



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTIMACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA.  
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

PRESENTA:

**SERGIO GONZÁLEZ ORTIGOZA**

TUTOR:

**DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA**



2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles  
Secretario: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval  
Vocal: Dr. Ramón Domínguez Mora  
1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. Víctor Franco  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dra. Lilia Reyes Chávez

## **Lugar o donde se realizó la tesis:**

Instituto de ingeniería, UNAM.

## **TUTOR DE TESIS:**

---

Dr. Ramón Domínguez Mora

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la universidad Nacional Autónoma de México que a través de la Facultad de Ingeniería me permitió continuar con mi formación académica y fortalecer mi carácter.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para la realización de los estudios de postgrado y la oportunidad de desarrollar esta investigación.*

*A los profesores que durante este tiempo me transmitieron sus conocimientos y experiencias.*

*Al Dr. Ramón Domínguez por los conocimientos transmitidos y por mostrar la mejor disposición al dirigir este trabajo, gracias por la confianza que deposito en mi y hacer un espacio cuando requería de su apoyo.*

*A los miembros del jurado, por su valioso tiempo prestado al revisar este trabajo y por sus atinados comentarios.*

***Gracias...***

## **DEDICATORIA**

*A mis padres por el amor brindado, si no fuera por ustedes esto no seria posible.*

*A mis hermanos por ser mis más grandes amigos.*

*A mi esposa Eunice por compartir la vida conmigo.*

*A mis hijos Mateo y Ximena por el tiempo que les eh robado para concluir con esta investigación.*

***Los amo...***

# INDICE DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| A. ÍNDICE DE FIGURAS.....   | I   |
| B. ÍNDICE DE TABLAS .....   | III |
| RESUMEN.....  | V   |
| I. INTRODUCCIÓN.....  | 1   |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA.....                                       | 3   |
| 2.1. FUNDAMENTOS DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA) .....    | 3   |
| 2.2. TIPOS DE FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA).....               | 3   |
| 2.2.1. FACTORES DE ÁREA GEOGRÁFICA FIJA .....                         | 3   |
| 2.2.2. FACTORES DE CENTRO DE TORMENTA .....                           | 4   |
| 2.3. ESTUDIOS PREVIOS.....  | 5   |
| 2.4. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA .....   | 5   |
| 2.4.1. MÉTODOS EMPÍRICOS.....   | 6   |
| a. Método del United States Weather Bureau (1958) .....               | 6   |
| b. Método de UK (Nerc, 1975) .....                                    | 8   |
| c. Método de Bell (1976) .....  | 8   |
| d. Método de Desbordes-Raous-Trevisiol (1984).....                    | 9   |
| 2.4.2. MÉTODOS TEÓRICOS.....  | 10  |
| a. Método de Roche (1963).....  | 10  |
| b. Método de Rodríguez Iturbe y Mejía.....                            | 12  |
| c. Método de Nguyen – Rousselle – McPherson (1980) .....              | 14  |
| d. Método de Asquith – Famiglietti (2000) .....                       | 15  |
| 2.4.3. MÉTODOS EMPIRICO-TEORICOS .....                                | 16  |
| a. Método de Myres – Zehr.....  | 16  |
| III. METODOLOGÍA .....  | 18  |
| IV. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RIO PANUCO .....                       | 20  |
| 4.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO .....                         | 20  |
| 4.1.1. LOCALIZACIÓN.....  | 20  |
| 4.1.2. HIDROGRAFÍA.....   | 20  |
| 4.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....                                  | 22  |
| 4.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE FRECUENCIAS Y DE BELL ..... | 24  |
| V. RESULTADOS.....  | 40  |
| 5.1. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS.....                                     | 40  |

|  |    |
|--|----|
| 5.2. BELL (1976).....  | 43 |
| VI. COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....                          | 44 |
| 6.1. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS.....                          | 44 |
| 6.2. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES REGIONES GEOGRÁFICAS ..... | 45 |
| VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                           | 62 |
| VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                    | 66 |
| IX. BIBLIOGRAFÍA .....                                       | 68 |

## A. ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Esquema del arreglo de registros de tormentas, <b>Pijki</b> , para calcular el FRA.   | 6  |
| Figura 2: Curvas de igual densidad de probabilidad (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”).  | 11 |
| Figura 3: Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y del nivel de profundidad. (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”). | 12 |
| Figura 4: Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual, para correlación tipo exponencial (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”).                      | 13 |
| Figura 5: Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual, para correlación tipo Bessel, (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”).                          | 13 |
| Figura 6: Cuenca del río Panuco y región analizada.   | 21 |
| Figura 7: Distribución de las estaciones en la zona es estudio.   | 23 |
| Figura 8: Área 1.   | 36 |
| Figura 9: Área 2 y 3.   | 37 |
| Figura 10: Áreas 4, 5, 6 y 7.   | 38 |
| Figura 11: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 5 años.   | 40 |
| Figura 12: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 50 años.  | 41 |
| Figura 13: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 100 años.   | 41 |
| Figura 14: Promedio de Factores de Reducción por Área para la zona en estudio.  | 42 |
| Figura 15: Variación del FRA con el periodo de retorno.   | 42 |
| Figura 16: $FRA_{BELL}$ para la cuenca del río Panuco.  | 43 |
| Figura 17: Tendencia del FRA con respecto al área, por los dos métodos estimados.   | 44 |
| Figura 18: Relación entre el FRA y el área de la cuenca.  | 46 |
| Figura 19: FRA teórico y calculado para la cuenca del río Pánuco.   | 47 |
| Figura 20: FRA para la cuenca del valle de México. Franco (1998).   | 48 |
| Figura 21: FRA teórico y calculado para la cuenca el Valle de México.   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22: FRA promedio para la cuenca del río Grijalva. ....                | 51 |
| Figura 23: FRA teóricos y calculados para la cuenca del río Grijalva. ....   | 52 |
| Figura 24: FRA para el estado de Sinaloa. ....                               | 53 |
| Figura 25: FRA teórico y calculado para el estado de Sinaloa. ....           | 54 |
| Figura 26: FRA para el estado de Durango. ....                               | 55 |
| Figura 27: FRA teórico y calculado para el estado de Durango. ....           | 57 |
| Figura 28: FRA teórico y calculado para España. ....                         | 59 |
| Figura 29: FRA teórico y calculado para Houston Texas, E.U. ....             | 61 |
| Figura 30: FRA de área geográfica fija, para varias regiones del Mundo. .... | 63 |

## B. ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis. ....   | 22 |
| Tabla 2: Datos diarios de precipitación en 24 horas para la estación 13021, del año 1961.....                      | 24 |
| Tabla 3: Precipitaciones areales para el año 1961. ....  | 25 |
| Tabla 4: Precipitaciones máximas areales. ....   | 26 |
| Tabla 5: Precipitaciones areales asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.....           | 27 |
| Tabla 6: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas $P_j'T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones. .... | 28 |
| Tabla 7: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas $P_j'T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones. .... | 29 |
| Tabla 8: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas $P_j'T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones. .... | 30 |
| Tabla 9: Precipitación en 24 horas, asociada a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100.....              | 31 |
| Tabla 10: Factores de peso para cada estación.....   | 32 |
| Tabla 11: Precipitación areal, calculada con los máximos puntuales. ....   | 33 |
| Tabla 12: Cálculo del FRA por el método de Análisis de Frecuencia. ....  | 33 |
| Tabla 13: Media areal de máximos puntuales.....  | 34 |
| Tabla 14: Calculo del FRA por el método de Bell (1976). ....   | 34 |
| Tabla 15: áreas empleadas para el cálculo de los FRA, por el método de análisis de frecuencias.....                | 39 |
| Tabla 16: FRA para las diferentes áreas y periodos de retorno.....   | 40 |
| Tabla 17: FRA obtenidos por el método de Bell. ....  | 43 |
| Tabla 18: Valores obtenidos de FRA por análisis de frecuencias y por el método de Bell.....                        | 44 |
| Tabla 19: FRA para 225 estaciones estadísticamente independientes.....   | 45 |
| Tabla 20: Área ajustada por un factor de 500 y su correspondiente FRA teórico.....                                 | 46 |
| Tabla 21: FRA para el valle de México. Franco (1998). ....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 22: Área unitaria y la ajustada por un factor de 50 correspondientes a los FRA teóricos. ....  | 49 |
| Tabla 23: FRA para la cuenca del río Grijalva. Domínguez et al (1997). ....                          | 50 |
| Tabla 24: Área unitaria y la ajustada por un factor de 150 correspondientes a los FRA teóricos. .... | 51 |
| Tabla 25: Factores de reducción por área (Mena 2004). ....   | 53 |
| Tabla 26: Área unitaria y la ajustada por un factor de 700 correspondientes a los FRA teóricos. .... | 54 |
| Tabla 27: FRA para el estado de Durango. (Domínguez). ....   | 55 |
| Tabla 28: Área unitaria y la ajustada por un factor de 200 correspondientes a los FRA teóricos. .... | 56 |
| Tabla 29: Factores de reducción por área para varias regiones del mundo. ....                        | 58 |
| Tabla 30: Área unitaria y la ajustada por un factor de 400 correspondientes a los FRA teóricos. .... | 59 |
| Tabla 31: Área unitaria y la ajustada por un factor de 100 correspondientes a los FRA teóricos. .... | 60 |

# ESTIMACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO

González Ortigoza S.<sup>1</sup>, Domínguez Mora R.<sup>2</sup>

## RESUMEN

Muchas aplicaciones hidrológicas y meteorológicas requieren un conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la lluvia en un área determinada. La intensidad de lluvia en un punto sólo puede ser representativa en pequeñas áreas, por lo que para estimarla para áreas extensas se debe recurrir a métodos que emplean las alturas de lluvia registradas en un número de estaciones, existentes en la zona de estudio.

Una manera de determinar la intensidad de la lluvia en áreas grandes se basa en los factores de reducción por área (FRA). Existen diversos métodos para calcular los FRA que de acuerdo a sus bases podrían considerarse empíricos, teóricos y teórico-empíricos. Estos índices se utilizan para transformar la altura de lluvia puntual en una altura de lluvia equivalente para un área determinada (precipitación areal).

El FRA se define como el factor que aplicado al valor de lluvia puntual para una duración y periodo de retorno especificado, proporciona la lluvia espacial sobre un área para la misma duración y periodo de retorno.

En el presente estudio se presentan dos métodos de estimación de este factor en la cuenca del río Pánuco, situada en la vertiente del golfo de México. En ella se presentan diferentes tipos de climas, desde los cálidos hasta los secos, donde generalmente las precipitaciones disminuyen de este a oeste. Estas precipitaciones se caracterizan por una marcada variabilidad temporal que permite la aparición de fenómenos extremos, y una fuerte variabilidad espacial.

Palabras clave: Factor de reducción por área, precipitación, golfo de México.

---

<sup>1</sup> Pasante de la maestría en ingeniería civil (Hidráulica).UNAM.

<sup>2</sup> Profesor investigador del Instituto de ingeniería y Tutor de Tesis. UNAM.

# AREAL REDUCTION FACTORS ESTIMATED. APPLICATION TO THE PANUCO RIVER BASIN

González Ortigoza S.<sup>1</sup>, Domínguez Mora R.<sup>2</sup>

## SUMMARY

Many hydrological and meteorological applications require knowledge of the spatial and temporal variability of rainfall for a given area. The rain intensity in one specific point is representative only for small areas, thus to estimate it for a wide area it should be resorted to methods that employ the highest rainfall recorded in a number of stations in the area of study.

One way to determine the intensity of rainfall in large areas is based on reduction factors by area (ARF). There are several methods to calculate the ARF and according to their bases could be considered empirical, theoretical and theoretical-empirical. These indices are used to transform the depth of timely rain in an equivalent rainfall depth for given area (areal precipitation).

The ARF is defined as the factor applied to timely rain value for duration and specified return period, it provides the spatial rainfall of an area with the same duration and return period.

In this study are presented one method to estimate this factor ARF in the Pánuco River basin, located on the slope of the Mexican Gulf. It presents various types of climates, from humid to dry, where rainfall generally decreases from east to west. These precipitation are characterized by clear temporal variability that allows the occurrence of extreme events, and a strong spatial variability.

Key words: reduction factors by area, rainfall, Mexico Gulf.

---

<sup>1</sup> Masters intern in civil engineering (Hydraulics). UNAM

<sup>2</sup> Researcher teacher of the Engineering Institute and thesis tutor. UNAM

## I. INTRODUCCIÓN

Muchas aplicaciones hidrológicas y meteorológicas requieren del conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la lluvia en un área determinada, como al diseñar obras hidráulicas ya que el dimensionamiento es función del caudal de diseño. Este último puede estimarse utilizando métodos hidrometeorológicos o análisis estadísticos de caudales máximos.

En los métodos hidrometeorológicos se calcula una tormenta de diseño, asociada al período de retorno requerido por la obra, y se convierte en avenida de diseño mediante modelos lluvia-escurrimiento.

En los análisis estadísticos se consideran directamente los datos de caudales máximos registrados en una estación hidrométrica en la zona de interés, en los estudios de frecuencias para máximos.

Debido a que es muy común que no se cuente con información de gastos máximos instantáneos, y cuando se cuenta con ellos no son lo suficientemente largos, para hacer un análisis estadístico confiable, que permita la estimación de la avenida de diseño.

Esto obliga a usar los modelos lluvia-escurrimiento. Para la aplicación de dichos modelos es necesario el cálculo de la tormenta de diseño para la duración, período de retorno y área de interés. Sin embargo, debido al desconocimiento de la distribución de frecuencia de las precipitaciones con respecto al área, se utilizan los datos puntuales para su estimación, lo cual ha obligado a introducir el concepto de factores de reducción por área (FRA).

En el análisis tradicional, en que se consideran los máximos anuales puntuales, los cálculos tienden a sobrestimar la precipitación, al no considerar el efecto de no simultaneidad de las lluvias; es decir el hecho de que los máximos no se presenten en

el mismo momento en todas las estaciones consideradas. Esta falta de simultaneidad lógicamente se acentúa conforme el área estudiada es mayor.

Estévez et al (2010), menciona que un factor de reducción por área (FRA) es un valor que se puede aplicar a una precipitación puntual de una duración especificada y período de retorno para obtener la precipitación areal de la misma duración y período de retorno.

Ya que la intensidad de lluvia en un punto sólo puede ser representativa de la intensidad de lluvia media de pequeñas áreas, se debe recurrir a métodos que emplean las alturas de lluvia registradas en un determinado número de estaciones para calcular empíricamente el FRA (factor de reducción areal). En algunos de ellos el FRA es único para los distintos periodos de retorno, mientras que en otros el FRA es función del periodo de retorno. Estos factores se utilizan para transformar la altura de lluvia puntual en una altura de lluvia equivalente para un área determinada.

Hersfield (1962) definió dos tipos de factores. Los denominados de centro de tormenta, que son los que se determinan para cada evento, y los de área geográfica fija, que se obtienen con datos de diferentes tormentas. Estos últimos no están relacionados con alguna tormenta registrada de forma individual, sino que se originan en las estadísticas de los registros de precipitación, por lo que también se conocen como factores de reducción por área estadísticos, por lo que son más usados para fines de diseño y revisión de obras hidráulicas.

No existen estimaciones de los valores de los factores de reducción por área en países distintos de EE.UU., Reino Unido o Australia. En el presente estudio, uno de los métodos más utilizados para el cálculo de los FRA basados en el área geográfica fija, ha sido evaluado en la cuenca del río Panuco ubicada en la vertiente del Golfo de México.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. FUNDAMENTOS DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA)

Como al realizar un análisis tradicional, se consideran los máximos anuales puntuales, los cálculos tienden a sobreestimar la precipitación. Ello se debe a que no se considera el efecto de la no simultaneidad de los eventos de lluvia, es decir el hecho de que los máximos no se presentan en el mismo momento de todas las estaciones en estudio. La falta de simultaneidad se ve más acentuada conforme el área aumenta.

Los Factores de reducción por área, según el Natural Environmental Research Council (NERC, 1975), "son factores que cuando se aplican a los valores de precipitaciones puntuales con una duración y un período de retorno, dan como resultado precipitaciones areales de la misma duración y período de retorno". El concepto de factores de reducción por área proporciona un marco eficaz para estudiar la variabilidad espacial de diferentes procesos hidrológicos.

### 2.2. TIPOS DE FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA)

Los dos tipos de factores de reducción por área más comunes en uso son los de centro de tormenta, que son los que se determinan para cada evento y los de área geográfica fija, que se obtienen con datos de diferentes tormentas. Estos últimos son los más usados, ya que permite hacer un análisis de frecuencias, por lo que también se conocen como factores de reducción por área estadísticos.

#### 2.2.1. FACTORES DE ÁREA GEOGRÁFICA FIJA

Los factores de área geográfica fija relacionan la altura de precipitación en un punto de la cuenca con la altura promedio de precipitación del área total de la cuenca. El área bajo observación se da fijando el tiempo y el espacio.

Estos de factores de reducción por área se originan en las estadísticas de los registros de precipitaciones máximas puntuales y no de tormentas individuales, por lo

que se conocen como factores de reducción estadísticos. Estos están representados por:

$$FRA = R/P$$

Donde:

**FRA** factor de reducción por área, adimensional

**R** precipitación máxima para una duración y área dadas, en mm

**P** precipitación puntual máxima anual sobre toda el área, para la misma duración para la cual se calculo R, en mm

### 2.2.2. FACTORES DE CENTRO DE TORMENTA

Los factores de reducción por área de centro de tormenta, están asociados al cálculo de la altura de precipitación efectiva para tormentas discretas. Estos presentan los perfiles de tormentas individuales. Ya que en la realidad, el área en la que la lluvia cae no está preestablecida sino que varía con cada tormenta. En este caso el punto de precipitación máxima es el centro de tormenta y es el representativo para el cálculo de los FRA. La relación de la altura media de precipitación sobre una superficie y una altura máxima de precipitación de una tormenta determinada se resume con ayuda de estos factores. Las líneas de igual altura de precipitación se dividen por la altura máxima de la tormenta y luego se integran para obtener la altura promedio de precipitación de la tormenta. Los Factores de reducción por área de centro de tormenta están dados por:

$$FRA = R/P$$

Donde:

**FRA** factor de reducción por área, adimensional

**R** precipitación media máxima en la cuenca para una determinada duración, en mm

**P** precipitación máxima puntual para la misma tormenta y duración para la que se calculo R, en mm

Estos factores de reducción por área no son muy ampliamente utilizados, debido a que este tipo de enfoque es difícil de implantar en tormentas multicéntricas. Solo se utilizan en las tormentas individuales. Además, de no poder utilizarse para la estimación de precipitaciones areales de determinada frecuencia, ya que este tipo de factores se estiman para cada tormenta (Omolayo, 1993).

### **2.3. ESTUDIOS PREVIOS**

Los primeros estudios se basaron en el análisis empírico de tormentas individuales y rara vez se tuvo en cuenta el periodo de retorno del evento (U.S. Weather Bureau, 1958). En algunos países como Italia, en este tipo de estudios, fueron los pioneros (Supino, 1964) y aun hoy en día son muy populares en la definición de las tormentas de diseño para sistemas de drenaje urbano. El enfoque teórico se amplió con la introducción de función de varianza a los Factores de Reducción (Rodríguez-Iturbe y Mejía). Una derivación estocástica basada en el análisis de los factores de reducción por áreas de procesos de precipitación agregada tanto en el espacio y el tiempo también se presentó (Waymire et al, 1984; Sivapalan y Blöschl, 1998; Bacchi y Ranzi, 1995). También se llevaron a cabo estudios prototipo dirigidos hacia la estimación de los factores de reducción de áreas utilizando datos digitalizados devueltos por radar (Frederick et al., 1977).

### **2.4. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA**

Los Factores de reducción por área se han desarrollado sobre todo en EE.UU., Reino Unido y Nueva Zelanda (Omolayo, 1993). Debido a que no se ha hecho mucho trabajo para estimar estos valores en otras partes del mundo a causa de las redes dispersas de estaciones pluviométricas y registros cortos. Para obtener los factores de reducción por área FRA se han propuesto diversos métodos, que de acuerdo con sus bases se podrían dividir en tres grupos. Los empíricos (U. S. Weather Bureau, 1957; NERC, 1975; Bell, 1976; Desbortes et al, 1984), los teóricos (Roche, 1963; R. Iturbe y Mejía, 1974; Nguyen et al, 1980; Bacchi y Ranzi, 1996; Sivapalan y Blösh, 1998 y De Michele et al, 2001), y los teórico-empíricos (Myers y Zehr, 1980).

### 2.4.1. MÉTODOS EMPÍRICOS

Los métodos empíricos relacionan la precipitación areal máxima, obtenida por diferentes procedimientos, con la máxima puntual; dentro de ellos se encuentran US Weather Bureau, Nerc, Bell y Desbordes. A pesar de tener bases teóricas nulas, han sido una referencia en diseño como para efectos de comparación con otros métodos como los teóricos por lo que en la actualidad siguen siendo usados.

#### a. Método del United States Weather Bureau (1958)

El método propuesto por el U.S. Weather Bureau fue presentado en el reporte técnico TP-29 (Omolayo, 1993), se deriva de un estudio de siete redes de estaciones densas en el Este de los Estados Unidos, en las que se relacionan las mayores tormentas registradas. Las redes cubren un área de 250 a 1000 km<sup>2</sup> y la longitud de registros varían entre 7 y 15 años (Viessman, 1989). En éste método se elige la precipitación areal de cada evento aplicando los factores de peso obtenidos por los polígonos de Thiessen y se seleccionan las precipitaciones máximas en cada año y estación. Se calcula la media de la serie anual y se identifica la precipitación máxima puntual de cada estación y año. El FRA es el cociente de la media de la serie anual entre la media total de todas las estaciones y de todos los años.

Para la determinación del FRA por el método del USWB (1958) se aplica el siguiente procedimiento

- a) Se eligen las tormentas históricas importantes para la duración de interés, en todas las estaciones del área estudiada,  $P_{ijk_i}$ . Donde,  $P$  es la precipitación acumulada,  $j$  es la estación y  $k_i$  es el número de evento de tormenta, para una fecha común en el año  $i$ , ver Figura 6 y Tabla 1.

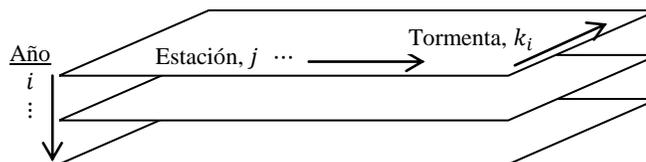


Figura 1: Esquema del arreglo de registros de tormentas,  $P_{ijk_i}$ , para calcular el FRA.

- b) Usando los factores de Thiessen,  $w_j$ , se calcula la precipitación areal,  $\bar{P}_{k_i}$ , de cada evento,  $k_i$ .

$$\bar{P}_{k_i} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot P_{ij} \quad (1)$$

- c) Se elige la mayor precipitación areal para cada año,  $i$ , y de cada tormenta seleccionada  $k_i$ . Se conforma una serie de  $n$  años,  $\bar{P}'_i$ , es decir,  $\bar{P}'_i = \text{Max}_{k_i} (\bar{P}_{k_i})$ , para toda  $i = 1, 2, \dots, n$ .

- d) Se calcula la media de la serie de datos generados en el punto anterior. Esta media es el numerador de la ecuación 5.

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{P}'_i \quad (2)$$

- e) Para cada año se eligen las precipitaciones máximas puntuales de cada estación,  $P'_{ij} = \text{Max}_j (P_{ij})$ . Luego, se calcula la media areal de cada año,  $\bar{P}'_{ij}$ .

$$\bar{P}'_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot P'_{ij} \quad (3)$$

- f) Se obtiene la media del registro generado en el punto anterior, que es el denominador de la ecuación 5.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{P}'_{ij} \quad (4)$$

- g) Finalmente, se calcula el FRA por el método USWB aplicando la ecuación siguiente:

$$FRA_{USWB} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{P}'_i}{\sum_{i=1}^n \bar{P}'_{ij}} \quad (5)$$

## b. Método de UK (Nerc, 1975)

Según el Método del Reino Unido (NERC, 1975) el FRA se obtienen dividiendo las precipitaciones de las tormentas en que ocurrió la máxima tormenta areal,  $P'$ , entre los eventos máximos ocurridos en cada estación durante el año,  $P$ . Al determinar los valores  $P'$  y  $P$  de cada año y de cada estación, éstos se dividen para obtener el FRA para cada año y cada estación,  $(P'/P)_{ij}$ , respectivamente. Para calcular el FRA de la duración considerada se promedian todos los valores de cada año y de cada estación. La ecuación sugerida para calcular el FRA por el método del Reino Unido es

$$FRA_{UK} = \frac{1}{n m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{P'_{ijk_i}}{P'_{ij}} \quad (6)$$

Procedimiento, se considera que los datos de partida son  $P_{ijk_i}$

- Se calcula la precipitación areal de todas las tormentas,  $\bar{P}_{k_i}$ . De todos los eventos,  $k_i$ , se identifican para cada año el día en que ocurrió el máximo evento en la zona de estudio,  $\bar{P}'_i$ . Es decir, se eligen las precipitaciones puntuales de dicha tormenta,  $P'_{ijk_i}$ , para cada año y estación.
- Se identifican las tormentas máximas de cada estación y de cada año,  $P'_{ij}$ .
- Se calcula el FRA como el gran promedio de los cocientes,  $(P'_{ijk_i}/P'_{ij})$ , aplicando la expresión 6.

## c. Método de Bell (1976)

En la aplicación de éste método se seleccionan los valores máximos anuales de precipitación areal,  $\bar{P}'_i$ , formando una serie anual. Por otra parte, se eligen los valores máximos anuales de lluvia puntual de cada estación, luego, se obtiene la precipitación areal correspondiente, resultando otra serie de valores anuales (Bell, 1976).

El procedimiento sugerido para calcular el FRA por el método expuesto (Bell, 1976) es como sigue:

- a) Se determina la máxima precipitación areal de cada año,  $\bar{P}'_i$ .
- b) Se eligen las precipitaciones máximas puntuales de cada estación y de cada año,  $P'_{ij}$ . Se obtiene la media areal de éstos máximos,  $\bar{P}'_{ij}$ .
- c) Con las dos series anuales halladas se calcula el FRA para cada año.
- d) Se calcula el FRA de la cuenca promediando los valores de cada año obtenidos en c), aplicando la ecuación

$$FRA_{Bell} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{P}'_i}{\bar{P}'_{ij}} \right) \quad (7)$$

#### d. Método de Desbordes-Raous-Trevisiol (1984)

Este método permiten conocer el FRA correspondientes a evento, en el que se identifican dos tipos de factores para cada evento, los que se derivan de la relación de la precipitación máxima areal y la precipitación presentada durante el mismo periodo de tiempo en la estación analizada. Cabe mencionar que estos factores pueden ser mayores que la unidad, y se obtienen tantos como estaciones analizadas. El segundo tipo de factores se obtienen al relacionar el valor de la precipitación máxima areal con el valor máximo puntual, se obtiene un factor para cada evento menor que la unidad.

De acuerdo con los autores, existen dos métodos para calcular los factores de reducción por área ( $\alpha, \alpha_d$ ).

La primera relaciona el valor de la intensidad media en toda la cuenca con la intensidad máxima para una misma duración localizada en el centro de la tormenta, esto es para cada evento se obtiene un solo factor, mediante la expresión:

$$\alpha_d(A, dt, iM) = \frac{iA(d, dt)}{iM(dt)} \quad (8)$$

Donde

$iA(dt)$  intensidad media en la cuenca

$iM(dt)$  intensidad máxima en algún punto de la cuenca

dt duración

Otra forma de calcularlo es relacionando la intensidad local con la intensidad máxima a una distancia  $d$ , del centro de tormenta, mediante la expresión:

$$\alpha d(d, dt, iM) = \frac{i(d, dt)}{iM(dt)} \quad (9)$$

Donde:

$i(d, dt)$  intensidad local

$iM(dt)$  intensidad máxima

Ambas expresiones se relacionan de la siguiente manera:

$$\alpha(d, dt, iM) = \frac{1}{A} \int_A \alpha d(x, y, dt, iM) dA \quad (10)$$

Cabe mencionar que estos factores pueden ser mayores que la unidad, y se obtienen tantos como estaciones analizadas.

## 2.4.2. MÉTODOS TEÓRICOS

En estos métodos tienen su base teórica en alguna ley de probabilidad. En este grupo podemos encontrar los métodos de Roche (1963), Nyguyen y Rousselle (1980) y Asquith Famiglietti (2000).

### a. Método de Roche (1963)

Este es el primer método que se propuso con bases teóricas. Roche considera a la precipitación como un proceso isotrópico, por lo que sigue la misma ley de probabilidad teórica en diferentes puntos de la zona en estudio, esto es, si se tiene una superficie  $S$ , la cual tiene una serie de puntos  $1, 2, 3, \dots, n$ , distribuidos de manera homogénea y se encuentra asociados a un altura de precipitación  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ , en las que las alturas de precipitación son variables aleatorias que siguen la función de probabilidad se tiene que:

$$\int \int \dots \int n \rho(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n) dh_1, dh_2, dh_3, \dots, dh_n \quad (11)$$

Donde P es la probabilidad.

La integral se debe de calcular en toda la región con la condición siguiente:

$$\frac{h_1+h_2+\dots+h_n}{n} \geq h \quad (12)$$

El valor exacto de la probabilidad se obtiene cuando n tiende a infinito.

Roche inicio su análisis considerando dos puntos de la superficie, de donde construyó una grafica, en la figura 2 se puede observar, en la que dos curvas representan la igual densidad de probabilidad. Repitiendo este procedimiento para un mayor número de valores y variando la distancia entre los puntos, se puede construir una grafica como la que se presenta en la figura 3. Este método fue aplicado para la cuenca Flakoho, ubicada en la costa occidental de África, de donde encontró que los factores de reducción por área son independientes al periodo e retorno.

Como podemos observar este método es muy laborioso ya que en cada caso se debe de construir graficas y calcular integraciones graficas. Además de que este método se refiere a FRA de eventos analizados individualmente.

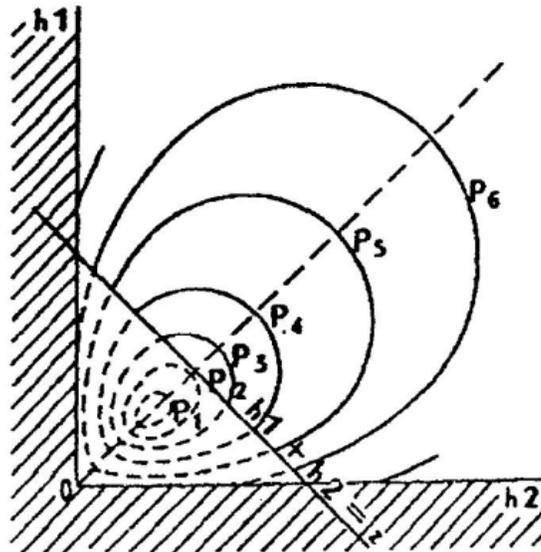


Figura 2: Curvas de igual densidad de probabilidad (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”).

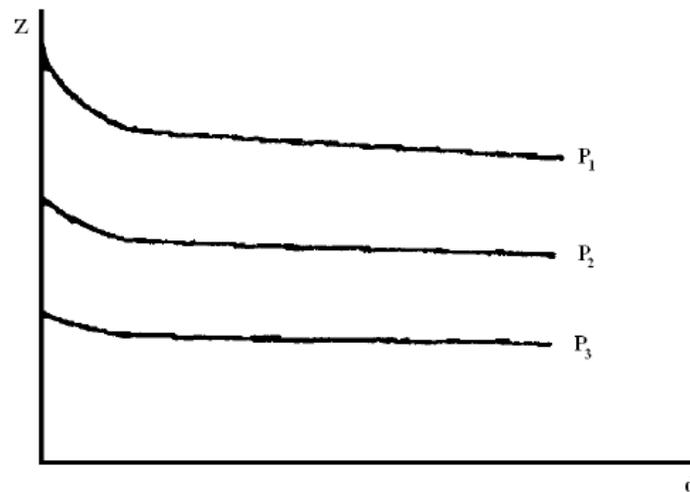


Figura 3: Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y del nivel de profundidad. (Guichard D. “Recopilación de métodos y factores empíricos”).

### b. Método de Rodríguez Iturbe y Mejía

Estos autores consideran que la lluvia es un proceso estacionario e isotrópico y que la función de correlación puede dividirse en dos componentes, una espacial y otra temporal.

El proceso puntual de la lluvia es distribuido con media cero y varianza  $\sigma_p^2$ , mientras que el proceso total de la lluvia tiene media cero y varianza  $A^2\sigma_p^2\bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2|A)$ . Para un periodo de retorno, la lluvia puntual puede transformarse en lluvia total, al multiplicarlo por la desviación estándar.

El factor de correlación del área fija depende únicamente de las características del área en cuestión.

$$K = A^2(\bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2|A))^2 \quad (13)$$

Donde

K es el factor que relaciona alturas de lluvia para el área de interés.

En toda el área, existen 2 tipos de correlación, una exponencial decreciente y otra el tipo Bessel. En las figuras 4 y 5, se muestra la variación del factor de correlación  $K$  para estas funciones, de donde se encontró que para el factor  $K$  no importa la forma geométrica del área de interés, excepto cuando se tienen formas muy alargadas

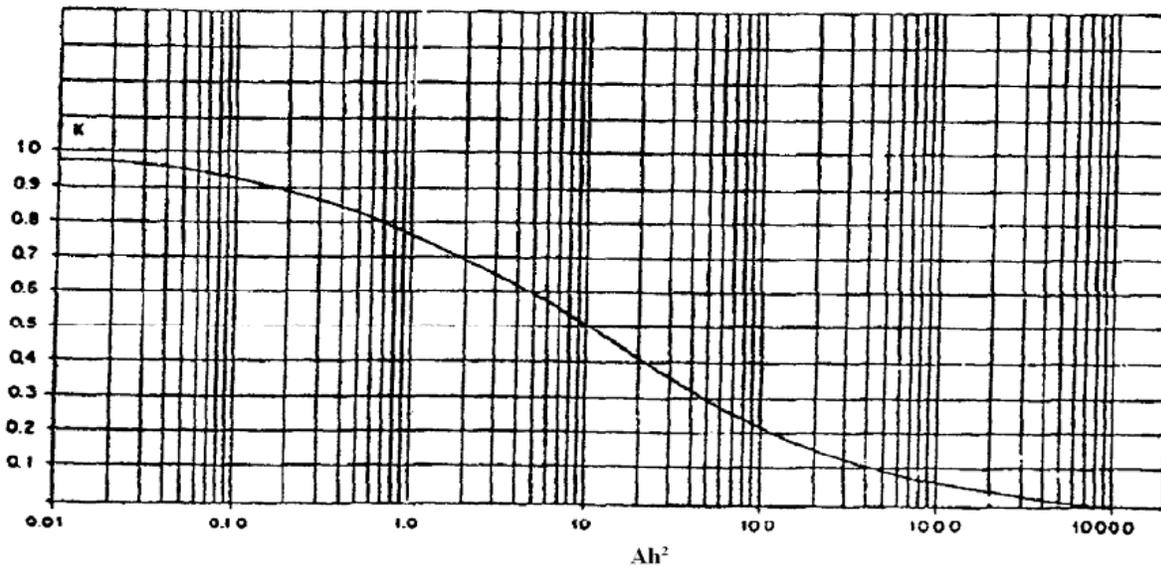


Figura 4: Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual, para correlación tipo exponencial (Guichard D. "Recopilación de métodos y factores empíricos").

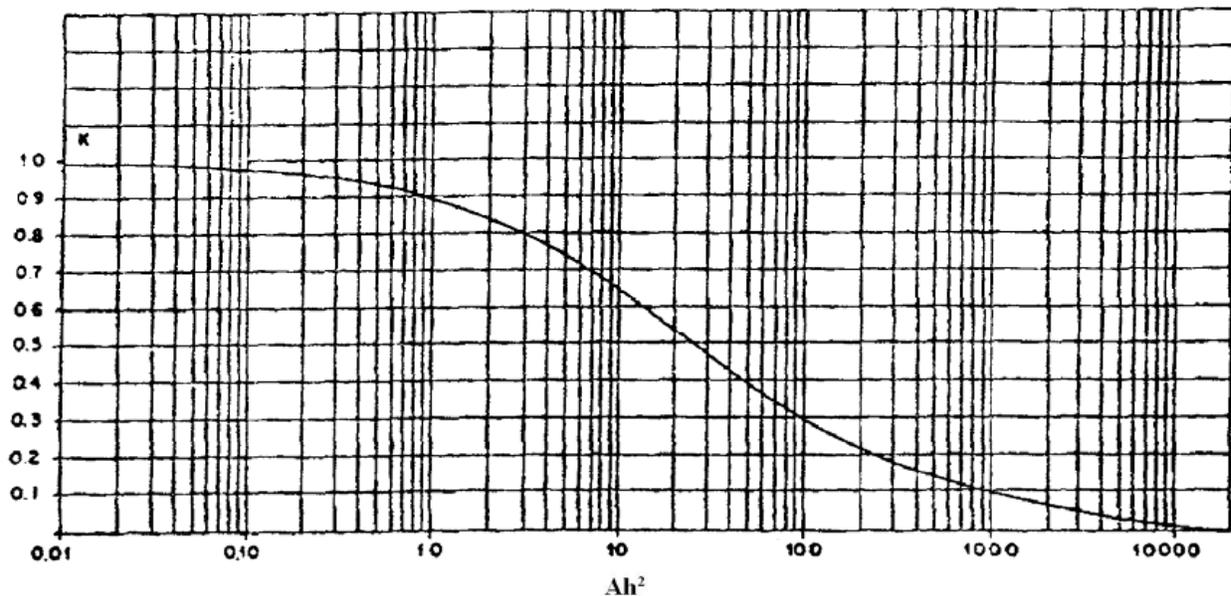


Figura 5: Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual, para correlación tipo Bessel, (Guichard D. "Recopilación de métodos y factores empíricos").

### c. Método de Nguyen – Rousselle – McPherson (1980)

Los argumentos hipotéticos del método son los siguientes:

- La lluvia es un proceso estocástico, intermitente y positivo.
- La distribución de frecuencias de las lluvias puntuales y areales es de tipo exponencial.

Los autores teóricamente consideran a la lluvia como un proceso estocástico intermitente y positivo; y que la distribución de frecuencias de las lluvias horarias puntuales y areales es de tipo exponencial, entonces pueden tomar cualquier valor, incluyendo el cero, por lo tanto hay una probabilidad finita para la que la altura de lluvia  $X$  sea cero, y para valores mayores que cero se puede usar la función de probabilidad  $\Phi(x)$ . Con este método se encuentran valores de los factores de reducción que pueden ser mayores que la unidad.

Por lo tanto la probabilidad de que la precipitación sea mayor a cero puede expresarse por medio de la expresión siguiente

$$F(x) = P\{X \leq x\} = F_0 + (1 - F_0)\phi(x) \quad (14)$$

Donde

$$F_0 = P\{X = 0\} \text{ y } \phi(x) = P\{X \leq x | X > 0\}$$

Ahora bien, suponiendo que las lluvias siguen una distribución exponencial, la función de probabilidad de excedencia  $F_1(x)$  es:

$$F_1(x) = (1 - F_0)e^{-\lambda x} \text{ para } x \geq 0 \quad (15)$$

Por lo que el área de influencia de cada estación se determina mediante los polígonos de Thissen para las lluvias areales, considerando que las lluvias son aleatorias, independientes y exponencialmente distribuidas, de este proceso se determina la ecuación de excedencia en función de las lluvias medias areales.

$$G_1(x) = 1 - G(x) = (1 - G_0)[1 - F_n(x)] \quad (16)$$

Donde

$G_0$  probabilidad de que la lluvia areal sea cero, y se estima de los datos históricos de lluvia.

$G_r$  probabilidad de excedencias de que las lluvias medias de toda el área sean mayores que  $x$ .

El factor de correlación de toda el área se puede determinar para un mismo valor de las probabilidades de las probabilidades de excedencias de las lluvias puntuales y areales.

#### **d. Método de Asquith – Famiglietti (2000)**

Estos autores proponen un método denominado máximo anual centrado, que considera específicamente la distribución de precipitaciones simultáneas circundantes a la precipitación máxima anual. El método supone un proceso isótropo y que el volumen potencial de la tormenta de diseño ocurre cuando el centro de tormenta coincide con el centroide de la cuenca.

Esta metodología se recomienda mas para lugares en donde existe gran cantidad de información de estaciones pluviométricas, por lo que no se requiere inferencia estadística.

El procedimiento que se sigue para obtener los factores de reducción es el siguiente:

Con los valores máximos de la base del registro, se determina las relaciones entre el máximo y el simultáneo que corresponda a las estaciones que se encuentran alrededor de dicho valor. Adicionalmente, se considera en cada relación de datos la distancia entre las estaciones correspondientes.

Se eligen las relaciones que cumplan con un período de retorno específico, en donde se busca una relación preliminar entre los cocientes seleccionados y sus respectivas distancias.

Se define un conjunto de funciones de ajuste entre los cocientes y las distancias seleccionadas en el punto anterior. Cuando la distancia es cero, las curvas que se obtienen deben de tener como valor uno.

Se calcula los factores de reducción por área para la zona de interés y el criterio de diseño seleccionado integrado específicamente la función estimada del punto anterior, para ello se propone utilizar áreas de forma circular.

### **2.4.3. MÉTODOS EMPIRICO-TEORICOS**

#### **a. Método de Myres – Zehr**

Este método consiste en obtener los estadísticos de cada estación por separado, de pares de estaciones y de grupos de cinco estaciones. Mediante la combinación de dichos estadísticos se obtienen los factores de reducción por área. Cabe mencionar que los autores trabajan con áreas circulares. Y el procedimiento propuesto es el siguiente:

Para los pares de estaciones. En un plano de distancia se representan los primeros y segundos momentos de todas las series de datos anuales, ajustándolas a una ecuación de tipo exponencial.

Se determinan las ecuaciones de ajuste para las cinco estaciones diferentes: primero y segundo momentos para los máximos anuales, del promedio de dos estaciones: primero y segundo momento de la lluvia que se registro en la segunda estación de manera simultánea al máximo de la primera: la covarianza entre los máximos de la estación cuando se presento la lluvia simultanea.

Los estadísticos se utilizan en distintas combinaciones para estimar los límites inferior y superior del primero y segundo momentos de las precipitaciones máximas de toda la región.

Por último se obtienen las relaciones precipitación – área mediante el procedimiento del primero y segundo momento de la zona, a través de la ecuación de frecuencia generalizada de Chow.

$$h = \bar{h} + K\sigma$$

Donde

$h$  precipitación máxima buscada para una frecuencia determinada, en mm

$\bar{h}$  precipitación media, mm

$K$  factor de frecuencias, tabulado para diferentes valores de la longitud de serie y el periodo e retorno  $T_r$ .

$\sigma$  desviación estándar de la serie

Los estadísticos se utilizan, obteniendo el cociente entre el valor para una área o distancia determinada y su correspondiente, para área o distancia cero.

Este método se aplica en Estados Unidos en áreas circulares, donde las muestras contaban con un valor medio de 20 años.

### III. METODOLOGÍA

En este trabajo se usó el método de análisis de frecuencias para obtener los FRA, de una parte de la cuenca del río Panuco. Este se deriva al ajustar a los datos una distribución probabilística de eventos extremos. El método consiste en determinar los eventos extremos medios areales y puntuales, se calculan los respectivos eventos para algunos periodos de retorno y se obtiene la división de éstos; finalmente, el promedio de los valores anteriores es el FRA.

Para este caso se uso la función de distribución de eventos extremos tipo I (Gumbel) ya que es la función que se ajuste de mejor manera a los registros de precipitación acumulada en 24 horas para eventos de hasta 100 años periodo de retorno.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- a) De todas las tormentas registradas en la red de estaciones y para la duración de interés, se calcula la precipitación areal de cada tormenta,  $\bar{P}_i$ .
- b) Para cada año se eligen las precipitaciones areales máximas,  $\bar{P}'_i$ , correspondiente a la tormenta  $k_i$ , y se conforma una serie de  $n$  años.
- c) Se calculan los estadísticos de la anterior serie, es decir, la media  $\bar{x}_p$  y desviación estándar  $S_x$ .
- d) Con los parámetros calculados se ajusta la función de distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) por momentos, con las ecuaciones 17 y 18.

$$\hat{\mu} = \bar{x} - .45S \quad (17)$$

$$\hat{\alpha} = .78S \quad (18)$$

Donde

$\bar{x}$  = Media muestral

S = Desviación estándar muestral

- e) Con los parámetros calculados se, obtienen las precipitaciones máximas areales, asociadas a los periodos de retorno de  $Tr = 2, 5, 10, 20, 50$  y  $100$  años. Con la ecuación (19).

$$\left(\bar{P}'_i\right)_T = \hat{\sigma} - \hat{\alpha}Ln[-\ln F(x)] \quad (19)$$

- f) Se eligen las tormentas máximas de cada año y de todas las estaciones del área de estudio,  $P'_{ij}$ . Conformando  $m$  series de  $n$  años, y se calculan los estadísticos:  $\bar{y}_j$  (media) y  $S_j$  (desviación estándar).
- g) Se obtienen las precipitaciones máximas puntuales,  $(P'_j)_T$  asociadas a cada periodo de retorno. Con la ecuación (19).
- h) Con las series obtenidas en el paso anterior, se calcula la Precipitación Areal de Máximos para cada periodo de retorno.

$$\left(\bar{P}'_j\right)_T = \sum_{j=1}^m w_j \cdot (P'_j)_T \quad (20)$$

- i) Finalmente, se determina el FRA como el promedio de los cocientes de  $(\bar{P}'_i)_T$  y  $(\bar{P}'_j)_T$

$$FRA_{A\text{Frec}} = \frac{(\bar{P}'_i)_T}{(\bar{P}'_j)_T} \quad (21)$$

## IV. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RIO PANUCO

### 4.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

Debido a que la cuenca del río Pánuco es muy extensa y existen más de 400 estaciones climatológicas, acotamos el área en estudio a las estaciones que contaran con más de 30 años de registro, a los registros de estas estaciones se les calcularon sus estadísticos muestrales, para separarlas en regiones que presentan el mismo patrón meteorológico.

El criterio que se siguió fue en base a la media de la precipitación acumulada en 24 horas y se eligieron aquellas estaciones que presentan una media por encima de 100 mm. Lo que nos dio como resultado 30 estaciones (tabla 1) que se encuentran en la región centro de la cuenca (figura 6).

#### 4.1.1. LOCALIZACIÓN

La cuenca del río Panuco es una de las regiones hidrográficas más importantes del País, tanto por el área que ocupa  $84\,956\text{ km}^2$ , que la sitúan en cuarto lugar de la República, como por el volumen de sus escurrimientos, que le confieren el quinto lugar a nivel nacional con  $73\,549\text{ Mm}^3$  al año. Pertenece a la vertiente del Golfo de México y se localiza entre los  $19$  y  $24$  de latitud norte y los  $97\,45'$  y  $101\,20'$  de longitud oeste.

Se encuentra delimitada por las siguientes cuencas: al norte con la cuenca del río Soto la Marina y la región del Salado, al oeste la del río Lerma, al sur la del río Balsas y al este la de los ríos Tuxpan, Cazones y Tecolutla.

#### 4.1.2. HIDROGRAFÍA

La corriente principal de la cuenca es el río Panuco, forma parte de una amplia red hidrográfica en la que además destacan los ríos, Moctezuma y Tamesi. El Moctezuma principal afluente del Panuco, tiene sus orígenes en los ríos San Juan y Tula, que después de un recorrido de  $174\text{ km}$  recibe tal denominación hasta la



## 4.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La información disponible para el presente trabajo, principalmente es la base de datos CLICOM, de ella se extrajo los registros de precipitación en 24 horas, de todas las estaciones de la cuenca, para seleccionar la región de estudio, en la tabla 1 se presentan las estaciones seleccionadas.

Tabla 1: Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis.

| Id Estación | Nombre                   | X_coord | Y_coord |
|-------------|--------------------------|---------|---------|
| 13021       | ORIZATLAN ORIZATLAN      | -99.133 | 22.950  |
| 13048       | TLANCHINOL TLANCHINOL    | -99.133 | 22.850  |
| 24002       | ALTAMIRA CD. SANTOS      | -99.033 | 22.833  |
| 24003       | AQUISMON AQUISMON        | -99.233 | 22.833  |
| 24005       | BALLESMI CD. VALLES      | -99.217 | 22.800  |
| 24014       | DAMIAN CARMONA TAMASOPO  | -98.967 | 22.717  |
| 24016       | EJIDO ABRITAS CD. MAIZ   | -99.433 | 22.600  |
| 24025       | EL PUJAL CD. VALLES      | -99.400 | 22.500  |
| 24026       | REQUETEMU VILLA TERRAZAS | -99.167 | 22.133  |
| 24027       | EL SALTO CD. DEL MAIZ    | -99.283 | 22.133  |
| 24031       | GALLINAS AQUISMON        | -99.250 | 21.950  |
| 24043       | MICOS CD. VALLES         | -98.933 | 21.850  |
| 24053       | CD. SANTOS CD. SANTOS    | -98.983 | 21.817  |
| 24072       | SANTA CRUZ AQUISMON      | -98.967 | 21.750  |
| 24082       | TAMAPATZ AQUISMON        | -99.050 | 21.717  |
| 24084       | TANCULIN TAMAZUCHALE     | -99.317 | 21.683  |
| 24086       | TANLACUT SANTA CATARINA  | -98.967 | 21.667  |
| 24088       | TANTIZOHUICHE CD.VALLES  | -99.217 | 21.667  |
| 24090       | TANZABACA TAMASOPO       | -99.083 | 21.633  |
| 24091       | TEMAMATLA TAMAZUNCHALE   | -98.967 | 21.617  |
| 24092       | TIERRA BLANCA            | -99.117 | 21.617  |
| 24105       | XILITLA XILITLA          | -99.117 | 21.567  |
| 28002       | AHUALULCO GOMEZ FARIAS   | -98.900 | 21.433  |
| 28008       | BELLAVISTA MANTE (DGE)   | -98.983 | 21.400  |
| 28012       | C.E.I. CD. MANTE MANTE   | -98.767 | 21.233  |
| 28023       | CHAMAL NUEVO OCAMPO      | -98.900 | 21.233  |
| 28043       | LA BOQUILLA OCAMPO       | -98.617 | 21.183  |
| 28049       | LA SERVILLETA MANTE      | -98.283 | 21.167  |
| 30041       | CHICONTEPEC TEJEDA (SMN) | -98.167 | 20.983  |
| 30098       | LOS HULES CHALMA         | -98.650 | 20.983  |

En la figura 7, se presenta la distribución de las estaciones en la zona en estudio.

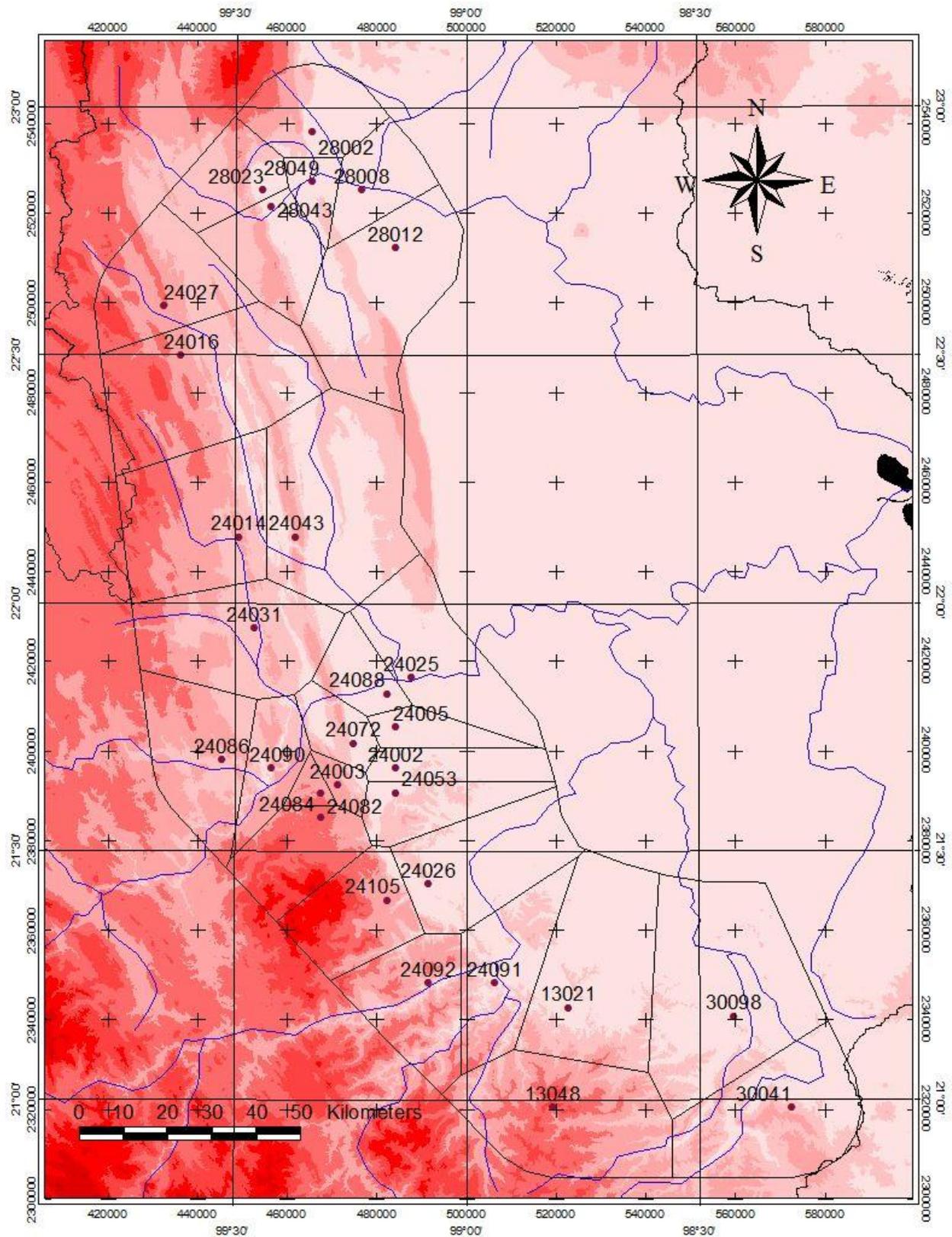


Figura 7: Distribución de las estaciones en la zona es estudio.

Además de la esta información fue necesario usar la capa vectorial de regiones hidrológicas, escala 1: 250 000 de la republica mexicana, de CONAMBIO en formato SHP, para la obtener el parteaguas de la cuenca, así como los modelos digitales de elevación de INEGI escala 1:50 000, de toda la cuenca para observar el relieve de la cuenca.

### 4.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE FRECUENCIAS Y DE BELL

En este capítulo se muestra el cálculo de los factores de reducción por área con el método de análisis de frecuencias a una parte de la cuenca del río Panuco.

El primer paso fue extraer los datos diarios de todas las estaciones, para poder definir un periodo en común, esta información fue extraída de la base de datos CLICOM, en la tabla 2, se presentan los datos diarios de la estación 13021, para el año de 1961.

Tabla 2: Datos diarios de precipitación en 24 horas para la estación 13021, del año 1961.

| Dia | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 20  | 50  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2   | 0   | 40  | 0   | 0   | 0   | 0   | 10  | 80  | 0   | 30  | 0   | 0   |
| 3   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 60  | 20  | 0   | 0   | 10  | 0   |
| 4   | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 60  | 0   | 0   | 0   | 10  | 0   |
| 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 40  | 0   | 0   | 0   | 120 | 0   |
| 6   | 0   | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7   | 20  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 20  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8   | 0   | 0   | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 10  | 50  | 0   | 0   | 0   |
| 9   | 0   | 0   | 0   | 0   | 40  | 0   | 0   | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11  | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 60  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 12  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 60  | 30  | 0   | 0   | 0   | 0   | 10  |
| 13  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 20  | 0   | 0   | 40  | 0   | 0   |
| 14  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 70  | 30  | 0   | 40  | 50  | 0   | 0   |
| 15  | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 40  | 0   | 0   | 30  | 0   | 0   | 0   |
| 16  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 17  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 40  | 0   | 0   | 0   |

|    |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 19 | 10 | 0    | 40   | 0    | 0    | 140  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 20   |
| 20 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 120  | 0    | 0    | 10   | 10   |
| 21 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 22 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 30   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 23 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 10   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 24 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 25 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 10   | 0    | 100  | 20   | 0    | 0    |
| 26 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 27 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 70   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 28 | 10 | 0    | 0    | 0    | 0    | 40   | 0    | 0    | 20   | 0    | 0    | 0    |
| 29 | 0  | ~~~~ | 0    | 0    | 0    | 0    | 10   | 0    | 0    | 0    | 10   | 0    |
| 30 | 0  | ~~~~ | 0    | NO_D | 0    | NO_D | 90   | 0    | NO_D | 0    | NO_D | 0    |
| 31 | 0  | ~~~~ | NO_D | ~~~~ | NO_D | ~~~~ | NO_D | NO_D | ~~~~ | NO_D | ~~~~ | NO_D |

Se extrajeron los datos diarios de todas las estaciones, del área en estudio, en el periodo de 1961 a 1999, para obtener la precipitación areal para cada día y para todos los años del registro. Esto se obtiene promediando, con la media aritmética, cada uno de los días del periodo en común de todas las estaciones, iniciando por el 1 de enero de 1961 hasta el 31 de diciembre de 1999, obteniendo un solo registro promedio en el que se presentan las precipitaciones areales para cada día de registro. En la tabla 3, se presenta la precipitación areal del año 1961, para el área en estudio.

Tabla 3: Precipitaciones areales para el año 1961.

| Día | Ene  | Feb   | Mar  | Abr  | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic  |
|-----|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1   | 1.68 | 0.04  | 2.12 | 1.10 | 0.22  | 0.33  | 21.60 | 8.39  | 0.01  | 0.75  | 0.02  | 0.00 |
| 2   | 4.15 | 15.11 | 0.21 | 0.76 | 0.00  | 0.00  | 15.32 | 19.27 | 1.04  | 16.17 | 0.44  | 1.86 |
| 3   | 8.00 | 0.58  | 0.00 | 0.02 | 0.04  | 0.00  | 41.51 | 8.63  | 8.83  | 2.53  | 2.09  | 0.52 |
| 4   | 4.88 | 0.01  | 0.01 | 0.01 | 0.00  | 0.51  | 13.82 | 0.52  | 11.75 | 0.00  | 6.68  | 0.00 |
| 5   | 3.07 | 0.52  | 0.01 | 0.00 | 0.00  | 0.05  | 13.17 | 2.17  | 2.13  | 0.00  | 23.93 | 0.19 |
| 6   | 1.29 | 1.47  | 0.00 | 0.78 | 0.44  | 0.12  | 14.98 | 2.81  | 0.47  | 0.00  | 24.51 | 1.99 |
| 7   | 4.74 | 0.07  | 0.03 | 0.00 | 0.00  | 0.08  | 21.09 | 2.93  | 3.71  | 0.00  | 8.46  | 0.22 |
| 8   | 1.19 | 0.17  | 1.16 | 0.00 | 12.41 | 0.06  | 8.42  | 16.17 | 34.44 | 0.91  | 0.04  | 0.00 |
| 9   | 0.07 | 0.04  | 0.00 | 0.00 | 12.85 | 15.62 | 0.41  | 9.81  | 0.01  | 2.00  | 0.00  | 0.00 |
| 10  | 0.02 | 0.14  | 0.02 | 0.00 | 0.13  | 24.10 | 0.40  | 7.38  | 0.89  | 0.80  | 0.00  | 0.00 |
| 11  | 1.84 | 0.00  | 0.02 | 0.00 | 0.00  | 34.78 | 3.40  | 4.23  | 0.06  | 3.44  | 0.00  | 0.00 |
| 12  | 0.05 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 21.93 | 19.82 | 4.40  | 15.11 | 0.41  | 0.05  | 1.95 |
| 13  | 0.38 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 43.94 | 28.18 | 1.17  | 28.81 | 10.28 | 2.44  | 0.15 |
| 14  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 72.88 | 7.50  | 0.44  | 47.21 | 16.24 | 1.47  | 0.09 |
| 15  | 3.26 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.83  | 41.88 | 1.80  | 1.11  | 11.64 | 0.06  | 3.47  | 1.28 |

|    |      |      |       |      |      |       |       |       |       |       |      |      |
|----|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 16 | 1.78 | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.04 | 61.17 | 2.31  | 14.03 | 9.96  | 0.00  | 5.04 | 0.00 |
| 17 | 0.99 | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.01 | 44.08 | 0.70  | 10.11 | 20.21 | 0.00  | 0.04 | 0.19 |
| 18 | 0.39 | 0.00 | 0.04  | 0.00 | 0.04 | 27.08 | 0.10  | 6.21  | 0.42  | 0.00  | 0.08 | 0.00 |
| 19 | 4.56 | 0.00 | 9.98  | 0.00 | 0.00 | 36.61 | 0.00  | 42.51 | 0.04  | 0.00  | 1.74 | 3.71 |
| 20 | 6.31 | 2.21 | 0.22  | 0.02 | 0.00 | 0.00  | 0.08  | 41.78 | 0.00  | 0.00  | 2.99 | 1.29 |
| 21 | 1.89 | 3.28 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 1.96  | 5.82  | 1.10  | 4.95  | 0.00  | 0.01 | 0.01 |
| 22 | 0.99 | 0.31 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.01  | 19.07 | 0.58  | 3.36  | 0.00  | 0.01 | 4.45 |
| 23 | 2.18 | 0.00 | 10.51 | 0.00 | 8.12 | 0.25  | 10.40 | 0.65  | 2.21  | 0.00  | 0.00 | 0.83 |
| 24 | 0.29 | 0.00 | 0.86  | 0.00 | 2.11 | 0.00  | 5.70  | 0.63  | 4.96  | 1.41  | 0.00 | 0.07 |
| 25 | 0.91 | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.18 | 0.00  | 9.93  | 0.82  | 32.82 | 18.24 | 0.00 | 0.02 |
| 26 | 1.13 | 0.00 | 0.02  | 0.00 | 6.52 | 2.41  | 2.00  | 3.32  | 1.90  | 8.82  | 0.00 | 0.00 |
| 27 | 0.70 | 0.38 | 0.00  | 0.02 | 0.75 | 1.40  | 18.71 | 5.50  | 3.01  | 0.02  | 0.00 | 0.00 |
| 28 | 1.66 | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.20 | 15.26 | 9.68  | 0.46  | 12.34 | 0.02  | 1.06 | 0.04 |
| 29 | 1.25 |      | 0.00  | 0.14 | 0.04 | 18.92 | 6.00  | 0.56  | 0.00  | 0.00  | 3.14 | 0.00 |
| 30 | 0.95 |      | 0.00  | 2.47 | 0.08 | 14.62 | 29.30 | 0.56  | 0.00  | 0.00  | 0.13 | 0.26 |
| 31 | 0.38 |      | 0.88  |      | 0.19 |       | 7.92  | 0.21  |       | 0.00  |      | 0.63 |

El siguiente paso es obtener las máximas precipitaciones areales para cada año de registro, en la tabla 4, se presentan estas precipitaciones.

Tabla 4: Precipitaciones máximas areales.

| Año  | Máximos | Año  | Máximos | Año  | Máximos | Año  | Máximos |
|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|
| 1961 | 72.89   | 1971 | 68.78   | 1981 | 122.01  | 1991 | 173.35  |
| 1962 | 57.61   | 1972 | 70.95   | 1982 | 45.14   | 1992 | 61.54   |
| 1963 | 74.81   | 1973 | 93.20   | 1983 | 76.65   | 1993 | 153.21  |
| 1964 | 64.99   | 1974 | 167.43  | 1984 | 76.59   | 1994 | 53.51   |
| 1965 | 59.44   | 1975 | 127.70  | 1985 | 78.00   | 1995 | 89.66   |
| 1966 | 104.17  | 1976 | 98.88   | 1986 | 61.66   | 1996 | 112.42  |
| 1967 | 97.93   | 1977 | 115.78  | 1987 | 53.61   | 1997 | 63.78   |
| 1968 | 79.46   | 1978 | 135.50  | 1988 | 112.03  | 1998 | 64.66   |
| 1969 | 104.28  | 1979 | 78.64   | 1989 | 72.15   | 1999 | 130.26  |
| 1970 | 108.64  | 1980 | 94.24   | 1990 | 204.79  |      |         |

De esta serie se obtienen sus estadísticos muestrales, que a continuación se presentan:

Media 94.3670  
 Varianza 1334.2417  
 Des. Est. 36.5272  
 coef. Var. 0.3870

Se calcularon los parámetros de la función de distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) por momentos con las ecuaciones (17) y (18). A continuación se presenta el proceso de cálculo:

$$\hat{\mu} = \bar{x} - .45S$$

$$\hat{\mu} = 94.36 - .45(36.52)$$

$$\hat{\mu} = 77.93$$

$$\hat{\alpha} = .78S$$

$$\hat{\alpha} = .78(36.52)$$

$$\hat{\alpha} = 28.49$$

Con estos parámetros se va a la ecuación (19) y se obtienen las precipitaciones areales

$(\bar{P}'_i)_T$ , asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años

En la tabla 5, se presentan los valores de precipitación areal  $(\bar{P}'_i)_T$ , para los diferentes periodos de retorno:

Tabla 5: Precipitaciones areales asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

| Tr (Años) | $(\bar{P}'_i)_T$ |
|-----------|------------------|
| 2         | 88.37            |
| 5         | 120.66           |
| 10        | 142.05           |
| 20        | 162.55           |
| 50        | 189.10           |
| 100       | 208.99           |

De la base de datos de datos diarios de precipitación en 24 horas  $(P'_{ij})$ , se obtuvieron los máximos anuales de todas las estaciones y se les calcularon sus estadísticos muestrales. En las tablas 6, 7 y 8, se presentan estos valores.

Tabla 6: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas  $(P_j^t)_T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones.

| Año  | 13021 | 13048 | 24002 | 24003 | 24005 | 24014 | 24016 | 24025 | 24026 | 24027 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1961 | 140   | 170.8 | 150   | 87    | 73    | 112   | 150   | 89.3  | 110.5 | 189.2 |
| 1962 | 200   | 87    | 149.1 | 137   | 115   | 117   | 131.5 | 56.5  | 100   | 86.3  |
| 1963 | 110   | 154.5 | 125.5 | 86    | 178.7 | 112   | 127.5 | 129   | 167.2 | 92    |
| 1964 | 220   | 102.2 | 108   | 87    | 83.6  | 102.5 | 183   | 121.5 | 212.3 | 149.5 |
| 1965 | 110   | 152   | 98    | 137   | 114.5 | 93    | 87    | 82.6  | 654   |       |
| 1966 | 150   | 132   | 246   | 230   | 167.5 | 141   | 215.5 | 120.7 | 198.8 | 162.5 |
| 1967 | 170   | 202   | 132   | 186.5 | 97    | 182   | 203.5 | 120   | 215.1 | 138   |
| 1968 | 100   | 150.8 |       | 126.8 | 114.6 | 137   |       | 97.8  | 160.5 | 102.5 |
| 1969 | 160   | 271   | 140   | 216   |       | 126   | 187.5 |       | 113.6 | 121   |
| 1970 | 240   | 143   | 160   | 231.2 | 121.4 | 112   | 254   | 96.1  | 173.3 | 186.5 |
| 1971 |       | 172.5 | 200   | 201   | 145.5 | 143   | 102   | 92.1  | 143.7 | 70.5  |
| 1972 |       | 148.5 |       | 152.5 | 94.5  | 87    | 130   | 94.5  | 98.5  | 94    |
| 1973 | 180   | 142.8 | 123.5 | 152   | 226.6 | 121.5 | 164   | 133.6 | 91.7  | 116.5 |
| 1974 | 180   | 340   | 160   | 209   | 185   | 160   | 280   | 304   | 200.3 | 138   |
| 1975 | 80    | 224.5 | 114   | 350   | 117.5 | 100   | 147   | 99.3  | 177.4 | 143   |
| 1976 | 140   | 122.5 | 154   | 161.1 | 166.7 | 234   | 170   | 157.5 | 197.5 | 124.5 |
| 1977 | 80    | 63.3  | 120   |       | 125   | 165   | 193   | 177.2 | 90.8  | 334   |
| 1978 | 288   | 256.5 | 152   | 275   | 169.3 | 121   | 85    | 143.7 | 179.9 | 104   |
| 1979 | 80    | 232   | 95    | 148   | 95    | 103.5 |       | 58.7  | 194.4 | 94    |
| 1980 | 73    | 200   | 117.3 | 134   | 143   | 87    | 87    | 194   | 142.4 | 93    |
| 1981 | 100   | 300   | 120.4 | 235.5 | 145.5 | 76    | 150   | 91    | 167.9 | 101.1 |
| 1982 | 70    | 29.5  | 80    | 97    | 90    | 95    | 97    | 113   | 156.4 | 120   |
| 1983 | 60    | 117.2 | 117   | 157   | 118   | 130   | 120   | 105   | 118.6 | 131.5 |
| 1984 | 60    | 180.4 | 110   | 155   | 107.7 | 116   | 64    | 139.6 | 93    | 130.5 |
| 1985 | 90    | 126.5 | 120   | 135   | 132   | 130   | 90    | 96    | 152.1 | 76.5  |
| 1986 | 160   | 89.5  | 100   | 123   | 121   | 82    | 175   | 77.5  | 96.9  | 118   |
| 1987 | 144   | 80    |       | 120   | 60    | 99    | 100   | 94.4  | 131.1 | 89    |
| 1988 | 80    | 90    | 240.5 | 326   | 104   | 120   | 140   | 126   | 237   | 94    |
| 1989 | 100   | 86    | 100   | 224   | 86.7  | 82    | 90    | 171.1 | 122.9 | 119.5 |
| 1990 | 411   | 96    | 200.9 | 100   | 72    | 186   | 140   | 332.2 | 297   | 116.5 |
| 1991 | 229.2 | 180   | 271   | 320   | 250   | 208   | 168   | 232   | 246   | 160   |
| 1992 | 182.5 | 67.3  | 401   | 137   | 138.7 | 90    | 194   | 101.3 | 148.6 | 100   |
| 1993 | 241   | 106.5 | 109   | 370   | 340   | 266   | 80    | 209.8 | 420.1 | 186   |
| 1994 | 95    | 203   | 88    | 112   | 108   | 120   | 85    | 111.8 | 88.2  | 60    |
| 1995 | 148.5 | 193   | 123   | 142   | 113.5 | 127.5 | 138   |       | 173   | 180   |
| 1996 | 100.5 | 175   | 126   | 103   | 97.2  | 318   | 138   | 175.5 | 156.3 | 290.5 |
| 1997 | 287.5 | 107   | 180.5 | 200   | 91.3  | 113   | 84    | 223.2 | 160.2 |       |
| 1998 | 165.5 | 124   | 110   | 130   | 95.1  | 113   |       | 84    | 132   | 59    |

|                  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>1999</b>      | 160            | 255            | 229            | 190            | 169.3          | 120            | 56             | 112.5          | 108.6          |                |
| <b>Media</b>     | <b>150.965</b> | <b>155.738</b> | <b>149.186</b> | <b>175.884</b> | <b>130.879</b> | <b>132.000</b> | <b>139.069</b> | <b>134.162</b> | <b>175.072</b> | <b>129.753</b> |
| <b>Varianza</b>  | <b>5778.5</b>  | <b>4773.7</b>  | <b>4079.6</b>  | <b>5538.3</b>  | <b>2902.4</b>  | <b>2631.9</b>  | <b>2792.2</b>  | <b>3855.3</b>  | <b>10283.7</b> | <b>3227.8</b>  |
| <b>Des. Est.</b> | <b>76.017</b>  | <b>69.093</b>  | <b>63.872</b>  | <b>74.420</b>  | <b>53.874</b>  | <b>51.303</b>  | <b>52.841</b>  | <b>62.091</b>  | <b>101.409</b> | <b>56.814</b>  |
| <b>coef. Var</b> | <b>0.504</b>   | <b>0.444</b>   | <b>0.428</b>   | <b>0.423</b>   | <b>0.412</b>   | <b>0.389</b>   | <b>0.380</b>   | <b>0.463</b>   | <b>0.579</b>   | <b>0.438</b>   |

Tabla 7: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas  $(P'_j)_T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones.

| <b>Año</b> | <b>24031</b> | <b>24043</b> | <b>24053</b> | <b>24072</b> | <b>24082</b> | <b>24084</b> | <b>24086</b> | <b>24088</b> | <b>24090</b> | <b>24091</b> |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1961       | 125          | 149          | 115          | 96           |              | 93.5         | 85           |              | 87.2         | 128.1        |
| 1962       | 55           | 100.5        | 114          | 99           |              | 113          | 120.2        | 80           | 123.3        | 95.1         |
| 1963       | 160          | 124          | 120          | 134          |              | 268.4        | 87           |              | 85.5         | 153.9        |
| 1964       | 286.5        |              |              | 100          |              | 195          |              |              |              |              |
| 1965       | 111          | 123          | 186          | 145          |              | 97.5         | 72.8         | 97           | 74.7         | 81.1         |
| 1966       | 149.5        | 300          |              | 152.5        | 260          | 176.1        | 174          | 88           | 180          | 128.6        |
| 1967       | 200          | 96.2         |              | 185.5        | 186.3        | 143          | 286.7        | 137          | 318.8        | 374.9        |
| 1968       | 134          | 125          | 150.5        | 200.2        |              | 118.2        | 115          | 100          |              | 151.6        |
| 1969       | 133          |              | 120          |              | 237          | 131          | 200          | 120          | 190.4        | 110.5        |
| 1970       | 124          | 86.3         | 362          | 140          | 226.4        | 175          | 119.5        | 196          | 180          | 197.5        |
| 1971       | 212.5        | 106.6        | 159.3        | 240          | 181.1        | 209.5        | 92.2         | 113          | 142.2        | 145          |
| 1972       | 153.5        | 88.5         | 121.3        | 171          | 196.1        | 105.7        | 217.5        | 100.5        | 190.5        | 144.9        |
| 1973       | 150          | 157.2        | 165.3        | 160          | 165.6        | 121.5        | 158.9        | 121          | 199          | 155.4        |
| 1974       | 237.5        | 160          | 203.3        | 220          | 268          | 242.2        | 332          | 284          | 292.5        | 321.5        |
| 1975       | 236          | 203.5        | 336.2        | 240          | 330          | 231.2        | 206.3        | 120          | 314.4        | 159.3        |
| 1976       | 220          | 160          | 246.2        | 140          | 186.2        | 200.2        | 134.3        | 140          | 166.2        | 166.8        |
| 1977       | 129.5        | 230.4        | 126.2        | 130          | 126.2        | 82           | 80           | 126          | 79.9         | 69.9         |
| 1978       | 136.5        | 60.8         | 248.2        | 120          | 147.9        |              | 218.8        | 160          | 236.3        |              |
| 1979       | 114          | 88.2         | 163.2        | 100          | 200          | 163.2        | 113.4        | 77.5         | 130          | 126.4        |
| 1980       | 210.5        | 57.2         | 163.2        | 128          | 250.1        | 180.5        | 157.1        | 117          | 151.5        | 131.4        |
| 1981       | 116          | 83.4         | 222.2        | 180          | 257.5        | 160.6        | 223          | 121          | 265.5        | 227.6        |
| 1982       | 71.5         | 180.3        | 122.2        | 105          | 120          | 124          | 73.2         | 91.5         | 59.3         | 120.1        |
| 1983       | 134          | 132.7        | 145.2        | 150          | 94.5         | 132.3        | 136.5        | 125          | 107          | 137.7        |
| 1984       | 103.5        | 83           | 161.2        | 135          | 180          | 198.2        | 151.1        | 110          | 151          | 284.5        |
| 1985       | 124.5        | 103.8        | 161.3        | 120          | 158          |              | 79.1         | 153          | 110          | 123.6        |
| 1986       | 113.5        | 91.7         | 118.3        | 160          | 103          |              | 108.4        | 81           | 89.6         | 99.4         |
| 1987       | 164          | 141.2        | 71.3         | 76           | 154          | 123.6        | 88           | 61.5         | 68.1         | 107.5        |
| 1988       | 113.5        | 174.5        | 99.3         | 180          | 325.5        |              | 259.4        | 108          | 394.9        | 104          |
| 1989       | 62           | 78.3         | 212.2        | 118.5        | 149          | 142          | 139.5        | 260          | 198.6        | 106          |
| 1990       | 440.7        | 54.4         | 89.3         | 93           |              | 411.4        | 421          | 426          | 452          | 90.1         |
| 1991       | 311.1        | 210.2        |              | 360          | 328          | 320          | 443.7        | 200          | 419.3        |              |
| 1992       | 138.7        | 110.4        |              | 115          | 184          | 110.6        | 111.5        | 152          | 140.6        |              |

|                  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>1993</b>      |                | 194            |                | 340            | 327            | 392.7          |                | 306            | 441.8          |                |
| <b>1994</b>      | 94.3           | 100            |                | 98             | 114            |                |                |                | 157.6          | 145.7          |
| <b>1995</b>      |                | 166.6          | 170            | 120            | 186            |                |                | 155            | 108            | 145.6          |
| <b>1996</b>      | 193            | 328.6          |                | 140            | 194            | 98.1           |                | 108            | 114.7          | 109.5          |
| <b>1997</b>      | 114.2          |                | 98.4           | 100.5          | 273            | 83             |                | 40             | 88.8           | 133.6          |
| <b>1998</b>      | 120.4          | 81.2           | 98.4           | 152            | 284.6          | 161            |                | 92             | 213.3          | 218.9          |
| <b>1999</b>      | 217.4          |                | 114.2          | 327.5          |                | 137.7          |                | 168            | 317.3          | 193            |
| <b>Media</b>     | <b>159.738</b> | <b>135.163</b> | <b>160.755</b> | <b>157.150</b> | <b>206.226</b> | <b>170.967</b> | <b>167.906</b> | <b>141.000</b> | <b>190.265</b> | <b>152.609</b> |
| <b>Varianza</b>  | <b>5632.6</b>  | <b>4089.0</b>  | <b>4534.4</b>  | <b>4597.9</b>  | <b>4811.7</b>  | <b>6580.1</b>  | <b>9327.7</b>  | <b>5840.8</b>  | <b>12121.3</b> | <b>4438.3</b>  |
| <b>Des. Est.</b> | <b>75.051</b>  | <b>63.946</b>  | <b>67.339</b>  | <b>67.808</b>  | <b>69.367</b>  | <b>81.118</b>  | <b>96.580</b>  | <b>76.425</b>  | <b>110.097</b> | <b>66.621</b>  |
| <b>coef. Var</b> | <b>0.470</b>   | <b>0.473</b>   | <b>0.419</b>   | <b>0.431</b>   | <b>0.336</b>   | <b>0.474</b>   | <b>0.575</b>   | <b>0.542</b>   | <b>0.579</b>   | <b>0.437</b>   |

Tabla 8: Precipitaciones máximas puntuales en 24 horas  $(P'_j)_T$ , y estadísticos muestrales, de 10 estaciones.

| <b>Año</b>  | <b>24092</b> | <b>24105</b> | <b>28002</b> | <b>28008</b> | <b>28012</b> | <b>28023</b> | <b>28043</b> | <b>28049</b> | <b>30041</b> | <b>30098</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>1961</b> | 117.5        |              | 126          | 85           |              |              | 80           | 90.6         | 80.7         |              |
| <b>1962</b> | 80           |              | 226.4        | 115.5        | 91.5         |              | 152          | 112.6        | 113.4        |              |
| <b>1963</b> | 120.4        |              | 70.5         | 122          | 85.5         |              | 89           | 67           |              | 154.2        |
| <b>1964</b> |              |              |              | 81           | 81.5         |              | 100          | 96.5         | 148          |              |
| <b>1965</b> | 111          | 159          |              |              | 112.5        | 101.5        | 81.5         | 82.5         | 80           | 81           |
| <b>1966</b> | 181.7        | 207.4        | 174          | 109.5        | 156.5        | 150          | 103.5        | 126          | 126          | 103          |
| <b>1967</b> |              | 224.5        | 153.2        | 95           |              | 162          | 130          | 106.5        | 190          | 104.5        |
| <b>1968</b> | 160.5        | 224.7        | 200.3        | 159          | 72           | 154          | 209          | 191.5        | 89           | 69.7         |
| <b>1969</b> |              | 340          | 173.5        |              | 87           | 104          | 107          | 85.1         | 108          | 89.2         |
| <b>1970</b> | 154          | 193.5        | 198.8        | 190          | 155.5        | 165          | 205.5        | 185.5        | 111.5        | 96.4         |
| <b>1971</b> | 186          | 184          | 158.4        | 147.7        | 107          | 147.5        |              | 150.8        | 126          | 63.5         |
| <b>1972</b> | 127.3        | 128          | 367.7        | 113          | 76.5         | 147.5        | 111          | 181.5        | 106          | 141.7        |
| <b>1973</b> | 121.4        | 147          | 113.5        | 147          | 150          | 134.5        | 138.5        | 118.5        | 105          | 135.8        |
| <b>1974</b> | 265          | 299          | 106.5        | 163          | 165          | 131          | 138          | 146          | 160          | 153          |
| <b>1975</b> | 182.6        |              | 140.2        | 166.5        | 152          | 171          | 140          | 198          | 158.5        | 187.3        |
| <b>1976</b> | 118          | 200          | 222          | 216.5        | 152          | 274          | 180          | 147          | 208.5        | 101.5        |
| <b>1977</b> | 91.9         | 103          | 152.5        | 147          | 120.5        | 130          | 144.5        | 188          | 84.5         | 202.5        |
| <b>1978</b> | 284.5        | 420          | 134.2        | 156          | 202          | 128          | 110.5        | 141.5        | 85           | 120.3        |
| <b>1979</b> | 90.8         | 226          | 141.8        | 122          | 163          | 112.5        | 147          | 144          | 100.5        | 114.5        |
| <b>1980</b> | 136.3        | 220          | 115.4        | 114          | 92           | 89.5         | 70           | 98           | 95           | 83.2         |
| <b>1981</b> | 164          | 180          | 95.4         | 106          | 96           | 76           | 82           | 130.5        | 200.2        | 181.5        |
| <b>1982</b> | 63.5         | 160          | 130          | 145          | 122.5        | 102          | 81.4         | 132.5        | 65           | 59.1         |
| <b>1983</b> | 162.5        | 232          | 130.8        | 74           | 60.5         | 96.5         | 101          | 77.5         | 155          | 105.8        |
| <b>1984</b> | 223          | 140          | 159          | 101.5        | 92           | 78           | 114          | 82.5         | 180          | 216.8        |
| <b>1985</b> | 104.5        | 137          |              |              | 93           | 136.5        | 97           | 152          | 180          |              |
| <b>1986</b> | 78.5         | 126.7        | 136.7        | 209          | 75.5         |              |              | 93.2         | 180          |              |

|                  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1987             | 105.4          | 200            | 220            | 173.5          | 130.5          | 120            |                | 179            | 135            |                |
| 1988             | 126.5          | 280            | 81.5           | 107            | 85.5           | 75             |                | 92             | 263            |                |
| 1989             | 153.5          | 184            | 151.2          | 158            | 208            | 140            | 116            | 196.5          | 77             |                |
| 1990             | 371.2          | 138            | 63.9           | 87             | 95             | 43             | 95             | 83.7           | 320            |                |
| 1991             | 136.5          | 200            | 124.5          | 164            | 118            | 133            |                | 137.3          | 170            |                |
| 1992             | 193.7          | 182            | 154            | 136            | 117.5          | 140            |                | 178.3          | 160            | 90.2           |
| 1993             | 348.5          | 330            | 210.6          | 152            | 151            |                | 84             | 190.5          | 122            | 257.5          |
| 1994             | 133.8          | 148            | 195            | 159            | 166            | 130.6          | 69             |                | 89             | 160.6          |
| 1995             | 121.2          | 222            | 101            | 97             | 52             | 140.1          | 140            |                | 115            | 72.9           |
| 1996             | 94.5           | 113            | 136.3          | 87             | 79             | 180.5          | 249.5          |                | 100            | 129.8          |
| 1997             | 65.5           | 187            | 241.7          | 193.5          | 117            | 140.1          | 230            | 220            | 161.5          |                |
| 1998             |                | 163            | 111.2          | 112            |                | 140.8          | 175            |                | 100.8          |                |
| 1999             |                | 136            | 187            |                |                | 180.7          | 115            | 288.2          | 165            | 153.8          |
| <b>Media</b>     | <b>152.212</b> | <b>198.082</b> | <b>155.686</b> | <b>134.606</b> | <b>116.600</b> | <b>131.964</b> | <b>126.845</b> | <b>139.737</b> | <b>137.213</b> | <b>127.011</b> |
| <b>Varianza</b>  | <b>5365.2</b>  | <b>4832.7</b>  | <b>3324.5</b>  | <b>1411.1</b>  | <b>1535.2</b>  | <b>1671.8</b>  | <b>2158.6</b>  | <b>2496.3</b>  | <b>2899.9</b>  | <b>2536.7</b>  |
| <b>Des. Est.</b> | <b>73.248</b>  | <b>69.518</b>  | <b>57.659</b>  | <b>37.565</b>  | <b>39.183</b>  | <b>40.889</b>  | <b>46.462</b>  | <b>49.963</b>  | <b>53.851</b>  | <b>50.366</b>  |
| <b>coef. Var</b> | <b>0.481</b>   | <b>0.351</b>   | <b>0.370</b>   | <b>0.279</b>   | <b>0.336</b>   | <b>0.310</b>   | <b>0.366</b>   | <b>0.358</b>   | <b>0.392</b>   | <b>0.397</b>   |

A estas series de lluvias máximas en 24 horas, se les ajustó la función de distribución de valores extremos tipo I (Gumbel), para obtener la precipitación puntual máxima en 24 horas asociados a los periodos de retorno requeridos para el estudio, en la tabla 9, se presentan estos eventos.

Tabla 9: Precipitación en 24 horas, asociada a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100.

| Estaciones | Tr (años) |        |        |        |        |        |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | 2         | 5      | 10     | 20     | 50     | 100    |
| 13021      | 138.49    | 205.69 | 250.19 | 292.87 | 348.12 | 389.52 |
| 13048      | 144.40    | 205.48 | 245.92 | 284.72 | 334.93 | 372.56 |
| 24002      | 138.70    | 195.17 | 232.56 | 268.42 | 314.84 | 349.62 |
| 24003      | 163.67    | 229.46 | 273.02 | 314.81 | 368.89 | 409.42 |
| 24005      | 122.04    | 169.67 | 201.20 | 231.45 | 270.60 | 299.94 |
| 24014      | 123.58    | 168.94 | 198.96 | 227.77 | 265.05 | 292.99 |
| 24016      | 130.40    | 177.11 | 208.04 | 237.71 | 276.11 | 304.89 |
| 24025      | 123.97    | 178.87 | 215.21 | 250.07 | 295.20 | 329.01 |
| 24026      | 158.43    | 248.08 | 307.44 | 364.38 | 438.08 | 493.30 |
| 24027      | 120.43    | 170.66 | 203.91 | 235.81 | 277.10 | 308.04 |
| 24031      | 147.42    | 213.77 | 257.70 | 299.84 | 354.38 | 395.26 |
| 24043      | 124.67    | 181.20 | 218.63 | 254.53 | 301.01 | 335.83 |
| 24053      | 149.70    | 209.24 | 248.65 | 286.46 | 335.40 | 372.07 |

|              |        |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>24072</b> | 146.02 | 205.97 | 245.66 | 283.73 | 333.01 | 369.94 |
| <b>24082</b> | 194.84 | 256.17 | 296.77 | 335.72 | 386.13 | 423.91 |
| <b>24084</b> | 157.65 | 229.37 | 276.85 | 322.39 | 381.35 | 425.53 |
| <b>24086</b> | 152.06 | 237.44 | 293.97 | 348.20 | 418.39 | 470.99 |
| <b>24088</b> | 128.46 | 196.02 | 240.76 | 283.67 | 339.21 | 380.83 |
| <b>24090</b> | 172.20 | 269.53 | 333.97 | 395.79 | 475.80 | 535.76 |
| <b>24091</b> | 141.67 | 200.57 | 239.57 | 276.97 | 325.39 | 361.67 |
| <b>24092</b> | 140.19 | 204.95 | 247.82 | 288.95 | 342.18 | 382.07 |
| <b>24105</b> | 186.67 | 248.13 | 288.82 | 327.85 | 378.38 | 416.24 |
| <b>28002</b> | 146.22 | 197.20 | 230.95 | 263.32 | 305.22 | 336.63 |
| <b>28008</b> | 128.44 | 161.65 | 183.64 | 204.73 | 232.03 | 252.49 |
| <b>28012</b> | 110.17 | 144.81 | 167.74 | 189.74 | 218.22 | 239.56 |
| <b>28023</b> | 125.25 | 161.40 | 185.34 | 208.29 | 238.01 | 260.28 |
| <b>28043</b> | 119.22 | 160.30 | 187.49 | 213.58 | 247.34 | 272.65 |
| <b>28049</b> | 131.54 | 175.71 | 204.95 | 233.01 | 269.32 | 296.53 |
| <b>30041</b> | 128.38 | 175.98 | 207.50 | 237.74 | 276.88 | 306.21 |
| <b>30098</b> | 118.75 | 163.27 | 192.75 | 221.03 | 257.64 | 285.07 |

En la tabla 10, se presentan los valores de los factores de peso para cada estación.

Tabla 10: Factores de peso para cada estación.

| Estación | $w_i$  | Estación | $w_i$  | Estación | $w_i$  |
|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| 13021    | 0.0580 | 24031    | 0.0476 | 24092    | 0.0325 |
| 13048    | 0.0573 | 24043    | 0.0682 | 24105    | 0.0287 |
| 24002    | 0.0155 | 24053    | 0.0196 | 28002    | 0.0255 |
| 24003    | 0.0049 | 24072    | 0.0117 | 28008    | 0.0193 |
| 24005    | 0.0109 | 24082    | 0.0038 | 28012    | 0.0545 |
| 24014    | 0.0528 | 24084    | 0.0256 | 28023    | 0.0203 |
| 24016    | 0.0646 | 24086    | 0.0371 | 28043    | 0.0244 |
| 24025    | 0.0403 | 24088    | 0.0136 | 28049    | 0.0084 |
| 24026    | 0.0417 | 24090    | 0.0177 | 30041    | 0.0512 |
| 24027    | 0.0348 | 24091    | 0.0327 | 30098    | 0.0769 |

Con los valores de las tablas 9 y 10 se calculo el valor de la precipitación areal de máximos puntuales correspondientes para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, con ayuda de la ecuación (4). Tabla 11.

Tabla 11: Precipitación areal, calculada con los máximos puntuales.

| Tr (Años) | $(\bar{P}'_i)_T$ |
|-----------|------------------|
| 2         | 140.45           |
| 5         | 198.06           |
| 10        | 236.20           |
| 20        | 272.79           |
| 50        | 320.14           |
| 100       | 355.63           |

Finalmente se calculo el FRA, para el área total de la zona en estudio, que resulta del promedio de los cocientes  $(\bar{P}'_i)_T$  y  $(\bar{P}'_j)_T$  ecuación (5). La Tabla 12 resume los valores calculados anteriormente y al final se obtiene el valor buscado.

Tabla 12: Cálculo del FRA por el método de Análisis de Frecuencia.

| T (años)           | $(\bar{P}'_i)_T$ | $(\bar{P}'_j)_T$ | $FRA = (\bar{P}'_i)_T / (\bar{P}'_j)_T$ | $FRA_T$     |
|--------------------|------------------|------------------|---|-------------|
| 2                  | 88.37            | 140.45           | $88.37 / 140.45 =$                      | 0.63        |
| 5                  | 120.66           | 198.06           | $120.66 / 198.06 =$                     | 0.61        |
| 10                 | 142.05           | 236.20           | $142.05 / 236.20 =$                     | 0.60        |
| 20                 | 162.55           | 272.79           | $162.55 / 272.79 =$                     | 0.60        |
| 50                 | 189.10           | 320.14           | $189.10 / 320.14 =$                     | 0.59        |
| 100                | 208.99           | 355.63           | $208.99 / 355.63 =$                     | 0.59        |
| Promedio = $FRA =$ |                  |                  |   | <b>0.60</b> |

$$FRA_{AFrec} = 0.60$$

Este procedimiento fue realizado para 7 diferentes áreas, para poder definir la tendencia del Factor de Reducción por Área en la zona. El área 1 está definida por el área de influencia de todas las estaciones (Figura 8), el área 2 está formada por el área de influencia de las estaciones 24014, 24016, 24025, 24027, 24031, 24043, 24086, 24088, 24090, 28002, 28008, 28012, 28023, 28043, 28049; el área 3 por las estaciones 13021, 13048, 24002, 24072, 24084, 24092, 30041, en figura 9 se presenta el área 2 y 3, 30098; el área 4 por las estaciones 13021, 24026, 30041, 30098; el área 5 por las estaciones 24014, 24025, 24031, 24043, 24086, 24088, 24090; el área 6 por las estaciones 24016, 24027, 28008, 28012, 28023, 28043, 28049; y por último el área 7 por las estaciones 24005, 24053, 24072, 24084, en la figura 10 se presentan la distribución en la zona de estudio de las áreas 4, 5, 6 y 7.

Además del cálculo de los FRA por el método de análisis de frecuencias que es el método central de este estudio, se realizó la estimación de los FRA para la misma zona por el método de BELL (1976). Utilizando las precipitaciones máximas areales calculadas para el método de análisis de frecuencias (tabla 4) y las precipitaciones máximas para cada estación se presentan en las tablas 6, 7 y 8, y de estos registros se calculo la media área, obteniendo un solo registro tabla 13.

Tabla 13: Media areal de máximos puntuales.

| Año  | Promedio | Año  | Promedio | Año  | Promedio | Año  | Promedio |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| 1961 | 113.77   | 1971 | 147.95   | 1981 | 155.19   | 1991 | 232.30   |
| 1962 | 114.27   | 1972 | 138.90   | 1982 | 102.53   | 1992 | 147.22   |
| 1963 | 124.95   | 1973 | 143.91   | 1983 | 122.16   | 1993 | 247.04   |
| 1964 | 136.56   | 1974 | 214.79   | 1984 | 136.68   | 1994 | 121.26   |
| 1965 | 127.89   | 1975 | 187.09   | 1985 | 122.36   | 1995 | 138.04   |
| 1966 | 165.87   | 1976 | 173.57   | 1986 | 115.67   | 1996 | 153.17   |
| 1967 | 175.56   | 1977 | 134.23   | 1987 | 119.86   | 1997 | 151.33   |
| 1968 | 139.01   | 1978 | 174.46   | 1988 | 163.97   | 1998 | 134.88   |
| 1969 | 152.95   | 1979 | 128.92   | 1989 | 139.05   | 1999 | 178.31   |
| 1970 | 172.66   | 1980 | 131.02   | 1990 | 204.51   |      |          |

Con las series de las tablas 4 y 13 se calcula el FRA para cada año de registro de la siguiente manera tabla 14:

Tabla 14: Calculo del FRA por el método de Bell (1976).

| Año  | $\bar{P}'_i$ | $\bar{P}'_{ij}$ | $FRA_i = \bar{P}'_i / \bar{P}'_{ij}$ | Año  | $\bar{P}'_i$ | $\bar{P}'_{ij}$ | $FRA_i = \bar{P}'_i / \bar{P}'_{ij}$ |
|------|--------------|-----------------|--------------------------------------|------|--------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1961 | 72.88        | 113.77          | 0.64                                 | 1981 | 122.01       | 155.19          | 0.79                                 |
| 1962 | 57.61        | 114.27          | 0.50                                 | 1982 | 45.14        | 102.53          | 0.44                                 |
| 1963 | 74.81        | 124.95          | 0.60                                 | 1983 | 76.65        | 122.16          | 0.63                                 |
| 1964 | 64.99        | 136.56          | 0.48                                 | 1984 | 76.59        | 136.68          | 0.56                                 |
| 1965 | 59.44        | 127.89          | 0.46                                 | 1985 | 78.00        | 122.36          | 0.64                                 |
| 1966 | 104.17       | 165.87          | 0.63                                 | 1986 | 61.66        | 115.67          | 0.53                                 |
| 1967 | 97.93        | 175.56          | 0.56                                 | 1987 | 53.61        | 119.86          | 0.45                                 |
| 1968 | 79.46        | 139.01          | 0.57                                 | 1988 | 112.03       | 163.97          | 0.68                                 |
| 1969 | 104.28       | 152.95          | 0.68                                 | 1989 | 72.15        | 139.05          | 0.52                                 |
| 1970 | 108.64       | 172.66          | 0.63                                 | 1990 | 204.00       | 204.51          | 1.00                                 |
| 1971 | 68.78        | 147.95          | 0.46                                 | 1991 | 173.35       | 232.30          | 0.75                                 |
| 1972 | 70.95        | 138.90          | 0.51                                 | 1992 | 61.54        | 147.22          | 0.42                                 |
| 1973 | 93.20        | 143.91          | 0.65                                 | 1993 | 153.21       | 247.04          | 0.62                                 |
| 1974 | 167.43       | 214.79          | 0.78                                 | 1994 | 53.51        | 121.26          | 0.44                                 |

|      |        |        |      |      |        |        |      |
|------|--------|--------|------|------|--------|--------|------|
| 1975 | 127.70 | 187.09 | 0.68 | 1995 | 89.66  | 138.04 | 0.65 |
| 1976 | 98.88  | 173.57 | 0.57 | 1996 | 112.42 | 153.17 | 0.73 |
| 1977 | 115.78 | 134.23 | 0.86 | 1997 | 63.78  | 151.33 | 0.42 |
| 1978 | 135.50 | 174.46 | 0.78 | 1998 | 64.66  | 134.88 | 0.48 |
| 1979 | 78.64  | 128.92 | 0.61 | 1999 | 130.26 | 178.31 | 0.73 |
| 1980 | 94.24  | 131.02 | 0.72 |      |        |        |      |

El FRA buscado para la cuenca resulta ser el promedio de la serie de FRA anual.

$$FRA_{Bell} = 0.612$$

Este método al igual que el de análisis de frecuencias se aplicó para siete áreas diferentes para observar la tendencia del Factor al aumentar el área.

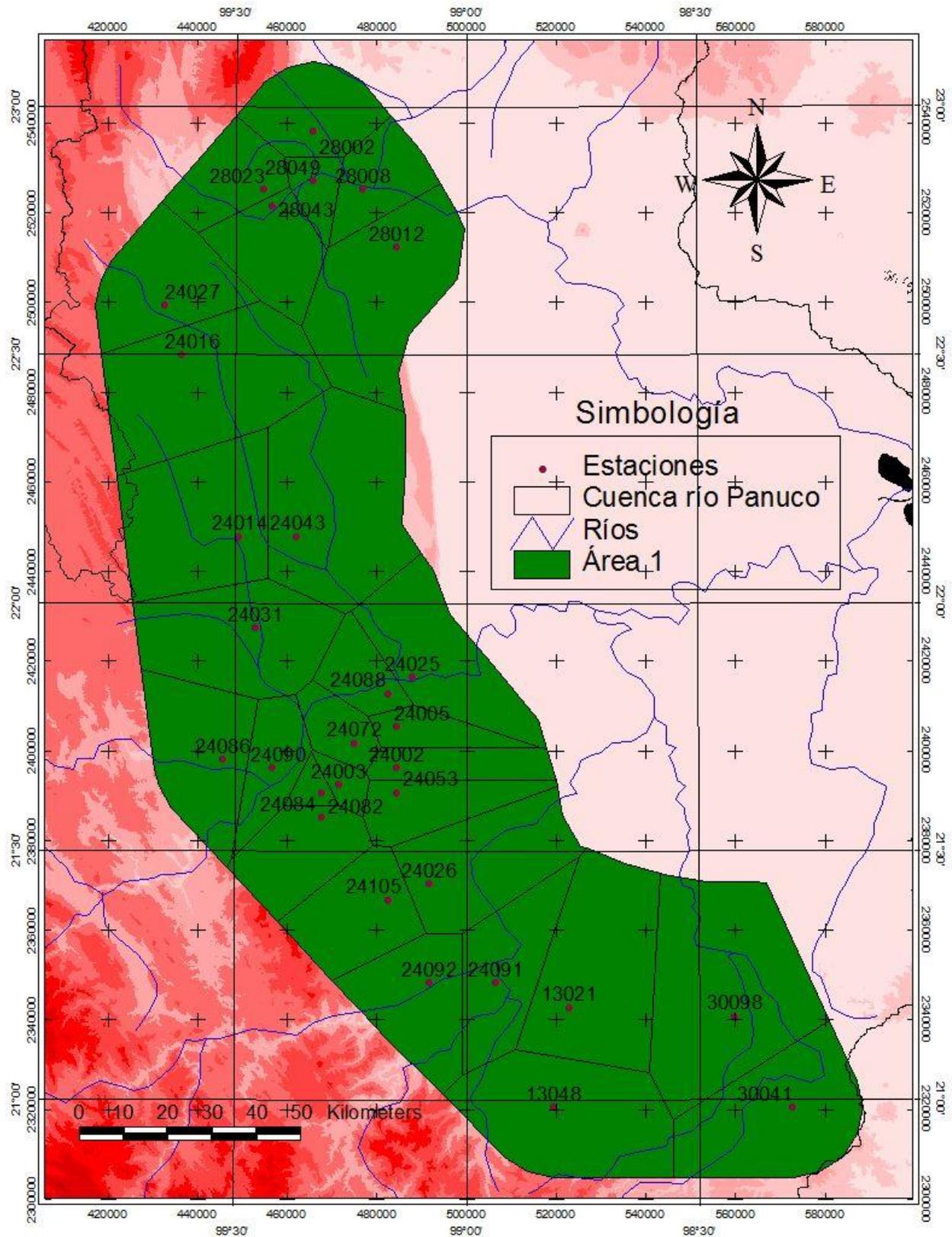


Figura 8: Área 1.

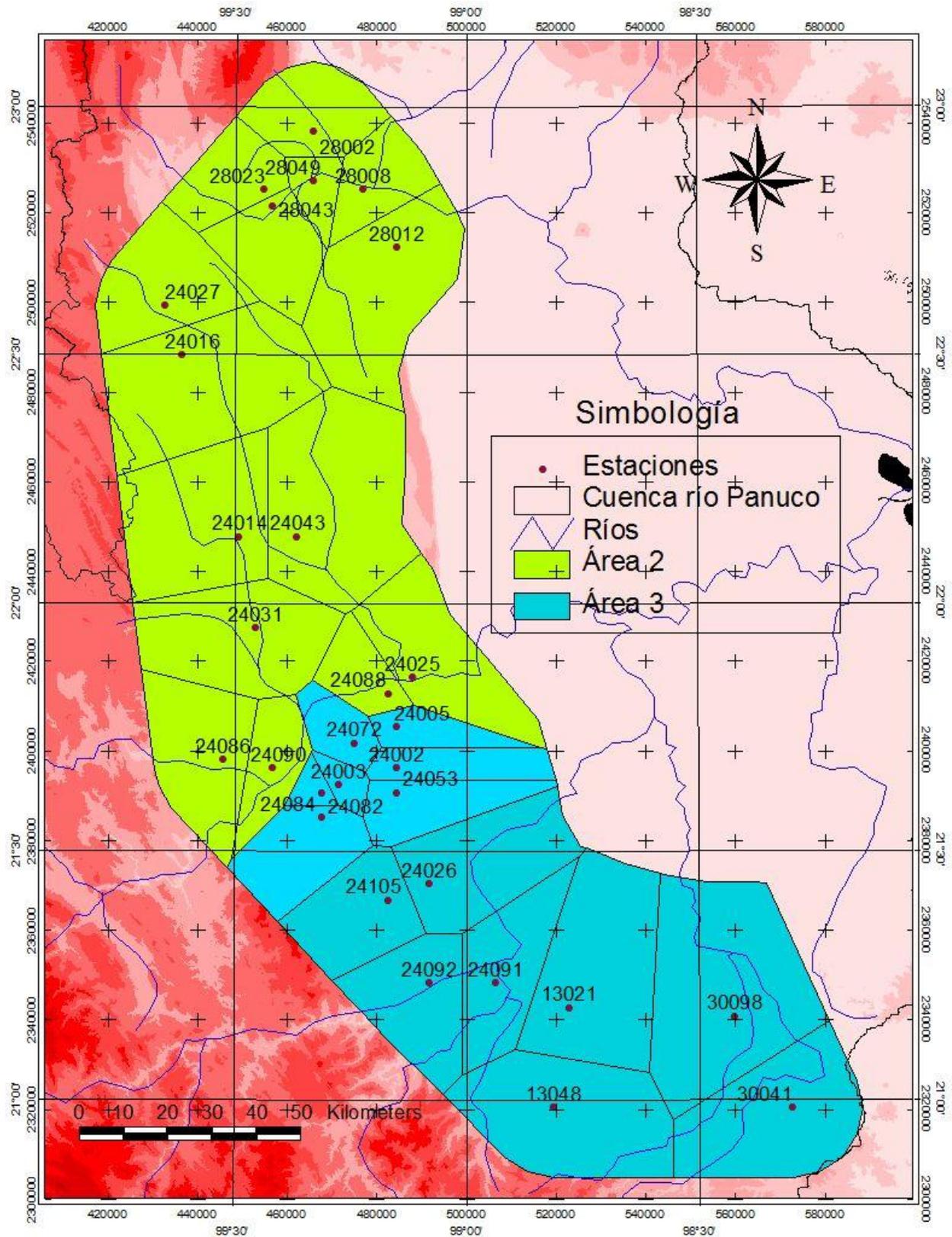


Figura 9: Área 2 y 3.

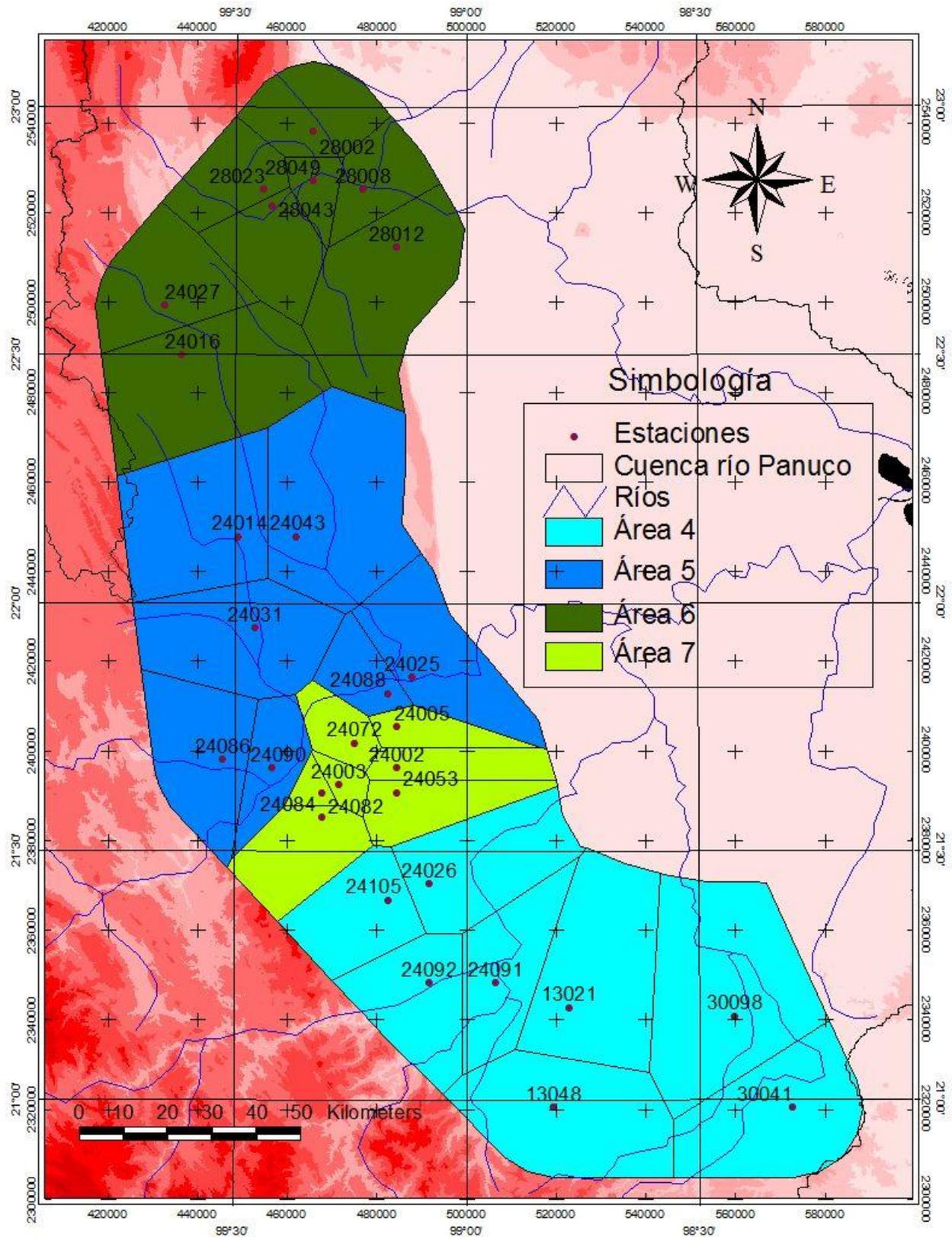


Figura 10: Áreas 4, 5, 6 y 7.

En la tabla 15 se presenta la superficie que ocupa cada una de estas áreas.

Tabla 15: áreas empleadas para el cálculo de los FRA, por el método de análisis de frecuencias.

| Área | Superficie (km <sup>2</sup> ) |
|------|-------------------------------|
| 1    | 17855.71                      |
| 2    | 9446.98                       |
| 3    | 8408.73                       |
| 4    | 6766.91                       |
| 5    | 4950.63                       |
| 6    | 4496.34                       |
| 7    | 1641.81                       |

## V. RESULTADOS

En este apartado se presentaran los valores estimados por los métodos de análisis de frecuencias y el método de Bell.

### 5.1. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

En la tabla 16 se presentan los FRA calculados para las áreas descritas, y para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años periodo de retorno.

Tabla 16: FRA para las diferentes áreas y periodos de retorno.

| Tr (Años)       | Área 1      | Área 2      | Área 3      | Área 4      | Área 5      | Área 6      | Área 7      |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2               | 0.65        | 0.67        | 0.72        | 0.75        | 0.76        | 0.79        | 0.89        |
| 5               | 0.63        | 0.64        | 0.67        | 0.71        | 0.77        | 0.75        | 0.88        |
| 10              | 0.62        | 0.63        | 0.65        | 0.70        | 0.77        | 0.73        | 0.87        |
| 20              | 0.61        | 0.62        | 0.64        | 0.69        | 0.77        | 0.72        | 0.87        |
| 50              | 0.61        | 0.61        | 0.63        | 0.68        | 0.77        | 0.70        | 0.87        |
| 100             | 0.60        | 0.61        | 0.62        | 0.67        | 0.77        | 0.70        | 0.86        |
| <b>Promedio</b> | <b>0.65</b> | <b>0.67</b> | <b>0.72</b> | <b>0.75</b> | <b>0.76</b> | <b>0.79</b> | <b>0.89</b> |

En las figuras 11, 12, 13 y 14 se presenta la tendencia de los FRA para la cuenca del rio Panuco, para periodos de retorno de 5, 50, 100 años y el promedio.

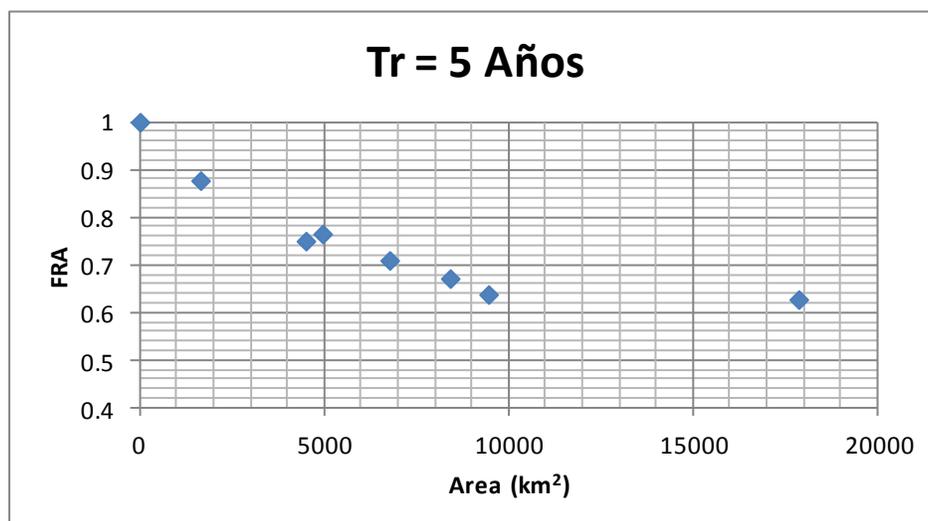


Figura 11: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 5 años.

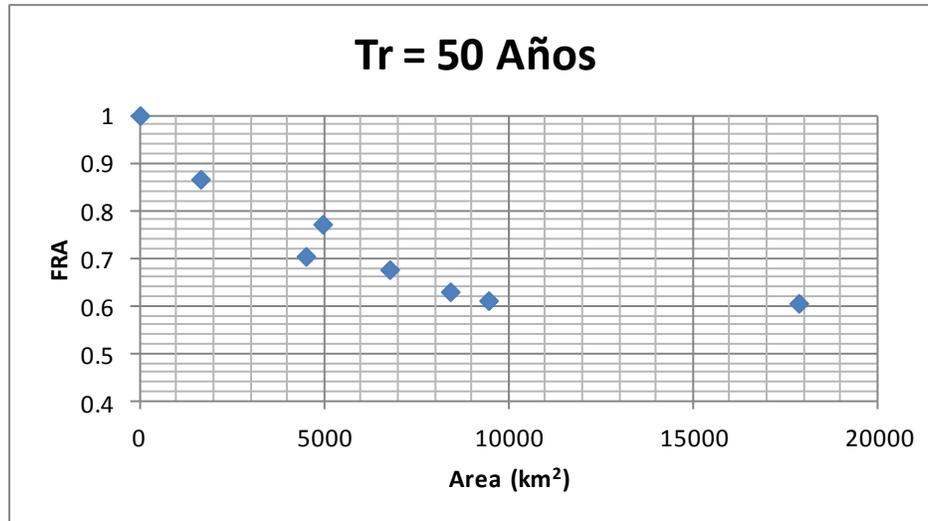


Figura 12: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 50 años.

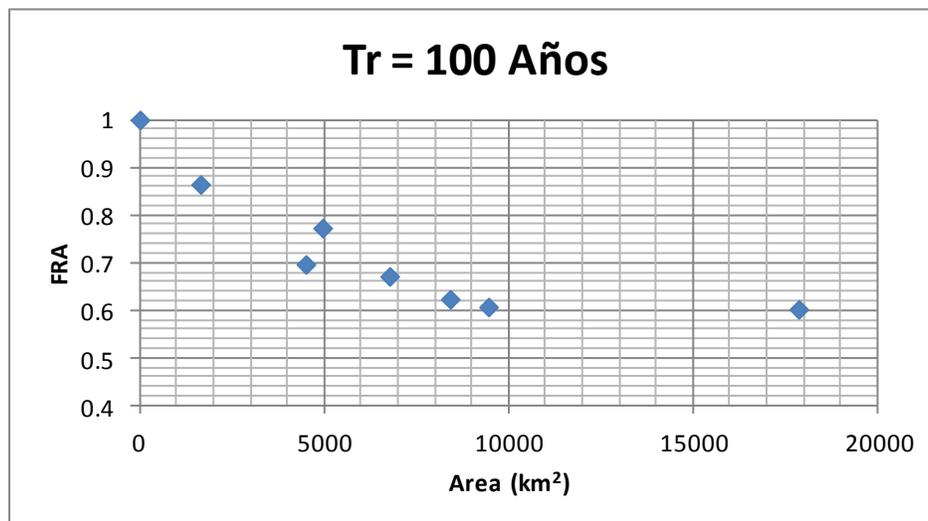


Figura 13: Factores de Reducción por Área para la zona en estudio para un Tr de 100 años.

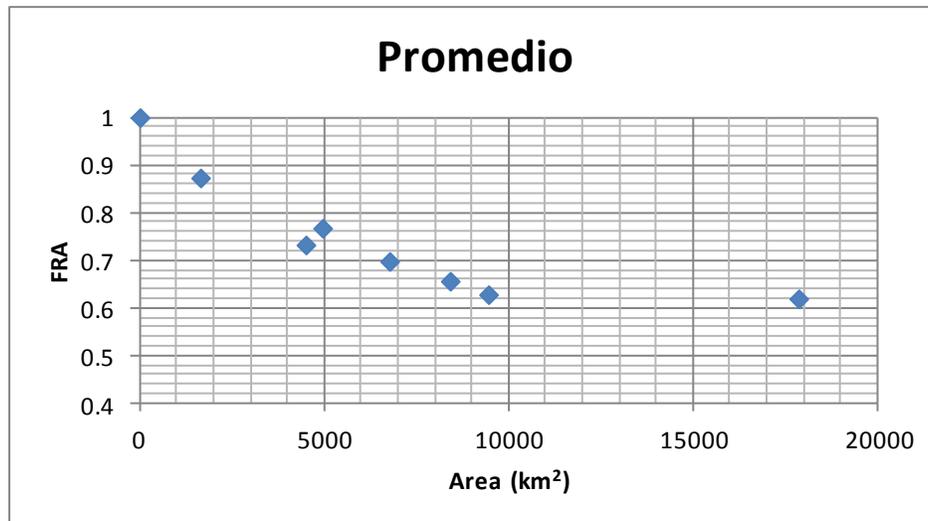


Figura 14: Promedio de Factores de Reducción por Área para la zona en estudio.

En la figura 15 se presentan la tendencia de los FRA, estimados para la cuenca del río Panuco, con respecto al área y su variación con el periodo de retorno.

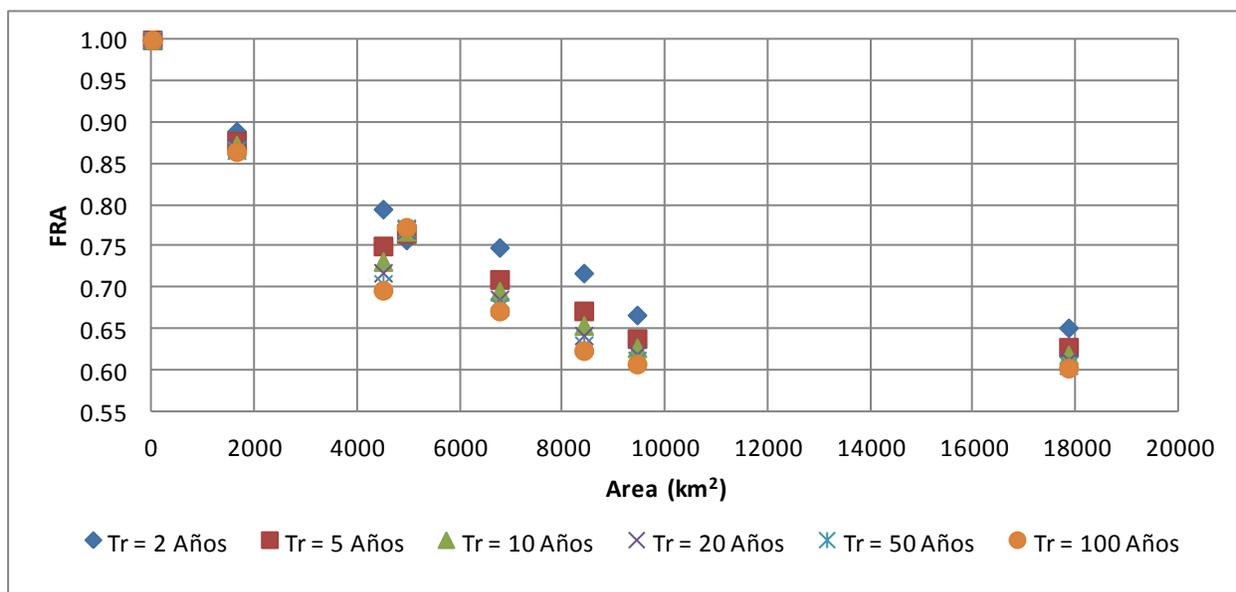


Figura 15: Variación del FRA con el periodo de retorno.

En base a los resultados y en relación a la opinión de diversos autores, algunos consideran que los FRA varían con el periodo el retorno y otros que opinan lo contrario. Podemos observar que en este caso existen diferencias pequeñas para periodos de

retorno de 2 a 10 años y disminuyen aun más conforme aumenta el periodo de retorno, para las diferentes áreas.

## 5.2. BELL (1976)

En la tabla 17 se presentan los FRA calculados para las áreas descritas, para este método Bell (1976) considera que no hay variación del factor con el periodo de retorno. En la tabla se presentan los valores calculados para cada área descrita en el apartado anterior.

Tabla 17: FRA obtenidos por el método de Bell.

|        | Área (km <sup>2</sup> ) | FRA <sub>BELL</sub> |
|--------|-------------------------|---------------------|
| Área 1 | 17855.7149              | 0.612               |
| Área 2 | 9446.98267              | 0.638               |
| Área 3 | 8408.73223              | 0.651               |
| Área 4 | 6766.91789              | 0.731               |
| Área 5 | 4950.63793              | 0.720               |
| Área 6 | 4496.34473              | 0.770               |
| 7      | 1641.81434              | 0.903               |

En la figura 16 se presenta la tendencia del FRABELL con respecto al área, para la cuenca del río Panuco.

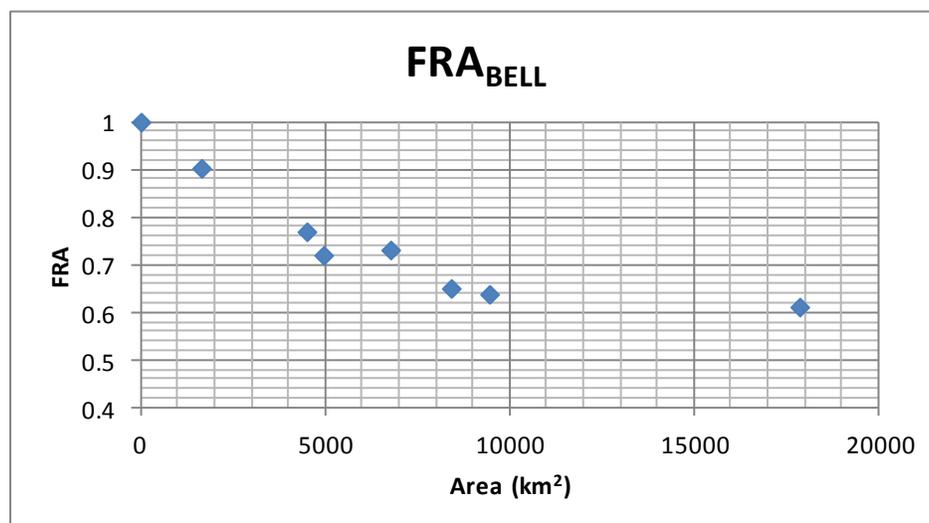


Figura 16: FRA<sub>BELL</sub> para la cuenca del río Panuco.

## VI. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS

Para poder comparar los resultados obtenidos por los dos métodos, en el caso de los resultados obtenidos por el método de análisis de frecuencia se compara el promedio, ya que en el método de Bell se considera que el FRA no varía con el periodo de retorno.

En la tabla 18 se comparan los valores del FRA obtenidos por los dos métodos.

Tabla 18: Valores obtenidos de FRA por análisis de frecuencias y por el método de Bell.

| Área (km <sup>2</sup> ) | FRA <sub>AFrec</sub> | FRA <sub>BELL</sub> |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| 17856                   | 0.619                | 0.612               |
| 9447                    | 0.628                | 0.638               |
| 8409                    | 0.656                | 0.651               |
| 6767                    | 0.698                | 0.731               |
| 4951                    | 0.768                | 0.720               |
| 4496                    | 0.733                | 0.770               |
| 1642                    | 0.873                | 0.903               |

En la figura 17 se presenta la tendencia que sigue el factor con respecto al área, por los dos métodos.

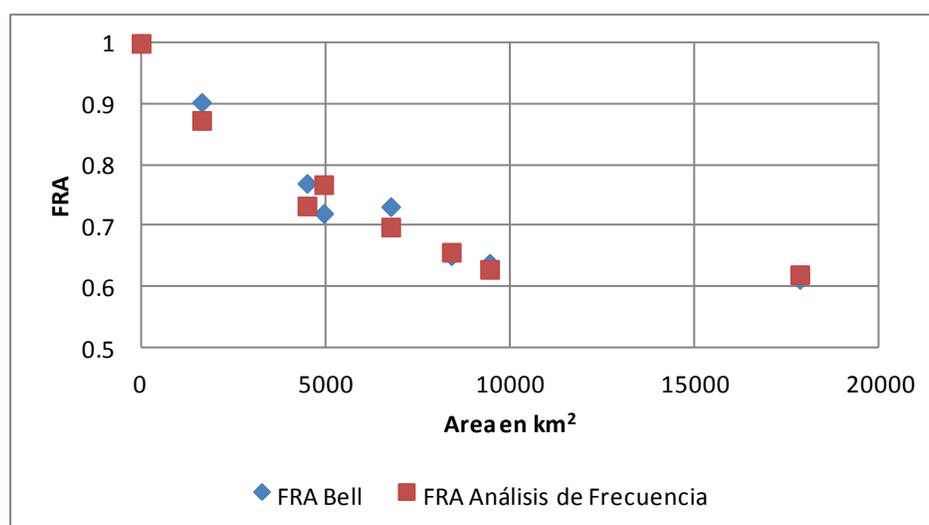


Figura 17: Tendencia del FRA con respecto al área, por los dos métodos estimados.

Como podemos observar los resultados obtenidos por los dos métodos son muy similares, ya que prácticamente se encuentra en el mismo punto.

Los factores de reducción por área estimados por los dos métodos se calcularon para una duración de 24 horas, y en el caso de análisis de frecuencias nos permitió hacer un análisis de la variación con respecto al periodo de retorno. Y comparando los valores del promedio con cada uno de los valores estimados para los diferentes periodos de retorno, se observó en la figura 17 que se asemejan en mayor medida a los de 10 años periodo de retorno, por lo que podemos decir que los resultados proporcionados por el método de Bell para este caso son de un periodo de retorno de 10 años.

## 6.2. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES REGIONES GEOGRÁFICAS

Para poder realizar una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los de otras áreas geográficas, se utilizara los resultados obtenidos en el instituto de ingeniería de la UNAM que a grades rasgos consiste en:

Se obtuvieron FRA para un grupo de datos generados aleatoriamente suponiendo una malla de 225 estaciones distribuida uniformemente en el espacio y que los valores de precipitación en cada estación son independientes entre sí. La generación se realizó considerando 225 estaciones, cada una representativa de un cuadro con área unitaria; se generaron así 100 años cada uno con 10 tormentas. Los valores de los FRA obtenidos para la media y para distintos periodos de retorno se muestran en la tabla 19.

Tabla 19: FRA para 225 estaciones estadísticamente independientes.

| Área | FRA   |        |         |          |
|------|-------|--------|---------|----------|
|      | Tr =5 | Tr=100 | Tr=1000 | Promedio |
| 0    | 1     | 1      | 1       | 1        |
| 4.0  | 0.80  | 0.81   | 0.81    | 0.81     |
| 9.0  | 0.71  | 0.69   | 0.69    | 0.70     |
| 16.0 | 0.67  | 0.65   | 0.64    | 0.65     |
| 25.0 | 0.63  | 0.61   | 0.60    | 0.62     |
| 36.0 | 0.61  | 0.59   | 0.58    | 0.59     |
| 49.0 | 0.60  | 0.57   | 0.56    | 0.58     |

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| 64.0  | 0.58 | 0.55 | 0.53 | 0.56 |
| 81.0  | 0.58 | 0.54 | 0.52 | 0.55 |
| 100.0 | 0.57 | 0.53 | 0.51 | 0.54 |
| 121.0 | 0.56 | 0.53 | 0.51 | 0.53 |
| 144.0 | 0.56 | 0.52 | 0.51 | 0.53 |
| 169.0 | 0.56 | 0.52 | 0.50 | 0.53 |
| 196.0 | 0.55 | 0.52 | 0.50 | 0.52 |
| 225.0 | 0.55 | 0.51 | 0.49 | 0.52 |

En la figura 18 se presenta la tendencia de los FRA, que dieron como resultado del proceso mencionado anteriormente, y que tiene como finalidad poder extrapolarlo a distintas regiones.

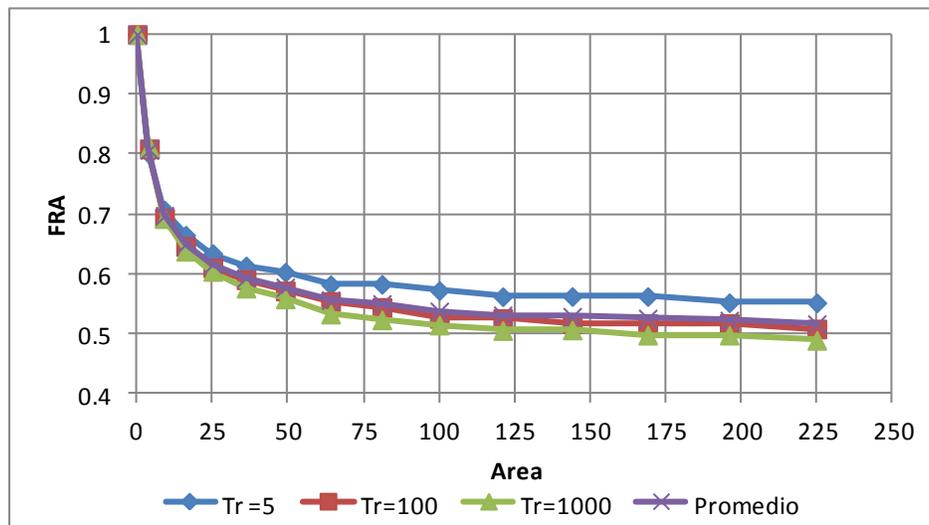


Figura 18: Relación entre el FRA y el área de la cuenca.

Para comparar los resultados de la tabla 19 con los resultados obtenidos en este trabajo, se busco un factor de ajuste, ya que las áreas que se presenta en la tabla 19 son áreas unitarias. En la tabla 20 se presentan las áreas ajustadas por un factor de 500.

Tabla 20: Área ajustada por un factor de 500 y su correspondiente FRA teórico.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 2000                 | 0.81         |
| 9.0           | 4500                 | 0.70         |
| 16.0          | 8000                 | 0.65         |

|       |        |      |
|-------|--------|------|
| 25.0  | 12500  | 0.62 |
| 36.0  | 18000  | 0.59 |
| 49.0  | 24500  | 0.58 |
| 64.0  | 32000  | 0.56 |
| 81.0  | 40500  | 0.55 |
| 100.0 | 50000  | 0.54 |
| 121.0 | 60500  | 0.53 |
| 144.0 | 72000  | 0.53 |
| 169.0 | 84500  | 0.53 |
| 196.0 | 98000  | 0.52 |
| 225.0 | 112500 | 0.52 |

El ajuste del área unitaria se realizó para extrapolar los resultados obtenidos para la cuenca del río Pánuco. En la figura 19, se presentan la tendencia de los FRA con su área ajustada, y el promedio del los FRA calculados para la cuenca el río Pánuco.

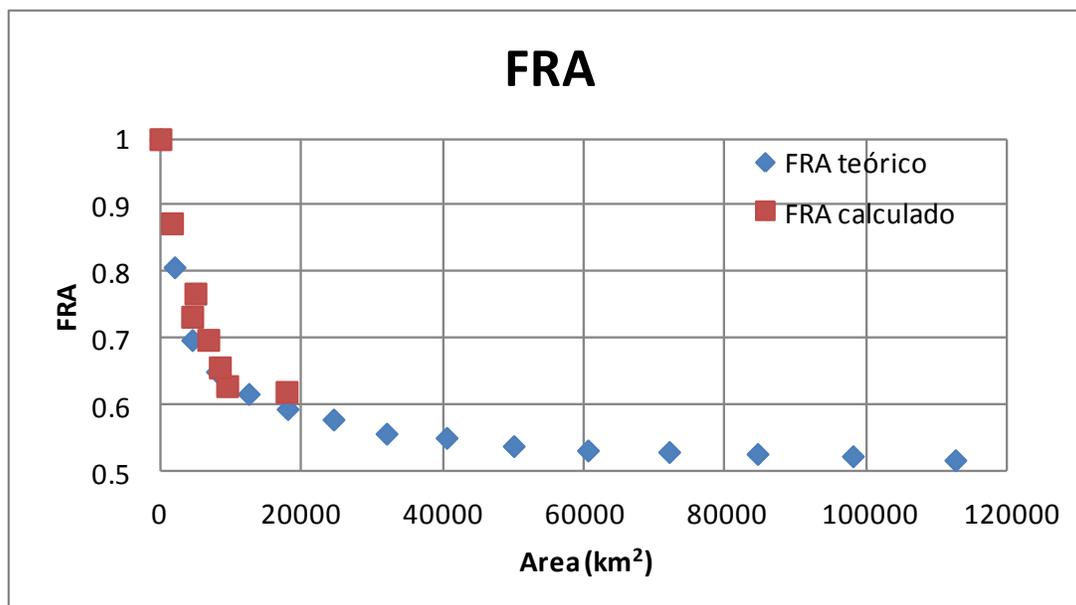


Figura 19: FRA teórico y calculado para la cuenca del río Pánuco.

En la grafica se observa que prácticamente los FRA tanto teóricos como calculados siguen la misma tendencia, por lo que para extrapolar o interpolar los resultados obtenidos, se podrán usar los valores teóricos ajustados para esta cuenca.

En la tesis de Carlos G. Franco “Análisis Regional de Lluvias Convectivas. Aplicación al Valle de México”. 1998. Se calcularon FRA para la cuenca del Valle de México, en la tabla 21 se presentan.

Tabla 21: FRA para el valle de México. Franco (1998).

| Área (km <sup>2</sup> ) | FRA  |
|-------------------------|------|
| 1                       | 1    |
| 135                     | 0.86 |
| 143                     | 0.84 |
| 323                     | 0.74 |
| 676                     | 0.64 |
| 1352                    | 0.58 |
| 2400                    | 0.49 |
| 4800                    | 0.45 |
| 9600                    | 0.41 |

En la figura 20 se presenta la tendencia que siguen los FRA con respecto al área de la cuenca del Valle de México.

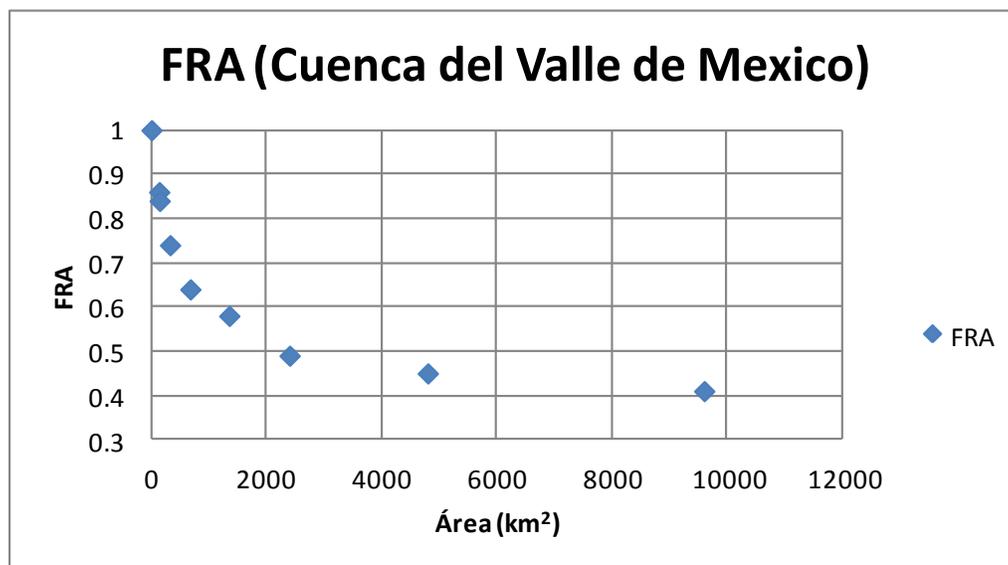


Figura 20: FRA para la cuenca del valle de México. Franco (1998).

Para fines de comparación se ajustaran las áreas de los FRA teóricos para poder compararlos a los calculaos para esta cuenca. En la tabla 22, se presentan los valores del área correspondiente a los FRA teóricos y el área ajustadas con un factor de 50.

Tabla 22: Área unitaria y la ajustada por un factor de 50 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 200                  | 0.81         |
| 9.0           | 450                  | 0.70         |
| 16.0          | 800                  | 0.65         |
| 25.0          | 1250                 | 0.62         |
| 36.0          | 1800                 | 0.59         |
| 49.0          | 2450                 | 0.58         |
| 64.0          | 3200                 | 0.56         |
| 81.0          | 4050                 | 0.55         |
| 100.0         | 5000                 | 0.54         |
| 121.0         | 6050                 | 0.53         |
| 144.0         | 7200                 | 0.53         |
| 169.0         | 8450                 | 0.53         |
| 196.0         | 9800                 | 0.52         |
| 225.0         | 11250                | 0.52         |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon con los valores calculados para la cuenca del Valle de México por Franco (1998). Figura 21.

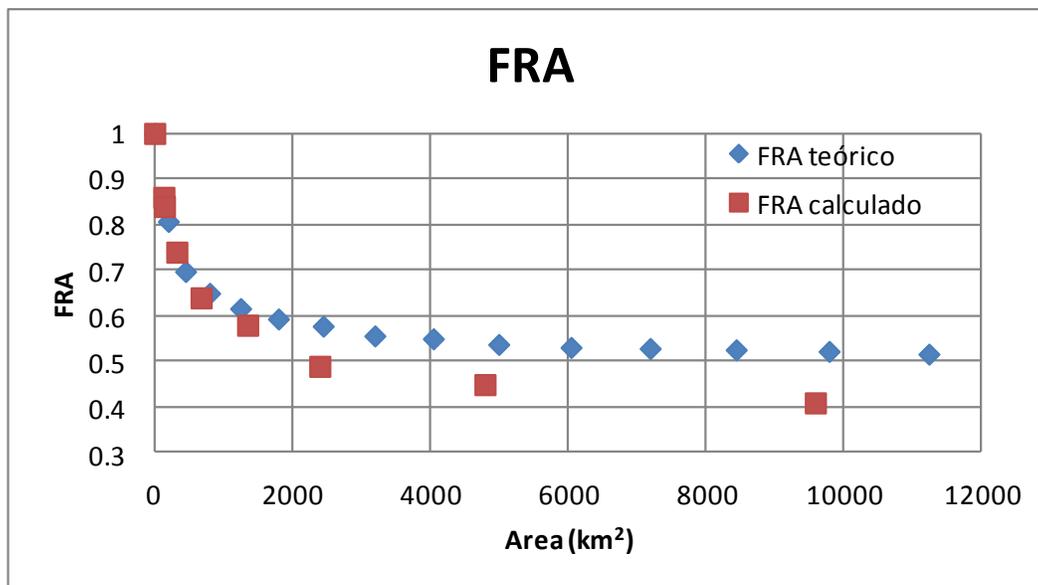


Figura 21: FRA teórico y calculado para la cuenca el Valle de México.

En la figura 21 se observa que para áreas de menos de 200 km<sup>2</sup> los FRA son semejantes, sin embargo para áreas mayores los valores teóricos se hacen asintóticos a 0.52 mientras que los calculados se mantienen bajando hasta un valor mínimo de 0.41. Esto se puede deber a que existe muy poca correlación entre las estaciones consideradas en el cálculo, ya que la precipitación que se presentan en esta zona es de tipo convectiva.

Otro caso que se compara son los resultados obtenidos para la cuenca del río Grijalva por Domínguez et al. (1997). En el estudio “Contribución al análisis regional de lluvias y escurrimientos máximos en la cuenca del río Grijalva”. En este trabajo se calcularon los FRA para periodos de retorno de 5 y 100 años, tabla 23.

Tabla 23: FRA para la cuenca del río Grijalva. Domínguez et al (1997).

| Área  | FRA    |          |          |
|-------|--------|----------|----------|
|       | Tr = 5 | Tr = 100 | Promedio |
| 1     | 1      | 1        | 1        |
| 1810  | 0.82   | 0.88     | 0.85     |
| 1345  | 0.73   | 0.71     | 0.72     |
| 4161  | 0.74   | 0.71     | 0.725    |
| 3150  | 0.48   | 0.39     | 0.435    |
| 2632  | 0.53   | 0.43     | 0.48     |
| 941   | 0.71   | 0.72     | 0.715    |
| 5610  | 0.62   | 0.55     | 0.585    |
| 2386  | 0.65   | 0.61     | 0.63     |
| 1792  | 0.75   | 0.71     | 0.73     |
| 2100  | 0.68   | 0.34     | 0.51     |
| 2444  | 0.77   | 0.75     | 0.76     |
| 5621  | 0.61   | 0.58     | 0.595    |
| 4123  | 0.61   | 0.64     | 0.625    |
| 12997 | 0.48   | 0.43     | 0.455    |
| 5740  | 0.51   | 0.44     | 0.475    |
| 7710  | 0.55   | 0.46     | 0.505    |
| 9862  | 0.46   | 0.43     | 0.445    |
| 20707 | 0.41   | 0.36     | 0.385    |
| 12524 | 0.42   | 0.35     | 0.385    |
| 16850 | 0.48   | 0.46     | 0.47     |
| 30569 | 0.37   | 0.32     | 0.345    |

En la figura 22 se presenta la tendencia que sigue el FRA promedio con respecto al área para la cuenca del río Grijalva.

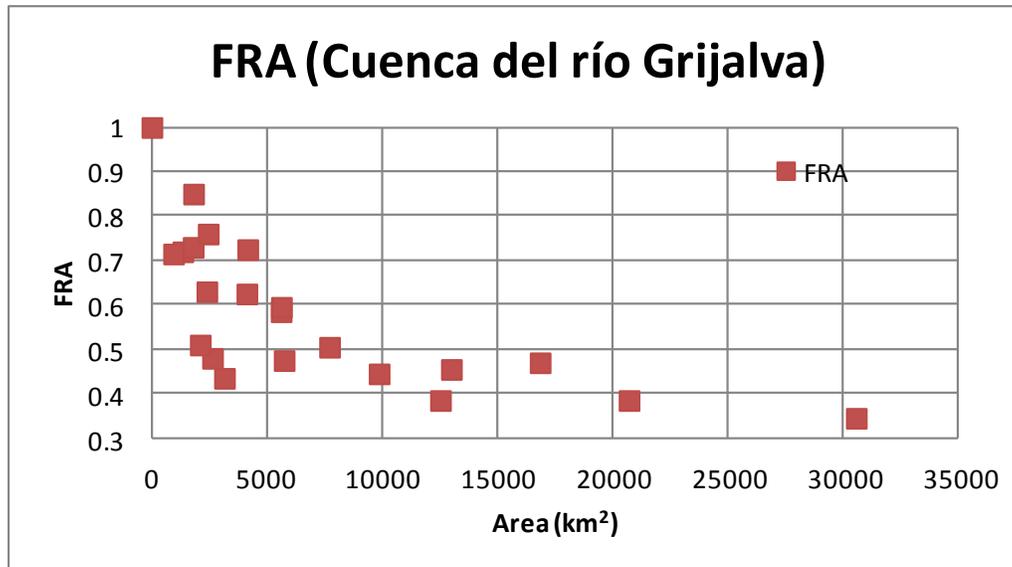


Figura 22: FRA promedio para la cuenca del río Grijalva.

Para fines de comparación se ajustaran las áreas de los FRA teóricos para compararlos a los calculaos para esta cuenca. En la tabla 24, se presentan los valores del área correspondiente a los FRA teóricos y el área ajustadas con un factor de 150.

Tabla 24: Área unitaria y la ajustada por un factor de 150 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 600                  | 0.81         |
| 9.0           | 1350                 | 0.70         |
| 16.0          | 2400                 | 0.65         |
| 25.0          | 3750                 | 0.62         |
| 36.0          | 5400                 | 0.59         |
| 49.0          | 7350                 | 0.58         |
| 64.0          | 9600                 | 0.56         |
| 81.0          | 12150                | 0.55         |
| 100.0         | 15000                | 0.54         |
| 121.0         | 18150                | 0.53         |
| 144.0         | 21600                | 0.53         |
| 169.0         | 25350                | 0.53         |

|       |       |      |
|-------|-------|------|
| 196.0 | 29400 | 0.52 |
| 225.0 | 33750 | 0.52 |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon con los valores calculados para la cuenca del río Grijalva por Domínguez (1998). Figura 23.

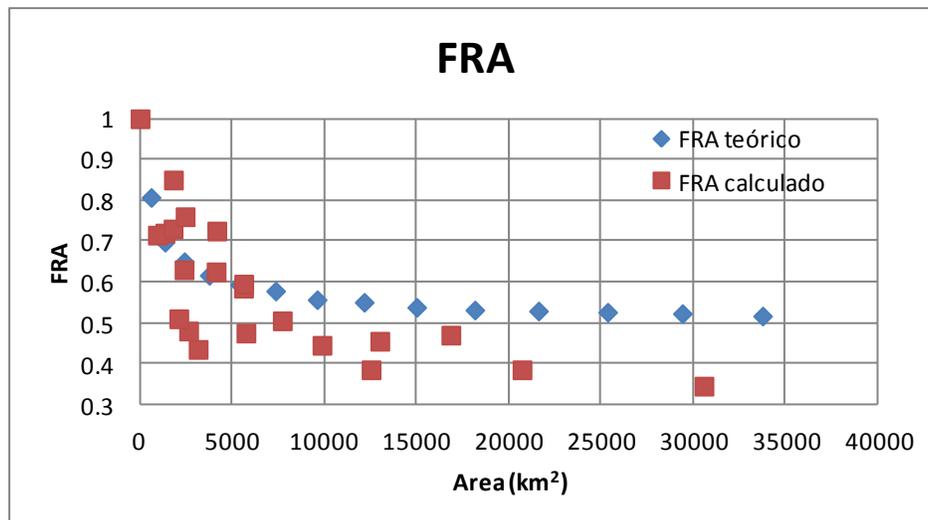


Figura 23: FRA teóricos y calculados para la cuenca del río Grijalva.

En la figura 23 se observa que hay una gran dispersión de los valores de FRA, además de que los valores teóricos se hacen asintóticos a 0.52, mientras que los valores calculados se van hasta un valor mínimo de 0.34. Esto se puede deber a que existe muy poca correlación entre las estaciones consideradas en el cálculo, esto es que se encuentren en regiones meteorológicas diferentes.

Un caso más al que se puede ajustar los factores empíricos, son los resultados estimados por Mena (2004) para el estado de Sinaloa, México para la tesis de maestría titulada "Factores de reducción por área para el cálculo de lluvias de diseño. Aplicación al estado de Sinaloa. En la que se calcularon los FRA por el método de análisis de frecuencias para periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100, 1000 y 10000 (tabla 25).

Tabla 25: Factores de reducción por área (Mena 2004).

| Área<br>(Km <sup>2</sup> ) | Periodo de retorno, en años |      |      |      |      |      |       | Promedio |
|----------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|-------|----------|
|                            | 2                           | 5    | 10   | 50   | 100  | 1000 | 10000 |          |
| 6049.13                    | 0.79                        | 0.74 | 0.7  | 0.67 | 0.66 | 0.65 | 0.64  | 0.693    |
| 7102.43                    | 0.66                        | 0.66 | 0.62 | 0.63 | 0.64 | 0.65 | 0.66  | 0.646    |
| 7257.35                    | 0.93                        | 0.84 | 0.75 | 0.68 | 0.67 | 0.64 | 0.62  | 0.733    |
| 11271.00                   | 0.77                        | 0.78 | 0.7  | 0.61 | 0.59 | 0.57 | 0.55  | 0.653    |
| 11475.69                   | 0.85                        | 0.83 | 0.62 | 0.71 | 0.74 | 0.83 | 0.89  | 0.781    |
| 14359.78                   | 0.85                        | 0.88 | 0.83 | 0.83 | 0.84 | 0.85 | 0.86  | 0.849    |
| 17320.12                   | 0.67                        | 0.68 | 0.63 | 0.57 | 0.56 | 0.54 | 0.53  | 0.597    |
| 20522.00                   | 0.81                        | 0.79 | 0.74 | 0.73 | 0.74 | 0.75 | 0.76  | 0.760    |
| 25835.00                   | 0.77                        | 0.74 | 0.63 | 0.64 | 0.65 | 0.68 | 0.70  | 0.687    |
| 26412.10                   | 0.74                        | 0.67 | 0.58 | 0.63 | 0.64 | 0.68 | 0.70  | 0.663    |
| 32257.00                   | 0.60                        | 0.68 | 0.7  | 0.74 | 0.75 | 0.77 | 0.78  | 0.717    |
| 37570.00                   | 0.62                        | 0.63 | 0.57 | 0.58 | 0.59 | 0.6  | 0.61  | 0.600    |
| 58092.00                   | 0.59                        | 0.56 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.50 | 0.50  | 0.519    |

En la figura 24, se presenta la tendencia que siguen los valores de FRA promedio con respecto al área.

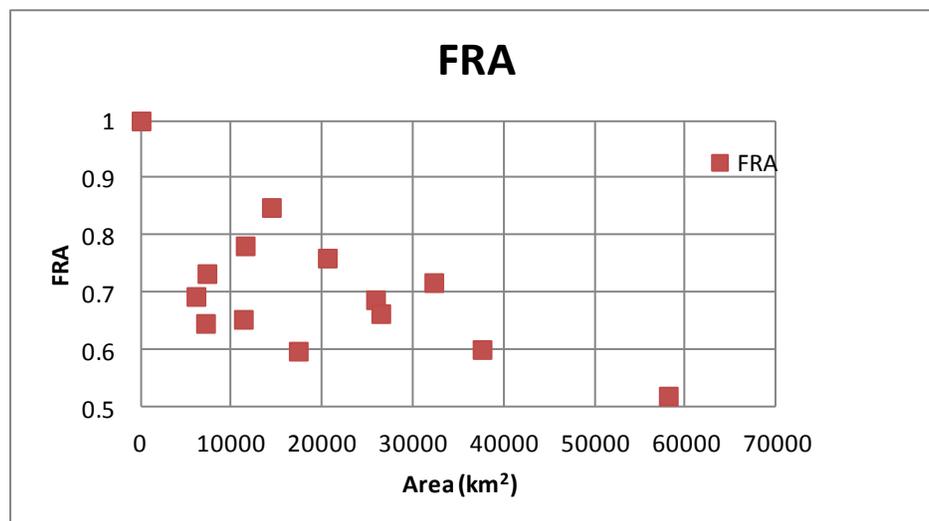


Figura 24: FRA para el estado de Sinaloa.

Para realizar la comparación se ajustaran las áreas de los FRA teóricos para poder compararlos a los calculaos para esta área. En la tabla 26, se presentan los valores del área correspondiente a los FRA teóricos y el área ajustadas con un factor de 700.

Tabla 26: Área unitaria y la ajustada por un factor de 700 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 2800                 | 0.81         |
| 9.0           | 6300                 | 0.70         |
| 16.0          | 11200                | 0.65         |
| 25.0          | 17500                | 0.62         |
| 36.0          | 25200                | 0.59         |
| 49.0          | 34300                | 0.58         |
| 64.0          | 44800                | 0.56         |
| 81.0          | 56700                | 0.55         |
| 100.0         | 70000                | 0.54         |
| 121.0         | 84700                | 0.53         |
| 144.0         | 100800               | 0.53         |
| 169.0         | 118300               | 0.53         |
| 196.0         | 137200               | 0.52         |
| 225.0         | 157500               | 0.52         |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon los valores calculados para el estado de Sinaloa, por Mana (2004). Figura 25.

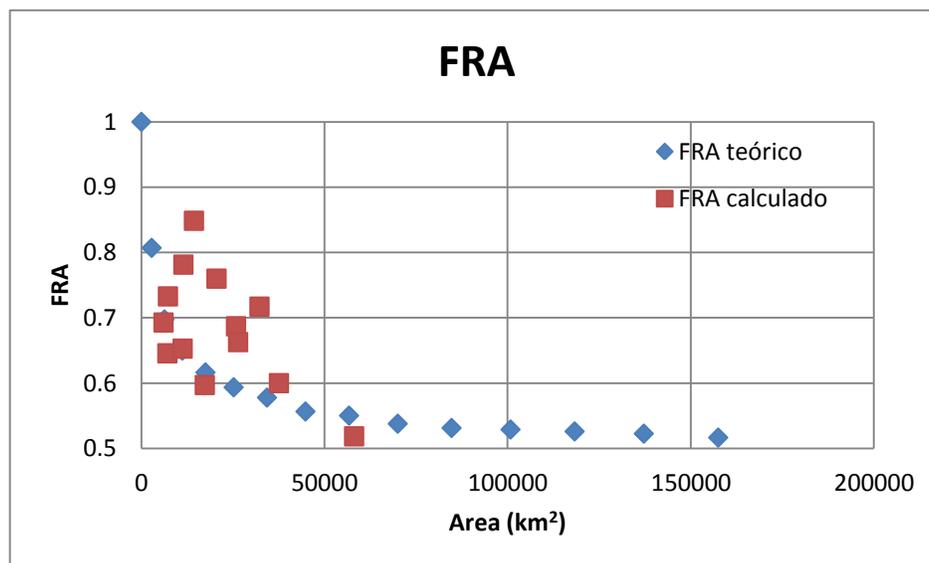


Figura 25: FRA teórico y calculado para el estado de Sinaloa.

En la figura 25 se observa que hay una gran dispersión de los valores de FRA, además de que los valores teóricos se hacen asintóticos a 0.52, en tanto los valores

calculados se observa una tendencia ligeramente menor, ya que llegan hasta un valor mínimo de 0.51 para una área de 58092 km<sup>2</sup>.

Otro caso con el que podemos comparar es con los valores de FRA obtenidos para el estado de Durango. En él que se obtuvieron los valores de FRA para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, para diferentes áreas, en la tabla 27 se presentan estos resultados.

Tabla 27: FRA para el estado de Durango. (Domínguez).

| área | (Km <sup>2</sup> ) | Tr = 2 | Tr = 5 | Tr = 10 | Tr = 20 | Tr = 50 | Tr = 100 | Promedio |
|------|--------------------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 1A   | 15393              | 0.64   | 0.59   | 0.57    | 0.56    | 0.55    | 0.54     | 0.57     |
| 1B   | 23738              | 0.60   | 0.57   | 0.56    | 0.56    | 0.55    | 0.55     | 0.57     |
| 2A   | 11580              | 0.66   | 0.60   | 0.58    | 0.56    | 0.55    | 0.54     | 0.58     |
| 2B   | 12626              | 0.56   | 0.51   | 0.49    | 0.47    | 0.46    | 0.45     | 0.49     |
| 2C   | 8748               | 0.61   | 0.60   | 0.59    | 0.58    | 0.58    | 0.58     | 0.59     |
| 3A   | 8249               | 0.58   | 0.55   | 0.53    | 0.52    | 0.51    | 0.50     | 0.53     |
| 3B   | 17358              | 0.66   | 0.65   | 0.64    | 0.64    | 0.64    | 0.64     | 0.64     |
| 3C   | 12632              | 0.70   | 0.68   | 0.67    | 0.66    | 0.65    | 0.65     | 0.67     |
| 1    | 39131              | 0.57   | 0.48   | 0.45    | 0.43    | 0.41    | 0.40     | 0.46     |

En la figura 26, se presenta la tendencia que siguen los valores de FRA promedio con respecto a al área.

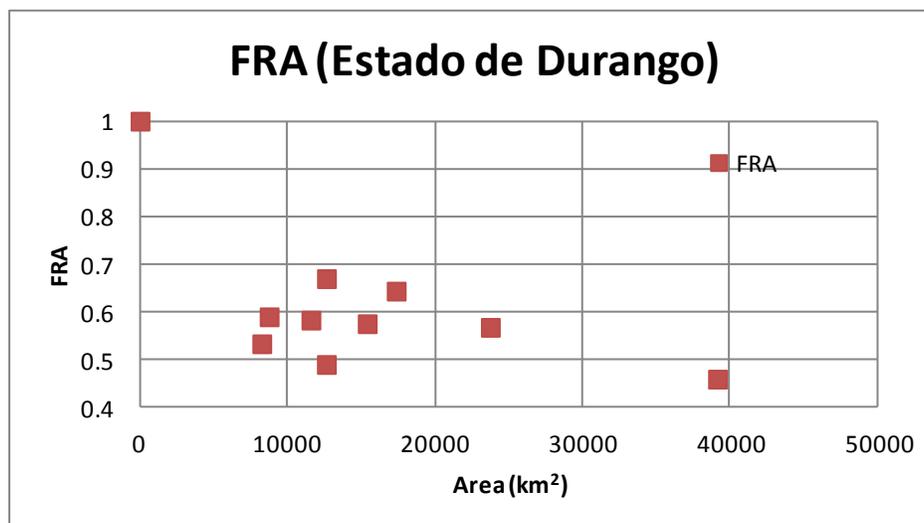


Figura 26: FRA para el estado de Durango.

Para realizar la comparación se ajustaran las áreas de los FRA teóricos para poder compararlos a los calculaos para esta área. En la tabla 28, se presentan los valores del área correspondiente a los FRA teóricos y el área ajustadas con un factor de 200.

Tabla 28: Área unitaria y la ajustada por un factor de 200 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 800                  | 0.81         |
| 9.0           | 1800                 | 0.70         |
| 16.0          | 3200                 | 0.65         |
| 25.0          | 5000                 | 0.62         |
| 36.0          | 7200                 | 0.59         |
| 49.0          | 9800                 | 0.58         |
| 64.0          | 12800                | 0.56         |
| 81.0          | 16200                | 0.55         |
| 100.0         | 20000                | 0.54         |
| 121.0         | 24200                | 0.53         |
| 144.0         | 28800                | 0.53         |
| 169.0         | 33800                | 0.53         |
| 196.0         | 39200                | 0.52         |
| 225.0         | 45000                | 0.52         |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon los valores calculados para el estado de Durango, por Domínguez. Figura 27.

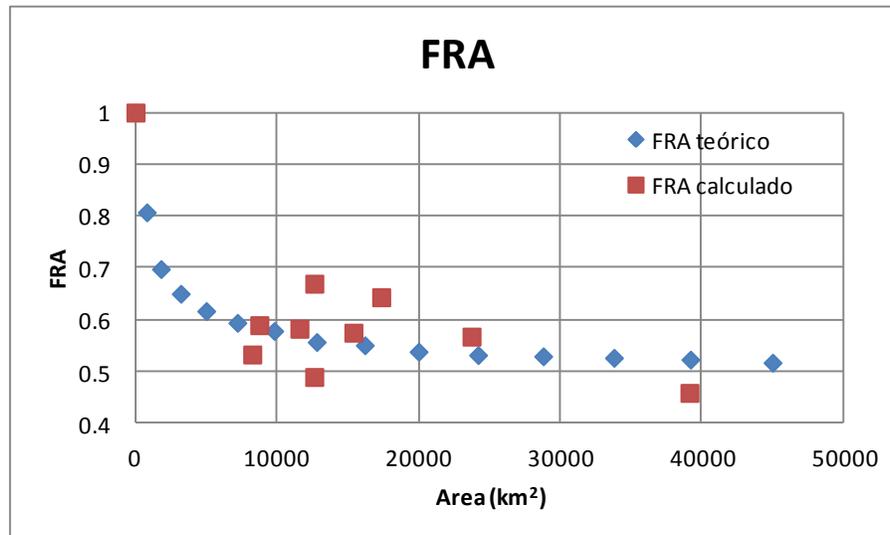


Figura 27: FRA teórico y calculado para el estado de Durango.

En la figura 27 se observa que hay una gran dispersión de los valores de FRA, además de que los valores teóricos se hacen asintóticos a 5.2, mientras que los valores calculados se van hasta un valor mínimo de 0.46. Esto se puede deber a que existe muy poca correlación entre las estaciones consideradas en el cálculo, esto es que se encuentren en regiones meteorológicas diferentes.

Además de los valores FRA obtenidos para las regiones de México comparadas anteriormente, en la tabla 29 se presentan algunos resultados obtenidos para diferentes zonas del mundo, por diferentes métodos y correspondientes a FRA de área geográfica fija.

Tabla 29: Factores de reducción por área para varias regiones del mundo.

| Área  | España<br>(Témez, 1991) | EU, Houston (Asquith<br>y Famigliatti, 2000) | Reino Unido<br>(NERC, 1975) |
|-------|-------------------------|--|-----------------------------|
| 1     | 1                       |  | 0.99                        |
| 10    | 0.93                    |  | 0.97                        |
| 20    |                         | 0.89   |                             |
| 50    | 0.89                    | 0.82   |                             |
| 100   | 0.87                    | 0.79   | 0.94                        |
| 200   | 0.85                    |  |                             |
| 400   | 0.83                    |  |                             |
| 500   | 0.82                    |  |                             |
| 1000  | 0.8                     | 0.68   | 0.89                        |
| 3000  | 0.77                    | 0.60   | 0.86                        |
| 10000 |                         | 0.52   | 0.83                        |
| 30000 |                         |  | 0.80                        |

Los valores calculados para España por Témez en 1991, son factores obtenidos empíricamente para duración de 24 horas. Así como los valores calculados por Asquith y Famigliatti en 2000 para Houston Texas, EU, fueron para un periodo de retorno de dos años y para una duración de 24 horas, en el que se analizó un área máxima de 18 000 km<sup>2</sup>.y por último los factores calculados por Nerec en 1975 para Reino Unido, se calcularon para una duración de 24 horas y supone que no hay variación con el periodo de retorno, menciona que el factor crece con la duración de la lluvia, además de que la localización geográfica no tiene importancia. Como la duración para la que fueron calculados estos FRA es igual a la utilizada para este estudio, se puede hacer la comparación con los valores teóricos presentados en la tabla 19.

Para los valores de FRA para España se logra un ajuste aceptable multiplicando el área unitaria de los valores teóricos de FRA por un valor de 400 (tabla 30).

Tabla 30: Área unitaria y la ajustada por un factor de 400 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 1600                 | 0.81         |
| 9.0           | 3600                 | 0.70         |
| 16.0          | 6400                 | 0.65         |
| 25.0          | 10000                | 0.62         |
| 36.0          | 14400                | 0.59         |
| 49.0          | 19600                | 0.58         |
| 64.0          | 25600                | 0.56         |
| 81.0          | 32400                | 0.55         |
| 100.0         | 40000                | 0.54         |
| 121.0         | 48400                | 0.53         |
| 144.0         | 57600                | 0.53         |
| 169.0         | 67600                | 0.53         |
| 196.0         | 78400                | 0.52         |
| 225.0         | 90000                | 0.52         |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon los valores calculados para España por Témez (1991). Figura 28.

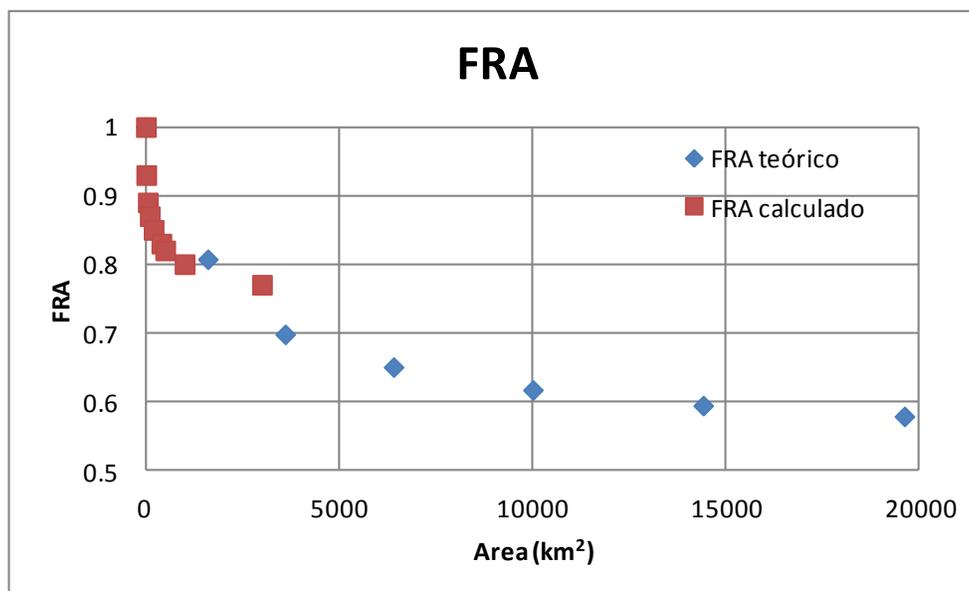


Figura 28: FRA teórico y calculado para España.

Para los valores de FRA para Houston Texas, EU se logra un ajuste aceptable multiplicando el área unitaria de los valores teóricos de FRA por un valor de 100 (tabla 31).

Tabla 31: Área unitaria y la ajustada por un factor de 100 correspondientes a los FRA teóricos.

| Área Unitaria | Área km <sup>2</sup> | FRA Teóricos |
|---------------|----------------------|--------------|
| 0             | 0                    | 1            |
| 4.0           | 400                  | 0.81         |
| 9.0           | 900                  | 0.70         |
| 16.0          | 1600                 | 0.65         |
| 25.0          | 2500                 | 0.62         |
| 36.0          | 3600                 | 0.59         |
| 49.0          | 4900                 | 0.58         |
| 64.0          | 6400                 | 0.56         |
| 81.0          | 8100                 | 0.55         |
| 100.0         | 10000                | 0.54         |
| 121.0         | 12100                | 0.53         |
| 144.0         | 14400                | 0.53         |
| 169.0         | 16900                | 0.53         |
| 196.0         | 19600                | 0.52         |
| 225.0         | 22500                | 0.52         |

Con estos valores de área ajustados para los FRA teóricos, se compararon los valores calculados para Houston Texas, E.U. por Asquith y Famigliatti en 2000 Figura 29.

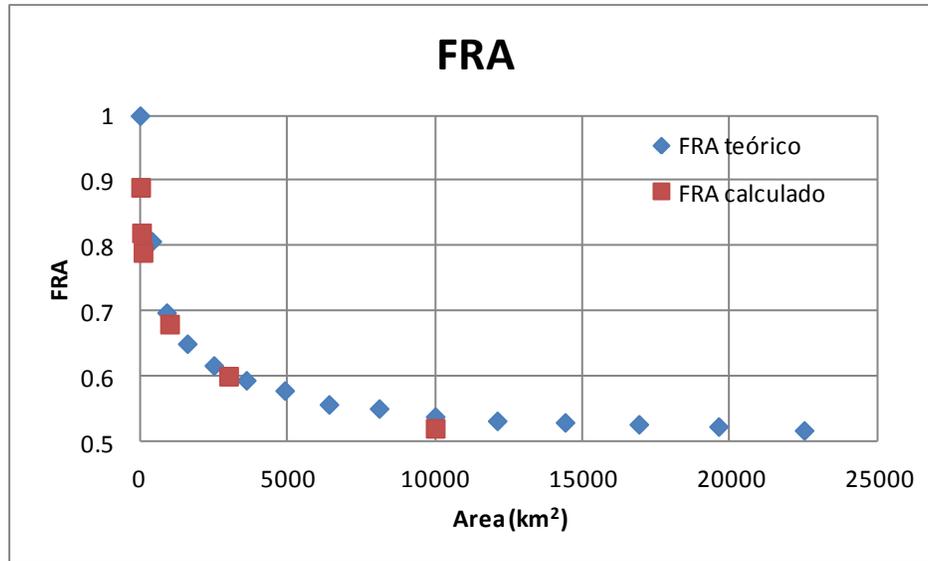


Figura 29: FRA teórico y calculado para Houston Texas, E.U.

Para los valores de FRA para Reino Unido, se trataron de ajustar a los valores teóricos, sin embargo no se logro un ajuste aceptable ya que sus valores se hacen asintóticos a 0.8 para valores de área de 30000 km<sup>2</sup>, esto nos indica que existe una gran simultaneidad en los eventos analizados para esta región.

## VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los factores de reducción por área obtenidos en este trabajo muestran, que en general, disminuyen conforme el área aumenta, como se aprecia en las figuras de la sección anterior.

Los valores de FRA son más altos para áreas pequeñas y conforme incrementamos la superficie hasta abarcar el área total de la zona en estudio los valores decrecen. Y se nota la misma tendencia que los valores obtenidos teóricamente.

En la figura 30 se presenta una comparación entre los FRA para diferentes regiones del mundo.

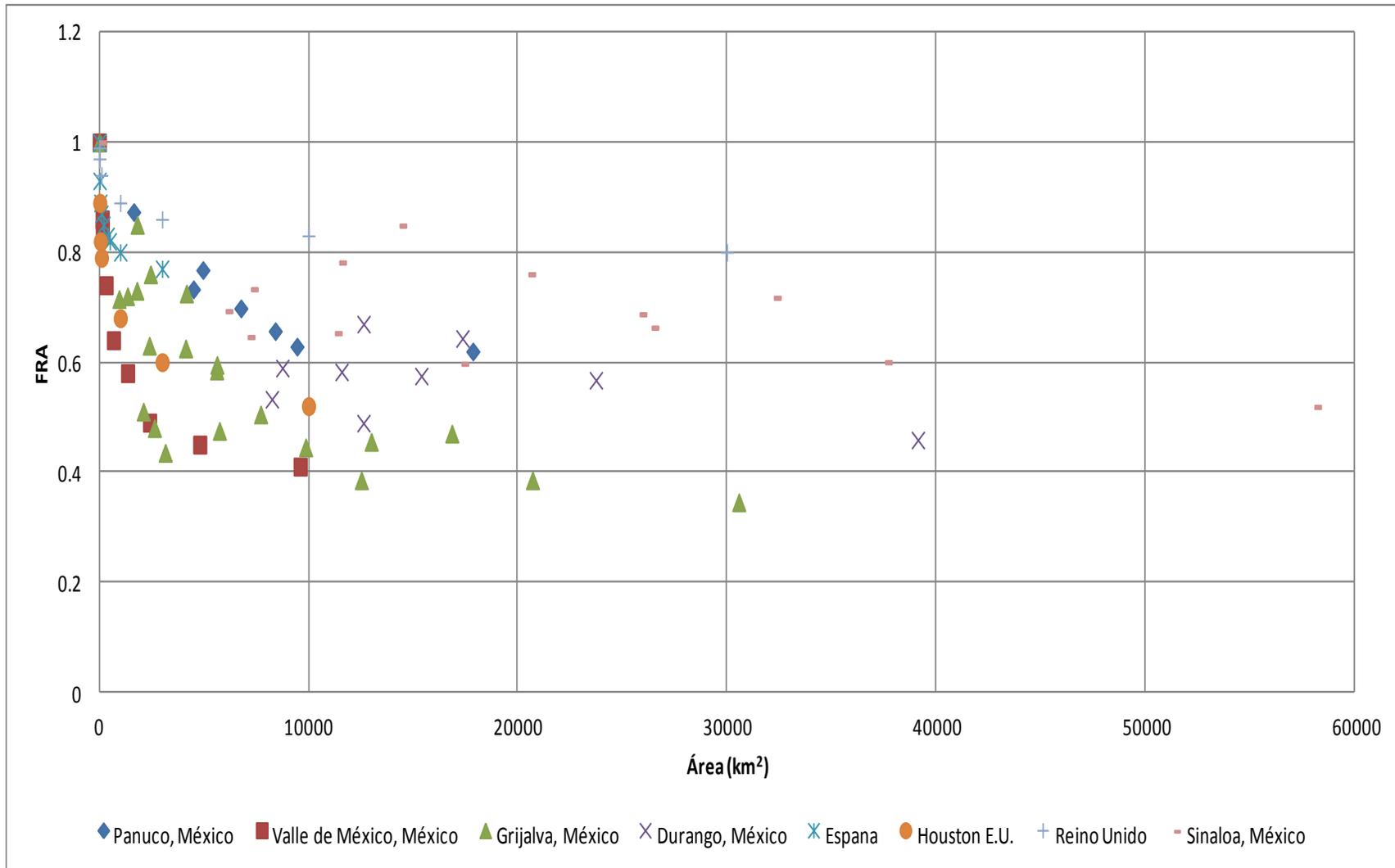


Figura 30: FRA de área geográfica fija, para varias regiones del Mundo.

Los valores de FRA obtenidos en este estudio, por los métodos de análisis de frecuencias y Bell, son generalmente superiores a los reportados por Franco (1998) para el valle de México prácticamente para todo el rango de áreas reportado.

Los valores reportados de FRA por Domínguez et al en 1998, para la cuenca del río Grijalva, son muy similares para valores de áreas menores a 4100 km<sup>2</sup> mientras que para áreas mayores, los valores para la cuenca del Grijalva descienden con mayor rapidez que los estimados para el Panuco, llegando a un valor mínimo de 0.34 para una área de 30569 km<sup>2</sup>, mientras que para el Panuco el valor mínimo es de 0.62 para una área de 17855 km<sup>2</sup>.

Los valores estimados para el estado de Sinaloa son muy similares para áreas de hasta 10000 km<sup>2</sup>, mientras que para áreas superiores descienden en menor medida que los estimados para el Panuco.

Los valores estimados para el estado de Durango por Domínguez, son muy similares a los estimados para el Panuco. Sin embargo los valores reportados por Témez (1991) para España son menores para áreas menores a 3000 km<sup>2</sup> y para áreas mayores a esta, los valores son muy semejantes a los estimados para el Panuco.

Los reportados por Asquith y Famigliatti (2000) para Houston E.U. son inferiores en todo el rango de áreas reportado, llegando a un valor mínimo de 0.52 para un área de 10000 km<sup>2</sup>, mientras que para el Panuco se estimó un valor de 0.62 para un área similar.

En comparación con los valores reportados por NERC (1975) para Reino Unido, son muy semejantes para áreas menores a 3000 km<sup>2</sup> y para áreas mayores a esta los valores estimados para el Panuco se hacen inferiores a los de Reino Unido.

A pesar de estas comparaciones es necesario tener precaución al interpretarlas, ya que existe una gran influencia de la densidad de estaciones en la estimación de los



FRA, ya que entre mayor sea el número de estaciones que se consideren para una misma área el factor será menor, esto se encontró al calcular el FRA para la misma área con un número de estaciones diferente.

El hecho de que los FRA estimados para el Panuco sea mayor a la mayoría de los resultados presentados por diferentes autores, se puede deber a que para seleccionar el área para este estudio, se delimitó una región en la que se presenta un mismo patrón para el caso de la precipitación, dando como resultado 3 regiones dentro de la cuenca del río Panuco, y solo se eligió una de ellas para el análisis.



## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos para la cuenca del río Panuco por el método de análisis de frecuencias se puede observar en la figura 16 que son muy similares a los estimados mediante el método de Bell, esto tomando en cuenta el valor promedio para el método de análisis de frecuencias, ya que el método de Bell considera que no hay variación con el periodo de retorno.

De los resultados obtenidos se observa que el FRA depende del periodo de retorno, ya que conforme aumenta el periodo de retorno el FRA disminuyen en promedio 0.06 en periodos de retorno que van de 2 a 100 años, para las siete áreas analizadas, sin embargo para efectos prácticos este valor no representa una gran diferencia por lo que al considerar el promedio de los valores calculados para los diferentes periodos de retorno no se incurre en errores de consideración.

Debido a la escasa disponibilidad de registros de precipitación de pluviógrafo, la estimación de FRA para duraciones menores a 24 horas no se puede estudiar en esta región. Sin embargo de acuerdo con los estudios realizados en otras regiones, se ha determinado que este factor si tiene una dependencia con respecto a la duración como se puede ver en el análisis presentado por Viessman et al (1989), donde se muestran los resultados obtenidos por el US Weather Bureau, en el que estudia a los FRA para duraciones de 30 min a 24 horas. Este tipo de análisis se considera fuera del alcance de este trabajo.

En cuanto a la variación del factor con respecto al área se observa que conforme aumenta el área el factor disminuye, pero cabe mencionar que no lo hace de manera constante, esto se puede deber principalmente a la orografía de la cuenca, ya que de esta depende la manera en que se distribuya la precipitación.

Este trabajo puede ser útil para comprender el significado de los factores de reducción por área utilizando datos de precipitación en 24 horas, siendo estos los periodos de medición más comunes en las redes climatológicas

Los valores de los factores de reducción por área obtenidos para esta región pueden ser aplicables para cualquier subcuenta del río Panuco, mediante la tendencia de los factores teóricos, presentada en la figura 18. La extrapolación a otras regiones debe realizar con suma cautela ya que este factor es muy sensible a la densidad de estaciones en el área de estudio, por lo que solo es recomendable usarlo con fines de comparación.

La aportación de este trabajo ha sido la obtención de los factores de reducción por área para la cuenca del río Panuco, mediante el análisis de una de sus regiones meteorológicamente homogéneas, y ajustando la curva de FRA teóricos descrita en el apartado 6. Como extensión de este trabajo se podría pensar en el ajuste de los FRA teóricos a otras regiones hidrológicas de México para usarlos en la determinación de tormentas de diseño que permitan proyectar obras hidráulicas rentables.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

Allen, R. J., & DeGaetano, A. T. (2005). Areal Reduction Factors for Two Eastern United States Regions with High Rain-Gauge Density. (ASCE, Ed.) Journal of Hydrologic Engineering , 10 (4), 327-335.

Aparicio, M. F. J. (2010). Fundamentos de hidrología de superficie, Ed. Limusa, 303 p.

Asquith, W. H., Famiglietti, J. S. (2000). Precipitation areal reduction factor estimation using an annual maxima centered approach. Journal of Hydrology, 230: 55-69.

Bacchi, B., Ranzi, R. (1996). On the derivation of areal reduction factor of storms. Atmospheric Research, 42: 123-135.

Bell, F. C. (1976). The areal reduction factor in rainfall frequency estimation. United Kindom: Institute of Hydrology, No. 35, Wallingford , England.

De Michelle, C., Kottegoda, N. T., Rosso, R. (2001). The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties. Water Resources Research, 37: 3247-3252.

Desbordes, M., Raous, P., Trévisiol, Y. (1984). Areal reduction factors on short time and space intervals. Wather, Sciences and Technology. Vol 16, Copenhagen, pp 189-198. Printed in Great Britain.

Domínguez, R., & Franco, C. (Oct. de 2002). Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores de 2 h. Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Dominguez, R., Villalobos, E., Guichard D. (1997). Contribución a análisis regional de lluvias y escurrimientos máximos en la cuenca del río Grijalva. México: CENAPRED.

Estevez, J., Garcia, A., Ayoso, J. L. (2010). Estimation of areal reduction factors in the province of Córdoba (Southern Spain). Memorias del XIV International Congress on Project Engineering. Madrid España.

Franco, C. G. (1998). Análisis regional de lluvias convectivas. Aplicación al Valle de México. Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Frederick, R.H., V.A. Myers, and E.P. Auciello (1977). Storm depth area relations from digitized radar returns, Water Resources Research 13(3): 675-679.

Guichard D. (2002). Factores de reducción Areal: Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos para episodios convectivos en la comunidad de Valencia.

Guichard, D., Domínguez, R. y García, R. (2004). Factores de reducción areal: revisión histórica.aplicación en cuencas de la zona mediterránea de españa. Memorias del XXI congreso latinoamericano de hidráulica.

Hershfield, D.M. (1962). Extreme rainfall relationships. Proc.Am.Soc.Civ.Eng., J. Hydraul. Div., HY6(11):73-79.

Mena, S. R. (2004). Factores de reducción por área para el cálculo de lluvias de diseño. Aplicación al estado de Sinaloa. Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Myers, V. A., Zehr, R. M. (1980). A methodology for point to area rainfall frequency ratios, NOAA Tech. Report NWS 24, Washington, D.C.

NERC. (1975). Flood Studies Report. Wallingford, Institute of Hydrology. Swindon: Natural Environmental Research Council.

Nguyen, V., Rousselle, J., McPhearson, M.B. (1981). Evaluation of areal versus point rainfall with sparse data, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 8, 173-178.

Omolayo, A. S. (1993). On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. (E. S. B.V., Ed.) *Journal of Hydrology*, 145, 191-205.

Roche, M. (1963). *Hydrologie de Surface*. Gauthier-Villars, París. 430p.

Rodríguez Iturbe, I., Mejía, J. M. (1974). On the transformation of point rainfall to areal rainfall, *Water Resources Research*, 10(4), 729–735.

Sivapalan, M., Blöschl, G. (1998). Transformation of point to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. *Journal of hydrology*, 204: 150-167.

Springall G, R. (1970). *Hidrología (Primera parte)*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.

Supino, G. (1964). *Le Reti Idrauliche (in Italian)*, 806, Patron Ed., Bologna, Italy.

Témez, J.R. (1991). Extended and improved rational method. Version of the highways administration of Spain, XXIV Congreso de la IAHR, Madrid, España. pp A-33-A-40.

Tipacamu G. Gómez F. y Domínguez R. (1992). Determinación de factores de reducción por área para el cálculo de la precipitación media de una tormenta de diseño. Aplicación a dos cuencas del río Grijalva. XII Congreso Nacional de Hidráulica. México.

U.S. Weather Bureau, (1957). Rainfall intensity-frequency regime, Part 1-The Ohio Valley, Technical Paper No. 29, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.

Viessman, W. (1989). *Introduction To Hydrology (Third Ed. ed.)*. New York: Harper & Row Publishers. 780 p.



Waymire, E., V.K. Gupta, and I. Rodriguez-Iturbe (1984). A spectral theory of a rainfall intensity field at the meso- $\beta$  scale, *Water Resources Research* 10(10): 1453-1465 p.

