



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis regional de
precipitaciones para la obtención
de lluvias de diseño en el estado
de Oaxaca**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Roberto Abraham Vázquez Martínez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2017

Agradecimientos

A mi mamá Rosa María, por sus regaños, por sus palabras de aliento en momentos difíciles, y por todo su apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de mi vida estudiantil.

A mi papá Roberto, por todos los sacrificios, los valores transmitidos y sus sabios consejos que han permitido mi formación como persona de bien.

Al M.I. Eliseo Carrizosa por permitirme formar parte del Instituto de Ingeniería, y por su apoyo y asesoría durante la elaboración de esta tesis.

A mis compañeros; los ingenieros, Mario Ponce, Adam Hernández y Juan Eduardo, por sus recomendaciones bibliográficas, orientación, y apoyo en el uso de software utilizado en la presente tesis.

Por último, a la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme educación gratuita y de calidad para mi formación como profesionista en beneficio de nuestra sociedad.

Introducción	1
Capítulo 1: Conceptos Básicos	3
1.1 Conceptos básicos de estadística	3
1.1.1 Medidas de tendencia central	3
1.1.1.1 Media	3
1.1.1.2 Mediana	4
1.1.1.3 Moda	5
1.1.2 Medidas de dispersión	6
1.1.2.1 Varianza	7
1.1.2.2 Desviación estándar	8
1.1.2.3 Coeficiente de variación	9
1.2 Conceptos básicos de hidrología	9
1.2.1 Tiempo de concentración	9
1.2.2 Precipitación media	11
1.2.2.1 Método aritmético	11
1.2.2.2 Método de polígonos de Thiessen	11
1.2.2.3 Método de las Isoyetas	13
Capítulo 2: Funciones de Distribución de probabilidad empleadas en hidrología.	14
2.1 Variable aleatoria discreta y variable aleatoria continua	14
2.2 Función de distribución de probabilidad y densidad de probabilidad	14
2.1.1 Periodo de retorno	16
2.1.2 Distribución Normal	17
2.1.3 Distribución Gumbel	20
2.1.4 Distribución Doble Gumbel	21
Capítulo 3: Metodología	23
3.1 Métodos de Regionalización (Técnicas de agrupamiento)	23
3.1.1 Método de los Trazos Multidimensionales (Curva de Andrews)	23
3.1.2 Método geográfico	24
3.1.4 Método del Coeficiente de Variación	25
3.2 Técnicas Regionales	25
3.2.1 Método de avenida índice	25
3.2.2 Método de correlación y regresión múltiple	26
3.2.3 Estaciones – Año	26
Capítulo 4: Ejemplo de aplicación	28
4.1 Zona de estudio (Descripción del estado de Oaxaca)	28
4.1.1 Ubicación	28
4.1.2 Clima	29
4.1.3 Hidrografía	30
4.2 Información Disponible	31

4.2.1 Estaciones climatológicas disponibles en Oaxaca	32
4.2.2. Selección y localización de las estaciones empleadas	33
Capítulo 5: Metodología aplicada	39
5.1 Obtención de datos de registro de precipitaciones	39
5.2. Conformación de regiones homogéneas	43
5.3. Regiones definidas	47
5.4 Depuración de estaciones climatológicas con CLICOM	48
5.5. Valores estandarizados con CLICOM	53
5.5. Obtención de las funciones de distribución para cada región con Ax.	56
5.6.1 Resultados obtenidos	64
5.7 Análisis de resultados	69
Conclusiones	78
Bibliografía	79

Introducción

La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre; ocupa un papel fundamental en el control de los recursos hidráulicos; proporcionando una guía útil para la planeación, diseño y operación de cualquier proyecto que aborde tal temática. Los estudios realizados por esta ciencia tienen sustento en un compilado amplio y detallado de datos históricos, que permiten realizar un estudio hidrológico, real y factible.

Los datos históricos se obtienen principalmente a través de registros de escurrimiento y precipitación: los primeros toman en cuenta el agua proveniente de la precipitación, la cual circula sobre la superficie terrestre de la cuenca; mientras que, los segundos se encargan de medir la altura de precipitación que se presenta dentro de una cuenca a través de estaciones climatológicas. En México, la disponibilidad de registros de precipitación es mayor que la de escurrimiento; esta información se encuentra a cargo de agencias gubernamentales como la Comisión Federal de Electricidad (CFE) o la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), organismos que se encargan de recolectar, difundir y depurar datos hidrológicos.

Por otro lado, a pesar de que los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, la red de estaciones climatológicas existente en el territorio nacional, sigue siendo muy limitada y no satisface la demanda de información que se requiere para la ejecución de diversos proyectos de aprovechamientos de recursos hídricos.

En la República Mexicana existe información de lluvias diarias medidas en más de 5000 estaciones; el análisis de estos registros muestra que en muchas estaciones los datos disponibles son escasos o erróneos, lo que implica que los análisis estadísticos que se realicen individualmente no resulten del todo confiables (CONAGUA, 2015). Esto se debe en gran medida a la falta de personal capacitado para tomar lecturas y a que la ubicación de las estaciones climatológicas es en zonas de difícil acceso.

La falta de registros hidrológicos dentro la superficie mexicana conduce a una fuerte distorsión e incertidumbre en los estudios de disponibilidad hídrica, afectando el dimensionamiento de las obras, y ocasionando pérdidas económicas por daños en infraestructura lo que inclusive, podría traducirse a pérdidas humanas.

Debido a lo anterior y a la creciente necesidad de estimar eventos de diseño para la creación de obras hidráulicas, se proponen técnicas de análisis probabilístico que permiten atender la falta de información, mediante la utilización de datos disponibles. Una de estas técnicas es la de regionalización; una herramienta que atiende tal

problemática, a través, de la transferencia de información hidrológica a sitios sin registros o con escasa información.

En esta tesis, se aborda el estado de Oaxaca, ya que, debido a su ubicación geográfica, año con año se encuentra vulnerable a ser atacado por fenómenos hidrometeorológicos, por ello, es necesario la construcción de obras que permitan mitigar los efectos adversos causados por éstos.

El presente trabajo, pretende realizar un análisis probabilístico utilizando los registros de precipitación disponibles dentro del estado de Oaxaca, con la finalidad de dimensionar obras hidráulicas seguras y confiables en cualquier parte del Estado.

En Oaxaca existen 352 estaciones climatológicas; no obstante, muchas se encuentran fuera de servicio o simplemente no cuentan con un historial lo suficientemente amplio para ser tomadas en cuenta en el análisis probabilístico. Una vez realizada la selección, se tuvo un total de 190 estaciones climatológicas para la elaboración del análisis de regionalización, el cual agrupa las estaciones climatológicas de acuerdo a sus características estadísticas y fisiográficas, permitiendo estimar la cantidad de lluvia que cae en lugares donde las estaciones no operen correctamente, tengan pocos años de registro, o la información sea inexistente.

El presente trabajo consta de cinco capítulos: en el capítulo 1 y 2, se presentan algunos conceptos generales utilizados en el análisis de regionalización de lluvias de precipitación para el estado de Oaxaca, estos conceptos conciernen a las áreas de estadística, probabilidad, e hidrología, y son de suma importancia en la comprensión de las medidas de tendencia usadas para el análisis de una muestra de datos.

En el capítulo 3, *Metodología*, se muestran algunas técnicas de agrupamiento, resaltando el método de Avenida Índice, el método de correlación y regresión múltiple, y el método de Estaciones- Año, siendo este último el que se utilizó para el análisis de regionalización de lluvias de precipitación.

En el capítulo 4, *Ejemplo de aplicación*, se realiza una breve descripción del estado de Oaxaca, así como información hidrológica disponible para el análisis de regionalización, además se detalla el procedimiento utilizado para obtención de lluvias de diseño para distintos periodos de retorno del estado de Oaxaca, a través de las funciones de probabilidad comentadas en el capítulo 3.

Por último, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y resultados obtenidos del estudio de regionalización en el estado de Oaxaca.

Capítulo 1: Conceptos Básicos

1.1 Conceptos básicos de estadística

La estadística es una ciencia que ofrece técnicas precisas para la recolección, descripción e interpretación de datos; además tiene el cometido de proporcionar métodos útiles para el análisis de masas de información numérica.

La meta de la estadística es hacer una inferencia acerca de una población de estudio, con base en la información contenida en la muestra de esa población; para ello, se debe contar con una distribución de frecuencia relativa asociada con un conjunto de datos, y un histograma. Aunado a esto, es necesario el uso de medidas descriptivas numéricas para resumir la información contenida en una muestra, estas reciben el nombre de *medidas de tendencia central* y *medidas de dispersión o variación*, las cuales se explicarán más adelante.

1.1.1 Medidas de tendencia central

Son medidas descriptivas que sintetizan en un valor único, un conjunto de valores, representando un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos. Las medidas de tendencia central más utilizadas son: media, mediana y moda.

1.1.1.1 Media

La media aritmética o promedio, es la tendencia central más empleada en la estadística. Es la suma de los valores de todas las observaciones, dividida entre el número de observaciones realizadas.

Sea n el tamaño de la muestra que contiene a las observaciones $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, entonces la media aritmética, \bar{x} es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

ecu.1.1

Donde el subíndice i , indica el número de conteo para identificar cada observación, y \bar{x} , se lee como “ \bar{x} barra”, referida a la media muestral. Por otro lado, la media poblacional se denota con la letra μ , y puede estimarse usando información muestral.

Si los datos se encuentran agrupados en una tabla de frecuencias, la expresión utilizada es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i f_i}{n}$$

ecu.1.2

Donde \tilde{x}_i es la marca de clase y f_i el número de datos analizados en cada intervalo, es decir, la frecuencia.

No obstante, es importante recalcar que el valor de la media puede ser severamente afectado por datos extremos, por lo que si la distribución es muy sesgada no es conveniente utilizar esta medida de tendencia central.

1.1.1.2 Mediana

Es un valor tal que la mitad de las observaciones son menores que ese valor y la otra mitad mayores que el mismo, en otras palabras, la mediana es el valor central que se localiza en una serie ordenada de datos, convirtiéndose así en el centro geométrico de la distribución de los datos.

Caso 1: Sean x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 las observaciones analizadas ordenadas de menor a mayor, entonces:

$$\text{Mediana} = x_3$$

Caso 2: Sean x_1, x_2, x_3, x_4 las observaciones analizadas ordenadas de menor a mayor, entonces:

$$\text{Mediana} = \frac{x_2 + x_3}{2}$$

La expresión utilizada para obtener la mediana a partir de datos agrupados en una tabla de frecuencias es:

$$\text{Mediana} = a + \Delta x \left[\frac{\frac{n}{2} - (\Sigma f)_a}{f_m} \right]$$

ecu.1.3

Donde:

Δx , Es el tamaño del intervalo.

a , Es el extremo izquierdo del intervalo.

n , Es el número de valores observados en el experimento.

f_m , Es la frecuencia absoluta correspondiente al intervalo en cuestión.

$(\sum f)_a$, Es la suma de las frecuencias correspondientes a los intervalos anteriores.

A diferencia de la media, la mediana no se ve afectada por valores extremos y por lo tanto, si la distribución es asimétrica o sesgada es una medida que representa mejor a los datos. Sin embargo, su desventaja radica en que su valor se determina con un único dato, el dato central de la serie ordenada.

1.1.1.3 Moda

La moda es el valor con mayor frecuencia en una serie de datos, sin embargo, se puede presentar el caso en el que exista más de una moda, es decir, que haya dos o más valores con la misma frecuencia máxima que den origen a una distribución multimodal. Otro caso es la ausencia de la moda, y ocurre cuando no existe un valor que se repita más veces que los otros.

Caso 1: Sean x_1, x_2, x_3, x_3, x_4 las observaciones analizadas, entonces:

$$\text{Moda} = x_3$$

Caso 1: Sean x_1, x_1, x_2, x_2, x_3 las observaciones analizadas, entonces:

$$\text{Moda} = x_1 \text{ y } x_2$$

Caso 3: Sean x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 las observaciones analizadas, entonces:

$$\text{Moda} = \emptyset$$

En el caso de una tabla de frecuencias, la moda siempre se encontrará en el intervalo que tenga la mayor magnitud de frecuencia, por lo tanto, si esto se extiende a una gráfica, la moda estará ubicada en el valor más alto o el pico de la distribución como se muestra en la *Figura 1.1*.

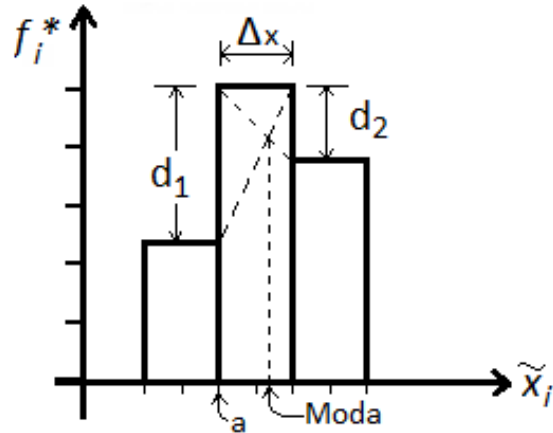


Figura 1.1. Distribución de frecuencias

Entonces la expresión utilizada para obtener la moda a partir de datos agrupados en una tabla de frecuencias la siguiente:

$$\text{Moda} = a + \Delta x \left[\frac{d_1}{d_2 + d_1} \right]$$

ecu.1.4

Donde:

a , Es el extremo izquierdo del intervalo.

Δx , Es el tamaño del intervalo.

d_1 , Corresponde a la diferencia entre la frecuencia del intervalo y la frecuencia inmediatamente inferior del intervalo.

d_2 , Corresponde a la diferencia entre la frecuencia del intervalo y la frecuencia inmediatamente posterior del intervalo.

Consideraciones: La moda por lo general no se usa debido a que no tiene un valor único o puede ser que no exista. Para datos agrupados en tabla de frecuencia, la moda tiene importancia porque en éste caso si hay un valor único.

1.1.2 Medidas de dispersión

Las medias expuestas anteriormente únicamente localizan el centro de la distribución de datos, y por sí mismas no proporcionan una descripción adecuada de un conjunto de mediciones, ya que se puede presentar el caso en el que se tengan distribuciones de frecuencia diferente, pero con equivalentes medias de tendencia central, como se muestra en la Figura 2.2.

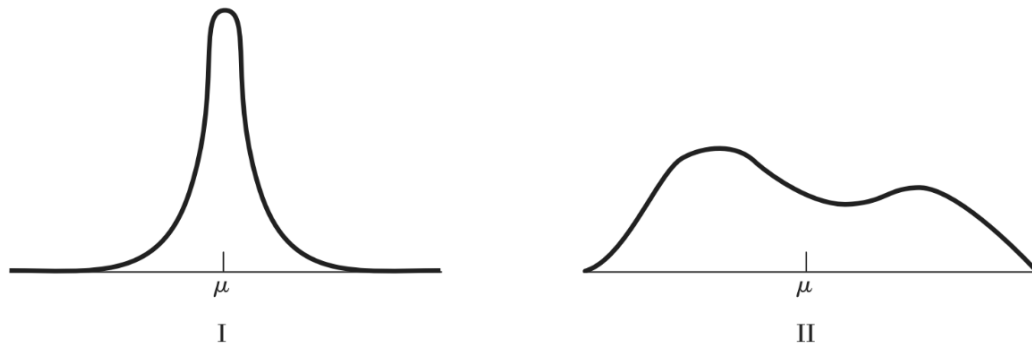


Figura 1.2. Distribución de frecuencias con medias poblacionales iguales, pero con diferentes distribuciones de frecuencia

Por lo tanto, si se desea describir en forma adecuada los datos, también es indispensable definir medidas de dispersión de datos, los cuales se explicarán a continuación.

1.1.2.1 Varianza

La medida de variabilidad más común empleada en estadística es la varianza, y está en función de las desviaciones (o distancias) de las mediciones muestrales desde la media. En otros términos, la *varianza muestral* es el promedio aritmético de los cuadrados de las desviaciones de los valores observados con respecto a su media, y se calcula con la siguiente expresión.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

ecu.1.5

Si los datos se encuentran agrupados en una tabla de frecuencias, la expresión utilizada es:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - \bar{x})^2 f_i$$

ecu.1.7

Donde:

\tilde{x}_i , Es la marca de clase

\bar{x} , Es la media

f_i , Es la frecuencia

n , Número de observaciones

La correspondiente *varianza poblacional* está denotada por el símbolo σ^2 y contempla todos los valores del universo.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 dF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

Es importante señalar que la *varianza*, al igual que la media, es un índice muy sensible a las puntuaciones extremas.

1.1.2.2 Desviación estándar

La desviación estándar es fácil de calcular, toma en cuenta todos los datos y es una medida importante en el estudio de la inferencia estadística.

Para el cálculo de la *desviación estándar* de una muestra de mediciones basta con obtener la raíz cuadrada de la *varianza* como se muestra a continuación:

$$s = \sqrt{s^2}$$

ecu.1.8

De igual manera para calcular la *desviación estándar poblacional* únicamente se obtiene la raíz cuadrada de la *varianza poblacional*.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

ecu.1.9

La expresión para la desviación estándar a partir de datos agrupados en tablas se calcula con la siguiente expresión:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - \bar{x})^2 f_i}$$

ecu.1.10

Donde:

\tilde{x}_i , Es la marca de clase

\bar{x} , Es la media

f_i , Es la frecuencia

n , Número de observaciones

Aun cuando la varianza y la desviación estándar se encuentran relacionadas, la varianza se expresa en las unidades de los datos, elevadas al cuadrado. Por otro lado, la desviación estándar tiene las mismas unidades que los datos y proporciona la variabilidad promedio de los datos respecto a su media.

1.1.2.3 Coeficiente de variación

Debido a que la desviación estándar y la media tienen las mismas unidades, el coeficiente de variación es una relación de ambos, y se expresa en proporción o en porcentaje a través de la siguiente expresión:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

ecu.1.11

El *coeficiente de variación* es una medida de variabilidad relativa de una serie de datos que se utiliza cuando se quiere comparar la variabilidad de dos o más muestras o poblaciones, debido a que su valor es independiente de las unidades de medición.

1.2 Conceptos básicos de hidrología

La ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, es la ciencia cuyo cometido es el diseño y operación de proyectos de ingeniería civil para el control y aprovechamiento del agua. Es una herramienta que sirve para planear, construir y supervisar el funcionamiento de obras civiles, tales como: presas, vertedores, sistemas de drenaje, puentes, carreteras, aeropistas, sistemas de abastecimiento de agua, entre otros.

El objetivo de la hidrología es fijar la capacidad y seguridad de estructuras hidráulicas. Además, busca proveer una guía para el planeamiento y el manejo de los recursos hidráulicos.

1.2.1 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como la diferencia temporal entre el inicio de la lluvia hasta el momento en que se establece el equilibrio, es decir, el momento en el cual el gasto de escurrimiento es constante.

El tiempo de concentración t_c equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. Es función de la pendiente y rugosidad del

terreno, ya que estas características determinarán la velocidad que el agua puede adquirir dentro de la cuenca.

Es importante conocer el *tiempo de concentración*, ya que en modelos lluvia-escorrimento, la duración de la lluvia se considera igual al tiempo de concentración de la cuenca, puesto que es cuando se presenta el escurrimiento directo, es decir, la precipitación no es retenida en la superficie terrestre y tampoco infiltra en el suelo, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos.

La expresión para calcular el tiempo de concentración es:

$$t_c = \frac{L}{3600 v}$$

ecu.1.12

Donde:

t_c , Es el tiempo de concentración en *horas*.

L , Es la longitud del cauce principal de la cuenca en *m*.

v , Es la velocidad media del agua en el cauce principal en *m/s*.

Otra manera de estimar el *tiempo de concentración* es con la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

ecu.1.13

Donde:

t_c , Es el tiempo de concentración en *horas*.

S , Es la pendiente del cauce principal.

L , La longitud del cauce principal en *m*

1.2.2 Precipitación media

La precipitación varía en el espacio y tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales. Normalmente la precipitación que cae en un lugar específico es diferente a la que cae a sus alrededores aledaños. Por otro lado, debido a que la única información disponible es a través de registros históricos puntuales de lluvia, mediante pluviómetros o pluviógrafos, surge la necesidad de conocer la lluvia promedio que cae sobre un área determinada, por ejemplo, en una cuenca, y para ello existen tres métodos de uso generalizado, las cuales se explican más adelante.

1.2.2.1 Método aritmético

El método de la media aritmética es el más simple para determinar la lluvia promedio sobre un área. Consiste en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi}$$

ecu.1.14

Donde en donde h_{pi} es la precipitación puntual de cada estación, y n es el número de estaciones dentro de los límites de la cuenca de estudio.

Por otro lado, este método es satisfactorio sólo si las estaciones pluviométricas se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones individuales no varían de manera considerable de la media.

1.2.2.2 Método de polígonos de Thiessen

Considerando que algunos pluviómetros son más representativos que otros, el método de *Polígonos de Thiessen* asigna pesos relativos a cada pluviómetro de acuerdo a su área de influencia, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes, como se muestra en la *Figura 3.3*.

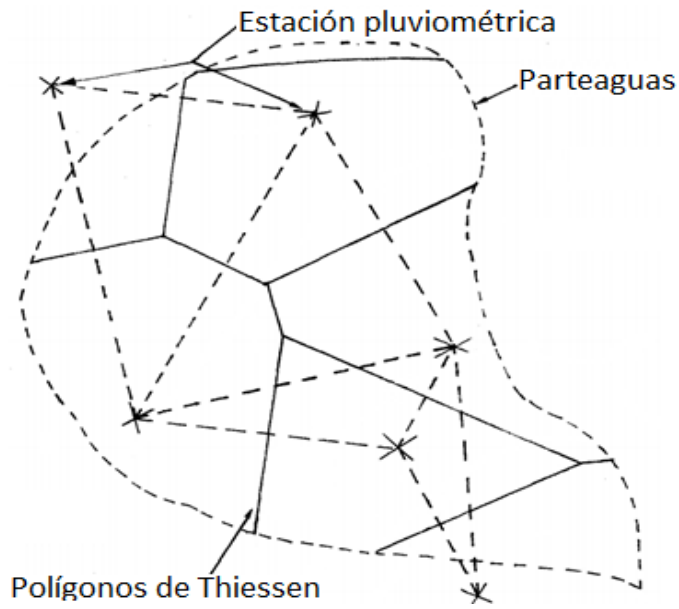


Figura 1.3. Cuenca con Polígonos de Thiessen

Para este método el tamaño y la configuración de los polígonos depende de la distribución de los puntos originales.

La expresión que determina la precipitación media dentro de una cuenca a través del método de *Polígonos de Thiessen*, es un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

ecu.1.15

Donde:

A_i , Es el área de influencia de cada estación i , en km^2 .

A , Es el área total de la cuenca en km^2 .

h_{pi} , Es la precipitación registrada de cada estación, en mm .

Por lo general, este método es más exacto que el de la media aritmética, sin embargo, no toma en cuenta los factores topográficos que afectan a la distribución de la lluvia.

1.2.2.3 Método de las Isoyetas

Es el único método que toma en cuenta los factores topográficos de la cuenca. Además es el método más laborioso y preciso.

Para elaborar un mapa de isoyetas se utilizan las alturas de precipitación que se tengan registradas en los pluviómetros, posteriormente se interpola entre pluviómetros adyacentes, dando origen a isolneas con contorno de lluvia constante.

La expresión utilizada para el cálculo de la precipitación media a través del método de isoyetas es la siguiente:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

ecu.1.16

Donde:

A_i , Es el área entre dos isoyetas consecutivas y el parteaguas de la cuenca en km^2 .

A , Es el área total de la cuenca en km^2 .

h_{pi} , Precipitación media entre dos isoyetas en mm .

Capítulo 2: Funciones de Distribución de probabilidad empleadas en hidrología.

2.1 Variable aleatoria discreta y variable aleatoria continua

Una variable aleatoria (v.a.) es una función que asocia a cada resultado del espacio muestral un número real. La *variable aleatoria discreta* es aquella que toma valores de un conjunto contable y finito, mientras que la *variable aleatoria continua* toma valores de un conjunto infinito no numerable. Un ejemplo de esta última podría ser el volumen de escurrimiento mensual de un río.

2.2 Función de distribución de probabilidad y densidad de probabilidad

Una distribución de probabilidad es un modelo teórico que describe la variación de los resultados de un experimento aleatorio, en otras palabras determina el comportamiento de la variable aleatoria X y proporciona las probabilidades de todos los posibles resultados que puede tomar la variable aleatoria, dichos valores se representan con la letra x .

Una *función de densidad de probabilidad* $f(x)$, se aplica únicamente para variables continuas, y describe la probabilidad de que la variable aleatoria esté comprendida dentro de un intervalo definido como se muestra en la figura 2.1:

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx \quad a, b \in \mathbb{R}$$

ecu.2.1

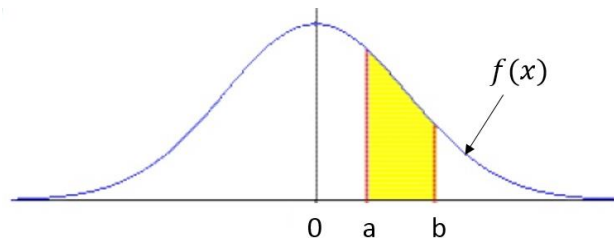


Figura 2.1. Intervalo de una función de densidad de probabilidad

De tal manera que las probabilidades son las áreas bajo la función de densidad. El área bajo la función de densidad entre dos puntos a y b se interpreta como la probabilidad de que la variable aleatoria tome valores comprendidos entre a y b .

La *función de densidad de probabilidad* siempre es positiva para cualquier valor que pueda adquirir la variable aleatoria $f(x) \geq 0$. Y además cumple con la propiedad de normalización que se define con la siguiente expresión:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

ecu.2.2

La *función de distribución de probabilidad* $F(x)$, es una función matemática que determina la probabilidad de que la variable aleatoria X tenga un valor menor o igual que x . En otros términos: para un valor dado de x , $F(x)$ es la probabilidad acumulada $P(X \leq x)$, y puede expresarse como la integral de la función de densidad de probabilidad sobre el rango $X \leq x$:

$$P(X \leq x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

ecu.2.3

Donde u es una variable de integración auxiliar.

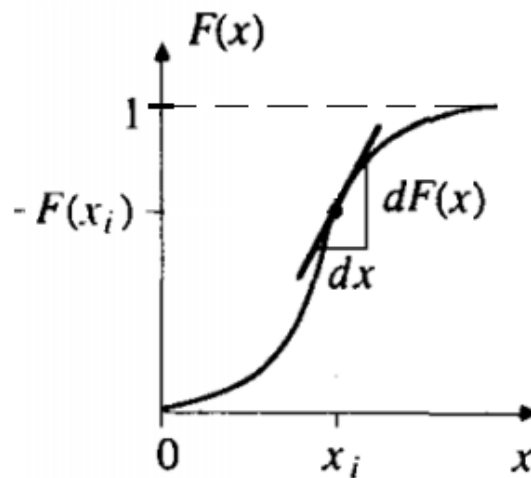


Figura 2.2. Función de distribución de probabilidad para una variable aleatoria continua

Tanto la *función de densidad* como la *función de distribución* están estrechamente relacionadas, mediante las siguientes expresiones:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad \text{ó} \quad f(x) = F'(x)$$

ecu.2.4

2.1.1 Periodo de retorno

Debido a que los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y tiempo en forma parcialmente predecible y parcialmente aleatoria, la probabilidad y estadística toman un papel de suma importancia en el análisis hidrológico.

El diseño y planeación de obras hidráulicas siempre está relacionado con eventos hidrológicos que toman en cuenta eventos que quizá no se hayan presentado anteriormente, o al menos no en un periodo de registros disponibles, pero que son necesarios conocer para determinar las dimensiones de una obra. Uno de los parámetros más representativos es el *periodo de retorno* $T(x)$, el cual se define como el tiempo promedio en años que se requiere para la ocurrencia de un evento x de igual o mayor magnitud y está dado por la siguiente expresión:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$

ecu.2.5

Donde:

$T(x)$, Es el periodo de retorno, en años, asociado a un valor.

$F(x)$, Función de distribución de probabilidad ajustada para los valores máximos anuales.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria. Entonces, sean $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ las precipitaciones ordenadas de mayor a menor, y m el número de orden que se asigna a cada número, siendo $m = 1$ para el valor máximo como se muestra en el ejemplo de la tabla 2.1.

Fecha	Precipitación <i>mm</i>	Precipitación ordenada <i>mm</i>	Numero de orden m
1992	X6	X9	1
1993	X3	X8	2
1994	X1	X7	3
1995	X9	X6	4
1996	X7	X5	5
1997	X6	X4	6
1998	X2	X3	7
1999	X5	X2	8
2000	X8	X1	9

Tabla 2.1. Para la obtención de periodo de retorno

Entonces si se desea obtener el *periodo de retorno* estimado para un valor x_i se aplica la expresión 2.6.

$$T_r = \frac{n + 1}{m}$$

ecu.2.6

Donde:

n , Es número de precipitaciones tomadas en cuenta.

T_r , Es el periodo de retorno estimado para cierta precipitación que ocupa el lugar m en la secuencia ordenada de mayor a menor.

Por ejemplo, si se desea obtener el valor de la lluvia de precipitación x_6 , sustituyendo la ecuación 2.6. quedaría lo siguiente:

$$T_r = \frac{8 + 1}{4} = 2.25 \text{ años}$$

Es decir, que el lapso que tiene que pasar para que una lluvia de magnitud x_6 ocurra es de *2.25 años*, por otro lado, si obtiene el recíproco de este valor se llegará a la probabilidad de que ocurra un evento igual o mayor magnitud en el año, arrojando un valor de 44.44%.

Debido a que *un periodo de retorno* de retorno se obtiene a través de los registros máximos, es importante contar con por lo menos 20 registros, sin embargo, por lo general, la cantidad de registros no es suficiente para determinar grandes periodos de retorno, es por eso que se deben emplear *funciones de probabilidad* que se ajusten al conjunto de datos que permitan extrapolar estos valores hasta llegar al periodo de retorno deseado. Aunado a esto, no todas las variables hidrológicas siguen la misma distribución, por ello, a continuación, se presentarán algunas distribuciones de probabilidad más utilizadas en la hidrología aplicada, así como los casos en los cuales se han aplicado dichas distribuciones.

2.1.2 Distribución Normal

La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, tal es el caso de las variables hidrológicas, como la precipitación anual, que calculadas como la suma de los efectos de muchos eventos independientes tienden a seguir una distribución normal (Chow, 1994). La función de densidad de probabilidad normal tiene una forma acampanada y es simétrica respecto a la media de los valores analizados, además su campo de existencia contempla

valores reales desde $-\infty$ hasta ∞ , esta función está dada por la expresión 2.7, mientras que la función de distribución de probabilidad está dada por la expresión 2.8

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{ecu.2.7}$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{ecu.2.8}$$

Donde μ es la media poblacional y σ es la desviación estándar de la población. Estos dos parámetros de distribución definen la forma de la función de densidad $f(x)$ como se muestra en la *Figura 4.1* y *Figura 5.2*.

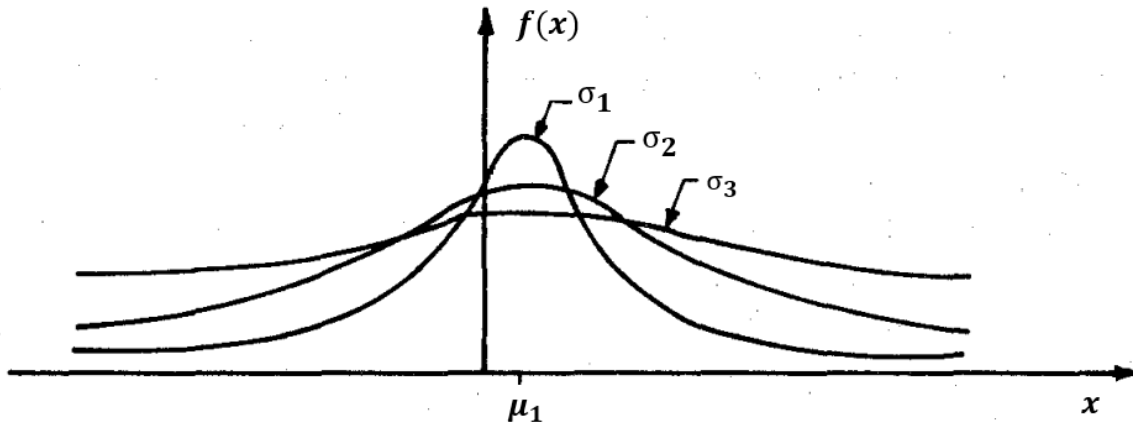


Figura 2.1 Función de densidad de probabilidad normal con mismo valor de μ pero con diferente valor de σ

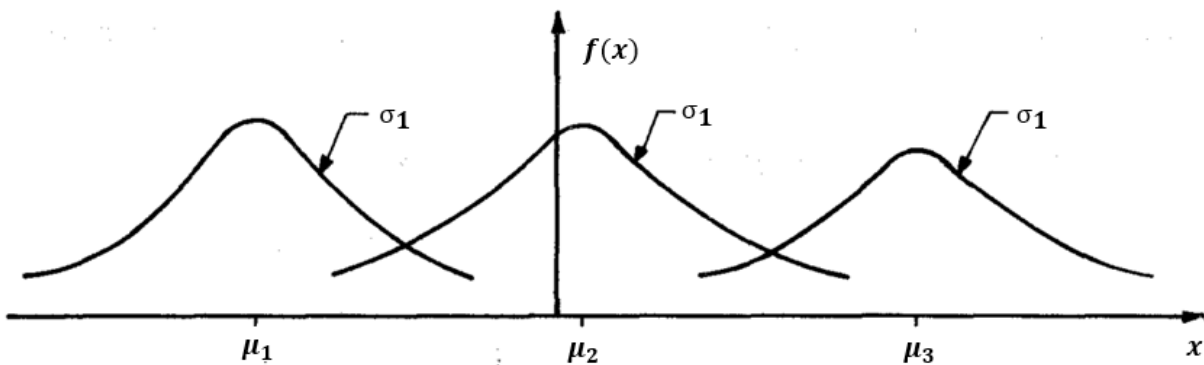


Figura 2.2. Función de densidad de probabilidad normal con mismos valores de σ pero con diferentes valores de μ

Sin embargo, para valuar una variable en una distribución normal, se utilizan métodos numéricos en los que participan los valores de μ y σ , de tal manera que la función $F(x)$ puede simplificarse definiendo la *variable normal estándar* z mediante la siguiente expresión.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

ecu.2.9

De tal manera que ahora la expresión de la *función de densidad de probabilidad* está dada por la ecuación 2.6, mientras que la *función de distribución de probabilidad normal estándar* es la ecuación 2.7.

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}; \quad -\infty \leq z \leq \infty$$

ecu.2.10

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

ecu.2.11

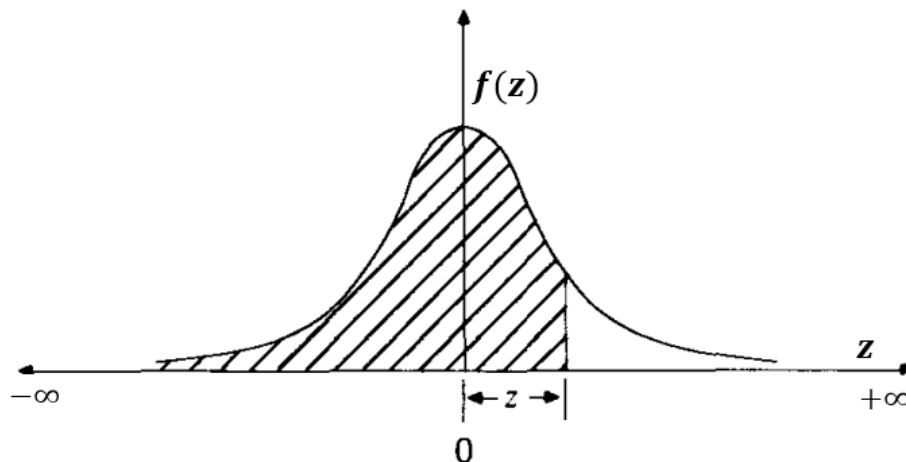


Figura 2.3. Función de densidad de probabilidad para la distribución normal estándar.

Es posible calcular $F(z)$ para cualquier valor de z ya que la función se encuentra calculada numéricamente y sus valores se encuentran en tablas.

No obstante, la aplicación de la distribución normal para la descripción de variables hidrológicas tiene dos principales limitantes. Por un lado, que la distribución normal varía a lo largo de un rango continuo $[-\infty, +\infty]$, y las variables hidrológicas no pueden ser negativas, y por otro lado, difícilmente se tendrá información hidrológica que sea simétrica alrededor de la media.

2.1.3 Distribución Gumbel

La distribución Gumbel se emplea para analizar valores extremos, ya sean máximos o mínimos. En el caso de la hidrología aplicada se utiliza para el análisis de gastos o precipitaciones máximas anuales. Su función de densidad de probabilidad está dada por la expresión 2.12, y su función de distribución de probabilidad está dada por la expresión 2.13:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad \text{ecu.2.12}$$

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad \text{ecu.2.13}$$

Donde α y β son parámetros de la función que se calculan con las expresiones 2.14 y 2.15 para muestras muy grandes.

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad \text{ecu.2.14}$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45 S \quad \text{ecu.2.15}$$

Para muestras relativamente pequeñas se emplea:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S} \quad \text{ecu.2.16}$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad \text{ecu.2.17}$$

Donde:

S , es la desviación estándar de la muestra.

\bar{x} , Es la media muestral.

μ_y y σ_y están determinados en la tabla 2.2

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

Tabla 1.2.

2.1.4 Distribución Doble Gumbel

Por lo general esta distribución se utiliza para realizar análisis hidrológicos en zonas donde se presentan dos poblaciones diferentes para una misma zona de estudio. Por ejemplo, en zonas costeras de México la primera población estaría referida a eventos meteorológicos habituales, mientras que la segunda población comprendería a los gastos producidos por las precipitaciones ciclónicas. La función de distribución de probabilidad está dada por la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \left[p + (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right]$$

ecu.2.18

Donde:

α_1 y β_1 son parámetros de forma de la primera población (no ciclónica)

α_2 y β_2 son parámetros de forma de la segunda población (ciclónica)

p Es la probabilidad de tener eventos no ciclónicos

$$p = \frac{\text{número de eventos no ciclónicos}}{\text{número total de eventos}} = \frac{N_n}{N_t}$$

ecu.2.19

Entendiéndose por población ciclónica a datos asociados a gastos mayores producidas por precipitaciones extraordinarias, y por población no ciclónica a datos asociados a precipitaciones producidas por eventos meteorológicos dominantes de la zona.

Los parámetros α_1 y α_2 definen una cierta inclinación de las curvas, entre más pequeñas más fuerte es la inclinación, y los parámetros β_1 y β_2 , definen la escala, donde el mayor valor que pueden tomar es el máximo valor de la muestra obtenido para las poblaciones 1 y la 2. Estos parámetros se calculan con las expresiones 2.14 y 2.15, las mismas que para la distribución Gumbel.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Métodos de Regionalización (Técnicas de agrupamiento)

El análisis hidrológico suministra la forma de inferir eventos para ciertos periodos de retorno en sitios con escasa o nula información, a través del empleo de las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca en el sitio de estudio y/o de sus cuencas vecinas. La mayoría de las técnicas regionales se basan en series de máximos anuales. (Escalante y Reyes, 2008).

El análisis regional de precipitaciones es una técnica que se apoya en la homogeneidad hidrológica de una región; es decir, en zonas de estudio cuyas características sean parecidas (homogeneidad estadística) que permitan generar grupos de estaciones climatológicas con registros históricos similares ajustados a una determinada función de probabilidad que presente un comportamiento muy similar de la muestra. La regionalización tiene la particularidad de tomar en cuenta varias estaciones en lugar de sólo hacer un análisis individual. Hoy en día existen diferentes métodos de regionalización, encaminadas a regionalizar parámetros que permiten evaluar eventos máximos para diferentes periodos de retorno en lugares donde no es posible acceder a información de este tipo, ya sea porque su información es poco confiable, tenga series de máximos anuales muy cortas, o de plano no exista información.

Por otro lado, debido que gran parte del territorio nacional no cuenta con suficientes estaciones climatológicas, es necesario aplicar una metodología de regionalización que tome en cuenta registros hidrológicos existentes, que permitan transferir dicha información de un punto a otro con información insuficiente o nula, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante.

Por lo general, la delimitación regional toma en cuenta límites políticos y áreas geográficas continuas, sin embargo, no se garantiza la homogeneidad debido a la gran variabilidad espacial de las características fisiográficas o hidrológicas, aunado a esto, actividades humanas como la apertura de áreas de cultivo o la construcción de embalses contribuyen al déficit de homogeneidad de los datos.

A continuación, se presentan algunos métodos para la identificación de regiones homogéneas.

3.1.1 Método de los Trazos Multidimensionales (Curva de Andrews)

El método emplea la técnica de regresión lineal múltiple para seleccionar las características fisiográficas y climatológicas adecuadas. La heterogeneidad de los

grupos que se forman de manera preliminar se evalúa mediante una técnica de posicionamiento, en la cual un punto en el espacio multidimensional se representa por una curva en dos dimensiones vía la función (Escalante y Reyes, 2008).

$$f(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \sin(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \sin(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots$$

ecu.3.1

Donde X_1 y X_2, \dots son características fisiográficas y/o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión y la función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$. Debido a que la función conserva las distancias, es una técnica ideal de comparación visual para la formación de grupos homogéneos.

Los resultados obtenidos dependen del tipo y del ordenamiento de las variables seleccionadas, donde las primeras variables son asociadas con componentes cíclicas de baja frecuencia y las últimas de alta frecuencia, siendo las de baja frecuencia las más fáciles de observar, por lo tanto, X_1 es la variable más significativa en el análisis de regresión, X_2 la segunda, y así sucesivamente.

Una vez desarrolladas las funciones $f(t)$, se generan envolventes que formen conjuntos de curvas de comportamiento similar y se deriva una curva media $\bar{f}(t)$, que represente los atributos físicos de cada grupo formado.

Para las curvas donde se tenga duda sobre si pertenece o no a un grupo particular se hará la siguiente prueba:

$$SS = \sum_{t=-\pi}^{\pi} \{ [f^j(t)] - [\bar{f}(t)]_k \}^2$$

ecu.3.2

Donde:

SS , es la suma de las diferencias al cuadrado entre los puntos que forman la curva en el sitio j .

$\bar{f}(t)$, es la curva característica de cada uno de los k grupos ya formados.

La cuenca se localizará en la región k donde se haya obtenido el menor valor de SS .

3.1.2 Método geográfico

Se basa en suponer que una región es homogénea, dada la proximidad de sus cuencas donde la delimitación se puede realizar trazando un radio de 80 km a partir

del centro de gravedad del sitio del proyecto y tomando toda la información proveniente de los sitios que quedan dentro de este radio (Escalante y Reyes, 2008).

3.1.4 Método del Coeficiente de Variación

Este método es ideal, ya que hace uso de una comparación gráfica entre atributos estadísticos de los registros analizados.

Para los datos de registro disponibles se obtiene el parámetro estadístico de centralización \bar{x}_i , y el parámetro estadístico de dispersión CV_i con los cuales se construye una gráfica, colocando en el eje de las ordenadas los coeficientes CV_i y en el eje de las abscisas la relación (\bar{x}_i/A_i) , donde A_i son las áreas drenadas de cada uno de los sitios. Por último, los grupos se forman por la concentración de puntos alrededor de determinado valor del coeficiente de variación.

3.2 Técnicas Regionales

La regionalización hidrológica se utiliza para obtener diferentes periodos de retorno en sitios con escasa o nula información, a través del empleo de las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca en el sitio de estudio y/o de sus cuencas vecinas, de tal manera que las cuencas involucradas tengan un comportamiento hidrológico similar para garantizar resultados confiables.

La mayoría de las técnicas regionales se basan en series de máximos anuales y unos pocos en series de excedentes anuales. Por otro lado, hay diversas técnicas de transferencia de información que se basan en métodos parcialmente o totalmente estadísticos y con diferentes niveles de complejidad. A continuación, se describen algunos tipos de análisis hidrológicos más utilizados.

3.2.1 Método de avenida índice

Es una técnica sencilla de regionalización ampliamente usada en la hidrología. Este método presenta diversas ventajas, entre las que se pueden mencionar las siguientes: la metodología es de aplicación y sistematización sencilla, el método requiere de la calibración de una sola ecuación índice, los estimadores regionales aseguran la consistencia en los resultados y los errores de estos estimadores son pequeños (Maidment, 1993).

Un método del tipo de avenida índice es el de Darlymple, el cual considera que las muestras se ajustan a la distribución de valores extremos tipo I (Gumbel), y se requiere que las muestras tengan igual longitud de registro.

3.2.2 Método de correlación y regresión múltiple

La dependencia o independencia de las variables se estima para cada sitio aforado mediante un proceso de correlación y regresión discriminante, donde la aportación de cada variable independiente es aprobada hasta lograr un modelo de regresión, en el que intervengan todas las variables que sean estadísticamente significativas para la estimación de la variable dependiente analizada. (Escalante y Reyes, 2008).

3.2.3 Estaciones – Año

Este método es utilizado para estimar largos periodos de retorno. Parte de la suposición de que los registros en los sitios son independientes entre sí, y consiste en el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro estandarizado de eventos, el cual una vez que se construye se ajusta a un conjunto de distribuciones de probabilidad. Esta técnica regional a diferencia de otras no requiere que las muestras tengan una longitud de registro común.

Para la aplicación de éste método se recomienda contar con una muestra de por lo menos 10 años de registro por estación, aunque si se tuviera una estación con menos años, pero con registros de eventos extremos que puedan afectar el comportamiento del fenómeno de la región, entonces debe ser tomada en cuenta en el estudio.

La secuencia de la aplicación de este método es la siguiente:

1. Se prueba dentro de la región analizada la homogeneidad de las series de datos.
2. De las series de los eventos analizados para cada estación Q_i^j , se obtienen los siguientes parámetros estadísticos muestrales: $\bar{x}_j, S_j^2, S_j, g_j, k_j, g_j, CV_j$ para $i = 1, \dots, n$ Años y $j = 1, \dots, ms$ sitios.
3. Para cada serie j verificar mediante la prueba de Anderson la independencia de eventos.
4. Para cada serie j generar una muestra modulada de la forma

$$q_i^j = \frac{Q_i^j}{Q^j}$$

ecu.3.6

5. Formar el registro llamado estación – año, de tamaño $n_T = \sum_{j=1}^{ms} n_j$ con todos los eventos modulados q_i^j .
6. Ordenar el registro de mayor a menor y asignar un periodo de retorno y una probabilidad de no excedencia.

$$T = \frac{n_T + 1}{m} \quad \text{ecu.3.7}$$

$$P(X \leq x) = P = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{ecu.3.8}$$

Donde:

T , es el periodo de retorno en años.

n_T , es el tamaño de muestra del registro estaciones – año.

m , es el número de orden del registro, desde $m = 1, \dots, n_T$.

P , es la probabilidad de no excedencia.

7. Ajustar diferentes funciones de probabilidad al registro formado en el paso 5, para el análisis de máximos (Normal, Log normal con 2 y 3 parámetros, Gamma con 2 y 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel, General de Valores Extremos, Weibull-2, Valores Extremos de dos Componentes, Gumbel Mixta, GVE Mixta, Weibull-2 y mezcla Gumbel-GVE), y se selecciona el que proporcione el mínimo error estándar de ajuste probabilidad de no excedencia.
8. Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste, estimar los eventos regionales para diferentes periodos de retorno, los cuales serán válidos para cualquier punto dentro de la zona analizada.

$$(q)_T^R = \left(\frac{Q}{\bar{Q}}\right)_T^R, \quad T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1\,000, 5\,000 \text{ y } 10\,000 \text{ años.}$$

ecu.3.9

9. Para obtener un evento \hat{Q}_T^j en un sitio j con escasa información, basta multiplicar la relación regional obtenida en el paso anterior por el correspondiente valor de \bar{Q}^j . Pero, si se desea un evento \hat{Q}_T^e en un sitio no aforado (e) que este dentro de la región, se construye la relación $\bar{Q}^j - A_j$, donde $A_j, j = 1, \dots, ms$ son las áreas drenadas, para que a partir de ella se pueda inferir el valor correspondiente de \bar{Q}^e para el área A_e del sitio (e). Esta última relación ser del tipo lineal, potencial o polinomial.

Capítulo 4: Ejemplo de aplicación

4.1 Zona de estudio (Descripción del estado de Oaxaca)



Figura 4.1. Zona de estudio

El estado de Oaxaca tiene una extensión de $93\,758\text{ km}^2$, lo que representa el 4.8% del territorio nacional. En 2015, su población fue de 3 967 889 habitantes, lo que representó el 3.3% del total del país, dicha población está distribuida en 77% urbana y 23% rural.

4.1.1 Ubicación

El estado de Oaxaca se encuentra en las regiones Suroeste e Istmo de Tehuantepec. Limita al norte con Puebla y Veracruz, al este con Chiapas, al sur con el océano Pacífico y al oeste con Guerrero.

Sus coordenadas geográficas extremas son: Al norte $18^{\circ}39'$, al sur $15^{\circ}39'$ de latitud norte; al este $93^{\circ}52'$, al oeste $98^{\circ}32'$ de longitud oeste.

La superficie estatal forma parte de las provincias: Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur, Sierras de Chiapas y Guatemala, Llanura Costera del Golfo Sur y Cordillera Centroamericana.






4.1.2 Clima

Debido a la accidentada geografía, el clima de estado de Oaxaca puede variar de manera drástica en sus regiones, por ejemplo, las costas se caracterizan por sus bajas temperaturas, mientras que en las regiones altas de las montañas impera el clima frío.

El 47% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo que se localiza en toda la zona costera y hacia el este, el 22% presenta clima cálido húmedo localizado principalmente en la región norte, el 16% presenta clima templado húmedo en las partes altas orientales de los cerros Volcán Prieto y Humo Grande, el 11% presenta clima seco y semiseco en la región centro sur y noroeste, el restante 4% presenta clima templado subhúmedo hacia el sur y noroeste del estado en zonas con altitudes entre 2 000 y 3 000 metros.



Figura 4.2. Climas del Estado

	Cálido subhúmedo	47%
	Seco y semiseco	11%
	Cálido húmedo	22%
	Templado subhúmedo	4%
	Templado húmedo	16%

*Referido al total de la superficie estatal.
FUENTE: Elaborado con base en INEGI. Carta de Climas 1:1 000 000.

Tabla 4.1. Climas del Estado

4.1.3 Hidrografía

Cuerpos de agua dentro del estado de Oaxaca:

Ríos

- Atoyac-Verde
- Grande-Salado
- Puxmetacán-Trinidad
- Cajonos
- Santo Domingo
- El Corte
- Tehuantepec
- Mixteco
- Valle Nacional-Papaloapan
- Aguacatenango-Jaltepec
- Grande
- Tequisistlán
- San Antonio
- Tonto
- Colotepec
- Amapa
- Xiquila
- Los Perros
- La Arena
- Putla
- Sarabia
- Joquila
- Espíritu Santo
- Petapa
- Ostuta
- Copalita
- Calapa
- Petlapa
- Minas
- Tenango
- Huamelula
- Ayutla
- Lalana

Presas

- Miguel Alemán (Temascal)
- Miguel de la Madrid Hurtado (Cerro de Oro)
- Presa Benito Juárez
- Presa Yosocuta

Lagunas

- Superior (Mar Santa Teresa)
- Inferior (Mar Tileme)
- Oriental
- Pastoría
- Chacahua
- Corralero
- Miniyua
- Mar Muerto

AÑO	OCEANO	NOMBRE	CATEGORÍA EN IMPACTO	LUGAR DE ENTRADA A TIERRA O COSTA MÁS CERCANA	PERIODO (inicio - fin)
1971	PACÍFICO	BRIDGET	TT	CACBAN, MICHOACÁN	14 - 20 JUN
1973	PACÍFICO	HEATHER	DT	SALINA CRUZ, OAXACA	31 AGO - 1 SEP
1974	ATLÁNTICO	FIFI	TT	EL CEDRO, CHIAPAS	14 - 22 SEP
	PACÍFICO	ORLENE	DT	LAG. MONROY, OAXACA	21 - 24 SEP
1980	ATLÁNTICO	HERMINE	TT	SACXAN, Q. ROO	20 - 26 SEP
1991	PACÍFICO	DT 5E	DT	PINOTEPA NAL., OAXACA	29 JUN
1993	PACÍFICO	BEATRIZ	TT	PINOTEPA NAL., OAXACA	18 - 20 JUN
1996	PACÍFICO	CRISTINA	TT	HUATILCO, OAXACA	1 - 4 JUL
1997	PACÍFICO	OLAF	TT	BOCABARRA, OAXACA	26 SEP - 12 OCT
	PACÍFICO	PAULINE	H3	PUERTO ANGEL, OAXACA	6 - 10 OCT
	PACÍFICO	RICK	H1	PUERTO ESCONDIDO, OAXACA	7 - 10 OCT
2000	PACÍFICO	ROSA	TT	PUERTO ANGEL, OAXACA	3- 8 NOV
2003	PACÍFICO	CARLOS	TT	15 NE PINOTEPA NACIONAL, OAXACA	25 - 27 JUN
2005	ATLÁNTICO	STAN	TT	FELIPE C. QROO	1 - 5 OCT
2010	PACÍFICO	DT 11E	DT	35 KM AL NW DE SALINA CRUZ, OAXACA	3 - 4 SEP
2011	ATLÁNTICO	HARVEY	DT	42 KM AL E-SE DE VILLAHERMOSA	18 - 22 AGO
	PACÍFICO	DT 12E	DT	10 KM AL OESTE DE CHAHUITES, OAXACA	12 - OCT

Tabla 4.2. Ciclones tropicales que impactaron el estado de Oaxaca (CONAGUA, 2011)

4.2 Información Disponible

Una estación climatológica es una instalación destinada a realizar mediciones y registros puntuales de parámetros como: precipitación, temperatura, evaporación, viento, entre otros; en México, hay existen diferentes bases de datos climatológicas encargadas de monitorear y recolectar toda esta información, algunas de ellas son:

- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Mapa de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) del Sistema Meteorológico Nacional (SMN)
- CLICOM de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Las estaciones climatológicas utilizadas para el presente trabajo pertenecen a la base de datos CLICOM, la cual es la base de datos del clima con carácter oficial en México, siendo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) el encargado de mantener y actualizar dicha base. Cuenta en promedio con alrededor de 5000 estaciones de observación (CFE, 2014). Dichas observaciones se realizan diario a las 08:00 AM.

4.2.1 Estaciones climatológicas disponibles en Oaxaca

Para cada estación se conoce su información climatológica de precipitación y sus respectivas coordenadas geográficas de longitud, latitud y elevación. En total se tienen 352 estaciones climatológicas dentro del estado de Oaxaca, aunque no todas se encuentren operando actualmente.

La nomenclatura utilizada para las estaciones climatológicas es la siguiente: La clave de las estaciones consta de cinco números, de los cuales, los dos primeros representan la entidad federativa en el que se encuentran las estaciones, en este caso es el número 20 para el estado de Oaxaca, mientras que los últimos tres se refieren al número de estación. (Ver ejemplo de la figura 4.4.)

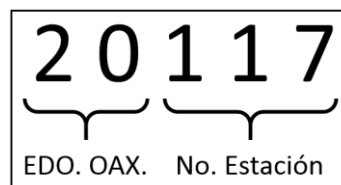


Figura 4.4. Ejemplo de clave para la estación “20117”

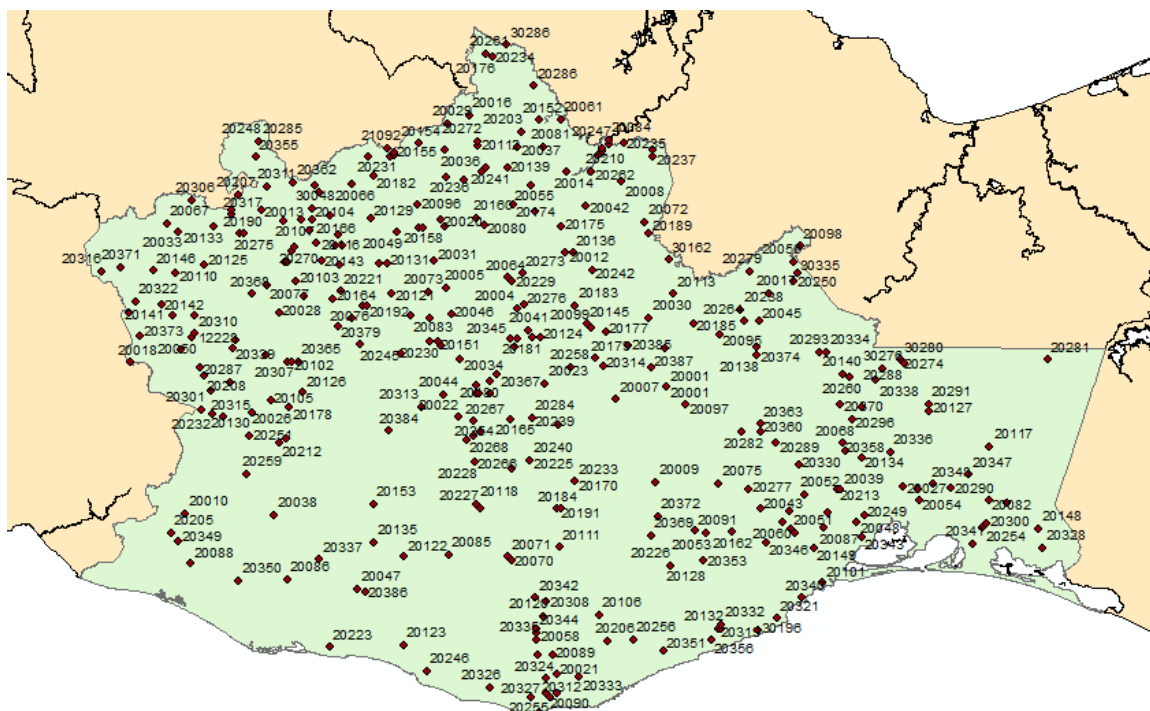


Figura 4.5. Estaciones climatológicas dentro del estado de Oaxaca

4.2.2. Selección y localización de las estaciones empleadas

Para poder tener un análisis más confiable la muestra de datos extraída debe ser lo más grande posible, no obstante, no todas las estaciones climatológicas pueden ser integradas en el análisis de regionalización, ya que deben cumplir dos principales condiciones: La primera, que la estación cuente con un registro histórico de por lo menos 20 años. La segunda, que sus precipitaciones máximas no se presenten entre los meses de octubre a diciembre, ya que es cuando ocurre la época de estiaje en el estado. Finalmente se obtuvieron un total de 190 estaciones participantes en el análisis de regionalización, las cuales se muestran la tabla 4.3.

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOND	LATD	ALTURA [m]
20001	SANTA MARIA ALOTEPEC	-95.867	17.067	2444
20002	SANTIAGO APOALA	-97.150	17.650	2269
20003	CONCEPCION BUENAVISTA	-97.417	17.967	2121
20004	SAN JUAN ATEPEC	-96.550	17.433	1975
20005	SAN JUAN BAUTISTA ATATLAHUCA	-96.838	17.533	983
20006	SAN BARTOLOME AYAUTLA	-96.667	18.033	702
20007	SAN PEDRO Y SAN PABLO AYUTLA	-96.100	17.017	2056
20008	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC	-96.006	17.918	70
20009	NEJAPA DE MADERO	-95.960	16.637	638
20010	SAN JUAN CACAHUATEPEC	-98.149	16.612	413
20012	SAN JUAN COMALTEPEC	-95.950	17.307	1395
20014	SAN LUCAS OJITLAN	-96.283	18.017	51
20015	LOMA BONITA	-95.958	18.063	15
20016	SANTA MARIA CHILCHOTLA	-96.717	18.283	255
20017	SAN JUAN COTZOCON	-95.383	17.450	82
20018	COICOYAN DE LAS FLORES	-98.300	17.250	2003
20019	SAN JUAN BAUTISTA COIXTLAHUACA	-97.317	17.733	2181
20020	CONCEPCION PAPALO	-96.867	17.833	2131
20022	SAN BARTOLO COYOTEPEC	-96.701	16.957	1533
20023	SAN MIGUEL AMATLAN	-96.417	17.125	2853
20024	SAN JUAN BAUTISTA CUICATLAN	-96.967	17.800	620
20025	SAN JUAN BAUTISTA CUICATLAN	-96.950	17.800	624
20026	CHALCATONGO DE HIDALGO	-97.529	16.950	2865
20027	HEROICA CIUDAD DE JUCHITAN DE Z.	-94.804	16.575	32
20028	VILLA DE CHILAPA DE DIAZ	-97.617	17.570	1881
20029	SANTA MARIA CHILCHOTLA	-96.817	18.250	1358
20030	SANTIAGO CHOAPAM	-95.933	17.367	900
20031	SAN JUAN BAUTISTA CUICATLAN	-96.900	17.650	720
20032	SANTA MARIA ECATEPEC	-95.883	16.283	1869
20034	VILLA DE ETLA	-96.800	17.207	1671
20035	HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE LEO	-97.783	17.800	1600
20036	HUAUTLA DE JIMENEZ	-96.833	18.133	1678
20037	SAN FELIPE JALAPA DE DIAZ	-96.521	18.101	118
20038	SANTIAGO IXTAYUTLA	-97.667	16.572	610
20039	CIUDAD IXTEPEC	-95.084	16.552	69
20040	SANTA CATARINA IXTEPEJI	-96.550	17.267	1926
20041	IXTLAN DE JUAREZ	-96.483	17.333	2312
20042	SANTA MARIA JACATEPEC	-96.200	17.867	47
20043	SANTA MARIA JALAPA DEL MARQUES	-95.447	16.442	160
20044	SAN FELIPE TEJALAPAM	-96.878	17.066	1742
20045	SAN JUAN COTZOCON	-95.433	17.333	70
20046	SAN JUAN BAUTISTA JAYACATLAN	-96.833	17.417	1629
20047	SANTA CATARINA JUQUILA	-97.300	16.233	1690
20048	HEROICA CIUDAD DE JUCHITAN DE Z.	-95.024	16.449	30

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOND	LATD	ALTURA [m]
20049	SAN PEDRO JOCOTIPAC	-97.083	17.710	2565
20050	SANTIAGO JUXTLAHUACA	-98.017	17.350	1680
20060	SANTA MARIA MIXTEQUILLA	-95.327	16.450	152
20061	SAN MIGUEL SOYALTEPEC	-96.300	18.250	27
20064	SAN PABLO MACUILTIANGUIS	-96.567	17.547	2139
20065	SANTA MAGDALENA JICOTLAN	-97.467	17.800	2248
20066	TEPELMEME VILLA DE MORELOS	-97.267	18.000	2086
20067	MARISCALA DE JUAREZ	-98.141	17.858	1072
20068	MATIAS ROMERO AVENDAÑO	-95.033	16.883	211
20070	MIAHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ	-96.594	16.329	1559
20071	MIAHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ	-96.617	16.350	1537
20072	LOMA BONITA	-95.903	17.783	73
20073	SANTIAGO NACALTEPEC	-96.933	17.517	2101
20076	ASUNCION NOCHIXTLAN	-97.217	17.467	2080
20077	SANTIAGO IXTAYUTLA	-97.668	16.601	399
20079	OAXACA DE JUAREZ	-96.710	17.083	1594
20080	OCOTLAN DE MORELOS	-96.667	16.800	1522
20081	SAN LUCAS OJITLAN	-96.396	18.059	139
20082	SANTO DOMINGO ZANATEPEC	-94.438	16.497	37
20083	SAN JERONIMO SOSOLA	-97.017	17.417	1551
20084	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC	-96.083	18.150	2744
20085	SAN VICENTE COATLAN	-96.883	16.367	1361
20086	SANTIAGO JAMILTEPEC	-97.617	16.260	438
20088	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL	-98.050	16.367	350
20089	PLUMA HIDALGO	-96.433	15.917	1338
20090	SAN PEDRO POCHUTLA	-96.467	15.750	165
20094	PUTLA VILLA DE GUERRERO	-97.873	17.117	1316
20095	SAN JUAN COTZOCON	-95.617	17.283	342
20096	SAN JUAN BAUTISTA CUICATLAN	-96.991	17.890	543
20097	SAN MIGUEL QUETZALTEPEC	-95.783	16.983	1211
20098	VILLA DE TUTUTEPEC DE MELCHOR O.	-97.433	16.011	27
20099	VILLA SOLA DE VEGA	-96.978	16.514	1409
20102	SAN AGUSTIN TLACOTEPEC	-97.518	17.200	2018
20103	SAN ANDRES LAGUNAS	-97.523	17.573	2310
20105	SAN ESTEBAN ATATLAHUCA	-97.679	17.065	2455
20106	SAN FRANCISCO OZOLOTEPEC	-96.217	16.083	1431
20108	SAN MARCOS ARTEAGA	-97.783	17.717	1544
20109	SAN JERONIMO TAVICHE	-96.575	16.733	1718
20110	SAN JORGE NUCHITA	-98.083	17.673	1409
20111	SAN JOSE LACHIGUIRI	-96.333	16.383	1679
20113	SANTIAGO CHOAPAM	-95.830	17.432	557
20114	SAN JUAN BAUTISTA VALLE NACIONAL	-96.368	17.839	346
20115	SAN SEBASTIAN TECOMAXTLAHUACA	-98.067	17.300	2352
20117	SAN MIGUEL CHIMALAPA	-94.748	16.712	120

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOND	LATD	ALTURA [m]
20118	SAN MIGUEL EJUTLA	-96.737	16.579	1446
20120	SAN MIGUEL SUCHIXTEPEC	-96.465	16.091	2453
20121	SAN PEDRO COXCALTEPEC CANTAROS	-97.142	17.496	2201
20122	SAN PEDRO JUCHATENGO	-97.089	16.343	879
20124	SANTIAGO XIACUI	-96.433	17.290	2173
20125	SANTO DOMINGO TONALA	-97.950	17.667	1349
20126	SANTA CRUZ ZENZONTEPEC	-97.495	16.537	960
20127	SANTA MARIA CHIMALAPA	-94.683	16.900	308
20129	SANTA MARIA IXCATLAN	-97.183	17.850	1896
20130	SANTA MARIA YUCUHITI	-97.800	17.017	1876
20133	HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE L.	-97.900	17.853	2099
20134	ASUNCION IXTALTEPEC	-95.000	16.717	217
20135	SANTIAGO MINAS	-97.217	16.433	956
20136	SAN JUAN BAUTISTA VALLE NACIONAL	-96.266	17.707	134
20137	TEOTONGO	-97.550	17.717	2076
20138	SAN JUAN MAZATLAN	-95.373	17.192	133
20139	SAN FELIPE JALAPA DE DIAZ	-96.550	18.050	137
20141	SILACAYOAPAM	-98.150	17.500	1675
20143	SAN CRISTOBAL SUCHIXTLAHUACA	-97.392	17.687	2348
20144	SAN CRISTOBAL SUCHIXTLAHUACA	-97.350	17.723	2084
20145	VILLA TALEA DE CASTRO	-96.250	17.350	1607
20146	SANTIAGO TAMAZOLA	-98.221	17.670	1782
20147	VILLA DE TAMAZULAPAM DEL P.	-97.567	17.667	2125
20148	SAN PEDRO TAPANATEPEC	-94.216	16.402	72
20149	SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC	-95.234	16.317	41
20150	SANTIAGO TENANGO	-97.002	17.232	2287
20151	SAN FRANCISCO TELIXTLAHUACA	-96.900	17.300	2260
20152	SAN MIGUEL SOYALTEPEC	-96.400	18.250	35
20153	SANTO DOMINGO TEOJOMULCO	-97.200	16.600	1255
20154	SANTA MARIA TEOPOXCO	-96.950	18.167	1974
20155	TEOTITLAN DE FLORES MAGON	-97.067	18.133	2002
20156	TEOTITLAN DE FLORES MAGON	-97.083	18.117	918
20157	TEPELME VILLA DE MORELOS	-97.367	17.867	2060
20158	SAN JUAN TEPEUXILA	-96.850	17.733	2115
20159	SAN PEDRO Y SAN PABLO TEPOSCOLULA	-97.500	17.517	2312
20160	SAN JUAN TEPEUXILA	-96.700	17.773	2373
20161	SAN PEDRO TEUTILA	-96.710	18.000	452
20162	MAGDALENA TEQUISISTLAN	-95.599	16.418	182
20163	TEZOATLAN DE SEGURA Y LUNA	-97.811	17.652	1527
20164	SAN PEDRO TOPILTEPEC	-97.367	17.480	2330
20165	TLACOLULA DE MATAMOROS	-96.483	16.950	1618
20167	HEROICA CIUDAD DE TLAXIACO	-97.683	17.267	2078
20168	HEROICA CIUDAD DE TLAXIACO	-97.683	17.267	2095
20170	SAN PEDRO TOTOLAPA	-96.307	16.670	944

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOND	LATD	ALTURA [m]
20172	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC	-96.117	18.100	26
20173	UNION HIDALGO	-94.833	16.465	11
20174	SAN FELIPE USILA	-96.533	17.883	127
20175	SAN JUAN BAUTISTA VALLE NACIONAL	-96.317	17.783	82
20176	ACATLAN DE PEREZ FIGUEROA	-96.525	18.514	121
20177	SAN ILDEFONSO VILLA ALTA	-96.150	17.350	1268
20178	CHALCATONGO DE HIDALGO	-97.583	17.033	2428
20179	VILLA HIDALGO	-96.183	17.200	1251
20181	IXTLAN DE JUAREZ	-96.467	17.300	2618
20182	SANTA MARIA IXCATLAN	-97.198	17.858	1915
20183	SAN JUAN YAEE	-96.283	17.433	1440
20184	SAN CARLOS YAUTEPEC	-96.108	16.503	846
20185	SANTIAGO YAVEO	-95.733	17.333	335
20186	SANTIAGO YOSONDUA	-97.600	16.900	2222
20187	SANTIAGO IXTAYUTLA	-97.625	16.604	437
20188	SANTA MARIA ZACATEPEC	-97.988	16.764	354
20189	SAN JUAN LALANA	-95.891	17.683	86
20190	ZAPOTITLAN PALMAS	-97.818	17.888	1913
20191	SANTA MARIA ZOQUITLAN	-96.367	16.550	1037
20200	SANTIAGO TETEPEC	-97.752	16.258	260
20202	SANTA ANA TLAPACOYAN	-96.817	16.740	1525
20203	SAN MIGUEL SOYALTEPEC	-96.483	18.200	68
20207	HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE L.	-97.854	17.759	1851
20209	ZIMATLAN DE ALVAREZ	-96.784	16.865	2879
20233	SAN PEDRO TOTOLAPA	-96.307	16.670	944
20256	SAN MIGUEL DEL PUERTO	-96.067	15.967	361
20265	SAN MATEO ETLATONGO	-97.267	17.417	2033
20266	SAN PABLO HUIXTEPEC	-96.781	16.827	1499
20271	SAN FRANCISCO TELIXTLAHUACA	-96.933	17.400	2233
20272	SAN JOSE TENANGO	-96.670	18.160	1208
20275	HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE L.	-97.767	17.800	1584
20277	SANTA MARIA MIXTEQUILLA	-95.281	16.475	477
20279	SANTIAGO COMALTEPEC	-96.561	17.597	2193
20280	SAN MIGUEL DEL RIO	-96.564	17.330	1496
20289	GUEVEA DE HUMBOLDT	-95.372	16.789	655
20290	SANTIAGO NILTEPEC	-94.608	16.558	60
20292	SANTO DOMINGO ZANATEPEC	-94.368	16.483	54
20303	SANTA MARIA TONAMECA	-96.544	15.739	48
20308	INGENIO CENTRAL PROGRESO	-96.683	18.900	2226
20313	SANTIAGO TLAZOYALTEPEC	-96.998	17.032	2500
20314	VILLA HIDALGO	-96.169	17.191	1191
20319	SANTIAGO ASTATA	-95.689	15.979	307
20326	SANTA MARIA TONAMECA	-96.723	15.789	145
20328	SAN PEDRO TAPANATEPEC	-94.233	16.250	23

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOND	LATD	ALTURA [m]
20329	OAXACA DE JUAREZ	-96.717	17.067	2301
20334	MATIAS ROMERO AVENDAÑO	-95.133	17.183	1641
20342	SAN MATEO RIO HONDO	-96.500	16.167	2485
20350	SANTIAGO JAMILTEPEC	-97.833	16.283	462
20353	ASUNCION TLACOLULITA	-95.727	16.301	353
20354	VILLA DE ZAACHILA	-96.782	16.948	1550
20355	COSOLTEPEC	-97.800	18.133	1825
20356	SANTIAGO ASTATA	-95.703	15.963	82
20364	SAN PABLO HUITZO	-96.883	17.283	1694
20367	TLALIXTAC DE CABRERA	-96.628	17.136	3034
20374	SAN JUAN MAZATLAN	-95.450	17.217	274
20379	MAGDALENA YODOCONO DE P.D.	-97.358	17.381	2310
20382	SANTA MARIA JALAPA DEL MARQUES	-95.374	16.434	82
20385	TOTONTEPEC VILLA DE MORELOS	-96.107	17.250	1645

Tabla 4.3. Ubicación de las 190 estaciones climatológicas tomadas en cuenta para el análisis de regionalización

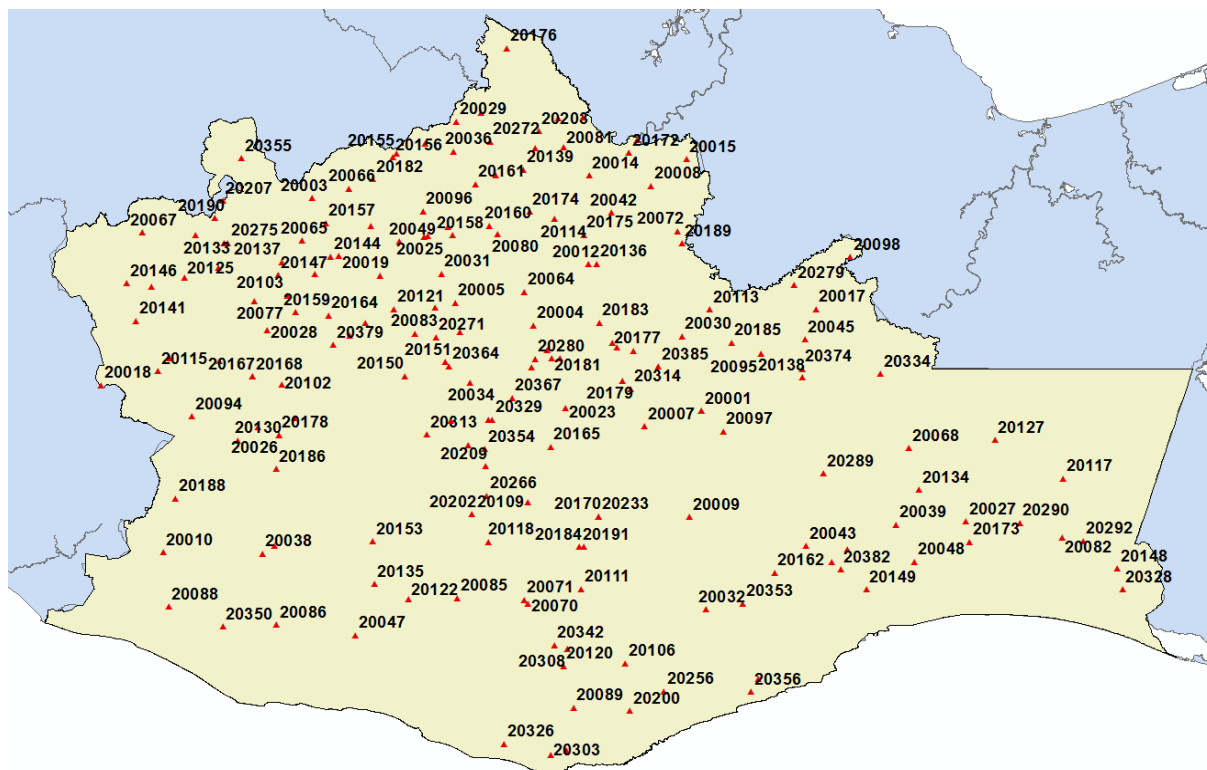


Figura 4.6. Mapa de las estaciones climatológicas tomadas en cuenta para el análisis de regionalización

Capítulo 5: Metodología aplicada

5.1 Obtención de datos de registro de precipitaciones

De la base de datos climatológica CLICOM, se obtiene un archivo llamado “OAX_DLY” el cual contiene toda la información de cada una de las estaciones climatológicas que operan dentro del estado de Oaxaca; cada estación tiene registros diarios de elementos que determinan el clima, como: temperatura, precipitación, evaporación, entre otros. Adicionalmente, cada uno de estos elementos tiene asignado una clave (Ver tabla 5.1.).

CLAVE	ELEMENTO
001	Temperatura ambiente 08 hs. °C
002	Temperatura máxima °C
003	Temperatura mínima °C
005	Precipitación 24 hs. mm
018	Evaporación 24 hs. mm
030	Días con tormenta (0 no hay, 1 sí hay)
031	Días con granizo (0 no hay, 1 sí hay)
032	Días con niebla (0 no hay, 1 sí hay)
043	Cobertura nubosa (0 despejado, 1 medio nublado, 2 nublado)
091	Días con helada (0 no hay, sí hay)

Tabla 5.1. Claves de los elementos de CLICOM

Para el análisis regional de precipitaciones, únicamente se utiliza el elemento con la clave 005 que corresponde a la precipitación generada en 24 horas.

Por lo antes mencionado, del archivo “OAX_DLY” se aplica un filtro para que únicamente aparezca el elemento con clave 005, una vez realizado esto se pueden apreciar los valores de precipitación relacionada con el año y mes en que se presentó dicho evento, como se muestra en la figura 5.1.

Posteriormente, se extraen los registros de precipitaciones máximas de cada estación para cada año, como se muestra en las figuras 5.2. y 5.3, luego se ordenan los datos en un nuevo archivo de Excel, de tal manera que se muestre la precipitación máxima anual de cada estación, una vez recopilada toda la información se clasifica de acuerdo a la región hidrológica a la que pertenece y se guarda en un archivo con terminación RDM. La delimitación de las regiones hidrológicas se realiza considerando la topografía del estado y la similitud entre registros históricos, este procedimiento se describe de manera detallada en el capítulo 5.2 “Conformación de regiones homogéneas”

	A	B	C	D	E	F
1	DATASET-ID	Station-ID	ELEMENT-CCYEAR	MONTH	PRECIPITACIÓN MAX	
2	20	20001	5	1950	4	51.5
3	20	20001	5	1950	6	169
4	20	20001	5	1950	7	125.9
5	20	20001	5	1950	8	60.1
6	20	20001	5	1950	9	68.3
7	20	20001	5	1950	10	156.5
8	20	20001	5	1950	11	42
9	20	20001	5	1950	12	10
10	20	20001	5	1951	2	7
11	20	20001	5	1951	3	32.5
12	20	20001	5	1951	4	17
13	20	20001	5	1951	5	91
14	20	20001	5	1951	6	116
15	20	20001	5	1951	8	100.9
16	20	20001	5	1952	1	28
17	20	20001	5	1952	2	14
18	20	20001	5	1952	3	10
19	20	20001	5	1952	4	43
20	20	20001	5	1952	5	40
21	20	20001	5	1952	6	134.2
22	20	20001	5	1952	7	84.5
23	20	20001	5	1952	8	72
24	20	20001	5	1952	9	79.3
25	20	20001	5	1952	10	48.5
26	20	20001	5	1952	11	32.1
27	20	20001	5	1952	12	9

Figura 5.2.

	A	B	C	D	E
1	Station-ID	ELEMENT-CCYEAR	MONTH	PRECIPITACIÓN MAX	
2	20001	5	1950	4	51.5
3	20001	5	1950	6	169
4	20001	5	1950	7	125.9
5	20001	5	1950	8	60.1
6	20001	5	1950	9	68.3
7	20001	5	1950	10	156.5
8	20001	5	1950	11	42
9	20001	5	1950	12	10
10			Máx. 1950		169
11	20001	5	1951	2	7
12	20001	5	1951	3	32.5
13	20001	5	1951	4	17
14	20001	5	1951	5	91
15	20001	5	1951	6	116
16	20001	5	1951	8	100.9
17			Máx. 1951		116
18	20001	5	1952	1	28
19	20001	5	1952	2	14
20	20001	5	1952	3	10
21	20001	5	1952	4	43
22	20001	5	1952	5	40
23	20001	5	1952	6	134.2
24	20001	5	1952	7	84.5
25	20001	5	1952	8	72
26	20001	5	1952	9	79.3
27	20001	5	1952	10	48.5
28	20001	5	1952	11	32.1
29	20001	5	1952	12	9
30			Máx. 1952		134.2

Figura 5.3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1																					
2	Año/Est.	20001	20006	20008	20012	20014	20017	20029	20030	20036	20037	20042	20072	20081	20084	20095	20113	20114	20136	20139	
3	1949					120															
4	1950					264.7															
5	1951					160											100				
6	1952	134.2				147.4				258.5				162.5	123.7		87				
7	1953	79.5				151.4			139	96.4		172		134			46				
8	1954	99.4				153.2			126			150.5	228	167	101.6				142.3		
9	1955	120.8				187		242.9	120	172.9		193.5		188	138.2		147		156.5		
10	1956	127.2	110.4			429			117	128.4	160.4	161		282.5	130				135		
11	1957	82.5	131.2	136		110.2			96.5	102.4	111	127	91.5	140			151		120		
12	1958		217.5	124		157.6		240	87	165.9	174	282	160.3	214	141.6		170		320		
13	1959		238.2	172.4	330	192.3	148.5	175.8	101	143.2	120.4	233	137.2	114	170.6		105		332		
14	1960	84.4	185	100	230	180		254.4	80	255.4	112	150.3	152		139.9	193.3	180		156		
15	1961	164.9	112	120	180	182.7	84.5	211	95	169.9	185.7	166.7	134		109				164	185	
16	1962	297	128	120	160.4	163	129.5	119	88.5	188.4	197.5	235.7	100		137.3	94.5	100.5	155	133	143.2	
17	1963	334.7	98.3	95.3	163	196.7	193.5	157.9	98	167.3	144.5	150.2	110.4	136.5	102.7	85.3	160	126.5	142.5	143.1	
18	1964	95.8	110	92	225.6	314.7	80.1	160.7	84	167.3	198.8	198.2	96.3	163.5	118.1	169.3	119.5	200	253.5	135	
19	1965	129	193		166.5	148.4		97.1	97	204.2		189.5	156.5	121	106.9	114.5	120	183.7	216.5	166.4	
20	1966	155.9		87.4	183.8	200.4	80.5	142		143.3		136.2		213	136.3	220	236.5	130.5	121	234.1	
21	1967		216.8	131.5	287.4	192.3	94	120	83	141.5	195.2	251.4	133.1	208.5	89	115.4	120.2	138.3	224.5		
22	1968	160	110	84.2	184.2	159	131	165	105	130.2	240.8	197.5	229	150.5	129.2	178	114.3	181.2	132	156.8	
23	1969		100	200	380.6	196.1	200	220.5	100.8	197.5	122.8	250	150.9	226.5	178.6	170.6	113.5	212.3	350	175	
24	1970		102	135.5	158.5	129	148.5	160	63.5	162.5	146		110.3	194.6	172	100	69.5	197.5	299	130	
25	1971	128.9	120	129.3	156	195.8	197.5	208.5		117.8	150	163.3		161.2	127.2	122.7	60	141	182	180	
26	1972		220	115.5	134	146.8	80	180.5	41.5	124.3	148	96.7	112.5	193.3	103.6	351	90	141.2	85.4	256.4	
27	1973		235	180.3	200.3	294	102	157	200	265.9	310	324.5	150.7	327.3	191.2	130.4	129.3	325.8	317.5	267.5	
28	1974	191	121	137.8	347.8	333	113.5	254.1	240	271.3	109	206.2	174	211.3		173	158		227.5	157.7	
29	1975		180	131.9	305.6	160.5	116.5	246	144	165.6	124	148	112.6	151	156.4	163.5	133	180	269	182	
30	1976	123	169	109.9	232.7	160	157.2	149.5	129	107.4	123	227.5	156.6	177.1	147.3	140.4	240	124	188.5	100.5	
31	1977		90	105.7	190.6	236.5	100.9	180	109	126.6	137	138.9	104.4	130	126.6	218	120	131.5	131	99	
32	1978	123	140	160.9	164.3	132	90	173.2	157	93.9	210	174.8	170.5	148	139.4		100	146	225	100.5	
33	1979	180		88.5	150	233.4	102	125.1	130	260.9	270	176.6	109	150	94.3		119	110.3	353.5	148.5	280
34	1980	103	131	221.9	174	205.6	160	182.1	90	165.9		194.1	227	185		93.5	60	140	123.5	164	
35	1981			178.8	332.7	164.6	132.9	515.3		136.2		216.2	160	171.6		120.9	107.1	155	328.3	148.4	
36	1982		105	112.5	227	137.5	200		108	77.5		213.1	99.2	127.3		94.8	88.5	111	130	138.5	
37	1983		126	136.6	260	207.3	121.4	270.4	163	137.3		221.8	140.3	104	128.2		140.1	360.5		181.3	
38	1984			147.5		241.3	183.2						102.5	234.3						163.5	
39	1985																				

Figura 5.4. Archivo RDM de la región 1

5.2. Conformación de regiones homogéneas

La regionalización agrupa las estaciones climatológicas que tengan características similares con la finalidad de generar regiones homogéneas. Para la delimitación de las regiones se tomaron en cuenta tanto las características topográficas del estado, como la cercanía entre las estaciones climatológicas (Ver figura 5.5 y 5.6.).

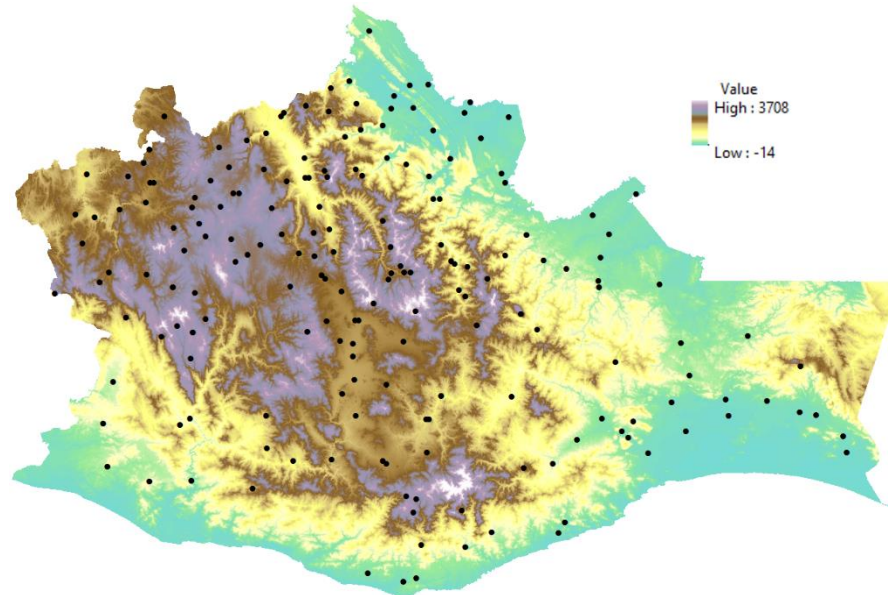


Figura 5.5. Topografía del estado de Oaxaca y ubicación de estaciones

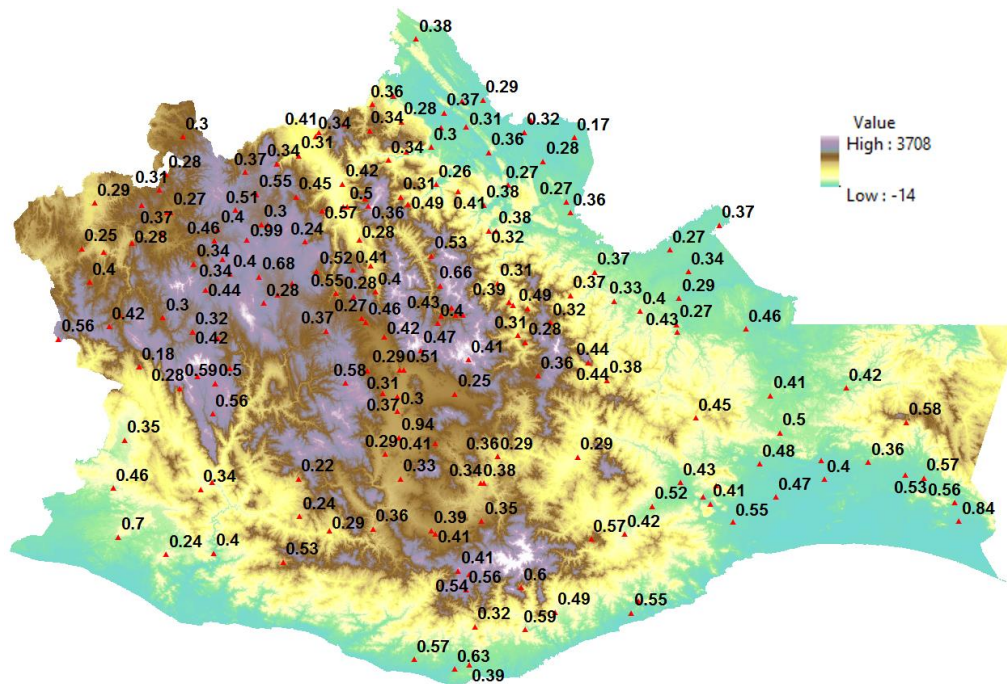


Figura 5.6 Coeficientes de variación y topografía del estado de Oaxaca

Además, se analizaron los coeficientes de variación (CV) de los valores máximos anuales de casa estación. De esta manera se crearon cuatro regiones hidrológicas dentro del estado (Ver tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10)

REGIÓN 1															
ESTACIÓN	20001	20002	20003	20004	20005	20007	20009	20018	20019	20020	20022	20023	20024	20025	20026
Máximo	334.7	60.0	120.0	285.0	95.0	158.2	81.4	325.0	100.0	216.7	110.0	152.8	91.5	114.8	146.5
Media	149.2	41.9	50.5	65.4	47.0	73.7	50.8	108.9	49.2	68.4	51.5	54.5	50.4	48.7	54.5
Desv.Est	66.3	10.1	18.6	43.2	17.3	26.5	14.7	60.6	17.2	33.9	18.9	22.4	17.1	24.3	27.3
Coef.Var.	0.44	0.24	0.37	0.66	0.37	0.36	0.29	0.56	0.35	0.50	0.37	0.41	0.34	0.50	0.50
ESTACIÓN	20028	20031	20032	20034	20035	20038	20040	20041	20044	20046	20047	20049	20050	20064	20065
Máximo	125.0	74.7	237.0	130.0	120.0	193.0	127.0	213.0	108.0	103.0	223.5	213.1	125.0	208.4	163.2
Media	48.16	44.80	91.18	56.94	51.69	86.23	51.62	65.23	54.31	55.77	76.48	71.41	52.38	83.11	53.70
Desv.Est	21.0	12.4	51.6	23.8	20.2	29.5	20.6	34.9	18.9	22.3	40.7	41.0	22.0	44.3	27.4
Coef.Var.	0.44	0.28	0.57	0.42	0.39	0.34	0.40	0.54	0.35	0.40	0.53	0.57	0.42	0.53	0.51
ESTACIÓN	20066	20067	20070	20071	20073	20076	20077	20079	20080	20083	20085	20094	20096	20097	20099
Máximo	101.0	84.0	149.0	103.0	125.6	105.0	195.0	117.0	196.0	60.5	121.0	145.2	120.6	200.0	266.0
Media	52.4	55.7	54.5	55.5	55.7	47.0	84.6	60.4	64.9	26.6	61.6	107.0	54.9	109.7	59.2
Desv.Est	17.8	16.1	22.1	21.4	22.9	19.6	28.8	17.7	31.8	14.8	22.3	18.7	23.3	41.8	39.2
Coef.Var.	0.34	0.29	0.41	0.39	0.41	0.42	0.34	0.29	0.49	0.55	0.36	0.18	0.42	0.38	0.66
ESTACIÓN	20102	20103	20105	20106	20108	20109	20110	20111	20115	20118	20120	20121	20122	20124	20125
Máximo	120.0	112.7	153.0	267.0	80.7	116.0	91.0	73.0	140.0	128.0	222.5	126.2	106.0	153.0	80.7
Media	50.9	52.0	57.7	97.1	55.5	52.3	54.2	43.3	67.3	55.9	79.5	41.8	48.3	63.7	51.6
Desv.Est	25.1	17.8	29.6	58.1	14.3	21.4	19.1	15.2	28.1	18.4	44.9	21.9	13.9	28.2	14.4
Coef.Var.	0.49	0.34	0.51	0.60	0.26	0.41	0.35	0.35	0.42	0.33	0.56	0.52	0.29	0.44	0.28
ESTACIÓN	20126	20129	20130	20133	20135	20137	20141	20143	20144	20145	20146	20147	20150	20151	20153
Máximo	300.0	150.5	180.0	126.0	100.0	90.0	124.0	400.0	82.0	196.2	86.0	140.0	96.0	97.0	161.0
Media	80.5	51.0	99.4	55.7	68.0	40.9	55.3	131.9	44.7	88.2	57.8	52.9	47.6	57.3	98.7
Desv.Est	42.3	23.1	28.1	20.5	16.1	16.4	22.3	130.7	13.6	34.1	14.5	24.2	17.5	15.4	21.3
Coef.Var.	0.53	0.45	0.28	0.37	0.24	0.40	0.40	0.99	0.30	0.39	0.25	0.46	0.37	0.27	0.22
ESTACIÓN	20154	20155	20156	20157	20158	20159	20160	20163	20164	20165	20167	20168	20170	20177	20178
Máximo	162.0	103.0	90.6	173.0	142.0	85.0	143.0	77.5	200.0	81.0	109.0	100.0	100.0	250.0	220.0
Media	80.4	52.4	53.3	50.3	67.9	45.9	81.9	43.0	54.8	46.9	51.3	51.9	44.9	94.5	54.8
Desv.Est	38.3	21.3	18.1	27.7	24.2	18.4	25.6	12.8	37.3	11.7	21.3	16.7	16.3	46.1	32.2
Coef.Var.	0.48	0.41	0.34	0.55	0.36	0.40	0.31	0.30	0.68	0.25	0.42	0.32	0.36	0.49	0.59
ESTACIÓN	20179	20181	20182	20184	20186	20187	20188	20190	20191	20202	20207	20209	20233	20265	20266
Máximo	102.2	135.5	66.4	111.0	199.2	145.5	139.8	94.8	91.0	97.7	110.2	102.3	80.0	110.0	320.0
Media	59.6	66.6	37.5	60.1	71.7	86.9	82.4	53.9	50.7	53.0	58.9	51.8	45.4	60.9	67.9
Desv.Est	18.4	25.4	11.8	20.5	39.9	23.8	28.7	16.5	19.4	15.3	16.6	15.5	13.3	19.9	63.5
Coef.Var.	0.31	0.38	0.31	0.34	0.56	0.27	0.35	0.31	0.38	0.29	0.28	0.30	0.29	0.33	0.94
ESTACIÓN	20271	20275	20277	20280	20308	20313	20314	20329	20342	20354	20355	20364	20367	20379	20385
Máximo	87.0	83.8	165.0	118.0	209.5	162.0	88.3	140.0	188.0	97.0	84.0	115.0	152.0	72.0	170.5
Media	55.6	54.0	90.2	48.5	77.2	62.8	54.8	59.9	110.7	53.8	49.3	54.0	59.0	49.4	101.4
Desv.Est	15.3	14.6	32.1	20.9	41.5	36.7	15.3	30.3	45.7	16.4	14.6	24.7	27.9	13.6	32.8
Coef.Var.	0.28	0.27	0.36	0.43	0.54	0.58	0.28	0.51	0.41	0.31	0.30	0.46	0.47	0.28	0.32

Tabla 5.2 Parámetros estadísticos para las estaciones de la región 1

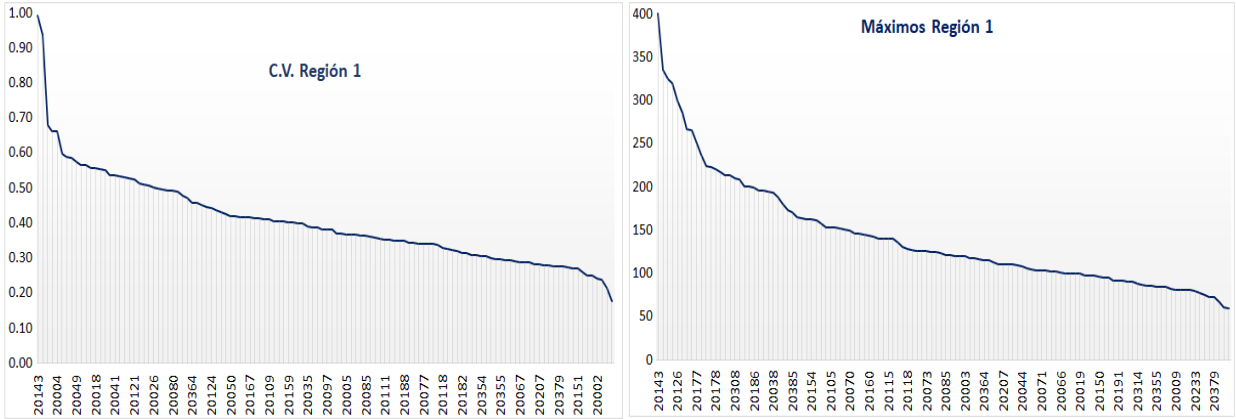


Figura 5.7. Variación de máximos y coeficiente de variación para la región 1

REGIÓN 2													
ESTACIÓN	20006	20008	20012	20014	20015	20016	20017	20029	20030	20036	20037	20042	20045
Máximo	238.2	227.1	380.6	442	136.4	307	268.5	515.3	240	271.3	310	324.5	185.3
Media	147.6	133.6	221	201.1	92.43	190.9	130.8	202.1	124	161.2	167	197.8	119.2
Desv.Est	48.32	36.89	71.07	72.11	16.17	59.8	44.51	73.21	46.22	54.22	52.97	52.81	34.37
Coef.Var.	0.327	0.276	0.322	0.359	0.175	0.313	0.34	0.362	0.373	0.336	0.317	0.267	0.288
ESTACIÓN	20061	20072	20081	20084	20095	20098	20113	20114	20136	20138	20139	20152	20161
Máximo	218	229	340	334.5	351	263	240	360.5	350	286	280	330.5	201
Media	118	137.7	181.6	135.1	149.8	132.2	114.5	188.3	200.6	153.6	168.3	151.1	114.8
Desv.Est	33.85	36.71	55.84	49.03	60.18	48.89	42.73	76.33	76.56	65.55	50.88	47.88	38.91
Coef.Var.	0.287	0.267	0.308	0.363	0.402	0.37	0.373	0.405	0.382	0.427	0.302	0.317	0.339
ESTACIÓN	20172	20174	20175	20176	20183	20185	20189	20203	20272	20279	20289	20334	20374
Máximo	342	360	368	240	240	290.5	306.2	324.4	352	260	269.5	382.2	265
Media	137.1	218.7	204.7	132.8	145.7	147.4	157.1	153	208.1	166.4	135.3	203.5	168.5
Desv.Est	43.29	57.43	76.9	50.26	45.56	48.3	56.38	56.48	58.97	45.34	60.66	94.39	45.51
Coef.Var.	0.316	0.263	0.376	0.378	0.313	0.328	0.359	0.369	0.283	0.272	0.448	0.464	0.27

Tabla 5.3 Parámetros estadísticos para las estaciones de la región 2

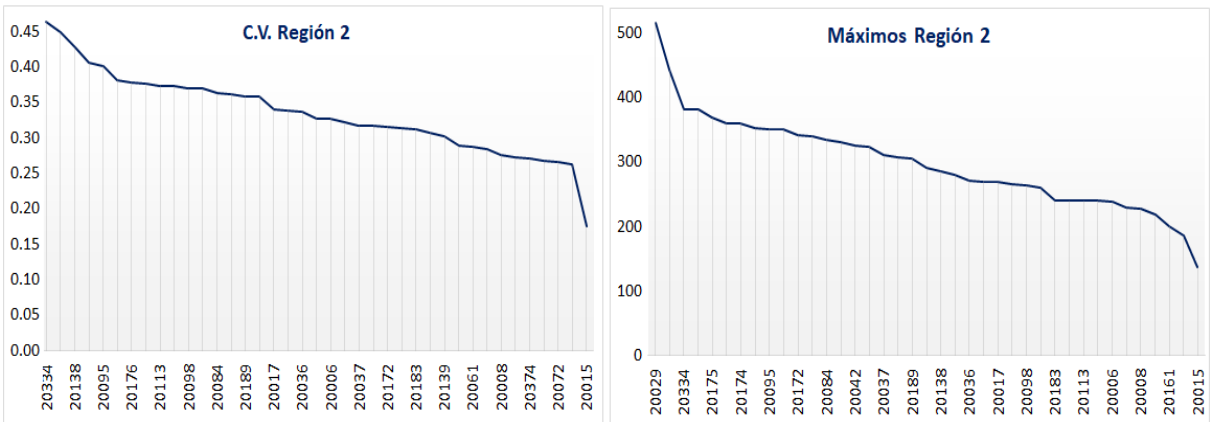


Figura 5.8. Variación de máximos y coeficiente de variación para la región 2.

REGIÓN 3										
ESTACIÓN	20027	20039	20043	20048	20060	20068	20082	20117	20127	20134
Máximo	217	282	206	315	320.5	240	381	300	296	304.0
Media	111.5	112.4	98.05	123.5	119.5	108.3	144.2	96.35	151.4	136.2
Desv.Est	41.33	53.49	42.43	57.75	63.25	44.26	75.72	56.07	63.61	67.83
Coef.Var.	0.371	0.476	0.433	0.468	0.529	0.409	0.525	0.582	0.42	0.498
ESTACIÓN	20148	20149	20162	20173	20290	20292	20328	20353	20382	
Máximo	435	379	239.5	216.5	201.2	420	310	189.4	248	
Media	146.5	142.9	82.15	120.3	108.6	149.4	91.29	99.31	117	
Desv.Est	81.36	78.48	42.34	48.12	39.17	85.49	76.53	41.31	47.7	
Coef.Var.	0.555	0.549	0.515	0.4	0.361	0.572	0.838	0.416	0.408	

Tabla 5.4 Parámetros estadísticos para las estaciones de la región 3

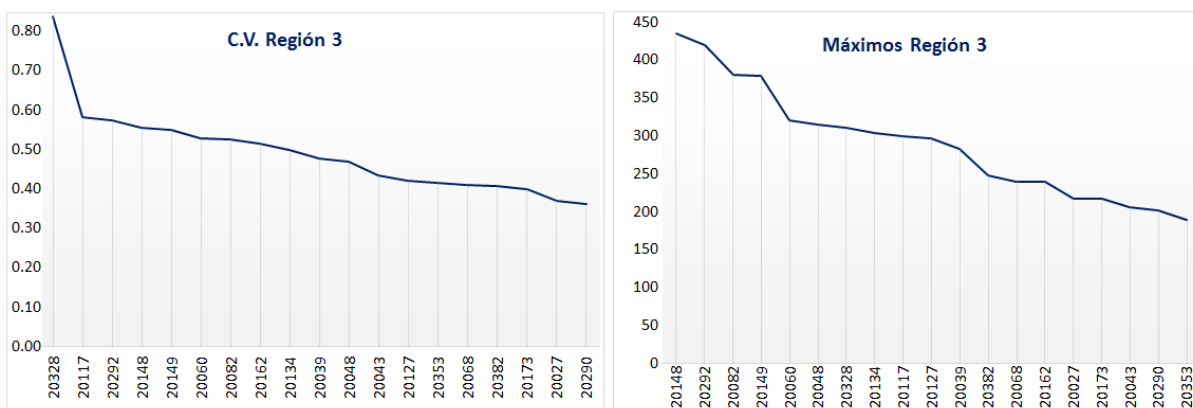


Figura 5.9. Variación de máximos y coeficiente de variación para la región 3.

REGIÓN 4												
ESTACIÓN	20010	20086	20088	20089	20090	20200	20256	20303	20319	20326	20350	20356
Máximo	340.5	182	450	205	211	293.7	317.2	330	332.8	300	167	234
Media	141.5	91.16	149.7	112.8	113	87.73	132.2	111.6	137.2	108.2	118.6	97.27
Desv.Est	64.51	36.5	104.7	36.48	44.19	52.09	64.29	70.12	64.48	61.52	27.94	53.3
Coef.Var.	0.456	0.4	0.699	0.323	0.391	0.594	0.486	0.628	0.47	0.568	0.236	0.548

Tabla 5.5 Parámetros estadísticos para las estaciones de la región 4

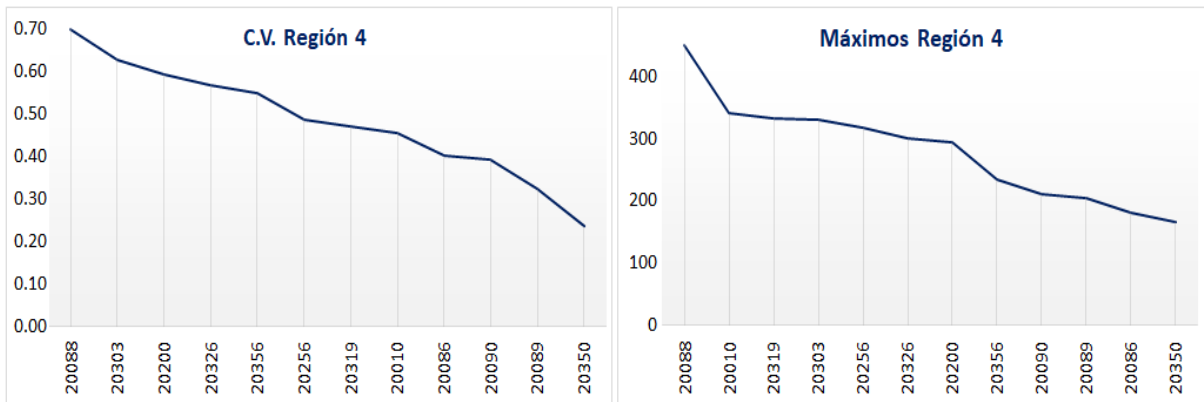


Figura 5.10. Variación de máximos y coeficiente de variación para la región 4

5.3. Regiones definidas

Una vez realizado el análisis a través de la variación de los C.V., los valores máximos, y la topografía del estado; se definieron cuatro regiones hidrológicas como se muestra en la figura 5.11 y 5.12.

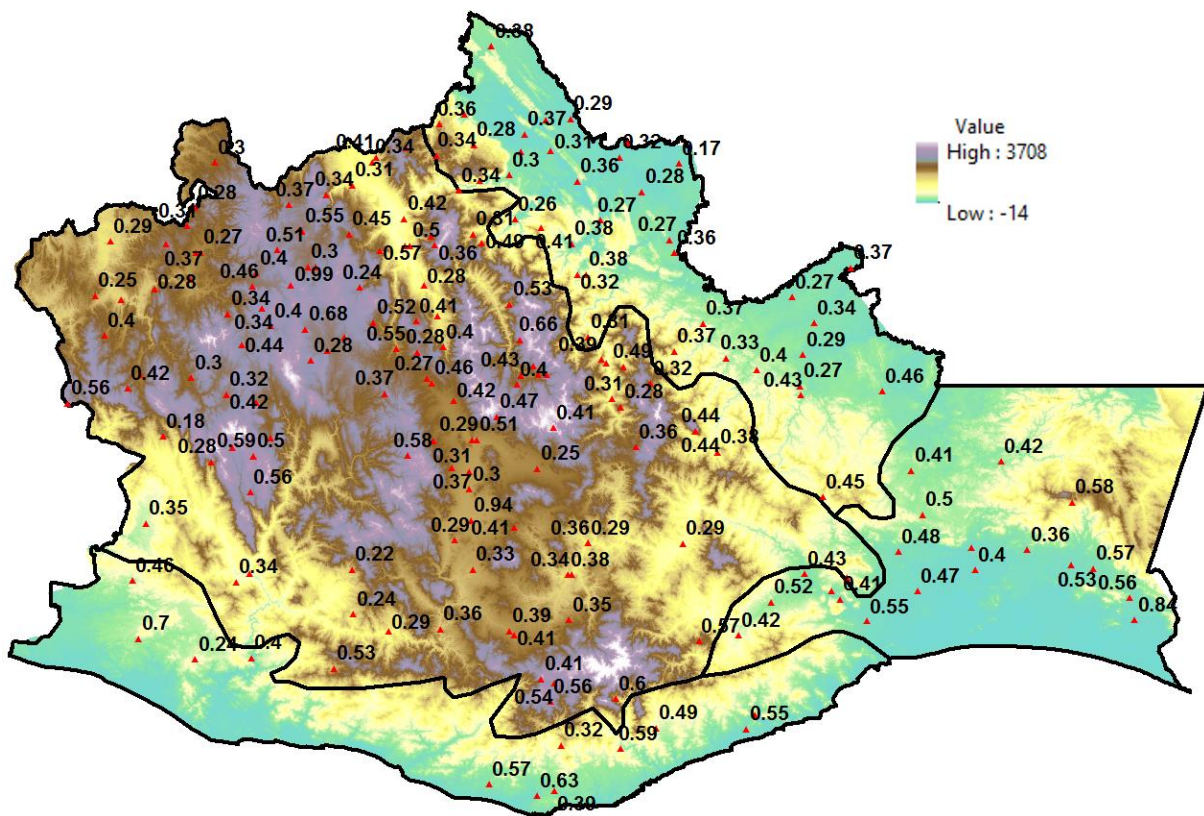


Figura 5.11. Delimitación de las regiones hidrológicas de Oaxaca



Figura 5.12. Regiones hidrológicas de Oaxaca

5.4 Depuración de estaciones climatológicas con CLICOM

El CLImate COMputing project (CLICOM) es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, dicha base de datos contiene los registros de una extensa red de estaciones climatológicas de gran cobertura geográfica, la cual es actualizada diariamente por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La interfaz gráfica de CLICOM se alimenta de la base de datos antes mencionada, cada estación climatológica reporta diferentes índices climatológicos, entre ellos los de precipitación.

Para el análisis regional de precipitaciones el sistema de software CLICOM resulta una excelente herramienta tanto para la depuración de estaciones climatológicas como para la obtención de valores estandarizados, en los siguientes párrafos se explica detalladamente cómo obtenerlos.

Depuración de estaciones climatológicas

1. Cargar el archivo OAX_DLY

Para cargar el archivo OAX_DLY se selecciona la opción “elegir archivo”, se busca la ubicación del archivo dentro de la computadora, una vez realizado esto se selecciona la opción “subir” y por último la opción “siguiente” como se muestra en la figura 5.13, 5.14. y 5.15

Carga Archivo de Estado

+ Elegir Archivo ↗ Subir ✖ Cancel

Siguiente

Figura 5.13. Pantalla de inicio de CLICOM

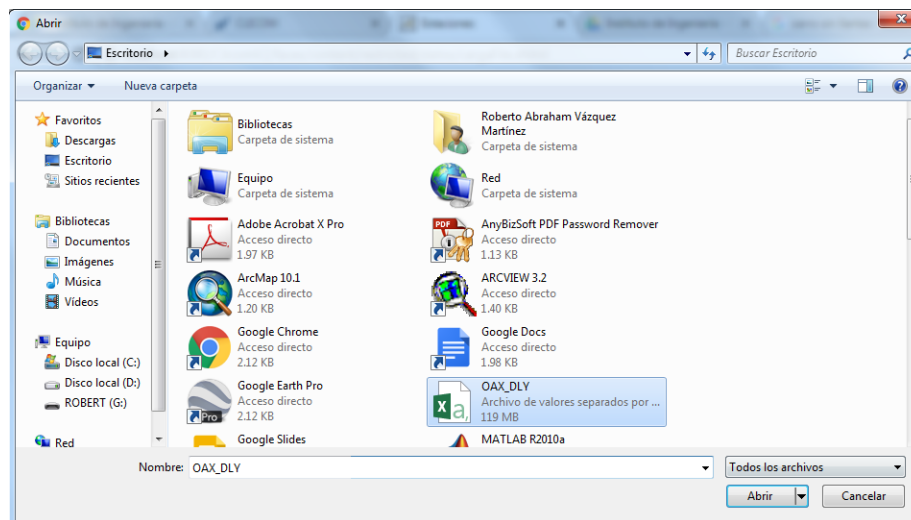


Figura 5.14. Ubicación del archivo OAX_DLY

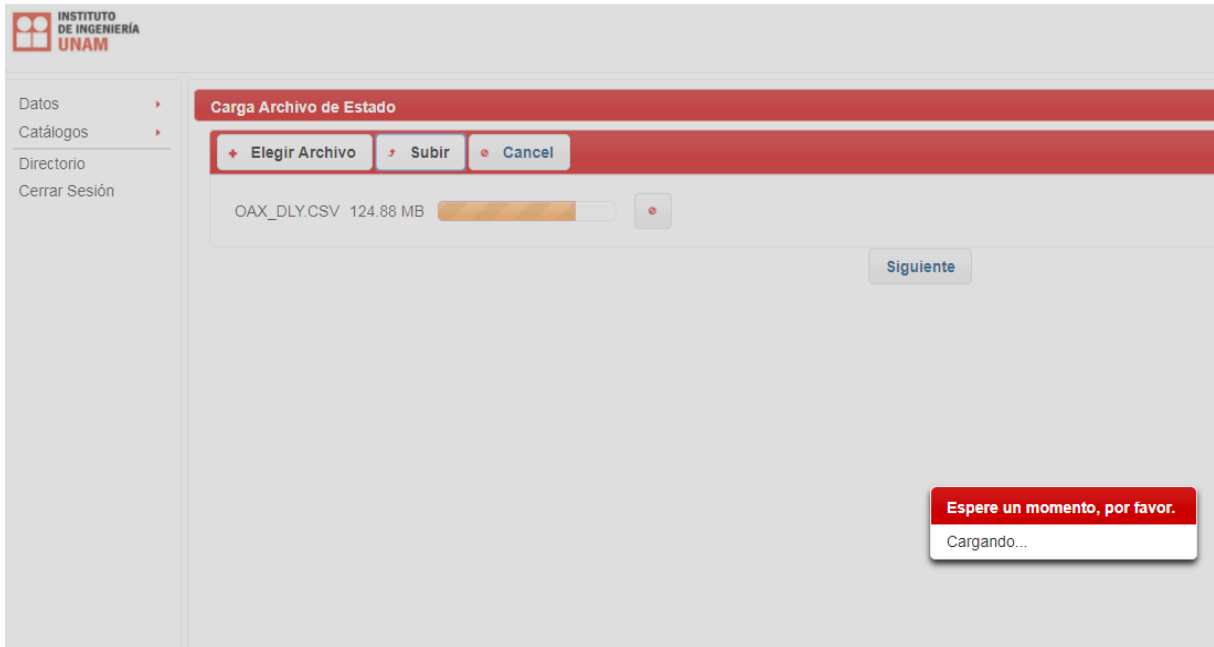


Figura 5.15. Archivo OAX_DLY cargando

2. Selección de estación climatológica a depurar

Una vez cargado el archivo OAX_DLY, se procede a escoger la estación climatológica a depurar, posteriormente se selecciona el código “005” que es el correspondiente a valores de precipitación, como se muestra en la figura 5.16

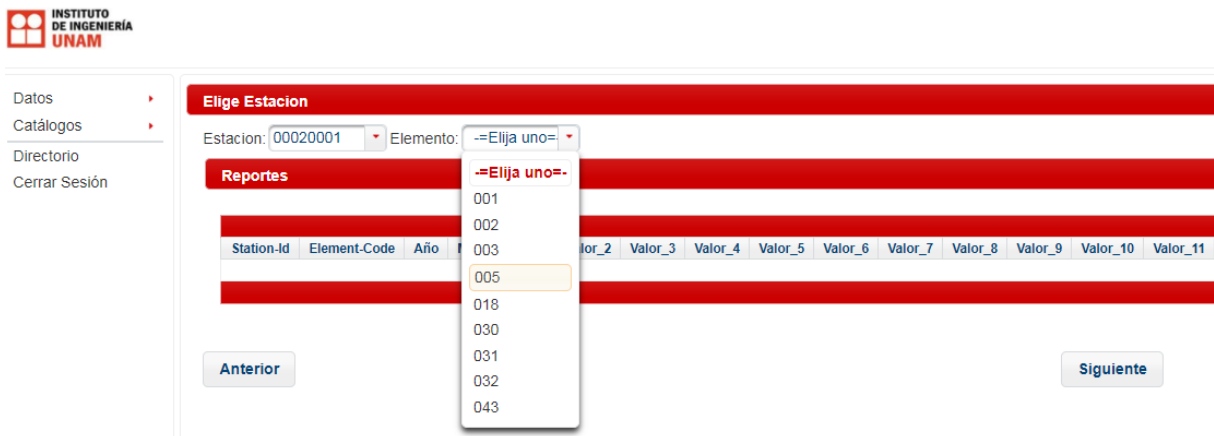


Figura 5.16 Selección de estación climatológica a depurar

3. Depuración de la estación climatológica

Inmediatamente se abre una ventana que muestra los años de registro para la estación seleccionada como muestra la figura 5.17, estos años deben ser comparados

con los del archivo RDM, para así conocer los años que se deben eliminar, por último, seleccionamos la opción “siguiente”

Elige Estacion

Estacion: 00020001 Elemento: 005

Reportes

Exportar Datos

Años contenidos en el archivo OAX_DLY

Station-Id	Element-Code	Año	Mes	Valor_1	Valor_2	Valor_3	Valor_4	Valor_5	Valor_6	Valor_7	Valor_8	Valor_9	Valor_10	Valor_11	Valor_12	Valor_13	Valor_14	Valor_15	Valor_16	Valor_17
00020001	005	1951	2	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	17.0	1.0	0.1	0.0	0.0	2.0	0.0
00020001	005	1951	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0	0.0	10.6	0.0	42.7	26.9	8.2	0.0	0.0	10.3
00020001	005	1951	6	0.0	116.0	0.0	43.0	109.3	5.2	9.5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	8	0.0	31.0	21.0	7.6	7.6	5.8	4.0	16.0	60.0	6.8	0.0	20.0	15.0	19.0	13.0	7.0	3.3
00020001	005	1952	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	2	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	14.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	4	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	6.2	4.5	3.5	6.0	0.0
00020001	005	1952	5	6.5	4.4	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	5.0	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	6	17.2	30.8	3.2	28.0	79.0	0.0	44.0	21.0	6.0	0.0	53.0	76.0	20.3	38.2	0.0	15.8	73.0
00020001	005	1952	7	15.5	0.0	0.0	77.0	29.8	27.0	7.8	0.0	0.0	15.0	0.0	30.4	0.0	34.0	0.0	84.5	2.5
00020001	005	1952	8	72.0	12.0	4.0	0.0	22.0	11.0	2.2	0.0	24.0	17.0	4.2	0.0	12.3	20.5	40.1	31.6	18.0
00020001	005	1952	9	6.3	17.2	28.0	6.4	1.0	4.0	2.0	0.0	0.0	0.0	58.0	34.5	43.6	29.2	4.2	4.2	0.0

Exportar Datos

Anterior

Siguiente

Figura 5.17. Depuración de la estación seleccionada

Una vez realizados los pasos anteriores, se abre una ventana como la que se muestra en la figura 5.18. Del lado inferior izquierdo se pregunta si se desea eliminar algún año, se selecciona la opción “sí”.

Reportes

Estación: 00020001 Elemento: 005 Años: 33

Días Faltantes por Mes

Element-Code	Station-Id	Year	Month	Description Days
005	00020001	1952	1	31
005	00020001	1969	6	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
005	00020001	1972	5	15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
005	00020001	1973	7	1 2 3 4 5 6 7 8 9
005	00020001	1973	12	11 12 13 14
005	00020001	1975	12	18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
005	00020001	1981	10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
005	00020001	1982	1	1

Eliminar Mes

¿ Desea Eliminar algun Mes ? Si No

Meses Faltantes por Año

Element-Code	Station-Id	Year	Description
005	00020001	1951	ENERO JULIO SEPTIEMBRE OCTUBRE NOVIEMBRE DICIEMBRE
005	00020001	1967	OCTUBRE NOVIEMBRE DICIEMBRE
005	00020001	1969	MAYO
005	00020001	1977	JUNIO
005	00020001	1981	MAYO JUNIO JULIO AGOSTO SEPTIEMBRE
005	00020001	1983	JULIO AGOSTO SEPTIEMBRE OCTUBRE NOVIEMBRE DICIEMBRE

Eliminar Año

¿ Desea Eliminar algun Año ? Si No

Año: Eliminar

Anterior

Siguiente

Figura 5.18.

En el espacio se escriben todos los años que se desean eliminar para esa estación, lo cuales son todos aquellos que no estén contenidos dentro del archivo RDM.

Eliminar Año

¿ Desea Eliminar algun Año ? Si No

Año:

Figura 5.19. Años a eliminar

Una vez terminado este paso se selecciona la opción “siguiente”, inmediatamente se abre una ventana en la cual se escribe “0.0001” y posteriormente se selecciona “limpiar”. ver figura 5.20.

Limpiar Datos

Es necesario limpiar los datos, indique el valor.

Sustituir (-99999)

Figura 5.20.

4. Descarga de archivo depurado

Por último, aparecerá una ventana, donde se confirma que la estación ha sido depurada. Posteriormente se exportan los datos como se muestra en el cuadro azul de la figura 5.21., el archivo descargado tendrá por nombre la clave de la estación seguido de la palabra “depurada”, ejemplo “00020001depurada”

Reportes

Exportar Datos

Estación depurada

																	Datos Estación		
Station-Id	Element-Code	Año	Mes	Valor_1	Valor_2	Valor_3	Valor_4	Valor_5	Valor_6	Valor_7	Valor_8	Valor_9	Valor_10	Valor_11	Valor_12	Valor_13	Valor_14	Valor_1	Valor_2
00020001	005	1951	2	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.3	0.0	0.0
00020001	005	1951	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	17.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0	0.0	10.6	0.0	42.7	26.9	8.2	0.0	0.0
00020001	005	1951	6	0.0	116.0	0.0	43.0	109.3	5.2	9.5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1951	8	0.0	31.0	21.0	7.6	7.6	5.8	4.0	16.0	60.0	6.8	0.0	20.0	15.0	19.0	13.0	0.0
00020001	005	1952	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	2	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	14.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	4	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	6.2	4.5	3.5	0.0
00020001	005	1952	5	6.5	4.4	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	5.0	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	6	17.2	30.8	3.2	28.0	79.0	0.0	44.0	21.0	6.0	0.0	53.0	76.0	20.3	38.2	0.0	0.0
00020001	005	1952	7	15.5	0.0	0.0	77.0	29.8	27.0	27.0	7.8	0.0	0.0	15.0	30.4	0.0	34.0	0.0	0.0
00020001	005	1952	8	72.0	12.0	4.0	0.0	22.0	11.0	2.2	0.0	24.0	17.0	4.2	0.0	12.3	20.5	40.1	0.0
00020001	005	1952	9	6.3	17.2	28.0	6.4	1.0	4.0	2.0	0.0	0.0	0.0	58.0	34.5	43.6	29.2	4.2	0.0

Exportar Datos

Figura 5.21. Descarga de la estación depurada

5. Depuración del resto de las estaciones

Para realizar la depuración del resto de las estaciones se selecciona la opción de Datos> Procesar> Estación, como se muestra en la figura 5.22. y se vuelve a repetir del paso uno al cinco hasta depurar todas las estaciones que se deseen.



Figura 5.22. Descarga de la estación depurada

5.5. Valores estandarizados con CLICOM

Los valores estandarizados son el resultado de dividir cada valor máximo, entre la media de la estación correspondiente, a continuación, se describe el procedimiento para obtener estos valores con el uso del software CLICOM.

1. Selección de las estaciones

De la pantalla de inicio seleccionar DATOS> PROCESAR> MÁXIMO como se muestra en la figura 5.23. Luego se elige la estación de la cual se desea obtener los valores estandarizados y por último se selecciona la opción “generar” como se muestra en la figura 5.24. Una vez concluido este paso, se vuelve a repetir el mismo procedimiento para todas las estaciones de las cuales se deseen obtener los valores estandarizados.



Figura 5.23.

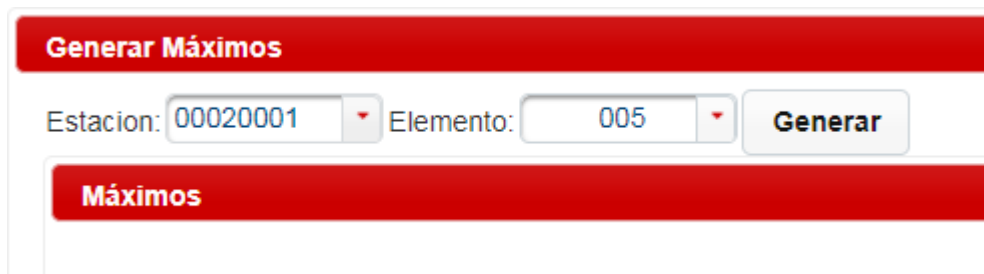


Figura 5.24

2. Obtención de los valores estandarizados

De la pantalla de inicio seleccionar DATOS> PROCESADOS> MÁXIMOS como se muestra en la figura 5.25. Inmediatamente se abre una ventana preguntando si se desean elegir varias estaciones, se indica que “sí”, luego se escoge el elemento “0.005” que es el correspondiente a lluvia, después se seleccionan todas las estaciones climatológicas de las cuales deseamos obtener los valores estandarizados y finalmente seleccionamos las opciones de “consultar” y “máximos” y descargamos el archivo que contiene los valores estandarizados (Ver figura 5.26. y 5.27.).



Figura 5.25

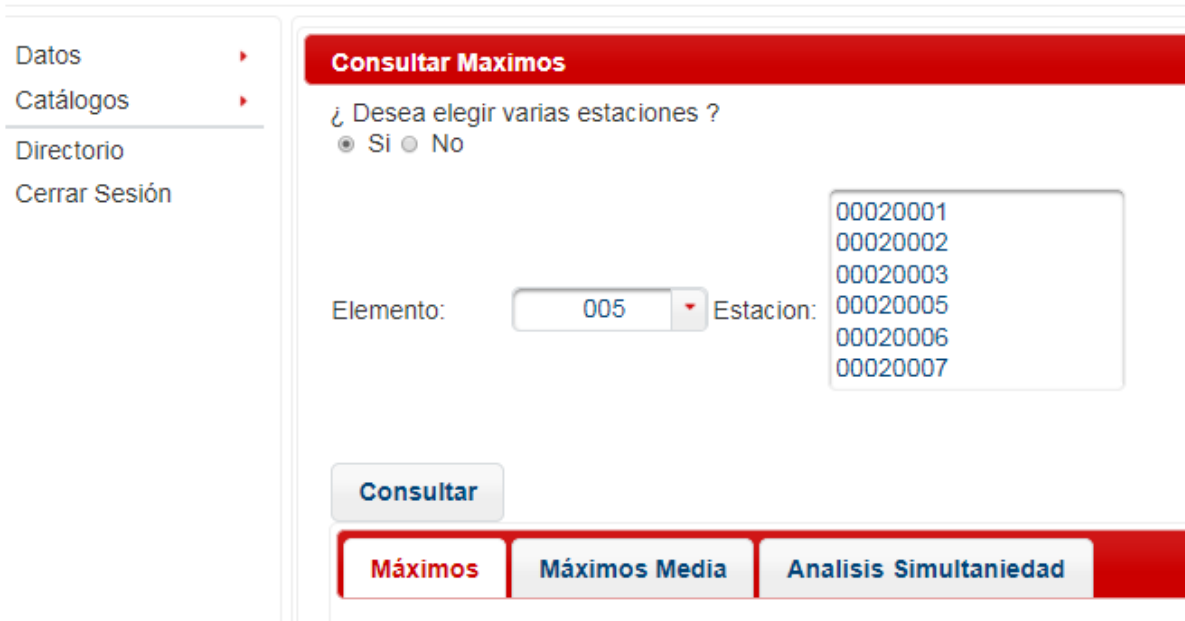


Figura 5.26

Consultar

Máximos Máximos Media Analisis Simultaneidad

Exportar Datos

Station_id	Año	Valor_1	Valor_2	Valor_3	Valor_4	Valor_5	Valor_6	Valor_7	Valor_8	Valor_9	Valor_10	Valor_11	Valor_12	Valor_13	Valor_14
00020367	1982	64.0	33.5	32.666666666666664	31.0	26.0	22.166666666666668	20.428571428571427	18.25	16.333333333333332	14.7	13.454545454545455	12.833333333333334	11.846153846153847	11.928571428571429
00020367	1983	33.0	21.5	21.666666666666668	19.75	16.0	15.25	13.357142857142858	12.5	11.111111111111111	11.25	10.409090909090909	9.708333333333334	8.961538461538462	8.464285714285714
00020367	1984	38.0	33.5	25.0	21.25	20.2	16.916666666666668	16.142857142857142	14.375	12.833333333333334	12.5	12.818181818181818	12.25	11.76923076923077	11.357142857142858
00020367	1985	40.0	25.0	25.666666666666668	21.75	20.0	17.5	16.428571428571427	15.0	13.666666666666666	12.6	11.454545454545455	10.5	9.692307692307692	9.0
00020367	1986	65.0	32.5	24.333333333333332	24.5	20.6	17.166666666666668	15.857142857142858	14.5	13.111111111111111	11.9	11.090909090909092	10.166666666666666	9.384615384615385	8.714285714285714
00020367	1987	35.0	28.5	23.666666666666668	21.5	19.2	17.333333333333332	15.428571428571429	13.5	12.0	10.8	9.818181818181818	9.0	8.307692307692308	7.714285714285714
00020367	1989	42.0	33.5	23.333333333333332	19.75	17.4	14.5	12.571428571428571	11.0	9.777777777777779	10.5	9.545454545454545	8.916666666666666	8.23076923076923	8.142857142857142
00020367	1993	40.0	25.0	16.666666666666668	14.0	11.2	9.333333333333334	8.0	7.0	6.222222222222222	5.6	5.090909090909091	4.866666666666667	4.3076923076923075	4.142857142857143
00020367	1994	43.0	30.5	22.0	21.0	17.6	16.166666666666668	15.0	13.5	13.111111111111111	11.8	11.181818181818182	10.416666666666666	10.076923076923077	9.357142857142858
00020367	1996	65.0	34.0	31.333333333333332	27.5	24.6	23.166666666666668	21.714285714285715	20.5375	19.700000000000003	17.830000000000002	16.39090909090909	15.106333333333334	14.176923076923079	13.664285714285715
00020367	1997	36.0	22.0	21.666666666666668	17.0	14.4	14.5	14.0	12.25	10.888888888888889	10.6	9.636363636363637	8.833333333333334	8.76923076923077	8.428571428571429
00020367	1998	48.0	23.0	25.666666666666668	22.25	21.8	22.333333333333332	19.857142857142858	17.875	16.0	15.7	14.636363636363637	13.75	13.461538461538462	12.785714285714286
00020367	1999	68.0	38.5	34.0	29.25	26.0	22.833333333333332	20.285714285714285	18.375	17.666666666666668	17.2	16.727272727272727	16.666666666666668	16.384615384615383	15.714285714285714
00020367	2000	63.0	43.0	33.0	25.25	20.4	17.166666666666668	16.571428571428573	14.5	14.777777777777779	14.3	13.909090909090909	12.75	11.923076923076923	12.142857142857142
00020367	2001	56.0	37.0	25.666666666666668	23.25	19.6	17.333333333333332	16.0	15.875	14.777777777777779	13.6	13.363636363636363	13.666666666666666	13.615384615384615	12.857142857142858

Exportar Datos

Figura 5.27.

5.5. Obtención de las funciones de distribución para cada región con Ax.

Ax es un software de modelación matemática de eventos extremos de precipitación, tiene el cometido de ajustar distintas funciones de probabilidad a una serie de datos de lluvia, además calcula el error estándar de cada una de las funciones respecto de la muestra. Las funciones de probabilidad que contempla Ax son: Normal, Log-normal, Gumbel, Exponencial, Gamma y doble Gumbel.

Para obtener las funciones de distribución con Ax, se utilizan los valores estandarizados proporcionados con CLICOM, estos son procesados en el software, donde se determina la función de probabilidad que mejor se ajuste a estos valores, y por último se hace una extrapolación que permita estimar los valores para distintos periodos de retorno. A continuación, se describe todo el procedimiento.

Los valores estandarizados se agrupan de acuerdo con la región que pertenecen, posteriormente cada grupo de valores estandarizados se guarda en un archivo de block de notas con terminación “.AJU” y se guardan en una carpeta dentro del Disco local (C:) como se muestra en la figura 5.28. y 5.29.

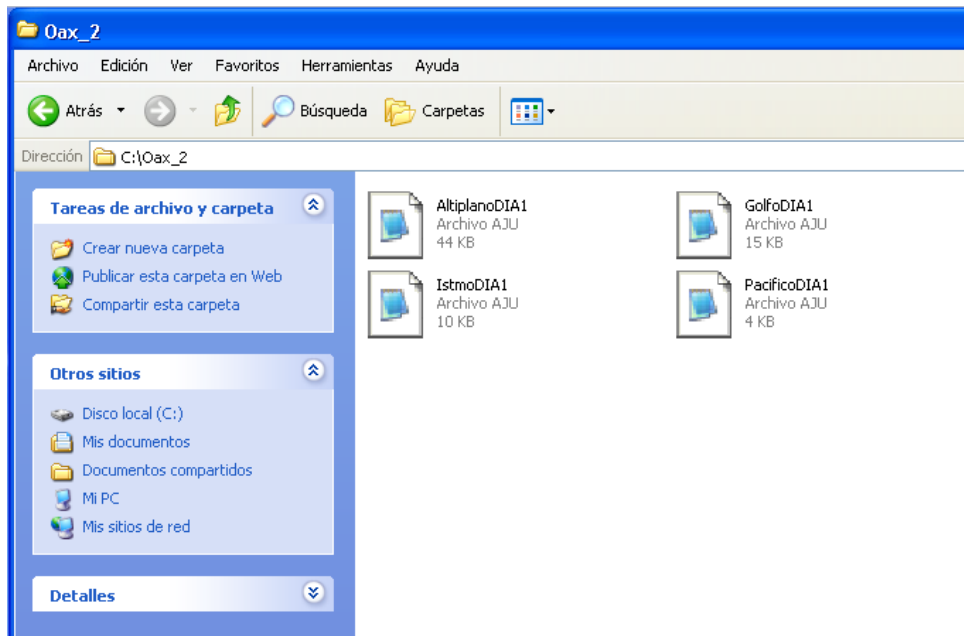


Figura 5.28. Valores estandarizados agrupados por región en

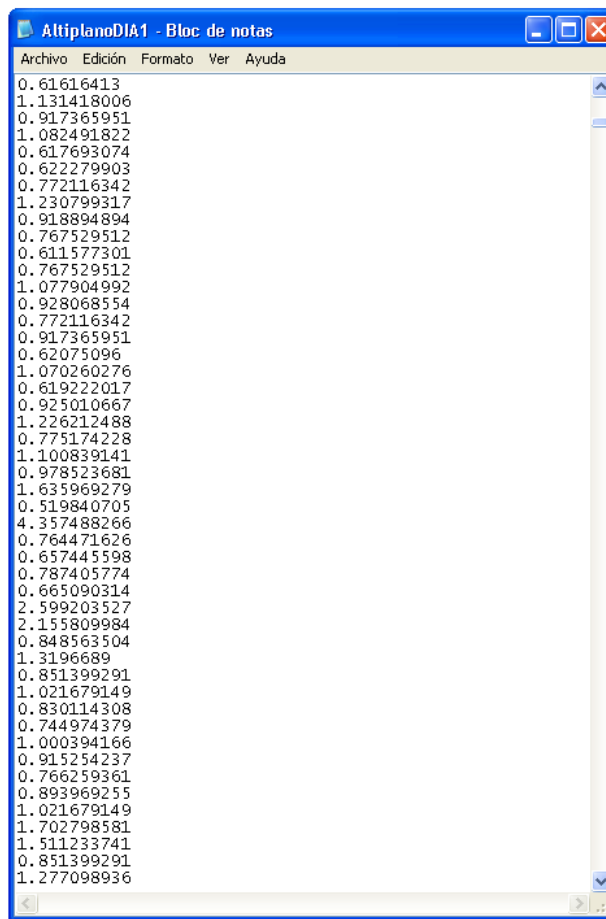


Figura 5.29. Ejemplo de Valores estandarizados para la región de Altiplano

Para poder cargar los valores estandarizados dentro de Ax, se selecciona la opción Archivos y Abrir, como se muestra en la figura 5.30.

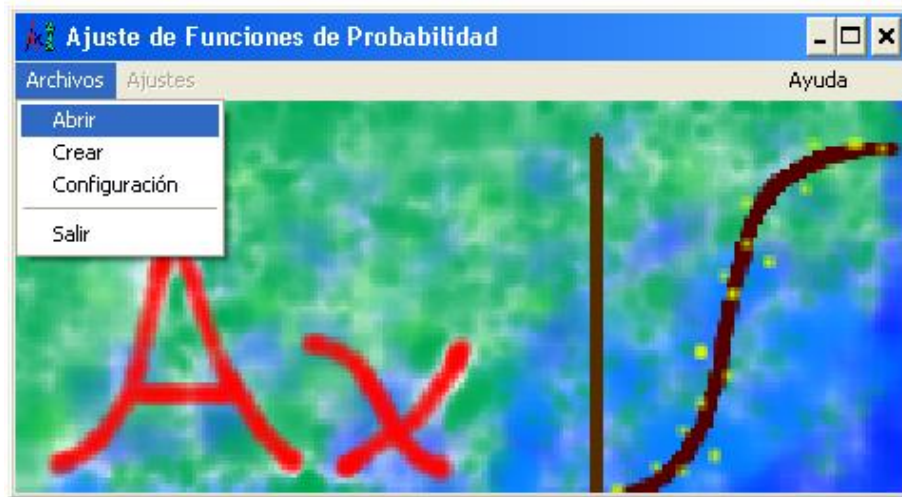


Figura 5.30. Pantalla de inicio de Ax

Posteriormente se busca el archivo con el que se desee trabajar, se selecciona y por último se elige la opción Aceptar, como se muestra en la figura 5.31.

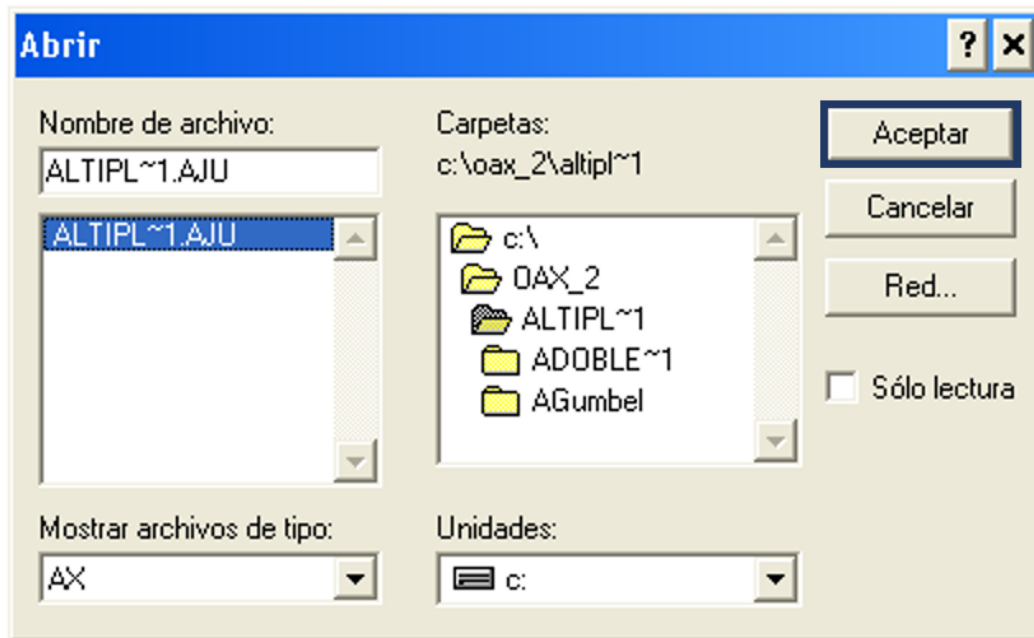
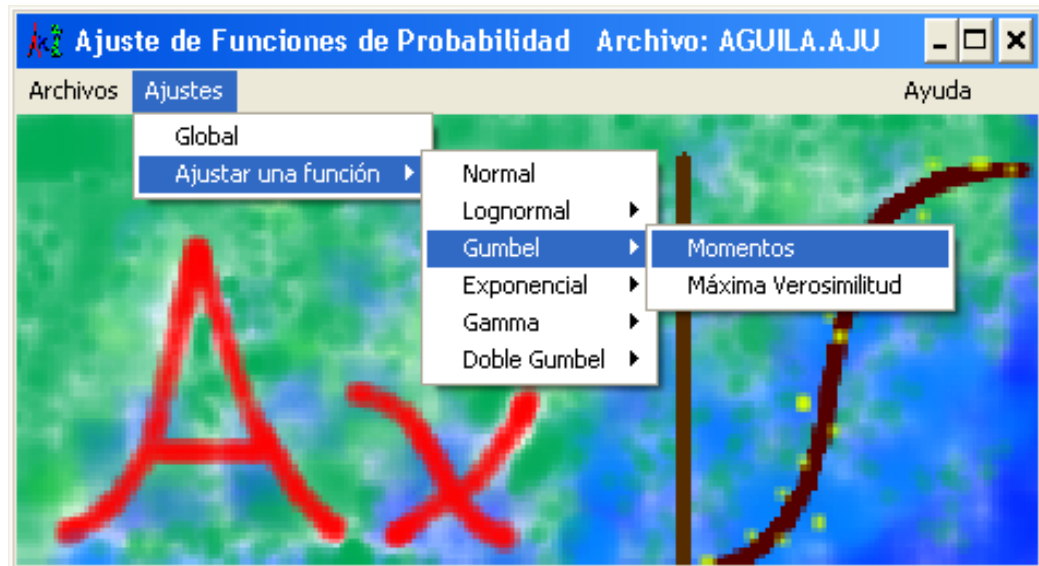


Figura 5.31.

A partir de aquí se realizan los ajustes para las funciones de probabilidad Gumbel y Doble Gumbel:

- Para la realización del ajuste de probabilidad para la función Gumbel se utilizó el método de los momentos, el cual plantea un sistema de ecuaciones, cuyo tamaño depende del número de parámetros a estimar, en el caso de la distribución Gumbel, se tiene un parámetro de ubicación β y un parámetro de escala α (expresiones 2.14 y 2.15). Para ello se selecciona la opción de Ajustes >> Ajustar una función >> Gumbel >> Momentos (Figura 5.32.). Inmediatamente se abre una ventana que muestra los errores cuadráticos, (Ver figura 5.33.), luego entonces se selecciona la opción de “Extrapolar” que abre una ventana que muestra los coeficientes de diseño para diferentes periodos de retorno, finalmente se elige la opción de “Guardar”. Una vez concluidos estos pasos, se habrá creado un archivo en block de notas con terminación “MAX”, el cual contiene los valores calculados para la función de probabilidad Gumbel (Ver figura 5.34. y 5.35).
- La estimación de los parámetros e



5.32. Ajuste de función de probabilidad Gumbel

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	3471.	4.72	3.44	1.64
2	1735.5	4.49	3.22	1.62
3	1157.	4.36	3.09	1.62
4	867.75	4.02	2.99	1.05
5	694.2	3.73	2.92	.65
6	578.5	3.65	2.86	.62
7	495.86	3.44	2.81	.39
8	433.88	3.27	2.77	.25
9	385.67	3.17	2.73	.19
10	347.1	3.04	2.7	.12
11	315.55	3.03	2.67	.13
12	289.25	3.02	2.64	.14
13	267.	3.02	2.61	.16
14	247.93	2.98	2.59	.15
15	231.4	2.98	2.57	.17
16	216.94	2.95	2.55	.16
17	204.18	2.92	2.53	.15
18	192.83	2.88	2.51	.14
19	182.68	2.8	2.49	.1
20	173.55	2.8	2.47	.11
21	165.29	2.78	2.46	.1
22	157.77	2.77	2.44	.11
23	150.91	2.75	2.43	.1
24	144.63	2.73	2.42	.1
25	138.84	2.71	2.4	.09
26	133.5	2.69	2.39	.09
27	128.56	2.65	2.38	.07
28	123.96	2.65	2.37	.08
29	119.69	2.65	2.35	.09
30	115.7	2.65	2.34	.09
31	111.97	2.65	2.33	.1
32	108.47	2.6	2.32	.08
33	105.18	2.6	2.31	.08
34	102.09	2.6	2.3	.09
35	99.17	2.58	2.29	.08
36	96.42	2.58	2.28	.09

Parámetros estadísticos de la muestra:
 $\mu = 1.$ $\sigma = .413$ $\gamma = 2.224$ $\kappa = 12.608$

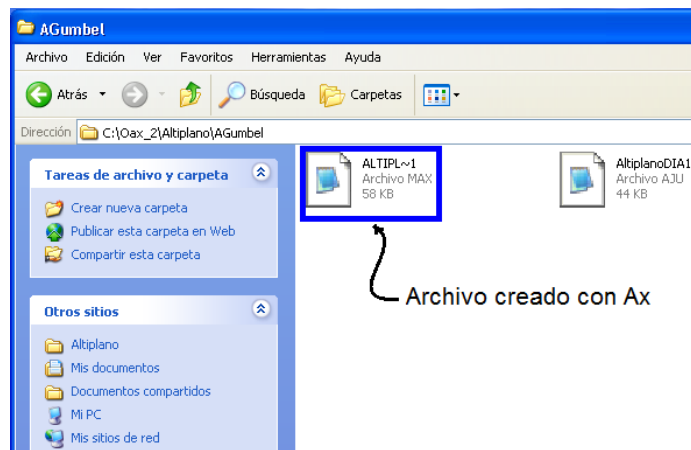
Parámetros de la función: Gumbel (momentos)

Parámetro	Alfa	Beta
Valor	3.1036	.8143

Error estándar = .076

No	Tr	Dato cal
1	2.	.93
2	5.	1.3
3	10.	1.54
4	20.	1.77
5	50.	2.07
6	100.	2.3
7	200.	2.52
8	500.	2.82
9	1000.	3.04
10	2000.	3.26
11	5000.	3.56
12	10000.	3.78

5.33. Errores cuadráticos y extrapolación para diferentes periodos de retorno

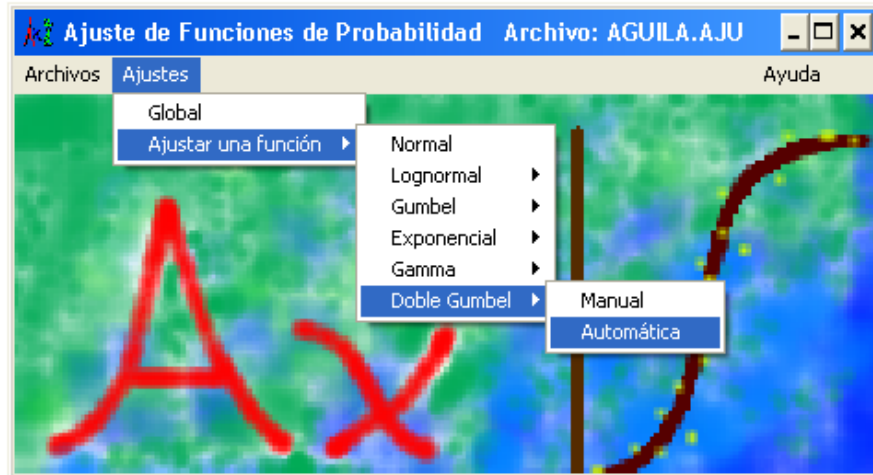


5.34. Archivo con terminación "MAX" creado por Ax

Gumbel (momentos)		
10000.00	3.78	
5000.00	3.56	
2000.00	3.26	
1000.00	3.04	
500.00	2.82	
200.00	2.52	
100.00	2.30	
50.00	2.07	
20.00	1.77	
10.00	1.54	
5.00	1.30	
2.00	.93	
3471.00	3.44	4.72
1735.50	3.22	4.49
1157.00	3.09	4.36
867.75	2.99	4.02
694.20	2.92	3.73
578.50	2.86	3.65
495.86	2.81	3.44
433.88	2.77	3.27
385.67	2.73	3.17
347.10	2.70	3.04
315.55	2.67	3.03
289.25	2.64	3.02
267.00	2.61	3.02
247.93	2.59	2.98
231.40	2.57	2.98
216.94	2.55	2.95

5.35. Coeficiente de diseño para distintos periodos de retorno

- *Ajuste de probabilidad para Doble Gumbel:* Se selecciona la opción de Ajustes >> Ajustar una función >> Doble Gumbel >> Automática (Ver figura 5.36), Inmediatamente se abre una ventana que muestra los parámetros estadísticos $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ para un valor determinado de P (Ver figura 5.37), posteriormente se selecciona O. K. e inmediatamente se crea un documento en block de notas con terminación RDG, el cual muestra los diferentes valores de $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ de acuerdo al valor de P (Ver figura 5.38.).



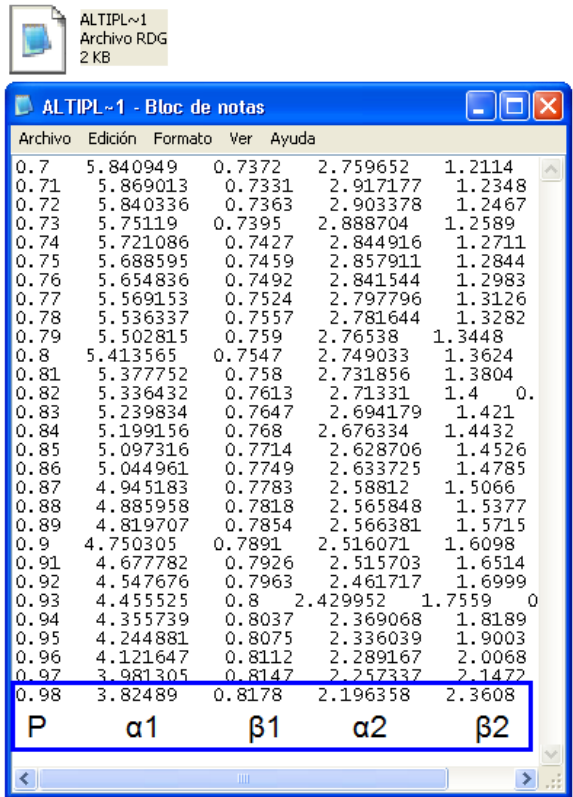
5.36. Ajuste de función de probabilidad Doble Gumbel

Optimización de la función Doble Gumbel	
P	0.98
Ciclos	1
Ciclos 1ª pob	1
Contador de alfa1	3
Error	.02
Contador de beta1	1
Error	.02
Ciclos 2ª pob	1
Contador de alfa2	7
Error	.02
Contador de beta2	5
Error	.02
Error global	.025

Resultados de la optimización:	
P	.98
α_1	3.82489
β_1	.8178
α_2	2.196358
β_2	2.3608
Error	.021

Buttons: O.K., Cancelar, Cerrar, Imprimir, Ayuda

5.37. Parámetros estadísticos propuestos para la función Doble Gumbel



5.38. Parámetros estadísticos para diferentes valores de P

De esta manera se proponen distintos valores de $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ y P con la finalidad de tener un mejor ajuste de probabilidad.

Actual:		Propuesto:		
α_1	3.82489	α_1	4.121647	X
β_1	.818	β_1	0.8112	OK
α_2	2.19636	α_2	2.289167	?
β_2	2.361	β_2	2.0068	
P	0.98	P	0.96	
Error estándar:		0.0212		

Figura 5.45. Ingreso de valores $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ y P

Por último se selecciona la opción O.K. se extrapolan los datos y se guardan (Ver figura 5.55), una vez concluido este paso se habrá creado un archivo en block de notas con terminación "MAX", que contiene los coeficientes de diseño calculados para diferentes periodos de retorno, de acuerdo a la función Doble Gumbel (Ver figura 5.56).

Errores cuadráticos Archivo: ALTIPL-1.AJU

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	3471.	4.72	4.29	.19
2	1735.5	4.49	3.98	.26
3	1157.	4.36	3.79	.33
4	867.75	4.02	3.65	.13
5	694.2	3.73	3.55	.03
6	578.5	3.65	3.47	.03
7	495.86	3.44	3.39	.
8	433.88	3.27	3.33	.
9	385.67	3.17	3.27	.01
10	347.1	3.04	3.22	.03
11	315.55	3.03	3.18	.02
12	289.25	3.02	3.14	.01
13	267.	3.02	3.1	.01
14	247.93	2.98	3.06	.01
15	231.4	2.98	3.03	.
16	216.94	2.95	3.	.
17	204.18	2.92	2.97	.
18	192.83	2.88	2.94	.
19	182.68	2.8	2.91	.01
20	173.55	2.8	2.89	.01
21	165.29	2.78	2.86	.01
22	157.77	2.77	2.84	.
23	150.91	2.75	2.82	.
24	144.63	2.73	2.79	.
25	138.84	2.71	2.77	.
26	133.5	2.69	2.75	.
27	128.56	2.65	2.73	.01
28	123.96	2.65	2.71	.
29	119.69	2.65	2.7	.
30	115.7	2.65	2.68	.
31	111.97	2.65	2.66	.
32	108.47	2.6	2.64	.
33	105.18	2.6	2.63	.
34	102.09	2.6	2.61	.
35	99.17	2.58	2.6	.
36	96.42	2.58	2.58	.
37	93.84	2.54	2.57	.

Parámetros estadísticos de la muestra:
 $\mu = 1.$ $\sigma = .413$ $\gamma = 2.224$ $\kappa = 12.608$
 Parámetros de la función: **Doble Gumbel**

Parámetro	Alfa1	Beta1	Alfa2	Beta2	P
Valor	3.82489	.8178	2.196358	2.3608	.98

Error estándar = .021

Cerrar **Extrapolar** Graficar Imprimir Ayuda

Extrapolación...

No	Tr	Dato cal
1	2.	.92
2	5.	1.23
3	10.	1.46
4	20.	1.72
5	50.	2.2
6	100.	2.6
7	200.	2.96
8	500.	3.4
9	1000.	3.72
10	2000.	4.04
11	5000.	4.47
12	10000.	4.78

Cerrar Imprimir

Guardar Ayuda

5.56. Errores cuadráticos y extrapolación para diferentes periodos de retorno

5.6.1 Resultados obtenidos

A continuación se presentan las gráficas que permiten comparar los valores medidos con los calculados para las funciones Gumbel y Doble Gumbel en cada región.

Región Altiplano

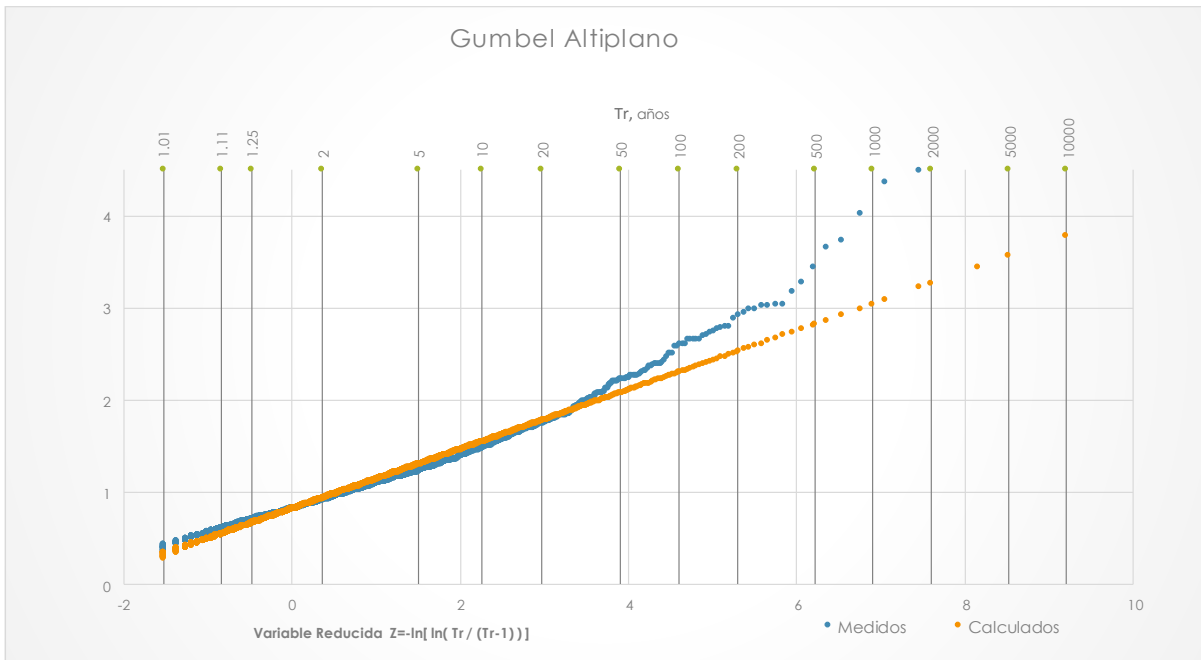


Figura 5.57 Función de probabilidad Gumbel, para la región Altiplano

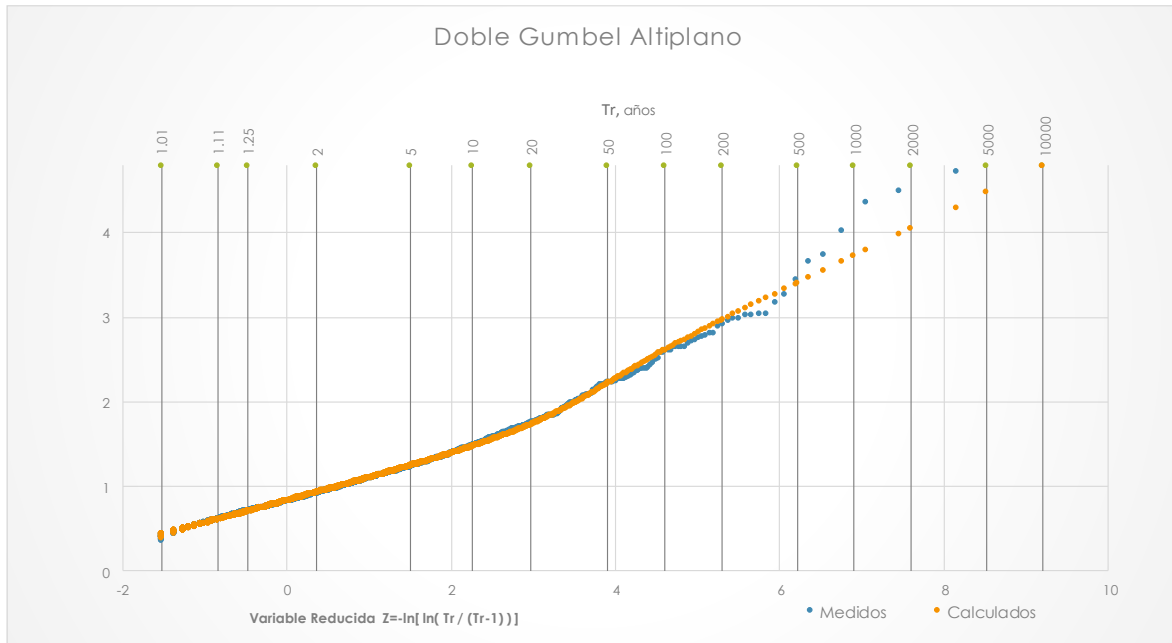


Figura 5.58. Función de probabilidad Doble Gumbel con parámetro $P = 0.98$, para la región Altiplano

Región Golfo

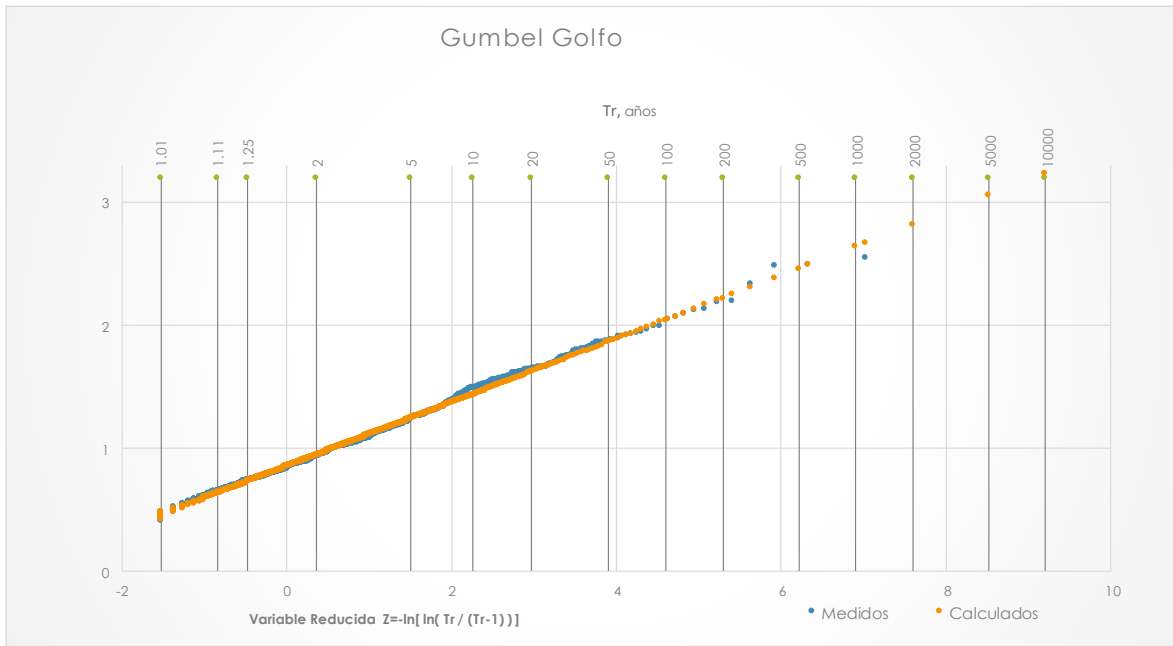


Figura 5.59 Función de probabilidad Gumbel, para la región Golfo

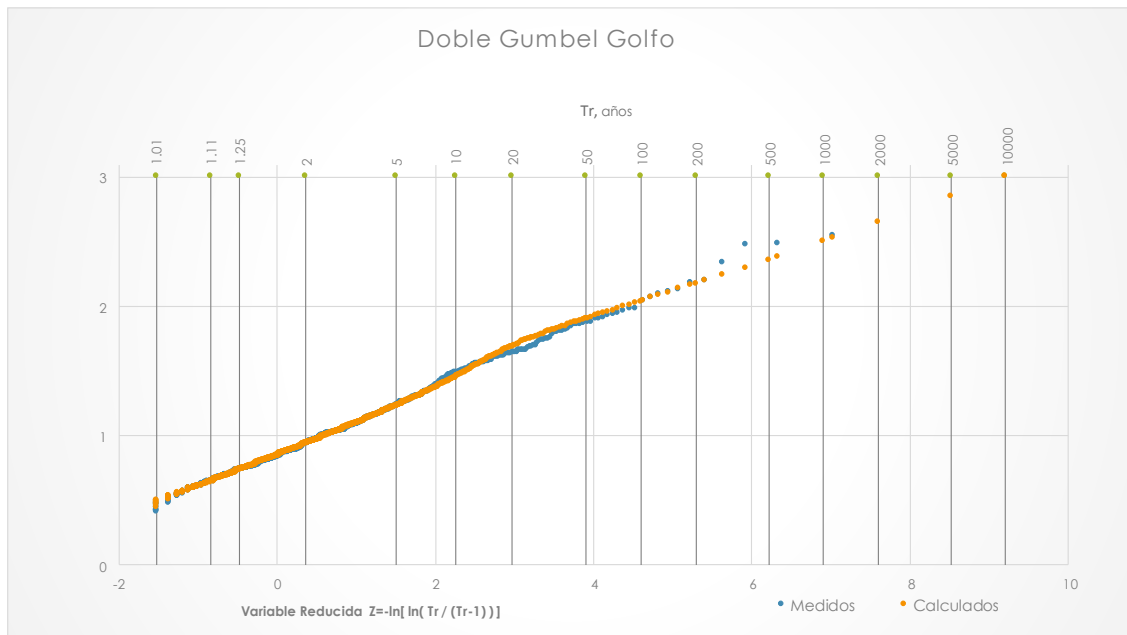


Figura 5.60 Función de probabilidad Doble Gumbel, para la región Golfo

Región Istmo

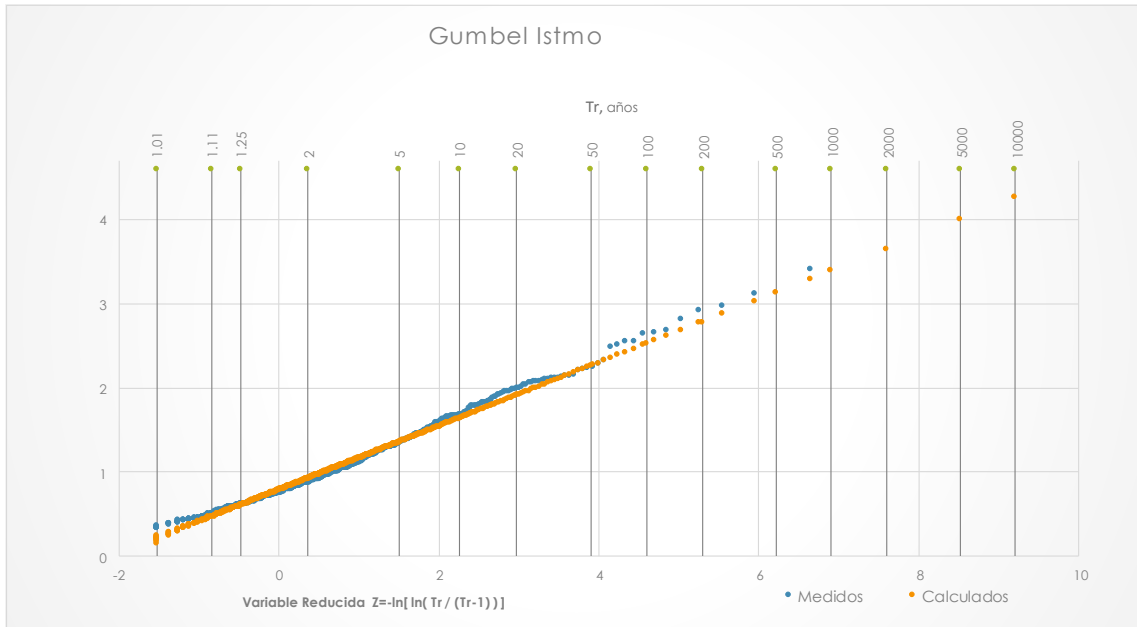


Figura 5.61 Función de probabilidad Gumbel, para la región Istmo

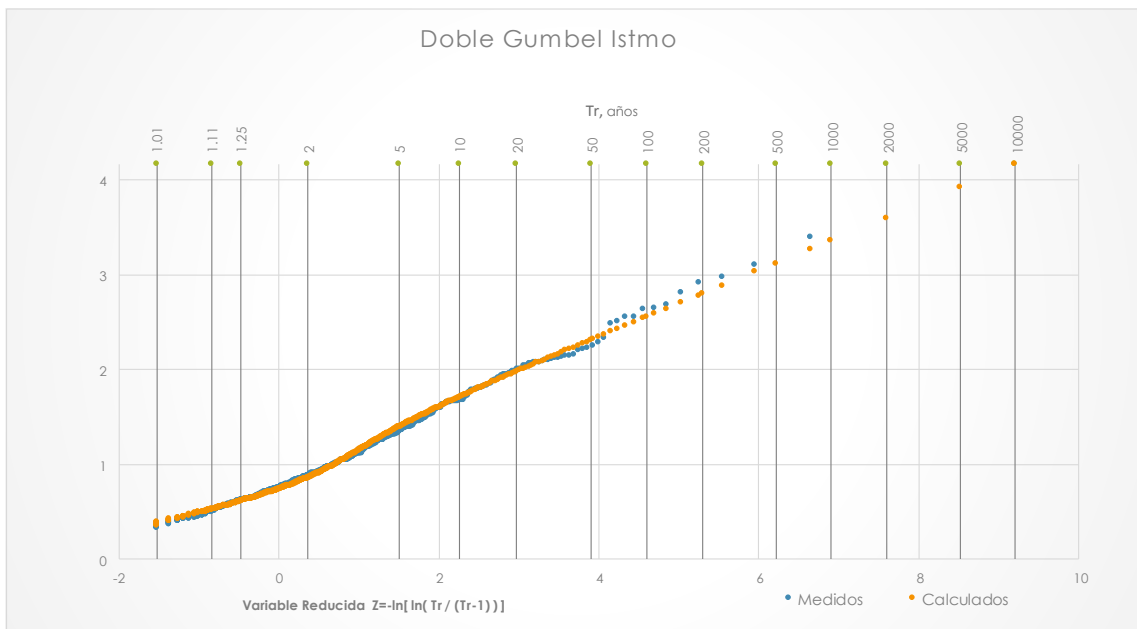


Figura 5.62 Función de probabilidad Doble Gumbel, para la región Istmo

Región Pacífico

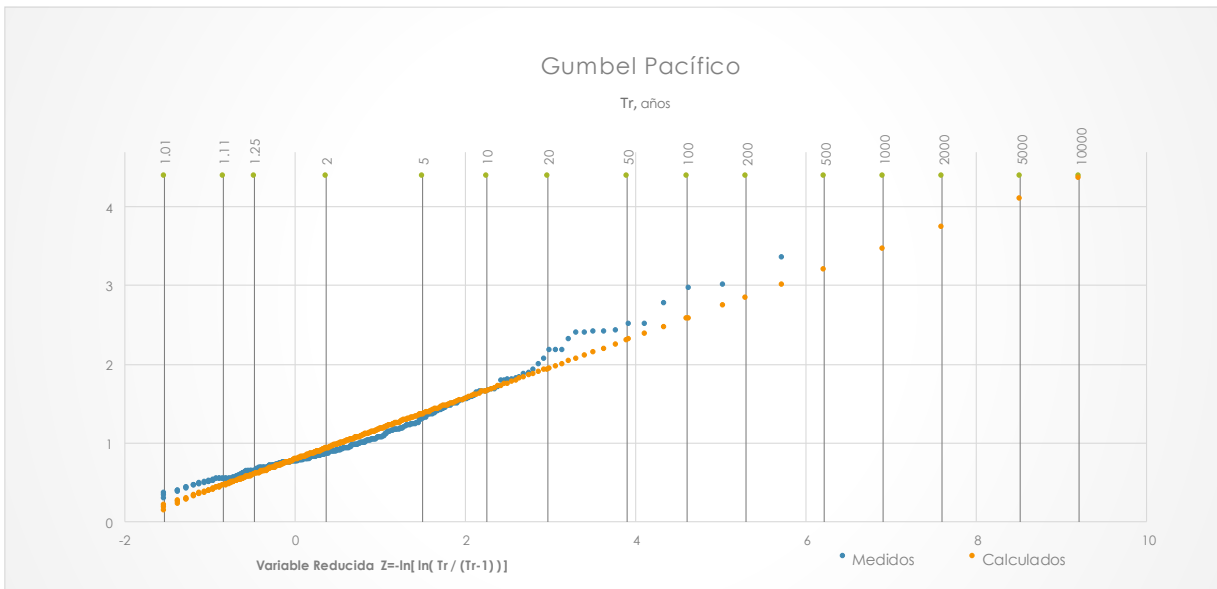


Figura 5.63 Función de probabilidad Gumbel, para la región Pacífico

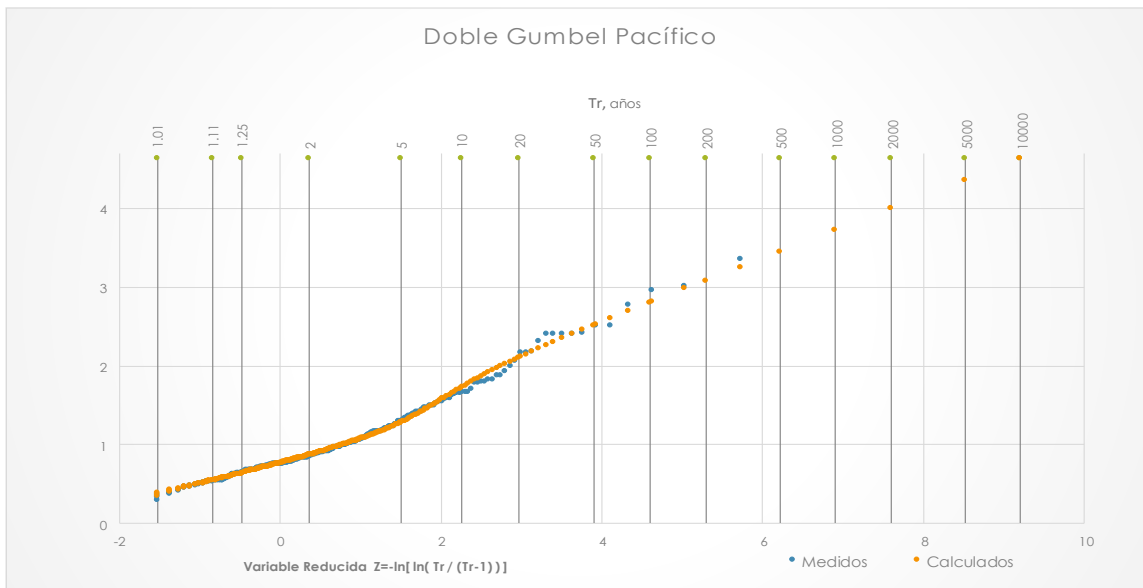


Figura 5.64 Función de probabilidad Doble Gumbel con $P = 0.88$, para Pacífico

Con base en las gráficas mostradas anteriormente, se determina la función de probabilidad que mejor se ajustó a los valores medidos de cada región. En la tabla 5.3. se presentan las funciones que mejor se ajustaron para cada región.

Región	Función de distribución de probabilidad
Altiplano	Doble Gumbel
Golfo	Gumbel
Istmo	Gumbel
Pacífico	Doble Gumbel

Tabla 5.3. Resumen de funciones correspondientes para cada región

Por último, utilizando las funciones de probabilidad correspondientes se infieren eventos para ciertos periodos de retorno, a continuación se muestran los resultados de los diferentes factores regionales obtenidos para periodos de retorno de 10 000, 5 000, 2 000, 1 000, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, y 2 años.

Tr (años)	Altiplano	Golfo	Istmo	Pacífico
2	0.92	0.95	0.92	0.87
5	1.23	1.24	1.35	1.27
10	1.46	1.43	1.63	1.72
20	1.72	1.62	1.9	2.1
50	2.2	1.86	2.26	2.51
100	2.6	2.04	2.52	2.8
200	2.96	2.22	2.78	3.08
500	3.4	2.46	3.13	3.45
1000	3.72	2.64	3.39	3.72
2000	4.04	2.82	3.65	4
5000	4.47	3.06	4	4.36
10000	4.78	3.23	4.26	4.63

Tabla 5.4. Factores de diseño asociados a diferentes periodos de retorno

5.7 Análisis de resultados

Para determinar la tormenta de diseño de cada estación analizada asociada a un cierto periodo de retorno simplemente se debe obtener el producto entre la precipitación media de la estación y su factor regional correspondiente, por ejemplo, si se desea obtener la lluvia de diseño de la estación 20290, para un periodo de retorno de 100 años, primero se debe conocer la precipitación media de la estación 20290, de la tabla 5.4., se obtiene el valor de 108.6 mm, posteriormente se debe conocer el factor regional para un periodo de retorno de 100 años, por ser la región de Istmo, se tiene un factor de 2.52 (Ver tabla 5.4), una vez conocidos estos dos términos la lluvia de diseño quedaría de la siguiente manera: $(108.6 \text{ mm})(2.52) = 273.672 \text{ mm}$. En la tabla 5.6., 5.7., 5.8. Y 5.9 se muestran los valores de las lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno de todas las estaciones.

Región Golfo con función de probabilidad Gumbel														
Tr (Años)	Fac. Reg.	2006	2008	2012	2014	2015	2016	2017	20029	20030	20036	20037	20042	20045
2	0.95	140.20	126.94	209.95	191.07	87.81	181.39	124.29	192.01	117.77	153.16	158.63	187.91	113.21
5	1.24	182.99	165.69	274.04	249.40	114.62	236.76	162.23	250.62	153.72	199.91	207.06	245.27	147.77
10	1.43	211.03	191.08	316.03	287.61	132.18	273.04	187.09	289.02	177.27	230.55	238.79	282.85	170.41
20	1.62	239.07	216.46	358.02	325.82	149.74	309.32	211.95	327.42	200.82	261.18	270.51	320.43	193.05
50	1.86	274.49	248.53	411.06	374.10	171.93	355.15	243.35	375.93	230.57	299.87	310.59	367.90	221.65
100	2.04	301.06	272.58	450.84	410.30	188.56	389.52	266.89	412.31	252.89	328.89	340.64	403.50	243.10
200	2.22	327.62	296.64	490.62	446.50	205.20	423.89	290.44	448.69	275.20	357.91	370.70	439.11	264.55
500	2.46	363.04	328.71	543.66	494.77	227.39	469.71	321.84	497.19	304.95	396.60	410.78	486.58	293.15
1000	2.64	389.60	352.76	583.44	530.97	244.02	504.08	345.39	533.57	327.27	425.62	440.83	522.18	314.60
2000	2.82	416.16	376.81	623.22	567.18	260.66	538.45	368.94	569.95	349.58	454.64	470.89	557.78	336.05
5000	3.06	451.58	408.88	676.26	615.45	282.85	584.27	400.34	618.46	379.33	493.34	510.97	605.25	364.66
10000	3.23	476.67	431.59	713.83	649.64	298.56	616.73	422.58	652.82	400.41	520.74	539.35	638.88	384.91
Tr (Años)	Fac. Reg.	20061	20072	20081	20084	20095	20098	20113	20114	20136	20138	20139	20152	20161
2	0.95	112.14	130.84	172.50	128.36	142.34	125.60	108.77	178.90	190.57	145.90	159.90	143.56	109.10
5	1.24	146.37	170.78	225.16	167.55	185.79	163.93	141.97	233.51	248.74	190.44	208.71	187.39	142.40
10	1.43	168.80	196.94	259.66	193.22	214.26	189.05	163.72	269.29	286.86	219.62	240.69	216.10	164.22
20	1.62	191.23	223.11	294.16	218.89	242.73	214.17	185.48	305.07	324.97	248.80	272.67	244.81	186.04
50	1.86	219.56	256.16	337.74	251.32	278.69	245.90	212.96	350.26	373.12	285.66	313.06	281.08	213.61
100	2.04	240.81	280.96	370.42	275.64	305.66	269.70	233.56	384.16	409.22	313.31	343.36	308.28	234.28
200	2.22	262.05	305.75	403.10	299.97	332.63	293.50	254.17	418.05	445.33	340.95	373.66	335.48	254.95
500	2.46	290.38	338.80	446.68	332.39	368.59	325.22	281.65	463.25	493.48	377.81	414.05	371.75	282.51
1000	2.64	311.63	363.59	479.37	356.72	395.56	349.02	302.26	497.14	529.58	405.46	444.35	398.95	303.18
2000	2.82	332.88	388.38	512.05	381.04	422.53	372.82	322.87	531.04	565.69	433.10	474.64	426.15	323.85
5000	3.06	361.21	421.43	555.63	413.47	458.49	404.55	350.35	576.24	613.84	469.96	515.04	462.42	351.42
10000	3.23	381.28	444.85	586.50	436.44	483.96	427.02	369.81	608.25	647.94	496.07	543.65	488.11	370.94
Tr (Años)	Fac. Reg.	20172	20174	20175	20176	20183	20185	20189	20203	20272	20279	20289	20334	20374
2	0.95	130.25	207.76	194.42	126.17	138.41	140.03	149.23	145.38	197.67	158.09	128.55	193.31	160.04
5	1.24	170.02	271.18	253.77	164.69	180.66	182.78	194.78	189.75	258.01	206.35	167.80	252.32	208.89
10	1.43	196.07	312.73	292.66	189.92	208.34	210.79	224.62	218.83	297.55	237.97	193.51	290.98	240.90
20	1.62	222.12	354.28	331.54	215.16	236.02	238.79	254.47	247.90	337.08	269.59	219.22	329.64	272.91
50	1.86	255.02	406.77	380.66	247.03	270.99	274.17	292.17	284.63	387.02	309.53	251.69	378.48	313.34
100	2.04	279.70	446.13	417.50	270.94	297.21	300.70	320.44	312.18	424.47	339.48	276.05	415.11	343.66
200	2.22	304.38	485.50	454.33	294.85	323.44	327.24	348.72	339.72	461.92	369.44	300.41	451.73	373.98
500	2.46	337.29	537.98	503.45	326.72	358.40	362.61	386.41	376.45	511.86	409.38	332.88	500.57	414.41
1000	2.64	361.97	577.35	540.29	350.63	384.63	389.15	414.69	403.99	549.32	439.33	357.24	537.20	444.73
2000	2.82	386.65	616.71	577.13	374.54	410.85	415.68	442.96	431.54	586.77	469.28	381.60	573.83	475.06
5000	3.06	419.55	669.20	626.24	406.41	445.82	451.06	480.66	468.26	636.71	509.22	414.08	622.66	515.49
10000	3.23	442.86	706.38	661.04	428.99	470.58	476.12	507.37	494.28	672.08	537.51	437.08	657.25	544.13

Tabla 5.7 Lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno en la región Golfo

Región Istmo con función de probabilidad Gumbel																				
Tr (Años)	Fac. Reg.	20027	20039	20043	20048	20060	20068	20082	20117	20127	20134	20148	20149	20162	20173	20290	20292	20328	20353	20382
2	0.92	102.61	103.39	90.20	113.58	109.98	99.59	132.63	88.64	139.26	125.27	134.76	131.49	75.58	110.68	99.90	137.45	83.99	91.37	107.68
5	1.35	150.56	151.71	132.36	166.67	161.38	146.14	194.62	130.07	204.35	183.83	197.74	192.95	110.90	162.41	146.59	201.69	123.25	134.07	158.00
10	1.63	181.79	183.18	159.82	201.24	194.85	176.45	234.99	157.05	246.73	221.95	238.75	232.97	133.90	196.09	176.99	243.52	148.81	161.88	190.78
20	1.9	211.90	213.52	186.29	234.57	227.13	205.68	273.91	183.07	287.60	258.72	278.30	271.56	156.08	228.57	206.31	283.85	173.46	188.69	222.38
50	2.26	252.05	253.97	221.59	279.01	270.17	244.65	325.81	217.75	342.09	307.74	331.03	323.01	185.65	271.88	245.40	337.64	206.33	224.44	264.51
100	2.52	281.05	283.19	247.08	311.11	301.25	272.80	363.29	242.81	381.44	343.14	369.12	360.17	207.01	303.16	273.63	376.48	230.06	250.26	294.94
200	2.78	310.05	312.41	272.57	343.21	332.33	300.95	400.78	267.86	420.80	378.55	407.20	397.34	228.37	334.43	301.86	415.32	253.80	276.08	325.37
500	3.13	349.08	351.74	306.89	386.42	374.17	338.84	451.23	301.58	473.78	426.20	458.47	447.36	257.12	376.54	339.87	467.61	285.75	310.84	366.34
1000	3.39	378.08	380.96	332.38	418.52	405.25	366.98	488.72	326.63	513.13	461.61	496.55	484.52	278.48	407.82	368.10	506.46	309.49	336.66	396.77
2000	3.65	407.08	410.18	357.87	450.62	436.33	395.13	526.20	351.68	552.49	497.01	534.63	521.68	299.84	439.10	396.33	545.30	333.22	362.48	427.20
5000	4	446.11	449.51	392.19	493.83	478.17	433.02	576.66	385.40	605.47	544.67	585.90	571.71	328.59	481.20	434.33	597.59	365.18	397.24	468.16
10000	4.26	475.11	478.73	417.68	525.93	509.25	461.16	614.14	410.46	644.82	580.07	623.98	608.87	349.95	512.48	462.57	636.43	388.91	423.06	498.59

Tabla 5.8 Lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno en la región Istmo

Región Pacífico con función de probabilidad Doble Gumbel													
Tr (Años)	Fac. Reg.	20010	20086	20088	20089	20090	20200	20256	20303	20319	20326	20350	20356
2	0.87	123.11	79.313	130.24	98.158	98.322	76.322	115.01	97.12	119.4	94.165	103.14	84.628
5	1.27	179.72	115.78	190.12	143.29	143.53	111.41	167.89	141.77	174.29	137.46	150.57	123.54
10	1.72	243.4	156.8	257.48	194.06	194.38	150.89	227.38	192.01	236.05	186.17	203.92	167.31
20	2.1	297.17	191.44	314.36	236.93	237.33	184.22	277.61	234.43	288.2	227.3	248.97	204.28
50	2.51	355.19	228.82	375.74	283.19	283.67	220.19	331.81	280.2	344.47	271.67	297.58	244.16
100	2.8	396.23	255.26	419.15	315.91	316.44	245.63	370.15	312.57	384.27	303.06	331.96	272.37
200	3.08	435.85	280.79	461.07	347.5	348.08	270.2	407.16	343.83	422.69	333.37	365.15	299.6
500	3.45	488.21	314.52	516.45	389.25	389.9	302.66	456.07	385.13	473.47	373.41	409.02	335.6
1000	3.72	526.42	339.13	556.87	419.71	420.41	326.34	491.77	415.27	510.53	402.64	441.03	361.86
2000	4	566.04	364.66	598.79	451.3	452.06	350.9	528.78	446.53	548.95	432.94	474.23	389.1
5000	4.36	616.98	397.48	652.68	491.92	492.74	382.49	576.37	486.72	598.36	471.91	516.91	424.11
10000	4.63	655.19	422.09	693.1	522.38	523.26	406.17	612.06	516.86	635.41	501.13	548.92	450.38

Tabla 5.9 Lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno en la región Pacífico

Una vez conocidos los valores de las tormentas de diseño es posible estimar dichos datos en sitios donde no se tenga información hidrométrica, para ello se hace uso de uno o varios mapas de isoyetas del estado de Oaxaca, estos mapas pueden estar asociados a la precipitación media de cada estación, sin embargo se tiene el inconveniente que estos valores no están afectados por un factor regional, por otro lado, los mapas también pueden estar referidos a un periodo de retorno específico, es decir, que sus valores ya están afectados por su factor regional correspondiente. A continuación, se muestran tres mapas de isoyetas; el de la figura 5.65 está referido a la precipitación media, mientras que los de las figuras 5.66. y 5.67. muestran las lluvias de diseño para un periodo de retorno de 10 y 100 años respectivamente.

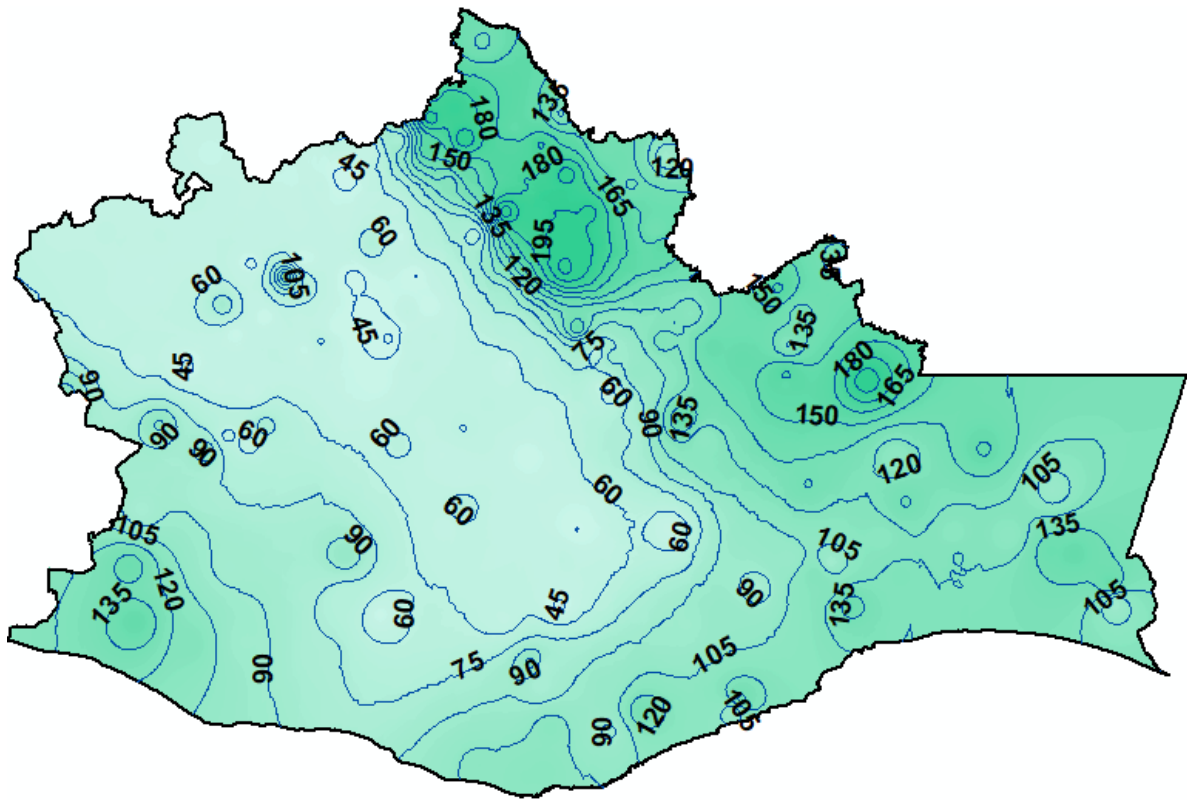


Figura 5.65 Mapa de isoyetas de precipitación media

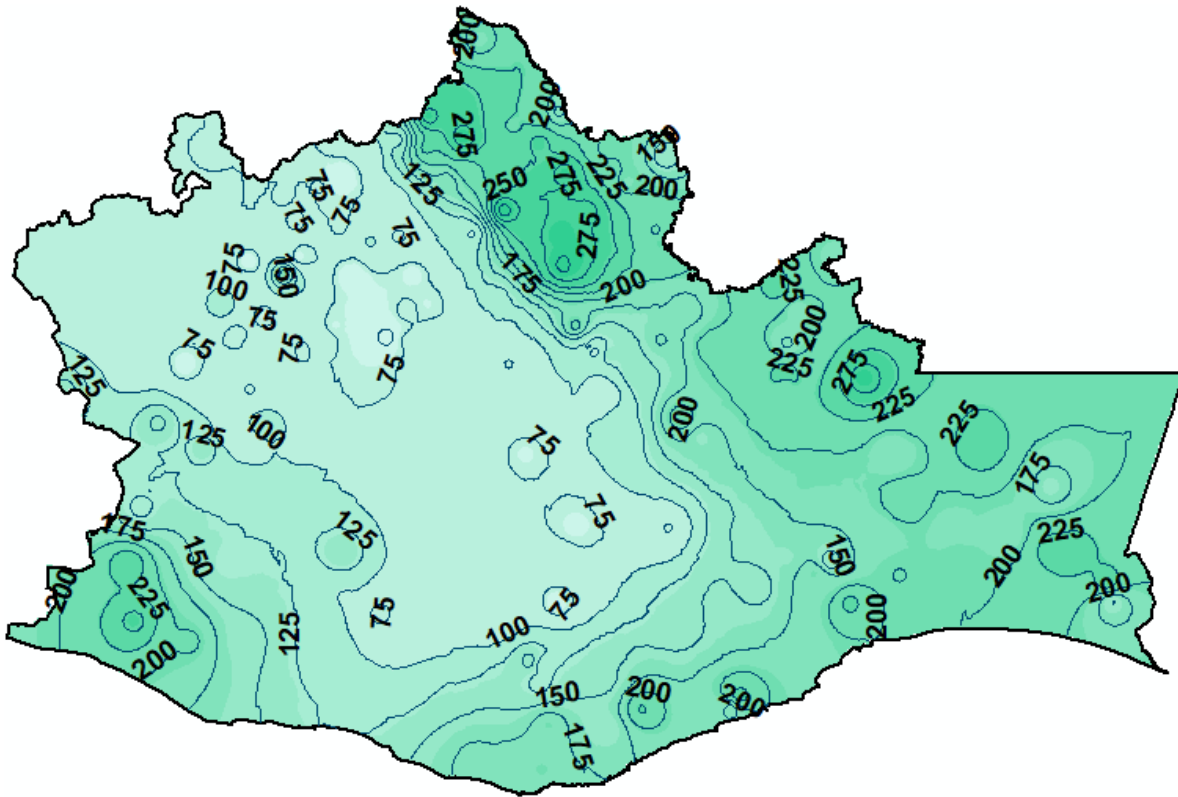


Figura 5.66 Mapa de isoyetas para un periodo de retorno de 10 años

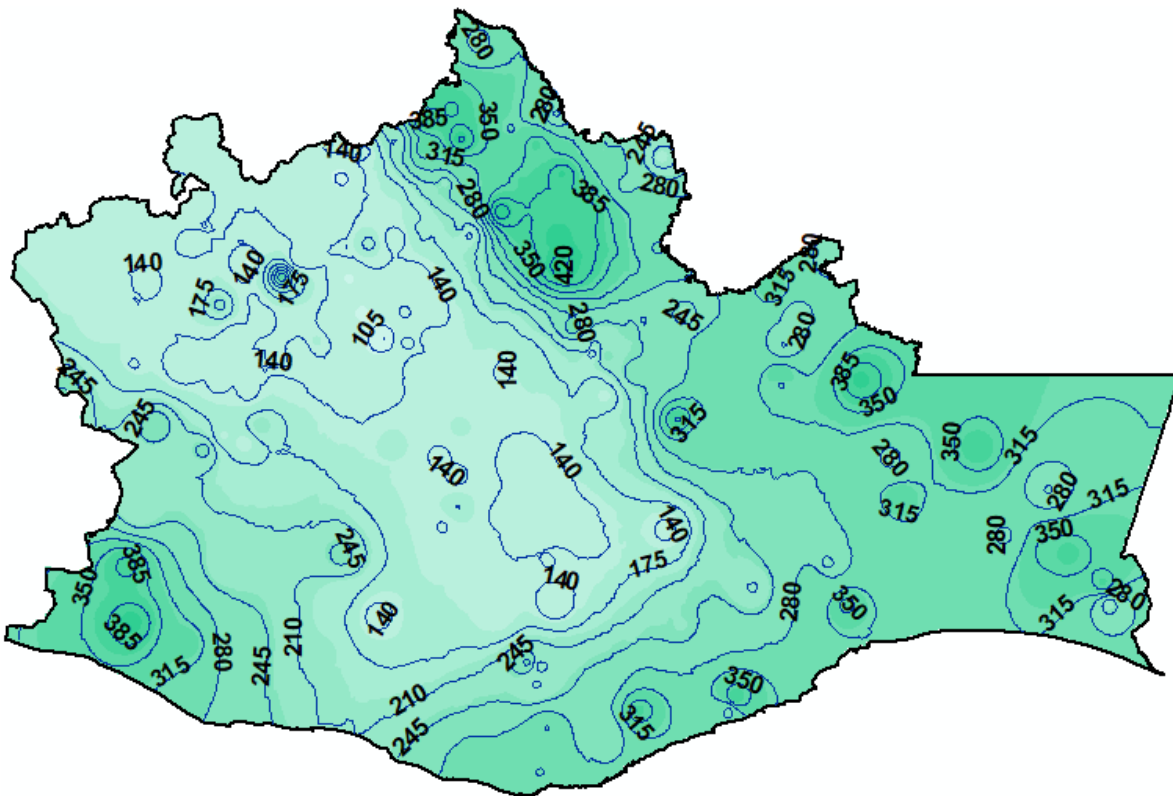


Figura 5.66 Mapa de isoyetas para un periodo de retorno de 100 años

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, se plantea el siguiente ejemplo:

Supóngase que dentro del estado de Oaxaca se desea conocer la tormenta de diseño para la construcción de una obra hidráulica cuya importancia asocia un periodo de retorno de 10 años. Dicha obra se encuentra dentro de la región del Golfo, y sus coordenadas geográficas son: 16.97° latitud norte y -95.54° longitud oeste, como se muestra en la figura 5.67.

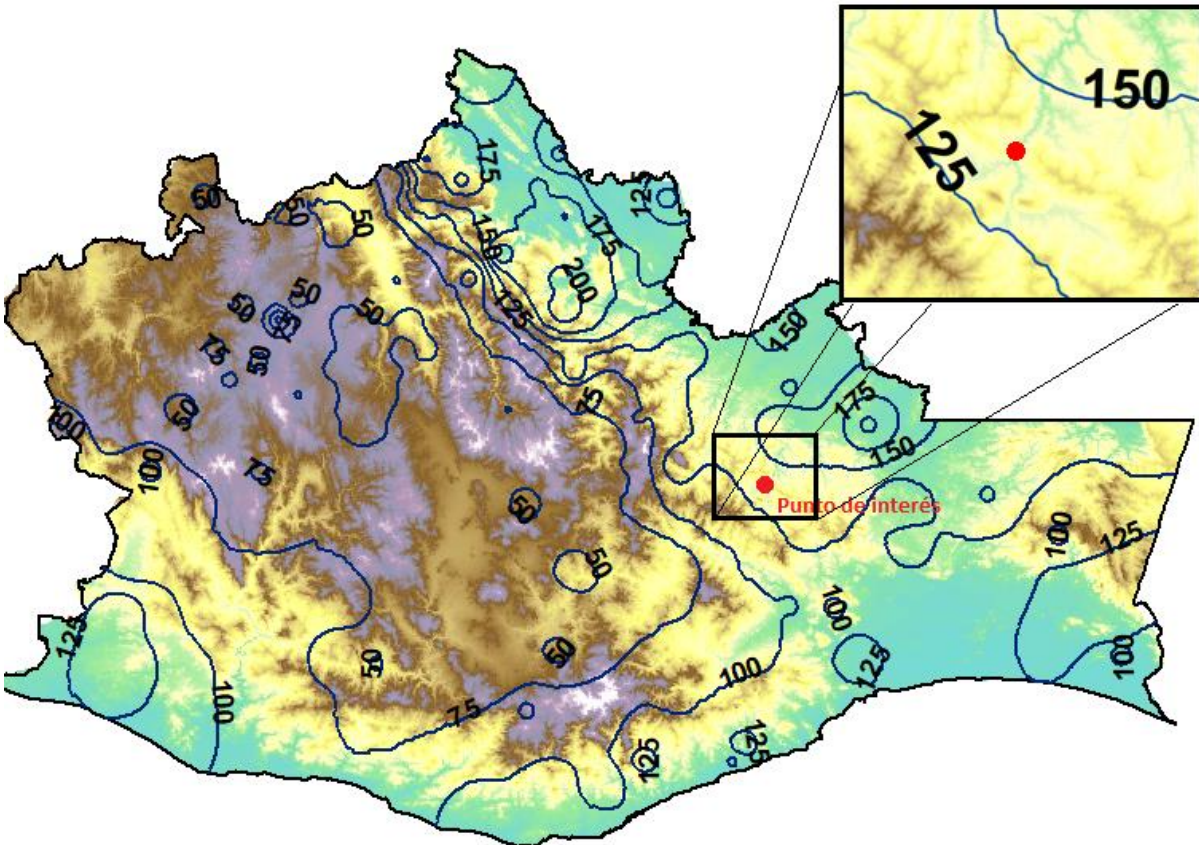


Figura 5.67 Ubicación de la obra hidráulica sobre un mapa de isoyetas de precipitación media

Para conocer la tormenta de diseño, primero se debe ubicar el punto de interés en un mapa de isoyetas de precipitación media, posteriormente se identifican las isoyetas entre las que se desea construir la obra, y a partir de estos dos valores se realiza una interpolación, con la finalidad de obtener una estimación de la precipitación media del punto de interés. Para el ejemplo propuesto, la obra a construir se encuentra entre las isoyetas 125 mm y 150 mm por lo que la interpolación sería de 137.5 mm. Por último, sólo se debe multiplicar el valor interpolado con el factor de diseño calculado para la región del Golfo, es decir 1.43 (ver tabla 5.4), dicha expresión quedará de la siguiente manera:

$$\text{Tormenta de diseño} = 137.5 \text{ mm} * 1.43 \approx 197 \text{ mm}$$

Para verificar el valor obtenido anteriormente, se utiliza el mapa de isoyetas para un periodo de retorno de 10 años, donde de acuerdo con la figura 5.68., la ubicación de la obra está dentro de la isoyeta con valor de 200 mm, muy cercano al valor antes calculado con el mapa de isoyetas de precipitación media.

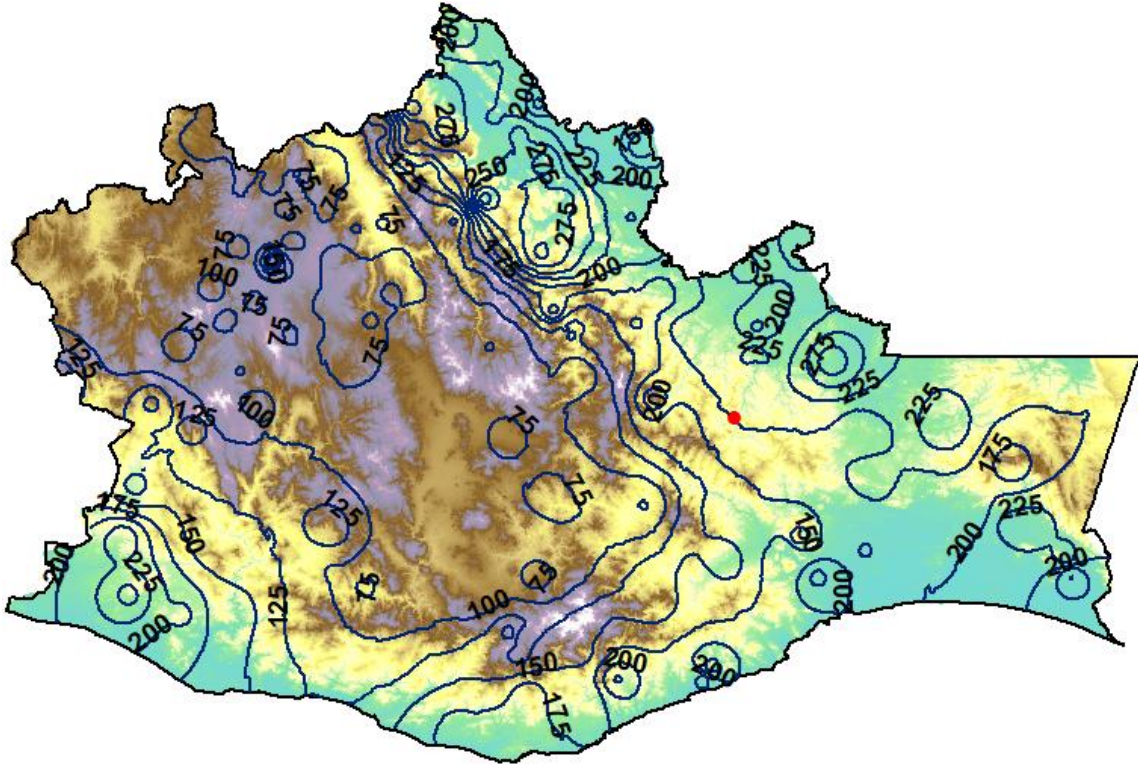


Figura 5.68 Ubicación de la obra hidráulica sobre un mapa de isoyetas para un periodo de retorno de 10 años

Conclusiones

El estado de Oaxaca no cuenta con suficientes estaciones climatológicas que permitan conocer la cantidad de lluvia que cae sobre sus cuencas; para atender esta problemática se elaboró un análisis regional de precipitaciones que permite conocer de manera aproximada las tormentas de diseño en cualquier parte del estado, proporcionando una guía útil para el diseño y dimensionamiento de cualquier obra hidráulica asociada a un cierto periodo de retorno, con la finalidad de tener el mayor aprovechamiento hídrico posible, ya que el recurso agua se destaca como un factor crítico en el desarrollo económico de cualquier población.

Para la regionalización de precipitaciones se utilizó la mayor cantidad de datos, lo que genera una mayor confianza en los resultados obtenidos, permitiendo una eficaz estimación de eventos extraordinarios dentro del estado, y reduciendo la incertidumbre de su probabilidad de ocurrencia.

Por otro lado, los mapas de isoyetas permiten conocer las zonas con precipitaciones más altas, a partir de esto es posible observar que las precipitaciones extraordinarias no se presentan de manera uniforme dentro de estado, sino que la mayoría de estas se encuentran en las regiones del Golfo e Istmo, por lo tanto, estas zonas son las que presentan mayor vulnerabilidad, y por ello tienen la necesidad de construir obras hidráulicas que permitan mitigar los daños que se pudieran generar sobre la población.

Como ya se ha aclarado, los mapas de isoyetas asociados a un cierto periodo de retorno permiten conocer de manera rápida la tormenta de diseño presentada en cualquier lugar dentro del estado de Oaxaca, sin embargo, debido a que el periodo de retorno al que se está asociado una obra hidráulica depende de su importancia, difícilmente se tendrán todos los mapas de isoyetas para diferentes periodos de retorno, por ello, también es válido utilizar el mapa de isoyetas de precipitación media tomando en cuenta su factor regional correspondiente para conocer la tormenta de diseño en un punto conocido dentro del estado.

Finalmente, sólo queda mencionar que, aunque el análisis regional de precipitaciones ayuda a estimar la cantidad de lluvia que cae en lugares donde no se tengan estaciones climatológicas, es indispensable que las estaciones que actualmente se encuentran fuera de servicio, retomen actividades, o incluso pensar en la posibilidad de incorporar nuevas estaciones a la red climatológica, y por ningún motivo dejar de actualizar las que actualmente se encuentran operando, ya que de ellas depende que se tenga un estudio hidrológico confiable. Además, contar con más estaciones climatológicas servirá para conocer las variaciones de algunos índices climatológicos a través del tiempo y así poder estudiar otros fenómenos no sólo del tipo hidrológico, sino ambiental.

Bibliografía

- Aparicio, M. F., (2012), "Fundamentos de Hidrología de Superficie". Editorial LIMUSA. México.
- Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chávez, L. (2008). Técnicas estadísticas en hidrología. México.
- Chow, Ven Te, R. Maidment, David, W. Mays, Larry. (1994). Hidrología aplicada.
- WACKERLY, Dennis D., et al. Estadística Matemática con Aplicaciones México 7a Edición Thomson, 2008.
- Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS), CONAGUA, México.
- Ibáñez Rosales Alejandro. (2011). Análisis estadístico de valores extremos y aplicaciones. 4 abril de 2017, de Universidad de Granada Sitio web: <http://masteres.ugr.es/moea/pages/tfm1011/analisisestadisticodevaloresextremosyaplicaciones/>
- SciELO México. (2009). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. 20 de junio de 2017, de SciELO Sitio web: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000300004
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Continuo de Elevaciones, Consultado 20 de agosto de 2017, en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>
- Ponce, S. M. (2017). *Regionalización de precipitaciones para obtener lluvias de diseño en el estado de Veracruz* (Tesis de licenciatura). UNAM, CDMX.
- Santana, S. O. (2016). *Regionalización para la obtención de lluvias de diseño en el estado de Nuevo León* (Tesis de licenciatura). UNAM, CDMX.