

1.1 ANTECEDENTES

Los eventos extremos, con intensidades de precipitación muy altas, son poco frecuentes, pero cuando ocurren, pueden provocar desastres tales como inundaciones, generadas principalmente por colapsos en los sistemas de drenaje urbano o desbordes de ríos y también deslizamientos de laderas en casos más severos

De este modo, por medio del análisis de las curvas IDT, es posible obtener intensidades de diseño, asociadas a distintas duraciones y periodos de retorno, lo que resulta fundamental para el dimensionamiento de numerosos proyectos de control y evacuación de crecidas que requieren de un diseño hidrológico, como proyectos de alcantarillados y colectores de aguas lluvias en cuencas urbanas, o sistemas de drenaje de caminos y aeropuertos, entre otros, para los cuales se debe conocer la probabilidad de que se produzcan determinados valores de intensidad de precipitación que representen riesgo. (Pizarro *et al*, 2001)

La precipitación, como variable de estado hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia, y para poder caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviográficas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior.

Muchas veces no se dispone de registros de caudales, o éstos no tienen la suficiente duración como para hacer los análisis de frecuencia requeridos; debe entonces usarse la información pluviométrica para estimar crecidas de cierta frecuencia. Es, por lo tanto, muchas veces necesario presentar la información pluviométrica correspondiente a una tormenta o lluvia en formas de intensidades, a partir de los registros de las estaciones pluviográficas en estudio.

Por ende, esta investigación pretende analizar el diseño y construcción de las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno, (IDT) en un punto que puede ser aplicable

para la comunidad de la Merced, se necesitará conocer el comportamiento de las precipitaciones en función de la duración y el periodo de retorno, en la estación de La Merced que cuenta con un estación pluviométrica y pluviográfica, cuya única finalidad será la de aportar patrones de conductas de las lluvias, tal que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería hidráulica, además de poner a disposición de los investigadores una herramienta de análisis y planificación en el largo plazo.

1.2 UBICACIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

Geográficamente La Comunidad de La Merced se encuentra ubicada entre las coordenadas $22^{\circ}01'29''$ y $21^{\circ}56'51''$ de Latitud Sur y $64^{\circ}40'36''$ y $64^{\circ}25'6''$ de Longitud Oeste. La Merced está situada en la primera sección de la provincia Arce, a 76 Km. de la ciudad de Tarija. El territorio del Departamento de Tarija tiene una extensión de 37.623 km², se sitúa íntegramente en la cuenca del Río de La Plata, y es parte de las cuencas de los ríos Pilcomayo y Bermejo, que son afluentes del río Paraguay.

El sistema fluvial del río Bermejo, se encuentra situado en Argentina y Bolivia, cuya parte alta tiene una superficie de 50.190 km², de los cuales 12.000 km² pertenecen a Bolivia, e íntegramente al departamento Tarija, (31,9 % de su territorio). Este sistema se divide en los subsistemas, del río Grande de Tarija y del río Bermejo superior.

La Merced está situada en la primera sección de la provincia Arce, a 76 Km. de la ciudad de Tarija. Muy próxima a La Merced se halla la frontera de la República Argentina. Una carretera asfaltada une hacia el sur con Bermejo y hacia el norte con Tarija, dos importantes ciudades. Por los años 80 había un poco más de 20 familias. En la comunidad actualmente viven 74 familias, este número a veces varía.

Figura 1.1 Ubicación geográfica de la estación en estudio (La Merced)

Figura 1.1.a Sud América



Figura 1.1.b Bolivia



Figura 1.1.d) Comunidad La Merced



Figura 1.1.c) Departamento de Tarija

1.3 DEFINICIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

Se sabe que en el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) aparte de tener registros pluviométricos que mide la altura de lluvia, en algunas estaciones se cuenta con registros pluviográficos el cual registra la altura y la duración de lluvia, del cual se obtiene la intensidad que es igual a la altura de lluvia sobre la duración de la lluvia.

Cuando se solicita información en el SENAMHI de lluvias simplemente se lo accede la altura lluvias mensuales y dentro de ello la precipitación máxima en 24 horas, que sirve para diseñar curvas I.D.T. y no así las intensidades de las lluvias.

La institución de SENAMHI no hace el trabajo de determinar las intensidades a partir del pluviógrafo, por lo tanto las bandas se la archivan y verifica que la lluvia medida en el pluviómetro sea igual y que el observador no engañe en la manipulación de datos falsos.

Por lo tanto este trabajo de investigación, propone estimar las tormentas de diseño y posteriormente las curvas I.D.T. desde el registro de la altura de lluvia en el pluviómetro, luego hacer una lectura de las intensidades reales en las bandas del pluviógrafo y graficar las curvas I.D. real, en ambos casos para el periodo de registro y luego para los diferentes periodos de retorno y finalmente comparar los resultados obtenidos

Se tiene en la Estación de la Comunidad la Merced registro de lluvias en pluviómetro y pluviógrafo que de data desde el año 2002 y ambos coinciden con el mismo periodo de registro y de esta manera se definió el titulo del tema: “Estimación de hietogramas de diseño de precipitación, para la estación de la Merced”

1.4 EL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para Pizarro *et al* (1986), uno de los principales problemas a la hora de diseñar obras de ingeniería, es la determinación del periodo de retorno, el que se debe basar en criterios tanto económicos como los relacionados con la vida útil de la obra, la protección de la vida humana, el tipo de estructura y la facilidad de reparación de la obra, entre otros.

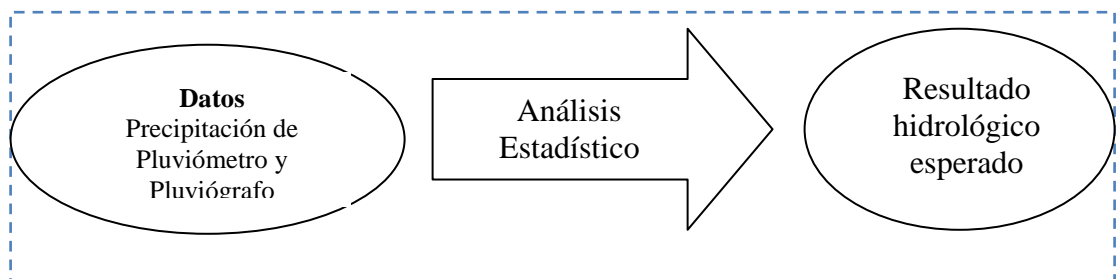
Para Stappung (1999), el periodo de retorno para el diseño de sistemas de evacuación de aguas lluvias, dependerá del grado de seguridad ante las inundaciones que requiera la ciudadanía, del comportamiento de las precipitaciones, de los caudales involucrados y de la consecuencia de que éstos excedan la capacidad de las obras, así como también el costo asociado a las mismas. En este sentido, el período de retorno considerado será mayor, cuanto mayor sea la importancia y la repercusión social, ecológica y económica de la obra. Por ello, la necesidad de disponer de amplios períodos de retorno contrasta con la disponibilidad de series de datos climatológicos, por lo que es necesario recurrir a estimaciones estadísticas

Otro problema para determinar las intensidades máximas de precipitación, es la falta de disponibilidad de pluviógrafo, que son los instrumentos que proporcionan datos con intervalos de tiempo adecuados a las necesidades de diseño. Debido a esta situación, lo que se utiliza normalmente son pluviómetros, que miden las alturas totales para intervalos grandes, generalmente 24 horas, asumiendo con esto, que el comportamiento de la intensidad en ese intervalo de tiempo es constante (Mintegui y Robredo, 1993).

1.4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los procesos naturales que intervienen en los fenómenos hidrológicos son sumamente complejos, resulta difícil examinarlos mediante un razonamiento deductivo riguroso. No siempre es aplicable una ley física fundamental, para determinar el resultado hidrológico esperado, es razonable partir de una serie de datos observados, analizarlos estadísticamente y después tratar de establecer la norma que gobierna dichos sucesos (Figura 1). Es decir, en hidrología siempre se cuenta con una gran información, su proceso para obtener los datos de diseño, se hacen estadísticamente con una determinada probabilidad de ocurrencia.

Figura 1.2 Proceso de análisis de datos



En general, cada problema hidrológico es único y la conclusión cuantitativa de su análisis no puede extrapolarse a otro problema.

1.4.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

La institución recopiladora de datos es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los estudios hidrológicos requieren de gran cantidad de información, la cual puede ser obtenida a diferentes grados de detalle, de acuerdo a su utilización e importancia en los procesos hidrológicos.

Es importante que el hidrólogo, conozca la forma en que los datos hidrológicos son recopilados y que instituciones son los encargados de hacerlo.

Por lo tanto en la sistematización del problema, nos planteamos las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se define un hietograma de diseño de precipitación?
- ¿En qué información se basa para la estimación de hietogramas de diseño de precipitación?
- ¿Cómo se obtiene las curvas I.D.T. para los diferentes periodos de retorno a partir de los datos disponibles?
- ¿Cómo se construyen los hietogramas de diseño de precipitación?
- ¿Qué métodos existen para la estimación hietogramas de diseño de precipitación?

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Generar curvas I.D.T. para diferentes periodos de retorno y a partir de ello estimar las hietogramas de diseño de precipitación.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la altura de lluvia en 24 horas entre el pluviómetro y pluviógrafo
- Seleccionar las precipitaciones máxima
- Leer desde las bandas del pluviógrafo, las diferentes alturas de precipitación, para diferentes duraciones
- Calcular las intensidades máximas registrados desde la bandas del pluviógrafo.
- Generar las curvas I. D. reales para el registro histórico de 12 años.
- Generar y proyectar para diferentes periodos de retorno las curvas I. D. T. desde el pluviógrafo, aplicando las funciones de distribución probabilística.

- Comparar las curvas I.D.T estimados por los diferentes métodos probabilísticos y revisar cual es que mejor que se adecua en el lugar en estudio.
- Recomendar el método, de estimación de curvas I.D.T.
- Estimar hietogramas de Diseño de precipitación para diferentes duraciones

1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA (ACADEMICA)

Con la siguiente investigación se profundizan conocimientos adquiridos, en Hidrología, Recursos Hídricos e Hidrología aplicada.

Se realizara la aplicación de métodos existentes y ampliar conocimientos en la estimación de los hietogramas diseño de precipitación, que en los últimos años están siendo usados en otros países en el diseño de la construcción de obras hidráulicas.

El proyecto realizado servirá como referencia para posteriores trabajos similares aplicados en otras estaciones, que los estudiantes deseen realizar, en especial los alumnos de ingeniería civil en la rama de mención hidráulica.

1.6.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA (TECNICA)

La investigación estará basada en un registro de 12 años, es con las que cuenta la estación pluviográfica. Si en la zona o alrededores se desea construir una obra hidráulica no se puede esperar que se tenga un registro histórico de 30 o 50 años, que es lo que recomienda la teoría. En el cálculo los registros de mayor dato histórico, por lógica tendrán mayor probabilidad de ocurrencia y los de menor lo contrario.

En esta parte se trabaja con la hoja de cálculo Excel que nos ayudara a encontrar los diferentes resultados para la estimación de hietogramas de diseño.

Los resultados obtenidos servirán como aplicación en el punto geográfico en estudio, sin ninguna aplicación en otra zona geográfica, pero podrá servir como guía o base bibliográfica para hacer el estudio en otro punto con los mismos datos que se realizan en esta investigación.

1.6.3 JUSTIFICACIÓN PRACTICA

- **Justificación de la estación seleccionada**

En la institución de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, las estaciones que existen con ambos instrumentos de medición, como el pluviómetro y pluviógrafo en el mismo punto geográfico son muy escasos, La estación de La Merced cuenta con registros que corresponde al mismo tiempo de registro en comparación con las otras estaciones, además la estación de la Merced tiene un registro continuo desde su instalación tanto en el instrumento del pluviómetro y pluviógrafo, en cambio las estaciones existentes en otro punto geográfico con pluviómetro y pluviografía no tiene un registro continuo o tienen menor cantidad de registro, o no se cuenta con los dos instrumentos de medición en el mismo punto.

- **Beneficio a la institución y/o la comunidad de la Merced**

Todos los que hagan un estudio hidrológico para el diseño de obras hidráulicas, podrán utilizar los cálculos estimados en esta investigación y utilizar la bibliografía para estimar para el tiempo de concentración deseado.

Por la escases que existe de registro de lluvias a lo largo de la carretera Tarija - Bermejo, podría ser utilizado el mismo con un análisis más profundo en las zonas aledañas.

La institución de SENAMHI, tendrá el trabajo realizado de interpretación de las precipitaciones desde las bandas del pluviógrafo y que también podría utilizar como referencia para realizar posteriores interpretaciones en la misma estación con el fin de seguir recopilando información o realizar en otra zona que cuente con pluviógrafo.

2.1 MARCO CONCEPTUAL

La hidrología cubre todas las fases del agua en la tierra, es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente.

Aplicaciones prácticas de la hidrología se encuentran en labores tales como diseño y operación de estructuras hidráulicas, obras residuales, riego, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión y control de sedimentos, control de salinidad, disminución de la contaminación, uso recreacional del agua y protección de la vida terrestre y acuática. El papel de la hidrología es ayudar a analizar los problemas relacionados con estas labores y proveer una guía para el planeamiento y el manejo de los recursos hidráulicos.

2.1.1 DEFINICIONES DE HIDROLOGÍA

Existen varias definiciones de hidrología pero nos quedamos con las siguientes definiciones:

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”.

“Hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico”

2.1.2 IMPORTANCIA DE HIDROLOGÍA

La hidrología proporciona al ingeniero o hidrólogo, los métodos para resolver los problemas prácticos que se presentan en el diseño, la planeación y la operación de estructuras hidráulicas.

Entre estos problemas se pueden mencionar:

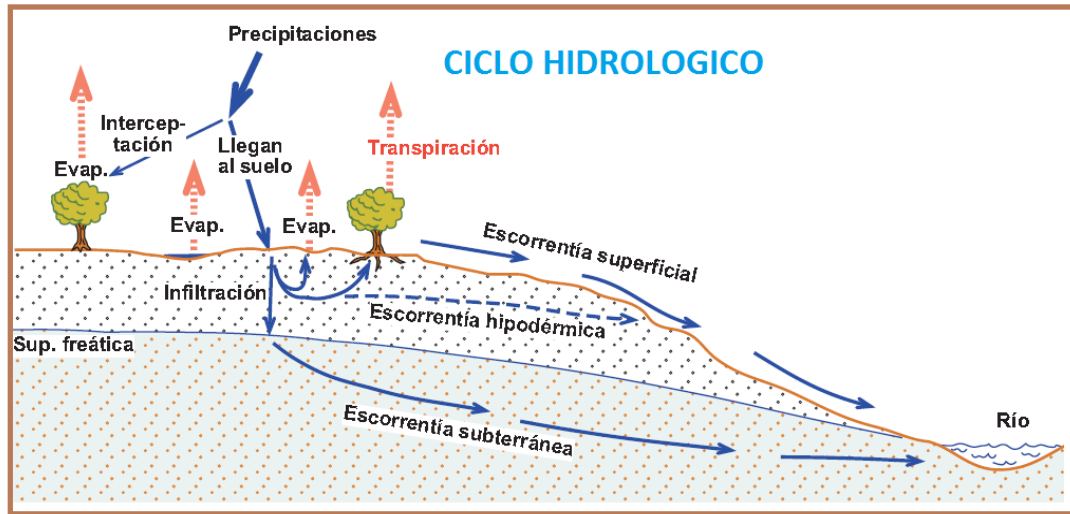
- Determinar si el volumen aportado por una cierta corriente es suficiente para:
 - El abastecimiento de agua potable a una población
 - El abastecimiento de agua potable a una industria
 - Satisfacer la demanda de un proyecto de irrigación
 - Satisfacer la demanda de un proyecto de generación de energía eléctrica
 - Permitir la navegación
- Definir la capacidad de diseño de obras como:
 - Alcantarillas
 - Puentes
 - Estructuras para el control de avenidas
 - Presas vertederos
 - Sistemas de drenaje
 - ❖ Agrícola
 - ❖ Poblaciones
 - ❖ Carreteras
 - ❖ Aeropuertos

2.1.3 CICLO HIDROLOGICO

Se denomina Ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases comenzando desde cualquier punto, pero lo más intuitivo puede comenzar en la Precipitación y considerar que caminos puede seguir el agua que cae sobre los continentes en las precipitaciones:

Figura 2.1 Ciclo hidrológico



El ciclo hidrológico, es completamente irregular y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el hombre. Una muestra de ello, son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua, para las diferentes actividades (uso poblacional, irrigación, generación de energía eléctrica, uso industrial), otros periodos de sequias y otros de inundaciones.

El ciclo hidrológico, es de suma importancia básica para determinar el campo de la Hidrología, la cual comprende la fase entre la precipitación sobre el terreno y su retorno a la atmosfera o al océano; corresponde al análisis de la atmosfera a la Meteorología y el estudio del océano a la Oceanografía.

2.1.4 PRECIPITACION

Precipitación, es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de:

- Lluvias
- Granizadas

- Garuas (lloviznas)
- Nevadas

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios de concernientes al uso y control de agua.

2.1.5 FORMAS DE PRECIPITACIÓN

De acuerdo a sus características físicas y producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, la precipitación puede adquirir diversas formas, siendo las más comunes: llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizo.

Figura 2.2. Formas de precipitación



a) Llovizna

Más conocida como garúas, consiste en diminutas gotitas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0,5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un

asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotarían en el aire. Por lo general la llovizna cae de estratos bajos y muy rara vez sobrepasa un valor de 1mm/h.

b) Lluvia

Consiste de gotas de agua líquida en su mayoría con un diámetro mayor a los 5 mm. En muchos países como en Estados Unidos por ejemplo suelen clasificarla como ligera, moderada o fuerte según su intensidad: Ligera: Para tasas de caída hasta de 2.5 mm/h. Moderada: Desde 2.5 hasta 7.6 mm/h. Fuerte: Por encima de 7.6 mm/h. Esta clasificación está dada para lluvias de larga duración.

c) Escarcha

Es una capa de hielo, por lo general transparente y suave, pero que usualmente tiene bolsas de aire que se forma en superficies expuestas por el congelamiento de agua súper enfriada que se ha depositado en forma de lluvia o llovizna. Su gravedad específica puede llegar a ser de 0,8 a 0,9.

d) Granizo

Es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida en nubes conectivas. El granizo se forma a partir de partículas de hielo que, en sus desplazamientos por la nube van "atrapando" gotas de agua, las gotas se depositan alrededor de la partícula de hielo y se congelan formando capas, como una cebolla. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro.

e) Nieve

La nieve está compuesta de cristales de hielo blanco o translucidos principalmente de forma compleja combinados hexagonalmente y a menudo mezclados con cristales

simples; alguna veces aglomerada en copos de nieve, que pueden tener varios centímetros de diámetro. La densidad relativa de la nieve fresca varía sustancialmente, pero en promedio se asume como 0,1gr/cm³.

2.1.6 TIPOS DE PRECIPITACION

Las precipitación puede ocurrir desde las nubes localizadas a cierto altitud o por condensación del vapor de agua sobre la superficie del terreno y para que en una nube se formen las que eventualmente se transformaran en lluvia, granizo o nieve, se deben cumplir las condiciones mínimas siguientes:

- Presencia de núcleos de condensación
- Temperaturas cercanas a la del punto de rocío
- Abasto continuo de vapor de agua
- Incremento del tamaño de las gotas a través de colisiones

En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos:

2.1.6.1 Precipitación ciclónica

Son las provocadas por las frentes asociadas a un aborrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones. La escala social se superficies de contacto entre masas de aire de temperaturas y unidas diferentes. En las manos húmedas y cálidas (más ligeras) ascienden hasta las frías, donde se condensan y originales presentaciones.

2.1.6.2 Precipitación Conectiva

Se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente: son las tormentas de verano, es decir son normalmente, perturbaciones locales y de poca duración, que se originan

por el calentamiento, debido a la radiación solar de masas de aire en contacto con el suelo. Este aire caliente asciende hasta altitudes en que reina una baja temperatura en donde se condensa. Este tipo de precipitación suele venir acompañada por un fuerte aparato eléctrico producido por las fuertes turbulencias de la corriente de aire ascendente.

2.1.6.3 Precipitación orográfica

Se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa, se originan cuando los vientos cargados de humedad procedentes de los océanos, se encuentran con una montaña. Las masas de aire húmedo se elevan, con lo que se producen en enfriamiento que puede dar lugar a la formación de nubes y precipitaciones.

Estas precipitaciones se expresan en forma de lluvia, de nieve en las vertientes o barlovento, siendo frecuente que la vertiente o sotavento sean bien débil pluviosidad y de baja humedad relativa, pudiendo dar lugar a regiones semiáridas. Este hecho se debe al calentamiento por compresión adiabática de aire que desciende por la ladera a sotavento y se conoce con el nombre de efecto FOEHN.

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras públicas, estudios de erosión, etc.

Figura 2.3 Precipitación conectiva

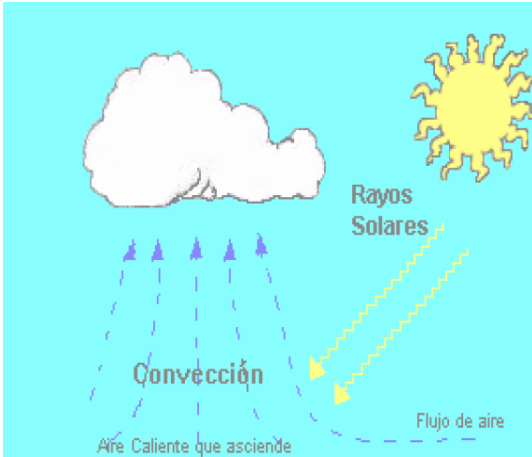


Figura 2.4 Precipitación orográfica



Figura 2.5 Precipitación ciclónica



2.1.7 MEDICION DE LA PRECIPITACION

Podemos cuantificar las precipitaciones caídas en un punto mediante cualquier recipiente de paredes rectas, midiendo después la lámina de agua recogida. La unidad de medida es el milímetro. Es obvio que el tamaño del recipiente de medida no influye en el espesor de la lámina de agua recogida. La intensidad de precipitación, aunque conceptualmente se refiere a un instante, suele expresarse en mm/hora.

Los aparatos de medición de precipitaciones más comunes que existen en nuestro medio son los pluviómetros y pluviógrafo, fuera de ello existen como estaciones automáticas etc.,

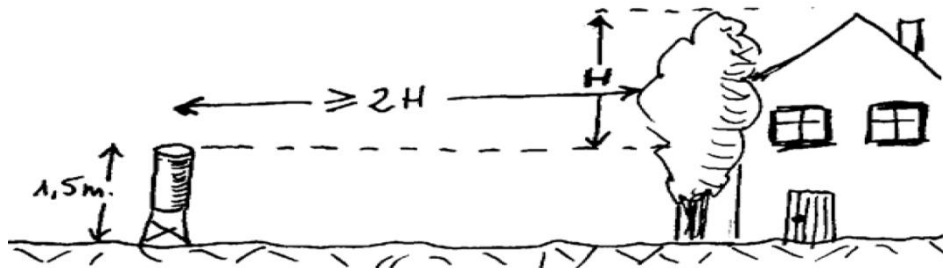
2.1.7.1 Pluviómetro

Para poder leer con más precisión el agua recogida ($\pm 0,1\text{mm}$) un pluviómetro recoge el agua en una bureta de sección menor a la de la boca del pluviómetro. La lectura del agua recogida se efectúa una vez al día.

En realidad, sí se aprecian pequeñísimas variaciones dependiendo del tamaño del recipiente, y también de la altura desde el suelo, por lo que cada país fija estos parámetros: En España, la boca del pluviómetro es de 200 cm^2 y debe estar a 1,5 metros de altura sobre el suelo.

El máximo error puede proceder de una ubicación defectuosa del pluviómetro. La norma fundamental es que debe estar alejado de arboles o construcciones elevadas, en general a más del doble de la altura del obstáculo.

Figura 2.6. Esquema de posición de un pluviómetro



2.1.7.2 Pluviógrafo

Es un instrumento, que registra la altura de lluvia en función del tiempo, lo cual permite determinar la intensidad de la precipitación, dato importante para el diseño de estructuras hidráulicas.

En general, una medida al día de la precipitación puede ser suficiente, pero en muchas ocasiones necesitamos un registro continuo del fenómeno, por ejemplo, si en un día han caído 100 mm., la avenida que se originara será muy diferente si se han registrado a lo largo de todo el día o si han caído en una hora.

Un pluviógrafo clásico funciona como un pluviómetro pero que registra la evolución de la precipitación con el tiempo, bien con tinta y papel, bien digitalmente.

En algunos modelos, el pluviógrafo está dotado de un flotador que hace subir a una plumilla que registra gráficamente llenando un recipiente lo largo del tiempo.

Figura 2.7 Imágenes de pluviógrafo

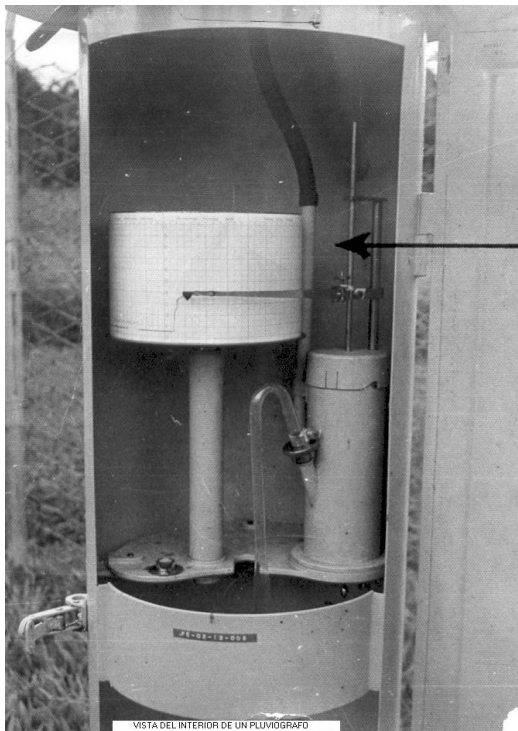
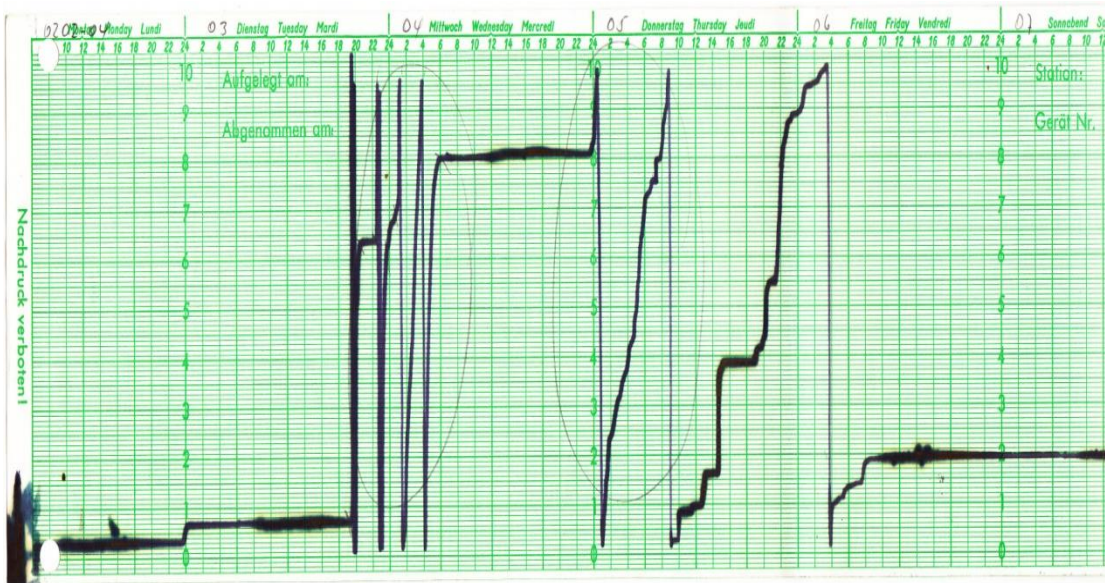


Figura 2.8 Bandas del pluviografo



2.1.8 ANALISIS DE CONSISTENCIA

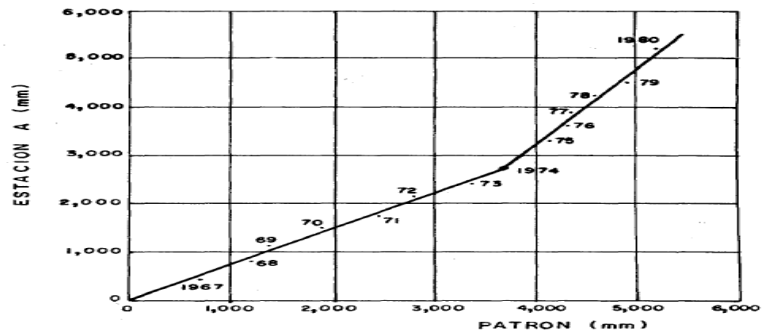
Cualquier cambio en la ubicación como en la exposición de un pluviómetro puede conllevar a un cambio relativo en la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro.

Una de las formas de detectar las inconsistencias es mediante las curvas másicas.

Una curva doble másica se construye llevando en ordenadas los valores acumulados de la estación en estudio y en abscisas los valores acumulados de un patrón, que consiste en el promedio de varias estaciones índice.

Figura 2.9 Curva doble masa

Fuente: Chereque



En la figura 2.8 se observa un quiebre en el 1974. Si se supone que las estaciones que componen el patrón son confiables este será consistente y por lo tanto el quiebre se lo atribuye a una inconsistencia de la estación en estudio.

Es necesario ajustar los valores del periodo más lejano para reducirlos a las condiciones de ubicación, ubicación, etc.,

La siguiente ecuación corrige la precipitación registrada de manera la curva doble másica se convierte en una sola recta.

$$pc = \frac{m2}{m1} \cdot P \quad (2.1)$$

Donde:

P = Precipitación observada (mm)

pc = Precipitación corregida (mm)

m2 = pendiente del periodo más reciente

m1 = pendiente del periodo cuando se observa P.

En estudios hidrológicos se recomienda verificar la consistencia de cada estación índice. Esto se hace dibujando la curva doble másica entre cada estación y el patrón formado por las restantes.

Al trazar la curva doble másica no se considera los quiebres que no persistan por más de 5 años, ya que se considera que los quiebres cortos se deben principalmente a la variabilidad inherente a los datos hidrológicos.

A veces un cambio pequeño en la ubicación del pluviómetro, de solo unos cuantos metros, puede afectar su exposición y provocar inconsistencias en el registro o formato además, aunque el pluviómetro no cambio de ubicación su exposición pueden verse afectada por el crecimiento de vegetación cercana, o por la construcción de edificios en los alrededores.

No se recomienda usar curvas dobles másicas en regiones montañosas, porque las diferencias en los registros de estaciones cercanas pueden deberse a eventos meteorológicos diferentes.

2.2 TORMENTAS DE DISEÑO

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia –escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis lluvia – escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grandes embalses.

2.2.1 TORMENTA PUNTUAL

La tormenta es la que se presenta en un punto y para definirla se utilizan los datos puntuales de altura de precipitación o intensidades máximas de lluvia registradas en una estación. Además, estas tormentas son validas para áreas cuya extensión este definida por la zona de influencia de la estación de aforo o bien para superficies que no excedan los 25 Km².

Los métodos más comunes que se usan para definir su magnitud son: el análisis simultaneo de las variables intensidad, duración y periodo de retorno (i-d-Tr), a través de una regresión múltiple; y el análisis independiente de las variables intensidad y

periodo de retorno (i-Tr) a partir de funciones de distribución de probabilidad

2.2.2 TORMENTA ASOCIADA A AREAS DE DIFERENTE TAMAÑO

Este tipo de tormenta se define con las curvas de altura de precipitación – área - duración (hp-A-d), es decir se analiza en forma espacial y temporal las condiciones más favorables de una tormenta.

La situación anterior ocurre cuando la precipitación es de gran magnitud dentro de un cierto intervalo de tiempo y se distribuye en áreas de diferentes tamaños, tal como ocurre con las precipitaciones ciclónicas que ocurren en las zonas costeras.

El proceso de cálculo se sintetiza en las etapas siguientes:

- Se obtiene la curva masa de la estación pluviográfica localizadas en la zona de captación de la cuenca o región hidrológica de estudio.
- Se calcula la precipitación media para la duración total, empleando pluviógrafos y pluviómetros, con el método de las isoyetas.
- Se selecciona el intervalo de tiempo a considerar.
- Se obtiene la precipitación para cada estación pluviográfica y cada intervalo de tiempo
- Para cada zona encerrada por una isoyeta, empezando por la isoyeta de mayor valor, se calcula el área encerrada por la isoyeta y la precipitación media correspondiente.
- Se trazan los polígonos de Thiessen asociados a las estaciones pluviográficas y se superponen al plano de isoyetas para determinar que porcentaje de área encerrada por cada isoyeta le corresponde a cada pluviógrafo.
- Se calcula la curva masa media para cada área encerrada entre isoyetas, multiplicando la curva masa de cada estación pluviográfica por el porcentaje correspondiente obtenido en el inciso anterior.
- Para cada área encerrada entre isoyetas, se calcula la curva masa media ajustada (obteniendo el factor de ajuste y multiplicándolo por las curvas masa).

- Para todas las duraciones de interés, las cuales deben ser múltiplos del intervalo de tiempo utilizado en el análisis y para cada área, se calculan los incrementos máximos de precipitación.
- Se construye las graficas considerando los valores de altura de precipitación en el eje horizontal, los valores de área en el eje vertical (escala logarítmica) y las curvas corresponderán a cada valor de intervalo de tiempo.

2.2.3 TORMENTA REGIONAL

La tormenta de tipo regional a través de un proceso que involucra un conjunto de aspectos relacionados con la geografía, la orografía, la hidrología, el tipo de lluvia que ocurre y algunos otros más.

En términos generales, este proceso equivale a obtener formulas o procedimientos factibles de aplicarse a una región hidrológica, aprovechando las características que son comunes para todo los puntos de la región y señalando las que no son comunes.

A lo largo del tiempo diverso autores han desarrollado este tipo de formulaciones, en cuencas hidrológicas localizadas en diverso latitudes del planeta, sobresaliendo los estudios llevados a cabo por Bell (1969), Chen (1983) y Breña (1996).

El proceso de regionalización involucra varios aspectos relacionados con la hipótesis de partida, la distribución regional de las lluvias máximas, los factores de ajuste asociadas con cortas y largas duraciones, el factor de reducción por periodo de retorno, el factor de reducción por área (FRA) y la distribución temporal de la lluvia representa por el hietograma de diseño.

El análisis de frecuencia para la precipitación sobre un área no se encuentra tan desarrollado como el análisis de la precipitación puntual. Ante la falta de información sobre la verdadera distribución de probabilidad de precipitación promedio sobre un área, usualmente se extienden estimativos de precipitación puntual para desarrollar una profundidad promedio de precipitación sobre un área. L estimación de la precipitación sobre el área puede ser centrada alrededor de la tormenta o fijada

localmente. Para este último caso, se tiene en cuenta el hecho de que las estaciones de precipitaciones, algunas veces están cerca del centro de la tormenta, otras veces cerca de los bordes exteriores y otras veces entre esos dos puntos. Un proceso de promediar produce curvas de profundidad-área fijadas localmente que relacionan la precipitación promedio sobre el área con medidas puntuales.

2.2.4 IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE LAS TORMENTAS

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la INTENSIDAD de lluvia (o profundidad), la DURACION y las FRECUENCIAS o PERIODOS DE RETORNO apropiados para la obra y el sitio. En muchos casos existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (IDF) disponibles para el sitio, luego no hay que llevar este análisis. Sin embargo este trabajo de investigación desarrollara las curvas estándar para la estación de la comunidad de La Merced, por la tanto es conveniente entender el procedimiento utilizado para desarrollar estas relaciones.

El análisis de las tormentas, está íntimamente relacionado con los cálculos o estudios previos, al diseño de obras de ingeniería hidráulica, como son:

- Estudio de drenaje
- Determinación de caudales máximos, que deben pasar por un aliviadero de una represa, o que deben encausarse, para impedir las inundaciones.
- Determinación de la luz de un puente
- Conservación de suelos
- Calculo de diámetro de alcantarillas

Las dimensiones de estas obras, dependen principalmente de la magnitud de las tormentas tengan, y de la frecuencia o periodo de retorno, esto a su vez determina el coeficiente de seguridad que se da a la obra, o los años probables de la misma.

Se comprende que lo mejor sería diseñar una obra para la tormenta de máxima

intensidad y de duración indefinida, pero esto significa grandes dimensiones de la misma y lógicamente hay un límite, después del cual, los gastos ya no compensan el riesgo que se pretenden cubrir. Entonces, en la práctica no se busca una protección absoluta, sino la defensa contra una tormenta de características bien definidas, o de una determinada probabilidad de ocurrencia.

La intensidad de la precipitación, varía en cada instante durante el curso de una misma tormenta, de acuerdo a las características de esta. Es absolutamente indispensable, cuando se hace el análisis de las tormentas, determinar estas variaciones, porque de ellas dependen muchas condiciones, que hay que fijar para las obras de ingeniería hidráulica, para las que se hacen principalmente esta clase de estudios. Esto se consigue mediante gráficos: el hietograma y la curva masa de precipitación.

2.2.5 HIETOGRAMA

Es un grafico de forma escalonada como un histograma, que representa la variación de la intensidad expresada en mm/hora de la tormenta, en el transcurso de la misma expresada en minutos u hora. En la figura 2.8 se puede ver esta relación que corresponde a una tormenta registrada por un pluviograma.

Mediante este hietograma es muy fácil decir a qué hora, la precipitación adquirió su máxima intensidad y cuál fue el valor de esta. Matemáticamente este grafico representa la relación:

$$i = \frac{dP}{dt} \quad (2.2)$$

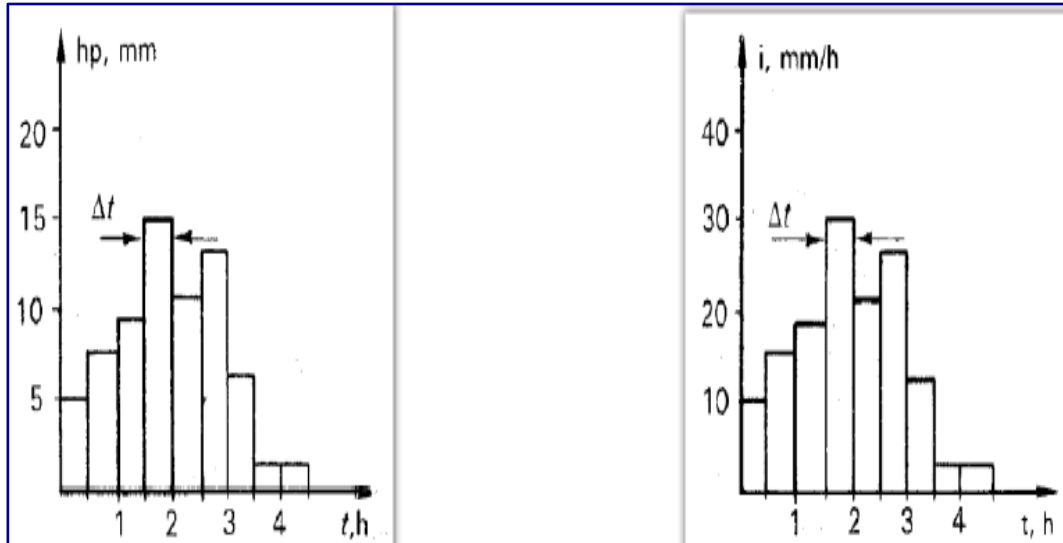
Donde:

i = intensidad (mm/h)

P = precipitación (mm)

t = tiempo (h)

Figura 2.10 Hietogramas de alturas de precipitación
Fuente: Hidrología de Aparicio Mijares



2.2.6 CURVA MASA DE PRECIPITACION

La curva masa de precipitación (figura 2.11), es la representación de la precipitación acumulada vs el tiempo. Se extrae directamente del pluviograma.

La curva masa de precipitación, es una curva no decreciente, la pendiente de la tangente en cualquier punto, representa la intensidad instantánea en ese tiempo.

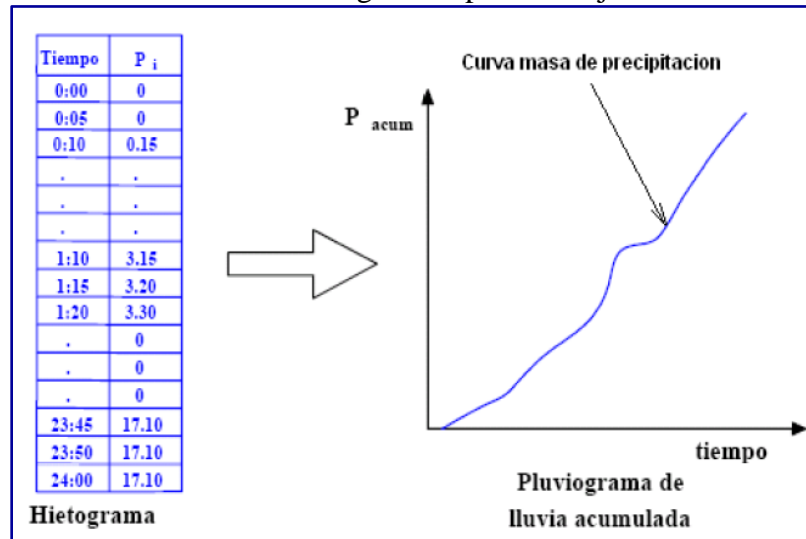
Matemáticamente la curva masa de precipitación, representa la función $P = f(t)$ expresada por:

$$P = \int_0^{t_1} i dt \quad (2.3)$$

que se deduce de la relación:

$$i = \frac{dP}{dt} \quad (2.4)$$

Figura 2.11 Curva masa de precipitación
Fuente: Hidrología de Aparicio Mijares



2.2.7 METODOS PARA ESTIMAR HIETOGRAMAS DE DISEÑO

La distribución de la lluvia media para la duración total de la tormenta, se determina a partir de un hietograma de diseño, el cual se define con el apoyo de las curvas masas media de las tormentas más desfavorables que han ocurrido en una región o cuenca hidrológica, durante el lapso de tiempo lo suficientemente grande para tener certeza en los resultados.

Sin embargo, a lo largo del tiempo diversos autores tales como Tholin y Keifer (1959), NERC (1975) y algunos otros más, han desarrollado varios métodos para determinar el hietograma de diseño, utilizando para ello los registros de datos pluviográficos y concepciones teóricas diferentes.

2.2.7.1 METODO DEL BLOQUE ALTERNO

El objetivo básico de este método es determinar la curva masa acumulada de precipitación, asociada a un área de análisis y un periodo de retorno dado y con su resultado se define el hietograma de diseño, discretizando la curva masa para un

intervalo de tiempo constante.

Por su parte, para el caso de áreas reducidas cuyos valores no sobrepasen los 25 km² y si se tienen disponibles lluvias a cortas duraciones, registrados en pluviógrafos, se procede a definir la curva masa de precipitación con el apoyo de una expresión matemática que asocia en forma conjunta los valores de lluvia, la duración y la probabilidad de ocurrencia, representada por el concepto de periodo de retorno.

Una de las expresiones que se usan regularmente, en la hidrología, para relacionar las variables de la altura de la lluvia (h_p), la duración (d), y el periodo de retorno (T_r), tiene la estructura siguiente:

$$h_p = kT_r^n d^m \quad (2.5)$$

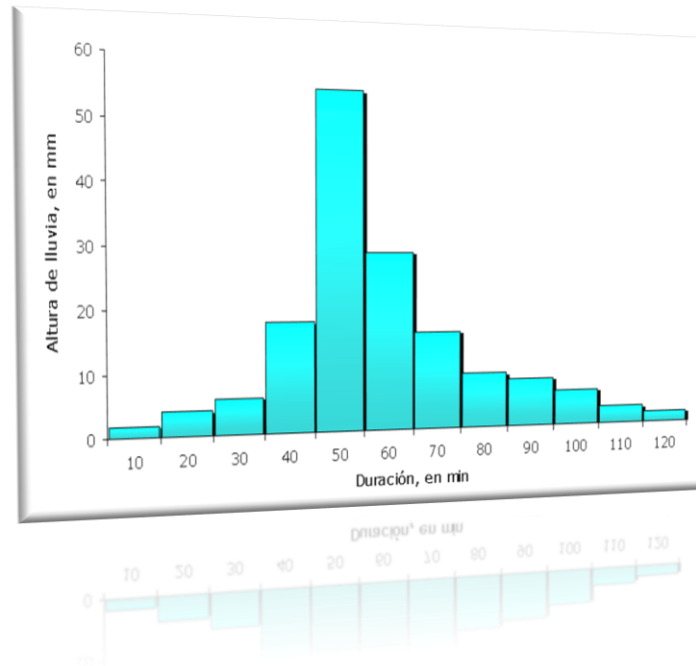
donde h_p es la altura de la lluvia en mm, T_r es el periodo de retorno en años; d es la duración en min; y k , m y n son parámetros cuyo valor se determinan al ajustar la ecuación (2.5) a los datos registrados, con la ayuda de regresión línea múltiple.

Posteriormente para calcular un hietograma de diseño se selecciona un periodo de retorno (T_r) y con el auxilio de la función (2.5) se determina la curva de la precipitación acumulada.

A continuación, con la curva de precipitación y el intervalo de tiempo elegido se estiman los incrementos de lluvia entre intervalos consecutivos y con estos valores se construye el hietograma de diseño.

El hietograma de diseño se define con la técnica del bloque alterno el cual consiste en formar un diagrama de barras con el proceso que a continuación se describe. En la parte central se ubica el mayor valor y después se van alternando en orden descendente hacia la derecha e izquierda los otros valores para formar el hietograma de diseño. La figura 12 señala la forma típica de un hietograma o tormenta de diseño elaborado con el método de bloque alterno.

Figura 2.12 Hietograma de precipitación



2.2.7.2 METODO DE LA INTENSIDAD INSTANTANEA

En este método si se conoce la ecuación que define la curva intensidad – duración – periodo de retorno, se pueden desarrollar las ecuaciones que describan la variación de la intensidad con el tiempo en el hietograma de diseño.

El principio es similar el empleado en el método de bloque alterno, es decir, la altura de precipitación para un periodo de duración (d) alrededor del pico de la tormenta es igual al valor dado por la ecuación que relaciona los valores de la intensidad – duración – periodo de retorno (i-d- T_r).

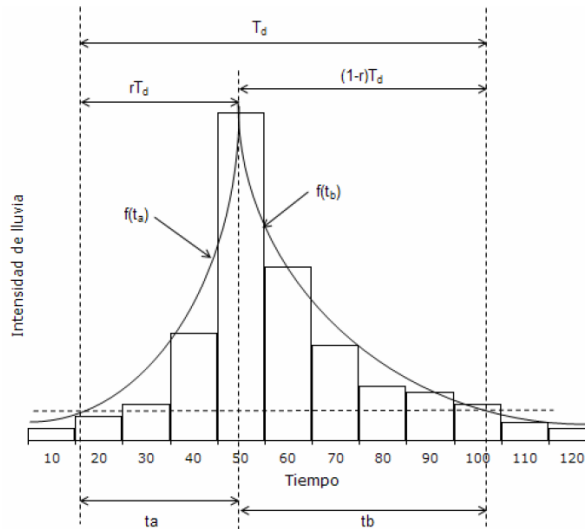
La diferencia entre el método de la intensidad instantánea y el método del bloque alterno es que la intensidad de precipitación varía en forma continua a través de la tormenta.

Ahora bien, si se considera el hietograma de la tormenta indicado en la figura 2.13. la línea horizontal punteada dibujada en el hietograma para una intensidad de lluvia dada i, interceptara el hietograma antes y después del valor pico, el tiempo de intersección antes y después del pico se denota con t_a y t_b , respectivamente.

Asimismo, el tiempo total entre las intersecciones de denomina T_d de tal forma que:

$$T_d = t_a + t_b \quad (2.6)$$

Figura 2.13 Ajuste de un hietograma mediante curvas



Por su parte, el coeficiente de avance de la tormenta r se define como la relación del tiempo antes del pico entre el tiempo entre las intersecciones, es decir:

$$r = \frac{t_a}{T_d} \quad (2.6)$$

Relacionando las ecuaciones (2.5) y (2.6) se obtiene la expresión siguiente:

$$T_d = \frac{t_a}{r} = \frac{t_b}{1-r} \quad (2.7)$$

Ahora bien, y tal como se observa en la figura 2.13 se supone que las dos curvas $i_a = f(t_a)$ y $i_b = f(t_b)$ se ajustan las intensidades de precipitación del hietograma, donde i_a e i_b son las intensidades de precipitación antes y después del pico, respectivamente.

Además, la cantidad total de lluvia R durante el tiempo (T_d) está dado por el área bajo las curvas:

$$R = \int_0^{rT_d} f(t_a) dt_a + \int_0^{(1-r)T_d} f(t_b) dt_b \quad (2.8)$$

Por otra parte, es importante recalcar que $f(t_a) = f(t_b)$ para cualquier T_d y diferenciando la ecuación (2.8) con respecto T_d se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dR}{dT_d} = f(t_a) = f(t_b) \quad (2.9)$$

Y si la intensidad de lluvia promedio para la duración T_d es i_{med} , entonces:

$$R = T_d i_{med} \quad (2.10)$$

Diferenciando la ecuación (2.2.7) con respecto a T_d se obtiene:

$$\frac{dR}{dT_d} = i_{med} + T_d \frac{di_{med}}{dT_d} = f(t_a) = f(t_b) \quad (2.11)$$

Keifer y Chu (1957) desarrollaron un hietograma sintético de este tipo para usarse en el diseño del sistema de alcantarillado de Chicago y para tal situación definieron que la intensidad promedio de lluvia i_{med} se puede representar a través de la ecuación siguiente:

$$i_{med} = \frac{c}{T_d^{e+f}} \quad (2.12)$$

Si se procede a diferenciar la ecuación de (2.2.9) y sustituyendo el resultado en la ecuación de (2.2.8) puede demostrarse que la intensidad i para la cual la línea intercepta el hietograma para una duración T_d está dado por:

$$i = \frac{c[(1-e)T_d^e + f]}{(T_d^e + f)^2} \quad (2.13)$$

2.2.7.3 METODO DE LA CURVA ALTURA DE PRECIPITACION – DURACION

Método desarrollado para determinar los hietogramas de diseño a través de una metodología cuyas características relevantes se describen a continuación.

- a) Para el área considerada y un periodo de retorno constante, se calcula la precipitación para cada duración, utilizando los factores de ajuste que se han determinado para la cuenca en análisis.
- b) Posteriormente, se repite el paso del inciso a), para diferentes duraciones, cambiando en cada paso el factor de ajuste por duración ya que los factores de ajuste por área y periodo de retorno solo se calculan una vez y permanecen constantes. Se puede considerar que la duración total es igual a dos veces el tiempo de concentración y los valores del incremento de tiempo para el hietograma varían entre $1/6$ y $1/16$ de la duración total.
- c) A continuación, se dibujan los valores de precipitación obtenidos en el paso b) contra las correspondientes duraciones y se forma una curva masa acumulada de precipitación.
- d) Con la curva masa acumunalada y el intervalo de tiempo escogido, se calculan los incrementos de lluvia entre intervalos consecutivos.
- e) Con los valores del inciso d) se construyen diferentes hietogramas; para ello se buscan diferentes combinaciones e las barras no deber ser mayor que la precipitación acumulada para esa duración.

2.2.7.4 METODO ESTADISTICO

El método estadístico requiere para su aplicación de información pluviográfica de las tormentas más desfavorables que han ocurrido en la cuenca o región hidrológica de estudio.

Este método fue desarrollado e implementado en la Gran Bretaña aplicando para tal efecto la metodología que a continuación se describe.

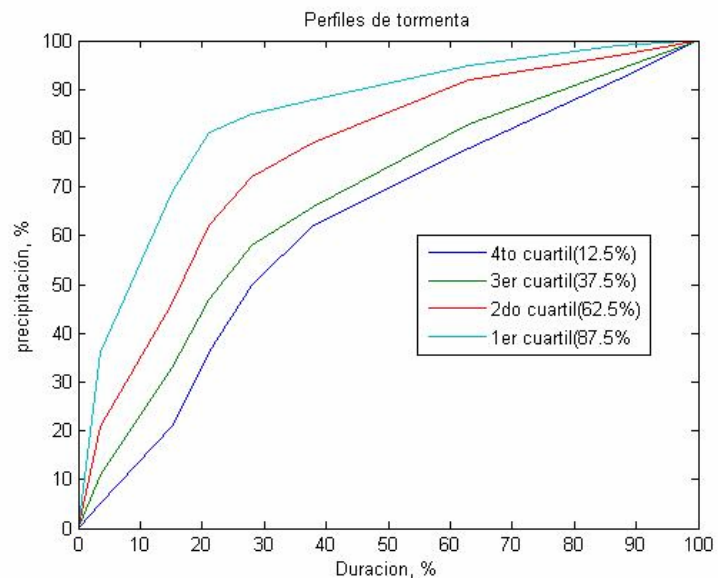
- i. En el primer paso, se selecciona las tormentas más importantes registradas en una duración de 24 horas y se construyen sus curvas masa de precipitación.
- ii. Las tormentas se ordenan en el criterio siguiente:
 - a) Para cada curva masa media de precipitación, correspondiente a cada tormenta, se calcula el incremento máximo de precipitación para un intervalo de tiempo.
 - b) Los valores obtenidos en el paso anterior, son ordenados de mayor a menor y una vez realizado este proceso se divide en cuatro grupos. A cada grupo se lo denomina “cuartil”
- iii. Para cada una de las tormentas que integran cada cuartil se determina, con ayuda de las curvas masas de precipitación, el centro de la misma, con el procedimiento descrito a continuación:
 - a) Se busca el intervalo de tiempo mínimo para el cual el incremento de precipitación es mayor al 50% de la lluvia total registrada en 24 horas.
 - b) Se considera que el centro está ubicado en la parte media del intervalo calculado en el paso anterior.
 - c) Se definen intervalos de tiempo de una hora indistintamente a partir del centro de la curva masa.
- iv. Se expresa las duraciones en función de 24 horas, en porcentaje; para ello se divide cada intervalo entre 24, por ejemplo $1/24$, $2/24$, $3/24$,, etc.
- v. Se calcula el porcentaje de incremento de lluvia, correspondiente a cada intervalo de tiempo; para ello se divide el incremento de precipitación entre la precipitación total registrada en 24 horas. Lo anterior se realiza a partir del centro de la curva masa y se van acumulando los porcentajes.
- vi. Para las tormentas de cada cuartil se calcula un promedio aritmético de los porcentajes de lluvia acumulada para porcentajes de duración comunes. Se considera que los valores calculados para el primer cuartil corresponden a tormentas con una “picudez” del 87.5 %.
- vii. Se repite lo indicado en los pasos iii a vi, asignando el porcentaje de “picudez” a cada uno de ellos, tal como se observa en la tabla 2.2.1

Tabla 2.1 Cuartiles y porcentajes de picudez

Cuartil	Porcentaje de picudez
1	87,5
2	62,5
3	37,5
4	12,5

- viii. Se elabora una grafica, tal como se muestra en la figura 2.14 con los valores obtenido en el paso vi.

Figura 2.14 Perfiles de tormenta



- ix. Mediante interpolación, en % de duración y precipitación acumulada, se obtiene con la ayuda de la figura 2.14, los percentiles correspondientes a una picudez.
- x. Para determinar el hietograma se propone aplicar el método siguiente:
- Se toma como base uno de los percentiles, ver paso ix ,
 - Con los datos de porcentaje de precipitación acumulada, calculados en el paso anterior, se obtiene el incremento entre intervalos consecutivos de

duración.

- c) Se ordenan los incrementos de precipitación, calculados en el paso anterior, de mayor a menor.
- d) El mayor incremento corresponde al centro del hietograma y los demás valores se colocan a la izquierda y derecha alternativamente de acuerdo con el orden de incremento de precipitación.
- e) Se transforma los porcentajes de precipitación a valores de lluvia multiplicando la precipitación media, por cada uno de los porcentajes de precipitación del hietograma de la figura 2.2.4
- f) Finalmente, los porcentajes de duración se cambian a duración multiplicando cada uno de ellos por la duración total de la tormenta, formando así el hietograma de precipitación o hietograma de diseño.

2.2.7.5 METODO DE THOLIN – KEIFER

El método diseñado por Tholin y Keifer en el año 1959, considera como fundamental la forma típica de las curvas masa acumuladas de precipitación que se han registrado en el pasado, es decir se recopila la información de las principales tormentas que han ocurrido durante el tiempo lo suficientemente confiable, en las estaciones pluviográficas de la cuenca o región de análisis.

En una fase posterior, con la información disponible se efectúa un análisis especial para detectar si la distribución de las curvas masa de precipitación, registradas en la red de estaciones de medición, presenta un comportamiento homogéneo y/o heterogéneo.

Ahora bien, para detectar si la distribución de las curvas masas de precipitación en la región de análisis presenta una pauta homogénea o heterogénea se lleva a cabo un análisis gráfico y estadístico de las curvas masas de precipitación.

En el análisis de tipo gráfico se dibuja en forma conjunta la totalidad de las curvas masa de precipitación y con el apoyo de un examen visual se detecta su comportamiento a lo largo del tiempo.

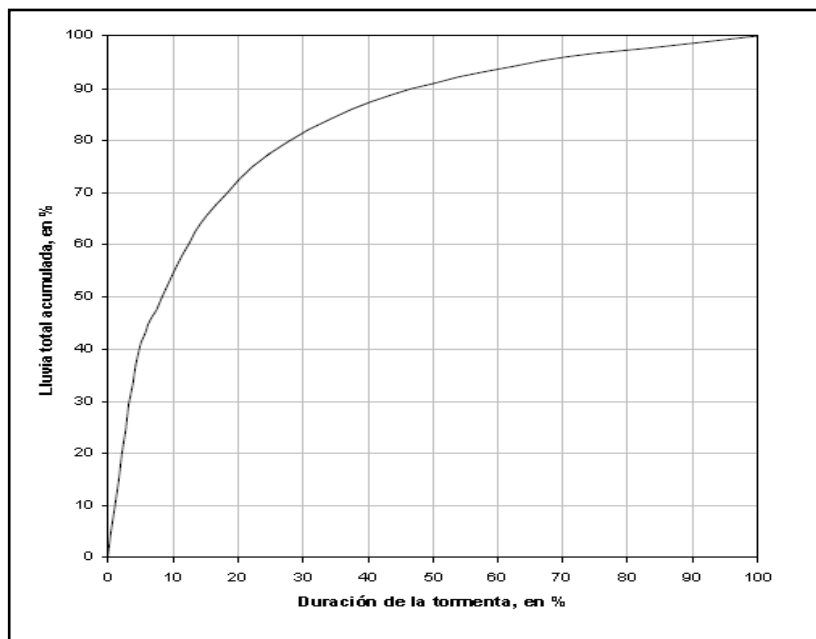
Si la distribución de las curvas masa no presenta grandes variaciones, se concluye que consistencia y homogeneidad en las curvas masas y en caso contrario hay una heterogeneidad en los datos.

Por su parte el objetivo del análisis estadístico es verificar la consistencia de los datos y para tal efecto se calcula los parámetros estadísticos de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, de cada uno de los valores discretos de lluvia asociados a 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos, los cuales integran las curvas masas medias de precipitación.

Se considera que los datos son homogéneos, si el parámetro estadístico del coeficiente de variación de cada uno de los valores de discretos de las curvas masas de lluvia asociados a las diferentes duraciones, es de una magnitud menor o igual a 15 %.

En el caso de heterogeneidad de los datos se proceda a regionalizar la cuenca de estudio, es decir se agrupan las curvas masas de precipitación en áreas donde su distribución sea homogénea. Tholin elabora para la estimación de los hietogramas de precipitación la curva total acumulada-duración de la tormenta en función de porcentajes.

Figura 2.15 Curva lluvia total acumulada-duración



2.3 CURVAS INTENSIDAD – DURACION – PERIODO DE RETORNO

Lo habitual es que se recurre a las curvas IDT para desarrollar hietogramas de diseño, así se obtiene los hietogramas discretos con intervalos de cierta duración, razón por la cual requiere un mayor conocimiento las curvas IDT.

2.3.1 CONCEPTOS GENERALES

Las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno (IDT) constituye una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño de obras de drenaje en vías y alcantarillados pluviales en zonas urbanas y rurales, así como la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a los modelos lluvia – escorrentía para el cálculo de los caudales máximos. Las intensidades máximas de la lluvia en distintos intervalos de tiempo en un mismo sitio y con distintas probabilidades de excedencia o periodos de retorno se resumen en las curvas IDF.

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), son curvas que resultan de unir puntos representativos de la intensidad media de intervalos de diferente duración, y correspondiente todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno (Temez, 1978).

Según Benítez (2002) las curvas IDF son la representación grafica de la relación existente entre la intensidad, la duración y la frecuencia o periodo de retorno de la precipitación.

Por otro lado, según Mintegui et al (1990), se denomina curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) a aquellas que representan duraciones en abscisas y alturas de precipitación en las ordenadas, en la cual, cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las graficas de las curvas IDF representa la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiente todos los de una misma curva, a un idéntico periodo de retorno.

Willems (2000) define las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) como la

relación que existe entre la intensidad de precipitación media y la frecuencia de ocurrencia (inverso del periodo de retorno); estas curvas son herramientas utilizadas en ingeniería para fines de plantación, diseños y operación de los proyectos hidráulicos, así como la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas. Existen básicamente dos formas de expresar la relación de IDF para un sitio dado, la primera a través de curvas y la segunda a través de modelos matemáticos. Para la construcción de las curvas se plantean dos métodos, uno conocido como intensidad-periodo de retorno, el cual relaciona estas dos variables para cada duración por separado mediante algunas de las funciones de distribución de probabilidad.

2.3.2 INTENSIDAD

Según Chow et al. (1994), la intensidad se define como la profundidad de precipitación por unidad de tiempo (en mm/hr o pulg/hr) y se expresa como:

$$i = \frac{P}{T_d} \quad (2.14)$$

Donde:

i = Intensidad de precipitación (mm/hr)

P = Profundidad de la lluvia (mm o pulg)

T_d = Es la duración en horas

Por otra parte el mismo autor señala, que la intensidad máxima se determina calculando las intensidades corrientes, pertenecientes a una serie de datos para un intervalo de tiempo determinado, para luego seleccionar el valor máximo de ese conjunto de datos.

2.3.3 PERIODO DE RETORNO O FRECUENCIA

Frecuencia, es la repetición de eventos características similares en intensidad y

duración. Esta definición va en directa relación con el periodo de retorno, el que se define como el número de años promedio que transcurre para que un evento sea igualado o excedido (Linsley et al. 1988)

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

De acuerdo a Pizarro (1998), en el diseño de las curvas IDF se debe considerar la frecuencia, la cual se expresa en función de periodo de retorno T, que se denomina al tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales.

Por otra parte, para Aparicio (2003), el número de años en que se presenta un evento puntual, se llama periodo de retorno, intervalo de ocurrencia o frecuencia y suele ser denotado como T.

La expresión más común para estimar el periodo de retorno, a partir de valores de datos es la desarrollada por Weibull:

$$T_r = \frac{n+1}{m} \quad (2.15)$$

Donde

T_r = Periodo de retorno en años

n = El número total de datos de la muestra a ser analizada

m = el valor de rango de cada valor

El valor de rango se obtiene de los datos de altura de precipitación o intensidad que han sido acomodados de mayor a menor, si es análisis de máximos o de menor a mayor si es de mínimos

2.3.4 DURACION

La duración, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. Aquí conviene definir el **periodo de duración**, que es un determinado

periodo de tiempo, tomando en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta. Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas. Ambos parámetros, se obtienen de un pluviograma.

2.3.5 PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA

Según Pizarro y Novoa (1986), la probabilidad de excedencia, es la probabilidad asociada al periodo de retorno. En otras palabras de que un evento sea igualado o superado en uno o más años.

Por otro lado según Ulriksen et al. (1979) y Viessman y Lewis (2003), la probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un cierto valor a asumir por la variable aleatoria sea superado. Se define por $(1/T)$, en donde T es el periodo de retorno; por consiguiente, la probabilidad de excedencia sirve para estimar riesgos en obras civiles en general, y para poder tener una aplicación a largo plazo en el sector productivo. Además, dentro de las aplicaciones de la estadística, usadas comúnmente en la hidrología, esta la determinación de la probabilidad o del periodo de recurrencia de determinado suceso.

2.3.6 CONSTRUCCION DE LAS CURVAS IDT

La construcción de las curvas IDT, se realiza a partir de datos aportados por los pluviogramas de una determinada estación. El análisis de estos pluviogramas lleva a obtener expresiones de la altura de precipitación en función de la duración, las cuales son características para cada zona (López, 1998)

Ahora bien existen otros métodos para construir las curvas IDT, los que han sido propuestos por diferentes autores.

Para Aparicio (1997) existen dos métodos; el primero, llamado intensidad – periodo de retorno, relaciona estas dos variables para cada duración por separado, mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad en hidrología.

El otro método relaciona simultáneamente la intensidad, duración y el periodo de

retorno en una familia de curvas cuya ecuación es:

$$I = \frac{k * T^m}{(d+c)^n} \quad (2.16)$$

Donde k, m, n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de relación lineal múltiple y en tanto que I y d corresponden a la intensidad de precipitación y la duración respectivamente.

$$\log(i) = \log(k) + m\log(T) - n\log(d + C) \quad (2.17)$$

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (2.18)$$

Las curvas intensidad, duración y frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de diseño, en una grafica (Chow et al. 1994). A continuación se presentan los modelos matemáticos más conocidos, a nivel mundial, que se utilizan para estimar las curvas IDF.

Tabla 2.2 Ecuación que relaciona intensidad con la duración

Ecuación que relaciona la intensidad de la lluvia con la duración de la tormenta.		
Autor	Modelo	Características
Ponce(1989)	$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^n}$	Siendo n < 1

Nota: los valores de de λ y θ se determina por análisis de regresión

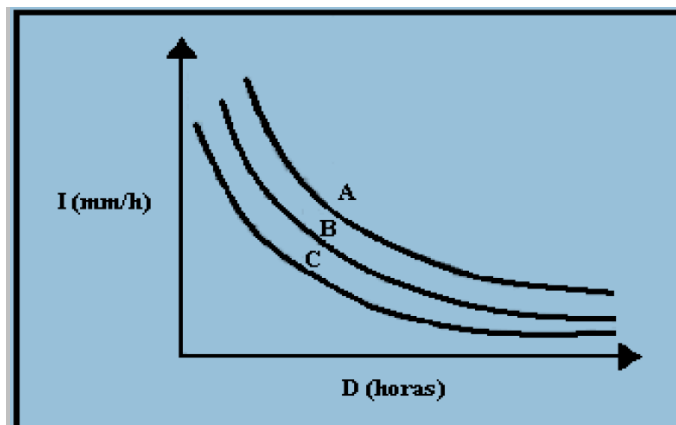
Tabla 2.3 Ecuaciones que relación la intensidad-duración-frecuencia

Ecuaciones que relacionan la intensidad de la lluvia de una tormenta con la duración y frecuencia de ocurrencia de esta.		
Autor	Modelo	Aplicación
Bernard (1932).	$i = \frac{\lambda \times T^\psi}{d^n}$	
Sherman (1931)	$i = \frac{\lambda \times T^\psi}{(d + \theta)^\eta}$	Boston-Massachussets-USA
Wenzel (1982).	$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta}$	Varias ciudades de los Estados Unidos
Chow et al. (1994),	$i = \frac{\lambda \times T^\psi}{d^\eta + \theta}$	Varias ciudades de los Estados Unidos
Koutsoyiannis et al. (1998).	$i = \lambda \left\{ \frac{\psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right\}$	Atenas- Grecia

Nota: los valores de λ , Ψ , η y θ se estiman por aproximaciones sucesivas cuando se ajusta cada modelo

Fig. 2.16 Curva Intensidad – Duración - Frecuencia

Fuente: WWW.Monografias.Hidrologia.com/es



2.4 PROBABILIDAD Y ESTADISTICA EN HIDROLOGIA

En esta sección se dará introducción al análisis estadístico en hidrología. Para ello, se hará en primer lugar, un recordatorio de los conceptos fundamentales de la probabilidad y estadística; posteriormente en esta investigación se hará la aplicación de los modelos

2.4.1 PROBABILIDADES

Las leyes naturales más simples son aquellas que expresan las condiciones bajo las cuales un evento de interés ocurre o no ocurre con certeza. Estas condiciones se expresan como:

- a) Si se presenta un conjunto de condiciones S , entonces el evento A , seguramente, ocurre; o bien
- b) Si se presenta un conjunto de condiciones S , entonces el evento A no puede ocurrir.

En el primer caso, A es un evento seguro con respecto a las condiciones S y en el segundo es un evento imposible.

Cuando un evento A , en presencia

Sea un espacio muestral asociada a un experimento y A cualquier suceso de S , tal que A es un subconjunto de S , se dice que la probabilidad de $P(A)$ de un evento A , es un experimento aleatorio que tiene N_s resultados igualmente posibles y N_a resultados desfavorables está dada por:

$$P(A) = \frac{N_a}{N_s} \quad (2.19)$$

Esta tiene que satisfacer las siguientes axiomas.

- a) $0 \leq P(A) \leq 1$, para todo $A \in S$ (Para todo evento A su probabilidad es positiva y cero si el evento es imposible)
- b) $P(S) = 1$

$$c) P(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots \cup A_N) = P(A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots + P(A_N)$$

2.4.2 FUNCIONES DE PROBABILIDAD

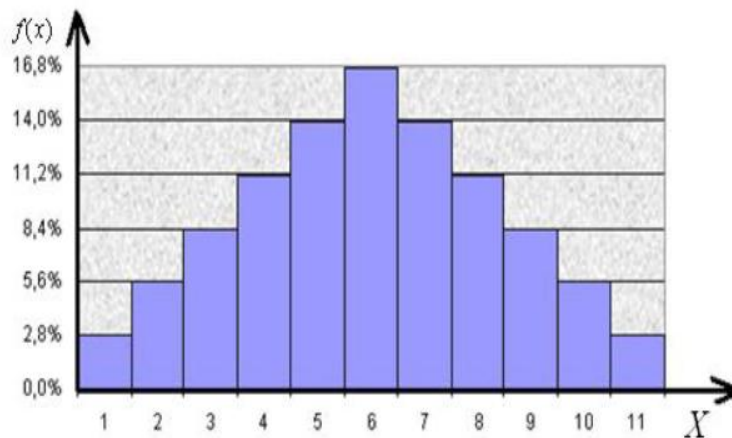
Una de las formas de representar las probabilidades de las variables hidrológicas son las funciones de probabilidad (funciones de densidad) y las funciones de probabilidad acumuladas que a continuación se mencionan.

2.4.2.1 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DISCRETA

Cuando el número n de valores que puede tomar una variable aleatoria X es finito, se dice que la variable aleatoria X es discreta.

A la función y gráfica que asocia una probabilidad a dicha variable aleatoria X se denomina función de probabilidad discreta $f(x_i)$. Esta función representa la probabilidad que tomara la variable aleatoria X , generalmente se representa por un gráfico de barras para cada valor de la variable aleatoria X . ver figura 2.4.1

Figura 2.17 Función de probabilidad discreta

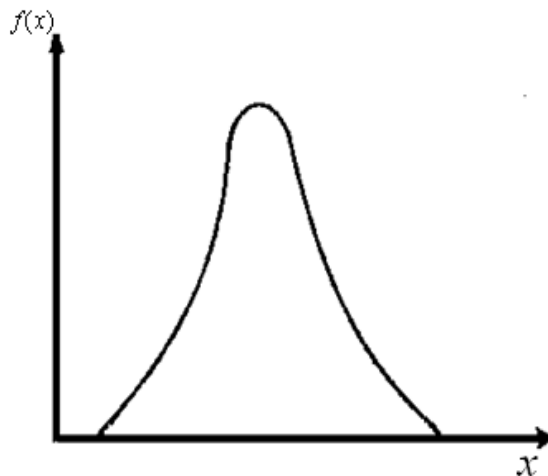


2.4.2.2 FUNCIONES DE PROBABILIDAD CONTINUA

Cuando el número de valores n que puede tomar una variable aleatoria X es infinito, se dice que la variable aleatoria X es continua. Este tipo de variables es más frecuente en hidrología.

La función asocia una probabilidad a dicha variable se denomina función de probabilidad continua o función de densidad $f(X_i)$. Esta función representa la probabilidad que toma una variable aleatoria X , la representación grafica se muestra en la figura 2.18

Figura 2.18 Función de probabilidad acumulada



2.4.3 FUNCION DE DISTRIBUCION ACUMULADA

Si X es una variable aleatoria discreta o continua, se define la función de distribución acumulada $F(x)$, como la probabilidad de que la variable aleatoria X tome cualquier valor menor o igual a x y se designa por:

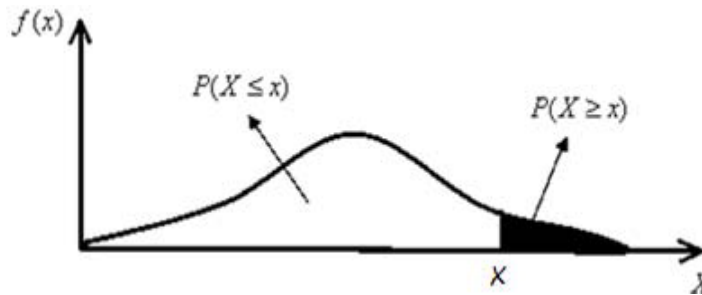
$$F(x) = P(X \leq x)$$

Que es conocida como probabilidad de no excedencia o:

$$1 - F(x) = 1 - P(X \leq x) = P(X \geq x) \quad (2.20)$$

Que es conocido como la probabilidad de excedencia, ver figura 2.19

Figura 2.19 Probabilidad de excedencia y no excedencia



Tal que:

$$P(X \leq x) + P(X \geq x) = 1 \quad (2.21)$$

En hidrología la variable más frecuente es una variable continua, se analizara la función de distribución acumulada de esta variable, que está representada por:

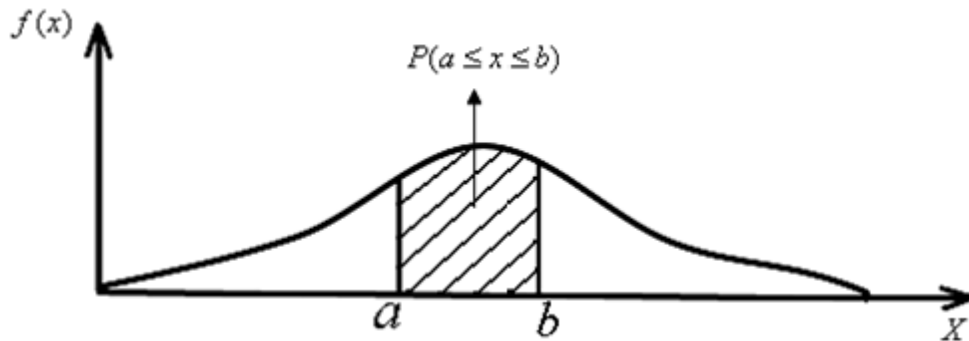
$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (2.22)$$

En el caso que la función empiece en $-\infty$, de esto se deduce que:

$$P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x)dx \quad (2.23)$$

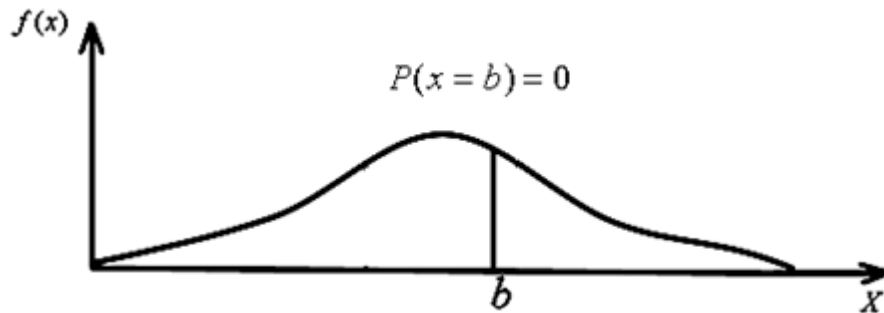
Lo que significa que la probabilidad de un evento $a \leq x \leq b$, es igual al area que hay bajo la curva la función de densidad $f(x_i)$ entre $x = a$ y $x = b$, ver figura 2.4.5

Figura 2.20 Probabilidad de un evento $a \leq x \leq b$



Se concluye que la probabilidad puntual es cero, porque el área bajo la curva es cero, como se observa en la figura 2.4.6.

Figura 2.21 Probabilidad continua



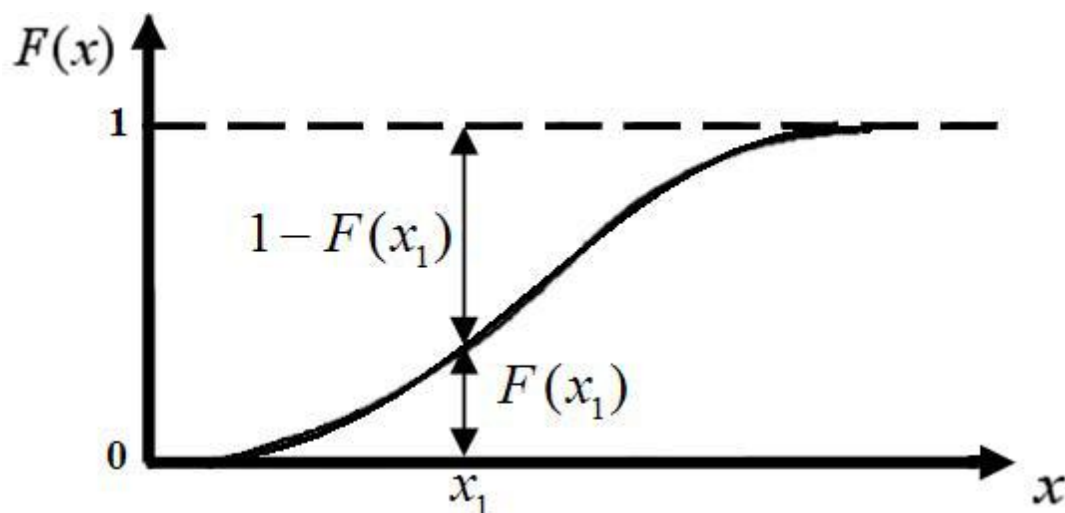
Por otro lado se tiene que el rango de $F(x)$ es

$$0 \leq F(x) \leq 1$$

Es decir que la función de distribución acumulada esta en el rango de cero y la unidad o 100 % dependiendo si se trabaja en porcentaje o decimales.

La función de distribución acumulada se representa de la siguiente manera.

Figura 2.22 Función de distribución acumulada



La figura 2.22 nos permite ver el porcentaje de las observaciones que están por encima (Fx_1) o debajo ($1-Fx_1$) del valor X_1 con respecto al total

2.4.4 FUNCIONES DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD USADAS EN HIDROLOGIA

En estadística existen muchas funciones de distribución de probabilidades teóricas, las funciones de distribución de probabilidad teóricas más usadas en hidrología son las siguientes:

- Distribución Normal
- Distribución Log. Normal
- Distribución Gama de 2 y 3 parámetros
- Distribución Log. Pearson Tipo III
- Distribución Gumbel
- Distribución Log. Gumbel

2.4.4.1 DISTRIBUCION NORMAL

También denominada distribución gaussiana. Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución normal, cuando su función densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2\right]} \quad (2.24)$$

Donde:

$f(x)$ = Función de densidad normal de la variable x

x = Variable independiente

\bar{X} = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x

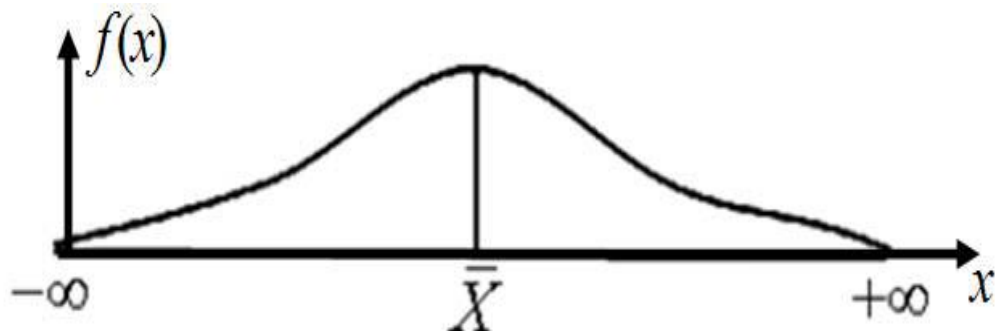
S = Parámetro de escala igual a la desviación estándar de x

e = base del logaritmo neperiano

Cuando la variable aleatoria se distribuye normalmente con media \bar{X} y varianza S^2 , se denota de la siguiente forma:

$$X \approx N(\bar{X}, S^2)$$

Figura 2.23 Función de densidad de la distribución normal



Para su aplicación lo más fácil es la utilización de una tabla que relaciona Z versus f Z para lo cual se ha definido la variable estandarizado como:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S} \quad (2.25)$$

Donde la función de densidad de Z, es denominada función de densidad de la distribución normal estándar o estandarizada, que tiene la siguiente expresión.

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} e^{\left[-\frac{Z^2}{2}\right]} \quad (2.26)$$

Una característica importante de la distribución normal estándar es que tiene la media cero y la varianza igual a uno.

La función de distribución acumulada de la distribución normal es:

$$f(x) = \int_{-\infty}^x f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_{-\infty}^x e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2\right]} dx \quad (2.27)$$

O su equivalente:

$$F(x) = F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_{-\infty}^Z e^{\left[-\frac{Z^2}{2}\right]} dZ \quad (2.28)$$

Para el cálculo de la función de distribución acumulada se recurre a la tabla de la ley normal que está en función de la variable estandarizada Z,.

2.4.4.1.1 APLICACIONES EN HIDROLOGIA

La distribución normal es de gran utilidad en hidrología, siendo alguna de sus principales aplicaciones:

- El ajuste de distribución empírica de variables hidrológicas medias anuales, mensuales, estacionales, etc., o también variables acumuladas anuales, mensuales, etc., que pueden ser caudal, precipitación, temperatura, entre otros.
- Como referencia para comparar varias distribuciones teóricas de ajuste con una distribución empírica
- Análisis de errores aleatorios en las observaciones o mediciones hidrológicas.
- Para aplicar inferencia estadística.

Para realizar el ajuste se utiliza el papel de probabilidades de la ley normal junto a su recta trazada analíticamente.

2.4.4.2 DISTRIBUCION LOG. NORMAL

Las variables de interés en hidrología son generalmente son positivas, por la que es usual que presenten distribuciones de frecuencias asimétricas, por lo que se propone aplicar una transformación logarítmica a la variable de interés y luego utilizar el modelo de distribución normal para la variable transformada, la distribución así obtenido se denominan Log. Normal, eso significa que $Y = \ln X$, tiene una distribución normal.

Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución Log-Normal, cuando su función densidad de probabilidad se definen como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \quad (2.4.7)$$

Para $0 < x < \infty$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \quad (2.4.8)$$

Donde:

$f(x)$ = Función de densidad log - normal de la variable x
 x = Variable independiente

μ_y = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x

σ_y = Parámetro de escala igual a la desviación estándar de x

$y = \ln x$

e = base del logaritmo neperiano

La función de distribución acumulada de la distribución log-normal se muestra a continuación:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-\infty}^x e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dx \quad (2.29)$$

O su equivalente:

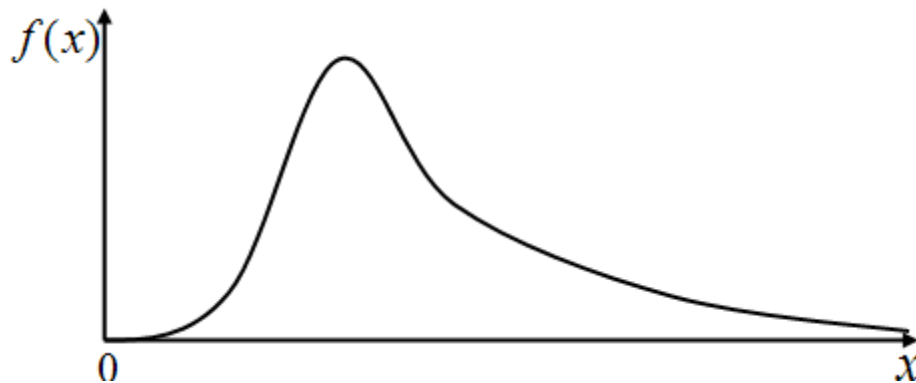
$$F(y) = \int_0^y f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-\infty}^z e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dy \quad (2.30)$$

Si:
$$Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \quad (2.31)$$

Se obtiene la distribución normal estándar.

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{\left[-\frac{z^2}{2}\right]} dz \quad (2.32)$$

Figura 2.24 Función de densidad de la distribución Log – Normal



Una vez realizada la transformación de la variable estandarizada Z, utilizar las tablas de la ley normal para el cálculo de la probabilidad o la función acumulada.

2.4.4.2.1 APLICACIONES EN HIDROLOGIA

La distribución log-normal es de gran utilidad en hidrología, siendo alguna de sus principales aplicaciones:

- Como referencia para comparar varias distribuciones teóricas de ajuste con una distribución emperica
- Análisis de errores aleatorios en las observaciones o mediciones hidrológicas.
- Para aplicar inferencia estadística.

2.4.4.3 DISTRIBUCION GAMA DE 2 Y 3 PARAMETROS

Este es una de las distribuciones más utilizadas en hidrología, se dice que una variable aleatorio X, tienen una distribución Gama o Pearson tipo III, sea su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^{\gamma-1}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{x-x_0}{\beta}} \quad (2.33)$$

Para

$$x_0 \leq x \leq \infty, \quad -\infty \leq x_0 \leq, \quad 0 \leq \beta \leq \infty, \quad 0 \leq \gamma \leq \infty$$

La función de distribución acumulada de la distribución pearson tipo III es:

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{(x-x_0)^{\gamma-1}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{x-x_0}{\beta}} \quad (2.34)$$

Donde:

$f(x)$ = Función de densidad de la variable x

$F(Z)$ = Función de distribución acumulada

x = Variable independiente

x_0 = Origen de la variable x, parámetro de posición

β = Parámetro de escala

γ = Parámetro de forma

$\Gamma(y)$ = Función gama completa

La función de distribución acumulada de la distribución log-normal se muestra a continuación:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dx \quad (2.35)$$

O su equivalente:

$$F(y) = \int_0^y f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-\infty}^z e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dy \quad (2.36)$$

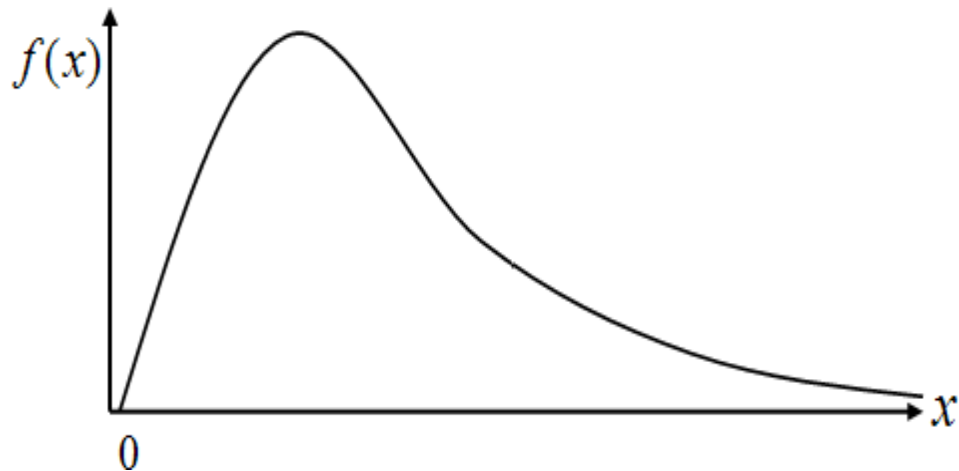
Si:

$$Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \quad (2.37)$$

Se obtiene la distribución normal estándar.

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{\left[-\frac{z^2}{2}\right]} dZ \quad (2.38)$$

Figura 2.25 Función de densidad de la distribución Pearson Tipo III



Para la aplicación de esta distribución, es recomendable utilizar el factor de frecuencia, donde se muestra que la mayoría de las funciones de frecuencias pueden ser generadas por:

$$X = \bar{X} + k * \sigma_x \quad (2.39)$$

Donde:

X = Variable analizada, con una probabilidad dada

\bar{X} = Media de la serie de datos

σ_y = Desviación estándar de la serie de datos

K = Factor de frecuencia definido para cada distribución

Para la distribución Pearson tipo III, se deberá calcular la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría

$$\text{Media} \Rightarrow \bar{X} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (2.40)$$

$$\text{Desviación estándar} \Rightarrow \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (2.41)$$

$$\text{Coeficiente de Asimetría} \Rightarrow c_s = g = \frac{N \sum (x_i - \bar{X})^3}{(N-1)(N-2)\sigma_x^3} \quad (2.42)$$

Para determinar el factor de frecuencia, es necesaria la utilización de la Tabla X del anexo X, para la cual es necesario calcular el coeficiente de asimetría y la probabilidad un período de retorno respectivo para la variable analizado.

En el caso de la distribución log-Pearson tipo III, el procedimiento es el mismo, lo único que cambia es que se deberá trabajar con los logaritmos de las variables y se utiliza la misma tabla para determinar el factor de frecuencia.

2.4.4.3.1 APLICACIÓN EN HIDROLOGIA

La distribución Pearson tipo III es identidad e hidrología, siendo alguna de sus principales aplicaciones:

- Como referencia para comparar varias distribuciones es teóricas de ajuste con una distribución empírica.
- Análisis de errores aleatorios en las observaciones y mediciones hidrológicas.
- Para aplicar inferencia estadística.
- Para realizar ajuste distribución emperica de variables hidrológicas de precipitación, caudales temperatura, etc., tales como ahora es anuales mensuales valores acumulados anuales, mensuales.

2.4.4.4 DISTRIBUCION LOG. PEARSON TIPO III

2.4.4.5 DISTRIBUCION GUMBEL O DE VALORES EXTREMOS

La distribución Gumbel es también llamada distribución de Valores Extremos tipo I o distribución doble exponencial. Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución Gumbel, cuando su función densidad de probabilidad se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}} \frac{x-\mu}{\alpha} \quad (2.43)$$

Donde:

$f(x)$ = Función de densidad Gumbel de la variable x

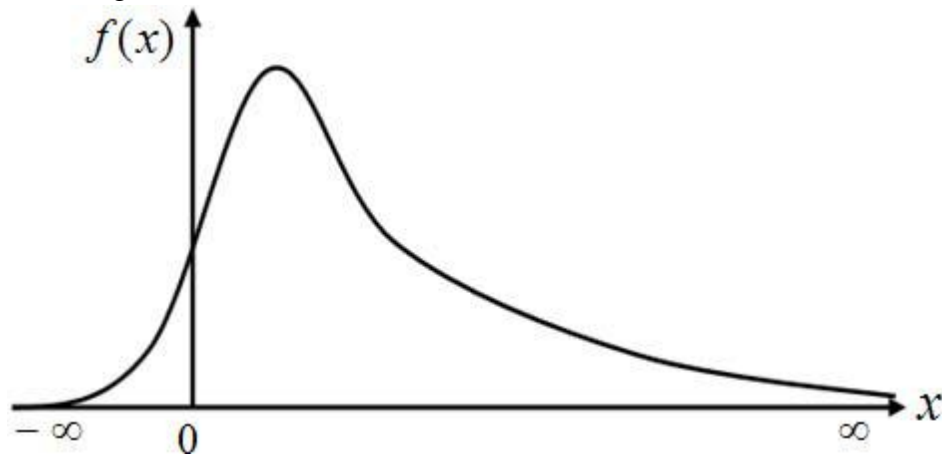
x = Variable independiente

α = Es el parámetro de escala

μ = Es el parámetro de posición, también llamada moda

e = base del logaritmo neperiano

Figura 2.26 Función de densidad de la distribución Gumbel



La función de distribución acumulada de la distribución Gumbel es:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (2.44)$$

Donde $F(x)$ es la función de distribución acumulada de la ley Gumbel. Una forma de calcular al α y μ es colas ecuaciones (2.4.19) y (2.4.20) respectivamente, y están en función de los parámetros de la media y la desviación estándar de la muestra.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \approx 0.78 S \quad (2.45)$$

$$\mu = \bar{X} - 0.57721\alpha \quad (2.46)$$

2.4.4.5.1 APLICACIÓN EN HIDROLOGIA

La distribución Gumbel por ello valores extremos tipo I, se utiliza generalmente para:

- Realizar ajustes de distribución empíricas de variables hidrológicas tales como valores de caudales máximos anuales, mensuales o precipitaciones máximos anuales, entre otros.
- Como representar a compradores distribución es teóricas de ajuste con una distribución empírica.
- Para efectuar inferencias estadísticas.

2.7.3 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

La bondad de ajuste es la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible interpolar y extrapolar información; en otras palabras, predecir el comportamiento de la variable en estudio.

Es por ello que una vez ajustada la función de Gumbel, se llevaron a cabo las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose como medidas de bondad el test de Kolmogorov – Smirnov.

2.73.1 .- TEST DE KOLMOGOROV – SMIRNOV

El test de Kolmogorov – Smirnov es una prueba no paramétrica que compara la frecuencia observada acumulada, con la frecuencia teórica acumulada y determina el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia, es decir, mide la desviación máxima de ambas frecuencias en la distribución.

De esta definición se desprende que es necesario determinar tanto la frecuencia observada acumulada, como la frecuencia teórica acumulada.

En el primer caso, para determinar la frecuencia observada acumulada de la serie, se ordenan los datos de menor a mayor y se trabaja con la probabilidad de excedencia asignada a cada valor de la muestra, cuya expresión más usada es la de Weibull:

$$F_{n(x)} = \frac{n}{N + 1} \quad (2.47)$$

Dónde:

$F_n(X)$ = frecuencia observada acumulada;

n = número de orden;

N = número total de datos.

Por otra parte, la frecuencia teórica acumulada se determina a través de la función de Gumbel, que fue indicada anteriormente.

Cuando han sido obtenidas ambas frecuencias, se selecciona el supremo de las diferencias entre ambas, en la n -ésima posición de orden, definido por la siguiente expresión:

$$Dc = \text{Max} \left\| F_{n(x)i} - F_{(x)i} \right\| \quad (2.48)$$

Dónde:

Dc = supremo de las diferencias entre la frecuencia observada y teórica acumulada;

$F_n(X)_i$ = frecuencia observada acumulada;

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

$$Dc_{\text{tabla}} = \frac{1.36}{\sqrt{N}} \quad (2.49)$$

Esta expresión que se encuentra en función del número de datos que tiene la muestra; se la utiliza para realizar la comparación para un nivel de significancia del 5%; es decir para una probabilidad del 95%.

Una vez obtenido el valor de D_c , se recurre a la tabla de valores críticos de D en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, con un tamaño de muestra “ n ” y asumiendo un 95% de confianza. Luego se decide si el ajuste es o no adecuado, considerando las siguientes afirmaciones:

- Si el valor D calculado $< D_{\text{tabla}}$, se acepta H_0 (H_0 : el ajuste es adecuado);
- Si el valor D calculado $> D_{\text{tabla}}$, se rechaza H_0 (H_a : el ajuste no es adecuado).

Luego de ajustar los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbell y de validarlos, a través de las pruebas de bondad de ajuste, se graficaron las respectivas intensidades y duraciones de precipitación, para cada uno de los períodos de retorno determinados y para cada una de las estaciones pluviométricas.

Los períodos de retorno a considerar en el presente investigación son son: $T = 5$ años, $T = 10$ años, $T = 20$ años, $T = 50$ años, $T = 100$ años, $T = 200$ años, $T = 500$ años y $T = 1000$ años.

3. PROCEDIMIENTO Y METODOLOGIA

A continuacion se describira detalladamente cada una de las fases metodologicas utilizadas para la realizacion de esta investigacion.

3.1 SELECCIÓN DE LA ESTACION PLUVIOGRAFICA

De toda las estaciones pluviométricas existentes en el departamento de Tarija, de ellas se hizo la selección de una estación pluviométrica y pluviográfica, la estación es La Merced que se encuentra en la comunidad del mismo nombre, en las coordenadas de Latitud Sur $22^{\circ} 01' 29''$ y Longitud Oeste $64^{\circ} 40' 36''$ a una altura de 1509 m.s.n.m.

Para la estación en estudio, se tomó como criterio que ambos sistemas de medicion de la altura de precipitacion (pluviometro y pluviografo), corresponden al mismo punto geografico y que corresponde relativamente al mismo periodo de registro de datos historicos. La estacion pluviométrica según la informacion de SENAMHI fue instalada el 1 de Mayo de 1999 y la estacion pluviografica fue instalada el el 18 de Noviembre del mismo año.

Sin embargo, en la estacion seleccionada se encontro que las bandas de los pluviógrafos presentaron registros defectuosos, pero al momento de seleccionar fue la que menos defectos presentaba. En aspecto a la magnitud de datos históricos solo se tiene 14 años hasta el momento de la investigacion, pero el primer y el último no son considerados por no tener registro de año completo de datos, el registro existente es escansa en comparacion a la recomendación que dan algunos autores, pero tambien otros autores hicieron investigación para pocos años de registro como Celis, citado por Eula (1993), construyo la curvas IDT para las ciudades de Concepcion-Talcahuano Chile en base a la informacion observados entre los años 1977 y 1983.

3.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA

Los datos pluviométricos e información necesaria para el desarrollo de esta investigación, fueron facilitados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

La institución facilitó las bandas del pluviógrafo y los datos pluviométricos entre ellas lluvias máximas, días con lluvia, las lluvias diarias registrado por el observador, las que se encuentran en el Anexo 1.

3.3 SELECCIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS

Desde la instalación del pluviómetro, hasta el año 2011 se registraron 759 días con lluvia en el pluviómetro que corresponde a 24 horas (08:00 AM a 08:00 AM), las mismas se pueden observar en la Anexo 1, del total de las lluvias diarias se ha seleccionado las 10 precipitaciones máximas de cada año de acuerdo al registro del pluviómetro. Ver anexo 3.

Además de los datos pluviométricos, se tiene las bandas del pluviógrafo (pluviograma), por la escasas de coincidencia de datos entre el pluviómetro pluviógrafo, se ha seleccionado los datos existentes en el pluviograma. Ver anexo 2

3.4 ÁLISIS DE CONSISTENCIA

Para observar la confiabilidad de los datos, se efectuará el análisis de consistencia, para ello se tomaron dos estaciones patrón, el Aeropuerto de Tarija y el Aeropuerto de Bermejo.

Haciendo análisis de consistencia con las dos estaciones, se pudo observar el grado de confiabilidad y proseguir con la investigación, los mismos e pueden ver en el capítulo IV figura 4.1 y figura 4.2

3.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTURA DE LLUVIA ENTRE EL PLUVIÓMETRO Y PLUVIÓGRAFO

Antes que se procediera con la investigación, en las fechas de las 10 máximas lluvias se realizo un análisis comparativo de altura de lluvias, Precipitación en 24 horas del registro del pluviómetro versus precipitación acumulada del pluviógrafo, tomando en cuenta en el mismo tiempo de 24 horas (08:00 AM a 08:00 AM).

Para el análisis, la hipótesis que se planteo es que la Precipitación en 24 horas en ambos instrumentos tenga la misma altura de lluvia. Se observo en el mismo varios casos, entre ellas:

- Las alturas de lluvias son iguales tanto en el pluviómetro como en el pluviógrafo
- Existen pequeñas variaciones uno respecto al otro, pero se los puede considerar aceptable
- El registro en el pluviógrafo las líneas no son visibles, que es difícil de hacer la comparación y verificación
- No existe registro en el pluviógrafo, porque no estaba en funcionamiento, por razones de fallas.
- La variación de altura de lluvia es muy dispersa, considerándola no aceptable.
- No existe las bandas de registro del pluviógrafo.

Tabla 3.1 Tabla tipo para la comparación de datos

Elaboración propia

1	2	3	4	5	6	7
#	Fecha	Pluviómetro	Pluviógrafo	# de tormentas	Grado de confiabilidad	Observaciones
		P Max (mm)	hp (mm)			
1						
2						

En la tabla 3.1 se resumen la comparación de los datos ver Anexo 4, cada columna corresponde a los siguientes:

- **Columna 1** Orden de altura de precipitación de mayor a menor de 1 al 10 de acuerdo a la información del pluviómetro
- **Columna 2** La fecha correspondiente al día de las precipitaciones máximas, obtenidas de lluvias diarias.
- **Columna 3** Se muestra las precipitaciones máximas registrados en el pluviómetro.
- **Columna 4** Altura de precipitación acumulada en 24 horas (08:00 a 08:00 Am) registrado en las bandas del pluviógrafo (pluviogramas)
- **Columna 5** Se observa el numero de tormentas producidos en el día de análisis.
- **Columna 6** Es el grado de confiabilidad que tiene dos parámetros aceptable/no aceptable, para determinar entre el parámetro respecto del otro que la diferencia de la lluvia caída y registrada en el pluviómetro varié en 10%,
- **Columna 7** Se describe las observaciones que se tenga en el análisis comparativo, visibilidad , falta de registro, etc.,.

En el análisis con las fechas seleccionadas desde el registro del pluviómetro se tiene una gran escases de los datos en las bandas del pluviógrafo, los mismos se deben a diferentes razones, fallas, error de lectura, por visibilidad, ver en capítulo 4 en apartado 4.3

Después del análisis comparativo, se llegó a la decisión de que en esta investigación se debe trabajar con lo que se tenga de registro, basados en las bandas del pluviógrafo. Ver Anexo 2 imagen de las bandas del pluviógrafo (pluviogramas) con las que se trabajó para el análisis de esta investigación.

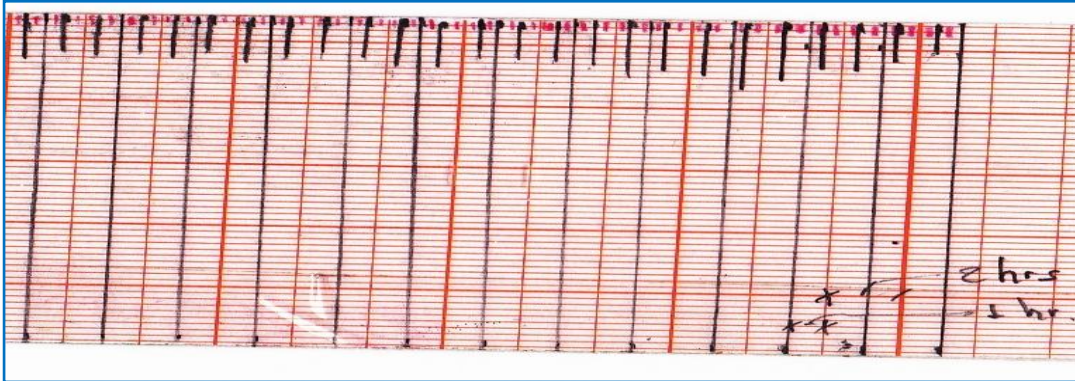
3.6 DETERMINACIÓN DE INTENSIDADES MÁXIMAS

3.6.1 OBTENCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS

Para determinar las intensidades máximas, se procedió a medir las alturas de precipitación de las tormentas seleccionadas de cada año, para un intervalo de cada 15 minutos.

Las bandas de los pluviógrafos (pluviograma) registran en intervalos de cada 2 horas, por lo tanto de las mismas bandas se elabora una regla, subdivido en 8 partes aproximadamente iguales, cada una de ellas corresponde a un intervalo de 15 min. Ver Figura 3.1

Figura 3.1 Regla elaborada para la medición de intervalos de tiempo
Elaboración propia



Para la obtención de las alturas de precipitación se prosigue de la siguiente manera:

- Con la ayuda de la regla elaborada se midió las alturas de precipitación cada 15 minutos, así se realizó para diferentes intervalos de 30, 45, 60, 90, 120, etc., de acuerdo a la duración de cada tormenta.
- Una vez realizada la lectura de la altura de precipitación del registro de las bandas del pluviógrafo, se selecciona las máximas alturas para cada intervalo de tiempo de cada una de las tormentas, y este mismo proceso se sigue para el total de las tormentas. Ver tablas de anexo 5
- Después de medir las máximas precipitaciones de las tormentas seleccionadas de cada año, se selecciona entre ellas la máxima para cada intervalo obteniéndose las máximas precipitaciones de cada año y este proceso se sigue para todos los años. Ver Tabla del anexo 5
- Una vez terminados los últimos pasos se tiene el resumen de las precipitaciones máximas de todos los años en estudio. Ver tablas de Anexo 5

3.6.2 INTENSIDAD MÁXIMA

Con la relación de:

$$i = \frac{P}{t} \quad (3.1)$$

Donde:

i = Intensidad (mm/h)

P = Altura de precipitación (mm)

t = Duración en horas

Se obtienen las intensidades máximas a partir de las precipitaciones máximas

3.7 CURVAS INTENSIDAD–DURACION–PERIODO DE RETORNO (I.D. T.)

3.7.1 FORMULA DE WEIBULL

Para el análisis de las frecuencias de tormentas, hacer lo siguiente:

- Del análisis de las tormentas caídas en el lugar, siguiendo el paso ya indicado, es decir para cada tormenta hallar la intensidad máxima, para las diferentes duraciones.
- Tabular los resultados en orden cronológico ya indicado, tomando la intensidad mayor de cada año para periodo de duración (15, 30, 45, 60, 90 y 120 min)
- Ordenar en forma decreciente e independiente del tiempo, los valores de las intensidades máximas correspondientes a cada uno de los periodos de duración. Para cada valor, calcular su periodo de retorno utilizando la formula de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (3.2)$$

Donde:

T = Periodo de retorno (años)

m = Numero de orden

n = Número total de observaciones

- Construir las curvas intensidad – duración – periodo de retorno (I-D-T)

3.7.2 DISTRIBUCIÓN DE LA LEY GUMBEL

Antes de generar las curvas IDF se debe realizar la prueba de bondad de ajuste para las diferentes duraciones para la diferente duración (15, 30, 45, 60, 90 y 120 min)

Una vez que se ajusten los datos aplicar la ley de la distribución Gumbel o valores extremos.

$$T = \frac{1}{1-P(X \geq x)} \quad (3.3)$$

Donde:

T = Periodo de retorno (años)

P(X ≥ x) = Probabilidad de excedencia (%)

De la ecuación 3.3 se despeja se tiene la siguiente ecuación:

$$P(X \geq x) = \frac{T}{1-T} = 1 - \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

Con la ecuación se obtiene la probabilidad de ocurrencia para el periodo de retorno deseado, en esta investigación para (T=5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000) años

Una vez determinada la probabilidad de ocurrencia, se aplica la siguiente función de probabilidad de valores extremos (Gumbel)

$$P(X \geq x) = F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.5 se extrae el valor de X y haciendo un cambio de variable, será en esta investigación igual a la intensidad que deseamos calcular para una duración y un periodo de retorno

$$X = I = \mu - \alpha * \text{Ln}(-\text{Ln}(P(X \geq x))) \quad (3.6)$$

Donde:

T = Periodo de retorno (años)

P (X≥x) = Probabilidad de excedencia (decimal o %)

F(x) = Función de distribución acumulada de la ley Gumbel

x = Variable independiente

μ = Valor central o moda Parámetro de posición (mm/h)

α = Parámetro de escala (mm/h)

Una vez obtenida las intensidades máximas para los diferentes periodos de retorno, se proseguirá a graficar las curvas IDT

3.7.3 DISTRIBUCION DE LA LEY LOG-NORMAL

Antes de generar las curvas IDT se debe realizar la prueba de bondad de ajuste para las diferentes duraciones para la diferente duración (15, 30, 45, 60, 90 y 120 min), al igual que la distribución Gumbel de la siguiente manera:

- Ordenar los datos estadísticamente, para cada una de las duraciones
- Calcular la media y la desviación estándar de cada una de las duraciones:

$$\begin{aligned} \text{Media} \quad \bar{X} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ \text{Desviacion} \quad S_x &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \end{aligned}$$

Donde:

\bar{X} = Media

N = Numero de observaciones

x_i = Observación x

- A partir de la media y Desviación estándar estimar los parámetros para la distribución log-normal
- Si se ajusta al ley log-normal

Para asociar el registro de datos histórico con un periodo de retorno se sigue el siguiente procedimiento.

- Ecuación para estimar el periodo de retorno en función de probabilidad de ocurrencia

$$T = \frac{1}{1-P(X \geq x)} \quad (3.6)$$

- De la ecuación anterior se despeja la probabilidad de ocurrencia $P(x)$ y se tiene la siguiente ecuación:

$$P(X \geq x) = \frac{T}{1-T} = 1 - \frac{1}{T} \quad (3.7)$$

Donde:

T = Periodo de retorno (años)

$P(X \geq x)$ = Probabilidad de excedencia (%)

- En la ecuación 3.7 se calcula la probabilidad para el periodo de retorno deseado, en este estudio para 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, además de ello para un periodo de retorno de 6.5 y 13 Años, esto para hacer una comparación con la formula de Weibull.
- Una vez obtenida la probabilidad se debe aplicar la siguiente ecuación:
Variable reducida de la función distribución de la ley log-normal

$$Z = \frac{Y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{\ln X - \mu_y}{\sigma_y} \quad (3.8)$$

Donde:

Z = Variable reducida o estandarizada de la ley log-normal

X = Variable independiente

$Y = \ln x$

μ_y = Parámetro de localización (mm/h)

σ_y = Parámetro de escala (mm/h)

- Pero aplicar la variable reducida o estandarizada Z, utilizara las tablas de la ley normal para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia. Ver anexo 6
- Una vez obtenida Z, despejar de la ecuación 3.8 la variable aleatoria X que será para esta investigación $X = I$ (mm/h) la intensidad a estimarse para los diferentes periodos de retorno y las diferentes duraciones.
- Tabular las intensidades asociadas a un periodo de retorno

3.8 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CURVAS I.D.F.

3.8.1 LEYES PROBABILÍSTICAS VERSUS LA FORMULA DE WEIBULL

Las formulas de periodo de retorno en la formula de Weibull está en función de la cantidad de años de registro histórico, en esta investigación según Weibull el máximo periodo de retorno que se puede obtener es $T = 13$ años y menores a ellos pero nunca mayores.

La ley Gumbel está recomendado y comprobado por diversos autores que se puede aplicar para valores extremos.

En este caso con base a Weibull, también se debe generar para Gumbel y Log-Normal el mismo periodo para hacer la respectiva comparación de intensidades y el R^2

3.8.2 LEY GUMBEL VERSUS LE LEY LOG-NORMAL

Se va a generar curvas I.D.T. para ambas leyes los mismo periodos de retorno para hacer, la misma comparación, que en el anterior y verificar cual es la variación de intensidades.

3.9 ESTIMACION DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO PRECIPITACION

En ocasiones no es suficiente el dato de (por ejemplo) la precipitación máxima para una duración más lluviosa con un periodo de retorno cualquiera. Es necesario conocer la evolución de de la precipitación máxima a lo largo de la duración de la lluvia.

En algunos países existen catálogos de aguaceros en lo que se facilita la forma del hietograma, que se puede adaptar a la cantidad de precipitación concreta. Como no se dispone en nuestro medio, más concreto para nuestra estación en estudio, en esta investigación elaboramos hietogramas de diseño de precipitación.

Este hietograma de diseño reflejara la distribución de las precipitaciones producidas a lo largo de las horas lluviosas que se pueden producir en ese punto con un periodo de retorno. Para esta investigación se elaborara hietogramas para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años y para duraciones de 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos.

Para esto existen varios procedimientos, varios de ellos se basan principalmente en las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno descritos anteriormente

Elegimos la curva Intensidad – Duración correspondiente al periodo de retorno deseado, en esta investigación se seguirá el siguiente orden de los periodos de retorno 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años. Para mayor facilidad se utilizarán las ecuaciones que reflejan las curvas IDT de los diferentes periodos de retorno.

3.9.1 APLICACIÓN DE LOS METODOS

De los diferentes métodos planteados en el Sección 2.2.7 para esta investigación se ha seleccionado los siguientes métodos:

3.9.1.1 BLOQUES ALTERNOS

La razón principal de la selección del método de bloques alternos, es que se basa en las curvas intensidad-duración-frecuencia.

Para ello seguimos los siguientes pasos:

- Elegimos la curva Intensidad-Duración correspondiente al periodo de retorno deseado, en esta caso para $T = 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$ y 1000 años.
- La intensidad se puede obtener gráficamente de las curvas Intensidad, pero también se puede obtener a partir de una ecuación dada para cada curva de Intensidad-Duración.
- En esta estudio se estimaran las intensidades a partir de la ecuación de cada curva Intensidad – Duración correspondiente a los periodos de retorno mencionados
- Para confeccionar un hietograma de una tormenta de una duración, lo que se debe hacer es repartir en intervalos de tiempo deseado de acuerdo a la duración de la tormenta.
- En esta investigación se toma como un parámetro de duración de una tormenta de 15 a 120 min.
- Para ser mas especifico se estimará una tormenta de diseño para duraciones de 1 hora (60 min) y 2 horas (120 min).
- Para 1 hora en seis intervalos de cada 10 min
- Para duración de 2 horas en 8 intervalos de 15 min
- Este proceso repetirá para cada periodo de retorno
- Graficar los hietogramas para duración de 1 hr y 2 hrs. para los diferentes periodos de retorno.

3.9.1.2 MÉTODO DE THOLIN – KEIFER

Para desarrollar el método de Tholin - Keifer se siguen los siguientes pasos:

- Para las diferentes duraciones de tormenta 15, 30, 45, 60, 90 y 120 min se calcula los parámetros estadísticos de valores discretos de la lluvia, que son la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales integran la curva masa de precipitación estimada para la estación en estudio.
- En la etapa siguiente, con los resultados se procedió a determinar la curva masa y la curva media del porcentaje de lluvia acumulada contra porcentaje de duración de la tormenta, es decir define la curva dimensional, cuyos valores varían entre 0 y 100 %, para las variables de la altura de lluvia y la duración correspondiente.
- Ahora bien para la estación en estudio se determina un hietograma de diseño para 10 intervalos constantes, utilizando la curva masa acumulada de precipitación - duración e la para tal efecto se procede a realizar la discretización de los 10 intervalos constantes en el proceso descrito
- Con el apoyo de los valores extremos de la tabla 4.23 se construye una distribución viable del hietograma de diseño de precipitación. La figura 4.14 muestra el resultado y de su análisis se desprende que las barras señalan el porcentaje de lluvia que ocurre durante cada uno de los intervalos de tiempo asociados a la duración de la tormenta.
- Finalmente para ilustra la aplicación del proceso descrito, se calcula el hietograma de la lluvia de diseño, para la estación en estudio, para una tormenta de duración de 60 y 120 min, cuya altura de precipitación es obtenida de la curva o ecuación de intensidades para los diferentes periodos de retorno.

3.9.1.3 MÉTODO DE LA CURVA ALTURA DE PRECIPITACIÓN – DURACIÓN

Para desarrollar este método se prosigue de la siguiente manera:

- Es determinar la curva masa, pero como ha sido desarrollado en el método Tholin-Keifer.
- Por su parte, el método es desarrollado para áreas reducidas cuyos valores no sobrepasen los 25 km², en esta investigación se un análisis de una tormenta puntual.
- La altura de precipitación a ser evaluada serán las misma que el método Tholin-Keifer
- Para ello plantea factores de ajuste:
 - Factor de ajuste asociado a cortas duraciones (F1)

$$F_1 = 0.27 + 2.11d - 1.52d^2 + 0.37d^3$$

Donde:

F₁ = factor de ajuste asociado a cortas duraciones

d = duración de la tormenta en horas.

- Factor de ajuste por periodo de retorno

$$F_2 = 0.583 + 0.26Ln(T)$$

Donde:

F₂ = factor de ajuste asociado por periodo de retorno

T = Periodo de retorno (años)

La expresión matemática tiene una limitante, válida para valores del periodo de retorno comprendidos entre 1 y 100 años

- Factor de reducción por área, una de las expresiones matemáticas que se ha desarrollado para cuencas del oeste de los estados unidos, tiene la forma siguiente:

$$FRA = 1 - \exp(-1.1d^{0.25}) + \exp(-1.1d^{0.25} - 0.01A)$$

Donde

FRA = es el factor de reducción por área

d = es la duración de la tormenta en horas

A = es la magnitud del área en análisis, en km²

En el caso específico de la cuenca del valle de México (Breña, 1996) se utilizó un método combinado de áreas fijas y tormentas centradas. Se muestra en la tabla

Tabla 3.2 FRA para diferentes duraciones y porciones de área
Fuente Breña 1996

Duración	Area, en km ²						
	0	10	50	100	200	500	1000
5 min	1.00	0.86	0.67	0.58	0.42	0.20	0.11
15 min	1.00	0.88	0.69	0.59	0.44	0.24	0.15
1 h	1.00	0.90	0.70	0.60	0.47	0.28	0.20
2 h	1.00	0.91	0.71	0.61	0.48	0.31	0.23
4 h	1.00	0.92	0.72	0.62	0.49	0.33	0.26
8 h	1.00	0.93	0.73	0.63	0.51	0.35	0.28
12 h	1.00	0.94	0.74	0.64	0.52	0.36	0.30
24 h	1.00	0.97	0.75	0.65	0.53	0.38	0.33
1 mes	1.00	0.98	0.93	0.88	0.82	0.71	0.61
1 año	1.00	0.99	0.95	0.91	0.87	0.79	0.71

Podemos concluir que para cuencas de $A = 0 \text{ km}^2$, $FRA = 1$ que sería el caso de esta investigación.

Los factores de ajuste de periodo d retorno y por área son constantes para todos, simplemente hay que calcular el factor de ajuste por duración.

En este caso se tomara una duración a 2 horas, para comparación con los otros métodos.

Una vez definida los factores se calcula la nueva altura de precipitación, máxima asociado a los factores con la expresión:

$$P_{A-d-T} = h_T * F_1 * F_2 * FRA$$

Donde

FRA = es el factor de reducción por área (adim)

F₁ = factor de ajuste asociado a cortas duraciones (adim)

F₂ = factor de ajuste asociado por periodo de retorno (adim)

h_T = Altura de lluvia para T años (mm)

P_{A-d-T} = Precipitación obtenida por el método (mm)

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

4.1 LLUVIAS MÁXIMAS DEL PLUVIÓMETRO

De los datos pluviométricos, se obtuvieron las 10 lluvias máximas, cada una con las fechas correspondientes. (Ver tablas del Anexo 3)

Tabla 4.1 Las 10 precipitaciones máximas del año 2000,
según el registro del pluviómetro

Fuente: Elaboración propia

Año 2000		
#	P (mm)	Fecha de lluvia
1	82,5	25 de Enero
2	58,5	26 de Enero
3	42,5	16 de Octubre
4	40,0	4 de Marzo
5	40,0	18 de Enero
6	38,0	5 de Marzo
7	37,0	22 de Marzo
8	29,5	8 de Marzo
9	27,5	14 de Enero
10	26,0	29 Diciembre

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE REGISTROS

En el análisis comparativo entre el registro del pluviómetro y el registro del pluviógrafo se tienen varios casos. Ver tabla 4.2

Tabla 4.2 Tablas de comparación entre el registro de datos entre el pluviómetro y pluviógrafo (Año 2000)

#	Fecha	Pluviómetro	Pluviógrafo	# de Tormentas	Grado de confiabilidad	Observaciones
		P max (mm)	hp (mm)			
1	25 de Enero	82,5	78,9	2	Aceptable	Debido a que en estos días se produjeron lluvias por dos días continuos
2	26 de Enero	58,5	58,5	1	Aceptable	Igual en altura y producidos en una sola tormenta
3	16 de Octubre	42,5				No existe registro
4	4 de Marzo	40,0	29,3	1	No aceptable	Las lluvias se registraron el día 4 de marzo en pluviómetro y en pluviógrafo corresponde al día 5 de marzo
5	18 de Enero	40,0	49	2	No aceptable	La diferencia es de 9 mm, se descartará el dato del pluviómetro
6	5 de Marzo	38,0	37,8		Aceptable	La lluvia de este día corresponde al día 6 de marzo según las bandas, y no así al día 5 como está registrado en el pluviómetro.
7	22 de Marzo	37,0	38,9	1	Aceptable	No existe mucha variación, y corresponde al día.
8	8 de Marzo	29,5	29,5	2	Aceptable	Se confunde al lectura en la hora 20:00 a 22:00 y se tiene dos tormentas de larga duración y otras de corta duración o baja intensidad
9	14 de Enero	27,5	27,3	2	Aceptable	La diferencia es de 0.02 mm
10	29 de Diciembre	26,0	28,1	1	Aceptable	Existe una diferencia de 2.1 mm

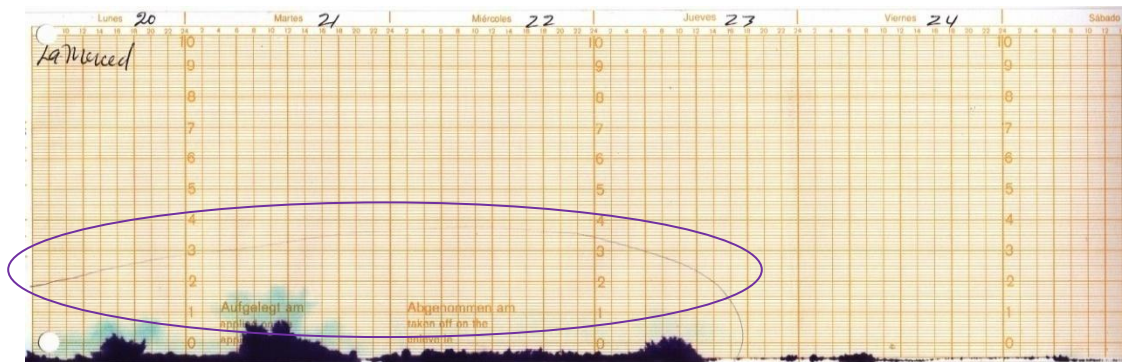
- **Columna 1** Orden de altura de precipitación de mayor a menor de 1 al 10 de acuerdo a la información del pluviómetro
 - **Columna 2** La fecha correspondiente al día de las precipitaciones máximas, obtenidas de lluvias diarias.
 - **Columna 3** Se muestra las precipitaciones máximas registrados en el pluviómetro.
 - **Columna 4** Altura de precipitación acumulada en 24 horas (08:00 a 08:00 Am) registrado en las bandas del pluviógrafo (pluviogramas)
 - **Columna 5** Se observa el numero de tormentas producidos en el día de análisis.
 - **Columna 6** Es el grado de confiabilidad que tiene dos parámetros aceptable/no aceptable, para determinar entre el parámetro respecto del otro que la diferencia de la lluvia caída y registrada en el pluviómetro varíe en 10%,
- Columna 7** Se describe las observaciones que se tenga en el análisis comparativo, visibilidad , falta de registro, etc.,.

Para ver los datos comparativos de los años que falta. (Ver anexo 4)

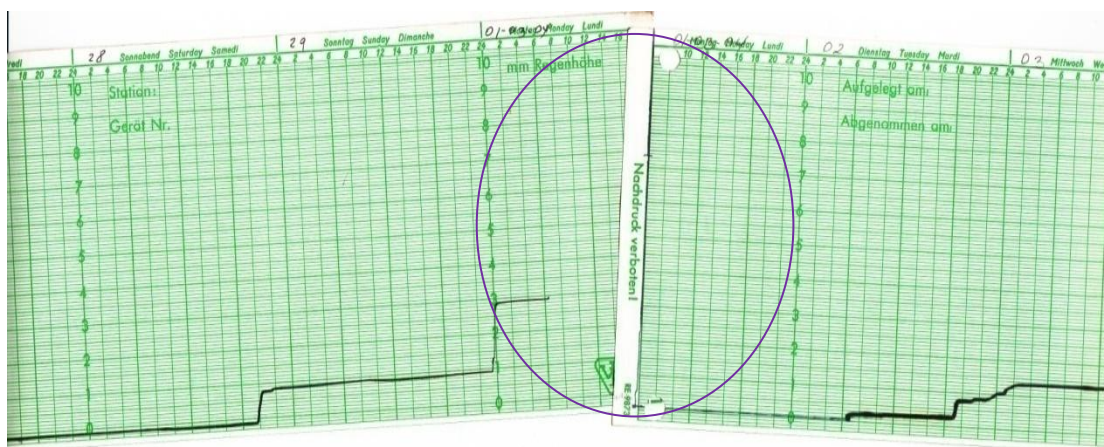
4.3 FALLAS EN LAS BANDAS DE LOS PLUVIÓGRAFOS

Las fallas principales que se presentaron al momento de realizar el análisis, en la no coincidencia de datos son las siguientes:

- **Falla por tinta.-** Un mal funcionamiento o mala manipulación de la tinta, ya que las bandas trabajan para registrar con tinta



- **Cambio de pluviograma.-** En el cambio de hoja de una semana a otra también fue otra falla que encontramos



- **No coinciden los datos.-** En la siguiente comparación se puede observar, que existe un error en el registro en el pluviómetro.



Tabla
ALTURA DE PRECIPITACION DIARIA (mm)

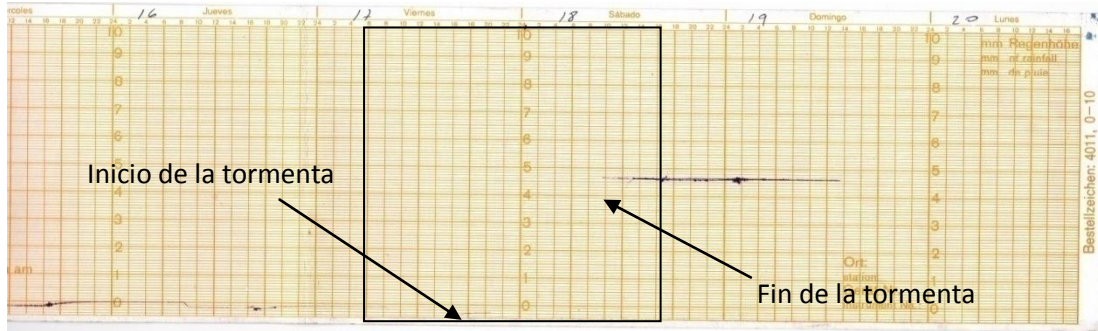
Estación: LA MERCED
Provincia: ARCE
Departamento: TARIJA

Año 2002

Lat. S.: 22° 01' 29"
Long. W.: 64° 40' 36"
Altura: 1,509 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Total
1	2,5	21,5											
2		25,0										2,0	
3	4,5									17,5	1,0	6,5	
4	4,0	53,5											
5	4,5	2,5								7,0			
6		1,0	5,0										
7													
8	32,5			4,0								0,5	
9	0,5	11,0		1,0						4,5			
10		11,5								14,0			
11			22,5	3,5									
12			10,0	0,5						0,5			
13		1,0	1,0										
14	1,5	3,0								20,0			
15	0,5	5,0											
16										11,0			
17													
18		4,5	14,5									2,0	
19		4,0	10,0								10,5		
20		0,5	69,0							38,0	4,0		
21	4,0		11,0	1,5									
22				0,2									
23													
24	1,0									9,0			
25													
26	15,0	1,0								4,0			
27	0,5		4,0	1,5						12,0	20,5		
28		30,0								7,0		50,5	
29													
30			8,0										
31	37,5												
SUMA	108,5	175,0	155,0	12,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	144,5	36,0	61,5	692,7
MED.													
MAX.	37,5	53,5	69,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0	20,5	50,5	69,0
MIN.	0,5	0,5	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0
OBSERVACIONES													

- **Falla por visibilidad.-** Es otro tipo de problema común que atravesamos, por falta de visibilidad, la siguiente imagen corresponde al día 18 de marzo de 2006 y según el pluviómetro es la de máxima precipitación del año.



ALTURA DE PRECIPITACION DIARIA (mm)

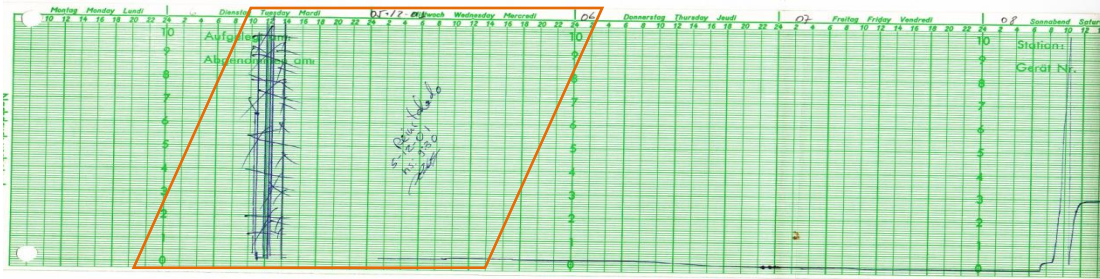
Estación: LA MERCED
Provincia: ARCE
Departamento: TARIJA

Año 2006

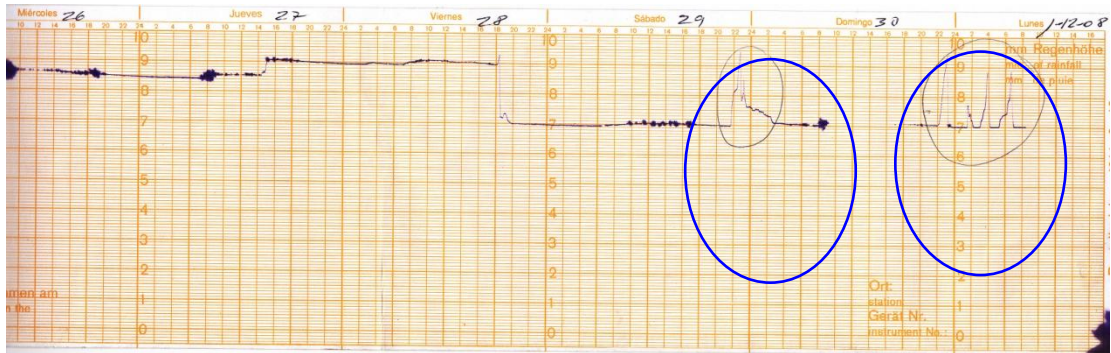
Lat. S.: 22° 01' 29"
Long. W.: 64° 40' 36"
Altura: 1,509 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Total
1					1,0						1,5		
2				1,2									
3			1,2	9,0	1,5								
4													
5		19,0		8,0							1,0		
6												6,3	
7		10,0		0,5							1,0	1,0	
8				0,7								13,0	
9		6,0									2,0		
10		11,0	20,5									15,5	
11	23,0	1,2											
12	1,5	3,5	1,0									0,5	
13	15,7	17,5	2,5									0,3	
14	5,0	10,0		1,5								1,0	
15		11,5											
16	3,0									15,5			
17	30,0												
18	15,5		60,0										
19			23,0								8,5	1,0	
20		2,0											
21	3,5		6,0							6,5			
22	13,5		1,3							2,5			
23	1,5	4,0	24,0										
24		5,5									10,0		
25	7,0		23,0										
26	31,0		3,0									4,0	
27											1,0	4,8	
28											5,0		
29			8,7							1,0			
30	13,5									1,3		10,0	
31													
SUMA	163,7	101,2	174,2	20,9	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	26,8	40,0	57,4	586,7
MED.													
MAX.	31,0	19,0	60,0	9,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	15,5	11,0	15,5	60,0
MIN.	1,5	1,2	1,0	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,3	0,0
OBSERVACIONES													

- **Falla por falta de funcionamiento.-** Una de las fallas principales y más comunes, fue la reinstalación no a tiempo.



- **Falla técnica.-** La siguiente falla que se observa no es muy común pero también se presentó en esta investigación.



4.4 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

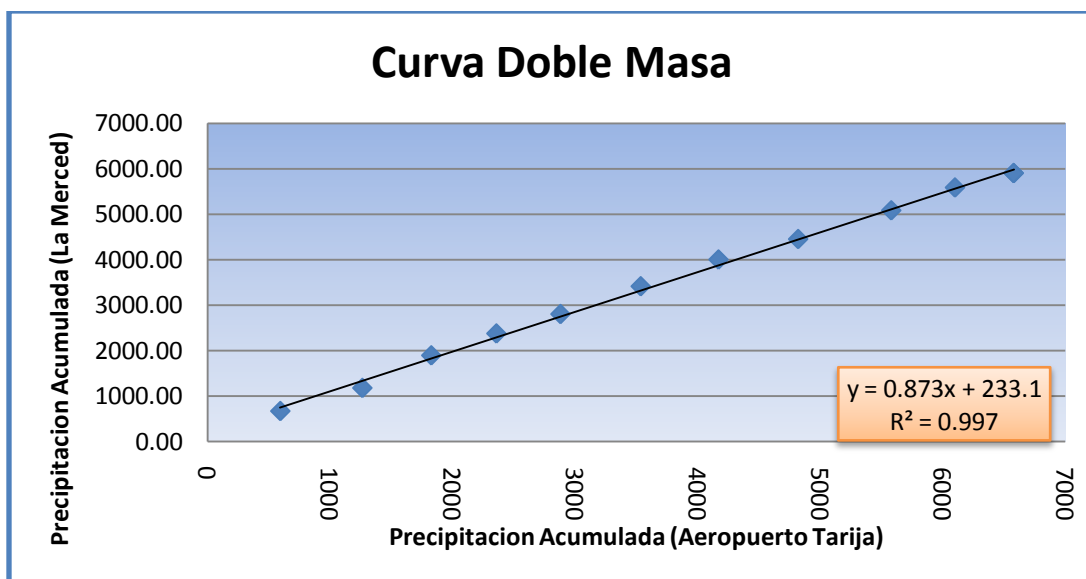
Los datos de la estación en estudio son confiables verificados con dos estaciones, la estación de Aeropuerto Tarija y aeropuerto Bermejo

La Meced versus Aeropuerto de Tarija

Tabla 4.3 Análisis de conciencia La Meced versus Aeropuerto de Tarija

Año	La Merced		Aeropuerto Tarija	
	Precipitación	Prec. Acum	Precipitación	Prec. Acum
2000	664,70	664,70	593,40	593,40
2001	508,60	1173,30	669,80	1263,20
2002	716,20	1889,50	562,70	1825,90
2003	481,50	2371,00	531,60	2357,50
2004	427,50	2798,50	523,20	2880,70
2005	611,00	3409,50	655,10	3535,80
2006	588,10	3997,60	634,90	4170,70
2007	450,80	4448,40	650,40	4821,10
2008	631,10	5079,50	760,20	5581,30
2009	502,80	5582,30	520,20	6101,50
2010	317,40	5899,70	479,20	6580,70
2011	458,36	5899,70		6580,70

Figura 4.1 Curva Doble másica La merced Vs Aeropuerto

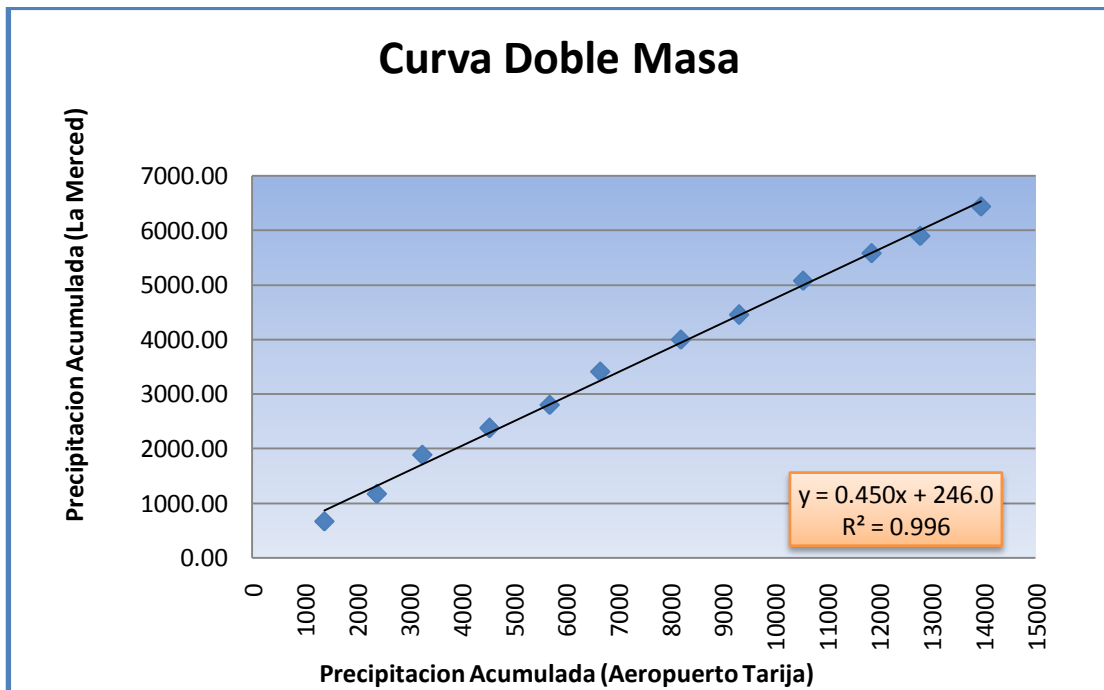


La Meced versus Aeropuerto de Bermejo

Tabla 4.4 Análisis de conciencia La Meced versus Aeropuerto de Bermejo

Año	La Merced		Aeropuerto Bermejo	
	Precipitación	Prec. Acum	Precipitación	Prec. Acum
2000	664,70	664,70	1379,50	1379,50
2001	508,60	1173,30	1005,70	2385,20
2002	716,20	1889,50	873,50	3258,70
2003	481,50	2371,00	1284,60	4543,30
2004	427,50	2798,50	1151,30	5694,60
2005	611,00	3409,50	967,00	6661,60
2006	588,10	3997,60	1550,20	8211,80
2007	450,80	4448,40	1118,50	9330,30
2008	631,10	5079,50	1217,60	10547,90
2009	502,80	5582,30	1318,50	11866,40
2010	317,40	5899,70	928,90	12795,30
2011	536,34	6436,04	1163,21	13958,51

Figura 4.2 Curva Doble másica La merced Vs Aeropuerto Bermejo



4.5 OBTENCIÓN DE LA ALTURA DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA

Se presenta a continuación la siguiente tabla correspondiente a una tormenta, de obtención de las alturas de precipitación. Ver Anexo 5

Tabla 4.5 Obtención de precipitación máxima correspondiente al 7 de Dic. 2005

Elaboración Propia

Tiempo acumulado (min)	15 (min)	30 (min)	45 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	180 (min)
15	0,7						
30	0,6	1,3					
45	0,6		1,9				
60	0,5	1,1		2,4			
75	0,3						
90	0,5	0,8	1,3		3,2		
105	0,3						
120	0,7	1,0		1,8		4,2	
135	1,0		2,0				
150	0,7	1,7					
165	0,5						
180	0,6	1,1	1,8	2,8	3,8		7,0
195	0,7						
h max (mm)	1,00	1,70	2,00	2,80	3,80	4,20	7,00

Después de obtener las precipitaciones máximas de cada tormenta, para cada intervalo, se tiene el resumen de precipitaciones máximas de toda las tormentas correspondientes a cada año. Se muestra a continuación la tabla 4.5 correspondiente al año 2005. (Ver Anexo 5) el resumen de todos los años en análisis

Tabla 4.6 Resumen de precipitaciones máximas del año 2005

# de Tormentas	hd max (mm)					
	15	30	45	60	90	120
1,00	3,50	4,10	5,00	8,10	9,60	
2,00	2,50	3,70	5,00	5,80		
3,00	1,20	2,00	3,20	2,80	4,80	3,70
4,00	8,00	9,50	10,20	12,70	14,90	15,40
5,00	1,80	2,90	3,10	4,80	6,10	7,20
6,00	3,20	6,20	8,70	8,90	9,30	
7,00	4,00	5,10	8,10	10,10	14,90	
8,00	1,00	1,70	2,00	2,80	3,80	4,20
9,00	8,00	14,00	15,00	23,00	27,00	38,00
10,00	7,00	12,50	16,80	20,80	27,50	33,50
h max (mm)	8,00	14,00	16,80	23,00	27,50	38,00

En la última fila de la tabla 4.5 se observa las precipitaciones máximas para cada intervalo de las 10 tormentas analizadas.

Nota: La duración de cada tormenta es variable, existen mayores a dos horas y menores a dos horas, pero sin embargo la que se repite con mayor frecuencia es una tormenta con duración de 2 horas, por lo tanto en la investigación se tiene el análisis de las tormentas de diseño para 120 min (2 horas).

Con las precipitaciones máximas de cada año se elabora el resumen de precipitaciones máximas de todo los años, el mismo se muestra en la siguiente tabla 4.6.

Tabla 4.6 Resumen de precipitaciones máximas.

AÑO	hd max (mm)					
	15	30	45	60	90	120
2000	10,00	13,50	19,50	23,50	32,50	29,70
2001	8,00	13,00	11,00	15,00	21,00	22,90
2002	17,20	29,20	37,30	37,40	44,00	46,20
2003	3,70	5,70	8,20	9,50	11,50	13,20
2004	15,30	13,20	14,20	15,50	11,50	16,00
2005	8,00	14,00	16,80	23,00	27,50	38,00
2006	6,00	7,80	9,00	8,80	14,60	12,40
2007	4,20	6,90	9,60	9,70	16,60	16,40
2008	4,20	5,20	7,00	8,00	3,70	7,00
2009	18,00	35,00	51,00	19,00	10,10	11,10
2010	7,20	8,90	6,70	9,20	11,60	10,00
2011	20,00	27,00	47,00	29,80	56,80	24,10

4.6 INTENSIDADES MÁXIMAS

Con la relación de:

$$I = \frac{P}{t} \left(\frac{mm}{hr} \right) \quad (4.1)$$

Como la precipitación esta en milímetros y el tiempo tenemos en minutos, para la conversión de unidades la ecuación queda de la siguiente manera:

$$I = \frac{P*60}{t} \left(\frac{mm}{hr} \right) \quad (4.2)$$

Donde:

- I = Intensidad (m/h)
- P = Precipitación (mm)
- t = tiempo (h)

Aplicando la ecuación 4.2 se tiene las intensidades máximas para todos los años, en la siguiente tabla que se muestra a continuación.

Tabla 4.7 Intensidades máximas

AÑO	Int max (mm/h)					
	15	30	45	60	90	120
2000	40,00	27,00	26,00	23,50	21,67	14,85
2001	32,00	26,00	14,67	15,00	14,00	11,45
2002	68,80	58,40	49,73	37,40	29,33	23,10
2003	14,80	11,40	10,93	9,50	7,67	6,60
2004	61,20	26,40	18,93	15,50	7,67	8,00
2005	32,00	28,00	22,40	23,00	18,33	19,00
2006	24,00	15,60	12,00	8,80	9,73	6,20
2007	16,80	13,80	12,80	9,70	11,07	8,20
2008	16,80	10,40	9,33	8,00	2,47	3,50
2009	72,00	70,00	68,00	19,00	6,73	5,55
2010	28,80	17,80	8,93	9,20	7,73	5,00
2011	80,00	54,00	62,67	29,80	37,87	12,05

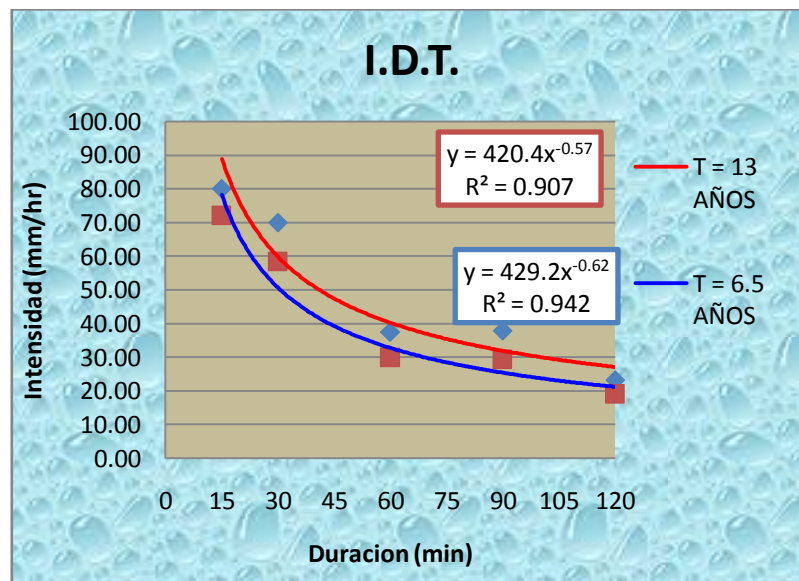
4.7 CURVAS I.D.T. PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

4.7.1 CURVAS I.D.T. UTILIZANDO LA FORMULA DE WEIBULL

Tabla 4.8 Aplicación de la Formula de Weibull para determinar T

m	T = n+1/m	Intensidad para (mm/h) diferentes duraciones					
		15	30	45	60	90	120
1	13,00	80,00	70,00	68,00	37,40	37,87	23,10
2	6,50	72,00	58,40	62,67	29,80	29,33	19,00
3	4,33	68,80	54,00	49,73	23,50	21,67	14,85
4	3,25	61,20	28,00	26,00	23,00	18,33	12,05
5	2,60	40,00	27,00	22,40	19,00	14,00	11,45
6	2,17	32,00	26,40	18,93	15,50	11,07	8,20
7	1,86	32,00	26,00	14,67	15,00	9,73	8,00
8	1,63	28,80	17,80	12,80	9,70	7,73	6,60
9	1,44	24,00	15,60	12,00	9,50	7,67	6,20
10	1,30	16,80	13,80	10,93	9,20	7,67	5,55
11	1,18	16,80	11,40	9,33	8,80	6,73	5,00
12	1,08	14,80	10,40	8,93	8,00	2,47	3,50

Figura 4.3 Curvas IDT aplicando Weibull



Haciendo un análisis de la determinación del periodo de retorno por método de Weibull, no puede obtenerse periodos de retorno mayores a 14 años. Siendo necesario recurrir a probabilidades, demás el R^2 es menor a 0.90

4.7.2 APLICANDO LA LEY DE GUMBEL

4.7.2.1 PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE POR SMIRNOV KOLMOGOROV

Tabla 4.10 Prueba de Bondad de ajuste de Smirnov Kolmogorov para la distribución Gumbel para duración a 45 min

m	Imax	Imax (Orden)	P(X)	Z=(X-μ)/α	F(Z)	Δ=(P(X)-F(Z))
1	26,00	8,93	0,0769	-0,4685	0,2024	0,1255
2	14,67	9,33	0,1538	-0,4445	0,2102	0,0563
3	49,73	10,93	0,2308	-0,3486	0,2424	0,0117
4	10,93	12,00	0,3077	-0,2846	0,2647	0,0430
5	18,93	12,80	0,3846	-0,2366	0,2817	0,1029
6	22,40	14,67	0,4615	-0,1247	0,3221	0,1394
7	12,00	18,93	0,5385	0,1312	0,4160	0,1225
8	12,80	22,40	0,6154	0,3391	0,4904	0,1249
9	9,33	26,00	0,6923	0,5549	0,5632	0,1291
10	68,00	49,73	0,7692	1,9782	0,8708	0,1016
11	8,93	62,67	0,8462	2,7537	0,9383	0,0921
12	62,67	68,00	0,9231	3,0736	0,9548	0,0317

Xm =	26.37
Sx =	21.38

$\mu = X_m - 0.45 * S_x =$	16.75
$\alpha = 0.78 * S_x =$	16.68

Delta $\Delta_{max} =$ **0.1394** \leq Δ_o **0.393**

Los Datos se Ajustan a la Ley Gumbell $\ddot{}$

Para todas las duraciones los datos se ajustan a la distribución Gumbel, Ver Anexo 7

4.7.2.2 Intensidades aplicando la distribución de la ley Gumbel

Aplicando la siguiente ecuación de Probabilidad, se obtiene la probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno asumidos

$$F_{(x)} = P(X \geq x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

T (AÑOS)	F(z)
5	0,800
6,5	0,846
10	0,900
13	0,923
20	0,950
50	0,980
100	0,990
200	0,995
500	0,998
1000	0,999

Gumbel es una ley exponencial de Valores extremos

$$P(X) = F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (4.4)$$

Parámetros para las diferentes duraciones de la tormenta:

Duración	α	μ
15	18,397	29,986
30	15,552	20,927
45	16,676	16,746
60	7,383	13,107
90	8,185	9,800
120	4,714	7,572

De la ecuación de 4.4 despejando X se tiene:

$$X = I = \mu - \alpha * Ln(-Ln(P(X \geq x))) \quad (4.5)$$

Donde:

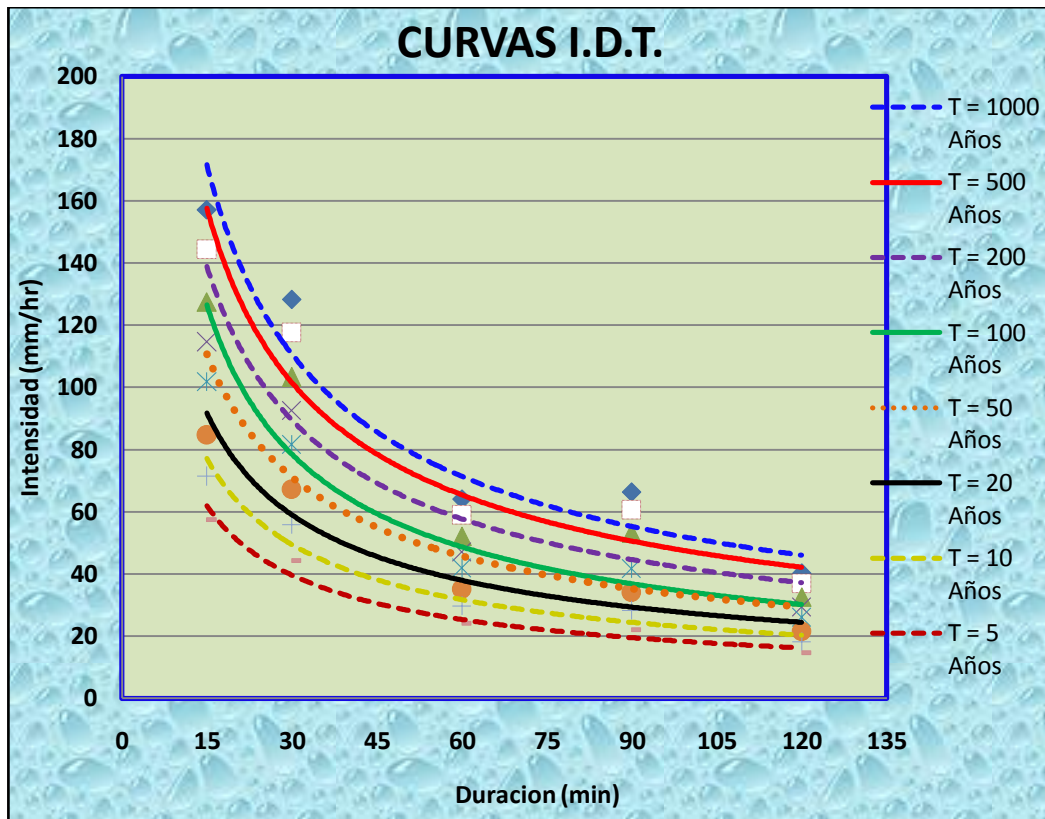
- T = Periodo de retorno (años)
- P (X≥x) = Probabilidad teórica de ocurrencia (decimal o %)
- F(x) = Función de distribución acumulada de la de la ley Gumbel
- X = Variable independiente
- μ = Valor central o moda Parámetro de posición (mm/h)
- α = Parámetro de escala (mm/h)

Con la ecuación se obtiene la siguiente tabla de intensidades asociados para diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.11 Intensidades para diferentes periodos de retorno

T (Años)	I (mm/h) Para diferentes duraciones					
	15	30	45	60	90	120
5	57,581	44,255	41,76	24,18	22,08	14,64
6,5	62,907	48,757	46,59	26,32	24,45	16,01
10	71,387	55,926	54,27	29,72	28,22	18,18
13	76,443	60,200	58,86	31,75	30,47	19,48
20	84,630	67,121	66,28	35,04	34,11	21,57
50	101,772	81,612	81,81	41,91	41,74	25,96
100	114,617	92,471	93,46	47,07	47,45	29,26
200	127,415	103,290	105,06	52,21	53,14	32,53
500	144,300	117,564	120,36	58,98	60,66	36,86
1000	157,062	128,352	131,93	64,10	66,33	40,13

Figura 4.4 Curvas IDT para diferentes periodos de retorno, aplicando la distribución Gumbel



Las siguientes ecuaciones que se muestran se obtienen de la regresión, es de tendencia potencial, que solo pueden aplicarse para los periodos de retorno mencionados y está en función de variables de Intensidad y duración de la tormenta;

La tendencia potencial es igual

$$Y = a.X^b \quad (4.6)$$

Haciendo un cambio de variable:

Y = Intensidad (mm/hr)

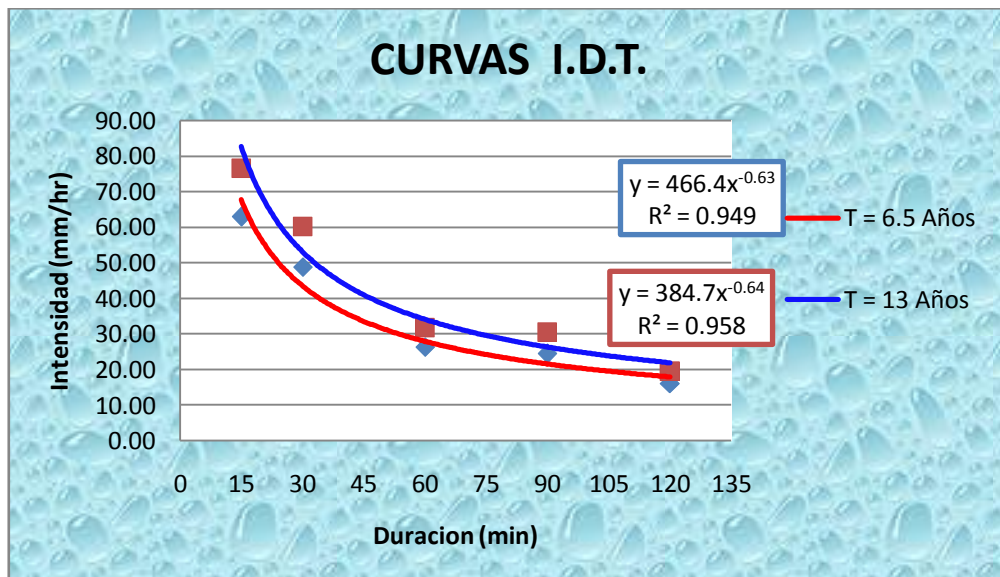
X = Duración (min)

a y b = Son constantes que se obtienen de la tendencia para cada periodo de retorno

Tabla 4.12 Tabla de ecuación para diferentes periodos de retorno, la ley Gumbel

Periodo de Retorno		
T (años)	Ecuación Para T (años)	R ²
5	$I_{T=5} = 352.7d^{-0.64}$	0.963
10	$I_{T=10} = 435.9d^{-0.63}$	0.952
20	$I_{T=20} = 515.8d^{-0.63}$	0.944
50	$I_{T=50} = 619.3d^{-0.63}$	0.937
100	$I_{T=100} = 815.7d^{-0.68}$	0.967
200	$I_{T=200} = 774.2 d^{-0.63}$	0.930
500	$I_{T=500} = 876.2 d^{-0.63}$	0.926
1000	$I_{T=1000} = 953.3 d^{-0.63}$	0.924

Figura 4.5 Curva I.D.T. para T = 6.5 y 13 Años para la Ley Gumbel



4.7.3 CURVAS I.D.T. APLICANDO LA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL DE 2 PARÁMETROS

4.7.3.1 PRUEBE DE BONDAD DE AJUSTE POR SMIRNOV KOLMOGOROV

Tabla 4.13 Prueba de Bondad de ajuste de Smirnov Kolmogorov para la distribución Gumbel para duración a 15

n	I max	max (Orden	LN(I max)	MEDIA (μ)	DESVST(σ)	P(X)	Z=(X- μ)/ σ	F(Z)	$\Delta=(P(X)-F(Z)$
1	40,00	14,80	2,6946	3,56	0,54	0,0769	-1,6017	0,0546	0,0223
2	32,00	16,80	2,8214	3,56	0,54	0,1538	-1,3667	0,0859	0,0680
3	68,80	16,80	2,8214	3,56	0,54	0,2308	-1,3667	0,0859	0,1449
4	14,80	24,00	3,1781	3,56	0,54	0,3077	-0,7053	0,2403	0,0674
5	61,20	28,80	3,3604	3,56	0,54	0,3846	-0,3672	0,3568	0,0279
6	32,00	32,00	3,4657	3,56	0,54	0,4615	-0,1718	0,4318	0,0297
7	24,00	32,00	3,4657	3,56	0,54	0,5385	-0,1718	0,4318	0,1067
8	16,80	40,00	3,6889	3,56	0,54	0,6154	0,2420	0,5956	0,0198
9	16,80	61,20	4,1141	3,56	0,54	0,6923	1,0306	0,8486	0,1563
10	72,00	68,80	4,2312	3,56	0,54	0,7692	1,2477	0,8939	0,1247
11	28,80	72,00	4,2767	3,56	0,54	0,8462	1,3320	0,9086	0,0624
12	80,00	80,00	4,3820	3,56	0,54	0,9231	1,5274	0,9367	0,0136

Parametros de le Log-Normal de dos parametros

$$\begin{aligned} \text{MEDIA (X)} &= 40,60 & C_v &= 0,5809 & \mu_y &= 3,5584 \\ \text{DESVIACION(Sx)} &= 23,5864 & \sigma_y &= 0,5393 & C_s &= 1,9304 \end{aligned}$$

$$\text{Delta } \Delta_{\text{max}} = 0,1563 \leq 0,3926 \Delta_0$$

Se Ajusta a la Ley Log Nomal ;;

Para las diferentes duraciones (15, 30, 45, 60, 90 y 120) min se ajustan a la ley de la distribución Log-Normal. Ver Anexo 8

4.7.3.2 Intensidades aplicando la distribución de la Ley Log-Normal

Aplicando la siguiente ecuación de Probabilidad, se obtiene la probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno asumidos

$$F_{(z)} = P(X \geq x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (4.7)$$

Tabla 4.14 Áreas bajo la curva normal

T (AÑOS)	F(z)	Z
5	0,800	0,85
6,5	0,846	1,02
10	0,900	1,29
13	0,923	1,43
20	0,950	1,65
50	0,980	2,06
100	0,990	2,330
200	0,995	2,58
500	0,998	2,88
1000	0,999	3,5

Z: Se obtiene de las tablas de áreas acumuladas para la ley normal, se redondea al número inmediato superior para evitar las iteraciones.

La distribución presenta la variable reducida:

$$Z = \frac{Y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{\text{Ln}X - \mu_y}{\sigma_y} \quad (4.8)$$

PARAMETROS PARA LA DISTRIBUICION LOG-NORMAL

Tabla 4.15 Parámetros de la ley log-normal

Duración	μ_y	σ_y
15	3,558	0,539
30	3,214	0,607
45	3,019	0,711
60	2,725	0,510
90	2,466	0,648
120	2,183	0,544

De la ecuación de 4.4 despejando X se tiene:

$$X = I = e^{(Z\sigma_y + \mu_y)} \quad (4.10)$$

Donde:

- T = Periodo de retorno (años)
- P (X≥x) = Probabilidad teórica de ocurrencia
- Z = Variable reducida
- X = Variable independiente
- μ_y = Parámetro de localización (mm/hr)
- σ_y = Parámetro de escala (mm/hr)

Con la ecuación se obtiene la siguiente tabla de intensidades asociados para diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.16 Intensidades para diferentes periodos de retorno, ley log-normal

T (Años)	I (mm/h) Para diferentes duraciones					
	15	30	45	60	90	120
5	55,52	41,66	37,47	23,52	20,42	20,42
6,5	60,85	46,18	42,29	25,65	22,80	22,80
10	70,39	54,40	51,24	29,44	27,16	27,16
13	75,91	59,22	56,60	31,62	29,74	29,74
20	85,47	67,67	66,18	35,37	34,30	34,30
50	106,62	86,78	88,57	43,60	44,74	44,74
100	123,33	102,22	107,31	50,04	53,29	53,29
200	141,13	118,96	128,18	56,84	62,67	62,67
500	165,91	142,70	158,64	66,24	76,12	76,12
1000	231,78	207,85	246,50	90,88	113,76	113,76

Figura 4.6 Curvas IDF para diferentes periodos de retorno, aplicando la distribución Log-Normal

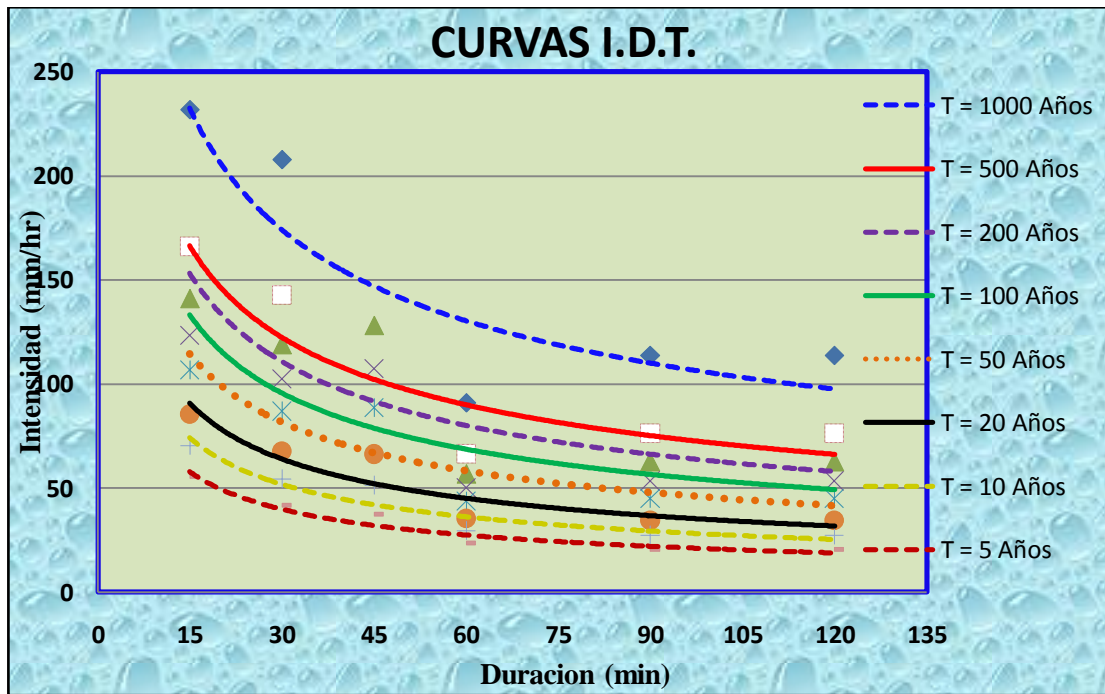
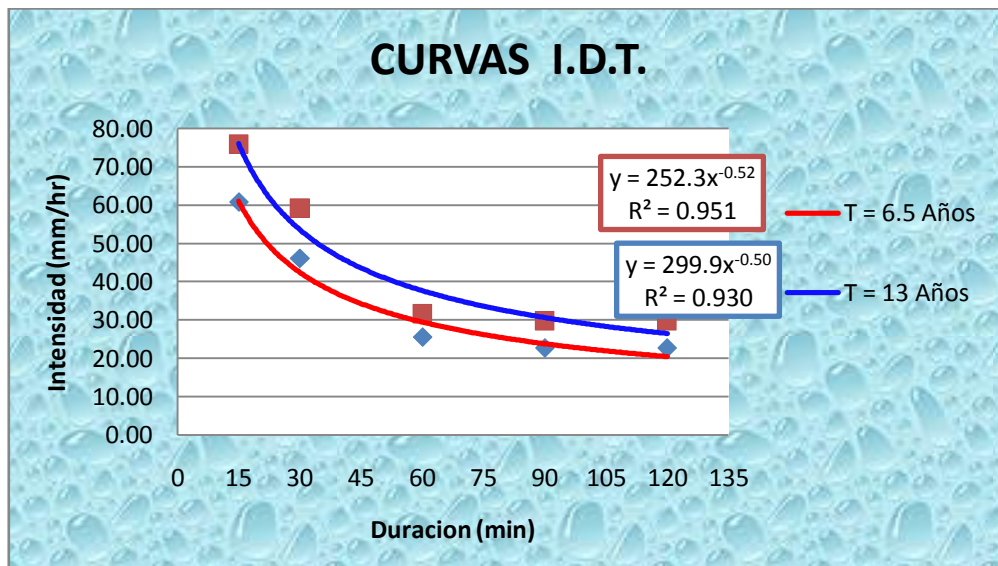


Tabla 4.17 ecuación para diferentes periodos de retorno, de la distribución Log-Normal

Periodo de Retorno		
T (años)	Ecuación Para T (años)	R ²
5	$I_{T=5} = 352.7d^{-0.64}$	0.963
10	$I_{T=10} = 435.9d^{-0.63}$	0.952
20	$I_{T=20} = 515.8d^{-0.63}$	0.944
50	$I_{T=50} = 619.3d^{-0.63}$	0.937
100	$I_{T=100} = 815.7d^{-0.68}$	0.967
200	$I_{T=200} = 774.2 d^{-0.63}$	0.930
500	$I_{T=500} = 553.3 d^{-0.44}$	0.803
1000	$I_{T=1000} = 718.9 d^{-0.41}$	0.727

Figura 4.7 Curva I.D..T para T = 6.5 y 13 Años para Log-Normal



4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS I.D.T.

4.8.1 LEYES PROBABILÍSTICAS VERSUS FORMULA DE WEIBULL

- R^2

	T = 6,5 Años			T = 13 Años		
	Weibull	Gumbel	Log Normal	Weibull	Gumbel	Log Normal
R^2	0,942	0,958	0,951	0,907	0,949	0,930

El valor de R^2 de mayor correlación próxima a 1 en ambos casos es el de la Ley Gumbel o valores extremos

Ecuaciones e intensidades

Para	T = 6.5 Años	T = 13 Años
Weibull	$Y = 429.2X^{-0.62}$	$Y = 420.4X^{-0.57}$
Gumbel	$Y = 384.7X^{-0.64}$	$Y = 466.4X^{-0.63}$
Log-Normal	$Y = 252.3X^{-0.52}$	$Y = 299.9X^{-0.50}$

Haciendo un cambio de variable:

$$Y = I \text{ (mm/h) } \quad \text{y} \quad X = d \text{ (min)}$$

Donde:

I = Intensidad (mm/h)

d = Duración (min)

Para	T = 6.5 Años	T = 13 Años
Weibull	$I_{T=6.5} = 429.2d^{-0.62}$	$I_{T=13} = 420.4d^{-0.57}$
Gumbel	$I_{T=6.5} = 384.7d^{-0.64}$	$I_{T=13} = 466.4d^{-0.63}$
Log-Normal	$I_{T=6.5} = 252.3d^{-0.52}$	$I_{T=13} = 299.9d^{-0.50}$

Con las ecuaciones se obtiene la siguiente tabla comparativa de intensidades

Tabla 18 Intensidad para T=6.5 y T=13 Años aplicando las ecuaciones

Duración (min)	T = 6,5 Años			T = 13 Años		
	Weibull	Gumbel	Log Normal	Weibull	Gumbel	Log Normal
15	80,07	67,99	61,71	89,80	99,63	77,43
30	52,10	43,63	43,03	60,49	67,11	54,75
45	40,52	33,66	34,85	48,01	53,26	44,71
60	33,90	28,00	30,01	40,75	45,21	38,72
90	26,37	21,60	24,31	32,34	35,88	31,61
120	22,06	17,97	20,93	27,45	30,45	27,38

El que tiene mayor intensidad entre Weibull, Log-Normal y Gumbel es el de Gumbel.

4.8.2 LEY LOG-NORMAL VERSUS LEY GUMBEL

- R^2

Tabla 4.19 Comparación de Curvas IDF Gumbel versus Log-Normal

Ley	R^2 para T (Años)							
	5	10	20	50	100	200	500	1000
Gumbel	0,963	0,952	0,944	0,937	0,967	0,93	0,926	0,924
Log-Normal	0,963	0,952	0,944	0,937	0,967	0,93	0,803	0,727

Se puede observar entre la tabla 4.16 y 4.17 de las ecuaciones para la ley Log-Normal y Ley Gumbel para duraciones de 5 a 500 de los Periodos de retorno planteados son iguales de la misma manera la correlación R^2 .

Para un periodo de retorno de 500 y 1000 años en la distribución Log-Normal es muy distinto al de Gumbel, el primero se aleja de 1 y Gumbel tiende a 1.0

Para la estimación de las tormentas de diseño después del análisis, se tomara en cuenta únicamente las curvas I.D.F. de la distribución Gumbel, porque tiene mayor correlación y es el que más se adecua para precipitaciones máximas según diferentes autores y lo podemos también constatar para la estación en estudio.

4.9 HIETOGRAMAS DE DISEÑO DE PRECIPITACION

4.9.1 MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS

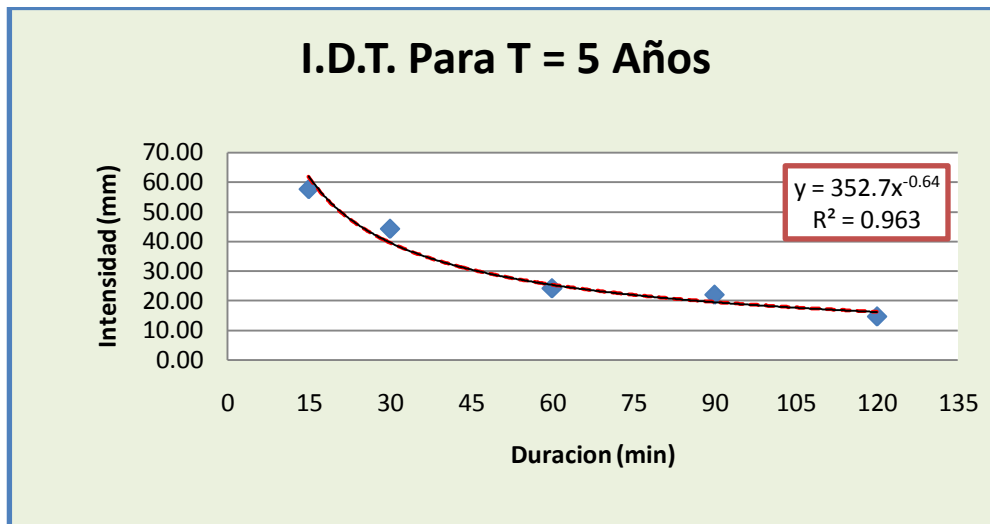
Hietograma para periodo de retorno de 5 Años

La curva y la ecuación de intensidad para diferentes duraciones se observan a continuación:

Tabla 4.20 Intensidad para T = 5 años

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuación		
	15	30	45	60	90	120	R ²	a	b
5	57,58	44,26	41,76	24,18	22,08	14,64	0,963	352,7	0,64

Figura 4.8 Curva I.D.F. de la ley Gumbel para T = 5 años



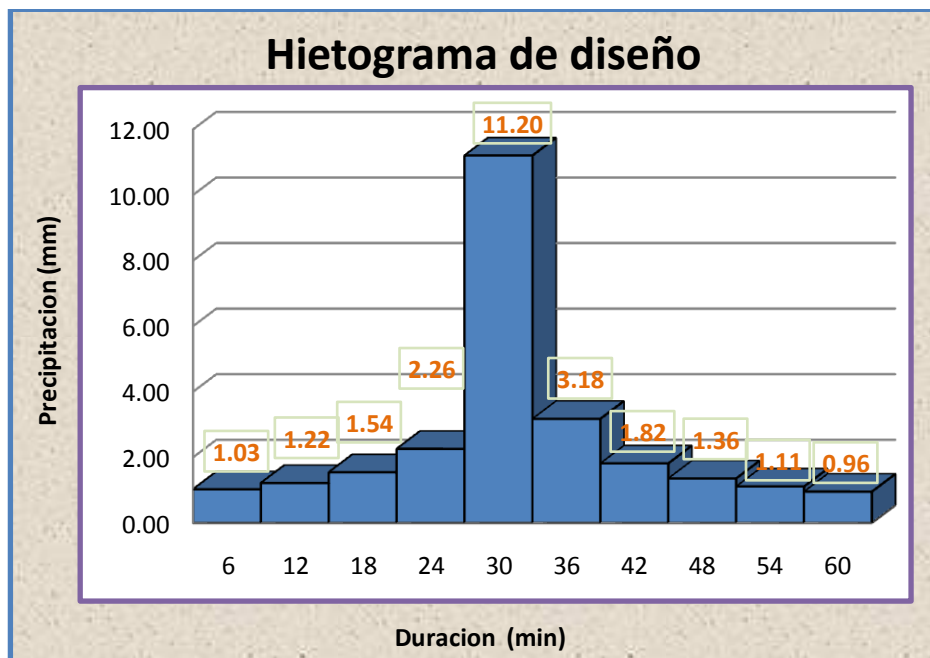
D (min) 60 Duración de la tormenta en minutos

Δt 6 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

Tabla 4.21 Para generar hietogramas de diseño de precipitación por el método de bloques alternos

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Ordenando
6	112,04	11,20	11,20	1,03
12	71,90	14,38	3,18	1,22
18	55,47	16,64	2,26	1,54
24	46,14	18,46	1,82	2,26
30	40,00	20,00	1,54	11,20
36	35,59	21,36	1,36	3,18
42	32,25	22,57	1,22	1,82
48	29,61	23,69	1,11	1,36
54	27,46	24,71	1,03	1,11
60	25,67	25,67	0,96	0,96

Figura 4.9 Hietograma de diseño de precipitación para T = 5 años y d = 60 min



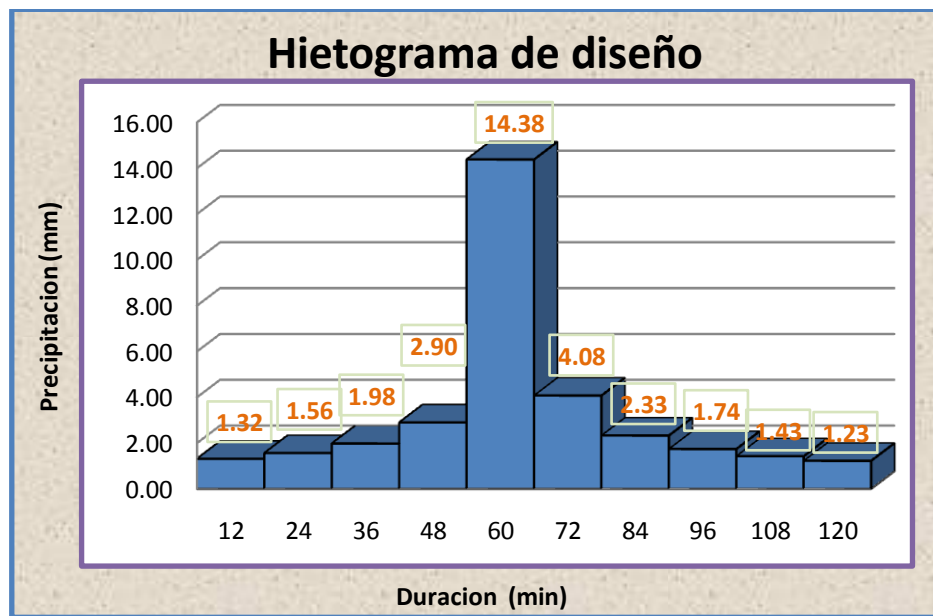
De la misma ecuación de la curva I.D.T. para periodo de retorno igual a 5 años para una duración de 120 min el hietograma de diseño de diseño es la siguiente:

D (min)	120	Duración de la tormenta en minutos
---------	-----	------------------------------------

Δt	12	Intervalo de tiempo
------------	----	---------------------

$$\Delta t = \frac{D}{10}$$

Figura 4.10 Hietograma de diseño de precipitación para T = 5 años y d = 120 min



Este mismo procedimiento se repite para cada uno de los periodos de retorno, para una duración de la tormenta de dos horas únicamente, para hacer las respectivas comparaciones.

A continuación se describe de cómo utilizar la hoja de cálculo, cada uno de los pasos y observaciones.

Guia para aplicar la hoja de calculo

- 1.- Utilizar la hoja de calculo solo para los periodos de retorno planteados (5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000) años
- 2.- Tomar la curva I. D. T. de los valores extremos o ley Gumbel, para el periodo de retorno deseado.
- 3.- Introducir la duracion de la tormenta , para el tiempo que se desea calcular, en diseños el tiempo de concentracion. Con excepcion que debe tratarse de duraciones menores a 2 horas.
- 4.- Calcula el tiempo en 10 intervalos
- 5.- Tabla de calculo:
 - * Columna 1 intervalos de tiempo
 - * Columna 2.- Intensidad calculada con la ecuacion o obtenid a partir de las curvas.
 - * Columna 3.- Calculo de la presicpitacion $P = I*d$ (mm)
 - * Columna 4.- Variacion de precipitacion de intervalo de tiempo
 - * Columna 5.- altura de precipitacion ordenado par la grafica de bloques alternos.

6.- Grafica de hietograma de precipitacion

Nota

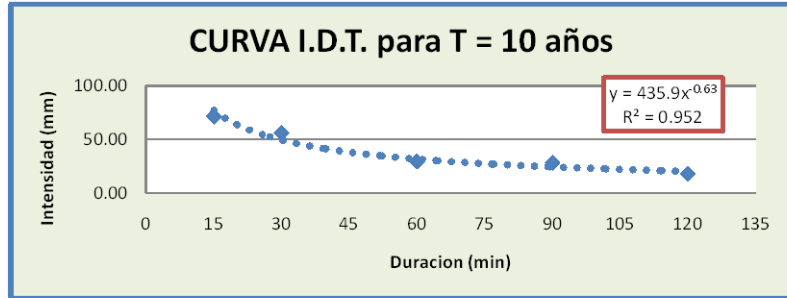
- a). El metodo plantea 10 intervalos de tiempo, esto es indiferente y esta en funcion del proyectista que puede ser mas o menos, pero por recomendaciones y aplicaciones del metodo por difrerentes autores tambien se tomo el mismo criterio y con el fin de que pueda servir para hacer comparaciones con otros metodos.
- b). El metodo es aplicable para cortas duraciones, menores a 2 horas y no asi para lluvias 24 horas
- c). Para un periodo de retorno distinto a lo planteado debe aplicar, nueva ecuacion a parti del metodo ley de Gumbel.

HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
10	71.39	0.62	55.93	29.72	28.22	18.18	0.952	435.9	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

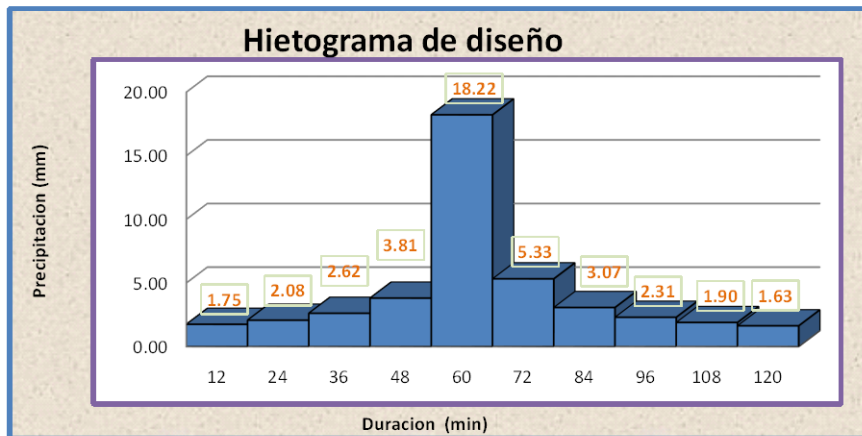
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	91.10	18.22	18.22	1.75
24	58.86	23.55	5.33	2.08
36	45.59	27.36	3.81	2.62
48	38.04	30.43	3.07	3.81
60	33.05	33.05	2.62	18.22
72	29.46	35.35	2.31	5.33
84	26.74	37.43	2.08	3.07
96	24.58	39.33	1.90	2.31
108	22.82	41.08	1.75	1.90
120	21.36	42.71	1.63	1.63

5.-

6.-

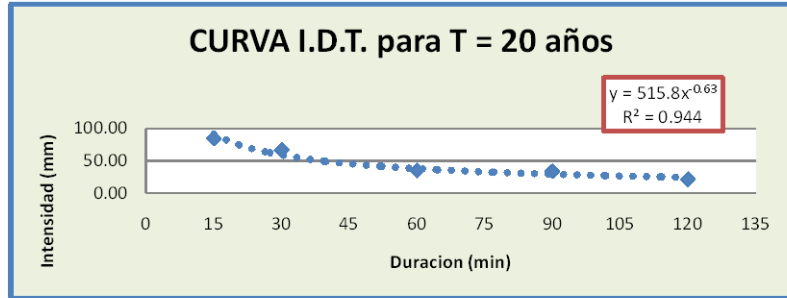


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 20 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
20	84.63	67.12	66.28	35.04	34.11	21.57	0.944	515.8	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

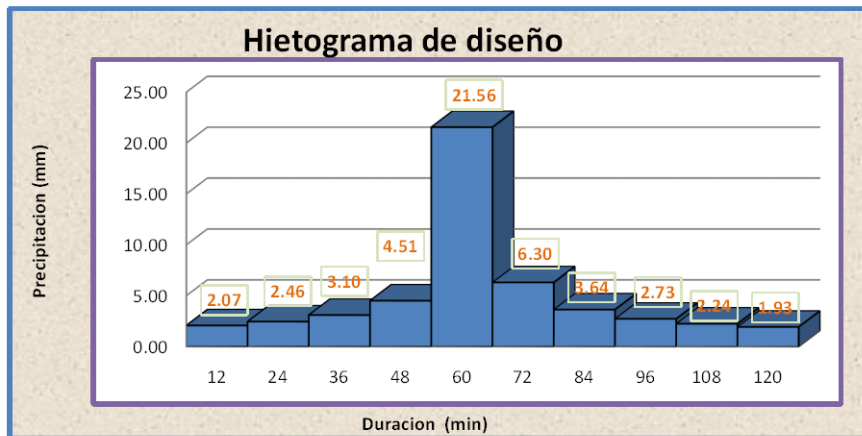
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	107.79	21.56	21.56	2.07
24	69.65	27.86	6.30	2.46
36	53.95	32.37	4.51	3.10
48	45.01	36.01	3.64	4.51
60	39.11	39.11	3.10	21.56
72	34.86	41.84	2.73	6.30
84	31.64	44.29	2.46	3.64
96	29.08	46.53	2.24	2.73
108	27.00	48.61	2.07	2.24
120	25.27	50.54	1.93	1.93

6.-

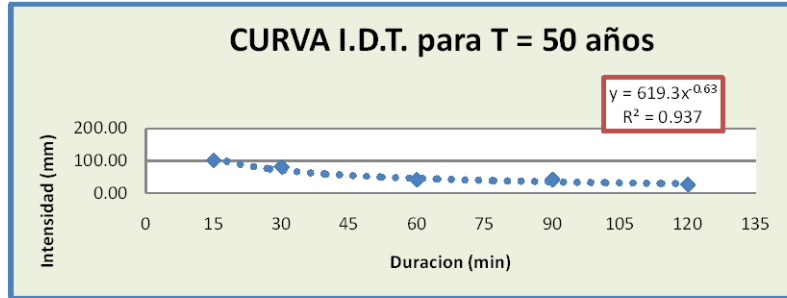


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
50	101.77	81.61	81.81	41.91	41.74	25.96	0.937	619.3	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

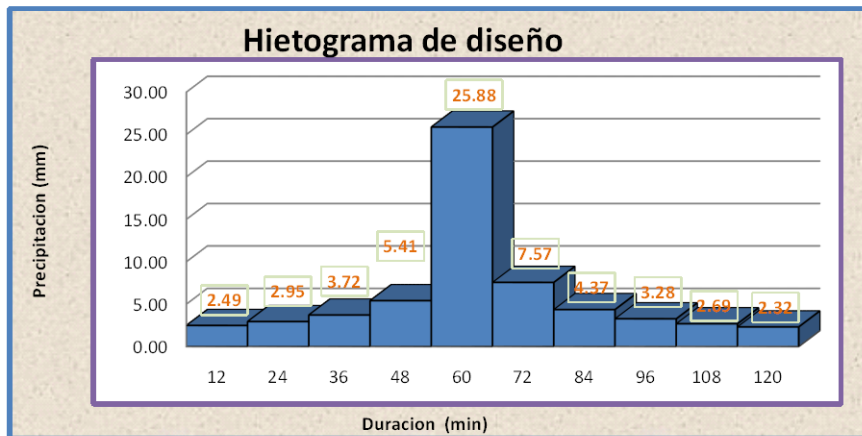
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	129.42	25.88	25.88	2.49
24	83.63	33.45	7.57	2.95
36	64.78	38.87	5.41	3.72
48	54.04	43.23	4.37	5.41
60	46.95	46.95	3.72	25.88
72	41.86	50.23	3.28	7.57
84	37.98	53.18	2.95	4.37
96	34.92	55.87	2.69	3.28
108	32.42	58.36	2.49	2.69
120	30.34	60.68	2.32	2.32

6.-

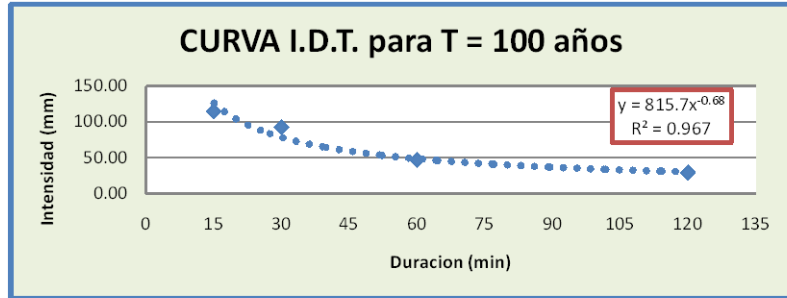


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
100	114.62	92.47	93.46	47.07	47.45	29.26	0.967	815.7	-0.68

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

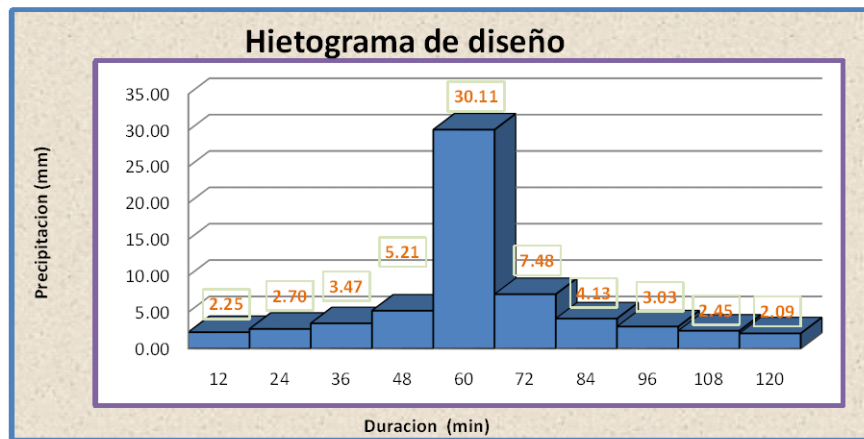
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	150.55	30.11	30.11	2.25
24	93.97	37.59	7.48	2.70
36	71.33	42.80	5.21	3.47
48	58.65	46.92	4.13	5.21
60	50.40	50.40	3.47	30.11
72	44.52	53.42	3.03	7.48
84	40.09	56.12	2.70	4.13
96	36.61	58.57	2.45	3.03
108	33.79	60.82	2.25	2.45
120	31.45	62.91	2.09	2.09

6.-

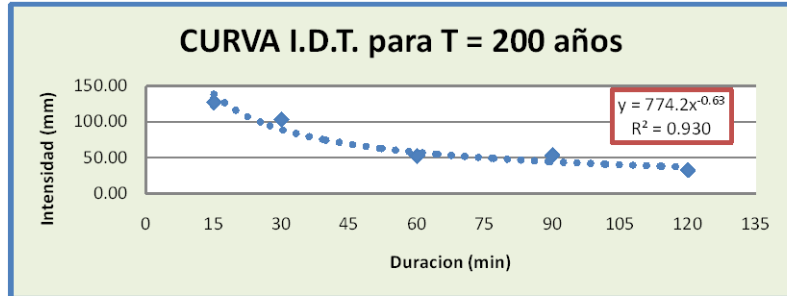


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 200 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
200	127.42	103.29	105.06	52.21	53.14	32.53	0.93	774.2	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

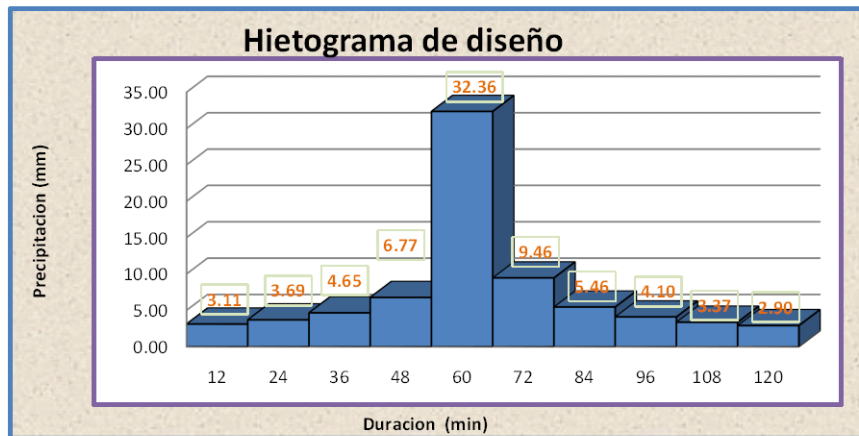
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	161.80	32.36	32.36	3.11
24	104.55	41.82	9.46	3.69
36	80.98	48.59	6.77	4.65
48	67.56	54.05	5.46	6.77
60	58.70	58.70	4.65	32.36
72	52.33	62.79	4.10	9.46
84	47.49	66.48	3.69	5.46
96	43.65	69.85	3.37	4.10
108	40.53	72.96	3.11	3.37
120	37.93	75.86	2.90	2.90

6.-

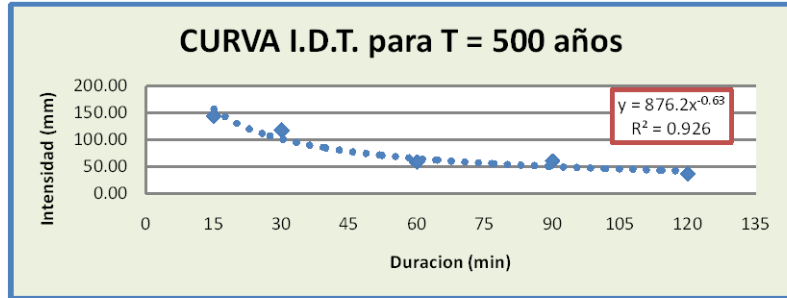


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
500	144.30	117.56	120.36	58.98	60.66	36.86	0.926	876.2	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

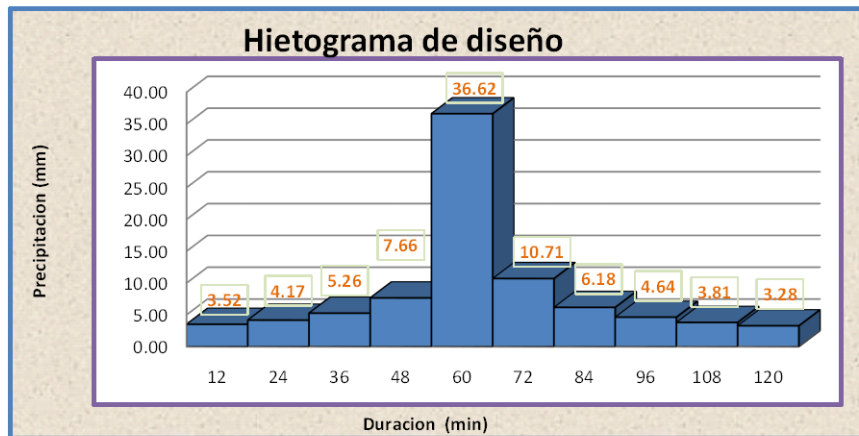
4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	183.11	36.62	36.62	3.52
24	118.32	47.33	10.71	4.17
36	91.65	54.99	7.66	5.26
48	76.46	61.17	6.18	7.66
60	66.43	66.43	5.26	36.62
72	59.22	71.07	4.64	10.71
84	53.74	75.24	4.17	6.18
96	49.41	79.05	3.81	4.64
108	45.87	82.57	3.52	3.81
120	42.93	85.85	3.28	3.28

6.-

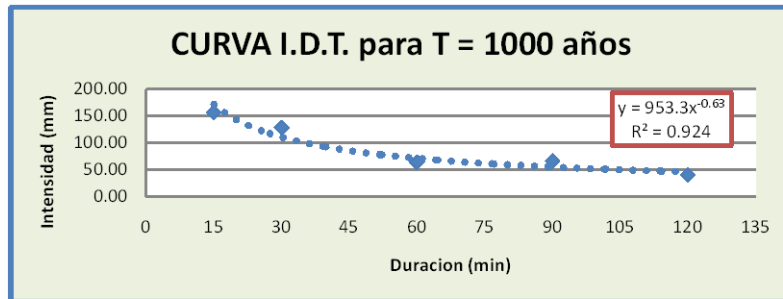


HIETOGRAMAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 1000 AÑOS

1.-

T (Años)	Intensidad para diferentes duraciones (mm)						Ecuacion		
	15	30	45	60	90	120	R2	a	b
1000	157.06	128.35	131.93	64.10	66.33	40.13	0.924	953.3	-0.63

2.-



3.-

D (min) 120 Duracion de la tormenta en minutos

4.-

Dt 12 Intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{D}{10}$

5.-

d (min)	I (mm/h)	P (mm)	D P	Ordenando
12	199.23	39.85	39.85	3.83
24	128.73	51.49	11.65	4.54
36	99.71	59.83	8.33	5.73
48	83.19	66.55	6.72	8.33
60	72.28	72.28	5.73	39.85
72	64.43	77.32	5.04	11.65
84	58.47	81.86	4.54	6.72
96	53.75	86.00	4.15	5.04
108	49.91	89.83	3.83	4.15
120	46.70	93.41	3.57	3.57

6.-

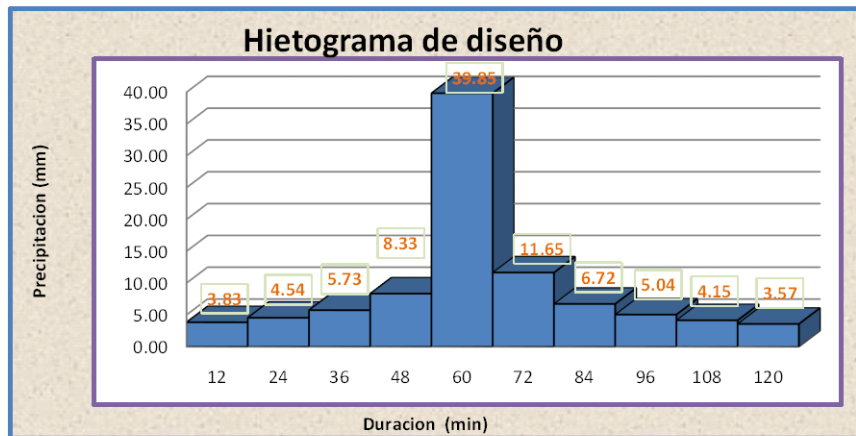
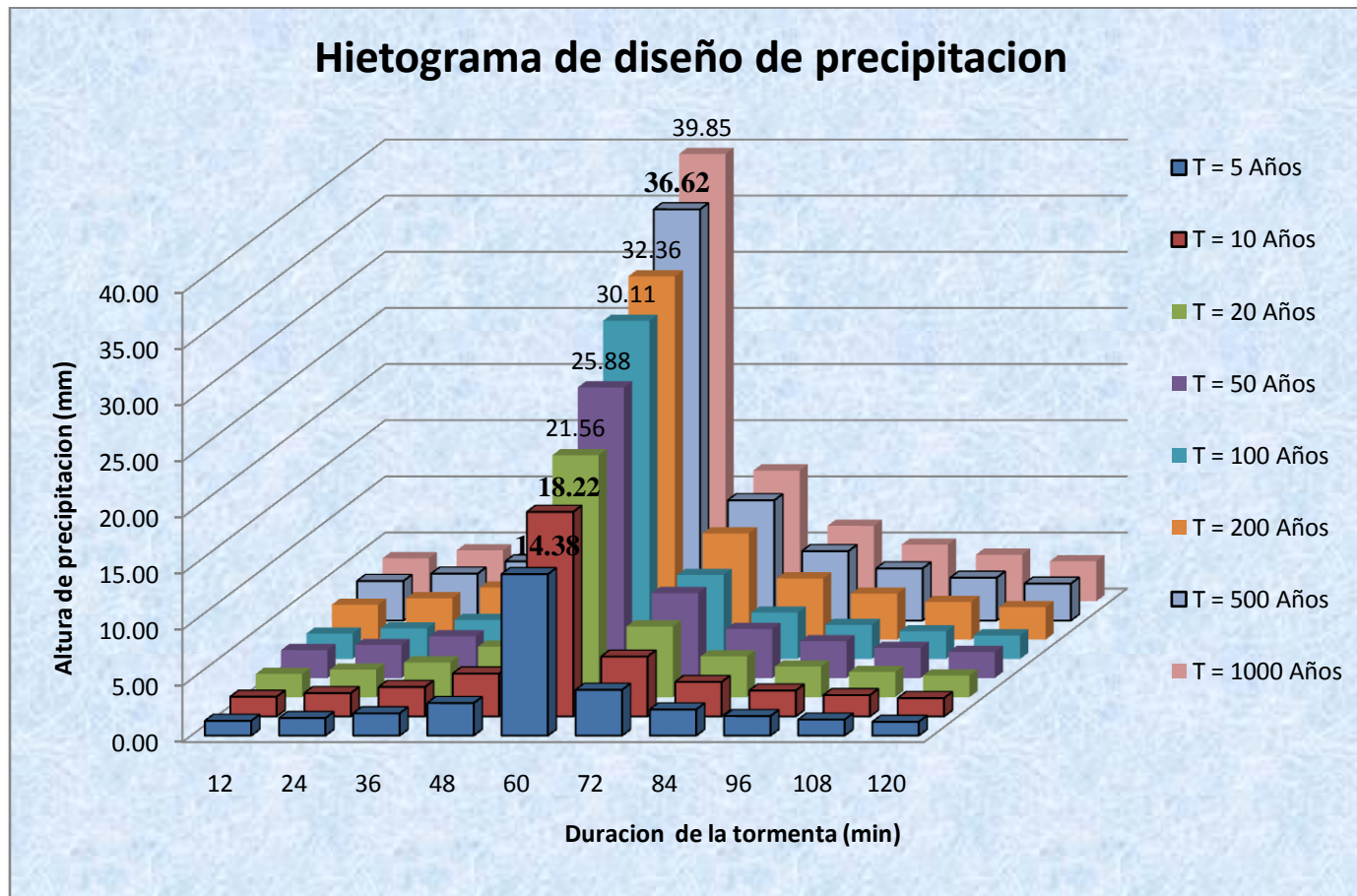


Figura 4.11 Grafico de los hietogramas de diseño para una duración de 2 hrs. de tormenta, para los periodos de retorno planteados (Método de bloques alternos)



4.9.2 METODO THOLIN Y KEIFER

Para cada una de las duraciones, a partir del registro histórico de datos se obtiene la siguiente tabla parámetros estadísticos de valores discretos de la lluvia, la media, la desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 4.22 Parámetros estadísticos de la lluvia

Duración min	Lluvia media en mm	Desviación estándar, en mm	Coef. De Variación en %
0	0	0	0
15	10,15	5,90	58,09
30	14,95	9,97	66,69
45	19,78	16,03	81,08
60	21,61	8,88	41,07
90	23,43	15,39	65,69
120	24,32	11,70	48,09

Figura 4. 12 Curva de precipitación acumulada-duración

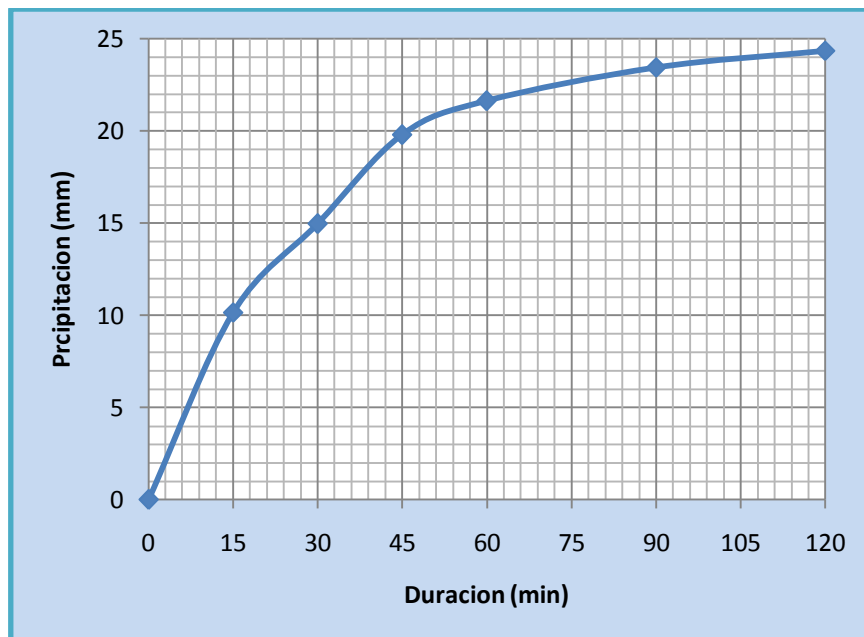
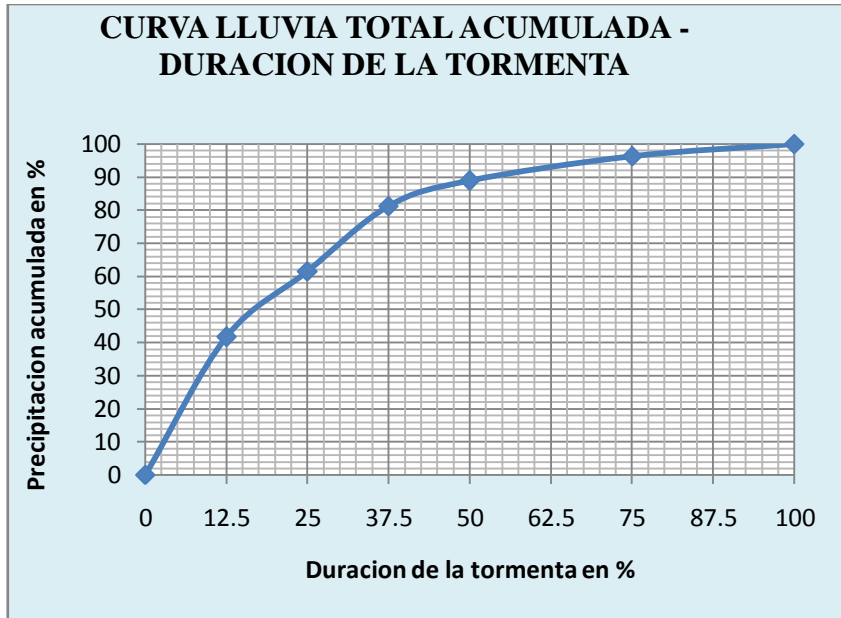


Figura 4.13 Curva lluvia total acumulada-duración de la tormenta



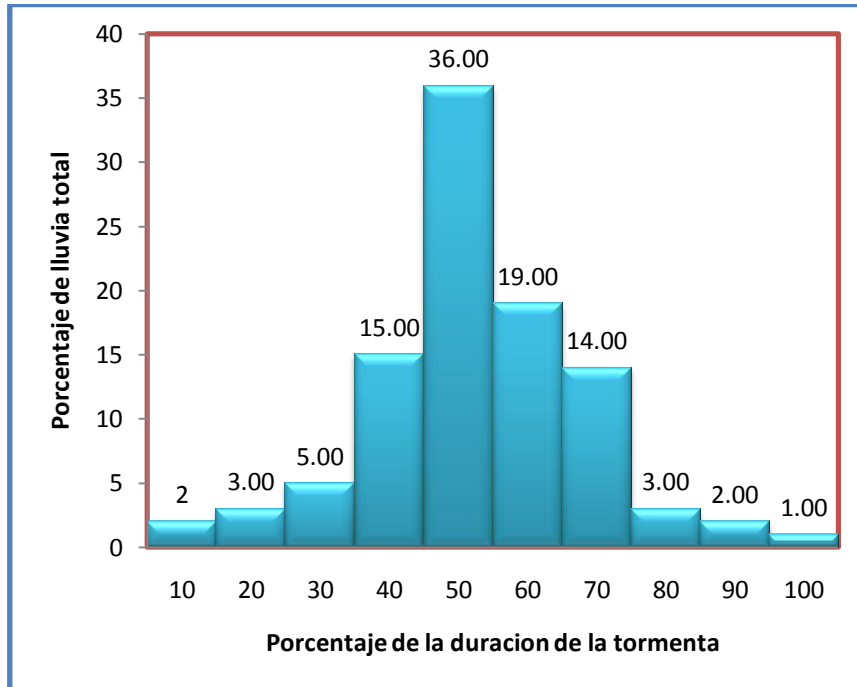
A partir de la figura se procede a la discretización de la lluvia en 10 intervalos

Tabla 4.23 Proceso de discretización

% duración de la tormenta	% lluvia acumulada	% incremento
0	0	0
10	36	36
20	55	19
30	70	15
40	84	14
50	89	5
60	92	3
70	95	3
80	97	2
90	99	2
100	100	1

Con la tabla 4.23 se procede a obtener los hietogramas de diseño, que se observa en la siguiente figura.

Figura 4.14 Hietograma de diseño de precipitación



Finalmente, para ilustrar la aplicación del método de Tholin-Keifer, calcular el hietograma de la lluvia de diseño, para la estación en estudio,

Inicialmente, se determina la distribución de la tormenta en el tiempo, a partir del hietograma de la lluvia de diseño, el cual se ha definido para 10 intervalos constantes equivalentes a:

Duración de la tormenta = 120 minutos

$$\Delta t = \frac{120}{10} = 12 \text{ min}$$

Posteriormente, las alturas de lluvia asociadas a cada intervalo se obtienen al multiplicar la magnitud de la lluvia total, por los porcentajes de la figura 4.14.

Y finalmente el mismo procedimiento para cada altura de lluvia correspondiente a cada periodo de retorno

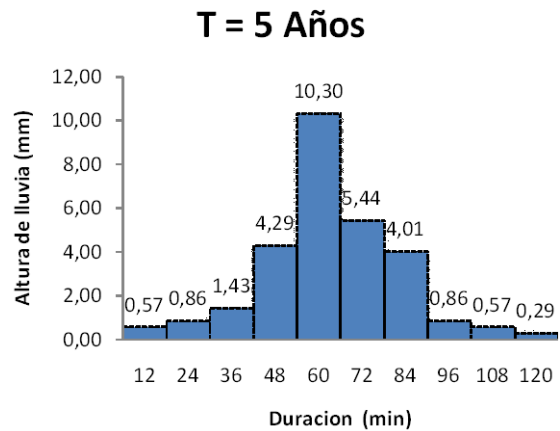
Tabla 4.24 Valores de precipitación e intensidad para T años

T (Años)	I (mm/h)	Lluvia (mm)
5	14,31	28,620
10	17,41	34,827
20	20,39	40,786
50	24,25	48,491
100	27,14	54,276
200	30,02	60,036
500	33,82	67,634
1000	36,68	73,369

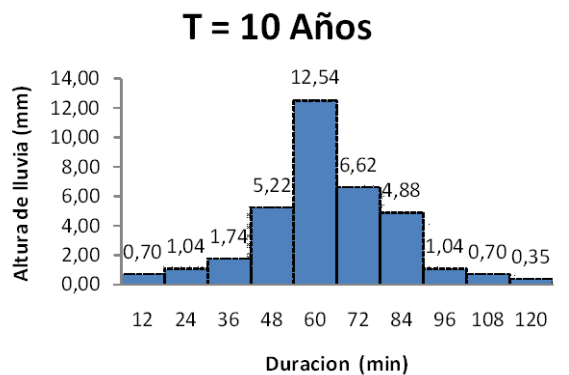
Con la ayuda de la tabla 4.24 se obtiene los hietogramas de diseño de precipitación, siguiendo el procedimiento explicado anteriormente, los mismos se muestra a continuación para todos los periodos de retorno planteados en la investigación.

Cada Hietograma corresponde únicamente para la duración de 120 minutos, con el fin de hacer las respectivas comparaciones, con los otros métodos aplicados en el presente trabajo

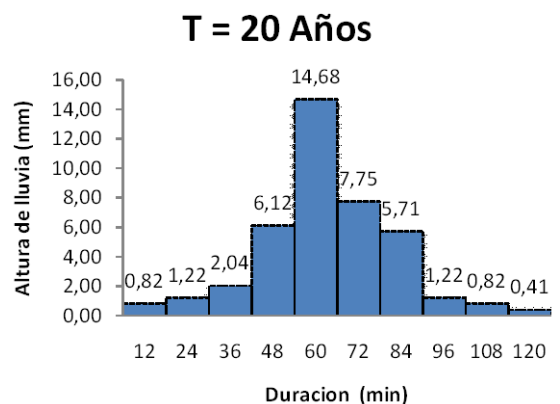
Tiempo (min)	T = 5 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	10,30	0,57
24	5,44	0,86
36	4,29	1,43
48	4,01	4,29
60	1,43	10,30
72	0,86	5,44
84	0,86	4,01
96	0,57	0,86
108	0,57	0,57
120	0,29	0,29



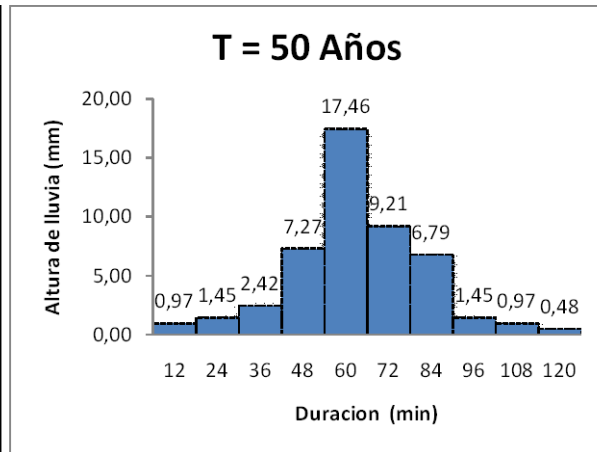
Tiempo (min)	T = 10 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	12,54	0,70
24	6,62	1,04
36	5,22	1,74
48	4,88	5,22
60	1,74	12,54
72	1,04	6,62
84	1,04	4,88
96	0,70	1,04
108	0,70	0,70
120	0,35	0,35



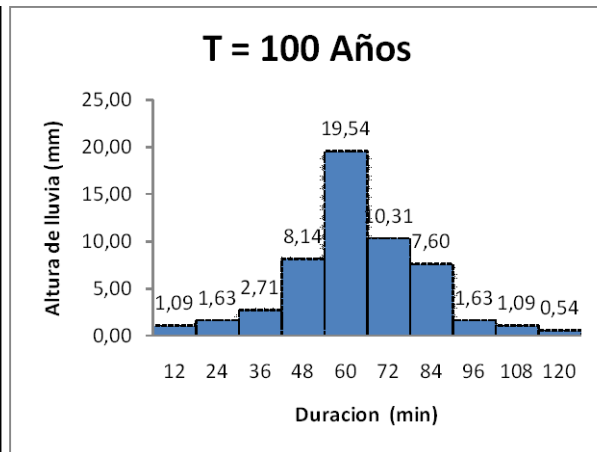
Tiempo (min)	T = 20 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	14,68	0,82
24	7,75	1,22
36	6,12	2,04
48	5,71	6,12
60	2,04	14,68
72	1,22	7,75
84	1,22	5,71
96	0,82	1,22
108	0,82	0,82
120	0,41	0,41



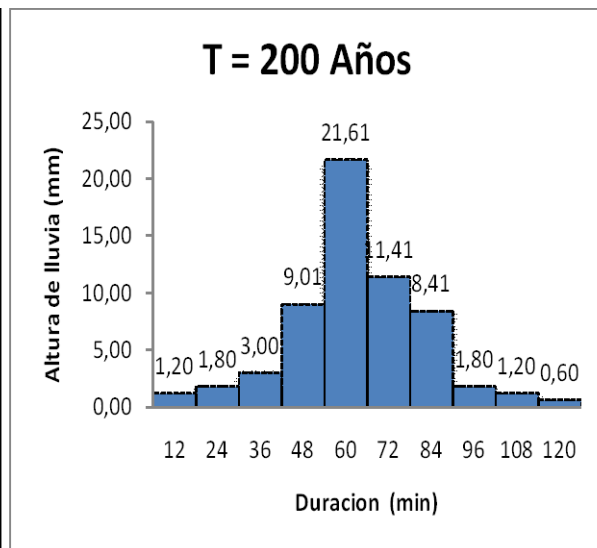
Tiempo (min)	T = 50 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	17,46	0,97
24	9,21	1,45
36	7,27	2,42
48	6,79	7,27
60	2,42	17,46
72	1,45	9,21
84	1,45	6,79
96	0,97	1,45
108	0,97	0,97
120	0,48	0,48



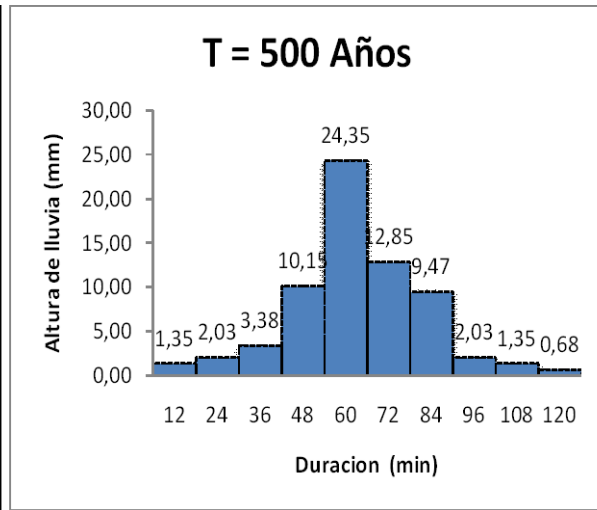
Tiempo (min)	T = 100 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	19,54	1,09
24	10,31	1,63
36	8,14	2,71
48	7,60	8,14
60	2,71	19,54
72	1,63	10,31
84	1,63	7,60
96	1,09	1,63
108	1,09	1,09
120	0,54	0,54



Tiempo (min)	T = 200 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	21,61	1,20
24	11,41	1,80
36	9,01	3,00
48	8,41	9,01
60	3,00	21,61
72	1,80	11,41
84	1,80	8,41
96	1,20	1,80
108	1,20	1,20
120	0,60	0,60



Tiempo (min)	T = 500 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	24,35	1,35
24	12,85	2,03
36	10,15	3,38
48	9,47	10,15
60	3,38	24,35
72	2,03	12,85
84	2,03	9,47
96	1,35	2,03
108	1,35	1,35
120	0,68	0,68



Tiempo (min)	T = 1000 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	26,41	1,47
24	13,94	2,20
36	11,01	3,67
48	10,27	11,01
60	3,67	26,41
72	2,20	13,94
84	2,20	10,27
96	1,47	2,20
108	1,47	1,47
120	0,73	0,73

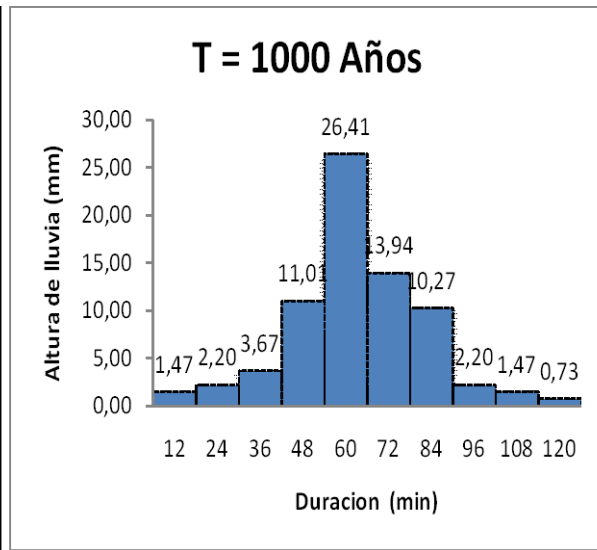
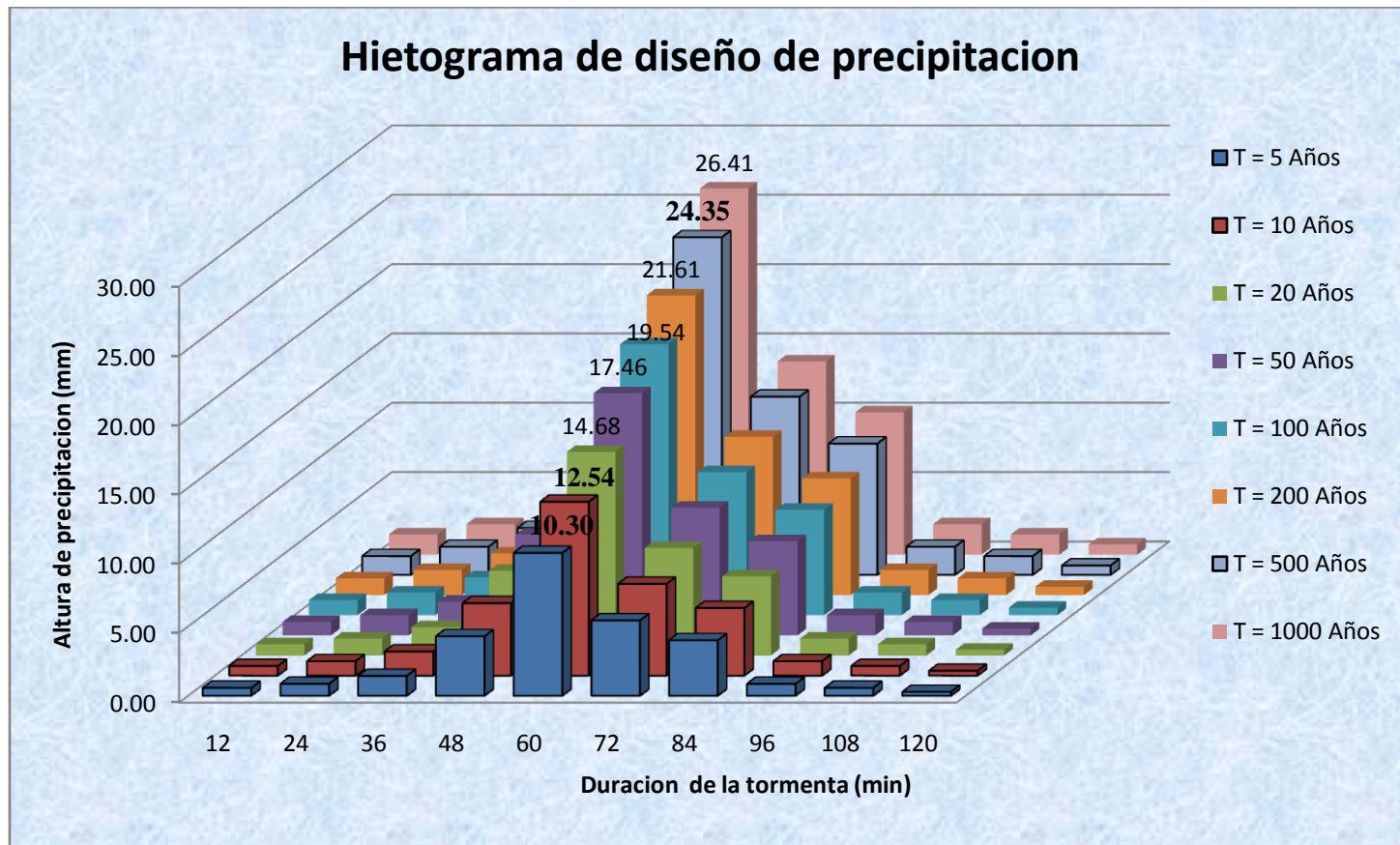


Figura 4.15 Grafico de los hietogramas de diseño para una duración de 2 hrs. de tormenta, para los periodos de retorno planteados (método de Tholin-Keifer)



4.9.3 MÉTODO DE CURVA DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA-DURACIÓN.

- **Factor de ajuste por periodo de retorno**

$$F_2 = 0.583 + 0.26Ln(T)$$

Tabla 4.25 Factor de ajuste por periodo de retorno (T)

T (Años)	F2
5	1,00
10	1,18
20	1,36
50	1,60
100	1,78
200	*
500	*
1000	*

- **Factor de ajuste a cortas duraciones**

$$F_1 = 0.27 + 2.11d - 1.52d^2 + 0.37d^3$$

$$d = 2 \text{ horas}$$

$$F_1 = 0.27 + 2.11 * 2 - 1.52 * 2^2 + 0.37 * 2^3$$

$$F_1 = 1.37$$

- **Factor de reducción por área**

$$FRA = 1.00$$

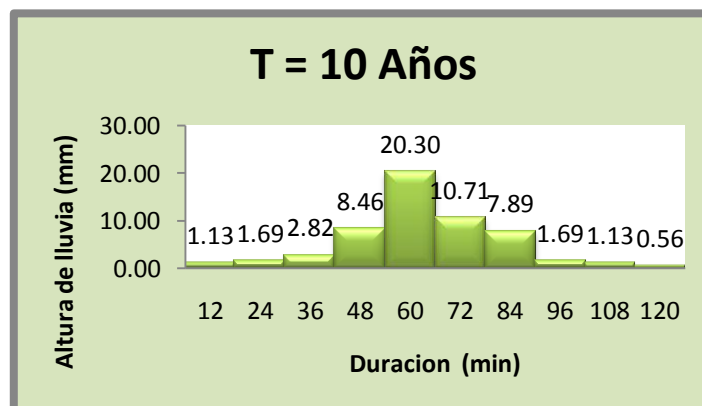
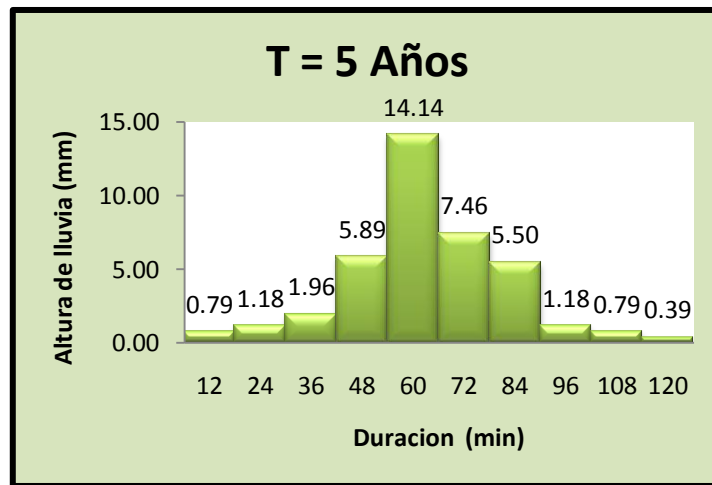
Aplicando la siguiente expresión se obtiene la tabla 21

$$P_{A-d-T} = h_T * F_1 * F_2 * FRA$$

Tabla 4.26 Altura de precipitación (P_{A-d-T})
Método de curva de precipitación acumulada - duración

T (Años)	I (mm/h)	lluvia (mm)	P_{A-d-T}
5	14,31	28,620	39,27
10	17,41	34,827	56,38
20	20,39	40,786	76,10
50	24,25	48,491	106,30
100	27,14	54,276	132,38

Multiplicando la P_{A-d-T} por la tabla 4.23 discreteada se obtiene los hietogramas de diseño de precipitación



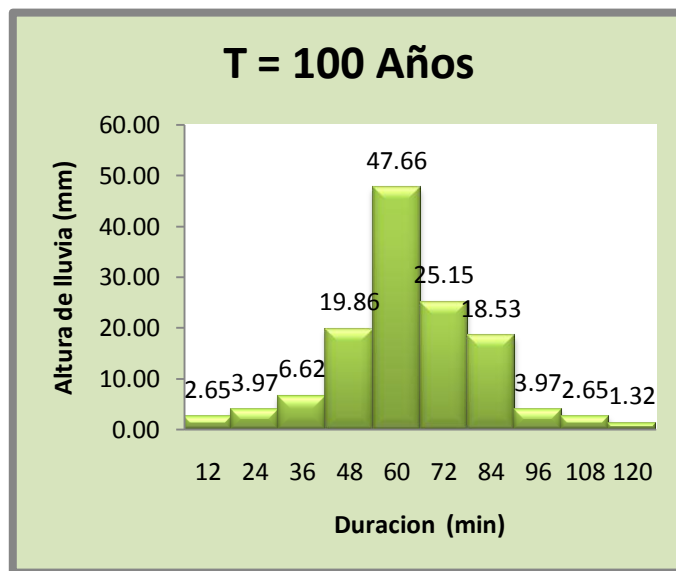
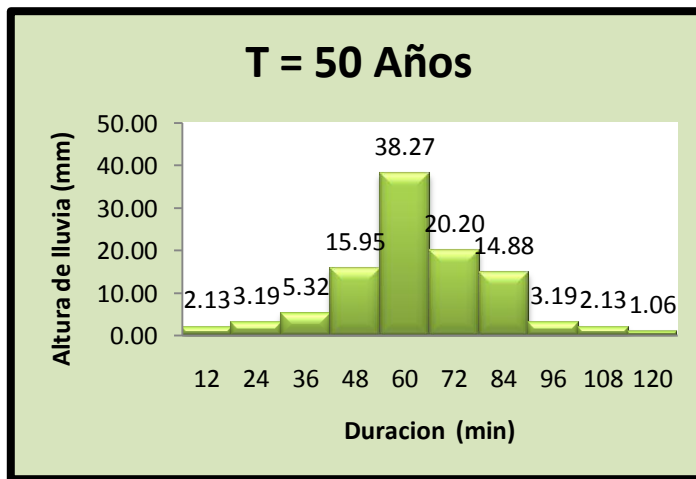
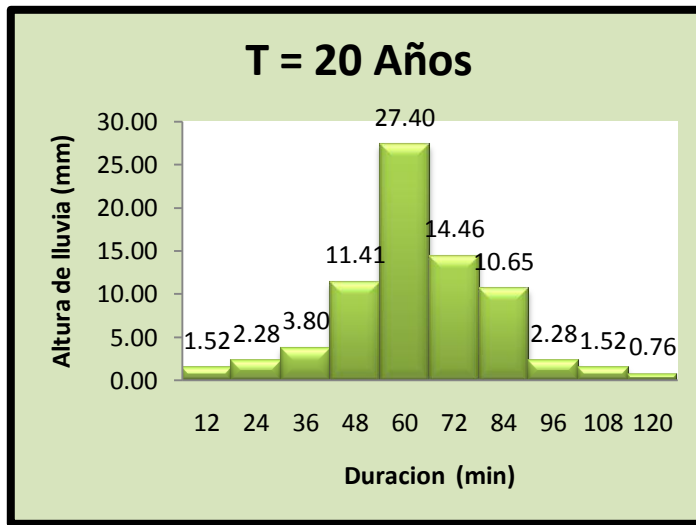
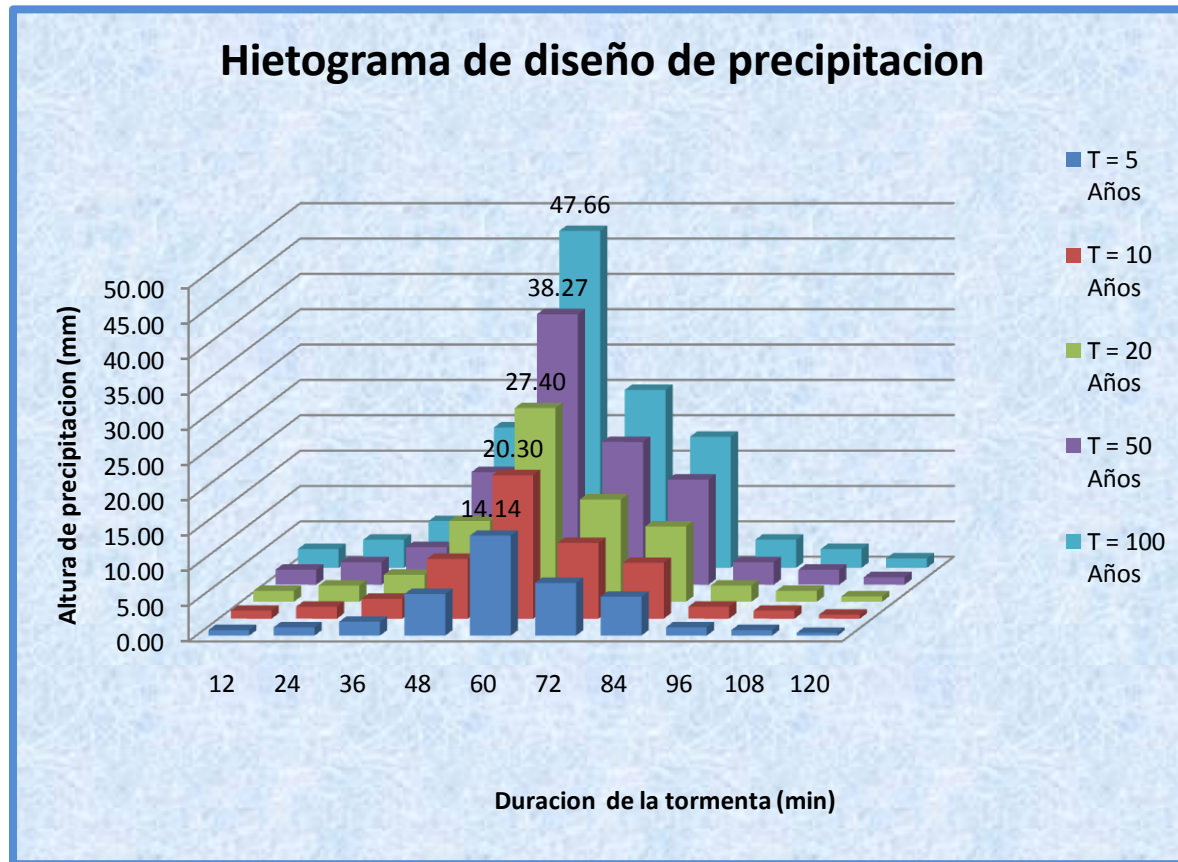


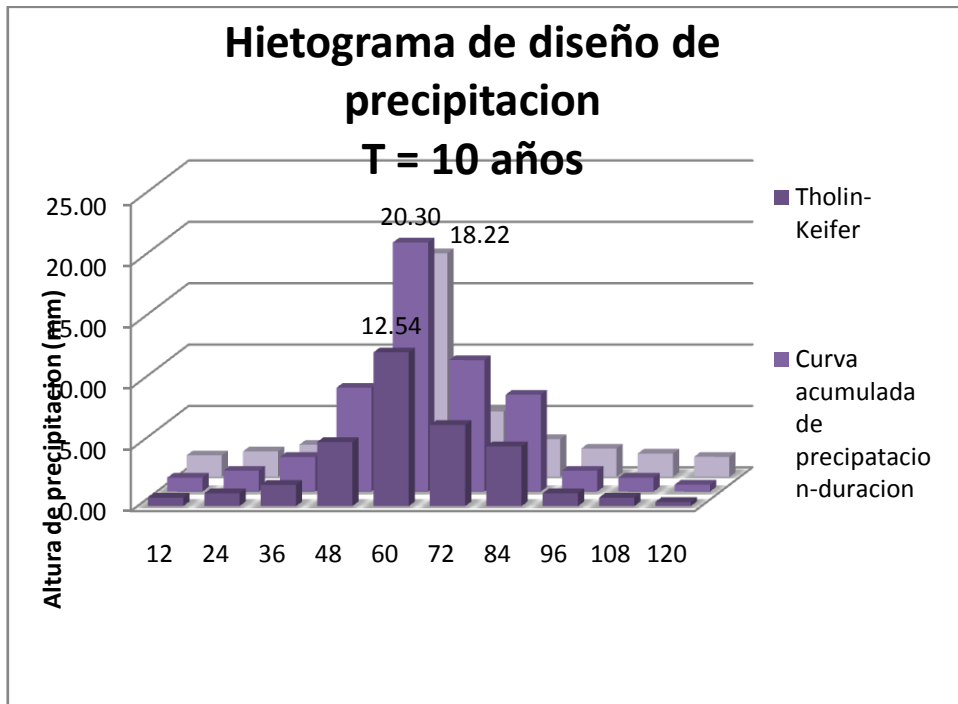
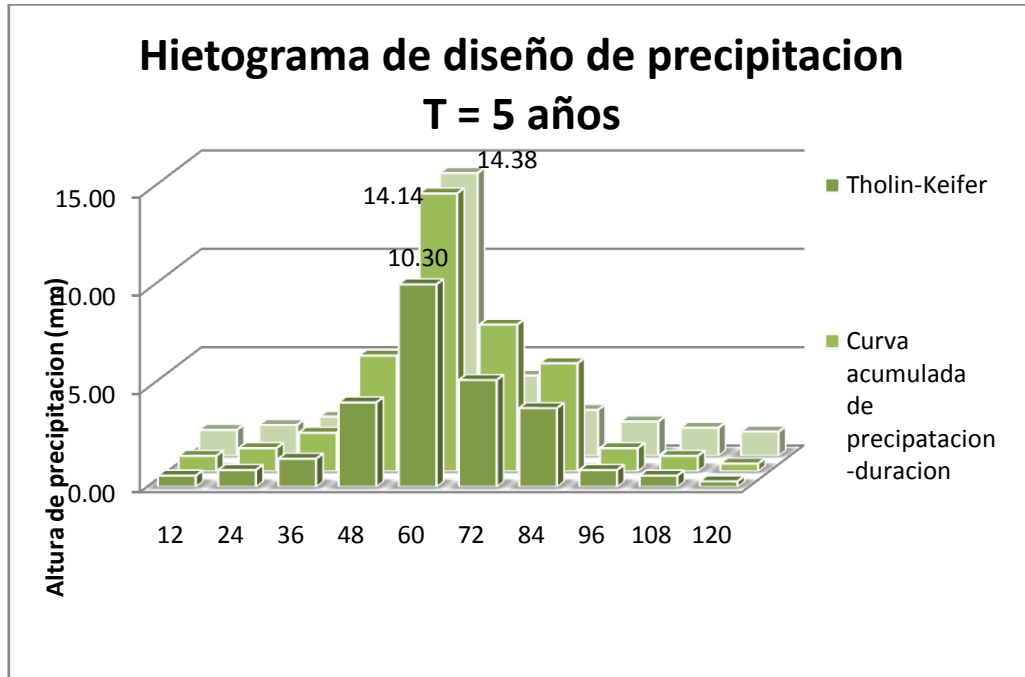
Figura 4.16 Grafico de los hietogramas de diseño para una duración de 2 hrs. de tormenta, para los periodos de retorno planteados (método curva acumulada de precipitación - duración)



4.10 ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

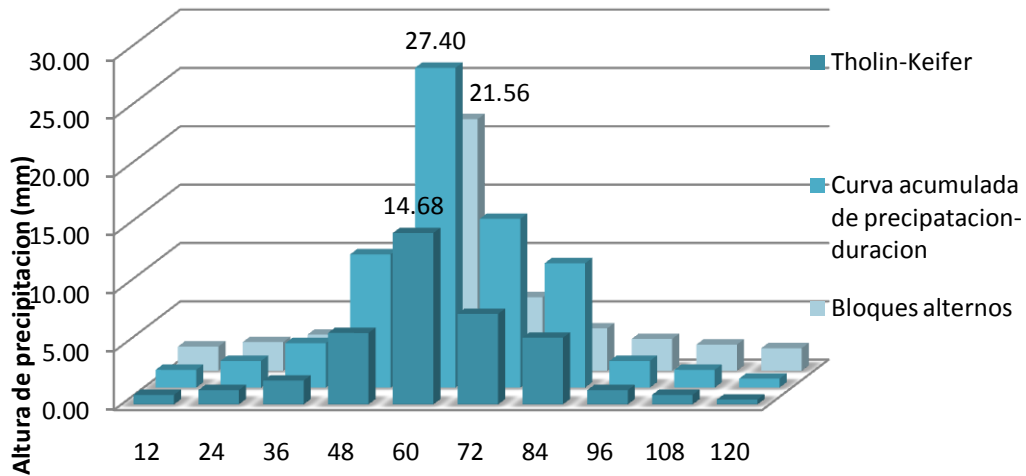
A continuación se presenta las graficas de comparación entre los métodos aplicados:

Figura 4.17 Hietogramas de comparación



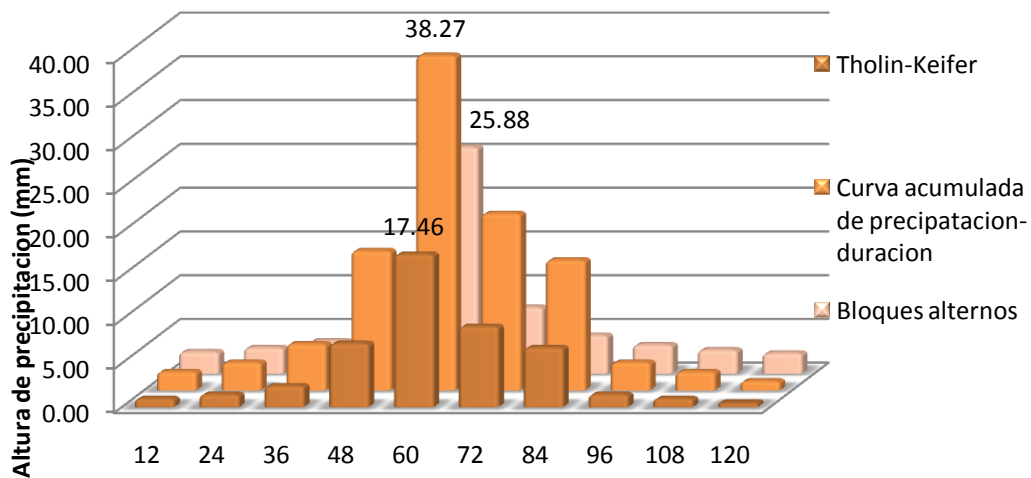
Hietograma de diseño de precipitacion

T = 20 años

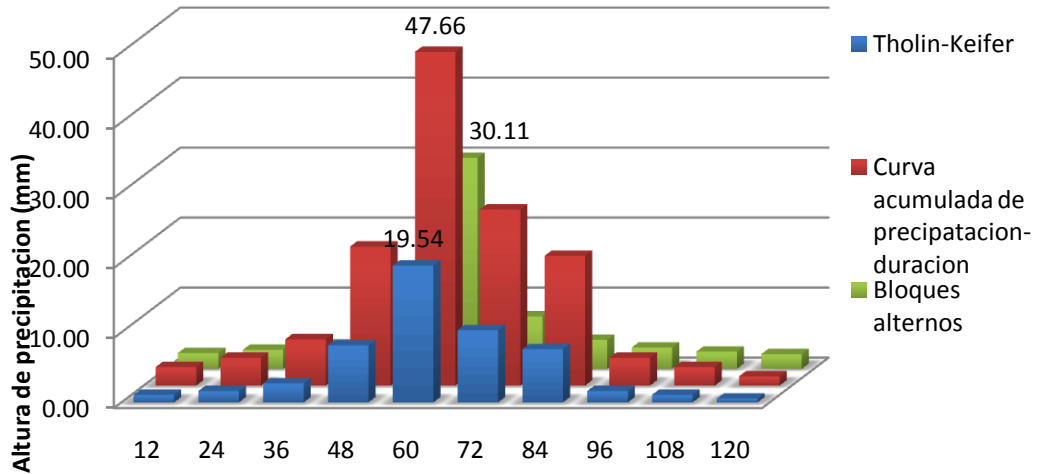


Hietograma de diseño de precipitacion

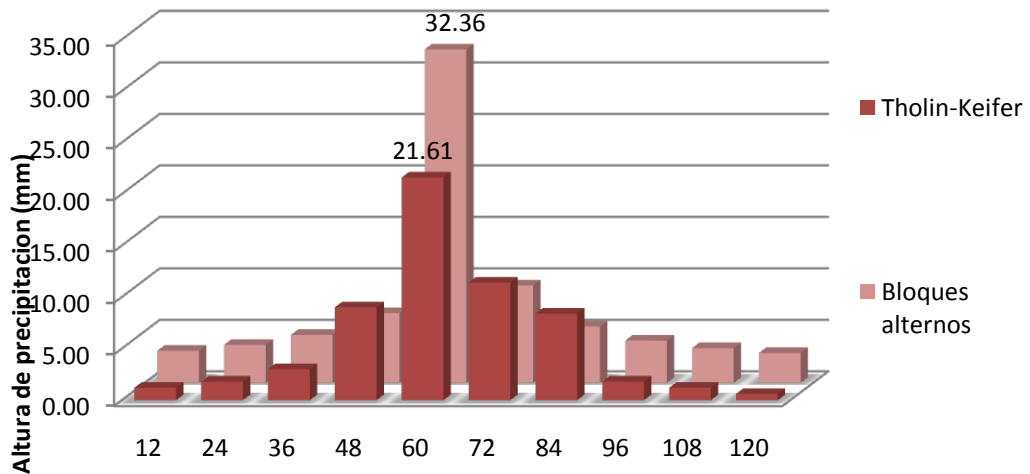
T = 50 años



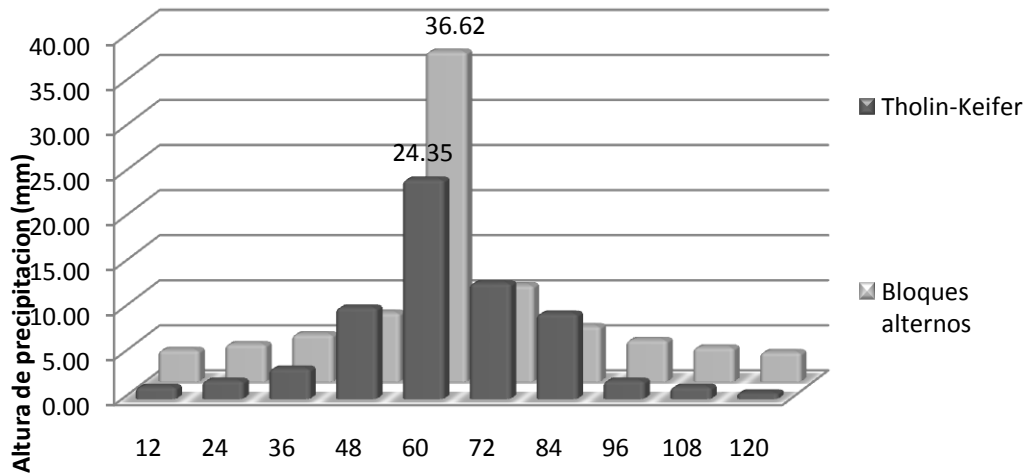
Hietograma de diseño de precipitacion T = 100 años



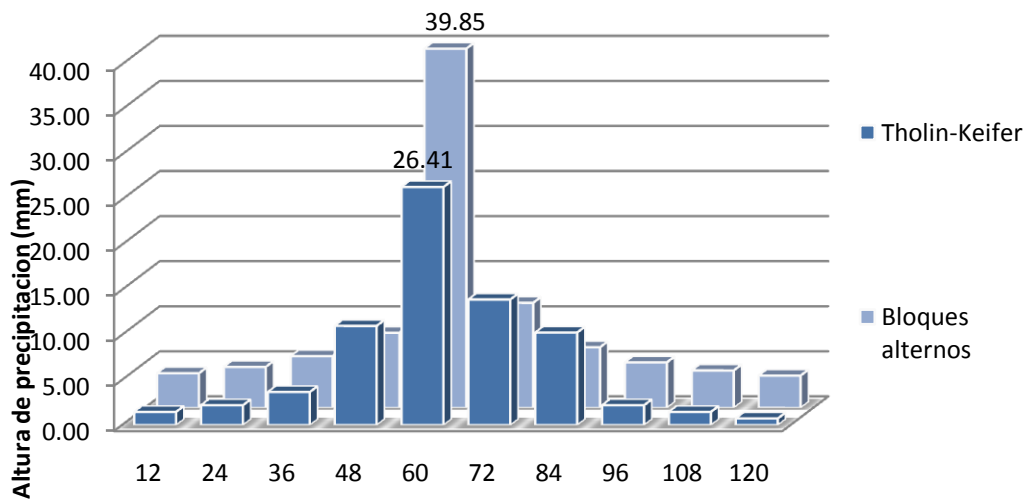
Hietograma de diseño de precipitacion T = 200 años



Hietograma de diseño de precipitacion T = 500 años



Hietograma de diseño de precipitacion T = 1000 años



Se puede observar para los periodos de retorno planteados, los hietogramas de diseño de precipitación con las siguientes conclusiones

- Que el hietograma de diseño de mayor precipitación es el de método de bloques alternos, para T = 5 años
- El hietograma de menor altura de precipitación es el de Tholin-Keifer, para todos los periodos de retorno.
- El hietograma de Curva acumulada de precipitación – duración, a mayor periodo de retorno, mayor la altura del hietograma de diseño de precipitación
- El método de Curva acumulada de precipitación esta en función del factor de área y por lo tanto al asociarlo a una área puede disminuir aun más la altura de hietograma de diseño, debido a que los factores son menores a 1
- Haciendo una comparación entre el método de bloques alternos y entre el método de Tholin-Keifer y el método de curva acumulada de precipitación – duración, existe una gran variación con respecto al primero y el segundo, es mayor que el primero y menor que el segundo a excepción para T =5 años
- Para periodos de retorno mayores a 100 años, el método de curva acumulada ya no es aplicable.
- El método a utilizar es depende del proyectista, de acuerdo a los caudales que determina.

4.11 Aplicación de los resultados.-

Los resultados de esta investigación tendrán la aplicación en la construcción de obras hidráulicas, en la parte de diseño de las mismas, pero para el diseño se requiere la determinación de caudales utilizados es la fórmula racional

$$Q = \frac{C * i * A}{360}$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal máximo (m}^3/\text{s)}$$

C = Coeficiente de escorrentía (adim)

i = Intensidad máxima (mm/h)

A = Área de la cuenca (Ha)

La intensidad puede ser calculada por las ecuaciones que se han calculado para los diferentes periodos de retorno.

Para una fácil aplicación de la misma los hietogramas podrán ser utilizados de la siguiente manera:

Ejemplo:

Si se desea estimar el caudal de diseño para la construcción de un puente vehicular en la carretera Tarija – Bermejo a la altura de la Comunidad de la Merced, con un periodo de retorno de 200 años, si el área de la cuenca es de 25 km² y el coeficiente de escorrentía es de 0.5 y un tiempo de concentración de 2 hrs.

Datos

$$Ac = 25 \text{ km}^2 = 2500 \text{ Ha}$$

$$C = 0,5$$

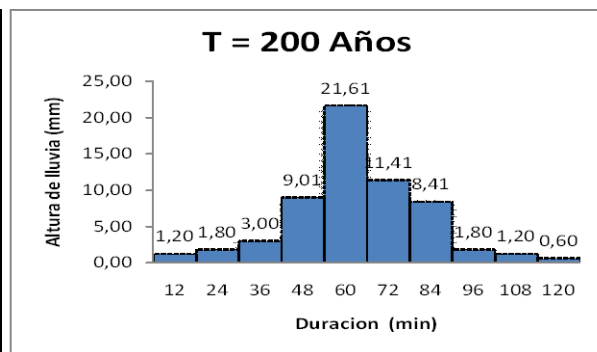
$$Tc = 1,6 \text{ h}$$

$$T = 200 \text{ años}$$

Solución

Utilizando el estudio realizado de hietogramas de diseño de precipitación por el método de Tholin-Keifer

Tiempo (min)	T = 200 Años	
	Lluvia (mm)	Ordenado
0	0,00	0,00
12	21,61	1,20
24	11,41	1,80
36	9,01	3,00
48	8,41	9,01
60	3,00	21,61
72	1,80	11,41
84	1,80	8,41
96	1,20	1,80
108	1,20	1,20
120	0,60	0,60



La máxima precipitación producida es de 21.61 mm

Además:

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

Donde:

i = Intensidad en mm/h

P = Precipitación de hietograma de diseño (mm)

t = Tiempo de concentración (h)

Entonces:

$$i = \frac{P}{t} = \frac{21.61 \text{ mm}}{2.0 \text{ hrs}} = 10.81 \text{ mm/h}$$

y

$$Q = \frac{0.5 * 2.81 * 2500}{360} = 37.53 \text{ m}^3/\text{s}$$

Existe una mayor facilidad de uso cuando se tiene los hietogramas de diseño.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La estimación de los hietogramas de precipitación es de gran importancia, debido a que todos los diseños hidráulicos requieren determinar las alturas de precipitación y su distribución temporal, razón por la cual se ve hoy en día las grandes fallas, principalmente en drenaje.
- Se cumplió con los objetivos, el de generar curvas intensidad-duración-frecuencia para diferentes periodos de retorno y la estimación de hietogramas de precipitación a partir de la misma
- No se elaboro, ni se utilizo ningún software, para la estimación de hietogramas de diseño, por que en nuestro medio aun no es de uso común y el que principalmente se usa es el hoja de cálculo de Excel.
- La estimación de hietogramas de diseño o de precipitación, se la realizó para una duración de 2 horas, debido a que al momento de analizar era el que tenia mayor frecuencia.
- Se tuvo dificultades, al momento de realizar las lecturas de las precipitaciones desde las bandas de los pluviógrafos, por las diferentes fallas que se presentaron y las mismas se muestran en la sección 4.3
- No sé trabajo exactamente con las lluvias máximas registradas en el pluviómetro, debido a diferentes razones de fallas.
- Se tomaron las tormentas máximas producidas y registradas en el pluviógrafo
- Se analizo alrededor de 100 tormentas, debido a la falta información en el pluviografo solo se trabajo con las que se contaba.
- No existe mucha bibliografía para hacer un buen desarrollo la estimación de tormentas de diseño.
- Se determino las curvas I.D.T. para periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años

- No se generó ninguna ecuación en función de periodo de retorno, solo las tendencia de las curvas I.D.T., para los periodos de retorno planteados
- Se generaron las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno a través de las leyes probabilísticas, como ley Gumbel, ley Log-Normal.
- La que mejor se ajusta a la estación en estudio es la ley Gumbel.
- La ley log normal nos da una curva idéntica a la de Gumbel a excepción para periodos de retorno 500 y 1000 años
- Se realizo la estimación de hietogramas de diseño por los métodos de; bloques alternos, método de Tholin-Keifer y Curva masa acumulada de precipitación-duración de la tormenta
- Los resultados uno respecto del otro son distintos, con excepción que para algunos años se asemejan a ser iguales
- Lo más recomendable y confiable es el método de bloques alternos, porque se ha generado directamente a partir de las curvas intensidad duración frecuencia y es la que mayor aceptación tiene en otros países.
- Se elaboro una hoja de cálculo Excel, para la estimación de hietogramas por el método de bloques alternos, incluye una pequeña guía.
- Los hietogramas de diseño podrán ser aplicados en al estimación de caudales máximos, principalmente en la formula racional.

RECOMENDACIONES

- Utilizar este estudio para proyectos de diseño en la comunidad de la Merced, donde se encuentra la estación en estudio.
- Utilizar la pequeña bibliografía que se ha recopilado, para hacer investigaciones de este tipo.

- Que los docentes motiven a los estudiantes a realizar trabajos de investigación y más que todo de este tipo, hietogramas de precipitación, ya que se tiene datos pluviográficos en algunas estaciones.
- Los resultados obtenidos solo pueden ser usados para periodos de retorno planteados en la presente investigación
- Para utilizar otro periodo de retorno distinto a lo propuesto, generar las curvas I.D.T. a partir de la Ley Gumbel o caso contrario adaptar una ecuación por regresión de mínimos cuadrados o regresión múltiple.
- Comprobar con algún programa que sea de su conocimiento en la estimación de tormentas de diseño, con los resultados obtenidos en esta investigación, con restricción que debe ser para tormentas menores a dos horas.