientes a cada cuartil para cada periodo presentan leves variaciones, es decir que las tormentas presentan una distribución temporal similar de acuerdo con en que cuartil ocurren, independiente del año en que ocurra la tormenta.

Luego, al realizar un análisis probabilístico y al comparar las tormentas más probables se determinó que si existe variación, ya que los periodos I y II presentan tormentas más probables pertenecientes al 1° cuartil con un 35 % y 36 % de frecuencia respectivamente, a diferencia del periodo III que presenta tormentas más probables las del 2° cuartil, con un 31 % de frecuencia. Además, se determinó del mismo modo la tormenta menos probable, siendo las tormentas del 4° cuartil para los tres periodos.

Finalmente, al analizar la relación cuartil-duración se determinó que las tormentas han disminuido su duración total, siendo más frecuentes tormentas menores a 6 horas en el periodo III, a diferencia de los periodos I y II donde eran más frecuentes las tormentas mayores a 6 horas.

ABSTRACT

The total annual precipitation in Chile has decreased in recent times, mainly in the last decade where the so-called mega-drought can be seen; and it seems that the rains that are of short duration have raised their intensity. Due to this, even knowing that the precipitation has decreased, we want to characterize the temporal distribution of precipitation in Concepción (*estación Carriel Sur*) and how it has evolved over time, performing a statistical analysis and Huff diagrams.

For the development of this work, it is necessary to have precipitation data for the years of analysis, which are obtained from the Meteorological Directorate of Chile (web and delivered). We worked with precipitation records at 15-minute intervals in three periods (1989 to 1991, 2000 to 2010 and 2018 to 2020). It's also necessary to define storm separation parameters (dry period, minimum precipitation and minimum duration), in order to divide the continuous records and obtain the individual storms that occur per year. Then, the storms are separated into groups depending on what percentage of the time the highest percentage of precipitation occurs, obtaining four groups due to the separation by quartiles. Finally, according to the methodology described, the Huff diagrams are made for each period.

Once the diagrams are obtained, they are compared to determine whether or not there is variation in the temporal distribution. It was first determined that the Huff diagrams belonging to each quartile for each period present slight variations, it means that the storms present similar temporal distribution according to the quartile they occur, regardless of the year in which the storm occurs.

Then, when performing a probabilistic analysis and comparing the most probable storm, it was determined that there is variation, since periods I and II present most probable storms belonging to the 1st quartile with 35% and 36% of frequency, unlike of period III that presents more likely storms belonging to the 2nd quartile with 31% of frequency. In addition, the least likely storm was determined in the same way, being the storms of the 4th quartile for the three periods.

Finally, when analyzing the quartile-duration relation, it was determined that the storms have decreased their total duration, being more frequent storms of less than 6 hours in period III, unlike periods I and II where storms greater than 6 hours were more frequent.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Plan de trabajo	2
1.4 Organización de la memoria.....	3
Capítulo 2: Antecedentes de precipitación en Concepción y diagramas de Huff.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Antecedentes.....	4
2.3 Diagramas de Huff.....	7
2.4 Conclusiones.....	13
Capítulo 3: Metodología.....	14
3.1 Introducción.....	14
3.2 Datos	14
3.3 Parámetros de separación de tormentas.....	15
3.3.1 Tiempo seco	15
3.3.2 Precipitación mínima caída.....	16
3.3.3 Tiempo mínimo de duración.....	16
3.4 Diagramas de Huff.....	16
3.5 Conclusiones.....	20
Capítulo 4: Resultados	21
4.1 Introducción.....	21

4.2 Datos	21
4.3 Parámetros de separación de tormentas	22
4.3.1 Tiempo seco	22
4.3.2 Precipitación mínima	23
4.3.3 Duración mínima	24
4.4 Diagramas de Huff.....	24
4.4.1 Tormentas individuales.....	24
4.4.2 Tormentas normalizadas	25
4.4.3 Separación de tormentas	26
4.4.4 Probabilidad	28
4.4.5 Diagramas	29
4.4.6 Análisis	32
4.5 Conclusiones.....	41
Capítulo 5: Conclusiones	42
Referencias	44
Anexo 4.2 Días con y sin lluvia por año.....	46
Anexo 4.4 Probabilidades de ocurrencia para los cuartiles de cada periodo.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Datos existentes por año.....	22
Tabla 4.2 Tiempo seco para cada periodo.....	23
Tabla 4.3 Tormentas por año.....	24
Tabla 4.4 Distribución de tormentas para el periodo I.....	26
Tabla 4.5 Distribución de tormentas para el periodo II.....	27
Tabla 4.6 Distribución de tormentas para el periodo III.....	28
Tabla 4.7 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 1° cuartil.	29
Tabla 4.8 Cuartil predominante y probabilidad total de cada periodo.....	37
Tabla 4.9 Cuartil minoritario y probabilidad total de cada periodo.....	37
Tabla 4.10 Cuartil-duración para el periodo I.....	39
Tabla 4.11 Cuartil-duración para el periodo II.....	40
Tabla 4.12 Cuartil-duración para el periodo III.....	40
Tabla 4.13 Cuartil más frecuente por duración para los tres periodos.....	40
Tabla A.4.2.1 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 1989.....	46
Tabla A.4.2.2 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 1990.....	46
Tabla A.4.2.3 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 1991.....	46
Tabla A.4.2.4 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2000.....	47
Tabla A.4.2.5 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2001.....	47
Tabla A.4.2.6 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2002.....	47
Tabla A.4.2.7 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2003.....	48
Tabla A.4.2.8 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2004.....	48
Tabla A.4.2.9 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2005.....	48
Tabla A.4.2.10 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2006.....	49

Tabla A.4.2.11 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2007	49
Tabla A.4.2.12 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2008	49
Tabla A.4.2.13 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2009	50
Tabla A.4.2.14 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2010	50
Tabla A.4.2.15 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2018	50
Tabla A.4.2.16 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2019	51
Tabla A.4.2.17 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2020	51
Tabla A.4.4.1 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 1° cuartil	52
Tabla A.4.4.2 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 2° cuartil	52
Tabla A.4.4.3 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 3° cuartil	53
Tabla A.4.4.4 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 4° cuartil	53
Tabla A.4.4.5 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo II, pertenecientes al 1° cuartil	54
Tabla A.4.4.6 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo II, pertenecientes al 2° cuartil	54
Tabla A.4.4.7 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo II, pertenecientes al 3° cuartil	55
Tabla A.4.4.8 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo II, pertenecientes al 4° cuartil	55
Tabla A.4.4.9 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo III, pertenecientes al 1° cuartil	56
Tabla A.4.4.10 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo III, pertenecientes al 2° cuartil	56

Tabla A.4.4.11 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo III, pertenecientes al 3° cuartil	57
Tabla A.4.4.12 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo III, pertenecientes al 4° cuartil	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación estación Carriel Sur	4
Figura 2.2 Precipitación promedio anual estación Carriel Sur.....	5
Figura 2.3 Normales de precipitación estación Carriel Sur	6
Figura 2.4 Precipitación media mensual estación Carriel Sur	6
Figura 2.5 Precipitación diaria estación Carriel Sur	7
Figura 2.6 Distribuciones propuestas por Huff	8
Figura 2.7 Comparación de distribuciones de Huff, SCS y Hershfield	9
Figura 2.8 Curvas Huff para tormentas con aumento (a) y disminución de intensidad (b)	10
Figura 2.9 Distribución Huff (90 %) para Malasia y tormenta de diseño DID.....	10
Figura 2.10 Características del hidrograma.....	11
Figura 2.11 Definición del tiempo seco	12
Figura 3.1 Curvas de masa acumulada para tormentas de Mayo y Junio en Coshocton, Ohio	17
Figura 3.2 Curvas de masa adimensionales para tormentas de Mayo y Junio en Coshocton, Ohio ..	17
Figura 3.3 Tipos de tormentas por cuartiles	18
Figura 4.1 Extracto datos año 2018. Inicio del conteo (izquierda) y datos intermedios (derecha)....	21
Figura 4.2 Extracto datos año 2000.....	21
Figura 4.3 Distribución exponencial de los tres periodos	23
Figura 4.4 Curvas de masa normalizadas del periodo I	25
Figura 4.5 Curvas de masa normalizadas del periodo II.....	25
Figura 4.6 Curvas de masa normalizadas del periodo III.....	26
Figura 4.7 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo I	27
Figura 4.8 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo II.....	27
Figura 4.9 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo III	28

Figura 4.10 Diagramas de Huff para el periodo I, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d).....	30
Figura 4.11 Diagramas de Huff para el periodo II, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d).....	31
Figura 4.12 Diagramas de Huff para el periodo III, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d).....	32
Figura 4.13 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 1° cuartil	33
Figura 4.14 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 2° cuartil	34
Figura 4.15 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 3° cuartil	35
Figura 4.16 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 4° cuartil	36
Figura 4.17 Distribución de tormenta más probable para cada periodo.....	38
Figura 4.18 Distribución de tormenta menos probable para cada periodo.....	38

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Se observa en los últimos años que la precipitación caída en Chile ha disminuido en su monto total anual, presentándose bajo el promedio 1961-1990 de manera continua desde el año 2007 alcanzando un déficit promedio de 26 % en el año 2020, donde la zona comprendida entre la región de Coquimbo y del Biobío presentó un déficit del 38 % (Dirección Meteorológica de Chile [DMC], 2021). Además, pareciera ser que las lluvias de corta duración han aumentado su intensidad, lo que influye directamente en la distribución en el tiempo de la lluvia caída, lo cual es un factor primordial en el diseño de obras hidráulicas como estimación de crecidas, redes de aguas lluvias, proyectos de drenaje, manejo de cuencas, entre otros.

En los métodos de cálculo de crecidas de diseño basados en relaciones precipitación-escorrentía, tiene fundamental importancia la selección de lluvias de diseño. Por ejemplo, para el método del hidrograma unitario es necesario disponer del hietograma de una lluvia de diseño que cumpla condiciones desfavorables, para la cual deben considerarse variables y condiciones como magnitud total de la precipitación, duración total de la lluvia, distribución temporal de la precipitación, condiciones iniciales (humedad), probabilidad de ocurrencia de la lluvia y distribución espacial (Espildora y Echavarría, 1979).

Aun así, conociendo la influencia que tiene el hietograma en el cálculo de la onda de crecida, generalmente se supone que la lluvia cae con una distribución uniforme en el tiempo para simplificar los problemas (Varas, 1985a). Esta suposición es un poco extrema ya que se sabe que la mayor parte de una tormenta ocurre en un pequeño periodo del tiempo total de esta (Huff, 1967), es decir ocurre una precipitación intensa durante un tiempo reducido.

Así, aun sabiendo que el total anual de lluvia caída ha disminuido, se desea realizar una caracterización de la distribución temporal de la precipitación en Concepción (estación Carriel Sur) para los últimos 32 años a través de un análisis estadístico y diagramas de Huff para determinar finalmente si existe

variación en la forma en que llueve, con el fin de mejorar el diseño de las obras hidráulicas al utilizar las tormentas características del lugar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar la distribución temporal de la precipitación de diferente duración y su evolución en el tiempo en la estación meteorológica de Concepción, Carriel Sur.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis de datos de precipitación diario, mensual y anual para la estación Carriel Sur, Concepción.
- Generar los diagramas de Huff característicos de la zona de estudio.
- Determinar si existe una evolución en la distribución temporal de la precipitación en Concepción para el periodo de análisis.

1.3 Plan de trabajo

Se utilizó una base de datos de precipitación de la estación Carriel Sur en Concepción, región del Biobío, la cual consta de 17 años, separando tres periodos de análisis (1989 a 1991, 2000 a 2010 y 2018 a 2020), los cuales son determinados de acuerdo con la disponibilidad de datos obtenida. Los registros se dividen en dos grupos, los obtenidos directamente desde la página web de la DMC los cuales presentan valores de precipitación en intervalos de tiempo de 15 minutos y los entregados directamente por la DMC los cuales presentan valores de precipitación en intervalos de 5 minutos.

Para cada uno de los periodos se determinaron parámetros para identificar las tormentas individuales y estas se separaron dependiendo de en qué cuartil del tiempo ocurría el mayor porcentaje de la precipitación total. Luego con la metodología elaborada se obtuvo para cada uno de los periodos los diagramas de Huff característicos.

Finalmente, se compararon los diagramas y se realizó un análisis probabilístico para determinar si existen evolución en la distribución temporal de la precipitación.

1.4 Organización de la memoria

El desarrollo de este trabajo consta de cinco capítulos. En el segundo capítulo se plantean las bases teóricas del trabajo, donde se presentan los antecedentes de la precipitación en Concepción para dar base al estudio realizado y luego se plantea y describen los conceptos necesarios para comprender los diagramas de Huff. El tercer capítulo muestra la metodología que se llevó a cabo, desde la obtención y manejo de los datos, definición de los parámetros necesarios para el trabajo y el procedimiento correspondiente para generar los diagramas de Huff. En el cuarto capítulo se aplica la metodología propuesta anteriormente, y se muestran los resultados obtenidos en conjunto de un análisis correspondiente. Finalmente, el capítulo cinco corresponde al de conclusiones y comentarios al trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES DE PRECIPITACIÓN EN CONCEPCIÓN Y DIAGRAMAS DE HUFF

2.1 Introducción

Como se menciona, es sabido que la precipitación anual ha disminuido en los últimos años en gran parte de Chile, dando origen a la llamada mega sequía en la última década. Debido a este fenómeno, se realizó inicialmente un análisis de antecedentes para la precipitación en la estación Carriel Sur, Concepción como base para realizar una caracterización de la distribución temporal de la precipitación en los últimos 32 años a través de un análisis estadístico y diagramas de Huff, para determinar finalmente si la forma en que llueve en la zona ha cambiado.

2.2 Antecedentes

La estación Carriel Sur (-36.78055° , -73.06639°) pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile, y está ubicada en la región del Biobío, provincia de Concepción, específicamente en la comuna de Talcahuano a un costado del Aeropuerto Internacional del mismo nombre (Figura 2.1). Esta se encuentra en operación desde el año 1968 y mide continuamente varias variables climatológicas como precipitación, temperatura, presión, entre otros.

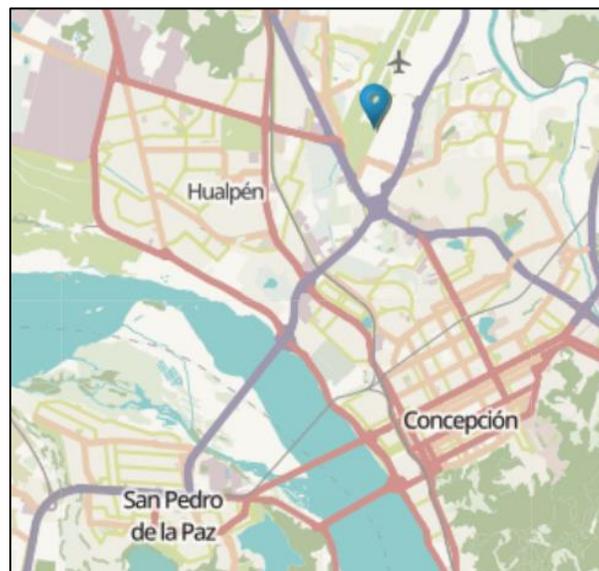


Figura 2.1 Ubicación estación Carriel Sur

De acuerdo con los datos de precipitación diaria obtenidos para esta estación en el periodo de años 1961 a 2020, se determinó inicialmente que la precipitación promedio anual para la ciudad de Concepción es de 1047 mm, con un valor mínimo de 599 mm en el año 1998 y un máximo de 1565 mm en el año 1997. Además, llueve en promedio 100 días al año con una tasa de 10,3 mm/día, lo cual presenta una tendencia de disminución de 2,5 días y casi 1 mm/día respectivamente (DMC, 2021). En la Figura 2.2 se observa la precipitación promedio anual para los años del periodo dado (1961-2020), donde si bien no existe un patrón constante, existe una notoria disminución de precipitación desde el año 2010, con valores que no superan los 1000 mm.

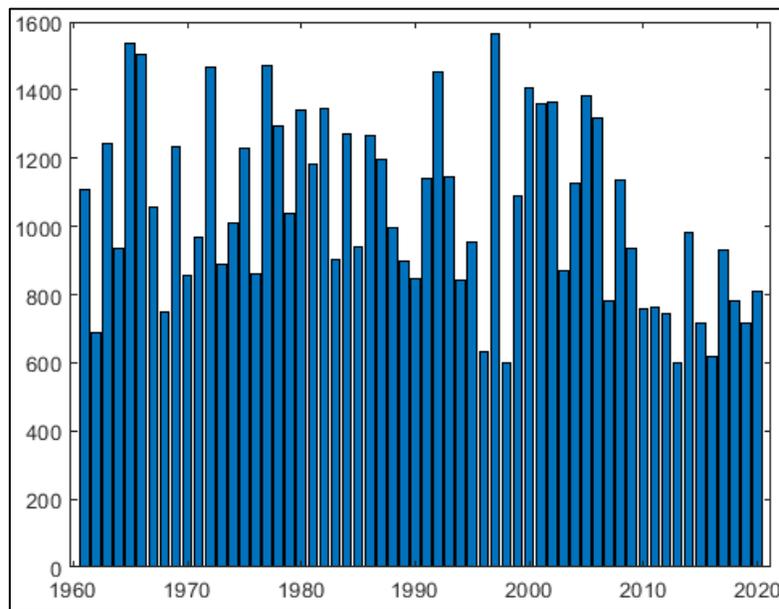


Figura 2.2 Precipitación promedio anual estación Carriel Sur

Además, se definen las “normales” de precipitación que corresponden al promedio de 30 años de precipitaciones promedio anuales, donde de acuerdo con la Figura 2.3 se afirma la disminución de precipitaciones señaladas en la Figura 2.2, donde la normal del periodo 1961-1990 tiene un valor de 1111 mm, luego las normales de los periodos intermedios (1971-2000 y 1981-2010) presentan valores de 1108 mm y 1090 mm respectivamente, lo que corresponde a una disminución de 0,2 % y 1,8 % con el primer periodo; y finalmente el periodo más actual correspondiente a 1991-2020 presenta una disminución del 11,4 % con el primer periodo, con un valor mínimo histórico de 984 mm.

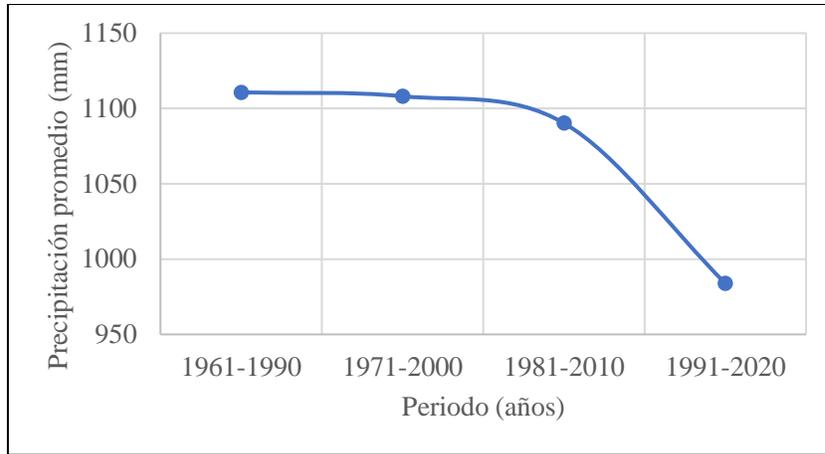


Figura 2.3 Normales de precipitación estación Carriel Sur

Luego, de acuerdo con un análisis de los datos se obtuvo que el 21 % de los días existe lluvia (precipitación mayor a 1 mm), y que estas lluvias se concentran principalmente en la época invernal (Junio a Septiembre), y con menor frecuencia durante el verano (Diciembre a Marzo). Esto último se aprecia en la Figura 2.4, en la cual se observa de manera gráfica las precipitaciones medias por mes (PP media mensual), en donde se ve que el mes de mayor lluvia corresponde a Junio con más de 200 mm de precipitación promedio caída, seguido por Mayo y Julio ambos con precipitaciones promedio sobre los 150 mm; y que los meses más secos corresponden a Febrero, Enero y Diciembre respectivamente, donde los tres meses presentan precipitaciones promedio bajo los 25 mm.

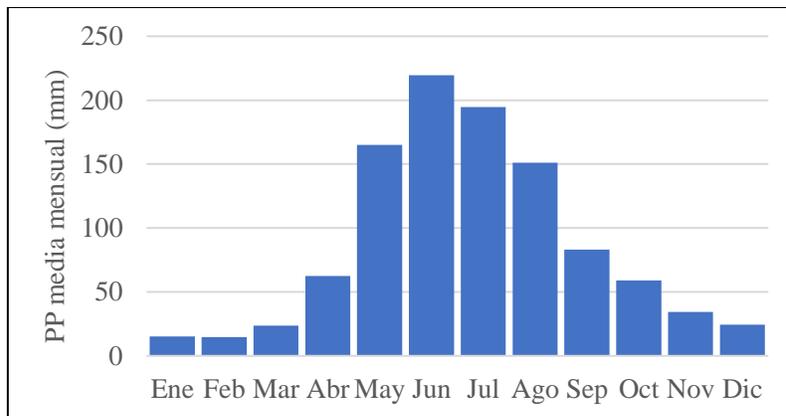


Figura 2.4 Precipitación media mensual estación Carriel Sur

Finalmente, de acuerdo con la precipitación diaria (Figura 2.5) se sigue apreciando la disminución de la precipitación en la última década, donde en este periodo señalado la precipitación diaria no supera

los 80 mm caídos, a diferencia de años previos al 2010 donde en periodos de cinco años existe por lo menos un día en que se supera el valor señalado. Incluso, en la década más actual solo se superan los 60 mm en dos ocasiones, donde en una de ellas se aprecia que son días seguidos.

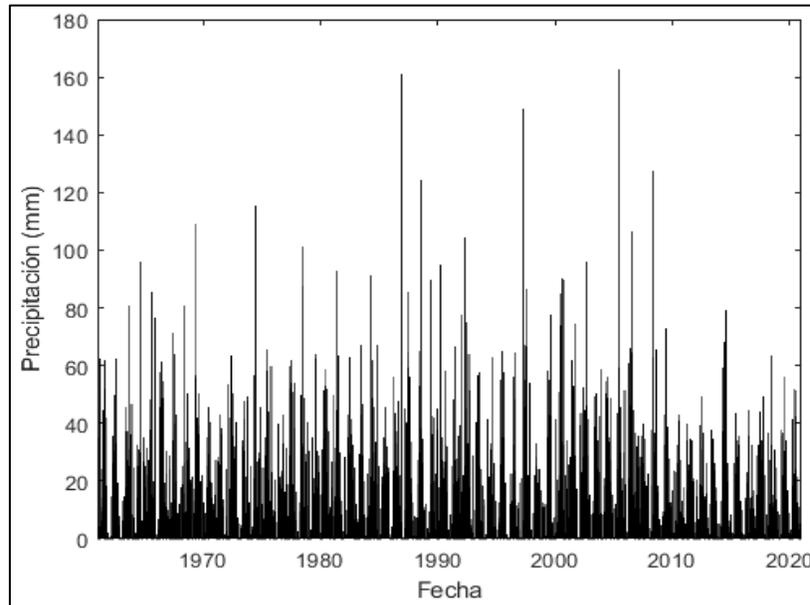


Figura 2.5 Precipitación diaria estación Carriel Sur

2.3 Diagramas de Huff

Huff (1967) planteó un trabajo de distribución del tiempo de las precipitaciones en tormentas intensas para el estado de Illinois, Estados Unidos. Aquí, planteó primero que una mayor porción del total de una tormenta ocurre en un pequeño periodo de tiempo del total de esta, independiente de la duración, el área que abarca y el número de ráfagas que ocurran en el periodo de la tormenta, y debido a esto, clasificó las tormentas en cuatro grupos, separándolas según en qué cuartil del tiempo (1°, 2°, 3° o 4° cuartil) ocurre el mayor porcentaje de la precipitación total.

Además, de acuerdo con análisis estadísticos indicó que la duración y la precipitación media de las tormentas solo explican una pequeña parte de la variación cuando estas variables se expresan como porcentajes acumulados, así, para poder comparar todas las tormentas, independientes de su duración y precipitación total, definió los “diagramas de Huff”, donde expresa el tiempo y la precipitación de forma acumulada (curva de masa) y normalizada (adimensional). En la Figura 2.6 se presentan las

distribuciones obtenidas por Huff (1967) para los cuatro grupos de tormentas, donde se expresa la distribución temporal como probabilidad (de excedencia) debido a la gran variabilidad que existe entre las distintas tormentas.

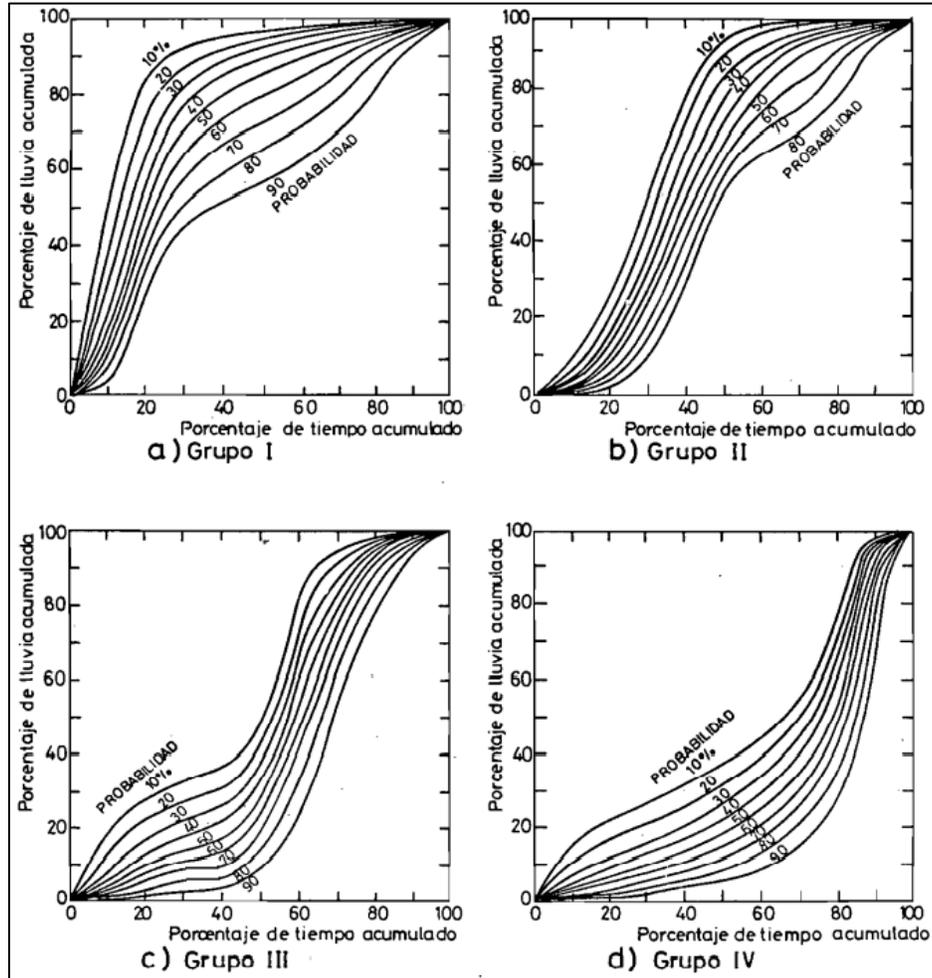


Figura 2.6 Distribuciones propuestas por Huff

Fuente: Varas (1985a)

De acuerdo con estas distribuciones de precipitación (Figura 2.6) se aprecia, por ejemplo, que para las tormentas del primer cuartil (grupo I) ocurre más del 40 % de la precipitación total de la tormenta en el primer 25 % del tiempo para el 90 % de las tormentas, así como también, que ocurre más del 85 % de la precipitación total de la tormenta en el primer 25 % del tiempo para el 10 % de las tormentas.

Además, Huff (1967) determinó la relación cuartil-duración, donde expresa que las tormentas pertenecientes al 4° cuartil tienen con mayor frecuencia (52 %) una duración mayor a 24 horas, las tormentas del 1° y 2° cuartil tienen con mayor frecuencia (45 % y 50 %) una duración menor a 12 horas, y las tormentas del 3° cuartil tienen con mayor frecuencia (42 %) una duración entre 12 y 24 horas.

Varas (1985b) realizó un procedimiento similar en Chile para las estaciones Embalse Paloma, Rapel, San Fernando y Concepción, donde concluyó que para las tormentas de corta duración es igualmente probable que la mayor lluvia ocurra en cualquier cuartil. Sin embargo, a medida que aumenta la duración de la tormenta es más probable que la lluvia de mayor intensidad se concentre en la parte central del tiempo (2° y 3° cuartil).

Al-Rawas y Valeo (2009) obtuvieron los diagramas de Huff para la ciudad de Rustaq en Omán, diferenciando tormentas de 6 horas de duración para la zona costera y la zona montañosa, con el fin de determinar si existe variabilidad entre estas a pesar de la cercanía. Además, comparó con las curvas de Huff y las curvas obtenidas en Calgary, Hogg, entre otros con el fin de mostrar la variabilidad que existe entre zonas (Figura 2.7).

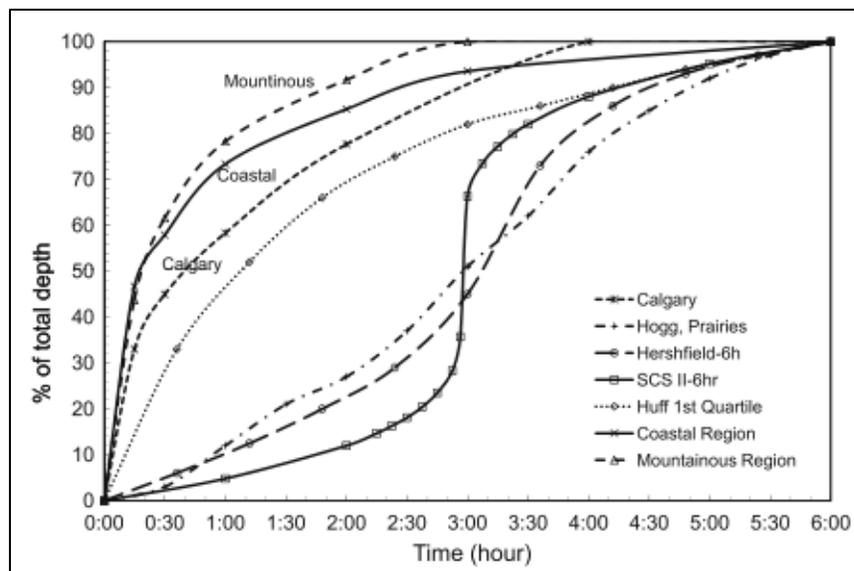


Figura 2.7 Comparación de distribuciones de Huff, SCS y Hershfield

Fuente: Al-Rawas y Valeo (2009)

Pan *et al.* (2017) planteó los diagramas de Huff mejorados, donde en vez de separar las tormentas por cuartiles las separa en 2 grupos, dependiendo de si la intensidad de la tormenta aumenta o disminuye (Figura 2.8).

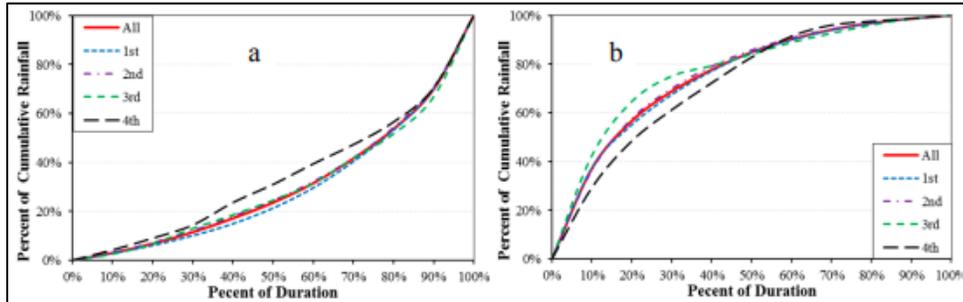


Figura 2.8 Curvas Huff para tormentas con aumento (a) y disminución de intensidad (b)

Fuente: Pan *et al.* (2017)

En Malasia Azli y Ramachandra Rao (2010) determinaron los diagramas de Huff, donde compararon los resultados obtenidos con la tormenta de diseño utilizada por la DID en el lugar, donde según la Figura 2.9, se aprecia que la tormenta utilizada para los proyectos no presenta similitud con ninguna de las curvas obtenidas para el lugar de estudio, lo que puede generar sub o sobreestimaciones de las obras.

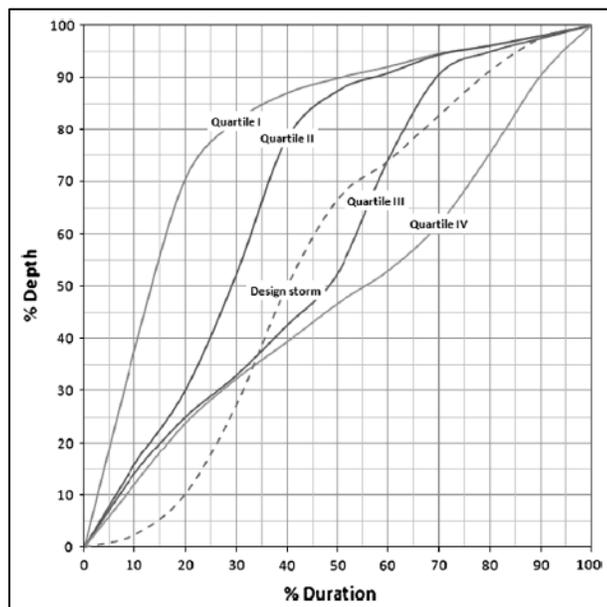


Figura 2.9 Distribución Huff (90 %) para Malasia y tormenta de diseño DID

Fuente: Azli y Ramachandra Rao (2010)

Varas (1985a) estimó la crecida que ocurre en la cuenca del río Thompson (Australia) utilizando una lluvia con distribución uniforme (practica usual) y de acuerdo con los gráficos de distribución propuestos por Huff tormentas de cada grupo con probabilidades de excedencia del 10 %, 50 % y 90 %, trabajando así con 13 tormentas diferentes. Determinó que los caudales máximos de crecida varían entre 662 m³/s y 1331 m³/s siendo el caso de la tormenta con distribución uniforme el menor valor (Figura 2.10). Además, existe una diferencia importante en el caudal máximo dependiendo de la distribución, inclusive en tormentas pertenecientes al mismo grupo. Finalmente, destacó la variabilidad que existe en los parámetros de tiempo (tiempo al máximo, tiempo al centroide), donde el desfase entre centroides de hietograma e hidrograma es el valor más constante, lo que confirma que ese factor es propiedad de la cuenca de estudio.

Lluvia	QMAX	TMAX	TCM	DCM	DMAX
Uniforme	662	60	56	29	33
Grupo I					
10%	1331	24	33	28	19
50%	1062	30	41	28	17
90%	702	36	52	29	12
Grupo II					
10%	1184	36	42	28	22
50%	1055	42	49	28	21
90%	855	48	57	28	19
Grupo III					
10%	945	48	50	28	27
50%	1098	54	58	27	24
90%	1196	60	64	27	22
Grupo IV					
10%	857	60	58	28	31
50%	1105	66	66	27	28
90%	1277	66	72	26	20

Figura 2.10 Características del hidrograma

Fuente: Varas (1985a)

Por ende, la principal utilidad de estos diagramas de Huff es lograr generar y obtener las tormentas de diseño características de la zona de estudio, las cuales presentan probabilidades de ocurrencia y pueden relacionarse con otros factores, por ejemplo, la magnitud, duración, distribución espacial de la precipitación y de las condiciones iniciales de humedad de una cuenca, con el fin de determinar la probabilidad de una crecida (Espildora y Echavarría, 1979). Debido a esto, existe la necesidad de realizar estudios similares a los hechos por (Huff, 1967), a fin de contar con datos chilenos al respecto, y ver si los diagramas sufren variaciones importantes entre los distintos lugares geográficos (Varas, 1985a), lo que implicaría que los diseños de las obras sean dependientes del lugar o zona en la que se proyecten.

Para la obtención de estos diagramas de Huff existen tres etapas a cumplir, las cuales corresponden a:

- Obtención de datos: debido a la naturaleza de los diagramas, es necesario contar con una amplia base de datos de precipitación, la cual debe estar expresada en intervalos de tiempo definidos para poder realizar el análisis correcto de estos.
- Definición de parámetros: como los datos obtenidos son continuos, es necesario definir parámetros para poder identificar y separar las tormentas individuales, los cuales son:
 - Tiempo seco: El tiempo seco (MDPD por sus siglas en ingles de “*minimum dry period duration*”) corresponde al mínimo tiempo que debe ocurrir sin precipitar, para que al momento de volver a hacerlo se considere como el inicio de una nueva tormenta. En la Figura 2.11 se ejemplifica el MDPD, donde se aprecia que existen tres periodos de tiempo seco (D_1 , D_2 y D_3), y de acuerdo con la definición dada anteriormente los tiempos D_1 y D_3 son menores al MDPD y por ende son tiempos sin precipitación que se incluyen en las tormentas 1 y 2 respectivamente, por el contrario, el tiempo D_2 es mayor al MDPD y por lo tanto este tiempo es separador de tormentas y al momento de volver a precipitar (en este caso la lluvia B_3) comienza una nueva tormenta.

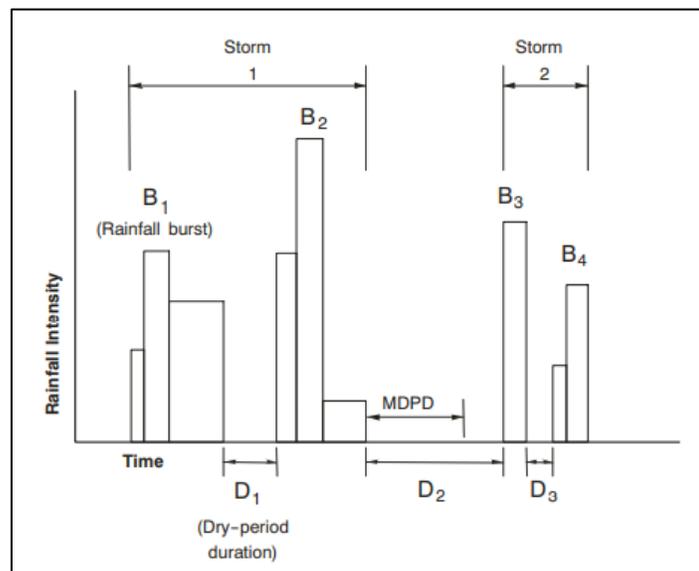


Figura 2.11 Definición del tiempo seco

Fuente: Bonta y Nayak (2013)

- Duración mínima: Se debe considerar una duración mínima de tormenta para el análisis, valor que dependerá de cómo estén presentados los datos y de como quieran trabajarse.
- Precipitación mínima: Se debe considerar una precipitación mínima que debe caer para considerar la tormenta, este valor dependerá de quien esté trabajando y de las consideraciones que se tomen para el análisis.
- Generación de diagramas: Una vez definidos los parámetros, se identifican las tormentas de manera individual para generar las respectivas curvas de masa acumulada y luego separarlas en los grupos definidos (cuartiles), para finalmente realizar un análisis de probabilidad y generar los diagramas de Huff correspondientes a cada uno de los grupos. Se destaca que el análisis es de quien realiza el trabajo, donde pueden separarse las tormentas por cuartiles de precipitación (como Huff y este trabajo), por mitades (en qué mitad del tiempo ocurre la mayor precipitación), o un análisis global (considerando todas las tormentas). Finalmente se obtienen los diagramas de probabilidad para el lugar de estudio.

2.4 Conclusiones

La elaboración del marco teórico entrega el conocimiento y la capacidad de entender los alcances que tendrá el estudio en esta Memoria de Título. Se han detallado los antecedentes bases que motivan el presente trabajo y los conceptos claves para entender el desarrollo, análisis y funcionamiento de los diagramas de Huff, además de su importancia y uso en el cálculo de obras hidráulicas.

En el siguiente capítulo se detalla la metodología de trabajo que se utilizó en este estudio.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En el presente capítulo se realiza la descripción de la metodología aplicada, la cual se divide en tres etapas: primero, la obtención de datos de precipitación para la estación Carriel Sur, Concepción. Para esto, se utilizaron los datos disponibles y entregados por la DMC.

En segundo lugar, se requiere definir los parámetros de separación de tormentas. Para ello, se definió el tiempo seco entre tormentas, la precipitación mínima caída y un tiempo mínimo de duración de tormenta.

Por último, una vez obtenidos los datos y definidos los parámetros de separación de tormentas se procede a la generación de los diagramas de Huff. Para ello se utiliza el procedimiento descrito por Bonta (2004).

3.2 Datos

Se utilizaron los datos de precipitación caída cada 15 minutos de la estación Carriel Sur, Concepción. Estos se obtuvieron directamente desde la página web de la DMC para los años 2018, 2019 y 2020; y para los demás años analizados los datos fueron entregados directamente por la DMC.

Los datos obtenidos desde la página web de la DMC son registros de precipitación anual, los cuales están presentados en formato .txt y entregados como precipitación acumulada cada 15 minutos, con reinicio del conteo cada día a las 12:00 hrs. Estos registros corresponden a los de los años 2018, 2019 y 2020, y para el correcto análisis son transformados a formato Excel, donde cada año presenta cerca de 35000 filas de datos.

Para la entrega, la DMC obtuvo los datos de precipitación directamente desde sus registros de pluviogramas, donde mediante el software PluvioReader (Burboa, 2019) trató los datos físicos para transformarlos a archivos digitales. Estos datos entregados se reparten en dos periodos, de 1989 a 1991 y de 2000 a 2010, donde para cada uno de los años se entregan varios registros de 8 días cada uno, los que entregan la precipitación cada 5 minutos (precipitación caída y acumulada). Estos

registros, están presentados directamente en formato Excel debido a la transformación realizada, donde cada registro entregado presenta cerca de 2000 filas.

Así, con la base de datos que se logró obtener, se realizó el análisis para tres periodos por separado, es decir, un primer periodo (I) del año 1989 a 1991, un segundo periodo (II) desde el año 2000 a 2010 y un tercer periodo (III) desde el año 2018 al 2020, esto con el fin de comparar y determinar si existe variación en la distribución temporal de la precipitación. Cabe destacar que a pesar de que dos de los periodos son de tres años, los datos obtenidos para ellos son significativos y representativos debido a la amplia muestra con que se trabajó, pudiendo comparar estos periodos más cortos con el periodo más grande de once años.

3.3 Parámetros de separación de tormentas

Previo a la realización de los diagramas, es necesario identificar cada tormenta independiente a partir del registro de precipitación. Para ello se definen tres parámetros de análisis: tiempo seco, precipitación mínima caída y tiempo mínimo de duración.

3.3.1 Tiempo seco

Para la obtención del MDPD se utilizó el procedimiento descrito por Restrepo - Posada y Eagleson (1982) y Moraga (2015) donde se maximiza el ajuste de los tiempos entre tormentas a una distribución exponencial, aprovechando la propiedad de que el coeficiente de variación de la distribución exponencial es igual a 1.

Así, se identifican los eventos de precipitaciones para diversos tiempos mínimos entre tormentas (t_b), crecientes entre 60 y 900 minutos (15 horas), con pasos de 1 hora. El procedimiento consiste en encontrar la desviación estándar y la media de cada una de las series de tiempos t_b según la Ecuación 3.1, donde se escoge el tiempo seco como aquel que entrega un coeficiente de variación igual a 1 (en caso de no cumplirse, se interpola para obtener el tiempo exacto).

$$CV(t_b) = \frac{desv(t_b)}{prom(t_b)} = 1 \quad (3.1)$$

El valor de MDPD se calculó para cada periodo de análisis (1989 a 1991, 2000 a 2010 y 2018 a 2020).

3.3.2 Precipitación mínima caída

Se debe considerar una precipitación total mínima que debe caer para cada tormenta, de manera que se considere como una lluvia significativa para la crecida que se genera y los criterios de diseño de las obras.

3.3.3 Tiempo mínimo de duración

Se debe considerar un tiempo mínimo de duración de tormenta, con el fin de obtener los suficientes datos para poder realizar los diagramas. Además de acuerdo con el análisis que se requiere debe definirse correctamente ya que, por ejemplo, el valor debe variar para estudios de cuencas grandes y cuencas urbanas (que presentan un menor tiempo de concentración).

3.4 Diagramas de Huff

Una vez obtenidos los datos y luego de definir los parámetros de separación de tormentas, es posible seguir con la realización de los diagramas de Huff para cada uno de los periodos (1989 a 1991, 2000 a 2010 y 2018 a 2020). Para ello se utilizó el procedimiento descrito por Bonta (2004), dado por:

- Extracción de tormentas: luego de definir los parámetros de separación de tormentas (MPDP, precipitación y tiempo mínimos) se extraen las tormentas individuales y se realiza para cada una de estas la curva de masa acumulada (Figura 3.1). La identificación, separación y curva de masa acumulada de cada tormenta individual se realizó mediante el software Matlab.
- Normalización de cada tormenta: una vez obtenidas las tormentas individuales (Figura 3.1) se normaliza cada una de estas, dividiendo los valores de precipitación y tiempo acumulados de cada tormenta por la precipitación y tiempo total de cada una, obteniendo así las curvas de masa adimensionales de cada tormenta (Figura 3.2). La normalización de tormentas se realizó mediante el software Matlab.

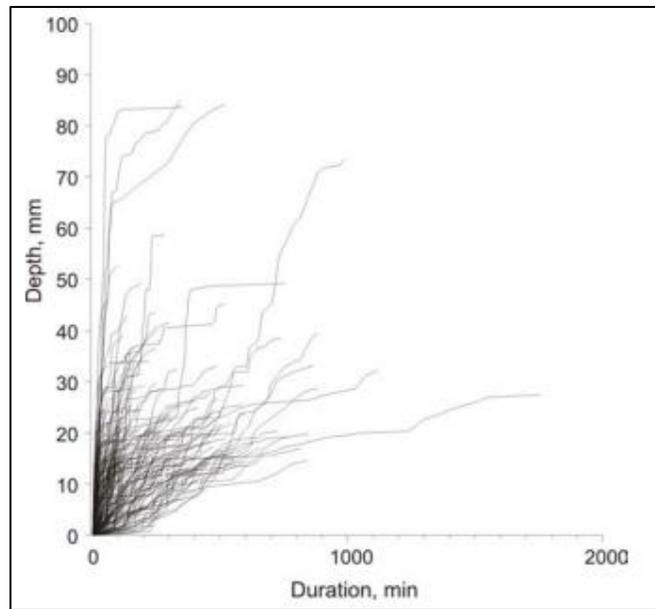


Figura 3.1 Curvas de masa acumulada para tormentas de Mayo y Junio en Coshocton, Ohio

Fuente: Bonta (2004)

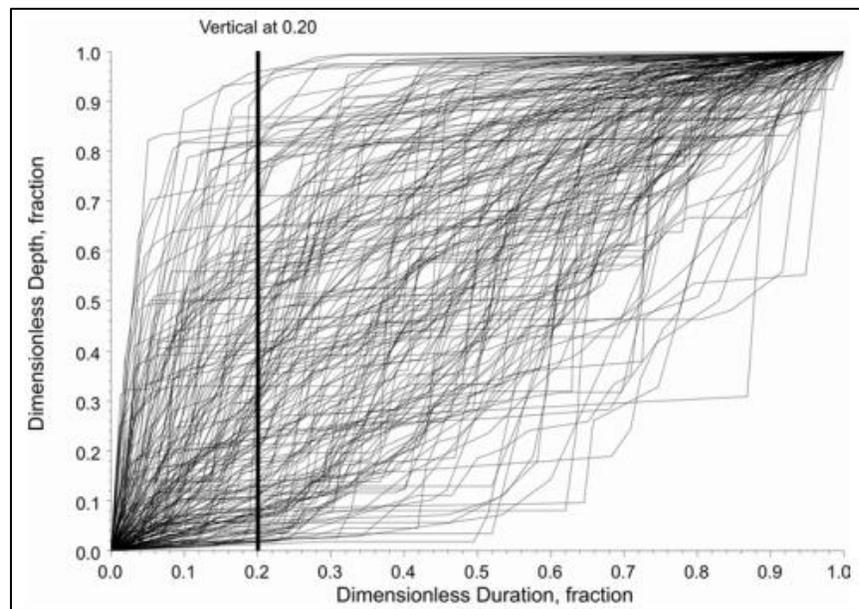


Figura 3.2 Curvas de masa adimensionales para tormentas de Mayo y Junio en Coshocton, Ohio

Fuente: Bonta (2004)

- Interpolación de cada curva con verticales en tiempo definido: como los puntos conocidos (porcentajes) de cada tormenta varían dependiendo de su duración, se interpola cada una de las curvas con verticales de tiempo definido (por ejemplo, la curva de 20 % en la Figura 3.2). Se

realizó la interpolación mediante la herramienta complementaria de Excel “*linear interpolation*” para cada una de las tormentas definiendo verticales de tiempo para todos los porcentajes de tiempo enteros, donde luego se utilizaron los valores de tiempo desde 0 % a 100 % con un incremento de 10 %.

- Separación de tormentas por cuartiles: luego de normalizar e interpolar, y debido a que el análisis es por cuartiles, las curvas se separan de acuerdo a en qué porcentaje del tiempo ocurre el mayor porcentaje de la precipitación. Así, existen cuatro grupos de tormentas a analizar (Figura 2.6).

En la Figura 3.3 se aprecia un ejemplo de cada uno de los tipos de tormenta obtenidos, donde en la tormenta del primer cuartil cae un 72 % de la precipitación en el primer 25 % del tiempo; en la tormenta del segundo cuartil cae un 78 % de la precipitación en el segundo 25 % del tiempo; en la tormenta del tercer cuartil cae un 48 % de la precipitación en el tercer 25 % del tiempo; y finalmente en la tormenta del cuarto cuartil cae un 80% de la precipitación en el último 25 % del tiempo.

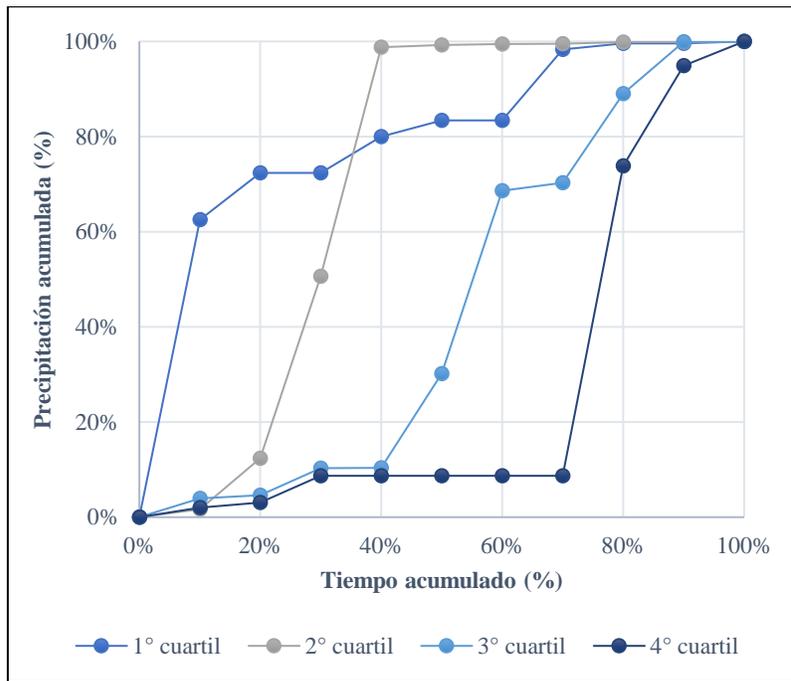


Figura 3.3 Tipos de tormentas por cuartiles

- Probabilidad de ocurrencia: luego de la separación de tormentas por cuartiles, y debido a la gran variabilidad que existe entre estas incluso al pertenecer al mismo tipo, se expresa la distribución temporal como probabilidad de ocurrencia. Para esto, se utilizó el software EasyFit (2017), donde se calcularon las probabilidades de ocurrencia del 10 % al 90 % con incremento de 10 % para cada porcentaje de tiempo, esto utilizando la función de distribución de probabilidad (que se use en hidrología) que mejor se ajuste a los datos según la prueba de bondad de Kolmogórov - Smirnov.
- Unión de puntos con igual probabilidad: finalmente, se unen los puntos obtenidos que presentan igual probabilidad de ocurrencia y se obtienen los diagramas de Huff característicos para cada uno de los tipos de tormentas.

Por último, una vez que son obtenidos los diagramas de Huff característicos de cada periodo, es posible determinar si existen o no cambios en las distribuciones, para ellos se realizan tres análisis descritos a continuación.

El primer análisis corresponde a la comparación por cuartiles, en el cual se determina si existe alguna diferencia en las distribuciones obtenidas para cada uno de los cuartiles de cada periodo, esto con el fin de determinar si existen diferencias en las distribuciones de las intensidades para los periodos.

El segundo análisis corresponde a determinar la tormenta característica (y menos característica), donde debido a que se trabaja con probabilidades es posible determinar la tormenta más probable de ocurrir para cada periodo. Esto, mediante el cuartil que presenta una mayor frecuencia (%) de ocurrencia para cada periodo y la curva de 90 % de probabilidad. Adicionalmente, es posible determinar la tormenta menos probable para cada periodo, considerando el cuartil con menor frecuencia (%) y la curva de 10 % de probabilidad.

Por último, el tercer análisis corresponde a comparar la relación cuartil-duración similar a Huff (1967) y Varas (1985b), donde se determina la duración más frecuente para las tormentas de cada uno de los cuartiles, considerando para este trabajo tormentas con duraciones menores a 6 horas, entre 6 y 12 horas y mayores a 12 horas.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se especificó la metodología para lograr los objetivos propuestos en este estudio. Primero se detalló la obtención y procesamiento de los datos de las series temporales de precipitación, luego se presentó como poder definir los parámetros de separación de tormentas para finalmente mostrar el procedimiento a seguir para la elaboración de los diagramas de Huff. Adicionalmente, se indicó los análisis a desarrollar para determinar las posibles variaciones entre los periodos.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología de trabajo descrita en el capítulo anterior. Los resultados son analizados y descritos en cada ítem según corresponde.

4.2 Datos

Debido a la gran densidad de datos con la que se trabajó, en la Figura 4.1 se muestra un extracto de los datos obtenidos directamente de la página de la DMC para el año 2018, donde se aprecia el inicio del conteo (izquierda) y una sección intermedia donde se aprecia el reinicio de la precipitación acumulada a las 12:00 hrs (derecha). También, como comparación en la Figura 4.2 se muestra un extracto de los datos entregados por la DMC para el año 2000.

	A	B	C		A	B	C
1	Momento	Agua caída 24 hrs		316	2018-01-04 06:30:00		2.6 mm
2	2018-01-01 00:00:00	0 mm		317	2018-01-04 06:45:00		2.6 mm
3	2018-01-01 00:15:00	0 mm		318	2018-01-04 07:00:00		2.6 mm
4	2018-01-01 00:30:00	0 mm		319	2018-01-04 07:15:00		2.6 mm
5	2018-01-01 00:45:00	0 mm		320	2018-01-04 07:30:00		2.6 mm
6	2018-01-01 01:00:00	0 mm		321	2018-01-04 07:45:00		2.8 mm
7	2018-01-01 01:15:00	0 mm		322	2018-01-04 08:00:00		2.8 mm
8	2018-01-01 01:30:00	0 mm		323	2018-01-04 08:15:00		2.8 mm
9	2018-01-01 01:45:00	0 mm		324	2018-01-04 08:30:00		3 mm
10	2018-01-01 02:00:00	0 mm		325	2018-01-04 08:45:00		3 mm
11	2018-01-01 02:15:00	0 mm		326	2018-01-04 09:00:00		3.6 mm
12	2018-01-01 02:30:00	0 mm		327	2018-01-04 09:15:00		3.8 mm
13	2018-01-01 02:45:00	0 mm		328	2018-01-04 09:30:00		3.8 mm
14	2018-01-01 03:00:00	0 mm		329	2018-01-04 09:45:00		4 mm
15	2018-01-01 03:15:00	0 mm		330	2018-01-04 10:00:00		4 mm
16	2018-01-01 03:30:00	0 mm		331	2018-01-04 10:15:00		4.2 mm
17	2018-01-01 03:45:00	0 mm		332	2018-01-04 10:30:00		4.4 mm
18	2018-01-01 04:00:00	0 mm		333	2018-01-04 10:45:00		4.6 mm
19	2018-01-01 04:15:00	0 mm		334	2018-01-04 11:00:00		5.2 mm
20	2018-01-01 04:30:00	0 mm		335	2018-01-04 11:15:00		5.8 mm
21	2018-01-01 04:45:00	0 mm		336	2018-01-04 11:30:00		6.6 mm
22	2018-01-01 05:00:00	0 mm		337	2018-01-04 11:45:00		7 mm
23	2018-01-01 05:15:00	0 mm		338	2018-01-04 12:00:00		0 mm
24	2018-01-01 05:30:00	0 mm		339	2018-01-04 12:15:00		2 mm
25	2018-01-01 05:45:00	0 mm		340	2018-01-04 12:30:00		3 mm

Figura 4.1 Extracto datos año 2018. Inicio del conteo (izquierda) y datos intermedios (derecha)

	FECHA (dd/mm/yyyy HH:MM)	PRECIPITACIÓN INSTANTÁNEA (mm)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA (mm)
4	03-01-2000 8:00	0	0
5	03-01-2000 8:05	0	0
6	03-01-2000 8:10	0	0
7	03-01-2000 8:15	0.000439108	0.000439108
8	03-01-2000 8:20	0.017465133	0.017904241
9	03-01-2000 8:25	0.003160647	0.021064888
10	03-01-2000 8:30	0.012496326	0.033561214
11	03-01-2000 8:35	0.003332456	0.03689367
12	03-01-2000 8:40	0.003755506	0.040649176
13	03-01-2000 8:45	0.000735095	0.041384271
14	03-01-2000 8:50	0.003776137	0.045160408
15	03-01-2000 8:55	0.001926142	0.04708655
16	03-01-2000 9:00	0.000112665	0.047199216
17	03-01-2000 9:05	0	0.047199216
18	03-01-2000 9:10	0	0.047199216
19	03-01-2000 9:15	0	0.047199216
20	03-01-2000 9:20	0	0.047199216

Figura 4.2 Extracto datos año 2000

En la Tabla 4.1 se presenta la cantidad de días para cada año en los que existe registro de datos, y adicionalmente el porcentaje de días que corresponde. Los días con y sin datos para cada uno de los años se encuentran detallados en Anexo 4.2 Días con y sin lluvia por año

Tabla 4.1 Datos existentes por año

Periodo	Año	Días con datos	Porcentaje
Periodo I	1989	95	26,0 %
	1990	121	33,2 %
	1991	113	31,0 %
Periodo II	2000	358	97,8 %
	2001	340	93,2 %
	2002	348	95,3 %
	2003	353	96,7 %
	2004	322	88,0 %
	2005	290	79,5 %
	2006	244	66,8 %
	2007	291	79,7 %
	2008	352	96,2 %
	2009	308	84,4 %
Periodo III	2010	284	77,8 %
	2018	365	100 %
	2019	365	100 %
	2020	366	100 %

Se observa una diferencia notable en la cantidad de datos que se obtuvo por año, donde para el periodo I el porcentaje obtenido es muy bajo en comparación con los periodos II y III. Aun así, estos datos se consideran representativos del periodo, ya que se tienen registros de los meses más lluviosos y, además, aun con un 26 %, 32,2 % o 31 % de datos analizados, la muestra analizada es grande y esto nos entrega una validez estadística.

4.3 Parámetros de separación de tormentas

4.3.1 Tiempo seco

Luego de extraer los valores de tiempos secos que ocurren en cada uno de los periodos, se realizó para cada serie de tiempo (t_b) el cálculo del coeficiente de variación (CV) según la Ecuación 3.1, donde se consideró inicialmente un t_b de 1 hora y se iteró con intervalos crecientes de 1 hora con valor de

termino 15 horas. Así, en la Figura 4.3 se presentan gráficamente los CV obtenidos para cada una de las iteraciones realizadas para cada uno de los periodos de análisis.

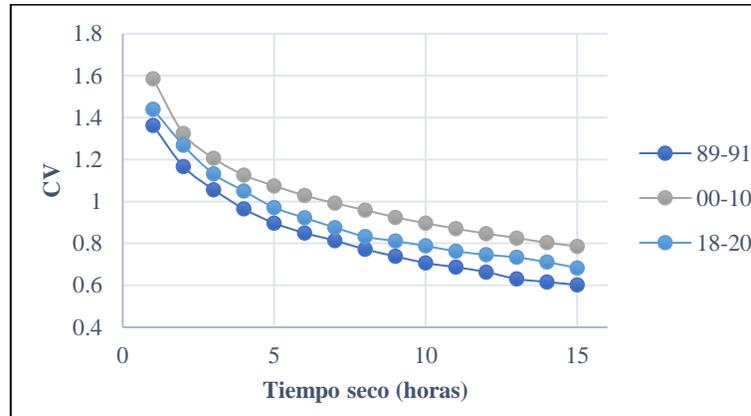


Figura 4.3 Distribución exponencial de los tres periodos

Debido a que los puntos no coinciden exactamente con un CV igual a 1, se determinó la ecuación de la recta que se ajustara a cada una de las curvas de la Figura 4.3. Luego, en la Tabla 4.2 se presentan los valores de tiempo seco obtenidos para cada uno de los periodos, correspondientes al valor de la serie de tiempo t_b en que el coeficiente de variación obtenido es igual a 1.

Tabla 4.2 Tiempo seco para cada periodo

Periodo	Tiempo seco (horas)
1989-1991 (I)	3,5
2000-2010 (II)	7
2018-2020(III)	5

Se aprecia que existe una diferencia en el tiempo seco de cada periodo, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad de este valor donde se varió en intervalos de una hora. Se obtuvo que la cantidad de tormentas obtenidas por año aumenta o disminuye en valores pequeños para las distintas variaciones del tiempo seco, donde esta pequeña variación en el número de tormentas obtenidas no afecta de manera drástica en los diagramas finales, donde solo varían pequeños porcentajes de precipitaciones.

4.3.2 Precipitación mínima

Se consideró una precipitación mínima caída para cada tormenta individual de 1 mm, valor dado arbitrariamente considerando que una lluvia de menor magnitud no es significativa para las crecidas

de diseño. Aquellas tormentas que presentan un valor menor a 1 mm de lluvia total caída son eliminadas para el análisis.

4.3.3 Duración mínima

El tiempo mínimo de duración de cada tormenta se consideró de 1 hora. Este valor es dado arbitrariamente ya que, con una hora de tormenta, debido a que los datos están cada 15 minutos se tienen cuatro puntos para realizar los diagramas de Huff, lo cual se estima adecuado debido a la división por cuartiles realizada. Al igual que con la precipitación mínima las tormentas con un tiempo de duración menor a una hora son eliminadas para el análisis.

4.4 Diagramas de Huff

4.4.1 Tormentas individuales

Una vez definidos los parámetros de separación, se identificó para cada periodo las tormentas individuales. En la Tabla 4.3 se presenta la cantidad de tormentas obtenidas por año.

Tabla 4.3 Tormentas por año

Periodo	Año	Tormentas
Periodo I	1989	31
	1990	33
	1991	35
	2000	58
	2001	54
	2002	45
	2003	40
Periodo II	2004	53
	2005	49
	2006	38
	2007	39
	2008	38
	2009	43
	2010	37
Periodo III	2018	61
	2019	55
	2020	68

Al igual que con los días con lluvia, se aprecia una amplia diferencia en la cantidad de tormentas por año, esto debido a la falta de datos para los periodos I y II, donde es notoria la baja en el primer caso. Aun así, se consideran estas tormentas representativas de los periodos, ya que la muestra analizada es grande y esto nos entrega validez estadística.

4.4.2 Tormentas normalizadas

En la Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6 se observan las curvas de masa normalizadas para los tres periodos analizados, donde se presentan todas las tormentas. Cabe destacar que estas curvas están interpoladas y listas para ser separadas en los grupos de análisis, en este caso en los cuartiles.

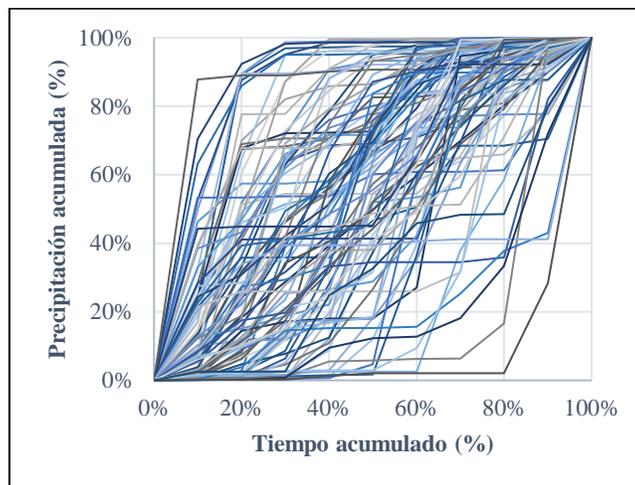


Figura 4.4 Curvas de masa normalizadas del periodo I

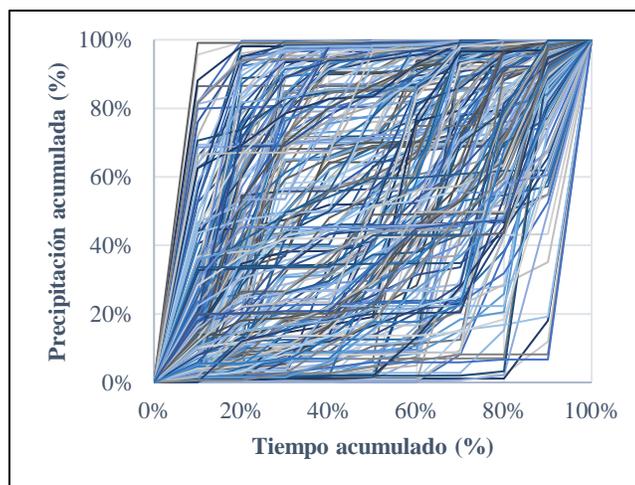


Figura 4.5 Curvas de masa normalizadas del periodo II

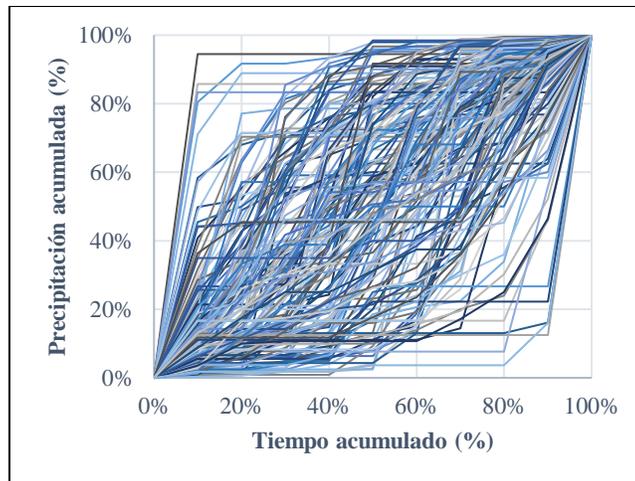


Figura 4.6 Curvas de masa normalizadas del periodo III

4.4.3 Separación de tormentas

En la Tabla 4.4 se presenta la distribución de tormentas por cuartil para el periodo I, donde se observa que existe un total de 99 tormentas para este periodo, donde predominan las tormentas del 1° cuartil. Se aprecia además que para los años 1989 y 1990 predominan las tormentas pertenecientes al 1° cuartil, y en el caso de 1991 predominan las pertenecientes al 2° cuartil. Para los tres años del periodo las tormentas del 4° cuartil son las que menos ocurren. Además, en la Figura 4.7 se distingue la distribución de las tormentas para este periodo en porcentajes.

Tabla 4.4 Distribución de tormentas para el periodo I

Cuartil	1989	1990	1991	Total
1° cuartil	12	13	10	35
2° cuartil	9	10	12	31
3° cuartil	7	6	9	22
4° cuartil	3	4	4	11
Total	31	33	35	99

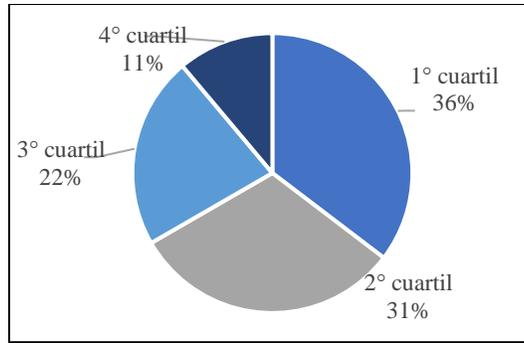


Figura 4.7 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo I

En la Tabla 4.5 se presenta la distribución de tormentas por cuartil para el periodo II, donde observa que existe un total de 494 tormentas para este periodo, predominando nuevamente en este caso las tormentas pertenecientes al 1° cuartil. Para los años 2005 y 2007 predominan las tormentas del 2° cuartil, pero para el resto de los años del periodo predominan las tormentas pertenecientes al 1° cuartil. Nuevamente las tormentas del 4° cuartil son las menos frecuentes, con excepción de los años 2006 y 2008 donde las pertenecientes al 3° cuartil son las que menos ocurre. Además, en la Figura 4.8 se distingue la distribución de las tormentas para este periodo en porcentajes.

Tabla 4.5 Distribución de tormentas para el periodo II

Cuartil	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
1° cuartil	21	18	18	19	19	16	14	14	14	11	16	180
2° cuartil	18	10	11	9	12	18	6	15	11	10	8	128
3° cuartil	15	17	9	8	12	11	8	5	6	11	8	110
4° cuartil	4	9	7	4	10	4	10	5	7	10	5	75
Total	58	54	45	40	53	49	38	39	38	43	37	494

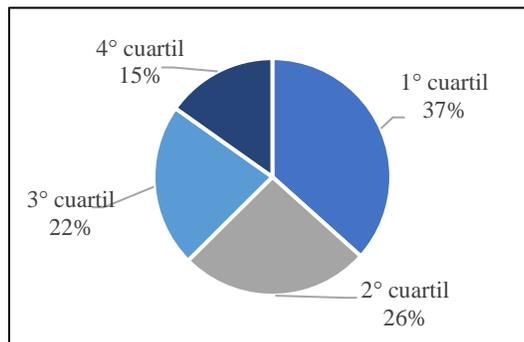


Figura 4.8 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo II

En la Tabla 4.6 se presenta la distribución de tormentas por cuartil para el periodo III, donde observa que existe un total de 184 tormentas para este periodo, predominando en este caso las tormentas pertenecientes al 2° cuartil. Para el año 2020 predominan las tormentas del 3° cuartil, a diferencia de los otros dos años donde predominan las del 2° cuartil. Nuevamente, las tormentas del 4° cuartil son las menos frecuentes para el periodo, pero para el año 2018 son menos probables las del 3° cuartil. Además, en la Figura 4.9 se distingue la distribución de las tormentas para este periodo en porcentajes.

Tabla 4.6 Distribución de tormentas para el periodo III

Cuartil	2018	2019	2020	Total
1° cuartil	15	14	16	45
2° cuartil	19	20	18	57
3° cuartil	12	11	19	42
4° cuartil	15	10	15	40
Total	61	55	68	184

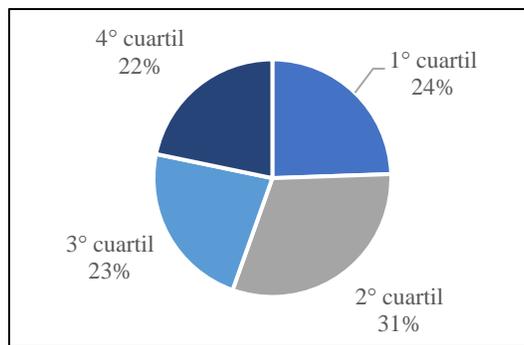


Figura 4.9 Porcentaje de tormentas por cuartil para el periodo III

4.4.4 Probabilidad

Luego, al identificar las tormentas que pertenecen a cada uno de los cuartiles en cada uno de los periodos analizados, se realizó mediante el software EasyFit (2017) el cálculo de probabilidad de ocurrencia para cada caso. En la Tabla 4.7 se muestran las probabilidades obtenidas para el caso de las tormentas del periodo I, pertenecientes al primer cuartil, donde para cada porcentaje de tiempo existen probabilidades del 10 % al 90 %, con un incremento de 10 %. Las demás probabilidades obtenidas se presentan detalladas en Anexo 4.4 Probabilidades de ocurrencia para los cuartiles de cada periodo

Tabla 4.7 Probabilidad de ocurrencia para las tormentas del periodo I, pertenecientes al 1° cuartil

tiempo	PP10	PP20	PP30	PP40	PP50	PP60	PP70	PP80	PP90
0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
10 %	7 %	11 %	15 %	19 %	23 %	27 %	33 %	41 %	55 %
20 %	31 %	37 %	43 %	49 %	55 %	62 %	70 %	78 %	88 %
30 %	48 %	55 %	60 %	65 %	70 %	74 %	79 %	86 %	94 %
40 %	54 %	62 %	68 %	73 %	77 %	82 %	87 %	92 %	98 %
50 %	59 %	66 %	72 %	79 %	84 %	89 %	93 %	97 %	99 %
60 %	68 %	76 %	84 %	88 %	91 %	94 %	96 %	98 %	99 %
70 %	74 %	84 %	91 %	95 %	96 %	98 %	98 %	99 %	100 %
80 %	86 %	92 %	95 %	97 %	98 %	99 %	100 %	100 %	100 %
90 %	95 %	98 %	98 %	99 %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %
100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

4.4.5 Diagramas

Para cada uno de los periodos, se realizaron las curvas correspondientes a cada uno de los cuartiles, obteniendo así los diagramas de Huff característicos para cada uno de los periodos. En la Figura 4.10 se aprecian los diagramas obtenidos para el periodo I, en donde, para todos los diagramas la curva inferior corresponde a aquella con un 10 % de probabilidad de ocurrencia, para luego ir creciendo en intervalos de 10 % y llegar a la curva superior con un 90 % de probabilidad de ocurrencia. Además, se destaca la curva central más gruesa correspondiente a aquella que presenta un 50 % de probabilidad de ocurrencia, que correspondería a la mediana y curva estadística más útil (Huff, 1967).

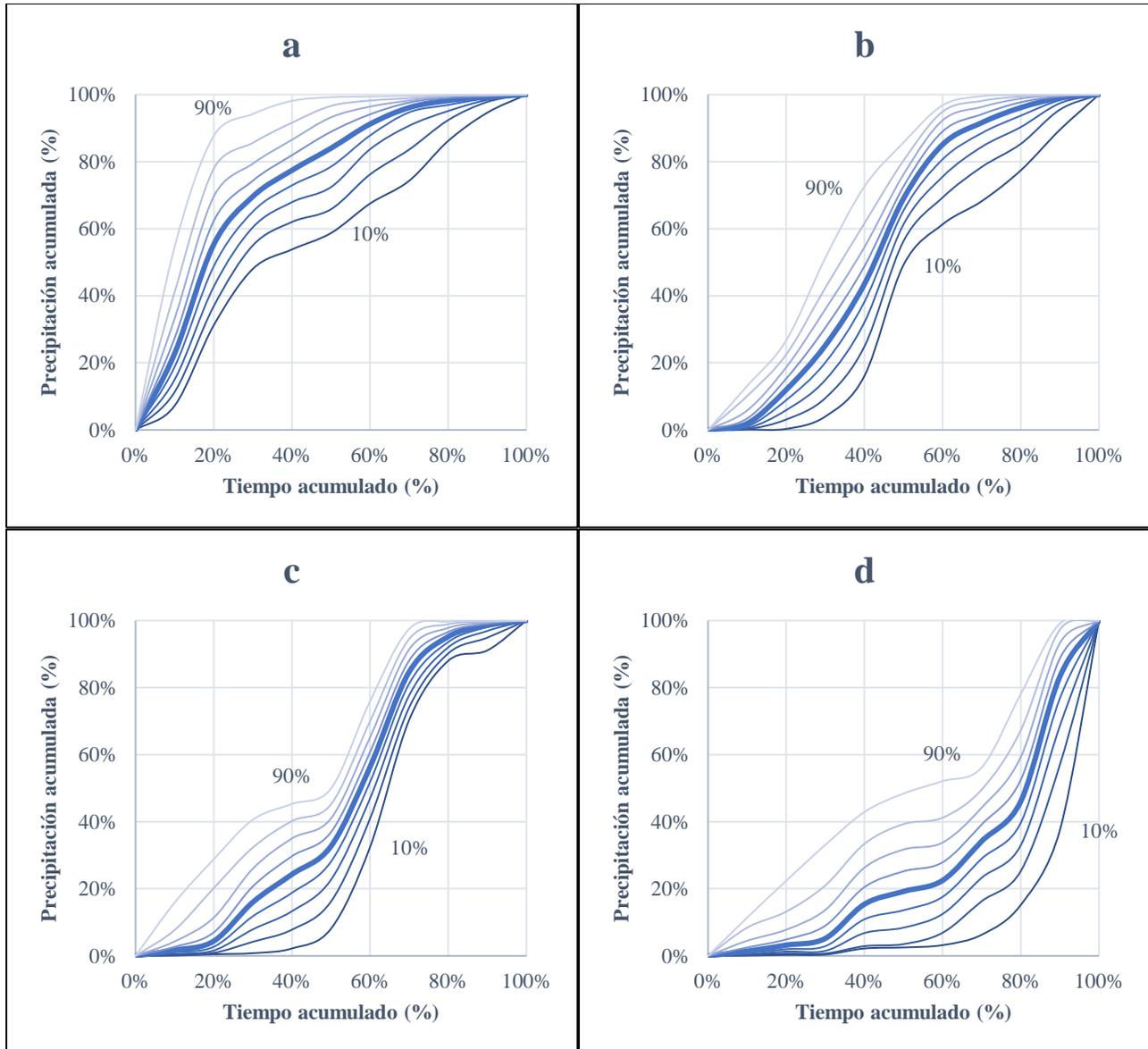


Figura 4.10 Diagramas de Huff para el periodo I, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d)

Se aprecia que las curvas obtenidas son similares a las obtenidas por Huff en su estudio (Figura 2.6), lo cual se debe a la separación realizada por cuartiles.

Luego, en la Figura 4.11 y en la Figura 4.12 se presentan los diagramas de Huff obtenidos para los periodos II y III respectivamente.

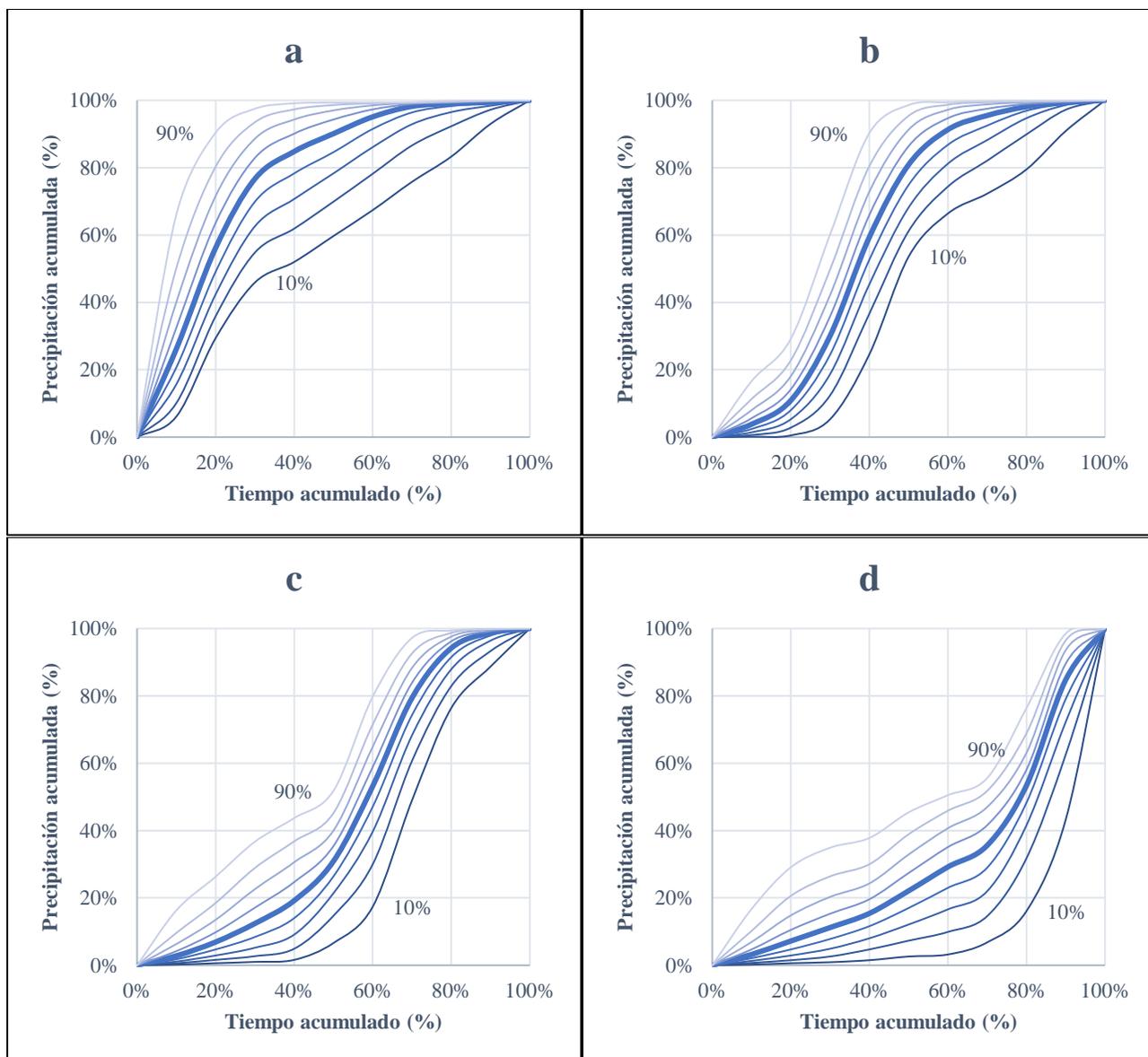


Figura 4.11 Diagramas de Huff para el periodo II, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d)

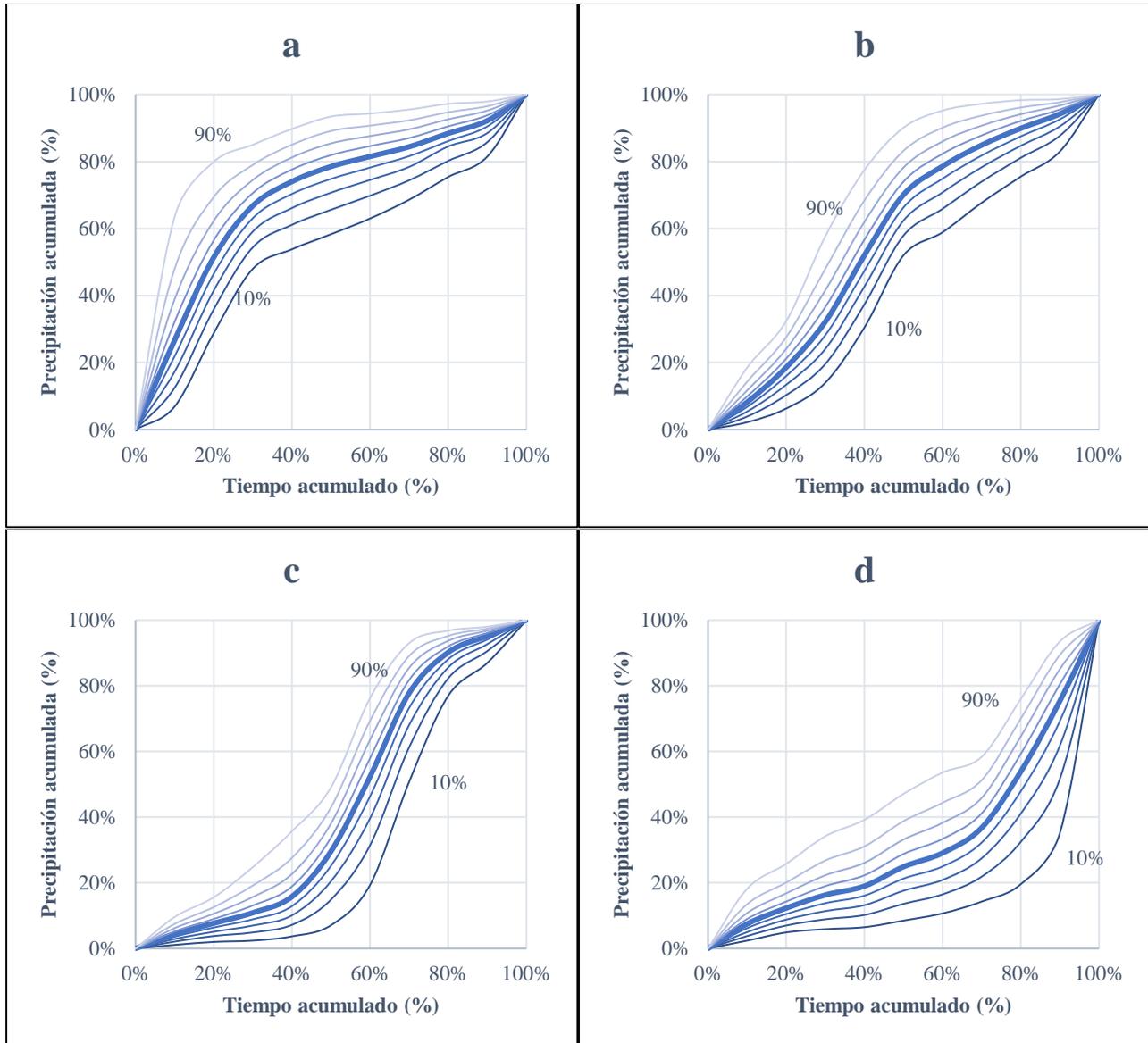


Figura 4.12 Diagramas de Huff para el periodo III, correspondientes a tormentas del 1° cuartil (a), 2° cuartil (b), 3° cuartil (c) y 4° cuartil (d)

4.4.6 Análisis

Debido a la similitud que se observa en los diagramas pertenecientes a un mismo cuartil, se realizó primero la comparación de los tres periodos para cada uno de estos con el fin de determinar si existe o no variación. Esto último, se aprecia en la Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16, donde para cada cuartil se comparan las curvas con 10 %, 50 % y 90 % de probabilidad de ocurrencia y se presenta un análisis para cada caso.

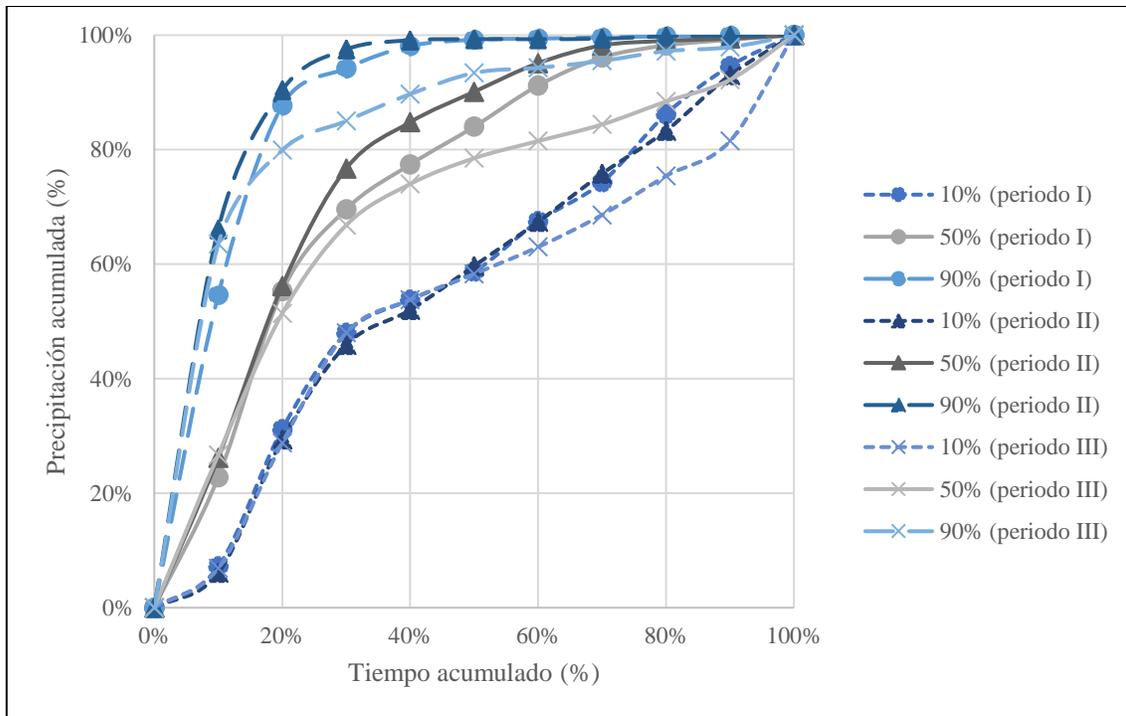


Figura 4.13 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 1º cuartil

Las curvas de 10 % de probabilidad presentan la etapa de intensidad, es decir el primer cuartil del tiempo, muy similar llegando a cerca del 40 % de la precipitación al 25 % del tiempo. Se aprecia que luego de la mitad de la tormenta existe una disminución en la intensidad para el periodo III, la cual aumenta al final de la tormenta. Para los periodos I y II las curvas son similares hasta el final.

Luego, en las curvas de 50 % de probabilidad, el periodo III presenta una menor duración en la etapa de intensidad, manteniendo homogénea la precipitación luego del 30 % del tiempo. El periodo II presenta una mayor duración en la etapa de intensidad, la cual disminuye de a poco luego del 30 % del tiempo, llegando casi al 100 % de la precipitación al 80 % del tiempo. El periodo I es intermedio a los otros dos periodos.

Finalmente, para las curvas de 90 % de probabilidad, nuevamente el periodo III presenta menor duración en la etapa de intensidad, llegando a un 82 % de la precipitación en el 25 % del tiempo, mientras que los periodos I y II al 25 % del tiempo llegan a cerca del 95 % de la precipitación. Para el periodo III se mantiene la lluvia constante hasta el término de la tormenta, a diferencia de los otros dos periodos donde la tormenta se completa casi en la mitad del tiempo.

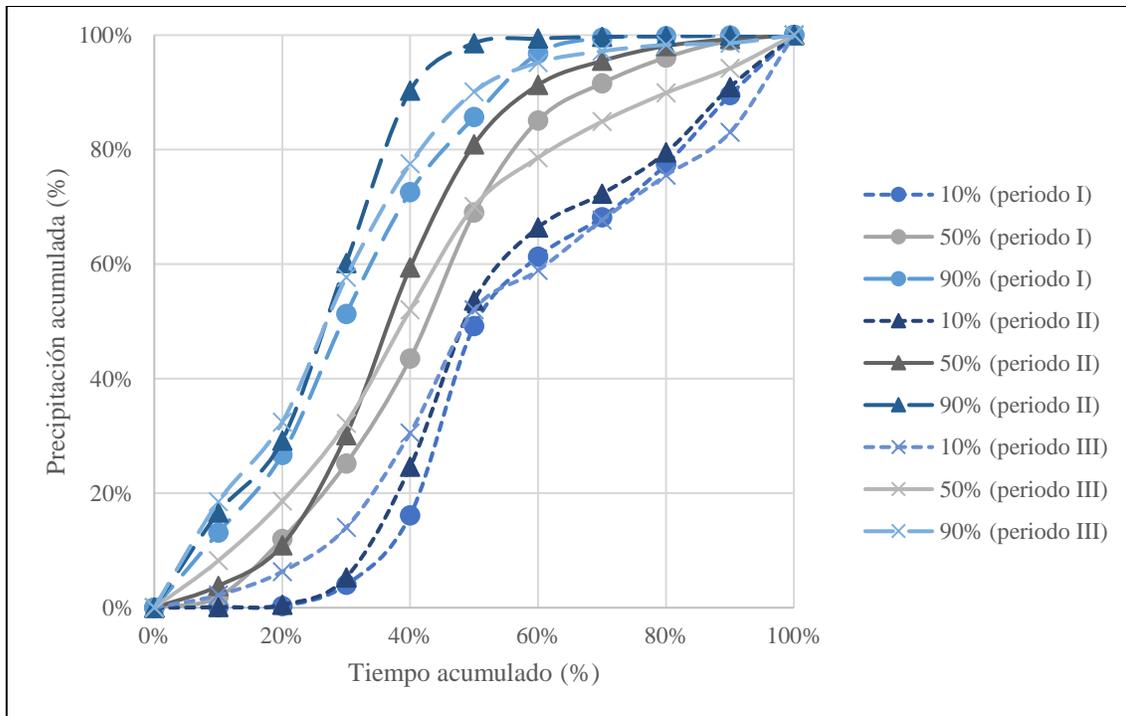


Figura 4.14 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 2° cuartil

Para las curvas del 10 % de probabilidad, en los tres periodos la distribución inicial es distinta, donde los periodos I y II parten con una menor intensidad que el periodo III, pero para los tres periodos se llega a cerca de un 50 % de la precipitación al 50 % del tiempo. Luego, las intensidades finales son similares.

En cuanto a las curvas de 50 % de probabilidad los tres periodos son distintos en intensidad en el primer 25 % del tiempo, luego el periodo II presenta una mayor intensidad en el 2° cuartil, sobrepasando por un 10 % de la precipitación a cada uno de los otros periodos en el final del 2° cuartil del tiempo (50 % del tiempo). Las intensidades en la última mitad del tiempo son distintas para los tres periodos, donde el periodo III es el que presenta una intensidad más homogénea hasta el final.

Por último, las curvas de 90 % de probabilidad son similares hasta el 20 % del tiempo en los tres periodos, luego nuevamente el periodo II presenta una mayor intensidad en el cuartil correspondiente, llegando al 99 % de la precipitación al 50 % del tiempo. Luego, para los otros dos periodos las intensidades varían, pero al 70 % del tiempo los tres periodos presentan más del 95 % de la precipitación.

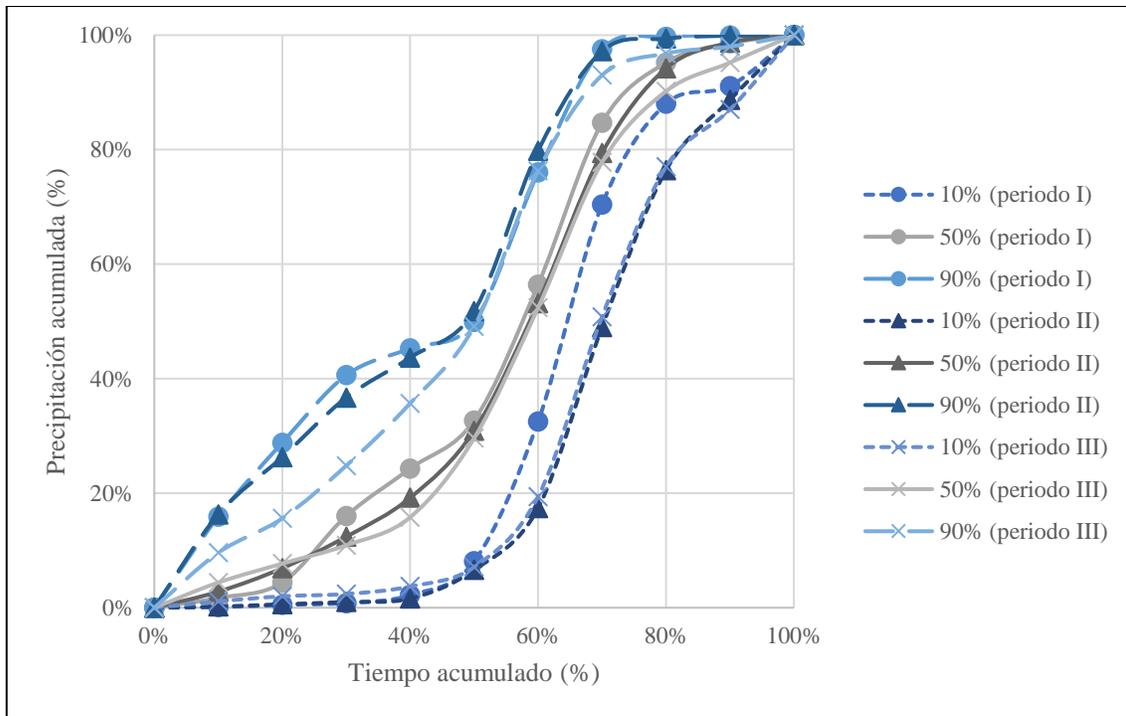


Figura 4.15 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 3º cuartil

Para las curvas de 10 % de probabilidad, la distribución en la primera mitad del tiempo es similar para los tres periodos, llegando a un poco menos del 10 % de la precipitación al 50 % del tiempo. Luego, el periodo I presenta una mayor intensidad en el 3º cuartil (50 %-75 % del tiempo), sobrepasando por cerca de un 10 % de la precipitación a cada uno de los otros periodos. Al 90 % del tiempo se igualan las precipitaciones y terminan con una intensidad similar.

Luego, en las curvas de 50 % de probabilidad los tres periodos presentan diferencias en las intensidades antes y después del 3º cuartil. En el periodo de intensidad los tres periodos son similares, tanto en los porcentajes de precipitación inicial y final del cuartil como en las intensidades.

Finalmente, para las curvas de 90 % de probabilidad los periodos I y II presentan una mayor intensidad en el 1º cuartil, pero el periodo III presenta una mayor intensidad en el 2º cuartil, llegando los tres periodos a un 50 % de la precipitación al 50 % del tiempo. Luego, los tres periodos son similares y las curvas siguen la misma tendencia e intensidad hacia el final.

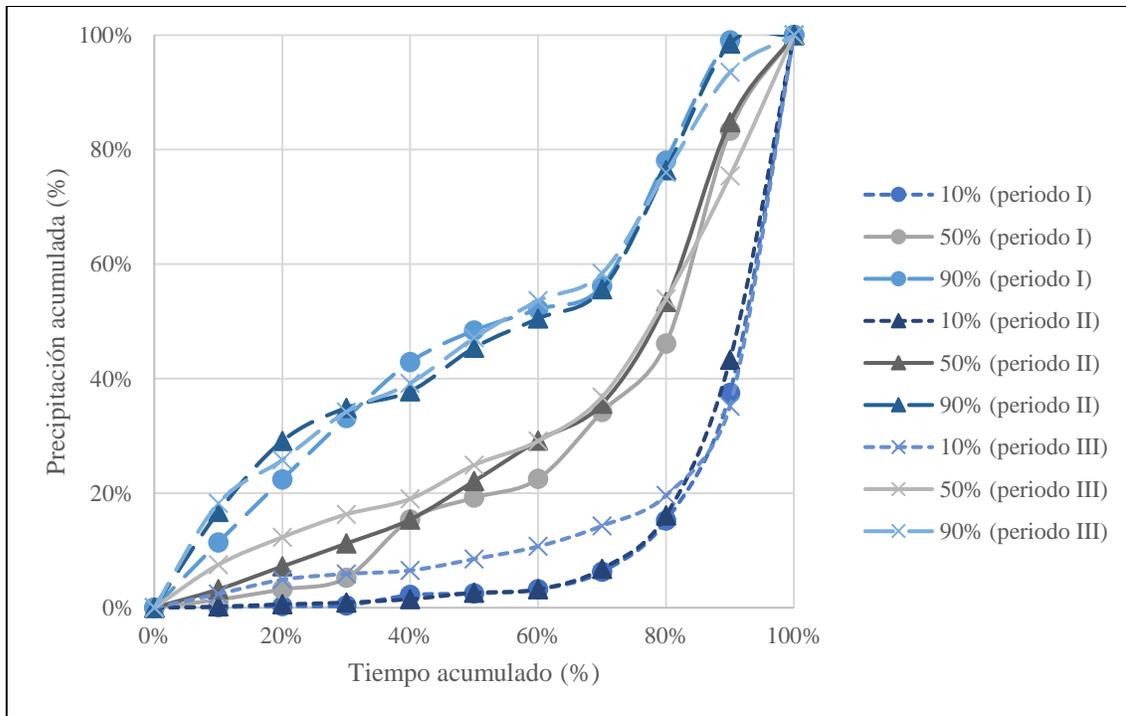


Figura 4.16 Comparación de diagramas de Huff para tormentas pertenecientes al 4° cuartil

Para el ultimo cuartil, en las curvas de 10 % de probabilidad los periodos I y II presentan una intensidad muy baja al inicio, donde presentan menos del 5 % de la precipitación al 60 % del tiempo, a diferencia del periodo III el cual presenta un 11 % debido a que presenta una distribución más homogénea previo al 4° cuartil. Luego, los periodos I y II aumenta su intensidad y al 80 % del tiempo los tres periodos presentan cerca de un 20 % de la precipitación, donde aumentan su intensidad para terminar de manera similar.

Para las curvas de 50 % de probabilidad los tres periodos presentan distribuciones variadas hasta antes del 4° cuartil, donde llegan con cerca de un 40 % de la precipitación. Luego, los periodos I y II presentan un aumento en la intensidad hacia el final de la tormenta, a diferencia del periodo III que tiene una distribución más homogénea en el 4° cuartil.

Por último, en las curvas de 90 % de probabilidad los tres periodos son muy similares, presentando diferencias en las intensidades previas al 4° cuartil, donde los tres periodos llegan a cerca de un 70 % de la precipitación al 75 % del tiempo y el aumento de la intensidad es similar para los tres casos.

Luego, se determinó la tormenta más frecuente para cada periodo, esto considerando el cuartil con mayor frecuencia para cada periodo según la Figura 4.7, la Figura 4.8 y la Figura 4.9. En la Tabla 4.8 se presenta el cuartil más frecuente para cada periodo, su frecuencia, y la probabilidad total de ocurrencia de la tormenta al multiplicarla por la curva de 90 % de probabilidad de ocurrencia (frecuencia cuartil * 0,9). Además, en la Tabla 4.9 se presenta de la misma forma la tormenta menos frecuente para cada uno de los periodos, donde la probabilidad total viene dada por la frecuencia del periodo multiplicada por la curva de 10 % de probabilidad (frecuencia cuartil * 0,1).

Tabla 4.8 Cuartil predominante y probabilidad total de cada periodo

Periodo	Cuartil predominante	Frecuencia (%)	Probabilidad total (%)
Periodo I	1° cuartil	35,4 %	31,9 %
Periodo II	1° cuartil	36,6 %	32,9 %
Periodo III	2° cuartil	31,0 %	27,9 %

Para el periodo I las segundas tormentas más frecuentes son las del 2° cuartil con una frecuencia cercana de 31,3 %. Para el periodo II las tormentas del 2° cuartil tienen una diferencia más amplia, presentando una frecuencia de 25,9 %. Para el periodo III la diferencia con el 1° cuartil es de cerca de 6 %.

Tabla 4.9 Cuartil minoritario y probabilidad total de cada periodo

Periodo	Cuartil minoritario	Frecuencia (%)	Probabilidad total (%)
Periodo I	4° cuartil	11,1 %	1,11 %
Periodo II	4° cuartil	15,2 %	1,52 %
Periodo III	4° cuartil	21,7 %	2,17 %

Para el periodo I siguen como minoritarias las tormentas del 3° cuartil con el doble de frecuencia (22,2 %). Para el periodo II nuevamente le siguen las del 3° cuartil con una frecuencia de 22,3 %. Finalmente, cabe destacar que para el periodo III las tormentas del 1° y 3° cuartil presentan una frecuencia de 24,5 % y 22,8 % respectivamente, cercana a las del 4° cuartil.

Luego, en la Figura 4.17 se comparan las 3 tormentas más probables para cada periodo y en la Figura 4.18 se comparan las 3 tormentas menos probables para cada periodo.

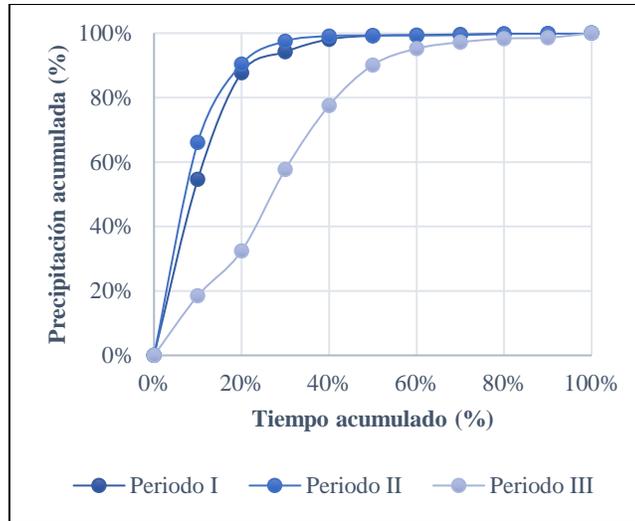


Figura 4.17 Distribución de tormenta más probable para cada periodo

Para los periodos I y II no existe gran diferencia en la tormenta predominante, donde incluso el porcentaje de probabilidad solo varia 1 %. La gran diferencia es en el periodo III, donde el cambio del cuartil que predomina es claro con respecto a los primeros dos periodos, inclusive las tormentas del 1° cuartil bajan más del 10 % su frecuencia.

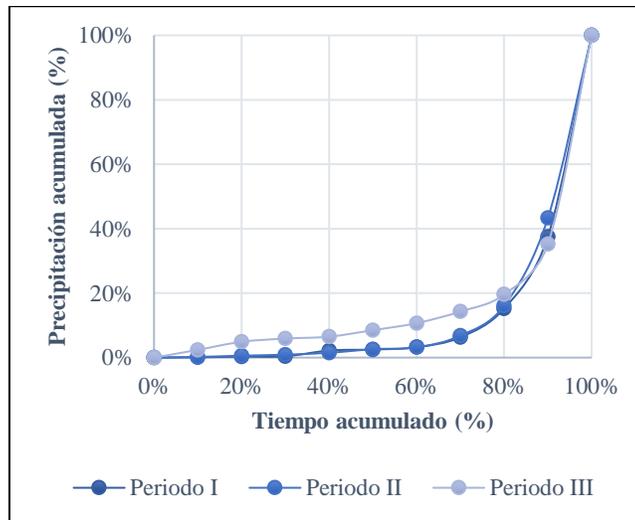


Figura 4.18 Distribución de tormenta menos probable para cada periodo

En cuanto a la tormenta menos probable, se mantiene la distribución para los tres periodos, donde las tormentas del 4° cuartil son las menos comunes. Aun así, en cada periodo existe un aumento cercano a 5 % en la frecuencia con el periodo anterior, por lo que en un futuro podría variar este resultado.

De acuerdo con la Figura 2.10 obtenida por Varas (1985a), y debido a que los diagramas obtenidos son similares a los de Huff, se estima que la crecida que generarían las distribuciones más probables de los periodos I y II serían las de mayor magnitud, a diferencia de la del periodo III, que la crecida generada por esta sería el valor mínimo entre los máximos probables. Además, para las tormentas menos probables se estima que la crecida generada sería la segunda más grande en magnitud.

Finalmente, se realizó el análisis de cuartil-duración similar al realizado por Huff (1967) donde se identificó para cada cuartil de cada periodo las tormentas con duración menor o igual a 6 horas, entre 6 y 12 horas y mayor o igual a 12 horas. Esto con el fin de determinar la distribución más típica dependiendo de la duración de la tormenta.

En la Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12 se observan las distribuciones de duraciones de tormentas para los distintos cuartiles de los periodos I, II y III respectivamente, donde se muestra el número de tormentas y la frecuencia (%) para cada duración.

Tabla 4.10 Cuartil-duración para el periodo I

Cuartil	Tiempo (hrs.)		
	≤ 6	6 < 12	≥ 12
1° cuartil	7 (20 %)	19 (54 %)	9 (26 %)
2° cuartil	1 (3 %)	8 (26 %)	22 (71 %)
3° cuartil	6 (27 %)	9 (41 %)	7 (32 %)
4° cuartil	2 (18 %)	6 (55 %)	3 (27 %)

Para el periodo I, las tormentas del 1° cuartil presentan con mayor frecuencia duraciones entre 6 y 12 horas siendo más de la mitad de las tormentas entre estas duraciones. Las tormentas del 2° cuartil se presentan con mayor frecuencia con duraciones mayores a 12 horas, con más del 70 % de frecuencia. Para el 3° cuartil no existe una duración que se destaque como en los casos anteriores, pero si entre 6 y 12 horas presentan una mayor frecuencia con 41 %. Finalmente, para el 4° cuartil nuevamente las tormentas tienen una frecuencia más alta en duraciones entre 6 y 12 horas, con una frecuencia del 55 %. Para todos los casos las tormentas menores a 6 horas son las menos frecuentes, donde se destacan la pertenecientes al 2° cuartil con solo un 3 % de frecuencia y las del 3° cuartil que presentan una frecuencia cercana a las tormentas mayores a 12 horas, con un 27 %.

Tabla 4.11 Cuartil-duración para el periodo II

Cuartil	Tiempo (hrs.)		
	≤ 6	$6 < 12$	≥ 12
1° cuartil	15 (8 %)	35 (19 %)	130 (72 %)
2° cuartil	20 (16 %)	21 (16 %)	87 (68 %)
3° cuartil	17 (15 %)	14 (13 %)	79 (72 %)
4° cuartil	11 (15 %)	20 (27 %)	44 (59 %)

Para el periodo II independientemente del cuartil en que se ubique la tormenta, es probable que esta dure más de 12 horas. Las tormentas menores a 6 horas de duración se presentan con menos frecuencia en las tormentas del 1° cuartil, con menos del 10 %. Las tormentas entre 6 y 12 horas son más probables que pertenezcan al 4° cuartil.

Tabla 4.12 Cuartil-duración para el periodo III

Cuartil	Tiempo (hrs.)		
	≤ 6	$6 < 12$	≥ 12
1° cuartil	24 (53 %)	10 (22 %)	11 (24 %)
2° cuartil	21 (37 %)	19 (33 %)	17 (30 %)
3° cuartil	10 (24 %)	16 (38 %)	16 (38 %)
4° cuartil	19 (48 %)	12 (30 %)	9 (23 %)

Para el periodo III, las tormentas del 1° cuartil ocurren con mayor frecuencia con duraciones menores a 6 horas. Para el 2° cuartil ocurre lo mismo, pero con frecuencias similares para las tres duraciones. Las tormentas del 3° cuartil presentan igual frecuencia para duraciones entre 6 y 12 horas y mayores a 12 horas, siendo menos frecuentes con duraciones menores a 6 horas. Nuevamente, para las tormentas del 4° cuartil la duración más frecuente es menor a 6 horas.

Finalmente, en la Tabla 4.13 se presenta comparativamente para los tres periodos el cuartil más frecuente para las distintas duraciones de tormenta.

Tabla 4.13 Cuartil más frecuente por duración para los tres periodos

Periodo	Tiempo		
	≤ 6 horas	6 horas < 12 horas	≥ 12 horas
Periodo I	-	1°, 3°, 4°	2°
Periodo II	-	-	1°, 2°, 3°, 4°
Periodo III	1°, 2°, 4°	3°	3°

Según la Tabla 4.13 se observa que existen cambios en las duraciones predominantes de las tormentas donde, para el periodo I las tormentas se presentan con mayor frecuencia entre 6 y 12 horas (44 %), con excepción de las tormentas pertenecientes al 2° cuartil que presentan duraciones mayores a 12 horas (39 %). Para el periodo II es más frecuente que las tormentas sean mayores a 12 horas (68 %), independientemente de en qué cuartil se ubique la tormenta, por lo que las lluvias en este periodo se consideran de mayor duración ya que las tormentas con tiempo menor a 6 horas son escasas (14 %). Finalmente, para el periodo III, cambia considerablemente la distribución, siendo las tormentas con duraciones menores a 6 horas las más frecuentes (40 %), seguidas por las tormentas entre 6 y 12 horas (31 %) y finalmente las tormentas con duración mayor a 12 horas (29 %) son las menos frecuentes.

4.5 Conclusiones

Se obtuvo una amplia base de datos para los tres periodos, donde se evaluó cada una de estas para determinar que son representativas independiente de la falta de datos entre periodos.

Al obtener los parámetros de separación de tormentas, se notó la diferencia que existe en el tiempo seco entre tormentas, valor que se analizó para determinar su sensibilidad en el resultado. Se determinó que los valores son representativos de cada periodo.

Para los tres periodos se logró obtener los diagramas de Huff, los cuales se compararon con el análisis descrito. Primero se notó que existe leve diferencia en las distribuciones temporales entre periodos, lo que indica que la forma de llover se mantiene entre tormentas de cuartiles similares. Luego al comparar la tormenta más frecuente se determinó que existen cambios, al igual que con la duración de las tormentas.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Con relación al logro de objetivos:

Se logró obtener una base de datos para realizar los análisis previos, que fueron necesarios como antecedentes y explicar la motivación del estudio realizado. Además, para el estudio en sí se utilizó un registro de precipitaciones cada 15 minutos de 17 años en total separado en tres periodos de análisis, donde si bien para algunos años los registros estaban incompletos, debido al intervalo de tiempo con el que se trabajó y la cantidad de datos que se analizaron para cada periodo, se consideran datos representativos y que presentan una validez estadística.

Para los diagramas de Huff, se logró la realización de estos para los tres periodos de estudio. Estos son similares a los obtenidos por Huff (1967), Azli y Ramachandra Rao (2010) y Bonta (2004); quienes realizaron la caracterización para distintos lugares separando las tormentas por cuartiles al igual que en este trabajo.

Con los diagramas obtenidos, se logró identificar las variaciones que existen entre los distintos periodos. Inicialmente y a simple vista las variaciones son mínimas ya que los diagramas presentan distribuciones similares en todos los casos de cuartiles, presentando cambios en intensidades en periodos suaves generalmente, pero siempre cumpliendo porcentajes similares de precipitación en los distintos cuartiles de intensidad.

Luego, al realizar un análisis probabilístico se determinó que entre los periodos I y II la distribución temporal predominante de la precipitación se mantuvo, siendo las tormentas pertenecientes al 1° cuartil las más frecuentes. Es en el periodo III que existe un cambio significativo en la forma de precipitar, donde la distribución predominante cambia de tormentas pertenecientes al 1° cuartil al 2° cuartil.

Finalmente, al analizar la relación cuartil-duración se determinó que existen cambios en las duraciones de tormentas, donde en el periodo I lo más frecuente era tormentas entre 6 y 12 horas, luego el periodo II aumenta la duración siendo más frecuentes las tormentas mayores a 12 horas. Por último, el cambio

drástico ocurre nuevamente en el periodo III donde las tormentas presentan una disminución en su duración, siendo más frecuentes las tormentas menores a 6 horas de duración.

Estas variaciones que se mencionan influyen en la determinación de la tormenta de diseño para las obras, debido a que las tormentas más actuales presentan una disminución en la duración y un cambio en el cuartil de mayor intensidad, lo cual afecta directamente por ejemplo en la estimación de la crecida de las tormentas (Varas, 1985a).

En cuanto a los parámetros de separación de tormenta, el tiempo seco es el que varía en cada uno de los periodos y por ende es importante su estimación, donde de acuerdo con un análisis de sensibilidad se estima que al aumentar el valor disminuyen en pequeñas cantidades las tormentas por año, pero no existe una relación constante debido a que las tormentas pueden presentar distintas duraciones. Además, esta variación en la cantidad de tormentas es despreciable al momento de realizar los diagramas, donde las distribuciones obtenidas son muy similares.

Aun cuando este tipo de análisis de diagramas de Huff se ha realizado poco en Chile y en general, existe información suficiente para comprender como se realizan estos diagramas, además de su funcionamiento, utilidad y como deben analizarse para obtener la información que se requiere.

Para futuras líneas de investigación se recomienda, primero realizar los diagramas de Huff para intervalos de tiempo de precipitación menores (por ejemplo, de 5 min) con el fin de obtener los diagramas para diseño de obras hidráulicas en cuencas urbanas, las cuales presentan un menor tiempo de concentración. Segundo, realizar el análisis para las tormentas sin separación por cuartiles y/o separando por en qué mitad del tiempo ocurre la mayor precipitación, donde se espera que se obtengan diagramas similares a los obtenidos por Pan *et al.* (2017). Tercero, así como se define la relación cuartil-duración evaluar la relación cuartil-precipitación, donde sea posible determinar intervalos de precipitaciones más probables dependiendo de en qué cuartil se ubica la tormenta.

REFERENCIAS

- Al-Rawas, G. A., y Valeo, C. (2009). Characteristics of rainstorm temporal distribution in arid mountainous and coastal regions. *Journal of Hydrology*. 376(1-2), 318-326.
- Azli, M., y Ramachandra Rao, A. (2010). Development of Huff curves for Peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*. 388(1-2), 77-84.
- Bonta, J. V. (2004). Developmetn and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. *American Society of Agricultural Engineers*. 20(5), 641-653.
- Bonta, J. V., y Nayak, A. (2013). Characterizing times between storms in montainous areas. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 51(6), 2013-2028.
- Bonta, J., y Ramachandra Rao, A. (1988). Factors affecting the identification of independent storm events. *Journal of Hydrology*. 98, 275-293.
- Burboa, A. (2019). *PluvioReader: un programa automático para la digitalización de pluviogramas*. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.
- Burboa, A., Vargas, J., & Meier, C. I. (2020). PluvioReader: a software for digitizing weekly siphoning-type pluviograph strip charts. *Computers and Geosciences*. 139, 1-10.
- Dirección Meteorológica de Chile. (mayo de 2021). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile*. Santiago.
- Easyfit. (2017). MathWave Tech.
- Espildora, B., y Echavarría , A. (1979). Criterios para la caracterización y selección de lluvias de diseño. *Sociedad Chilena de Ingenieria Hidraulica*. 20(1), 461-478.

- Godoy, I. (2017). *Análisis de la variabilidad temporal de precipitaciones de corta duración en Concepción*. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*. 3(4), 1007-1019.
- Moraga, J. (2015). *Influencia de la estacionalidad al estimar la variabilidad interanual de la precipitación mediante distribuciones derivadas*. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.
- Pan, C., Wang, X., Liu, L., Huang, H., y Wang, D. (2017). Improvement to the Huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China. *Water*. 9(6), 411-429.
- Restrepo-Posada, P., y Eagleson, P. (1982). Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology*. 55, 303-319.
- Varas, E. (1985a). Influencia del hietograma de una tormenta en la crecida resultante. *Anales de la Universidad de Chile*, 655-668.
- Varas, E. (1985b). Hietogramas de tormentas de diseño. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. 32, 533-548.

Tabla A.4.2.16 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2019

2019																															
Mes	Dia																														
Enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Febrero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Marzo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Abril	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Mayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Junio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Julio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Agosto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Septiembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Octubre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Noviembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Diciembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

Tabla A.4.2.17 Días con lluvia (blanco) y días sin lluvia (rojo) para el año 2020

2020																															
Mes	Dia																														
Enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Febrero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
Marzo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Abril	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Mayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Junio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Julio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Agosto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Septiembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Octubre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Noviembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Diciembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Vicente Andrés Soto Pinto
Título de la memoria : Caracterización de la distribución temporal de la precipitación y su evolución en el tiempo en Concepción, Carriel Sur
Fecha de la presentación oral : 27 de abril de 2022

Profesor(es) Guía : José Vargas Baecheler
Profesor(es) Revisor(es) : Alex Schwarz Kusch
Concepto :
Calificación :

Resumen

La precipitación anual en Chile ha disminuido, y pareciera que las lluvias cortas han aumentado su intensidad. Por esto, se caracterizó la distribución temporal de la precipitación en Concepción y su evolución en el tiempo, realizando un análisis probabilístico y diagramas de Huff.

Se trabajó con registros de precipitación en tres periodos (1989-1991, 2000-2010 y 2018-2020), donde se definieron parámetros, con el fin de obtener las tormentas por año. Luego, estas se separaron en cuatro grupos dependiendo de en qué porcentaje de tiempo ocurre el mayor porcentaje de precipitación. Finalmente, se procedió a realizar los diagramas de Huff.

Se determinó, que la distribución temporal presenta leves variaciones entre los cuartiles, es decir llueve de manera similar independiente del año.

Tras un análisis probabilístico se determinó que las tormentas más probables para los periodos I y II son las del 1° cuartil, y para el periodo III predominan las del 2° cuartil. Las menos probables son las del 4° cuartil en los tres periodos.

Se determinó que las tormentas han disminuido su duración, siendo más frecuentes tormentas menores a 6 horas en el periodo III, a diferencia de los periodos I y II con duraciones mayores a 6 horas.