

**DISEÑO Y ESTUDIO DE LAS PRECIPITACIONES MAS ALTAS A
PARTIR DE LAS CURVAS IDF (INTENSIDAD, DURACIÓN,
FRECUENCIA) EN LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS CHIVOR
Y EL TUNEL.**

OSWALDO SUAREZ GARCIA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CÁLDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGIA EN CONSTRUCCIONES CIVILES

BOGOTÁ D.C.

2015

**DISEÑO Y ESTUDIO DE LAS PRECIPITACIONES MAS ALTAS A
PARTIR DE LAS CURVAS IDF (INTENSIDAD, DURACIÓN,
FRECUENCIA) EN LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS CHIVOR
Y EL TUNEL.**

OSWALDO SUAREZ GARCIA

**Proyecto de Grado en la modalidad de Monografía, para optar el título
de Tecnólogo en Construcciones Civiles.**

**Docente Tutor
Eduardo Zamudio Huertas
Ing. Civil**

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CÁLDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGIA EN CONSTRUCCIONES CIVILES

BOGOTÁ D.C.

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme paciencia y fe para lograr realizar de manera satisfactoria este proyecto, por enseñarme que no hay que desfallecer en los momentos difíciles.

De igual forma agradezco a todas las personas que de una u otra forma estuvieron presentes en la elaboración de mi proyecto, ya que sin ellos no habría sido posible su realización.

En primer lugar quisiera agradecer al Ingeniero Eduardo Zamudio por su apoyo y colaboración. Al Ingeniero Jorge Muñoz por su paciencia y tiempo que dedico en solucionar cualquier duda que surgiera, siendo esto de gran ayuda en el desarrollo del trabajo. A mis compañeros que han estado siempre incondicionales y brindando un gran apoyo en los momentos difíciles.

Agradezco al Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales, al permitirme recolectar la información necesaria para el adecuado avance del proyecto.

Por ultimo agradezco a mi familia, quienes han sido la razón principal de querer seguir hacia adelante.

CONTENIDO

| | Pag. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 16 |
| 1.2 FORMULACIÓN | 16 |
| 1.3 DESCRIPCIÓN | 16 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 18 |
| 3. OBJETIVOS | 19 |
| 4. MARCO TEÓRICO..... | 20 |
| 4.1 ESTUDIOS DE PRECIPITACIÓN..... | 20 |
| 4.2 CURVAS INTENSIDAD DURACION Y FRECUENCIA..... | 20 |
| 4.3 APLICACIÓN DE LAS CURVAS IDF | 22 |
| 4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO APLICADO A CURVAS IDF | 23 |
| 4.4.1 Funciones de distribución de probabilidad | 23 |
| 4.4.1.1 Distribución normal..... | 23 |
| 4.4.1.2 Distribución Log-Normal..... | 24 |
| 4.4.1.3 Distribución Pearson III | 25 |
| 4.4.1.4 Distribución Gumbel | 26 |
| 4.4.1.5 Distribución log-Gumbel..... | 26 |
| 4.4.2 Pruebas de bondad de ajuste..... | 27 |
| 4.4.2.1 Método del error cuadrático. | 27 |
| 4.4.2.2 Prueba X^2 | 28 |
| 4.4.2.3 Prueba Kolmogorov-Smirnov | 29 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 31 |
| 6. PROCEDIMIENTO | 32 |
| 6.1 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN | 32 |
| 6.1.1 Selección de Estaciones Pluviográficas | 32 |
| 6.1.2 Recolección de la Información Pluviográfica..... | 33 |
| 6.2 PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULO DE CURVAS IDF | 33 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.3 | AJUSTE CON UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD | 36 |
| 6.3.1 | Distribución normal..... | 36 |
| 6.3.2 | Distribución Log-Normal..... | 38 |
| 6.3.3 | Distribución Pearson III. | 40 |
| 6.3.4. | Distribución Gumbel. | 41 |
| 6.3.5 | Distribución Log-Gumbel..... | 42 |
| 6.4 | PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE | 45 |
| 6.4.1 | Método Error Cuadrático. | 45 |
| 6.4.2 | Prueba Kolmogorov- Smirnov. | 48 |
| 6.4.3 | Prueba X^2 | 49 |
| 6.5 | SELECCIÓN FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN | 52 |
| 6.6 | CÁLCULO DE ECUACIÓN DE CURVA IDF (INTENSIDAD-DURACIÓN- FRECUENCIA) | 55 |
| 7. | RESULTADOS | 66 |
| 7.1 | ECUACIÓN Y CURVA (IDF) PARA LA ESTACION EL TÚNEL..... | 66 |
| 7.2 | ECUACIÓN Y CURVA (IDF) PARA ESTACIÓN CHIVOR. | 69 |
| 8. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 72 |
| 9. | CONCLUSIONES..... | 73 |
| 10. | RECOMENDACIONES | 74 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 75 |
| | ANEXOS | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Banda pluviográfica estación El Túnel | 33 |
| Figura 2 Grafica Intensidades Vs Intervalos de duración. (Escala Log.)..... | 56 |
| Figura 3 Determinación Constante t_0 . (Escala logarítmica) | 57 |
| Figura 4 Intensidades vs intervalo de duración..... | 63 |
| Figura 5 Determinación t_0 . Estación Chivor | 64 |
| Figura 6 Ecuación Curva IDF. Estación El Túnel..... | 66 |
| Figura 7 Curva IDF, estación el túnel..... | 68 |
| Figura 8 Ecuación Curva IDF..... | 69 |
| Figura 9 Curva IDF Estación Chivor | 71 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Formato de registro de incrementos de lluvia por día | 34 |
| Tabla 2 Precipitaciones máximas anuales Estación El Túnel | 35 |
| Tabla 3. Intensidades máximas ordenadas de forma decreciente estación el Túnel..... | 36 |
| Tabla 4. Resultados de aplicación función de distribución Normal. D=10min. | 38 |
| Tabla 5. Resultados de función de distribución Log Normal. D=10min..... | 39 |
| Tabla 6. Resultados de función de distribución Pearson III. D=10min..... | 41 |
| Tabla 7. Resultados de función de distribución Gumbel. D=10min..... | 42 |
| Tabla 8 Resultados función de distribución Log-Gumbel..... | 44 |
| Tabla 9 Ajuste de probabilidad de datos D=10 min | 45 |
| Tabla 10. Periodos de retorno para Prueba error cuadrático. D=10min | 46 |
| Tabla 11. Valores para la prueba de error cuadrático. D=10 min. | 48 |
| Tabla 12. Resultados Prueba Kolmogorov- Smirnov. D=10 min..... | 49 |
| Tabla 13. Parámetros estadísticos para intervalos de clase. Prueba X^2 | 49 |
| Tabla 14. División de datos en Intervalos de clase..... | 50 |
| Tabla 15. Parámetros de funciones de distribución de datos para Prueba X^2 | 50 |
| Tabla 16 Resultados prueba x^2 . D=10 min..... | 51 |
| Tabla 17 Resultados prueba error cuadrático mínimo | 53 |
| Tabla 18 Resultados prueba Kolmogorov-Smirnov..... | 53 |
| Tabla 19 Resultados prueba X^2 | 53 |
| Tabla 20. Resultados de aplicación función Gumbel para ajuste de datos... 55 | 55 |
| Tabla 21 Estimación de t_0 | 57 |
| Tabla 22 Determinación de constantes n y C. T 3 años | 58 |
| Tabla 23 Constantes n y C | 59 |
| Tabla 24 Parámetros K y m | 59 |

| | |
|---|----|
| Tabla 25 Intensidades máximas ordenadas de forma decreciente estación Chivor..... | 61 |
| Tabla 26 Resultados prueba error cuadrático mínimo. Estación Chivor | 61 |
| Tabla 27 Resultados prueba Kolmogorov-smirnov. Estación Chivor | 62 |
| Tabla 28 Resultados prueba X^2 estación Chivor..... | 62 |
| Tabla 29 Resultados de aplicación función Gumbel para ajuste de datos. Estación Chivor..... | 62 |
| Tabla 30 determinación de t_0 | 64 |
| Tabla 31 constantes n y C. Estación Chivor | 65 |
| Tabla 32 Parámetros K y m estación Chivor..... | 65 |
| Tabla 33. Evaluación ecuación y curva IDF para estación El Túnel. | 66 |
| Tabla 34. Parámetros de la ecuación para curva IDF. De la estación El Túnel. | 67 |
| Tabla 35. Evaluación ecuación y curva IDF para estación Chivor. | 69 |
| Tabla 36. Parámetros de la ecuación para curva IDF. Chivor..... | 70 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| ANEXO A Valores área bajo la curva de la función normal. | 76 |
| ANEXO B Parámetros μ_y y σ_y , función de distribución de probabilidad Gumbel. | 77 |
| ANEXO C Valor percentil para distribución ji- cuadrado con n grados de libertad. | 78 |
| ANEXO D Valor crítico d para la prueba Kolmogorov-Smirnov. | 79 |

GLOSARIO

La definición de los siguientes términos será de ayuda al correcto entendimiento del proyecto¹:

CURVAS IDF: (IDF) Intensidad-Duración-Frecuencia, curvas que se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

INTENSIDAD: se define como la tasa de precipitación o altura equivalente de precipitación por unidad de tiempo (mm/hora) y se expresa como:

$$I = \frac{p}{T_d}, \text{ donde } P = \text{Lámina de agua lluvia (mm) y } T_d = \text{Duración.}$$

DURACIÓN: Es el tiempo comprendido entre el comienzo y el final de la precipitación considerado como evento. (Td).

FRECUENCIA: Se considera como una medida de la probabilidad de ocurrencia de que un evento sea igualado o excedido por lo menos una vez al año, expresada en función del periodo de retorno.

PRECIPITACIÓN: es el producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. La precipitación puede producirse en muchas formas diferentes como lo son la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre.

¹ Curvas IDF para la zona centro sur de Chile. Talca, Chile: Universidad de Talca. Documento técnico, No. 7.

APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa, 1992. 304 p.

ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA: Registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. Actualmente se utilizan los pluviógrafos de registro diario.

PROBABILIDAD: Es la posibilidad de que un evento se efectúe y se expresa como fracciones o decimales que se encuentran en el rango de cero a uno; donde una probabilidad de cero significa que algo nunca va a suceder, una probabilidad de uno indica que algo va a suceder siempre.

PERIODO DE RETORNO: Es la probabilidad de que un suceso ocurra por término una vez en un periodo de N años.

PLUVIOGRAMA: Presenta un trazo en dos direcciones elaborados por los pluviógrafos que presentan una escala en el eje de las abscisas que indica el tiempo, en divisiones por horas y subdivisiones cada 10 minutos, en el eje de las ordenadas se encuentra una escala de 0 a 10 que indica la cantidad de precipitación en mm de cada evento.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el fin de dar solución a un problema que afecta a muchos municipios de Colombia, los cuales cuentan con poca información pluviográfica, a raíz de este inconveniente se elaboraron curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), herramienta utilizada para obtener información más acertada de las lluvias esperadas en determinado lugar, de acuerdo a esto se estudiaron dos estaciones meteorológicas Chivor y el Túnel, las cuales se encuentran ubicadas en el departamento de Boyacá.

Con la información suministrada por el Archivo Técnico del IDEAM se logró llevar a cabo el estudio de las estaciones ya mencionadas. Se realizó un proceso de análisis que permitió la identificación y organización de los datos con los cuales se aplicaron los modelos de distribución y las pruebas de bondad de ajuste, teniendo como resultado curvas IDF.

A partir de los resultados obtenidos, se puede aportar modelos de conducta para zonas cercanas que no cuentan con estaciones pluviográficas y que presenten regímenes climáticos similares.

INTRODUCCIÓN

Colombia está ubicada en la zona intertropical de nuestro planeta, lo cual conlleva a que presente diferentes climas en todas las regiones del país, Boyacá es un departamento el cual tiene gran diversidad de climas por su compleja topografía, encontrando montañas, valles estrechos y amplias llanuras. Por este motivo las lluvias son muy variables, tanto en intensidad como en distribución, presentando valores anuales muy bajos en algunas regiones, como valores elevados en otros lugares.

En nuestro país existen aproximadamente 3400 estaciones con pluviógrafo que se encuentran activas en este momento, establecidas por parte del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), y tan solo cerca de 100 estaciones poseen estudios y curvas que relacionan información pluvial.

Estos estudios suministran información en cuanto a crecidas de caudales, que permiten mejorar modelos de precipitación – escorrentía, con el fin de poder utilizar esa información y tomar decisiones en cuanto al diseño de obras civiles. Por esta razón es necesario conocer las intensidades de precipitación para diferentes periodos de retorno.

Para el adecuado desarrollo del proyecto este se realizó en el marco del convenio 008 de 2008 IDEAM-UDISTRITAL, donde se utilizó la información pluviográfica suministrada por tal institución, mediante el cual se pretende generar documentación indispensable en diseños y estudios ingenieriles, material que estará disponible en diversos institutos, entre ellos el IDEAM.

Por lo tanto, el presente documento tiene por objeto analizar la información pluviográfica para el diseño y construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), correspondiente a las estaciones de La copa y Valle grande en el departamento de Boyacá. Esta información debe ser organizada y analizada para luego aplicar distintas funciones de distribución de datos (Normal, Log- Normal, Pearson III y Gumbel). La selección del método adecuado para la construcción de las curvas IDF, está sujeta a la aplicación de tres diferentes pruebas de bondad de ajuste (Error cuadrático, Kolmogorov- Smirnov y Chi- cuadrada).

En el documento se describe paso a paso el proceso para la construcción de la curva IDF de la estación Chivor, ya que el proceso para la estación El Túnel, es exactamente el mismo, exceptuando el análisis y la organización de los datos.

El presente trabajo está organizado en 10 pasos consecutivos los cuales se presentaran ordenadamente de la siguiente manera. El primero corresponde a la definición del problema; en el segundo se justifica el abordaje de la problemática; en el tercero se enuncian los objetivos; en el cuarto se definen las categorías conceptuales y teóricas a partir de las cuales se desarrolla el proyecto, como lo son las curvas IDF, sus aplicaciones y los métodos de análisis estadístico; en el quinto se describe la metodología utilizada; en el sexto se despliega el procedimiento llevado a cabo para la construcción y cálculo de la ecuación y la curva IDF para cada una de las estaciones en estudio, mediante el método escogido durante el proceso; en el séptimo y octavo se encontrarán las ecuaciones y curvas IDF para cada una de las estaciones hidrometeorológicas objeto de estudio y el análisis de las mismas, los cuales son objetivo principal de este proyecto.

Posteriormente, se evalúa la hipótesis planteada de acuerdo con los resultados obtenidos en los pasos citados anteriormente y se realizan recomendaciones dirigidas a investigadores que tengan interés en realizar proyectos relacionados con el tema, esto con el fin de poner en práctica las experiencias y dichos resultados.

Para finalizar, se formulan conclusiones que evalúan el correcto desarrollo del proyecto y el adecuado cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de la investigación.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

El origen de las curvas IDF se dio en los años 30 (Bernard,1932), y a partir de ese momento se han desarrollado y construido mapas en distintas partes del mundo como lo son Estados Unidos, Irlanda, Australia, Chile, Argentina entre otros; Siendo una herramienta fundamental, en el diseño y planificación de estudios hidrológicos.²

En Colombia, en el 2005 la universidad de Pamplona y el IDEAM, por medio de un convenio de pasantías de estudiantes, elaboraron las curvas IDF para dos estaciones localizadas en el municipio de Cúcuta, Dpto. de Norte de Santander.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el semillero de investigación UDENS, en el año 2011 inicio el proceso de realización de curvas IDF como temática para la realización de trabajo de grado en modalidad de monografía.

1.2 FORMULACIÓN

Las estaciones meteorológicas Chivor y El Túnel del instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se encuentran ubicadas en el departamento de Boyacá, dichas estaciones no cuentan con curvas IDF; al realizar estas curvas serán de gran importancia puesto que servirán para el estudio y comportamiento de las precipitaciones en la zona, además de servir como soporte para adelantar obras civiles relacionadas con el área de hidrología e hidráulica.

1.3 DESCRIPCIÓN

En nuestro país existen aproximadamente 3400 estaciones con pluviógrafo que se encuentran activas en este momento, establecidas por parte del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), y tan solo cerca de 100 estaciones poseen estudios y curvas que relacionan información pluvial.

Este es un gran inconveniente en el momento de querer realizar estudios pluviográficos en diferentes áreas que se requiera de dicha información ya sea constructivo, ambiental, investigativo, entre otros.

² Regionalización de leyes IDF para el uso de modelos Hidrometeorológicos de estimación de caudales. Madrid, España; Universidad Politécnica de Madrid, documento técnico.

La universidad Distrital y el semillero de investigación UDENS, busca darle solución a la falta de información pluviográfica en el departamento de Boyacá, ya que existen sitios en los cuales no hay estaciones pluviográficas o no poseen ningún tipo de información pluvial, dicho proyecto se adelanta con jóvenes universitarios que realicen las curvas IDF, de dos estaciones en distintos municipios. Las curvas IDF resultantes de este proyecto investigativo, tendrán el propósito de aportar patrones que representan conductas de las lluvias, y así este resultado permita diseños confiables y eficientes para la ingeniería.

2. JUSTIFICACIÓN

La construcción de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) es una herramienta que es usada ampliamente en la ingeniería civil, brindando datos estadísticos los cuales permiten la evaluación de caudales de diseño, obras hidráulicas, gestión de recursos hídricos, en zonas urbanas y rurales. Un problema frecuente es la falta de estaciones que registren información de este tipo, esto se debe a la falta de recursos por parte del estado puesto que el mantenimiento de dichas estaciones tiene un elevado costo. Una alternativa para remediar este inconveniente es la estimación de curvas IDF a partir de información pluviométrica.

Analizando el comportamiento de las precipitaciones en las zonas donde se encuentran ubicadas las estaciones, se puede aportar modelos de conducta, y posiblemente con indicadores efectivos y eficientes para el diseño hidrológico.

En el departamento de Boyacá existen zonas donde no cuentan con estaciones pluviográficas, lo cual genera un gran inconveniente, puesto que no existe ningún registro de lluvias, el objetivo del proyecto de grado es dar una solución a este problema, junto con el semillero UDENS de la facultad tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se realizara la investigación de las estaciones asignadas (Chivor y el Túnel) y realizando las curvas IDF correspondientes a cada estación y de esta forma aportar registros a cada municipio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y estudiar las curvas IDF para las estaciones Chivor y el Túnel, en el departamento de Boyacá, con los datos de los pluviogramas.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar las precipitaciones máximas para las estaciones pluviográficas Chivor y el Túnel.
- Utilizar funciones de distribución de probabilidad, para el de ajuste de datos.
- Realizar las respectivas curvas IDF con ayuda de la programación en hojas de cálculo en Excel, logrando evitar errores de procedimiento.
- Analizar los resultados obtenidos y de esta manera entregar los datos correspondientes a cada estación con el fin de evaluar la validez de la información correspondiente.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ESTUDIOS DE PRECIPITACIÓN

El estudio de las precipitaciones es fundamental en cualquier estudio hidrológico de alguna zona, gracias a ello nos permite cuantificar los recursos hídricos constituyendo la principal entrada de agua a una cuenca. Además de esto nos permite tener conocimientos previos en el momento realizar cualquier obra civil y tener información valiosa para la gestión de este recurso el cual puede ser utilizado en diferentes ámbitos como lo puede ser agrícola, domestico, energéticos, etc.

Para tener un adecuado estudio de las precipitaciones es necesario conocer las intensidades de precipitación máxima, que pueden presentarse en distintos periodos de retorno. “La precipitación 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 hacerlo se realizan un gran número de observaciones, tomadas de las estaciones pluviográficas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior”³.

Como se cuenta con poca información de caudales, se presenta información pluviográfica en forma de intensidades, los cuales están registrados en estaciones pluviográficas que se encuentran instaladas en diferentes zonas del país.

4.2 CURVAS INTENSIDAD DURACION Y FRECUENCIA⁴

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

Muy ligado a las curvas, se encuentran otros elementos que son de gran relevancia, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento.

³ VEN TE, Chow. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw- Hill, 1994. 598 p.

⁴ Regionalización de leyes IDF para el uso de modelos hidrometereológicos de estimación de caudales. Madrid, España: Universidad de Madrid. Tesis de grado.

Para tener un concepto más claro de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, Chow et al (1994) define la intensidad como la tasa temporal de precipitación, lo que quiere decir que es la altura de agua de precipitación por unidad de tiempo (mm/hr ó pulg/hr), la cual se expresa como:

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

Siendo P la altura de agua de precipitación en mm o pulg, y Td la duración de la lluvia, expresada en hr.

Para analizar las relaciones intensidad-duración-frecuencia de las lluvias en estudio, se determina para los diferentes intervalos de duración de lluvias el tipo de ecuación y el número de parámetros la ecuación que mas se utiliza en hidrología es:

$$i = \frac{c}{(t+t_0)^n} \quad (1)$$

i: Intensidad de precipitación máxima, en mm/hora

t: Duración de lluvia, en minutos

t₀: Constante, en minutos

C y *n*: Son constantes (parámetros por definir)

Para relacionar a la constante C con el periodo de retorno T, expresado en años se emplea la siguiente ecuación:

$$C = KT^m \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación (2) en la ecuación (1), se obtiene como resultado la presente ecuación que será con la que se trabajara para poder identificar los diferentes parámetros de la ecuación:

$$i = \frac{KT^m}{(t+t_0)^n} \quad (3)$$

i = intensidad de precipitación máxima (mm/hr).

t = duración de la lluvia (min).

t₀ = constante (min).

C, *n*, *K* y *T* son constantes y parámetros por determinar.

En donde, C es calculado para cada periodo (en años). K es la pendiente de la gráfica C contra el valor de los periodos de retorno correspondientes. La constante t_o es el promedio de t_o calculados para cada duración de lluvia durante los periodos de retorno especificados.

En lugares donde se dispone de un pluviómetro en una estación, este solo podrá recolectar información de la intensidad media en 24 horas. Es de entender, que esta información puede inducir grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son en general las más intensas.

4.3 APLICACIÓN DE LAS CURVAS IDF

El uso de las curvas IDF se enmarcan en la estimación de crecidas de cuencas hidrográficas que tienen tiempos de concentración pequeños o de pequeña duración, y su utilidad principal es poder estimar la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en un lugar que no posee pluviógrafo, solamente pluviógrafos totalizadores que entregan precipitaciones diarias o lugares donde no existe información pluviométrica.

Las curvas (IDF) pueden aplicarse en 3 situaciones diferentes:

1. Conocer registros diarios totales de las precipitaciones únicamente.
2. Poseer información pluviográfica de la distribución temporal de la precipitación de la zona a estudiar.
3. No poseer ninguna información pluviográfica, dado que no exista.

Es de reconocer que a nivel nacional son escasos los estudios realizados con el diseño de las curvas IDF, siendo esta una herramienta vital para la planificación de la hidrología del país, ya que sirve como base en cualquier proyecto de diseño hidrológico que se quiera adelantar como puede ser un drenaje urbano, la generación de energía eléctrica, o el diseño de obras de ingeniería de regadíos. Para tal efecto se utiliza una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO APLICADO A CURVAS IDF⁵

4.4.1 Funciones de distribución de probabilidad

Montealegre plantea que “En estadística y probabilidad la distribución normal es una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales. Esta distribución es frecuentemente utilizada en las aplicaciones estadísticas.”⁶

Como su nombre lo indica es extensa su utilización, justificada por la frecuencia o normalidad con la que ciertos fenómenos tienden a parecerse en su comportamiento o distribución.

En estadística existen muchas funciones de distribución de probabilidad teóricas, en nuestro caso utilizaremos las funciones que mejor se adapten para dar la mejor solución posible. En hidrología las funciones de distribución de probabilidad más usadas son Normal, Log-normal, Pearson III y Gumbel; para precipitaciones máximas horarias o diarias la función de distribución que mejor se ajusta es Gumbel, por esta razón es la más utilizada en la construcción de las curvas IDF.

4.4.1.1 Distribución normal.

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

Donde μ y σ son, respectivamente, la media y la desviación estándar de la muestra. En este caso se aplican a los datos. Hasta el día de hoy, no se conoce analíticamente la integral de la ecuación (5), por lo que es necesario

⁵ Las ecuaciones y fórmulas fueron tomadas de: APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa, 1992. 304 p. y MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela colombiana de Ingeniería, 1995. 360p.

⁶ MONTEALEGRE, José Edgar. Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos. Bogotá. HIMAT, 1990. 45p

recurrir a métodos numéricos para evaluarla, para tal efecto se establece una variable estandarizada z :

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

Se debe determinar un $F(z)=F(x)$ aplicando la ecuación 6, ecuación a la cual se han calculados valores numéricamente y se encuentran en el anexo A.

$$F(x) = F(z) = \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz$$

La probabilidad de ocurrencia de una intensidad determinada está dada por:

$$P(X \geq x) = 1 - F(z) \quad (9)$$

4.4.1.2 Distribución Log-Normal.

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (10)$$

Donde, α y β son los parámetros de distribución, media y desviación estándar respectivamente de los logaritmos de la variable aleatoria. Esta función no es necesariamente simétrica.

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (11)$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (12)$$

En este caso se utiliza los mismos valores de z , $F(z)$ y la probabilidad de ocurrencia, utilizados en la función de distribución normal.

4.4.1.3 Distribución Pearson III

La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}}$$

En donde α_1 , β_1 y δ_1 son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta_1)$ es la función Gama.

Los parámetros α_1 , β_1 y δ_1 se evalúan, a partir de n datos medidos, a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\beta_1 = \left(\frac{2}{\gamma} \right) \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \frac{s}{\sqrt{\beta_1}} \quad (14)$$

$$\delta_1 = \bar{x} - \alpha_1 \beta_1 \quad (15)$$

El coeficiente de sesgo se define como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3 \ln}{s^3} \quad (16)$$

Sustituyendo

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \quad (17)$$

Se obtiene la función de distribución

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta_1-1} e^{-y} dy \quad (18)$$

Esta última es una función de distribución *ji* cuadrada con

$$v = 2\beta_1 \text{ Grados de libertad} \quad (19)$$

$$x^2 = 2y \quad (20)$$

4.4.1.4 Distribución Gumbel

Supóngase que se tienen N muestras, cada una de las cuales contiene n eventos. Si se selecciona el máximo x de los “n” eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad es:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Donde α y β son los parámetros de la función, para muestras grandes se calculan como:

$$\alpha = \frac{1.2825}{s}$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45 s$$

En muestras más pequeñas son representados por:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s} \quad (21)$$

$$\beta = \bar{x} - \mu_y/\alpha \quad (22)$$

Donde, σ_y y μ_y dependen del número de datos y son tomados del anexo B. La función de distribución para un x determinado es:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (23)$$

4.4.1.5 Distribución log-Gumbel

En esta función se reemplaza la variable x de la ecuación 23 por una función $w = f(x)$, de tal forma que $w = \ln x$, de esta forma la función de probabilidad

de Gumbel se transforma en la comúnmente denominada log-Gumbel. De esta forma la desviación estándar y el promedio se transforman en:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n} \quad (24) \quad S_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n-1}} \quad (25)$$

Para los datos σ_y y μ_y , se utilizan los mismos que hallamos en la función Gumbel:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S_w} \quad (26) \quad \beta = \bar{w} - \mu_y / \alpha \quad (27)$$

Al reemplazar los nuevos valores la función de distribución Log-Gumbel queda de la siguiente manera:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(\ln(x)-\beta)}} \quad (28)$$

4.4.2 Pruebas de bondad de ajuste⁷

En la teoría estadística, las pruebas de bondad del ajuste más conocidas son χ^2 , error cuadrático y la Kolmogorov- Smirnov.

4.4.2.1 Método del error cuadrático.

Es un método. Consiste en calcular, para cada función de distribución, el error cuadrático dado por:

$$c = \left[\sum_{i=1}^n (x_{e_i} - x_{o_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Donde x_{e_i} es el i-ésimo dato estimado y x_{o_i} es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución analizada. Primero debe calcularse el periodo de retorno de la siguiente manera:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (30)$$

Donde m, es el número de orden y n el número total de datos. Luego, los valores para X_e , son calculados aplicando la función de distribución aplicada inversa. A continuación se presentan las ecuaciones correspondientes a cada una de las funciones:

⁷ Tomado de APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa, 1992. 304 p.

Normal: $x = z\sigma + \mu$ (31)

Log-Normal: $x = e^{z\beta + \alpha}$ (32)

Pearson III: $x = y\alpha + \delta$ (33)

Gumbel: $x = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right)$ (34)

Log-Gumbel $x = e^{\left(\beta^{-1} / \alpha \ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right)}$ (35)

Dónde:

$$z = \frac{T-1}{T} \quad (36)$$

y = interpolación para un v y x^2 determinados, de la tabla B del anexo

Después de haber calculado los errores cuadráticos se dispone a observar cual es la función que presenta menor error cuadrático y de esta forma saber cuál es la más adecuada.

4.4.2.2 Prueba X^2

“La prueba X^2 es la más popular. Fue propuesta por Karl Pearson en 1900. Se utiliza cuando se quiere analizar la correlación entre dos variables cuyos valores son nominales y parte, de la comparación de las frecuencias absolutas del cruce de los valores, con los valores de las frecuencias esperados de forma teórica.”⁸ Para aplicar la prueba, se dividen los datos en intervalos de clase, posteriormente se calcula el parámetro estadístico:

$$D = \sum_{i=1}^k (\theta_i - \epsilon_i)^{\frac{2}{\epsilon_i}} \quad (37)$$

Donde θ_i , es el número observado de eventos en el intervalo i y ϵ_i es el número esperado de eventos en el mismo intervalo.

ϵ_i se calcula como:

⁸ Tomado de APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa, 1992. 304 p.

$$\epsilon_i = n[F(S_i) - F(I_i)] \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (38)$$

Donde $F(S_i)$ es la función de distribución de probabilidad en el límite superior del intervalo i , $F(I_i)$ es la misma función en el límite inferior y n es el número de eventos. Una vez calculado el parámetro D para cada función considerada, se determina el valor de la variable aleatoria con distribución χ^2 para un nivel de significancia α y unos grados de libertad:

$$v = k - 1 - m \quad (39)$$

Donde m es el número de parámetros estimados para cada función de distribución.

Para aceptar una función de distribución dada, se debe cumplir:

$$D \leq \chi^2 \quad (40)$$

El valor para χ^2 se obtiene del anexo C, para los diferentes grados de libertad obtenidos.

4.4.2.3 Prueba Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$, con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado del anexo D.

$$D = \text{máx} |F_o(x_m) - F(x_m)| \quad (41)$$

Dónde:

- (x_m) es el i -ésimo valor observado en la muestra (cuyos valores se han ordenado previamente de menor a mayor).
- $F_o(x_m)$ es un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_m .
- $F(x_m)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_m cuando la distribución que siguen los datos es cierta.

Esta prueba tiene ventaja sobre la X^2 de que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como

$$F_o(x_m) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad (42)$$

Donde m es el número de orden del dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos. Cuando se tiene los valores para cada función de distribución se escoge el mayor D de cada uno.

5. METODOLOGÍA

Para lograr la construcción de las curvas IDF correspondientes a los municipios de Chivor y Cuitiva, los cuales cuentan con estaciones pluviográficas conocidas como Chivor y El Túnel respectivamente, se inicia con la recopilación de la información pluviográfica de cada estación, cuya información se encuentra en el IDEAM; seguido a esto se realiza un análisis de la información y de esta forma seleccionar las intensidades máximas.

Al haber seleccionado los pluviogramas que presentan mayor intensidad de lluvia por año, se procede a analizar los eventos máximos de precipitación en intervalos de 10 minutos, y de esta forma obtener las alturas de precipitación para una serie de minutos determinada. Dicho proceso se repite en los eventos máximos de cada año y de cada estación.

Con la información recolectada se elabora una base de datos por cada estación. Con la base de datos completa se elabora una tabla resumen la cual contiene las mayores alturas de precipitación, para diferentes duraciones por año.

Con los datos obtenidos en la tabla resumen se analizan estadísticamente con los diferentes métodos nombrados (Normal, Log-Normal, Pearson III y Gumbel), con el fin de evaluar que tanto se aproximan los ajustes a la distribución teórica de probabilidad correspondiente a cada evento de precipitación estudiado, se emplean las pruebas de bondad de ajuste (error cuadrático, Kolmogorov Smirnov y Chi-cuadrado), con esta información se selecciona la función de probabilidad más adecuada de acuerdo con las pruebas que se le han realizado a los datos. Luego se realizara la selección de los periodos de retorno y se determinara la magnitud del evento máximo, por una duración determinada.

Para finalizar se construyen las curvas IDF para cada estación con el método que mejores resultados arrojo. Evaluando la hipótesis planteada y de acuerdo con los resultados obtenidos se generan los análisis de resultados, recomendaciones y conclusiones, la importancia para el departamento de Boyacá, en los municipios Chivor y Cuitiva.

6. PROCEDIMIENTO

6.1 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

6.1.1 Selección de Estaciones Pluviográficas

En varias zonas del país se cuenta con estaciones pluviográficas, en las cuales se debe analizar la información y generar documentos aptos para cualquier consulta en caso de ser necesarios, como lo puede ser la construcción de diferentes tipos de obras hidráulicas. En convenio con el semillero de la Universidad Distrital UDENS se está desarrollando un macro proyecto, el cual consiste en la regionalización de curvas IDF en el departamento de Boyacá.

Para el desarrollo de este proyecto se recolecta la información de dos estaciones ubicadas en el departamento de Boyacá.

- Nombre: Chivor
Código: 3506011
Categoría: PG
Coordenadas: 4°53'10" Norte – 73°22' Este
Altitud: 3000 m.s.n.m.
Departamento: Boyacá
Municipio: Chivor
Corriente: Chivor

- Nombre: El Túnel
Código: 35095030
Categoría: CO
Coordenadas: 5°34' Norte – 72°52' Este
Altitud: 3000 m.s.n.m.
Departamento: Boyacá
Municipio: Cuitiva
Corriente: Lago de Tota

En dicha selección se tuvieron en cuenta diferentes criterios como el tipo, la cantidad y la periodicidad de los datos, teniendo en cuenta los parámetros

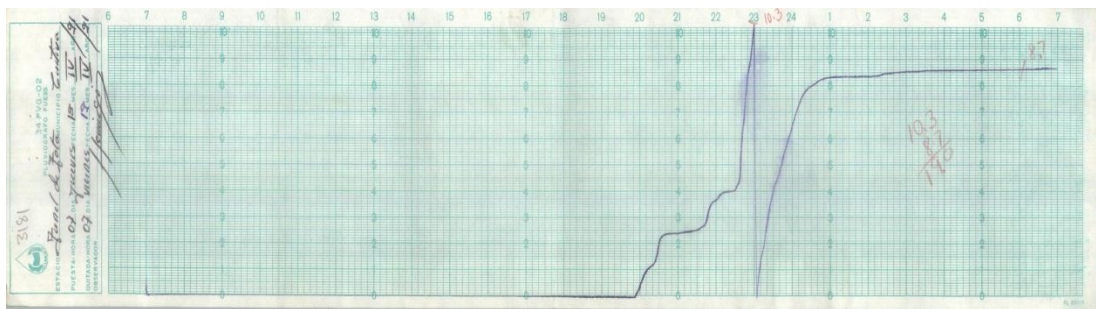
que se debía seguir para cada estación en las cuales se tuvieron periodos comprendidos entre 1992-2010 para la estación Chivor, y 1986-2004 para la estación El Túnel, además se recolecto solamente la información de las bandas que poseían mejor información estadística pluviográfica.

6.1.2 Recolección de la Información Pluviográfica

La información pluviográfica requerida para el desarrollo de este proyecto de investigación fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

El IDEAM brinda acceso a los registros pluviográficos, estos registros se encuentra en bandas de pluviografos los cuales contienen en registro de las precipitaciones por día, durante cada año transcurrido desde la instalación del pluviografo en el sitio hasta el último año recibido por el instituto. Para cada año se seleccionaron las bandas con mayores eventos de precipitación. (Ver Figura 1).

Figura 1 Banda pluviográfica estación El Túnel



Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Como se muestra en la figura (1) se realizó una selección cualitativa de todos los registros de precipitaciones de cada estación, mediante un procedimiento visual de los pluviogramas seleccionando los que presentaran mayores registros de intensidad, seleccionando en promedio 3 eventos por año y por cada estación.

6.2 PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULO DE CURVAS IDF

Luego de haber seleccionado la información, esta se debe analizar para poder determinar el incremento de lluvia en mm, cada 10 minutos durante la duración total de la precipitación. Para cada banda pluviográfica, los incrementos se registran en hojas formuladas de Excel como la siguiente:

Tabla 1 Formato de registro de incrementos de lluvia por día

| SEPTIEMBRE 12 DE 1988 | | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| minutos | | | | | | | | |
| hora | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| 07:00 | 1 | | | | | | | |
| 07:10 | 1 | 2 | | | | | | |
| 07:20 | 0,7 | 1,7 | 2,7 | | | | | |
| 07:30 | 0,5 | 1,2 | 2,2 | | | | | |
| 07:40 | 0,4 | 0,9 | 1,6 | | | | | |
| 07:50 | 0,4 | 0,8 | 1,3 | 4 | | | | |
| 08:00 | 0,5 | 0,9 | 1,3 | 3,5 | | | | |
| 08:10 | 0,6 | 1,1 | 1,5 | 3,1 | | | | |
| 08:20 | 0,6 | 1,2 | 1,7 | 3 | | | | |
| 08:30 | 0,3 | 0,9 | 1,5 | 2,8 | | | | |
| 08:40 | 0,4 | 0,7 | 1,3 | 2,8 | | | | |
| 08:50 | 0,2 | 0,6 | 0,9 | 2,6 | 6,6 | | | |
| 09:00 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 2,2 | 5,7 | | | |
| 09:10 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1,7 | 4,8 | | | |
| 09:20 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1,2 | 4,2 | | | |
| 09:30 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1 | 3,8 | | | |
| 09:40 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 3,4 | | | |
| 09:50 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 3,1 | 7,1 | | |
| 10:00 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 2,6 | 6,1 | | |
| 10:10 | 0 | 0 | 0,1 | 0,3 | 2 | 5,1 | | |
| 10:20 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 1,4 | 4,4 | | |
| 10:30 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 1,2 | 4 | | |
| 10:40 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 3,7 | | |
| 10:50 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 3,4 | 7,4 | |
| 11:00 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 3 | 6,5 | |
| 11:10 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 2,5 | 5,6 | |
| 11:20 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 0,8 | 2 | 5 | |
| 11:30 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 1,7 | 4,5 | |
| 11:40 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 4,2 | |
| 11:50 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 1,2 | 3,8 | |
| 12:00 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 3,4 | |
| 12:10 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,9 | 1,2 | 2,9 | |
| 12:20 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 1,1 | 2,3 | |
| 12:30 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,9 | 1,1 | 2,1 | |
| 12:40 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | 1,1 | 1,7 | |
| 12:50 | 0 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1 | 1,5 | 8,1 |
| 13:00 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 7,2 |
| 13:10 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 1,5 | 6,3 |

En la tabla 1 se organizan los valores con el propósito de ir seleccionando para cada año los valores máximos de precipitación para tiempos de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360 minutos. En la tabla 2 se muestran los eventos de precipitación mayores para los años estudiados de la estación El Túnel.

Tabla 2 Precipitaciones máximas anuales Estación El Túnel

| PRECIPITACIONES MAXIMAS | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| minutos | | | | | | | | |
| año | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| 1986 | 1,3 | 2,2 | 3,3 | 4,7 | 7,7 | 9,7 | 12,5 | 18,5 |
| 1987 | 2,5 | 3,7 | 4,6 | 6,7 | 10,2 | 15,4 | 16,8 | 17,3 |
| 1988 | 1,5 | 2,7 | 3,9 | 6,4 | 11 | 11,9 | 12,9 | 21,8 |
| 1989 | 4 | 7,3 | 8,4 | 11,7 | 18,7 | 23,5 | 24,6 | 24,7 |
| 1990 | 4,9 | 9,6 | 11,6 | 17,3 | 21,2 | 24,4 | 27,7 | 30 |
| 1991 | 2,5 | 4,5 | 6,3 | 10,3 | 14,3 | 15,8 | 16,2 | 17,8 |
| 1992 | 2,5 | 3,8 | 5 | 9,2 | 14,2 | 16,5 | 17,7 | 17,9 |
| 1993 | 5 | 7,4 | 9,3 | 9,4 | 13,1 | 15,2 | 19,3 | 20,6 |
| 1994 | 2,2 | 4 | 5,4 | 8,4 | 13,4 | 20,2 | 25,3 | 29,3 |
| 1995 | 6,9 | 12,9 | 16,9 | 23,1 | 35,7 | 39,2 | 40,4 | 41,5 |
| 1996 | 5 | 10 | 13 | 15,9 | 21,6 | 30,6 | 36,3 | 36,9 |
| 1997 | 5,9 | 9,3 | 12,8 | 15,4 | 24,4 | 27,3 | 27,4 | 27,4 |
| 1998 | 1,4 | 2,7 | 3,9 | 7,2 | 11,5 | 13,1 | 15,3 | 18,5 |
| 1999 | 9,7 | 12,2 | 16,4 | 29,1 | 39,4 | 43,1 | 45,7 | 46,2 |
| 2000 | 3,5 | 4,8 | 5,9 | 8,5 | 12,5 | 14,2 | 15,5 | 21,8 |
| 2001 | 4,1 | 5,4 | 6,1 | 8,5 | 14,9 | 15,6 | 18,9 | 21,6 |
| 2002 | 2,5 | 3,7 | 4,8 | 6,4 | 11,9 | 12,8 | 13 | 13,6 |
| 2003 | 1,5 | 2,7 | 3,7 | 5,8 | 7,8 | 9,8 | 12,6 | 17,9 |
| 2004 | 1,2 | 1,7 | 2,4 | 3,8 | 6,8 | 9,1 | 12,3 | 16,8 |

Con los datos registrados en la tabla 2 se obtienen los valores para las intensidades máximas anuales en mm/hr. Para poder realizar los diferentes cálculos es necesario disponer de los datos en milímetros por hora (mm/h), lo cual se consigue aplicando la siguiente ecuación:

$$i = \frac{P}{t} = \frac{P}{t(\text{minutos})} * \frac{60 \text{ min}}{1h} \quad (43)$$

Al aplicar la ecuación 38 a los datos de la tabla 2, se obtienen las intensidades máximas. En donde se ordenan de mayor a menor cada una de las duraciones, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Intensidades máximas ordenadas de forma decreciente estación el Túnel.

| INTESIDADES MÁXIMAS ORDENADAS | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| año | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| 1 | 58,2 | 38,7 | 33,8 | 29,1 | 19,7 | 14,37 | 11,43 | 7,70 |
| 2 | 41,4 | 36,6 | 32,8 | 23,1 | 17,85 | 13,07 | 10,1 | 6,92 |
| 3 | 35,4 | 30 | 26 | 17,3 | 12,2 | 10,2 | 9,075 | 6,15 |
| 4 | 30 | 28,8 | 25,6 | 15,9 | 10,8 | 9,1 | 6,925 | 5,00 |
| 5 | 30 | 27,9 | 23,2 | 15,4 | 10,6 | 8,133 | 6,85 | 4,88 |
| 6 | 29,4 | 22,2 | 18,6 | 11,7 | 9,35 | 7,833 | 6,325 | 4,57 |
| 7 | 24,6 | 21,9 | 16,8 | 10,3 | 7,45 | 6,733 | 6,15 | 4,12 |
| 8 | 24 | 16,2 | 12,6 | 9,4 | 7,15 | 5,5 | 4,825 | 3,63 |
| 9 | 21 | 14,4 | 12,2 | 9,2 | 7,1 | 5,267 | 4,725 | 3,63 |
| 10 | 15 | 13,5 | 11,8 | 8,5 | 6,7 | 5,2 | 4,425 | 3,60 |
| 11 | 15 | 12 | 10,8 | 8,5 | 6,55 | 5,133 | 4,2 | 3,43 |
| 12 | 15 | 11,4 | 10 | 8,4 | 6,25 | 5,067 | 4,05 | 3,08 |
| 13 | 15 | 11,1 | 9,6 | 7,2 | 5,95 | 4,733 | 3,875 | 3,08 |
| 14 | 13,2 | 11,1 | 9,2 | 6,7 | 5,75 | 4,367 | 3,825 | 2,98 |
| 15 | 9 | 8,1 | 7,8 | 6,4 | 5,5 | 4,267 | 3,25 | 2,98 |
| 16 | 9 | 8,1 | 7,8 | 6,4 | 5,1 | 3,967 | 3,225 | 2,97 |
| 17 | 8,4 | 8,1 | 7,4 | 5,8 | 3,9 | 3,267 | 3,15 | 2,88 |
| 18 | 7,8 | 6,6 | 6,6 | 4,7 | 3,85 | 3,233 | 3,125 | 2,80 |
| 19 | 7,2 | 5,1 | 4,8 | 3,8 | 3,4 | 3,033 | 3,075 | 2,27 |
| μ | 21,505 | 17,463 | 15,126 | 10,937 | 8,166 | 6,446 | 5,400 | 4,036 |
| σ | 13,485 | 10,441 | 8,982 | 6,570 | 4,443 | 3,251 | 2,500 | 1,494 |

Con los resultados obtenidos en la tabla 3, se aplican los diferentes métodos de ajuste a una función de distribución de probabilidad.

6.3 AJUSTE CON UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD

La aplicación de cada función de probabilidad se realiza para cada duración (10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360) minutos. A continuación se describirá el proceso realizado para las intensidades máximas de precipitación en para una duración D= 10 min.

6.3.1 Distribución normal.

Para comenzar con este proceso se debe iniciar calculando la media (ecuación 6) y la desviación estándar (ecuación 7)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{19} x_i}{19} = 21.51$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} (x_i - 21.51)^2}{19-1}} = 13.49$$

De esta forma las variables μ y σ son, respectivamente, 21.51 y 13.49.

Para cada dato de intensidad máxima registrado en cada uno de los años evaluados (X_i), se calcula una variable z , por medio de la ecuación (8).

$$i = 58.2$$
$$Z = \frac{58.2 - 21.51}{13.49} = 2.721$$

En la tabla 1 del Anexo D, se muestran los valores para $F(z)$. Con ésta es posible calcular la función evaluada en un valor z anteriormente calculada.

Para el ejemplo anterior donde:

$$i = 58.2$$
$$Z = 2.721$$

La función $F(z)$ indica la probabilidad de que un evento de precipitación X sea menor o igual que 58.2 mm/hr.

Para calcular la probabilidad de que un evento X sea mayor o igual a 58.2 mm/hr se utiliza la ecuación (9).

$$P = (X \geq 58.2) = 1 - 0.997 = 0.003$$

De la misma forma en que se explicó anteriormente se calculan z , $F(z)$, $P(X \leq X_i)$ y $P(X \geq X_i)$, para cada uno de los eventos máximos registrados para cada año.

Los resultados correspondientes a este procedimiento se muestran en la tabla (4).

Tabla 4. Resultados de aplicación función de distribución Normal. D=10min.

| DISTRIBUCION NORMAL | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|----------|
| n=19 | 10 MIN | | | |
| año | x | z | f(z) | P(X ≥ x) |
| 1 | 58,20 | 2,7211 | 0,997 | 0,0033 |
| 2 | 41,40 | 1,4753 | 0,9299 | 0,0701 |
| 3 | 35,40 | 1,0304 | 0,8486 | 0,1514 |
| 4 | 30,00 | 0,6299 | 0,7356 | 0,2644 |
| 5 | 30,00 | 0,6299 | 0,7356 | 0,2644 |
| 6 | 29,40 | 0,5854 | 0,7209 | 0,2791 |
| 7 | 24,60 | 0,2295 | 0,5908 | 0,4092 |
| 8 | 24,00 | 0,185 | 0,5734 | 0,4266 |
| 9 | 21,00 | -0,037 | 0,4851 | 0,5149 |
| 10 | 15,00 | -0,482 | 0,3148 | 0,6852 |
| 11 | 15,00 | -0,482 | 0,3148 | 0,6852 |
| 12 | 15,00 | -0,482 | 0,3148 | 0,6852 |
| 13 | 15,00 | -0,482 | 0,3148 | 0,6852 |
| 14 | 13,20 | -0,616 | 0,269 | 0,7310 |
| 15 | 9,00 | -0,927 | 0,1769 | 0,8231 |
| 16 | 9,00 | -0,927 | 0,1769 | 0,8231 |
| 17 | 8,40 | -0,972 | 0,1656 | 0,8344 |
| 18 | 7,80 | -1,016 | 0,1547 | 0,8453 |
| 19 | 7,20 | -1,061 | 0,1444 | 0,8556 |

6.3.2 Distribución Log-Normal.

En este proceso también debemos calcular la media (ecuación 11) y la desviación estándar (ecuación 12).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{19} x_i}{19} = 2.89 \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} (x_i - 21.51)^2}{19-1}} = 0.60$$

De esta forma las variables α y β son, respectivamente, 2.89 y 0.60.

Para cada dato de intensidad máxima registrada en cada uno de los años evaluados X_i , se calcula una variable estandarizada z , por medio de la (ecuación 8).

$$Z = \frac{\ln 58.20 - 2.89}{0.60} = 1.96$$

En la tabla 1 del anexo, se muestran los valores para $F(z)$. Con ésta es posible calcular la función evaluada en un valor z anteriormente calculada.

Para este ejemplo donde:

$$i = 58.2$$

$$Z = 2.721$$

Se identifica de la tabla 1 del anexo: $F(z) = 0.975$

La función $F(z)$ indica la probabilidad de que un evento de precipitación X sea menor o igual que 58.20 mm/hr.

De esta forma para poder calcular la probabilidad de que un evento X sea mayor o igual a 58.2 mm/hr:

$$P = (X \geq 58.2) = 1 - 0.975$$

De igual forma se calculan z , $F(z)$, $P(x \leq x_i)$ y $P(x \geq x_i)$, para cada uno de los eventos máximos registrados para cada año, los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de función de distribución Log Normal.
D=10min.

| DISTRIBUCION LOGNORMAL | | | | | | |
|------------------------|----------|--------|---------|--------|----------|-----------|
| 10 MIN | | | | | | |
| ln x | α | | β | Z | f(z) | P(X ≥ x) |
| 4,064 | 2,891 | 0,0724 | 0,598 | 1,9601 | 0,97501 | 0,0249904 |
| 3,723 | 2,891 | 0,0365 | | 1,39 | 0,917886 | 0,0821145 |
| 3,567 | 2,891 | 0,024 | | 1,13 | 0,870628 | 0,1293716 |
| 3,401 | 2,891 | 0,0137 | | 0,85 | 0,803114 | 0,1968859 |
| 3,401 | 2,891 | 0,0137 | | 0,85 | 0,803114 | 0,1968859 |
| 3,381 | 2,891 | 0,0126 | | 0,82 | 0,793618 | 0,2063821 |
| 3,203 | 2,891 | 0,0051 | | 0,52 | 0,698883 | 0,3011166 |
| 3,178 | 2,891 | 0,0043 | | 0,48 | 0,684362 | 0,3156382 |
| 3,045 | 2,891 | 0,0012 | | 0,26 | 0,601335 | 0,3986649 |
| 2,708 | 2,891 | 0,0018 | | -0,31 | 0,380019 | 0,6199807 |
| 2,708 | 2,891 | 0,0018 | | -0,31 | 0,380019 | 0,6199807 |
| 2,708 | 2,891 | 0,0018 | | -0,31 | 0,380019 | 0,6199807 |
| 2,708 | 2,891 | 0,0018 | | -0,31 | 0,380019 | 0,6199807 |
| 2,58 | 2,891 | 0,0051 | | -0,52 | 0,301868 | 0,6981321 |
| 2,197 | 2,891 | 0,0253 | | -1,16 | 0,123227 | 0,8767727 |
| 2,197 | 2,891 | 0,0253 | | -1,16 | 0,123227 | 0,8767727 |
| 2,128 | 2,891 | 0,0306 | | -1,27 | 0,101281 | 0,8987194 |
| 2,054 | 2,891 | 0,0368 | | -1,40 | 0,081038 | 0,9189616 |
| 1,974 | 2,891 | 0,0442 | | -1,53 | 0,062777 | 0,9372227 |

6.3.3 Distribución Pearson III.

Para esta función de distribución de datos es indispensable calcular los valores de los parámetros α_1 , β_1 , y δ_1 . Esta función se calcula para los datos X_i por medio de la (ecuación 13).

Se calcula el coeficiente de sesgo, basándose en la ecuación (16).

$$\gamma = \sum_{i=1}^{19} \frac{(x_i)^3}{s^3} = \frac{19}{s^3} = 1.61$$

Los parámetros β_1 , α_1 y δ_1 , son dependientes entre ellos, se calculan por medio de las ecuaciones 13, 14 y 15, respectivamente.

$$\beta_1 = \left(\frac{2}{1.61}\right)^2 = 1.54$$

$$\alpha_1 = \frac{13.49}{\sqrt{1.54}} = 10.86$$

$$\delta_1 = 21.51 - (1.54 * 10.86) = 4.77$$

La variable estandarizada y , se calcula para cada dato registrado en cada uno de los años estudiados; esta se puede obtener de la ecuación 17:

$$y = \frac{58.20 - 4.77}{10.86} = 4.92$$

Los valores para X^2 y los grados de libertad v , están dados por las ecuaciones (20) y (19), respectivamente:

$$X^2 = (4.92) * 2 = 9.84$$

$$v = 2 * 1.54 = 3.08$$

Después de haber calculado los valores para X^2 y v , se puede calcular el valor de $F(y)$ mediante la estimación de la tabla 3 del anexo A.

La función indica la probabilidad de que un evento de precipitación X sea menor o igual que 58.20 mm/hr.

Este procedimiento se repite para cada uno de los años estudiados, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de función de distribución Pearson III. D=10min.

| DISTRIBUCION PEARSON III | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|---------|----------|----------|-------|-------|------|-------------|---------------|
| 10 MIN | | | | | | | | | |
| | γ | β | α | δ | y_i | x_2 | v | $f(x)=f(z)$ | $P(X \geq x)$ |
| 1,060 | 1,61 | 1,54 | 10,86 | 4,77 | 4,92 | 9,84 | 3,08 | 0,98 | 0,02 |
| 0,169 | | | | | 3,37 | 6,74 | 3,08 | 0,92 | 0,08 |
| 0,058 | | | | | 2,82 | 5,64 | 3,08 | 0,87 | 0,13 |
| 0,013 | | | | | 2,32 | 4,65 | 3,08 | 0,80 | 0,20 |
| 0,013 | | | | | 2,32 | 4,65 | 3,08 | 0,80 | 0,20 |
| 0,011 | | | | | 2,27 | 4,54 | 3,08 | 0,79 | 0,21 |
| 0,001 | | | | | 1,83 | 3,65 | 3,08 | 0,70 | 0,30 |
| 0,000 | | | | | 1,77 | 3,54 | 3,08 | 0,68 | 0,32 |
| 0,000 | | | | | 1,49 | 2,99 | 3,08 | 0,61 | 0,39 |
| 0,006 | | | | | 0,94 | 1,88 | 3,08 | 0,40 | 0,60 |
| 0,006 | | | | | 0,94 | 1,88 | 3,08 | 0,40 | 0,60 |
| 0,006 | | | | | 0,94 | 1,88 | 3,08 | 0,40 | 0,60 |
| 0,006 | | | | | 0,94 | 1,88 | 3,08 | 0,40 | 0,60 |
| 0,012 | | | | | 0,78 | 1,55 | 3,08 | 0,33 | 0,67 |
| 0,042 | | | | | 0,39 | 0,78 | 3,08 | 0,15 | 0,85 |
| 0,042 | | | | | 0,39 | 0,78 | 3,08 | 0,15 | 0,85 |
| 0,048 | | | | | 0,33 | 0,67 | 3,08 | 0,12 | 0,88 |
| 0,055 | | | | | 0,28 | 0,56 | 3,08 | 0,09 | 0,91 |
| 0,063 | | | | | 0,22 | 0,45 | 3,08 | 0,07 | 0,93 |

6.3.4. Distribución Gumbel.

Para la aplicación de esta función se calculan, inicialmente, los parámetros α y β de la función, teniendo en cuenta las ecuaciones (21) y (22), correspondientemente, ya que es una muestra pequeña.

De la tabla 4 del anexo, se estiman los valores para μ_y y σ_y , basándose en los años registrados e interpolando, de ser necesario. En nuestro caso tomaremos 19 años ya que son el número de años que tenemos:

$$\mu_y = 0.521$$

$$\sigma_y = 1.054$$

$$\alpha = \frac{1.054}{13.49} = 0.078$$

$$\beta = 21.51 - \frac{0.521}{0.078} = 14.84$$

Para cada uno de los eventos de precipitación registrados por cada año, se evalúa $F(x)$ utilizando la ecuación (23):

$$F(x) = e^{-e^{-0.078(58.2-14.84)}} = 0.9669$$

La función $F(x)$ indica la probabilidad de que un evento de precipitación X sea menor o igual que 58.2 mm/hr.

Este proceso se repetirá para cada dato de los años estudiados, obteniendo los resultados que presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de función de distribución Gumbel. D=10min.

| DISTRIBUCION GUMBEL | | | | | |
|---------------------|------------|----------|---------|-------------|---------------|
| 10 MIN | | | | | |
| μ_y | σ_y | α | β | $f(x)=f(z)$ | $P(X \geq x)$ |
| 0,521 | 1,054 | 0,078 | 14,84 | 0,9669 | 0,0331 |
| | | | | 0,8822 | 0,1178 |
| | | | | 0,8185 | 0,1815 |
| | | | | 0,7367 | 0,2633 |
| | | | | 0,7367 | 0,2633 |
| | | | | 0,7260 | 0,2740 |
| | | | | 0,6275 | 0,3725 |
| | | | | 0,6136 | 0,3864 |
| | | | | 0,5392 | 0,4608 |
| | | | | 0,3726 | 0,6274 |
| | | | | 0,3726 | 0,6274 |
| | | | | 0,3726 | 0,6274 |
| | | | | 0,3726 | 0,6274 |
| | | | | 0,3210 | 0,6790 |
| | | | | 0,2063 | 0,7937 |
| | | | | 0,2063 | 0,7937 |
| | | | | 0,1913 | 0,8087 |
| | | | | 0,1767 | 0,8233 |
| | | | | 0,1626 | 0,8374 |

6.3.5 Distribución Log-Gumbel

Para esta distribución se debe calcular nuevamente la distribución estándar y el promedio de los datos, ya que la función Gumbel presenta un cambio; estos datos los conseguimos mediante las ecuaciones (24) y (25) respectivamente:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^{19} \ln(58.20)}{19} = 2.89 \qquad S_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} (4.06-2.89)^2}{19-1}} = 0.61$$

Después de obtener estos resultados procedemos a estimar los valores de μ_y y σ_y , dichos valores los encontramos en la tabla 4 del anexo, en nuestro caso utilizaremos 19 años siendo el número de años que tenemos:

$$\mu_y = 0.521$$

$$\sigma_y = 1.054$$

A partir de estos datos y utilizando las ecuaciones (26) y (27) respectivamente obtenemos los datos α y β :

$$\alpha = \frac{1.054}{0.61} = 1.715 \qquad \beta = 2.89 - \left(\frac{0.521}{1.715}\right) = 2.587$$

Para cada uno de los eventos de precipitación registrados por cada año, se evalúa $F(x)$ utilizando la ecuación (28):

$$F(x) = e^{-e^{-1.715(\ln(4.06-2.587))}} = 0.9237$$

Esta función indica la probabilidad de que un evento de precipitación X sea menor o igual que 58.20 mm/hr.

El proceso anterior se repite para cada uno de los años estudiados, en la tabla número 8 se presentan los datos y resultados obtenidos para una duración de 10 min.

Tabla 8 Resultados función de distribución Log-Gumbel.

| DISTRIBUCION LOG GUMBEL | | | | | | |
|-------------------------|-------|----------|----------|---------|-----------|----------|
| 10 MIN | | | | | | |
| ln x | μ | σ | α | β | f(x)=f(z) | P(X ≥ x) |
| 4,06 | 2,89 | 0,6149 | 1,7148 | 2,5868 | 0,92365 | 0,076 |
| 3,72 | | | | | 0,86725 | 0,133 |
| 3,57 | | | | | 0,83003 | 0,170 |
| 3,40 | | | | | 0,7808 | 0,219 |
| 3,40 | | | | | 0,7808 | 0,219 |
| 3,38 | | | | | 0,77402 | 0,226 |
| 3,20 | | | | | 0,70628 | 0,294 |
| 3,18 | | | | | 0,69574 | 0,304 |
| 3,04 | | | | | 0,63373 | 0,366 |
| 2,71 | | | | | 0,44388 | 0,556 |
| 2,71 | | | | | 0,44388 | 0,556 |
| 2,71 | | | | | 0,44388 | 0,556 |
| 2,71 | | | | | 0,44388 | 0,556 |
| 2,58 | | | | | 0,36375 | 0,636 |
| 2,20 | | | | | 0,14223 | 0,858 |
| 2,20 | | | | | 0,14223 | 0,858 |
| 2,13 | | | | | 0,11133 | 0,889 |
| 2,05 | | | | | 0,08269 | 0,917 |
| 1,97 | | | | | 0,0573 | 0,943 |

Cada una de las funciones de distribución de datos explicadas anteriormente debe ser evaluada para cada una de las duraciones trabajadas (20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360), para los 19 años correspondientes a la estación El Túnel. En la tabla 8 se muestran los resultados generados de todas las funciones aplicadas para la D=10 min:

Tabla 9 Ajuste de probabilidad de datos D=10 min

| DURACION 10 MIN | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| Intensidad | Normal f(x)=f(z) | Log-Normal f(x)=f(z) | Pearson III f(x)=f(z) | Gumbel f(x)=f(z) | Log-Gumbel f(x)=f(z) |
| 58,2 | 0,997 | 0,975 | 0,980 | 0,967 | 0,924 |
| 41,4 | 0,930 | 0,918 | 0,920 | 0,882 | 0,867 |
| 35,4 | 0,849 | 0,871 | 0,870 | 0,818 | 0,830 |
| 30 | 0,736 | 0,803 | 0,800 | 0,737 | 0,781 |
| 30 | 0,736 | 0,803 | 0,800 | 0,737 | 0,781 |
| 29,4 | 0,721 | 0,794 | 0,791 | 0,726 | 0,774 |
| 24,6 | 0,591 | 0,699 | 0,698 | 0,627 | 0,706 |
| 24 | 0,573 | 0,684 | 0,685 | 0,614 | 0,696 |
| 21 | 0,485 | 0,601 | 0,607 | 0,539 | 0,634 |
| 15 | 0,315 | 0,380 | 0,403 | 0,373 | 0,444 |
| 15 | 0,315 | 0,380 | 0,403 | 0,373 | 0,444 |
| 15 | 0,315 | 0,380 | 0,403 | 0,373 | 0,444 |
| 15 | 0,315 | 0,380 | 0,403 | 0,373 | 0,444 |
| 13,2 | 0,269 | 0,302 | 0,330 | 0,321 | 0,364 |
| 9 | 0,177 | 0,123 | 0,146 | 0,206 | 0,142 |
| 9 | 0,177 | 0,123 | 0,146 | 0,206 | 0,142 |
| 8,4 | 0,166 | 0,101 | 0,120 | 0,191 | 0,111 |
| 7,8 | 0,155 | 0,081 | 0,094 | 0,177 | 0,083 |
| 7,2 | 0,144 | 0,063 | 0,070 | 0,163 | 0,057 |

6.4 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

Una vez se han aplicado las funciones de distribución a los datos, se procede a evaluar qué función se ajusta de mejor manera para trabajar la curva IDF. En este caso, se hace según los resultados generados en tres pruebas de bondad de ajuste (Error cuadrático, Kolmogorov- Smirnov y Chi- Cuadrado).

6.4.1 Método Error Cuadrático.

Para aplicar esta prueba se requiere calcular un periodo de retorno, El cual conseguimos por medio de la ecuación (25):

Con $m=1$ y $n=19$, entonces:

$$T = \frac{19 + 1}{1} = 20$$

Esta ecuación aplica para cada uno de los números de orden, los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 10. Periodos de retorno para Prueba error cuadrático. D=10min

| año | x (mm/h) | T años |
|-----|----------|--------|
| 1 | 58,2 | 20 |
| 2 | 41,4 | 10,00 |
| 3 | 35,4 | 6,67 |
| 4 | 30 | 5,00 |
| 5 | 30 | 4,00 |
| 6 | 29,4 | 3,33 |
| 7 | 24,6 | 2,86 |
| 8 | 24 | 2,50 |
| 9 | 21 | 2,22 |
| 10 | 15 | 2,00 |
| 11 | 15 | 1,82 |
| 12 | 15 | 1,67 |
| 13 | 15 | 1,54 |
| 14 | 13,2 | 1,43 |
| 15 | 9 | 1,33 |
| 16 | 9 | 1,25 |
| 17 | 8,4 | 1,18 |
| 18 | 7,8 | 1,11 |
| 19 | 7,2 | 1,05 |

Posteriormente se calcula los valores de X_e para cada función de distribución aplicada. Por ejemplo para un $m=1$ y $n=19$, se calculan los siguientes valores para cada una de las funciones de distribución:

Se utiliza la ecuación (30):

$$Z = \frac{20 - 1}{20}$$

-Normal: se aplica la ecuación (31):

$$X = \left(\frac{20-1}{20}\right) * (13.49) + 21.51 = 43.7 \text{ mm/h}$$

-Log- Normal: se aplica la ecuación (32):

$$x = e^{\left(\frac{20-1}{20}\right) * (0.60) + 2.89} = 48.19 \text{ mm/h}$$

-Pearson III: para una probabilidad $X^2 = 9.84$ y un valor de grados de libertad $v = 3.08$, se resuelve la ecuación (33).

$$X = Y(\alpha) + (\delta)$$

-Gumbel: esta función se aplica a los X_e generados por la ecuación (34)

$$X = 14.84 - \frac{1}{0.078} \text{LnLn} \left(\frac{20}{20-1} \right) = 52.82 \text{ mm/h}$$

-Log-Gumbel: se aplica la ecuación (35).

$$x = e^{\left(14.84 - 1/0.078 \text{lnln} \left(\frac{20}{20-1} \right) \right)} = 75.10 \text{ mm/h}$$

Después de haber calculado el valor de X_e para cada dato anual de las funciones aplicadas, se aplica la ecuación (22) a los valores hallados correspondientes a cada función:

Por ejemplo, para la función Gumbel el error cuadrático está dado por:

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^{19} (X_{ei} - X_{oi})^2} = 12.29$$

Los valores utilizados para hallar la sumatoria anterior, en donde se elige como la función más apropiada la que presente en menor valor de C y los valores del error cuadrático correspondientes a las demás funciones se encuentran consignados en la tabla 11,

Tabla 11. Valores para la prueba de error cuadrático. D=10 min.

| PRUEBA ERROR CUADRATICO MINIMO | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|
| 10 MIN | | | | | | | | | | | | |
| AÑO | T Años | X _o (mm/h) | NORMAL | | LOG-NORMAL | | PEARSON III | | GUMBEL | | LOG-GUMBEL | |
| | | | X _e (mm/h) | (X _e -X _o) ² | X _e (mm/h) | (X _e -X _o) ² | X _e (mm/h) | (X _e -X _o) ² | X _e (mm/h) | (X _e -X _o) ² | X _e (mm/h) | (X _e -X _o) ² |
| 1 | 20 | 58,2 | 43,686 | 210,643 | 48,193 | 100,146 | 47,21 | 120,753 | 52,82 | 28,894 | 75,10 | 285,654 |
| 2 | 10 | 41,4 | 38,787 | 6,827 | 38,775 | 6,888 | 38,72 | 7,183 | 43,62 | 4,920 | 49,36 | 63,304 |
| 3 | 6,667 | 35,4 | 35,482 | 0,007 | 33,485 | 3,667 | 33,64 | 3,080 | 38,07 | 7,155 | 38,33 | 8,606 |
| 4 | 5 | 30 | 32,855 | 8,149 | 29,800 | 0,040 | 29,98 | 0,001 | 34,02 | 16,162 | 31,86 | 3,472 |
| 5 | 4 | 30 | 30,601 | 0,361 | 26,964 | 9,220 | 27,08 | 8,528 | 30,77 | 0,595 | 27,48 | 6,371 |
| 6 | 3,333 | 29,4 | 28,577 | 0,677 | 24,647 | 22,588 | 24,67 | 22,363 | 28,02 | 1,900 | 24,24 | 26,640 |
| 7 | 2,857 | 24,6 | 26,701 | 4,416 | 22,679 | 3,691 | 22,60 | 4,010 | 25,61 | 1,014 | 21,71 | 8,341 |
| 8 | 2,5 | 24 | 24,922 | 0,850 | 20,957 | 9,262 | 20,77 | 10,450 | 23,43 | 0,328 | 19,66 | 18,854 |
| 9 | 2,222 | 21 | 23,200 | 4,839 | 19,415 | 2,513 | 19,12 | 3,532 | 21,42 | 0,173 | 17,93 | 9,394 |
| 10 | 2 | 15 | 21,505 | 42,318 | 18,008 | 9,050 | 17,62 | 6,844 | 19,52 | 20,464 | 16,45 | 2,110 |
| 11 | 1,818 | 15 | 19,811 | 23,143 | 16,704 | 2,903 | 16,22 | 1,495 | 17,71 | 7,366 | 15,15 | 0,022 |
| 12 | 1,667 | 15 | 18,089 | 9,541 | 15,475 | 0,226 | 14,92 | 0,007 | 15,95 | 0,910 | 13,98 | 1,037 |
| 13 | 1,538 | 15 | 16,309 | 1,714 | 14,300 | 0,490 | 13,68 | 1,739 | 14,21 | 0,617 | 12,92 | 4,346 |
| 14 | 1,429 | 13,2 | 14,434 | 1,522 | 13,158 | 0,002 | 12,50 | 0,493 | 12,46 | 0,545 | 11,92 | 1,630 |
| 15 | 1,333 | 9 | 12,410 | 11,626 | 12,027 | 9,165 | 11,35 | 5,527 | 10,66 | 2,750 | 10,98 | 3,929 |
| 16 | 1,25 | 9 | 10,156 | 1,336 | 10,883 | 3,544 | 10,22 | 1,500 | 8,75 | 0,063 | 10,07 | 1,138 |
| 17 | 1,176 | 8,4 | 7,529 | 0,759 | 9,685 | 1,651 | 9,10 | 0,488 | 6,65 | 3,076 | 9,15 | 0,557 |
| 18 | 1,111 | 7,8 | 4,223 | 12,793 | 8,364 | 0,318 | 7,94 | 0,019 | 4,17 | 13,185 | 8,17 | 0,136 |
| 19 | 1,053 | 7,2 | -0,676 | 62,030 | 6,729 | 0,222 | 6,68 | 0,274 | 0,80 | 40,920 | 7,01 | 0,037 |
| | | | C= | 20,089 | C= | 13,623 | C= | 14,081 | C= | 12,290 | C= | 21,109 |

6.4.2 Prueba Kolmogorov- Smirnov.

Para evaluar los datos con esta prueba debe calcularse el F_o (x_m), por medio de la ecuación 36:

Para un m=1 y n =19, como es el caso de la estación El Túnel, se tiene:

$$F_o(X_m) = 1 - \frac{1}{1 + 19} = 0.95$$

El F_o(X_m) es calculado para cada número de orden (m) de los datos en una lista de mayor a menor. Una vez son calculados todos estos valores, se procede a comparar el valor F_o(X_m) contra el valor F(X_m), que es el valor estimado por la función de distribución, por medio de la aplicación de la ecuación (35), luego se debe seleccionar el mayor valor de D para cada función de distribución, en la cual se aceptaran todas las funciones de distribución consideradas para un nivel de significancia α = 0.05, para nuestro caso el valor critico es 0.26 con n = 19(anexo D). Se comparan el valor obtenido D y se escoge la función de distribución con el menor valor de D, estos resultados se muestran en la tabla 12:

Tabla 12. Resultados Prueba Kolmogorov- Smirnov. D=10 min

| PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|
| 10 MIN | | | | | | | | | | | | |
| m | X _m (mm/h) | F _o (X _m) | NORMAL | | LOG-NORMAL | | PEARSON III | | GUMBEL | | LOG-GUMBEL | |
| | | | F (X _m) | F _o (X _m) - F(X _m) | F (X _m) | F _o (X _m) - F(X _m) | F (X _m) | F _o (X _m) - F(X _m) | F (X _m) | F _o (X _m) - F(X _m) | F (X _m) | F _o (X _m) - F(X _m) |
| 1 | 58,2 | 0,950 | 0,997 | 0,047 | 0,975 | 0,025 | 0,980 | 0,030 | 0,967 | 0,017 | 0,924 | 0,026 |
| 2 | 41,4 | 0,90 | 0,930 | 0,030 | 0,918 | 0,018 | 0,920 | 0,020 | 0,882 | 0,018 | 0,867 | 0,033 |
| 3 | 35,4 | 0,85 | 0,849 | 0,001 | 0,871 | 0,021 | 0,870 | 0,020 | 0,818 | 0,032 | 0,830 | 0,020 |
| 4 | 30 | 0,80 | 0,736 | 0,064 | 0,803 | 0,003 | 0,800 | 0,000 | 0,737 | 0,063 | 0,781 | 0,019 |
| 5 | 30 | 0,75 | 0,736 | 0,014 | 0,803 | 0,053 | 0,800 | 0,050 | 0,737 | 0,013 | 0,781 | 0,031 |
| 6 | 29,4 | 0,70 | 0,721 | 0,021 | 0,794 | 0,094 | 0,791 | 0,091 | 0,726 | 0,026 | 0,774 | 0,074 |
| 7 | 24,6 | 0,65 | 0,591 | 0,059 | 0,699 | 0,049 | 0,698 | 0,048 | 0,627 | 0,023 | 0,706 | 0,056 |
| 8 | 24 | 0,60 | 0,573 | 0,027 | 0,684 | 0,084 | 0,685 | 0,085 | 0,614 | 0,014 | 0,696 | 0,096 |
| 9 | 21 | 0,55 | 0,485 | 0,065 | 0,601 | 0,051 | 0,607 | 0,057 | 0,539 | 0,011 | 0,634 | 0,084 |
| 10 | 15 | 0,50 | 0,315 | 0,185 | 0,38 | 0,120 | 0,403 | 0,097 | 0,373 | 0,127 | 0,444 | 0,056 |
| 11 | 15 | 0,45 | 0,315 | 0,135 | 0,38 | 0,070 | 0,403 | 0,047 | 0,373 | 0,077 | 0,444 | 0,006 |
| 12 | 15 | 0,40 | 0,315 | 0,085 | 0,38 | 0,020 | 0,403 | 0,003 | 0,373 | 0,027 | 0,444 | 0,044 |
| 13 | 15 | 0,35 | 0,315 | 0,035 | 0,38 | 0,030 | 0,403 | 0,053 | 0,373 | 0,023 | 0,444 | 0,094 |
| 14 | 13,2 | 0,30 | 0,269 | 0,031 | 0,302 | 0,002 | 0,330 | 0,030 | 0,321 | 0,021 | 0,364 | 0,064 |
| 15 | 9 | 0,25 | 0,177 | 0,073 | 0,123 | 0,127 | 0,146 | 0,104 | 0,206 | 0,044 | 0,142 | 0,108 |
| 16 | 9 | 0,20 | 0,177 | 0,023 | 0,123 | 0,077 | 0,146 | 0,054 | 0,206 | 0,006 | 0,142 | 0,058 |
| 17 | 8,4 | 0,15 | 0,166 | 0,016 | 0,101 | 0,049 | 0,120 | 0,030 | 0,191 | 0,041 | 0,111 | 0,039 |
| 18 | 7,8 | 0,10 | 0,155 | 0,055 | 0,081 | 0,019 | 0,094 | 0,006 | 0,177 | 0,077 | 0,083 | 0,017 |
| 19 | 7,2 | 0,05 | 0,144 | 0,094 | 0,063 | 0,013 | 0,070 | 0,020 | 0,163 | 0,113 | 0,057 | 0,007 |
| | | | D= | 0,1852 | D= | 0,1268 | D= | 0,1043 | D= | 0,1274 | D= | 0,1078 |

6.4.3 Prueba X².

Para aplicar la prueba es necesario agrupar los datos en intervalos de clase por medio de la aplicación de algunos parámetros estadísticos. El número de intervalos está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Intervalos} = 1 + 1.33 \ln(n) \quad (44)$$

En nuestro caso para una duración de 10 min se debe conocer el dato de valor máximo, el dato de valor mínimo y otros valores que se muestran en la tabla 13:

Tabla 13. Parámetros estadísticos para intervalos de clase. Prueba X².

| datos (n) | intervalos de clase k | nivel de significancia | porcentaje de certeza (%) |
|--------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 19 | 5 | 5 | 95 |
| valor maximo | valor minimo | Dx | Dx/2 |
| 58,2 | 7,2 | 12,75 | 6,375 |

Para los datos correspondientes a la estación de El Túnel, en una duración D=10 min, el número de intervalos es 5, como lo muestra la tabla 14:

Tabla 14. División de datos en Intervalos de clase.

| PRUEBA 10 MIN | | | | |
|---------------|---------------------------|---------------------------|----------------|-----------------------------|
| intervalo i | limite inferior (I_i) | limite superior (S_i) | marca de clase | numero observado Θ_i |
| 1 | 0,825 | 13,575 | 7,2 | 6 |
| 2 | 13,575 | 26,325 | 19,95 | 7 |
| 3 | 26,325 | 39,075 | 32,7 | 4 |
| 4 | 39,075 | 51,825 | 45,45 | 1 |
| 5 | 51,825 | 64,575 | 58,2 | 1 |
| | | | $\Sigma=n=$ | 19 |

En este caso se debe conocer los parámetros o variables necesarias en cada función:

Tabla 15. Parámetros de funciones de distribución de datos para Prueba X^2 .

| PARAMETROS DE LAS FUNCIONES | | |
|-----------------------------|------------|------------|
| FUNCION | PARAMETROS | TOLERANCIA |
| Normal | 2 | 5,99 |
| Log-normal | 2 | 5,99 |
| Pearson III | 3 | 3,84 |
| Gumbel | 2 | 5,99 |
| Log-Gumbel | 2 | 5,99 |

Esta prueba requiere de un $F(S_i)$, función de distribución de probabilidad en el límite superior, y un $F(I_i)$, que es la misma función evaluada en el límite inferior. Luego de obtener estos valores se procede a calcular el valor de ϵ_i a partir de la ecuación (38).

$$\epsilon_i = (0.27 - 0.06) * 19 = 4.09$$

Los respectivos resultados se muestran en la tabla 16:

Tabla 16 Resultados prueba x2. D=10 min

| funcion | i | $F(Sz)$ | $F(lz)$ | ϵ_i | $(\theta_i - \epsilon_i)^2/\epsilon_i$ | |
|-------------|-------|---------|---------|--------------|--|------------------|
| NORMAL | 1 | 0,278 | 0,063 | 4,098 | 0,883 | |
| | 2 | 0,640 | 0,278 | 6,866 | 0,003 | |
| | 3 | 0,904 | 0,640 | 5,018 | 0,206 | |
| | 4 | 0,988 | 0,904 | 1,597 | 0,223 | |
| | 5 | 0,999 | 0,988 | 0,220 | 2,767 | |
| | | | | D= | 4,082 | Se acepta |
| LOG-NORMAL | i | $F(Sz)$ | $F(lz)$ | ϵ_i | $(\theta_i - \epsilon_i)^2/\epsilon_i$ | |
| | 1 | 0,318 | 0,000 | 6,049 | 0,0004 | |
| | 2 | 0,737 | 0,318 | 7,956 | 0,1148 | |
| | 3 | 0,902 | 0,737 | 3,138 | 0,2371 | |
| | 4 | 0,961 | 0,902 | 1,123 | 0,0134 | |
| 5 | 0,984 | 0,961 | 0,423 | 0,7886 | | |
| | | | | D= | 1,154 | Se acepta |
| PEARSON III | i | $F(Sz)$ | $F(lz)$ | ϵ_i | $(\theta_i - \epsilon_i)^2/\epsilon_i$ | |
| | 1 | 0,346 | 0,000 | 6,566 | 0,0488 | |
| | 2 | 0,735 | 0,346 | 7,403 | 0,0219 | |
| | 3 | 0,903 | 0,735 | 3,185 | 0,2087 | |
| | 4 | 0,966 | 0,903 | 1,198 | 0,0328 | |
| 5 | 0,988 | 0,966 | 0,426 | 0,7716 | | |
| | | | | D= | 1,084 | Se acepta |
| GUMBEL | i | $F(Sz)$ | $F(lz)$ | ϵ_i | $(\theta_i - \epsilon_i)^2/\epsilon_i$ | |
| | 1 | 0,332 | 0,050 | 5,347 | 0,0798 | |
| | 2 | 0,665 | 0,332 | 6,342 | 0,0682 | |
| | 3 | 0,860 | 0,665 | 3,705 | 0,0235 | |
| | 4 | 0,946 | 0,860 | 1,626 | 0,2412 | |
| 5 | 0,980 | 0,946 | 0,640 | 0,2022 | | |
| | | | | D= | 0,615 | Se acepta |
| LOG-GUMBEL | i | $F(Sz)$ | $F(lz)$ | ϵ_i | $(\theta_i - \epsilon_i)^2/\epsilon_i$ | |
| | 1 | 0,381 | 0,000 | 7,247 | 0,215 | |
| | 2 | 0,734 | 0,381 | 6,694 | 0,014 | |
| | 3 | 0,854 | 0,734 | 2,294 | 1,269 | |
| | 4 | 0,908 | 0,854 | 1,010 | 0,000 | |
| 5 | 0,936 | 0,908 | 0,533 | 0,409 | | |
| | | | | D= | 1,907 | Se acepta |

Para el ejemplo anterior, en el intervalo 1 de la función Normal (Véase tabla 16) se tiene:

$$D_1 = \frac{(\theta - \epsilon_i)^2}{\epsilon_i} = \frac{(6 - 4.09)^2}{6} = 0.883$$

El valor de D total, para el ejemplo anterior, está dado por la ecuación (31):

$$D = \sum_{i=0}^5 \frac{(\theta - \epsilon_i)^2}{\epsilon_i} = 4.082$$

Se debe calcular los grados de libertad para cada función este proceso se realiza con la ecuación (33) en donde para funciones con 2 parámetros y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ se tiene:

$$v = 5 - 1 - 2 = 2$$

$$X^2 = 5.99 \text{ (tomado de la tabla C del anexo)}$$

Para funciones con 3 parámetros y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$:

$$v = 5 - 1 - 3 = 1$$

$$X^2 = 3.84 \text{ (tomado de la tabla C del anexo)}$$

Con los valores obtenidos de D y x^2 , se puede determinar si la función se acepta o no, para la función de distribución normal que presenta 2 parámetros, se calcula por medio de la ecuación (34):

$$D \leq 5.99$$

$$4.082 \leq 5.99 \text{ SI CUMPLE}$$

El procedimiento anterior se repite para los datos estimados con cada función de distribución de probabilidad, generando los resultados consignados en la tabla 16.

6.5 SELECCIÓN FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN

Después de evaluar cada una de las funciones con las pruebas de bondad de ajuste se puede determinar cuál es la función que presenta mejores resultados en las tres pruebas aplicadas a continuación se muestra los resultados de error cuadrático mínimo en la tabla 16.

Tabla 17 Resultados prueba error cuadrático mínimo

| RESULTADOS PRUEBA ERROR CUADRATICO MINIMO | | | | | | |
|---|--------|------------|-------------|--------|------------|----------|
| | NORMAL | LOG-NORMAL | PEARSON III | GUMBEL | LOG-GUMBEL | C minimo |
| 10 | 20,089 | 13,623 | 14,081 | 12,290 | 21,109 | 12,290 |
| 20 | 13,927 | 11,121 | 18,453 | 9,321 | 23,048 | 9,321 |
| 30 | 13,433 | 10,690 | 11,943 | 9,123 | 16,077 | 9,123 |
| 60 | 11,666 | 9,116 | 13,378 | 7,765 | 4,456 | 4,456 |
| 120 | 7,954 | 6,495 | 9,223 | 5,540 | 3,668 | 3,668 |
| 180 | 5,247 | 4,204 | 5,247 | 3,322 | 2,799 | 2,799 |
| 240 | 4,138 | 3,366 | 3,950 | 2,665 | 2,126 | 2,126 |
| 360 | 2,475 | 2,095 | 1,966 | 1,602 | 1,043 | 1,043 |

En esta prueba las funciones que mejores resultados arrojaron fueron Gumbel y Log-Gumbel, aunque la diferencia en sus resultados es mínima.

Tabla 18 Resultados prueba Kolmogorov-Smirnov

| RESULTADOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|------------|-------------|--------|------------|----------|
| | NORMAL | LOG-NORMAL | PEARSON III | GUMBEL | LOG-GUMBEL | D minimo |
| 10 | 0,185 | 0,127 | 0,104 | 0,127 | 0,108 | 0,104 |
| 20 | 0,165 | 0,111 | 0,158 | 0,105 | 0,093 | 0,093 |
| 30 | 0,211 | 0,119 | 0,114 | 0,150 | 0,067 | 0,067 |
| 60 | 0,192 | 0,107 | 0,210 | 0,132 | 0,073 | 0,073 |
| 120 | 0,214 | 0,129 | 0,218 | 0,155 | 0,084 | 0,084 |
| 180 | 0,214 | 0,149 | 0,082 | 0,154 | 0,090 | 0,082 |
| 240 | 0,191 | 0,125 | 0,159 | 0,155 | 0,088 | 0,088 |
| 360 | 0,206 | 0,160 | 0,138 | 0,146 | 0,105 | 0,105 |

Los resultados arrojan como mejor distribución a Log-Gumbel

Tabla 19 Resultados prueba X^2

| RESULTADOS PRUEBA X2 | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| FUNCION | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| Normal | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta | Se acepta |
| Log-normal | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta | Se acepta |
| Pearson III | Se acepta | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta | Se acepta |
| Gumbel | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se acepta | Se acepta | Se acepta |
| Log-Gumbel | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se acepta | Se acepta | Se acepta |
| menor D | Gumbel | Gumbel | Gumbel | Log-gumbel | | Gumbel | Log-gumbel | Log-gumbel |

Aunque en esta prueba se aceptan varias funciones a la vez, se debe escoger la que presente menor valor de D, la función de distribución que mejores resultados arrojo fue Gumbel.

Después de aplicar las pruebas de bondad de ajuste y comparar los resultados de las funciones de distribución, la que mejor se ajusta a los datos es Log-Gumbel seguida de la función Gumbel.

Aunque Log-Gumbel arroja mejores resultados en las pruebas realizadas en el presente proyecto se escogió la función de probabilidad Gumbel siendo la segunda opción en mejores resultados y según el RAS 2000 título D numeral 4.3 recomienda utilizar la función Gumbel; puesto que resulta eficiente para la elaboración de las curvas IDF y es la que ajusta los datos de la mejor manera.

En la sección 4.4.1.4, se define la función $F(x)$ con la que se ajustan los datos, de esta función se despeja la variable x , de la siguiente manera:

En la sección 4.4.1.4, se encuentra la función $F(x)$ que será la utilizada para ajustar los datos, de esta función se debe despejar la variable x :

$$F(x) = \frac{T - 1}{T} = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Despejando x se obtiene:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \text{LnLn} \left(\frac{T}{T-1} \right)$$

Esta ecuación es la misma ecuación 29, utilizada en la prueba de error cuadrático. Los valores de x , deben ser calculados para cada periodo de retorno que se va a estudiar en este proyecto se tomaran periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años siguiendo las recomendaciones del RAS 2000, al ser los valores típicos que se adaptan a las necesidades del interesado para los diferentes proyectos ingenieriles . Por ejemplo, utilizando los valores de α y β calculados en la sección 5.3.4 para una $D=10\text{min}$, y un periodo de retorno de $T=3$ años, se tiene:

$$x = 14.84 - \frac{1}{0.078} \text{LnLn} \left(\frac{3}{3-1} \right) = 26.38 \text{ mm/h}$$

El proceso anterior debe ser calculado para cada periodo de retorno a estudiar en cada una de las duraciones establecidas en el análisis de los datos, el resultado de cada proceso se presenta en la tabla 17:

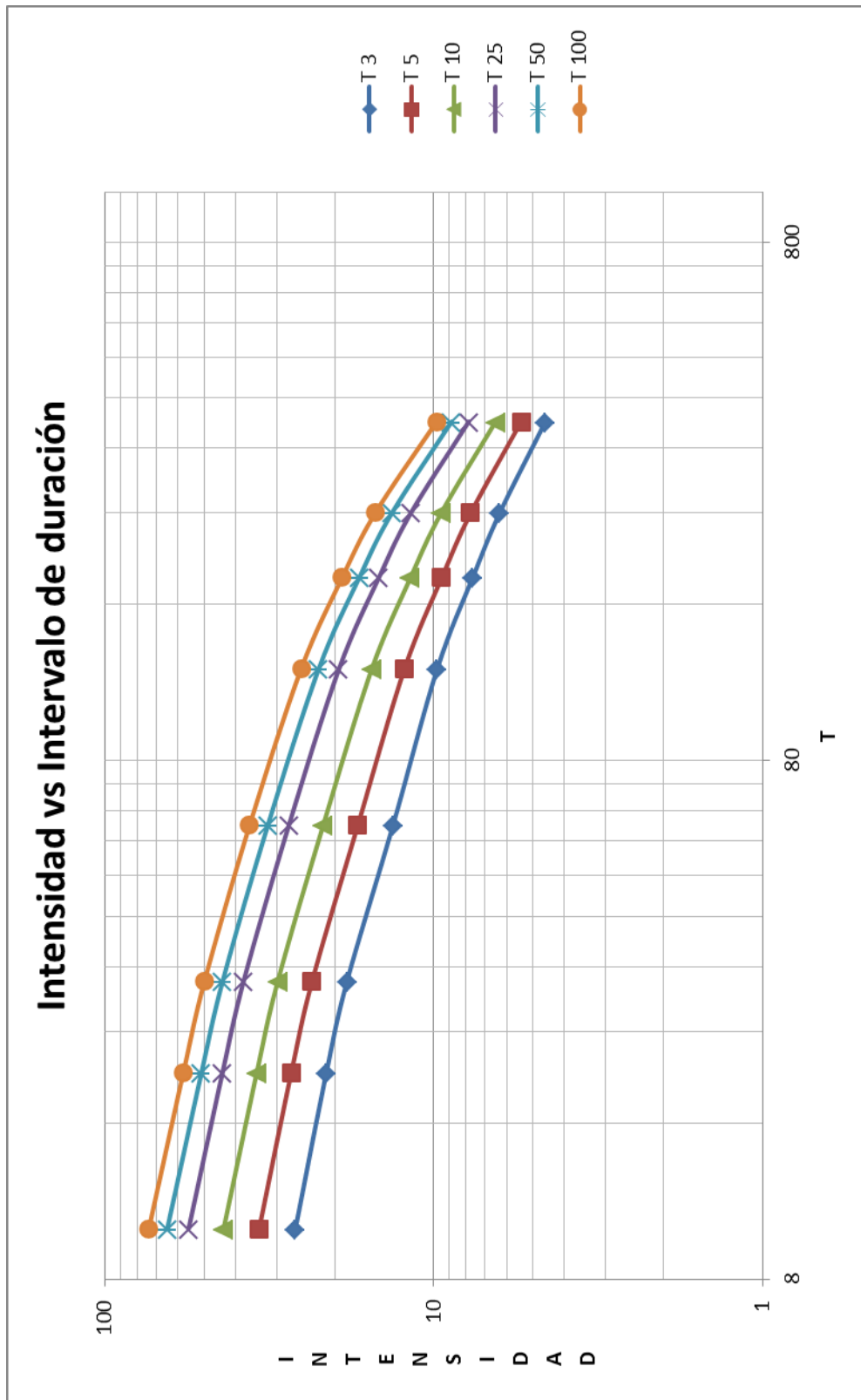
Tabla 20. Resultados de aplicación función Gumbel para ajuste de datos.

| Duración (min) | FUNCION GUMBEL | | | | | |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | PERIODO DE RETORNO (años) | | | | | |
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 10 | 26,38 | 34,02 | 43,62 | 55,75 | 64,74 | 73,67 |
| 20 | 21,24 | 27,15 | 34,58 | 43,97 | 50,94 | 57,85 |
| 30 | 18,37 | 23,46 | 29,85 | 37,93 | 43,92 | 49,87 |
| 60 | 13,31 | 17,03 | 21,71 | 27,62 | 32,00 | 36,35 |
| 120 | 9,77 | 12,29 | 15,45 | 19,45 | 22,41 | 25,35 |
| 180 | 7,62 | 9,46 | 11,78 | 14,70 | 16,87 | 19,02 |
| 240 | 6,30 | 7,72 | 9,50 | 11,75 | 13,42 | 15,07 |
| 360 | 4,58 | 5,42 | 6,49 | 7,83 | 8,83 | 9,81 |

6.6 CÁLCULO DE ECUACIÓN DE CURVA IDF (INTENSIDAD-DURACIÓN- FRECUENCIA)

La ecuación de la curva IDF está descrita en la sección 4.2 representada por la ecuación 3. En la cual se calculan las constantes desconocidas como lo son t_0 , m , n y K , las cuales se calculan a partir de los datos recolectados en la tabla 17, en la gráfica 2 se muestran en coordenadas logarítmicas las series de intensidades máximas versus intervalos de duración “ t ”, los cuales están unidas por una serie de curvas unidas con el mismo periodo de retorno “ T ”.

Figura 2 Grafica Intensidades Vs Intervalos de duración. (Escala Log.)

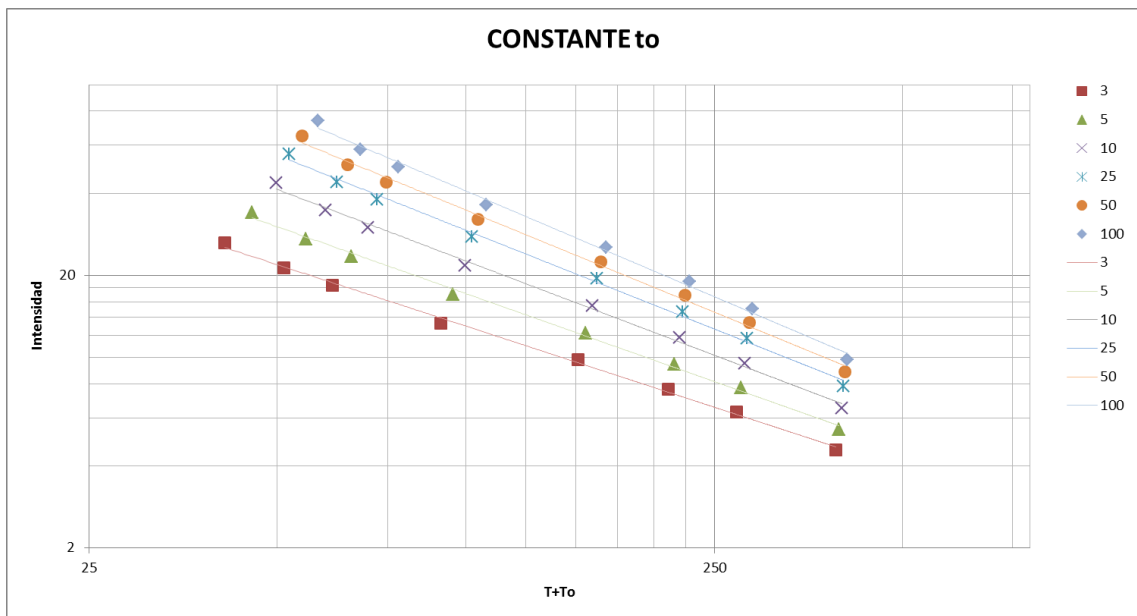


Con esta grafica se trabaja sobre los datos del eje horizontal, para encontrar el valor de t_0 mediante el aumento de un valor en minutos a cada uno de los intervalos de duración, de tal forma que las curvas tomen un comportamiento lineal. Es un método de ensayo y error. El valor debe permitir que los puntos estén lo más cerca posible a la línea recta. Este procedimiento aplica para todos los periodos de retorno en estudio. Los resultados como la grafica respectiva se muestran a continuación:

Tabla 21 Estimación de t_0

| Duracion | FUNCION GUMBEL | | | | | | PERIODO DE RETORNO | | | | | | to pro |
|----------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | |
| 10 | 26,38 | 34,02 | 43,62 | 55,75 | 64,74 | 73,67 | 41,2 | 45,6 | 49,8 | 52,3 | 54,7 | 58,00 | |
| 20 | 21,24 | 27,15 | 34,58 | 43,97 | 50,94 | 57,85 | 51,2 | 55,6 | 59,8 | 62,3 | 64,7 | 68,00 | |
| 30 | 18,37 | 23,46 | 29,85 | 37,93 | 43,92 | 49,87 | 61,2 | 65,6 | 69,8 | 72,3 | 74,7 | 78,00 | |
| 60 | 13,31 | 17,03 | 21,71 | 27,62 | 32,00 | 36,35 | 91,2 | 95,6 | 99,8 | 102,3 | 104,7 | 108,00 | |
| 120 | 9,77 | 12,29 | 15,45 | 19,45 | 22,41 | 25,35 | 151,2 | 155,6 | 159,8 | 162,3 | 164,7 | 168,00 | |
| 180 | 7,62 | 9,46 | 11,78 | 14,70 | 16,87 | 19,02 | 211,2 | 215,6 | 219,8 | 222,3 | 224,7 | 228,00 | |
| 240 | 6,30 | 7,72 | 9,50 | 11,75 | 13,42 | 15,07 | 271,2 | 275,6 | 279,8 | 282,3 | 284,7 | 288,00 | |
| 360 | 4,58 | 5,42 | 6,49 | 7,83 | 8,83 | 9,81 | 391,2 | 395,6 | 399,8 | 402,3 | 404,7 | 408,00 | |
| | | | | | | | 31,2 | 35,6 | 39,8 | 42,3 | 44,7 | 48 | 40,27 |

Figura 3 Determinación Constante t_0 . (Escala logarítmica)



El valor de t_0 definitivo es el promedio de todos los aumentos realizados a cada duración:

$$t_0 = \sum_{i=1}^a \frac{t_{oi}}{a} \quad (39)$$

En donde a es el número de periodos de retorno utilizados. El valor promedio de t_0 se presenta en la tabla 18, el cual se calcula mediante la ecuación (39).

$$t_0 = \frac{31.2 + 35.6 + 39.8 + 42.3 + 44.7 + 48}{6} = 40.27$$

Después de haber calculado este parámetro, se procede a calcular el valor n con la aplicación de la fórmula del logaritmo a los términos de la ecuación 1:

$$\log i = \log C - n \log(t - t_0) \quad (40)$$

Se realiza un análisis de mínimos cuadrados para cada periodo de retorno, obteniendo el valor de n_i , que es el valor de la pendiente de la línea y $\log C$, que es el valor de las ordenadas cuando $t+t_0=1$. En la tabla 19 se muestra los cálculos y resultados aplicados a un periodo de retorno de 3 años:

Tabla 22 Determinación de constantes n y C . T 3 años

| 3 AÑOS | | | | | | | | | | | |
|------------|---|-------|--------|--------------|--------------|---------------|--------------|-----------|---------------|-------|---------------|
| duracion | N | Y | X | LN Y | LN X | LN X^2 | LN X*LN Y | | | | |
| 10 | 1 | 26,38 | 50,27 | 3,27 | 3,92 | 15,35 | 12,82 | | | | |
| 20 | 2 | 21,24 | 60,27 | 3,06 | 4,10 | 16,80 | 12,53 | | | | |
| 30 | 3 | 18,37 | 70,27 | 2,91 | 4,25 | 18,08 | 12,38 | | | | |
| 60 | 4 | 13,31 | 100,27 | 2,59 | 4,61 | 21,23 | 11,93 | | | | |
| 120 | 5 | 9,77 | 160,27 | 2,28 | 5,08 | 25,77 | 11,57 | | | | |
| 180 | 6 | 7,62 | 220,27 | 2,03 | 5,39 | 29,10 | 10,96 | | | | |
| 240 | 7 | 6,30 | 280,27 | 1,84 | 5,64 | 31,76 | 10,38 | | | | |
| 360 | 8 | 4,58 | 400,27 | 1,52 | 5,99 | 35,91 | 9,11 | | | | |
| $\Sigma =$ | | | | 19,50 | 38,98 | 194,01 | 91,67 | $n =$ | 0,81 | | |
| | | | | | | | | $\ln C =$ | 6,3857 | $C =$ | 593,33 |

Este proceso se realiza para cada uno de los periodos 5, 10, 25, 50 y 100 años, de los cuales se obtienen las respectivas constantes. El valor de n se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$n = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{k} \quad (41)$$

Para el parámetro n , se aplica la siguiente formula:

$$\log C = \sum_{i=1}^k \frac{\log C_i}{k} \quad (42)$$

Donde k es el número de periodos de retorno estudiados.

Después de aplicar las respectivas formulas a cada periodo de retorno se obtienen los resultados consignados en la tabla 20:

Tabla 23 Constantes n y C

| T | n | ln C= | C |
|-----|--------------|--------------|---------------|
| 3 | 0,810 | 6,386 | 593,3 |
| 5 | 0,845 | 6,783 | 882,4 |
| 10 | 0,874 | 7,148 | 1271,0 |
| 25 | 0,897 | 7,488 | 1786,6 |
| 50 | 0,909 | 7,687 | 2180,3 |
| 100 | 0,919 | 7,687 | 2577,4 |
| | 0,876 | 7,196 | 1548,5 |

Con los resultados obtenidos se procede a realizar un análisis de mínimos cuadrados con los cuales se podrá determinar los valores de Ln K y m, con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\log C = \log K + m \log T \quad (43)$$

Los cálculos y respectivos resultados se muestran en la tabla 21:

Tabla 24 Parámetros K y m

| PARAMETROS K Y m | | | | | | |
|------------------|---------|------------|-------|-------|--------|------------------------------------|
| | C | T | | | | |
| N | Y | X | LN Y | LN X | LN X^2 | LN X*LN Y |
| 1 | 593,33 | 3 | 6,39 | 1,10 | 1,21 | 7,02 |
| 2 | 882,39 | 5 | 6,78 | 1,61 | 2,59 | 10,92 |
| 3 | 1271,04 | 10 | 7,15 | 2,30 | 5,30 | 16,46 |
| 4 | 1786,64 | 25 | 7,49 | 3,22 | 10,36 | 24,10 |
| 5 | 2180,30 | 50 | 7,69 | 3,91 | 15,30 | 30,07 |
| 6 | 2577,37 | 100 | 7,85 | 4,61 | 21,21 | 36,17 |
| | | Σ = | 43,35 | 16,75 | 55,97 | 124,74 |
| | | | | | | m= 0,41 |
| | | | | | | ln K= 6,09 K= 441,07 |

Según el análisis de mínimos cuadrados, los valores son:

$$\ln K = 6.09$$

$$K = e^{6.09} = 441.07$$

$$m = 0.407$$

Luego de haber determinados todos los parámetros t_0 , n , C , K y m , se procede a escribir la ecuación de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación el Túnel:

$$i = \frac{441.07 * T^{0.407}}{(t + 40.27)^{0.876}}$$

La ecuación anterior representa la relación Intensidad-Duración-Frecuencia correspondiente al pluviógrafo ubicado en el departamento de Boyacá, en la estación de El Túnel de Tota. Esta ecuación representa el comportamiento de las precipitaciones en esta zona, por esta razón esta relación solo es válida únicamente para esta estación pluviográfica.

De la misma forma que se realizó el proceso para determinar y construir la curva IDF de la estación el Túnel, se debe hacer el mismo proceso que se describe en la sección 5 para la estación Chivor, a continuación se muestra los resultados de todo el procedimiento que se llevó para calcular y construir la curva IDF para la estación Chivor:

Tabla 25 Intensidades máximas ordenadas de forma decreciente estación Chivor.

| INTESIDADES MÁXIMAS ORDENADAS | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| año | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| 1 | 74,40 | 59,10 | 52,00 | 42,70 | 38,75 | 28,60 | 23,58 | 17,98 |
| 2 | 67,80 | 55,80 | 42,00 | 30,90 | 22,00 | 17,93 | 15,13 | 13,18 |
| 3 | 57,60 | 46,20 | 37,20 | 30,90 | 20,15 | 17,80 | 15,13 | 13,18 |
| 4 | 55,20 | 41,40 | 35,60 | 30,60 | 20,15 | 17,80 | 15,13 | 12,39 |
| 5 | 42,60 | 38,40 | 35,60 | 29,95 | 18,35 | 13,10 | 12,27 | 10,25 |
| 6 | 42,00 | 38,40 | 35,00 | 26,60 | 17,80 | 12,99 | 11,10 | 8,52 |
| 7 | 42,00 | 34,20 | 32,07 | 22,50 | 16,45 | 12,30 | 9,98 | 7,95 |
| 8 | 37,20 | 33,60 | 31,60 | 20,90 | 16,04 | 11,47 | 9,73 | 7,42 |
| 9 | 36,00 | 33,55 | 28,80 | 20,40 | 15,10 | 11,47 | 9,65 | 6,97 |
| 10 | 34,20 | 32,40 | 25,40 | 20,30 | 14,55 | 11,20 | 9,23 | 6,68 |
| 11 | 30,00 | 29,40 | 23,80 | 19,30 | 14,05 | 10,23 | 9,08 | 6,62 |
| 12 | 30,00 | 28,50 | 23,20 | 18,00 | 12,15 | 10,10 | 8,70 | 6,17 |
| 13 | 30,00 | 26,40 | 23,00 | 16,00 | 11,85 | 9,93 | 8,13 | 6,15 |
| 14 | 29,10 | 24,60 | 21,00 | 14,20 | 11,15 | 9,60 | 7,88 | 5,75 |
| 15 | 28,80 | 24,00 | 20,00 | 13,30 | 10,25 | 8,00 | 6,30 | 5,35 |
| 16 | 27,00 | 20,70 | 17,60 | 13,20 | 8,35 | 6,87 | 5,70 | 4,35 |
| 17 | 26,40 | 19,20 | 16,60 | 13,00 | 7,85 | 5,63 | 5,58 | 4,17 |
| 18 | 22,20 | 19,20 | 14,40 | 11,80 | 7,70 | 5,60 | 5,28 | 3,80 |
| 19 | 16,20 | 13,50 | 12,40 | 10,30 | 7,40 | 2,07 | 4,23 | 2,82 |
| μ | 38,35 | 32,56 | 27,75 | 21,31 | 15,27 | 11,72 | 10,09 | 7,88 |
| σ | 15,45 | 12,12 | 10,28 | 8,62 | 7,26 | 5,87 | 4,64 | 3,90 |

Tabla 26 Resultados prueba error cuadrático mínimo. Estación Chivor

| RESULTADOS PRUEBA ERROR CUADRATICO MINIMO | | | | | | |
|---|--------|------------|-------------|--------|------------|----------|
| | NORMAL | LOG-NORMAL | PEARSON III | GUMBEL | LOG-GUMBEL | C minimo |
| 10 | 21,626 | 17,291 | 16,041 | 13,477 | 15,567 | 13,477 |
| 20 | 11,954 | 9,296 | 11,859 | 6,610 | 16,571 | 6,610 |
| 30 | 9,362 | 7,936 | 8,039 | 6,114 | 15,780 | 6,114 |
| 60 | 10,707 | 8,980 | 9,424 | 7,199 | 11,560 | 7,199 |
| 120 | 13,458 | 11,660 | 11,018 | 10,615 | 7,841 | 7,841 |
| 180 | 8,720 | 6,283 | 8,720 | 6,788 | 13,893 | 6,283 |
| 240 | 7,251 | 5,940 | 7,278 | 5,080 | 4,689 | 4,689 |
| 360 | 5,515 | 4,163 | 4,657 | 3,368 | 4,540 | 3,368 |

Tabla 27 Resultados prueba Kolmogorov-smirnov. Estación Chivor

| RESULTADOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|------------|-------------|--------|------------|----------|
| | NORMAL | LOG-NORMAL | PEARSON III | GUMBEL | LOG-GUMBEL | D minimo |
| 10 | 0,156 | 0,130 | 0,119 | 0,111 | 0,106 | 0,106 |
| 20 | 0,096 | 0,066 | 0,074 | 0,052 | 0,106 | 0,052 |
| 30 | 0,100 | 0,102 | 0,075 | 0,070 | 0,108 | 0,070 |
| 60 | 0,119 | 0,110 | 0,111 | 0,068 | 0,081 | 0,068 |
| 120 | 0,101 | 0,093 | 0,115 | 0,106 | 0,108 | 0,093 |
| 180 | 0,157 | 0,148 | 0,172 | 0,121 | 0,208 | 0,121 |
| 240 | 0,160 | 0,081 | 0,149 | 0,106 | 0,117 | 0,081 |
| 360 | 0,147 | 0,087 | 0,092 | 0,093 | 0,095 | 0,087 |

Tabla 28 Resultados prueba X^2 estación Chivor

| RESULTADOS PRUEBA X2 | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| FUNCION | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 360 |
| Normal | Se rechaza | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta |
| Log-normal | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta |
| Pearson III | Se rechaza | Se rechaza | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se rechaza | Se acepta | Se acepta |
| Gumbel | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta |
| Log-Gumbel | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta | Se acepta |
| menor D | Log-gumbel | Gumbel | Gumbel | Gumbel | Log-gumbel | Log-NORMAL | Log-gumbel | Gumbel |

Tabla 29 Resultados de aplicación función Gumbel para ajuste de datos. Estación Chivor

| Duración (min) | FUNCION GUMBEL | | | | | |
|----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | PERIODO DE RETORNO (años) | | | | | |
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 10 | 43,94 | 52,70 | 63,69 | 77,59 | 87,90 | 98,14 |
| 20 | 36,94 | 43,80 | 52,43 | 63,33 | 71,41 | 79,44 |
| 30 | 31,47 | 37,29 | 44,61 | 53,85 | 60,71 | 67,52 |
| 60 | 24,43 | 29,31 | 35,45 | 43,20 | 48,95 | 54,66 |
| 120 | 17,89 | 22,01 | 27,18 | 33,71 | 38,56 | 43,37 |
| 180 | 13,84 | 17,16 | 21,34 | 26,61 | 30,53 | 34,41 |
| 240 | 11,77 | 14,40 | 17,71 | 21,88 | 24,98 | 28,05 |
| 360 | 9,29 | 11,50 | 14,28 | 17,79 | 20,39 | 22,98 |

Figura 4 Intensidades vs intervalo de duración

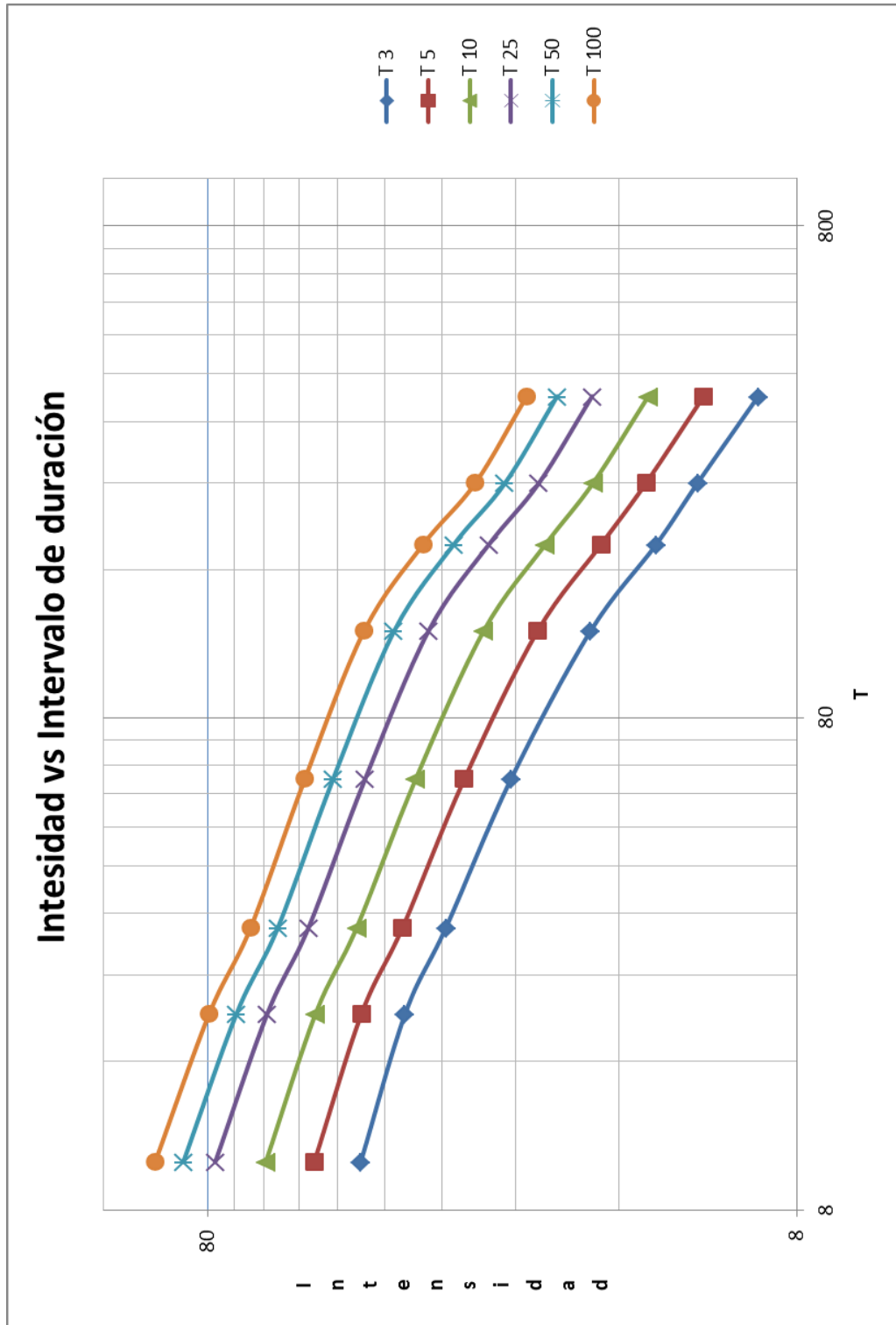


Tabla 30 determinación de t_0

| Duración (min) | FUNCION GUMBEL | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | PERIODO DE RETORNO (años) | | | | | | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | | |
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | | | | | | | | |
| 10 | 43,94 | 52,70 | 63,69 | 77,59 | 87,90 | 98,14 | 48,4 | 51 | 52,5 | 54,3 | 57,2 | 65,00 | | |
| 20 | 36,94 | 43,80 | 52,43 | 63,33 | 71,41 | 79,44 | 58,4 | 61 | 62,5 | 64,3 | 67,2 | 75,00 | | |
| 30 | 31,47 | 37,29 | 44,61 | 53,85 | 60,71 | 67,52 | 68,4 | 71 | 72,5 | 74,3 | 77,2 | 85,00 | | |
| 60 | 24,43 | 29,31 | 35,45 | 43,20 | 48,95 | 54,66 | 98,4 | 101 | 102,5 | 104,3 | 107,2 | 115,00 | | |
| 120 | 17,89 | 22,01 | 27,18 | 33,71 | 38,56 | 43,37 | 158,4 | 161 | 162,5 | 164,3 | 167,2 | 175,00 | | |
| 180 | 13,84 | 17,16 | 21,34 | 26,61 | 30,53 | 34,41 | 218,4 | 221 | 222,5 | 224,3 | 227,2 | 235,00 | | |
| 240 | 11,77 | 14,40 | 17,71 | 21,88 | 24,98 | 28,05 | 278,4 | 281 | 282,5 | 284,3 | 287,2 | 295,00 | | |
| 360 | 9,29 | 11,50 | 14,28 | 17,79 | 20,39 | 22,98 | 398,4 | 401 | 402,5 | 404,3 | 407,2 | 415,00 | | |
| | | | | | | | 38,4 | 41 | 42,5 | 44,3 | 47,2 | 55 | to pro | 44,73 |

Figura 5 Determinación t_0 . Estación Chivor

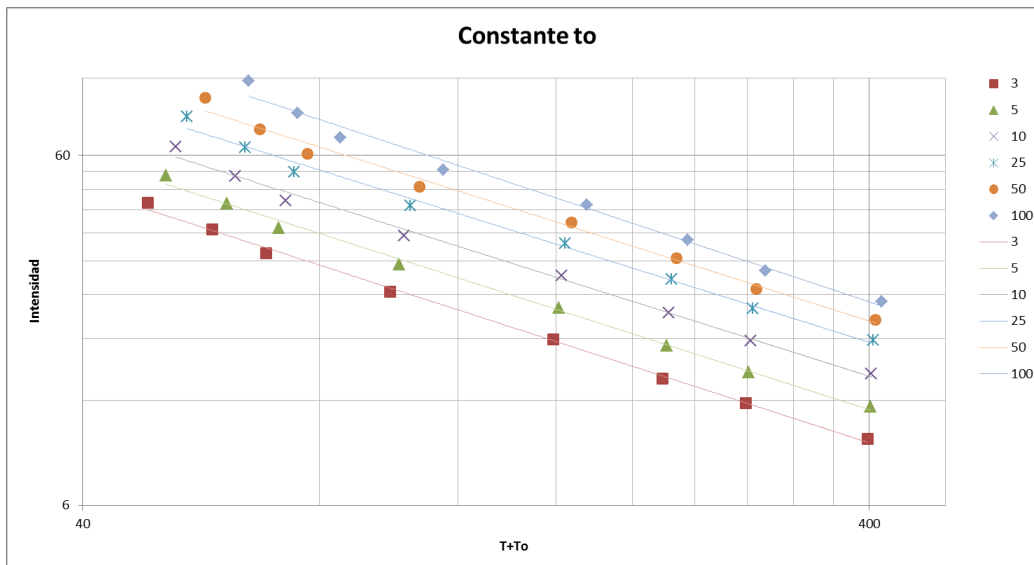


Tabla 31 constantes n y C. Estación Chivor

| T | n | ln C= | C |
|-----|--------------|--------------|---------------|
| 3 | 0,765 | 6,789 | 888,1 |
| 5 | 0,742 | 6,871 | 964,0 |
| 10 | 0,723 | 6,976 | 1070,5 |
| 25 | 0,707 | 7,102 | 1213,8 |
| 50 | 0,698 | 7,188 | 1323,6 |
| 100 | 0,692 | 7,188 | 1323,6 |
| | 0,721 | 7,019 | 1130,6 |

Tabla 32 Parámetros K y m estación Chivor

| PARAMETROS K Y m | | | | | | | | | | |
|------------------|---------|-----|-------|-------|--------|-----------|-------|-------|----|--------|
| N | C | T | | | | | | | | |
| | Y | X | LN Y | LN X | LN X^2 | LN X*LN Y | | | | |
| 1 | 888,14 | 3 | 6,79 | 1,10 | 1,21 | 7,46 | | | | |
| 2 | 964,02 | 5 | 6,87 | 1,61 | 2,59 | 11,06 | | | | |
| 3 | 1070,47 | 10 | 6,98 | 2,30 | 5,30 | 16,06 | | | | |
| 4 | 1213,81 | 25 | 7,10 | 3,22 | 10,36 | 22,86 | | | | |
| 5 | 1323,64 | 50 | 7,19 | 3,91 | 15,30 | 28,12 | m= | 0,137 | | |
| 6 | 1434,43 | 100 | 7,27 | 4,61 | 21,21 | 33,47 | ln K= | 6,65 | K= | 773,27 |
| | | Σ= | 42,19 | 16,75 | 55,97 | 119,03 | | | | |

$$i = \frac{773.27 * T^{0.137}}{(t + 44.73)^{0.721}}$$

7. RESULTADOS

7.1 ECUACIÓN Y CURVA (IDF) PARA LA ESTACION EL TÚNEL.

Figura 6 Ecuación Curva IDF. Estación El Túnel.

ECUACION IDF

$$i = \frac{441.07 * T^{0.407}}{(t + 40.27)^{0.876}}$$

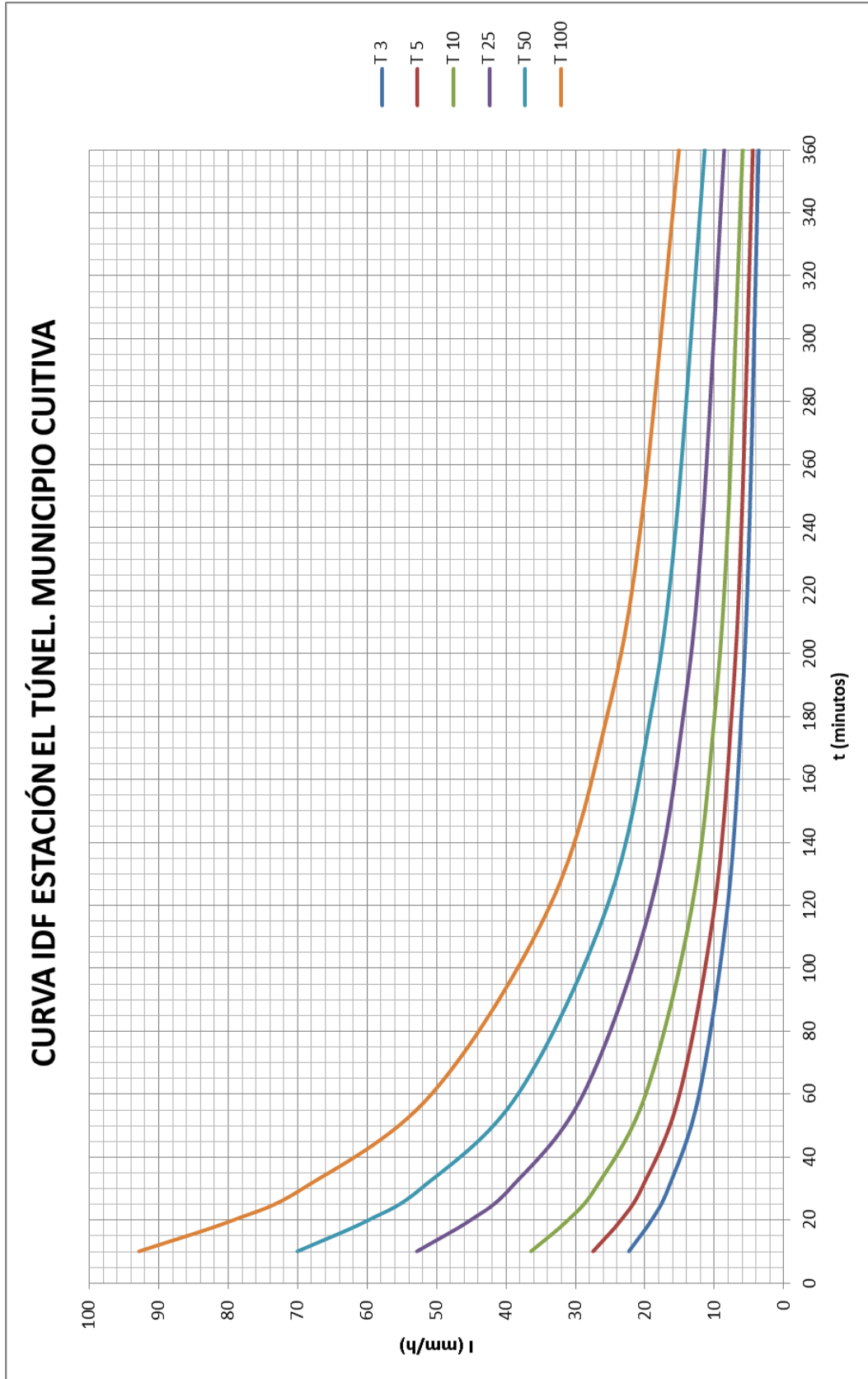
Tabla 33. Evaluación ecuación y curva IDF para estación El Túnel.

| ESTACION TUNEL DE TOTA | | | | | | |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Evaluación curva Intensidad-Duración-frecuencia | | | | | | |
| Duración (min) | PERIODO DE RETORNO (años) | | | | | |
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 10 | 22,31 | 27,47 | 36,41 | 52,85 | 70,06 | 92,88 |
| 20 | 19,04 | 23,43 | 31,06 | 45,09 | 59,77 | 79,23 |
| 30 | 16,64 | 20,48 | 27,15 | 39,41 | 52,25 | 69,26 |
| 60 | 12,19 | 15,00 | 19,89 | 28,87 | 38,27 | 50,73 |
| 120 | 8,08 | 9,95 | 13,19 | 19,14 | 25,38 | 33,64 |
| 180 | 6,12 | 7,53 | 9,98 | 14,49 | 19,21 | 25,46 |
| 240 | 4,95 | 6,10 | 8,08 | 11,73 | 15,56 | 20,62 |
| 360 | 3,63 | 4,46 | 5,92 | 8,59 | 11,38 | 15,09 |

Tabla 34. Parámetros de la ecuación para curva IDF. De la estación El Túnel.

| Parámetro | valor |
|----------------------|--------|
| k | 441,07 |
| m | 0,407 |
| n | 0,876 |
| t₀ | 40,27 |

Figura 7 Curva IDF, estación el túnel.



7.2 ECUACIÓN Y CURVA (IDF) PARA ESTACIÓN CHIVOR.

Figura 8 Ecuación Curva IDF

ECUACION IDF

$$i = \frac{773.27 * (T^{0.137})}{(t + 44.73)^{0.721}}$$

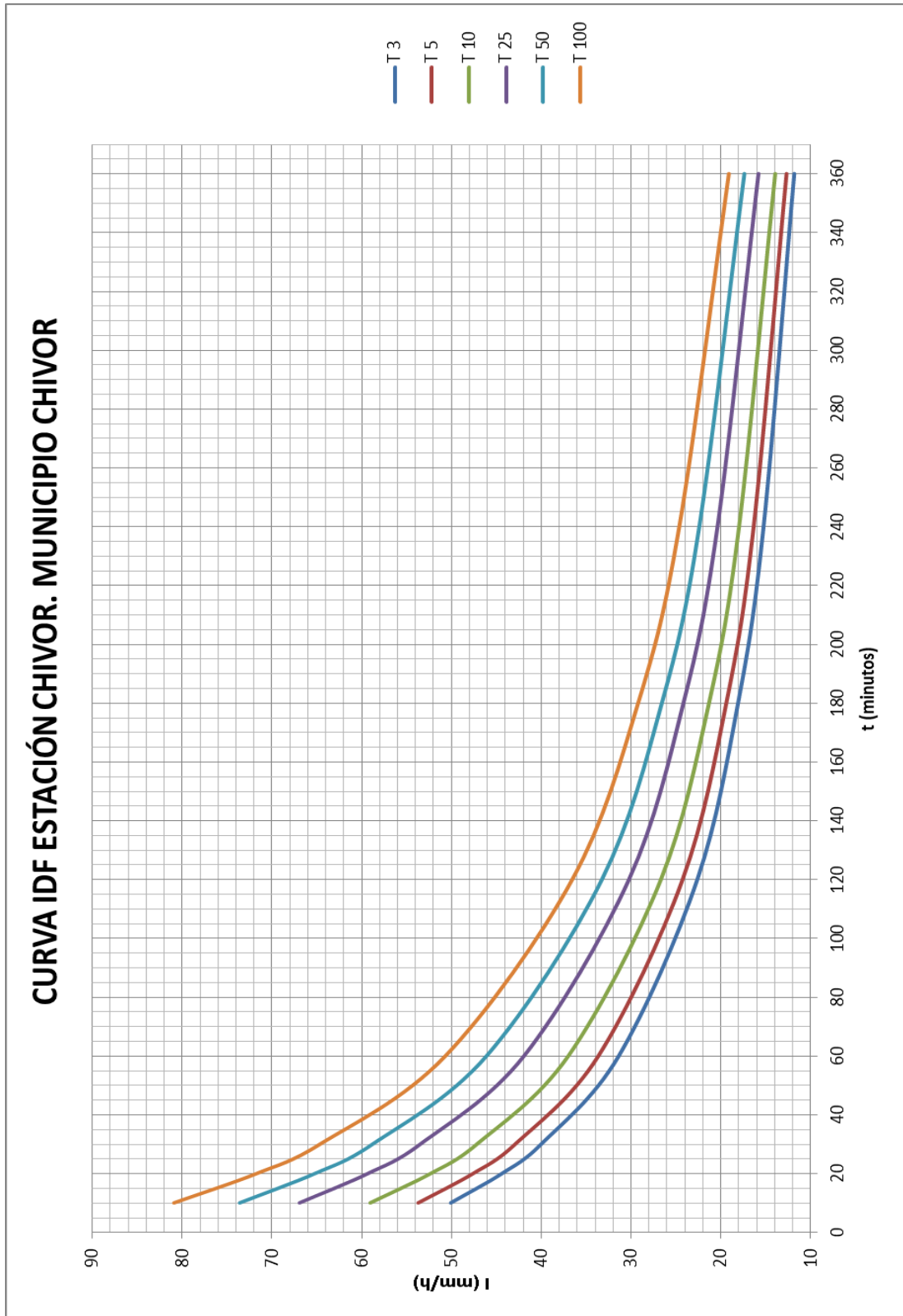
Tabla 35. Evaluación ecuación y curva IDF para estación Chivor.

| ESTACION CHIVOR | | | | | | |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Evaluación curva Intensidad-Duración-frecuencia | | | | | | |
| Duración (min) | PERIODO DE RETORNO (años) | | | | | |
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 10 | 50,09 | 53,72 | 59,06 | 66,94 | 73,60 | 80,92 |
| 20 | 44,38 | 47,59 | 52,33 | 59,31 | 65,21 | 71,69 |
| 30 | 40,01 | 42,91 | 47,18 | 53,47 | 58,79 | 64,64 |
| 60 | 31,37 | 33,64 | 36,98 | 41,92 | 46,09 | 50,67 |
| 120 | 22,63 | 24,26 | 26,68 | 30,24 | 33,24 | 36,55 |
| 180 | 18,08 | 19,39 | 21,32 | 24,17 | 26,57 | 29,21 |
| 240 | 15,25 | 16,35 | 17,98 | 20,38 | 22,40 | 24,63 |
| 360 | 11,83 | 12,69 | 13,95 | 15,81 | 17,38 | 19,11 |

Tabla 36. Parámetros de la ecuación para curva IDF. Chivor.

| Parámetro | valor |
|----------------------|--------------|
| k | 773,27 |
| m | 0,137 |
| n | 0,721 |
| t_o | 44,73 |

Figura 9 Curva IDF Estación Chivor



8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Después de analizar y procesar la información pluviográfica, se puede evidenciar que en la estación Chivor presenta una mayor intensidad de lluvia a menor periodo de retorno, en comparación con la estación el Túnel la cual a mayor periodo de retorno presenta mayores precipitaciones.

En la selección las bandas para la investigación, es importante mencionar que solo se tomaron 19 años de registro, ya que en estas estaciones no existe información de años anteriores lo que puede ocasionar errores en algún evento futuro. Por esta razón se tomaron registros entre 1992 y 2010 para la estación de Chivor y de 1986 a 2004 para la estación de El Túnel. A pesar de no contar con un número mayor de años de análisis, se puede decir que la metodología seguida para la obtención de la información registrada, es lógica y confiable, dado que cumple con los mínimos requeridos.

- En las pruebas de bondad de ajuste se evidencia que las funciones de distribución de probabilidad que mejor ajuste presentan en el problema planteado son Log-Gumbel y Gumbel en la estación el Túnel presentando mejores resultados Log-Gumbel; a pesar de esto se eligió a la función de probabilidad Gumbel puesto que es la que mejor se ajusta a los datos según se evidencia mediante las pruebas realizadas y lo sugiere el RAS 2000.
- Para la estación pluviográfica Chivor la función que mejor se ajusta a los datos es Gumbel, el resultado se puede evidenciar al observar que en las tres pruebas de bondad de ajuste fue la que mejores resultados arrojó.
- De acuerdo con las precipitaciones máximas en una duración de 10 minutos es evidente que Chivor presenta mayores precipitaciones teniendo como máxima 74 mm/h y una mínima de 16.2 mm/h, a diferencia de la estación el Túnel que tiene una precipitación máxima de 58.2 mm/h y una mínima de 7.2 mm/h

9. CONCLUSIONES

- Se logró calcular las intensidades de precipitación máximas en las estaciones pluviográficas Chivor y El Túnel, aplicando las cuatro funciones de distribución recomendadas, así mismo es posible concluir mediante las pruebas de bondad de ajuste que la que mejores resultados arrojó fue la función Gumbel, a pesar de esto la función Log-Gumbel también presenta buenos resultados.
- en la prueba de bondad de ajuste X^2 se trabajó con un nivel de significancia del 5%, lo cual nos da un porcentaje de certeza del 95%, siendo estos resultados confiables, además de esto en la prueba kolmogorov-smirnov todos los resultados están por debajo del valor crítico el cual permite evaluar si se aprueba o no la función de distribución, en consecuencia todas la funciones hubiesen servido.
- Todas las funciones de probabilidad pueden servir para la construcción de la curva IDF, pero solo se elige aquella que presente el menor error.
- Los métodos y procedimientos estadísticos fueron fundamentales para la correcta aproximación a los valores reales de las constantes que conforman la ecuación de intensidad correspondiente a cada curva IDF graficada.
- Este trabajo en modalidad de monografía, es un aporte importante para el semillero UDENS, permitiendo que se utilice este documento para la extrapolación de datos y la regionalización de curvas IDF en el departamento de Boyacá, el cual se logró gracias a la información suministrada por parte del IDEAM.
- Las curvas IDF que se presentan en este documento sirven como información pluviográfica en los municipios Chivor y Cuitiva, brindando datos estadísticos importantes puesto que permite pronosticar los periodos de retorno de lluvias y de esta manera tomar medidas preventivas, evitando daños, sobrecostos y perjuicios en proyectos a desarrollar.

10. RECOMENDACIONES

- Para la construcción de curvas IDF se recomienda utilizar mayor cantidad de años, consiguiendo con esto una mejor exactitud y unos resultados más fiables, de esta manera se recomienda identificar la cantidad de años de registro en el IDEAM para cada estación y en lo posible trabajar con más de 30 años en cada una. Así los resultados se basarían en un amplio análisis estadístico.
- Con la información obtenida de las pruebas de bondad de ajuste en cada función y la información suministrada de proyectos anteriores, se recomienda no ajustar datos con la función Pearson III, siendo esta función la que presenta una menor bondad de ajuste de la información.
- Se recomienda complementar este estudio en algunos años con el fin de añadir información pluviográfica nueva y revisar si existe alguna modificación de los resultados, y que tan incidente es para el análisis de la curva IDF.
- La función que mejores resultados arrojó en el presente documento es Gumbel, no obstante es indispensable analizar otras funciones de distribución de probabilidad, con fines académicos y determinar si alguna otra arroja resultados parecidos.

BIBLIOGRAFIA

- APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa, 1992. 340 p.
- CONAF. Control de erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile. Proyecto cuencas CONAF-JICA. Informe Final. Ministerio de Agricultura. Chile. 1988.161 p
- Curvas IDF para la zona centro sur de Chile. Talca, Chile: Universidad de Talca. Documento técnico, No. 7.
- Elaboración curvas IDF estaciones: Cintera Villa Olga y Santa Isabel/ Revista Ambiental. No. 2 (2007). Cúcuta: Universidad Unipamplona, 2007. ISSN 1900-9178
- Modelación hidráulica para las cuencas de los ríos Tunjuelo y Fucha en las condiciones actuales. Bogotá, Colombia: Acueducto de Bogotá, 2009.
- MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela colombiana de Ingeniería, 1995. 360p.
- Regionalización de leyes IDF para el uso de modelos hidrometeorológicos de estimación de caudales. Madrid, España: Universidad de Madrid. Tesis de grado
- VEN TE, Chow. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw- Hill, 1994. 598 p.

ANEXOS

ANEXO A Valores área bajo la curva de la función normal.

| z | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0 | 0.5000 | 0.5040 | 0.5080 | 0.5120 | 0.5160 | 0.5199 | 0.5239 | 0.5279 | 0.5319 | 0.5359 |
| 0.1 | 0.5398 | 0.5438 | 0.5478 | 0.5517 | 0.5557 | 0.5596 | 0.5636 | 0.5675 | 0.5714 | 0.5754 |
| 0.2 | 0.5793 | 0.5832 | 0.5871 | 0.5910 | 0.5948 | 0.5987 | 0.6026 | 0.6064 | 0.6103 | 0.6141 |
| 0.3 | 0.6179 | 0.6217 | 0.6255 | 0.6293 | 0.6331 | 0.6368 | 0.6406 | 0.6443 | 0.6480 | 0.6517 |
| 0.4 | 0.6554 | 0.6591 | 0.6628 | 0.6664 | 0.6700 | 0.6736 | 0.6772 | 0.6808 | 0.6844 | 0.6879 |
| 0.5 | 0.6915 | 0.6950 | 0.6985 | 0.7019 | 0.7054 | 0.7088 | 0.7123 | 0.7157 | 0.7190 | 0.7224 |
| 0.6 | 0.7258 | 0.7291 | 0.7324 | 0.7357 | 0.7389 | 0.7422 | 0.7454 | 0.7486 | 0.7518 | 0.7549 |
| 0.7 | 0.7580 | 0.7612 | 0.7642 | 0.7673 | 0.7704 | 0.7734 | 0.7764 | 0.7794 | 0.7823 | 0.7852 |
| 0.8 | 0.7881 | 0.7910 | 0.7939 | 0.7967 | 0.7996 | 0.8023 | 0.8051 | 0.8078 | 0.8106 | 0.8133 |
| 0.9 | 0.8159 | 0.8186 | 0.8212 | 0.8238 | 0.8264 | 0.8289 | 0.8315 | 0.8340 | 0.8365 | 0.8389 |
| 1.0 | 0.8413 | 0.8438 | 0.8461 | 0.8485 | 0.8508 | 0.8531 | 0.8554 | 0.8577 | 0.8599 | 0.8621 |
| 1.1 | 0.8643 | 0.8665 | 0.8686 | 0.8708 | 0.8729 | 0.8749 | 0.8770 | 0.8790 | 0.8810 | 0.8830 |
| 1.2 | 0.8849 | 0.8869 | 0.8888 | 0.8907 | 0.8925 | 0.8944 | 0.8962 | 0.8980 | 0.8997 | 0.9015 |
| 1.3 | 0.9032 | 0.9049 | 0.9066 | 0.9082 | 0.9099 | 0.9115 | 0.9131 | 0.9147 | 0.9162 | 0.9177 |
| 1.4 | 0.9192 | 0.9207 | 0.9222 | 0.9236 | 0.9251 | 0.9265 | 0.9279 | 0.9292 | 0.9306 | 0.9319 |
| 1.5 | 0.9332 | 0.9345 | 0.9357 | 0.9370 | 0.9382 | 0.9394 | 0.9406 | 0.9418 | 0.9429 | 0.9441 |
| 1.6 | 0.9452 | 0.9463 | 0.9474 | 0.9484 | 0.9495 | 0.9505 | 0.9515 | 0.9525 | 0.9535 | 0.9545 |
| 1.7 | 0.9554 | 0.9564 | 0.9573 | 0.9582 | 0.9591 | 0.9599 | 0.9608 | 0.9616 | 0.9625 | 0.9633 |
| 1.8 | 0.9641 | 0.9649 | 0.9656 | 0.9664 | 0.9671 | 0.9678 | 0.9686 | 0.9693 | 0.9699 | 0.9706 |
| 1.9 | 0.9713 | 0.9719 | 0.9726 | 0.9732 | 0.9738 | 0.9744 | 0.9750 | 0.9756 | 0.9761 | 0.9767 |
| 2.0 | 0.9772 | 0.9778 | 0.9783 | 0.9788 | 0.9793 | 0.9798 | 0.9803 | 0.9808 | 0.9812 | 0.9817 |
| 2.1 | 0.9821 | 0.9826 | 0.9830 | 0.9834 | 0.9838 | 0.9842 | 0.9846 | 0.9850 | 0.9854 | 0.9857 |
| 2.2 | 0.9861 | 0.9864 | 0.9868 | 0.9871 | 0.9875 | 0.9878 | 0.9881 | 0.9884 | 0.9887 | 0.9890 |
| 2.3 | 0.9893 | 0.9896 | 0.9898 | 0.9901 | 0.9904 | 0.9906 | 0.9909 | 0.9911 | 0.9913 | 0.9916 |
| 2.4 | 0.9918 | 0.9920 | 0.9922 | 0.9925 | 0.9927 | 0.9929 | 0.9931 | 0.9932 | 0.9934 | 0.9936 |
| 2.5 | 0.9938 | 0.9940 | 0.9941 | 0.9943 | 0.9945 | 0.9946 | 0.9948 | 0.9949 | 0.9951 | 0.9952 |
| 2.6 | 0.9953 | 0.9955 | 0.9956 | 0.9957 | 0.9959 | 0.9960 | 0.9961 | 0.9962 | 0.9963 | 0.9964 |
| 2.7 | 0.9965 | 0.9966 | 0.9967 | 0.9968 | 0.9969 | 0.9970 | 0.9971 | 0.9972 | 0.9973 | 0.9974 |
| 2.8 | 0.9974 | 0.9975 | 0.9976 | 0.9977 | 0.9977 | 0.9978 | 0.9979 | 0.9979 | 0.9980 | 0.9981 |
| 2.9 | 0.9981 | 0.9982 | 0.9982 | 0.9983 | 0.9984 | 0.9984 | 0.9985 | 0.9985 | 0.9986 | 0.9986 |
| 3.0 | 0.9987 | 0.9987 | 0.9987 | 0.9988 | 0.9988 | 0.9989 | 0.9989 | 0.9989 | 0.9990 | 0.9990 |
| 3.1 | 0.9990 | 0.9991 | 0.9991 | 0.9991 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9993 | 0.9993 |
| 3.2 | 0.9993 | 0.9993 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9995 |
| 3.3 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9996 | 0.9997 |
| 3.4 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9997 | 0.9998 |
| 3.5 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9998 |
| 3.6 | 0.9998 | 0.9998 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 |
| 3.7 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 |
| 3.8 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 |
| 3.9 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

ANEXO B Parámetros μ_y y σ_y , función de distribución de probabilidad Gumbel.

| n | μ_y | σ_y |
|-----|---------|------------|
| 10 | 0.4952 | 0.9496 |
| 15 | 0.5128 | 1.0206 |
| 20 | 0.5236 | 1.0628 |
| 25 | 0.5309 | 1.0914 |
| 30 | 0.5362 | 1.1124 |
| 35 | 0.5403 | 1.1285 |
| 40 | 0.5436 | 1.1413 |
| 45 | 0.5463 | 1.1518 |
| 50 | 0.5485 | 1.1607 |
| 55 | 0.5504 | 1.1682 |
| 60 | 0.5521 | 1.1747 |
| 65 | 0.5535 | 1.1803 |
| 70 | 0.5548 | 1.1854 |
| 75 | 0.5559 | 1.1898 |
| 80 | 0.5569 | 1.1938 |
| 85 | 0.5578 | 1.1974 |
| 90 | 0.5586 | 1.2007 |
| 95 | 0.5593 | 1.2037 |
| 100 | 0.5600 | 1.2065 |

ANEXO C Valor percentil para distribución ji- cuadrado con n grados de libertad.

| n | $\chi^2_{0.995}$ | $\chi^2_{0.99}$ | $\chi^2_{0.975}$ | $\chi^2_{0.95}$ | $\chi^2_{0.90}$ | $\chi^2_{0.75}$ | $\chi^2_{0.50}$ | $\chi^2_{0.25}$ | $\chi^2_{0.10}$ | $\chi^2_{0.05}$ | $\chi^2_{0.025}$ | $\chi^2_{0.01}$ | $\chi^2_{0.005}$ |
|-----|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 1 | 7.88 | 6.63 | 5.02 | 3.84 | 2.71 | 1.32 | 0.455 | 0.102 | 0.0158 | 0.0039 | 0.0010 | 0.0002 | 0.0000 |
| 2 | 10.6 | 9.21 | 7.38 | 5.99 | 4.61 | 2.77 | 1.39 | 0.575 | 0.211 | 0.103 | 0.0506 | 0.0201 | 0.0100 |
| 3 | 12.8 | 11.3 | 9.35 | 7.81 | 6.25 | 4.11 | 2.37 | 1.21 | 0.584 | 0.352 | 0.216 | 0.115 | 0.072 |
| 4 | 14.9 | 13.3 | 11.1 | 9.49 | 7.78 | 5.39 | 3.36 | 1.92 | 1.06 | 0.711 | 0.484 | 0.297 | 0.207 |
| 5 | 16.7 | 15.1 | 12.8 | 11.1 | 9.24 | 6.63 | 4.35 | 2.67 | 1.61 | 1.15 | 0.831 | 0.554 | 0.412 |
| 6 | 18.5 | 16.8 | 14.4 | 12.6 | 10.6 | 7.84 | 5.35 | 3.45 | 2.20 | 1.64 | 1.24 | 0.872 | 0.676 |
| 7 | 20.3 | 18.5 | 16.0 | 14.1 | 12.0 | 9.04 | 6.35 | 4.25 | 2.83 | 2.17 | 1.69 | 1.24 | 0.989 |
| 8 | 22.0 | 20.1 | 17.5 | 15.5 | 13.4 | 10.2 | 7.34 | 5.07 | 3.49 | 2.73 | 2.18 | 1.65 | 1.34 |
| 9 | 23.6 | 21.7 | 19.0 | 16.9 | 14.7 | 11.4 | 8.34 | 5.90 | 4.17 | 3.33 | 2.70 | 2.09 | 1.73 |
| 10 | 25.2 | 23.2 | 20.5 | 18.3 | 16.0 | 12.5 | 9.34 | 6.74 | 4.87 | 3.94 | 3.25 | 2.56 | 2.16 |
| 11 | 26.8 | 24.7 | 21.9 | 19.7 | 17.3 | 13.7 | 10.3 | 7.58 | 5.58 | 4.57 | 3.82 | 3.05 | 2.60 |
| 12 | 28.3 | 26.2 | 23.3 | 21.0 | 18.5 | 14.8 | 11.3 | 8.44 | 6.30 | 5.23 | 4.40 | 3.57 | 3.07 |
| 13 | 29.8 | 27.7 | 24.7 | 22.4 | 19.8 | 16.0 | 12.3 | 9.30 | 7.04 | 5.89 | 5.01 | 4.11 | 3.57 |
| 14 | 31.3 | 29.1 | 26.1 | 23.7 | 21.1 | 17.1 | 13.3 | 10.2 | 7.79 | 6.57 | 5.63 | 4.66 | 4.07 |
| 15 | 32.8 | 30.6 | 27.5 | 25.0 | 22.3 | 18.2 | 14.3 | 11.0 | 8.55 | 7.26 | 6.26 | 5.23 | 4.60 |
| 16 | 34.3 | 32.0 | 28.8 | 26.3 | 23.5 | 19.4 | 15.3 | 11.9 | 9.31 | 7.96 | 6.91 | 5.81 | 5.14 |
| 17 | 35.7 | 33.4 | 30.2 | 27.6 | 24.8 | 20.5 | 16.3 | 12.8 | 10.1 | 8.67 | 7.56 | 6.41 | 5.70 |
| 18 | 37.2 | 34.8 | 31.5 | 28.9 | 26.0 | 21.6 | 17.3 | 13.7 | 10.9 | 9.39 | 8.23 | 7.01 | 6.26 |
| 19 | 38.6 | 36.2 | 32.9 | 30.1 | 27.2 | 22.7 | 18.3 | 14.6 | 11.7 | 10.1 | 8.91 | 7.63 | 6.84 |
| 20 | 40.0 | 37.6 | 34.2 | 31.4 | 28.4 | 23.8 | 19.3 | 15.5 | 12.4 | 10.9 | 9.59 | 8.26 | 7.43 |
| 21 | 41.4 | 38.9 | 35.5 | 32.7 | 29.6 | 24.9 | 20.3 | 16.3 | 13.2 | 11.6 | 10.3 | 8.90 | 8.03 |
| 22 | 42.8 | 40.3 | 36.8 | 33.9 | 30.8 | 26.0 | 21.3 | 17.2 | 14.0 | 12.3 | 11.0 | 9.54 | 8.64 |
| 23 | 44.2 | 41.6 | 38.1 | 35.2 | 32.0 | 27.1 | 22.3 | 18.1 | 14.8 | 13.1 | 11.7 | 10.2 | 9.26 |
| 24 | 45.6 | 43.0 | 39.4 | 36.4 | 33.2 | 28.2 | 23.3 | 19.0 | 15.7 | 13.8 | 12.4 | 10.9 | 9.89 |
| 25 | 46.9 | 44.3 | 40.6 | 37.7 | 34.4 | 29.3 | 24.3 | 19.9 | 16.5 | 14.6 | 13.1 | 11.5 | 10.5 |
| 26 | 48.3 | 45.6 | 41.9 | 38.9 | 35.6 | 30.4 | 25.3 | 20.8 | 17.3 | 15.4 | 13.8 | 12.2 | 11.2 |
| 27 | 49.6 | 47.0 | 43.2 | 40.1 | 36.7 | 31.5 | 26.3 | 21.7 | 18.1 | 16.2 | 14.6 | 12.9 | 11.8 |
| 28 | 51.0 | 48.3 | 44.5 | 41.3 | 37.9 | 32.6 | 27.3 | 22.7 | 18.9 | 16.9 | 15.3 | 13.6 | 12.5 |
| 29 | 52.3 | 49.6 | 45.7 | 42.6 | 39.1 | 33.7 | 28.3 | 23.6 | 19.8 | 17.7 | 16.0 | 14.3 | 13.1 |
| 30 | 53.7 | 50.9 | 47.0 | 43.8 | 40.3 | 34.8 | 29.3 | 24.5 | 20.6 | 18.5 | 16.8 | 15.0 | 13.8 |
| 40 | 66.8 | 63.7 | 59.3 | 55.8 | 51.8 | 45.6 | 39.3 | 33.7 | 29.1 | 26.5 | 24.4 | 22.2 | 20.7 |
| 50 | 79.5 | 76.2 | 71.4 | 67.5 | 63.2 | 56.3 | 49.3 | 42.9 | 37.7 | 34.8 | 32.4 | 29.7 | 28.0 |
| 60 | 92.0 | 88.4 | 83.3 | 79.1 | 74.4 | 67.0 | 59.3 | 52.3 | 46.5 | 43.2 | 40.5 | 37.5 | 35.5 |
| 70 | 104.2 | 100.4 | 95.0 | 90.5 | 85.5 | 77.6 | 69.3 | 61.7 | 55.3 | 51.7 | 48.8 | 45.4 | 43.3 |
| 80 | 116.3 | 112.3 | 106.6 | 101.9 | 96.6 | 88.1 | 79.3 | 71.1 | 64.3 | 60.4 | 57.2 | 53.5 | 51.2 |
| 90 | 128.3 | 124.1 | 118.1 | 113.1 | 107.6 | 98.6 | 89.3 | 80.6 | 73.3 | 69.1 | 65.6 | 61.8 | 59.2 |
| 100 | 140.2 | 135.8 | 129.6 | 124.3 | 118.5 | 109.1 | 99.3 | 90.1 | 82.4 | 77.9 | 74.2 | 70.1 | 67.3 |

ANEXO D Valor crítico d para la prueba Kolmogorov-Smirnov.

| <i>Tamaño de la muestra</i> | $\alpha = 0.10$ | $\alpha = 0.05$ | $\alpha = 0.01$ |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5 | 0.51 | 0.56 | 0.67 |
| 10 | 0.37 | 0.41 | 0.49 |
| 15 | 0.30 | 0.34 | 0.40 |
| 20 | 0.26 | 0.29 | 0.35 |
| 25 | 0.24 | 0.26 | 0.32 |
| 30 | 0.22 | 0.24 | 0.29 |
| 40 | 0.19 | 0.21 | 0.25 |
| <i>n grande</i> | $1.22/\sqrt{n}$ | $1.36/\sqrt{n}$ | $1.63/\sqrt{n}$ |