



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FORMULACIÓN DEL RIESGO CONJUNTO, INUNDACIÓN-
SEQUÍA, BAJO UN ESQUEMA PROBABILÍSTICO, APLICADO
EN LA REGION HIDROLÓGICA NAZAS-AGUANAVAL (RH-36)**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

ING. JESÚS DE LA CRUZ BARTOLÓN

T U T O R :

DR. MARTIN ALFONSO GUTIÉRREZ LÓPEZ



ENERO DEL 2009

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M.I. VICTOR FRANCO

SECRETARIO: DR. ALDO IVÁN RAMÍREZ OROZCO

VOCAL: DR. MARTÍN ALFONSO GUTIÉRREZ LÓPEZ

PRIMER SUPLENTE: M.I. ROBERTO MEJÍA ZERMEÑO

SEGUNDO SUPLENTE: M.I. JUAN FRANCISCO GÓMEZ MARTÍNEZ

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

JIUTEPEC, ESTADO DE MORELOS

TUTOR DE TESIS:

DR. MARTIN ALFONSO GUTIÉRREZ LÓPEZ

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Dr. M. Alfonso Gutiérrez López, a quien estimo y respeto, y que me brindo su apoyo y todas las atenciones oportunas para realizar este trabajo de tesis, siendo un guía permanente con un cálido trato y contagioso optimismo al dirigir y sustentar este trabajo.

A los señores revisores de este trabajo:

M.I. Victor Franco

M.I. Roberto Mejía Zermeño

DR. Aldo Iván Ramírez Orozco, y

M.I. Juan Francisco Gómez Martínez

A la División de Estudios de Posgrado, Campus Morelos de la Universidad Nacional Autónoma de México.

DEDICATORIAS

Recordando un hermoso pasaje bíblico que me acompaña siempre (Salmos 23:4): “No temeré mal alguno porque tú estarás conmigo; tu vara y tu cayado me infundirán aliento”.

Con agradecimiento y respeto a mis padres Francisca y José Saturnino y a todos mis hermanos a quienes estimo y quiero.

A la Sra. María de Lourdes Barba Córdova, de la división de estudios de posgrado Campus Morelos-UNAM, por su apoyo invaluable y oportuno, sus atenciones y consejos, y del cual le estoy enteramente agradecido.

A la C.P. Elizabeth Plascencia Morellano quien sus consejos y apoyo siempre han estado en el momento preciso.

A mis amigos y colegas que en la vida profesional y empresarial hemos unido esfuerzo: Ing. Joel Méndez Pérez de la empresa Grupo Riego, S. A de C. V., y al Ing. Efraín Panama Tirado de la empresa Ingeniería en Riego Agrícola, S. A de C.V. Siempre mostrando profesionalismo y calidad en el trabajo y muy celosos en el hacer del agua un uso y manejo eficiente.



RESUMEN

En sus diferentes variables de los fenómenos meteorológicos es común observar series de eventos que ocurren aleatoriamente en el tiempo. Los procesos de Poisson proporcionan modelos probabilísticos apropiados para explicar el número de eventos que se producen a partir de un cierto fenómeno: caso de la hidrología es frecuente relacionar la distribución de Poisson con la ocurrencia de los eventos de precipitación. La Ley Fuga o modelo Poisson-Exponencial, consiste en utilizar simultáneamente una Ley de Poisson para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento y una distribución Exponencial para expresar la magnitud media de dicho evento; concebida originalmente para simular las fugas de gas en una red de distribución en Francia, he allí su nombre y que en la actualidad tiene aplicaciones importantes en la hidrología. En este trabajo de tesis se introducen las bases teóricas de la Ley Fuga o modelo Poisson-Exponencial y la estimación de sus parámetros por los métodos de Máxima Verosimilitud y de Momentos, principalmente. Como parte de la validación se demuestra la bondad del modelo de asociarlo con una ley de valores extremos. Se presenta un estudio de caso, aplicando la metodología para conocer el régimen de precipitaciones en la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval (RH-36) de la República Mexicana. A través del conocimiento de los dos parámetros del modelo (λ y β), los cuales se pueden asociar con variables físicas es posible conocer con detalle la distribución espacial y temporal de la lluvia. Como una aplicación adicional se presenta el uso del modelo Poisson-Exponencial en estudios de sequías, donde los parámetros de la distribución se relacionan con el Índice Estandarizado de Sequía, SPI, dando lugar a un índice modificado que representa mejor la variabilidad espacial de los periodos secos en la cuenca. De acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación del modelo en la hidrología se considera que su uso permite profundizar en el conocimiento de la climatología regional.

Palabras clave: Ley Fuga, modelo Poisson-Exponencial, Distribución de Poisson, régimen de precipitación, índice estandarizado de precipitación.



ABSTRACT

In their different variables of the meteorological phenomena it is common to observe series of events of random occurrence in time. Poisson processes lead to probabilistic models that are appropriate to explain the number of events produced by certain phenomena. For instance, case of the hydrology is quite frequent to relate the Poisson distribution to the occurrence of rainfall events. The Law of Leaks or Poisson-exponential model consists of the simultaneous use of a Poisson law for the representation of the probability of occurrence of an event and an exponential distribution applied to the mean magnitude of such event. Originally introduced to simulate gas leaks in distribution networks in France, there is their name there and that at the present time it has important applications in the hydrology. In this thesis work the theoretical bases of the Law or Poisson-exponential model are introduced and the estimate of their parameters for the methods of Maximum Verisimilitude and of Moments, mainly. As part of its validation, the reliability of the model is demonstrated when associated to a law of extreme values. Also, some applications are included, such as the further knowledge of the precipitation regime of the hydrologic region No 36 Nazas-Aguanaval (RH-36) in the Mexican Republic. Through the knowledge of the two parameters of the law (λ and β) which can be associated to physical variables, it is possible to determine the temporal and spatial distribution of the rain in detail. As an additional application, the use of the law for drought analysis is shown. Here, the parameter of the distribution are related to the Standardize Precipitation Index, SPI, allowing to coin a modified SPI that much better represent the spatial variability of drought periods in the watershed. According to the results presented in this paper, the use of the law of leak in surface hydrology processes allows to deep in the knowledge of regional climatology.

Keywords: Leak Distribution, Poisson distribution, precipitation regime, Standardize Precipitation Index



CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
CONTENIDO	vii
APÉNDICES	viii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Definición del problema	5
1.3. Objetivo y alcance de la investigación	6
1.4. Metodología y técnica de investigación	7
1.5. Estructura de la investigación	10
2. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1. El cambio climático y su efecto en la frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos	13
2.2. Las inundaciones y sequías en el contexto hidrológico	21
2.2.1. Inundación	21
2.2.2. Sequía	26
2.3. Tratamiento de los eventos hidrológicos extremos con modelos probabilísticos ...	41
2.3.1. Función de distribución de variables aleatorias continuas	41
2.3.2. La función de distribución de probabilidad de Poisson	46
2.3.3. La función de distribución de probabilidad Exponencial	46
2.3.4. La función de distribución de probabilidad Gumbel	48
3. ÁREA DE ESTUDIO: LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36 NAZAS-AGUANAVAL (RH-36)	50
3.1. Descripción de la zona de estudio	50
3.2. Distribución espacio-temporal de la precipitación	53
3.3. Regionalización de las precipitaciones en la RH-36	62
4. VALIDACIÓN DEL MODELO RIESGO CONJUNTO INUNDACIÓN-SEQUÍA	66
4.1. La función de distribución de probabilidad conjunta Poisson-Exponencial	66
4.2. Validación del modelo	73
5. APLICACIÓN DEL MODELO RIESGO CONJUNTO INUNDACIÓN-SEQUÍA EN LA RH-36	84
5.1. Estimación conjunta inundación-sequía	84
5.2. Análisis de resultados	97
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	102



APÉNDICES

A	LA RH-36 EN LA ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIÓN A NIVEL DE REGIÓN HIDROLOGICA-ADMINISTRATIVA Y REGIÓN HIDROLÓGICA.	111
B	ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS UBICADA EN LA RH 36	116
C	ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS POR SUBREGIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36.	127
D	VALIDACIÓN DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE ESCALA (β) Y FORMA (λ) DE LA LEY FUGA PARA ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36.	138
E	RESULTADOS DEL PROGRAMA HYFRAN PARA DETERMINAR LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE ESCALA (β) Y FORMA (λ), A TRAVÉS DEL MÉTODO DE MOMENTOS, USANDO SIMULTÁNEAMENTE LA LEY POISSON Y LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL, EN LAS ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36.	164
F	EVOLUCIÓN ESPACIAL DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIAS (λ) Y EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LA ALTURA MEDIA DE LLUVIA POR EVENTO (β) EN TODA LA RH-36, Y EL RIESGO HIDROLÓGICO (β_{GUMBEL}).	170
G	EL PARÁMETRO (λ) DE LA LEY FUGA Y SU PAPEL COMO ÍNDICE DE SEQUÍA.	183



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1.	Variabilidad climática y efectos proyectados a nivel mundial 13
2.2.	Impactos previsibles por el impacto del cambio climático en México 17
2.3.	Número de desastres naturales en el mundo, periodo 1995-2004 20
2.4.	Estadística de población muerta y afectada, según el periodo. 20
2.5.	Definición del grado de aridez según el criterio del cociente de evapotranspiración 30
2.6.	Clasificación climática, criterio de Martonne (De Martonne, 1926, mencionado por INIFAP, 2006) 30
2.7.	Clasificación de la aridez según el criterio del cociente de evapotranspiración (Escalante y Reyes, 2005) 31
2.8.	Clasificación de las sequías con base en la superficie afectada (Medina y Espinoza, 1998) 32
2.9.	Clasificación de la sequía con base en el criterio de la Normal (INIFAP, 2006) 33
2.10.	Clasificación de las sequías mediante la técnica de los deciles (Medina y Espinoza, 1998; mencionado por INIFAP, 2006) 34
2.11.	Clasificación de la sequía, según criterio de los Percentiles de lluvia anual (INIFAP, 2006) 35
2.12.	Clasificación de la sequía, de acuerdo con el SPI (U.S. Drought Monitor, 1999, mencionado por Nuñez, 2007) 36
2.13.	Clasificación de la sequía, Palmer, PDSI (Kart y Knight, 1985, citado por Escalante y Reyes, 2005) 40
3.1.	Climas de la república mexicana en relación a la lámina precipitada 54
3.2.	Información del comportamiento de la precipitación y datos históricos 55
3.3.	La Región hidrológica 36 sujeta a condiciones de sequía, determinado por el índice de precipitación estándar 60
3.4.	Comportamiento de la precipitación en la cuenca del Nazas (en porcentaje del total anual) 64
4.1.	Parámetros de escala y forma usando simultáneamente la Ley de Poisson y función de distribución Exponencial 75
4.2.	Validación de los valores de los parámetros de escala y forma de la Ley Fuga 75
4.3.	Valores obtenidos del SPI método tradicional y el valor de SPI* modificado 83
5.1.	Parámetros de escala (β) y forma (λ) diario en los cuatro meses consecutivos por el método de Momentos en la RH-36 85
5.2.	Determinación del riesgo de lluvia extrema (β_{Gumbel}) y sequía (λ_{Gumbel}) correspondiente al mes de agosto en toda la RH-36 93
5.3.	Valores obtenidos del SPI método tradicional y el valor de SPI* modificado. 96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Grado del derretimiento de hielo del mar Ártico	15
2.2. Comportamiento del derretimiento anual del polo norte	15
2.3. Lapso de tiempo para estabilizarse el nivel del mar, la temperatura y la concentración de bióxido de carbono	16
2.4. Emisión de Bióxido de carbono (CO ₂) por país en el año 2000	16
2.5. Catástrofes relacionadas con eventos naturales extremos en el mundo en el 2005	19
2.6. Mapa de precipitación anual registrada para el 2006 y media mensual histórica de 1941-2000	23
2.7. Identificación de sequías por el método de truncamiento, oferta menos demanda	28
2.8. Interrelación entre los diversos tipos de sequías	29
3.1. Distribución espacial de las 13 regiones hidrológico-administrativas en México	50
3.2. Figura 3.2. Distribución espacial de las 37 regiones hidrológicas en México	51
3.3. Localización geográfica de la Región Hidrológica 36	52
3.4. Cuencas y Subcuencas de la Región Hidrológica 36	52
3.5. Distribución de la precipitación en la republica mexicana	53
3.6. Principales tipos de clima en México (Tomado del INEGI, 2007)	54
3.7. Relación entre la frecuencia de impacto directo de ciclones tropicales y la precipitación normal	55
3.8. Comportamiento de la precipitación de México y la anomalía presentada en el 2006	56
3.9. Distribución de la lámina media anual de lluvia para el periodo 1941-2005	56
3.10. Distribución espacial de las 37 regiones hidrológicas en México	57
3.11. Isoyetas de la distribución espacial de la precipitación media anual en toda la RH-36	57
3.12. Comportamiento de la lluvia a nivel nacional y en la RH-36, histórica y al 2006	58
3.13 a. Estaciones con porciento de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, sub-región árida	59
3.13 b. Estaciones con porciento de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, semi-árida	59
3.13 c. Estaciones con porciento de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, sub-húmeda	60
3.14. Regiones pluviométricas basadas en características climáticas y físicas	62
3.15. División de la RH 36 en tres regiones geoclimáticas	63
3.16. Distribución espacial del coeficiente de variación inter-anual en la RH-36	64
4.1. Funciones de densidad y acumulada para diferentes valores de λ	70
4.2. Distribución de la lluvia diaria para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003)	75
4.3. Distribución de la lluvia acumulada en diez días, para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003)	76
4.4. Distribución de la lluvia mensual para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003)	76



4.5.	Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 10 días en la sub-región árida de la RH-36.	77
4.6.	Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 10 días en la sub-región semi-árida de la RH-36.	78
4.7.	Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 10 días en la sub-región Sub-Húmeda de la RH-36.	78
4.8.	Comparación del ajuste con los parámetros de escala para el análisis de lluvia máxima aplicado al mes de agosto en la estación Agua Nueva San Pedro de las Colonias ($\beta_{\text{Poisson/Exp}}=7.89$; $\beta_{\text{Gumbel}}=7.78$).	80
4.9.	Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 1 mes para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.	82
4.10.	Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 3 meses para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.	82
4.11.	Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 12 meses para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.	82
5.1.	Comportamiento de los parámetros de escala (β) y forma (λ) diario en los cuatro meses consecutivos en la RH-36.	86
5.2.	Relación de las isoyetas de lluvia anual respecto al entorno topográfico.	87
5.3.	Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1de junio.	90
5.4.	Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1de agosto.	90
5.5.	Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1de septiembre.	91
5.6.	Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1de junio.	91
5.7.	Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1de agosto.	92
5.8.	Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1de septiembre.	92
5.9.	Media inter-anual de la altura media de lluvia por evento, riesgo de lluvia extrema para el mes de agosto en la RH-36.	94
5.10.	Media inter-anual del número de eventos por día para el mes de agosto, riesgo de sequía para el mes de agosto en la RH-36.	94
5.11.	Índice de sequía SPI-1, estimado según el procedimiento tradicional. Valor para el mes de agosto, año 1980.	96



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

A nivel mundial el crecimiento exponencial de la población cada vez ha exigido el permanente desarrollo de las actividades económicas y de la industria, situación que ha generado un costo ambiental irreversible por encima de los beneficios materiales de ellos obtenidos. Ejemplo de esto es el aumento de la temperatura en el planeta que hace más de veinte años habían advertido los estudiosos en la materia debido a la actividad industrial.

La revolución industrial es el inicio de una serie de impactos negativos en el medio ambiente, tal como el cambio en la composición de la atmósfera generadora del cambio climático mundial, en donde los gases de efecto de invernadero natural (vapor de agua, bióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono) que tienen la capacidad de retener el calor emitido a la superficie terrestre al mantener y regular la temperatura en la tierra y cuya cantidad es solo el 1% de la composición atmosférica, se tornan aumentadas con los gases generados por las actividades humanas, desencadenando altas temperaturas que tienen consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo. El principal generador de gases de efecto invernadero de origen antropogénico es el uso indiscriminado e ineficiente de los combustibles fósiles.

El cambio climático mundial es muy evidente en nuestros días ante la presencia de climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos; las áreas de los casquetes polares y cúpulas de hielo se ven disminuidas provocando el aumento en el nivel del mar e inundación de zonas costeras; en otros casos, los veranos son cada vez más cálidos y los patrones de las lluvias se modifican dando lugar a una variación en la frecuencia de sequías e inundaciones.



A nivel mundial, la estadística de los desastres naturales coloca a los fenómenos de tipo atmosférico como el principal generador de víctimas mortales e importantes pérdidas económicas, solo en el siglo XX 3.2 millones de personas perecieron por este motivo, equivalente a más de la mitad de los fallecidos por desastres naturales en el mundo (Grupo de Trabajo 23, 2007; IPCC, 2007).

Estos eventos atmosféricos extremos, las lluvias intensas y sequías, guardan ciertas particularidades intrínsecas; por ejemplo, la presencia de tormentas, con una duración e intensidad prolongada, tienen la característica de ser medianamente previsibles en tiempo y espacio; más no así en el caso de las sequías, las cuales solo se pueden realizar escenarios. En ambos casos se determina la exposición y vulnerabilidad del ser humano frente a dicho peligro, creando las herramientas necesarias para mitigar los efectos negativos.

En México como en otras partes del mundo la precipitación es un fenómeno complejo de estudiar debido a la heterogeneidad espacio-temporal en que ocurre tanto por la posición geográfica como la orografía, entre otros factores. Para mitigar los daños y disminuir la vulnerabilidad a la que hace referencia la estadística inicialmente mencionada, es necesario realizar estudios más localizados focales y detallados, con un fundamento riguroso y consistente, que permitan aportar un pleno conocimiento del fenómeno.

Los tratamientos que se le han dado al problema han sido diversos, dependiendo del enfoque disciplinario y alcance profesional, pero más han sido en el estudio de los impactos ambientales, económicos y sociales que aquejan al ser humano y que a través de conclusiones basadas en metodologías científicas valoran la vulnerabilidad y tratan de mitigar los desastres al generar estimaciones, las cuales contemplan: estudiar el fenómeno, caracterizarlo, ubicarlo en el espacio y en el tiempo, limitarlo, hacer estimación de daños por análisis de frecuencias para su pronóstico, análisis de peligro, análisis de vulnerabilidad y análisis de daños, y en muchos de los casos acudir a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar mapas de un área puntual (local, municipal o estatal) y regionales.



Distintas vías de investigación científicas dentro del campo de la hidrología han apuntalado el desarrollo de diversas metodologías que se utilizan para explicar y predecir las variaciones en la distribución espacio-temporal de la precipitación, todas ellas enfrentando un problema central caracterizado en que: la ocurrencia de éste fenómeno meteorológico es poco pronosticable, es decir existen distintas fuentes de incertidumbres asociadas que van desde el fenómeno en si que es la lluvia, la selección del modelo matemático y la estimación de los parámetros del modelo; por otro lado, los procesos hidrológicos son muy complejos y no existe una teoría completa para describirlos. De éste último punto resalta la importancia de contar con teorías científicas que permitan realizar predicciones con menores niveles de incertidumbre y utilizar modelos explicativos cuyas aplicaciones sean de dominio y bien conocidas. En esta circunstancia del manejo del problema de la precipitación, en los últimos años se ha observado la presencia de una nueva familia de modelos matemáticos que tienen como objetivo explicar los procesos físicos y producir una respuesta en términos probabilísticos.

Al respecto, para profundizar en el conocimiento de la climatología de una región o área de estudio y tener una herramienta para representar el comportamiento de fenómenos hidrometeorológicos, así como evaluar el riesgo hidrológico asociado con inundaciones o sequías, se ha virado como idea central de este trabajo hacia formulaciones basadas en las leyes de la probabilidad, aplicando un esquema probabilístico, basado en la ley de Poisson, para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento, y una distribución Exponencial para expresar la magnitud media de dicho evento.

El utilizar simultáneamente ambos modelos Poisson-Exponencial es lo que se le llama La Ley Fuga (Babusiaux, 1969, y Ribstein, 1983). Esta Ley tiene todo un sustento matemático, cuyas bondades en la aplicación a la hidrología estocástica son innumerables; permite conocer el régimen de precipitación en una región determinada, los dos parámetros de la Ley se pueden asociar con variables físicas y con ello conocer con detalle la distribución temporal y espacial de la lluvia, además de encontrar relaciones simples de los parámetros con el entorno geográfico y físico de estudio. Los resultados de este modelo son consistentes con la descripción de los cambios asociados con los fenómenos extremos (evolución del parámetro de escala λ), es muy adaptable a la



estimación del riesgo hidrológico y por ende establece las bases para el conocimiento de la climatología regional.

Los procesos de Poisson son modelos probabilísticos apropiados para explicar el número de eventos que ocurren o se producen a partir de un cierto fenómeno (López *et al.*, 2002). Esta distribución de probabilidad tiene múltiples tratamientos, y entre los cuales se mencionan los siguientes: en el caso de la hidrología, la aplicación frecuente consiste en relacionar la distribución de Poisson con la ocurrencia de los eventos de precipitación para explicar, por ejemplo, el intervalo de ocurrencia de precipitaciones en el que la intensidad y la duración se presentan como dos variables aleatorias independientes (Tapsoba, 1997; Bacchi, *et al.*, 1994; Le Barbé *et al.*, 2002 y Gutiérrez, 2003); igualmente, se ha extendido el empleo de esta distribución para construir modelos estocásticos de precipitación horaria que preserve el patrón de ocurrencia de los eventos lluviosos a través del año, así como para variar las características de duración, magnitud e intensidad de la precipitación entre otros eventos (Istok y Boersma, 1988; Abi-Zeid, *et al.*, 2003); incluso estudios tan precisos como cuantificar el número de gotas están basados en esta distribución; por su parte Calder (1986) propuso un modelo estocástico de modelación de precipitación que relaciona a través de la distribución de Poisson el número promedio de gotas de lluvia retenidas en una superficie dada con el número promedio de gotas de lluvia caídas. Los modelos *Poissonianos* proporcionan una explicación racional del porqué las superficies del suelo se humedecen en forma gradual y asintótica. Asimismo, esta distribución permite considerar la intensidad y la duración como variables aleatorias bivariadas, cada una con distribución Exponencial marginal (Bacchi, *et al.*, 1994).

En el caso de la aplicación del esquema conjunto de la distribución Poisson-Exponencial, resulta útil para caracterizar el movimiento de tormentas con diferentes estructuras y posiciones, una base más para afirmar que el proceso de Poisson es una herramienta adecuada para representar el comportamiento de fenómenos hidrometeorológicos; también es posible usar el modelo para evaluar el riesgo hidrológico asociado con inundaciones y sequías en forma simultánea (Gutiérrez, 2003), en este caso permite demostrar que los parámetros de las dos distribuciones están relacionados a través de un factor de reducción de varianza que es función de la estructura de correlación espacial de la precipitación.



La distribución de probabilidad Exponencial, la Gumbel y la Gamma se usan en la hidrología estocástica para el análisis de eventos extremos máximos, esto quiere decir que de una manera esta relacionada la Gumbel por una ley de valores extremos. Al respecto, suponiendo que la lámina media por evento de precipitación sigue una distribución Exponencial, el parámetro de escala ajustado a partir de la serie de lluvia diaria adquiere el mismo valor que el parámetro de escala de la distribución Gumbel, obtenido al ajustar los valores máximos de lluvia mensual (Sivapalan y Blöschl, 1997; Gutiérrez, 2003); trabajos similares, remplazando la distribución Exponencial por la distribución Gamma, han sido desarrollados en cuencas con registros de precipitación horaria, en el centro del Reino Unido y en Estados Unidos (Onof y Wheeler, 1993; Wilks, 1998). Las aplicaciones en estudios realizados manejando conjuntamente las distribuciones Exponencial y Gumbel en forma conjunta destacan los que relacionan la precipitación con el relieve; si se considera que la precipitación sigue una tendencia Exponencial de decrecimiento con la altitud y de esta forma, con las características topográficas del relieve, un análisis de componentes principales (de un modelo digital en elevación) proporciona un conjunto de variables que describen el ambiente topográfico ligados con los parámetros de la distribución Gumbel y la intensidad de precipitación (Singh y Kumar, 1996; Wotling, *et al.*, 2000). En ese mismo contexto, la distribución Gumbel es usada como una aproximación a la distribución de probabilidad de extremos del modelo bivariado Exponencial (Bacchi *et al.*, 1994).

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El carácter complejo que presenta el estudio de la precipitación en su distribución espacio-temporal y la importancia cada vez de poder representar el comportamiento extremo para evaluar el riesgo hidrológico, hace que se tenga la necesidad de aplicar herramientas más precisas en el tratamiento del problema, esto con tal de obtener un conocimiento más completo del mismo, que ofrezca ventajas en su aplicación y sencillez en el manejo de los parámetros que de él resulten para encontrar relaciones simples con el entorno geográfico y físico del área de estudio.

Las cualidades mencionadas y necesarias para el conocimiento del problema es posible alcanzarlas a través de la aplicación de un modelo Poisson-Exponencial, Ley Fuga, un modelo probabilístico con todo un sustento matemático, ya usada en la hidrología y aplicada en otros países, caso de México los estudios realizados por Gutiérrez, 2003, y en otros países como: Nigeria y Benin los



desarrollados por Lebel y Le Barbe, 1997; Burkina Faso, los realizados por Tapsoba, 1997; y en Togo, los desarrollados por Seguis, 1988.

Con esta exposición de las virtudes que ofrece el modelo probabilístico de la Ley Fuga, en el presente trabajo se hará la difusión de las bases teóricas del modelo, aunado los métodos para la estimación de sus parámetros, así como la asociación con variables físicas de los parámetros obtenidos. El área de estudio para la aplicación del modelo es la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval (RH-36), lo que permitirá describir los cambios asociados a los fenómenos extremos para tener un pleno conocimiento de ello.

Como resultado en aplicación de esta metodología se conseguirá estimar el riesgo hidrológico y así mismo poder profundizar en el conocimiento de la climatología regional del lugar de estudio.

1.3. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de la investigación consiste en formular un riesgo conjunto, Inundación-Sequía, a través de la aplicación de un modelo probabilístico, modelo Poisson-Exponencial, para evaluar el riesgo hidrológico asociado con inundaciones y sequías en forma simultánea.

Los objetivos particulares son:

1. Obtener un modelo probabilístico, Poisson-Exponencial, cuyos parámetros de forma (λ) y escala (β) tengan un significado físico bien definido, en donde uno de ellos represente el número de eventos (días de lluvia o sequía) y el otro la magnitud promedio de dicho evento.
2. Que el modelo permita la desagregación temporal de eventos estimados, que con una simple multiplicación de los parámetros estimados por el valor del intervalo de tiempo se pueda conocer a diferentes escalas temporales el número de eventos ocurridos.
3. Demostrar que uno de los parámetros de la distribución mezclada Poisson-Exponencial es igual al parámetro de la distribución Gumbel, cuando se ajusta ésta última a una serie de máximos;



esto con la hipótesis de que la distribución mezclada Poisson-Exponencial representa fenómenos extremos de sequía o de inundación debido a que contiene una distribución de extremos.

4. Correlacionar el parámetro de una distribución de probabilidad Poisson con el índice de aridez SPI, el cual permita estimar de manera rápida y confiable un índice de aridez, cosa que en lo general es difícil de estimar y sobre todo de interpretar.

1.4. METODOLOGÍA Y TÉCNICA DE INVESTIGACIÓN

Se realizó la revisión bibliográfica de los estudios realizados en relación con el riesgo hidrológico de naturaleza inundación-sequía. Se hace hincapié en el calentamiento global como uno de los fenómenos que origina este desajuste climatológico, así mismo se analizan las predicciones de altas y bajas temperaturas, el derretimiento de las masas de hielo continental, las elevaciones del nivel del mar, entre otros contrastes.

Se llevo a cabo la revisión bibliográfica de los modelos de probabilidad, Ley de Poisson, Exponencial y Gumbel, como modelos estadísticos en los cuales versa esta investigación, enunciando las expresiones que determinan los parámetros de forma y de escala, así como los principios en los cuales se basan estas formulaciones.

De la estadística del agua 2007 (CONAGUA, 2007), se hizo un análisis del comportamiento de la precipitación en el país y en la Región Hidrológica 36 (RH-36), determinando valores promedio, máximos y mínimos de láminas de lluvia, del orden mensual y anual, así como el periodo histórico ocurrido de escasez de lluvia. Los valores de láminas de precipitación mensual y anual sirven de referencia para describir a groso modo la forma en que se distribuye en el tiempo y espacio, encontrando las relaciones que guardan respecto a la altitud y la orografía, típica de la región del norte.



Se hizo la descripción geográfica de la RH-36, y se revisaron los estudios que se han hecho en relación con la distribución espacial de la precipitación, detallando la superficie, sub-regiones y su representación en planos, principalmente.

De una lámina de la RH-36, presentada por Descroix *et al.*, 1997, se eligieron las estaciones climatológicas para cada una de las sub-regiones geoclimáticas, evitando el efecto de abundancia al escoger solo aquellas que tuvieran la información completa sin datos faltantes; con las coordenadas geográficas y el auxilio del programa ERIC II (IMTA, 2000) se extrajo la información de precipitación diaria. De esta forma, de un total de 201 estaciones reportadas en la RH-36 solo fueron elegidas 29 estaciones por su representatividad, extensión de la serie histórica e información diaria completa.

Procedimiento de obtención de los parámetros de escala y forma

1. De los datos históricos de cada estación, agrupadas por sub-región, se seleccionó la información de los meses de junio, julio, agosto y septiembre; para ello solo se dejaron los años en cuyo mes específico los 30 o 31 días contaban con información de lámina de precipitación. Una vez seleccionado el año con la información mensual de lámina diaria de lluvia se quitaron los valores de cero precipitación diaria y con la lista de valores resultados se hicieron intervalos de 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días. Esta forma de agrupar la información únicamente se realizó para el mes de agosto, para el resto de los meses se hizo un solo grupo, con intervalo de tiempo 1 día.

2. Preparada la información se usó el software HYFRAN para ajustar los datos a leyes estadísticas. HYFRAN fue desarrollado al Instituto Nacional de Investigación Científica-Agua, Tierra y Medioambiente (INRS-ETE) de la Universidad de Québec con el patrocinio de Hydro-Québec (el principal productor de energía hidroeléctrica del mundo) y del Consejo de investigación en las ciencias naturales y en ingeniería de Canadá (CRSNG). El software inicialmente se concibió para el análisis de frecuencia de eventos extremos, sin embargo tiene aplicación para todo estudio que requiera el ajuste de una distribución estadística con una serie de datos independientes e idénticamente distribuidas. Entre las leyes de probabilidad que considera está la familia Gamma,



otras distribuciones como la Exponencial, Gumbel, Ley Fuga, Normal, etc, y distribuciones mixtas, así como varios métodos de ajuste en la estadística de eventos extremos.

3. De lo anterior es como se obtienen los parámetros de forma (λ) y escala (β) usando el modelo Poisson-Exponencial (Ley Fuga), que nos indicarán el número de eventos con lluvia y la lámina media de lluvia por evento, según el intervalo de tiempo T.

4. A partir de estos parámetros, que se les puede dar un significado físico, se determinó el riesgo hidrológico, riesgo de lluvia extrema y riesgo de sequía; el primer caso se obtuvo aprovechando los resultados de la validación del parámetro de escala de la Ley Fuga (β) ajustada a la muestra de datos de lluvia diaria y que resulta semejante con el parámetro de escala de Gumbel tipo I ajustada a los eventos máximos anuales de un mes en específico, ambos para el mismo mes y periodo de registro; y el segundo caso queda establecido al representar el parámetro λ para un periodo máximo de 31 días (caso de agosto, mes estudiado).

5. Aprovechando que el parámetro λ del modelo Poisson-Exponencial representa por si solo un riesgo de sequía, a través de una relación sencilla se obtuvo el índice de sequía SPI, que es uno de los parámetros más aceptados y difundidos por la comunidad científica con tal de evaluar y monitorear las sequías. Los valores de SPI* modificado obtenidos de la relación mencionada se compararon con los valores de SPI de la forma tradicional, usando el programa de cómputo desarrollado por el “National Agricultural Decision Support System” de los Estados Unidos, que distribuye estas herramientas libremente en internet para uso no comercial de los investigadores, NADSS, 2004. Los resultados obtenidos del SPI* y el SPI tradicional al clasificarse resultan en la mayoría de los casos igual; por lo tanto, esto refleja la bondad que tiene el modelo aplicado en reproducir el fenómeno de la sequía.



1.5. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

La estructura del cuerpo de este informe consta de 7 capítulos que a continuación se detalla el contenido de cada uno.

En el capítulo uno se hace una introducción describiendo y justificando el tema de la tesis, esto es, haciendo hincapié en la importancia de la investigación y el planteamiento del problema que origina la necesidad de investigar sobre ello. Se especifica el objetivo general y sus objetivos particulares, así como la metodología y técnica de investigación. Se hace hincapié en la dimensión que tiene el problema de las inundaciones y sequías como fenómenos atmosféricos, y que su estudio es importante para mitigar los efectos negativos en la protección de las zonas más vulnerables espacialmente de la sociedad.

En el capítulo dos se hace una revisión de literatura que servirá para darle soporte teórico a los temas tratados en el proceso de desarrollo de la tesis. Se hizo la revisión del tema sobre el cambio climático, ya que es uno de los principales fenómenos que generan la presencia de eventos extremos provocado por el incremento de las concentraciones de gases de efecto de invernadero de origen antropogénico; se mencionan las estadísticas de la situación actual manejadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del 2007; los escenarios generados hasta el año 2050 para prevenir y alertar a la comunidad mundial de los efectos y repercusiones irreversibles, entre otros detalles. Como un subtema se analizan los conceptos de inundación y sequía, factores que los generan, y la forma de medir la dimensión de cada uno de ellos; en el subtema de la sequía se profundiza en el concepto de Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), ya que a nivel mundial es uno de las herramientas aprobadas para dimensionar la frecuencia, duración e intensidad de un fenómeno extremo como éste. En otros subcapítulos se manejaron las funciones de probabilidad que sirven para el tratamiento de los eventos hidrológicos extremos, caso de ello la Ley de Poisson, la distribución de probabilidad Exponencial y la de Gumbel tipo I.



En el capítulo tres se hace la descripción de la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval (RH-36), ubicándola geográficamente y considerando los estudios realizados en la consecución de obtener una regionalización de la precipitación, que es la base para analizar los resultados obtenidos de la distribución espacio-temporal de los parámetros de forma y escala; se revisó la estadística del agua en México presentando su naturaleza semiárida por ubicarse dentro de la zona tropical y zona subtropical y que genera una heterogeneidad extremosa en la distribución de la lluvia.

En el capítulo cuarto se realiza la validación del modelo riesgo conjunto inundación-sequía a través de la Ley fuga, usando información de precipitación diaria de las estaciones climatológicas de la RH-36. Para la estimación de los parámetros de forma (λ) y escala (β) se emplearon los métodos de momentos y máxima verosimilitud, y la prueba chi cuadrada (X^2) para seleccionar el mejor ajuste, que en este caso resultó el método de momentos; el comparativo, los parámetros simplificados λ^* y β^* se determinaron multiplicando el valor del parámetro de forma de un día por el intervalo de tiempo deseado, en tanto que el parámetro de escala permanece constante a lo largo del tiempo. Como validación se compararon los valores estimados de los parámetros de la serie de datos original en diferentes intervalos de tiempo y los estimados de manera simplificada, se realizaron histogramas de frecuencias y se aceptó aquellos en los cuales la variación no fuera superior al 20%.

Por otro lado, se ajustó la distribución Gumbel a los eventos máximos anuales del mes de agosto, encontrando que el parámetro de escala (β), interpretado como un índice de riesgo, es similar al obtenido usando el modelo mezclado Poisson-Exponencial; este resultado permite que estos valores puedan usarse como riesgo hidrológico, representando (λ) el riesgo de sequía, y (β) el riesgo de lluvia extrema. Y como un último análisis, se relacionó el parámetro de forma (λ) con el índice de precipitación estandarizado SPI (Standardized Precipitation Index). Para esto se empleó una relación empírica de un índice modificado SPI* que relaciona en la formulación el relieve y la topografía regional al contener en su expresión a λ , y se compararon estos valores con el SPI tradicional. De la clasificación de los resultados con el criterio del Nacional Drought Mitigation Center (NDMC, 2005) se encontró que el índice modificado SP* reproduce de manera confiable la distribución espacial del parámetro λ , definido como un índice de riesgo de sequía.



En el capítulo quinto se hace un estudio de caso en la formulación del riesgo conjunto Inundación-Sequía bajo el esquema probabilístico Poisson-Exponencial en la Región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval. Se emplearon los valores de los parámetros de forma y escala para construir la cartografía y para analizar la evolución espacial del número de días con lluvias (λ) y la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β). Como una segunda aplicación, se representa y estima el riesgo hidrológico ajustando la distribución Gumbel Tipo 1 a los eventos máximos del mes de agosto, esto debido a que los valores de β obtenidos con el modelo resultan iguales, de esto se obtienen dos planos, uno del comportamiento del riesgo de lluvia extrema, β , y otro del riesgo de sequía. Y como una tercera aplicación se compararon los valores obtenidos de SPI: uno resultado de la aplicación del parámetro λ en una expresión empírica que considera el relieve y la topografía regional y, el otro obtenido con el método tradicional, al respecto se pudo constatar que el parámetro λ representa al riesgo de sequía.

En el capítulo sexto se exponen las conclusiones y recomendaciones, haciendo hincapié de las virtudes que tiene el empleo de la Ley Fuga como una herramienta adecuada en el tratamiento del problema de eventos extremos, en nuestro caso la lluvia.

En el capítulo siete se menciona la bibliografía que se usó en el soporte de la información para corroborar los resultados encontrados y sustentar los comentarios al respecto vertidos.

Y finalmente se presentan ocho apéndices, del apéndice A al G se sustenta y detalla el procedimiento seguido y los resultados encontrados como parte de la validación del modelo Poisson-Exponencial, así como su aplicación en la RH-36; y en el apéndice H se presentan una serie de planos que representan la distribución espacio-temporal de la precipitación a través de los valores que adquieren los parámetros de forma y escala.



CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO EN LA FRECUENCIA DE FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS

Múltiples estudios han permitido identificar las causas de la presencia continua y cada día de la ampliación en los rangos de variabilidad climática y la probable intensificación de fenómenos hidrometeorológicos extremos, cambios drásticos en los regímenes de lluvias y la ocurrencia de sequías, cuyo efecto significativo es debido al cambio climático, provocado por el incremento de las concentraciones de gases de efecto de invernadero de origen antropogénico (crecimiento de la población, el crecimiento económico, la intensidad energética y las mezclas de combustibles fósiles) que se utilizan y cuya comprensión y entendimiento es importante para no restarle interés a la dimensión del problema que trae como consecuencia riesgos al exponer a las poblaciones humanas y al ecosistema.

El cambio climático en términos generales presenta un conjunto de efecto de gran significación, los cuales se listan en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Variabilidad climática y efectos proyectados a nivel mundial.

CAMBIOS PROYECTADOS	EFECTOS PROYECTADOS
1. Temperaturas máximas más elevadas, más días calurosos y oleadas de calor en casi todas las zonas terrestres.	a. Incidencia de defunciones y graves enfermedades en personas de edad y en la población rural pobre. a. Estrés térmico en el ganado y en la flora y fauna silvestre. a. Riesgo de daños a varios cultivos. a. Demanda de refrigeración eléctrica. c. Fiabilidad en el suministro de energía.
2. Temperaturas mínimas más elevadas y menos días fríos, días de heladas y días de frío en casi todas las zonas terrestres.	c. Morbilidad y natalidad humana relacionadas con el frío. c. Riesgo de daños para varios cultivos. b. Distribución y actividad de algunas plagas y vectores de enfermedades. c. Demanda de energía calórica.
3. Episodios de precipitaciones más intensas.	a. Daños provocados por inundaciones, desprendimientos de tierra y avalanchas.



	a. Erosión del suelo. a. Los escurrimientos de las inundaciones podría aumentar la carga de los acuíferos de algunas llanuras de inundación. a. Presión sobre los sistemas públicos y privados de socorro en caso de desastre y de seguro frente a inundaciones.
4. Mayor deshidratación veraniega en la mayor parte de las zonas continentales interiores de latitud medio y riesgo asociado de sequía.	c. Rendimiento de los cultivos. a. Daños en los cimientos de los edificios provocados por la contracción del suelo. a. Riesgo de incendios forestales. c. Calidad y cantidad de los recursos hídricos.
5. Aumento de las intensidades máximas de los ciclones tropicales y de la intensidad de las precipitaciones medias y máximas.	a. Riesgo para la vida humana, riesgo de epidemia de enfermedades infecciosas. a. Erosión costera y daños en los edificios de infraestructura de la costa. a. Daños en los ecosistemas costeros como los arrecifes de coral y los manglares.
6. Intensificación de las sequías e inundaciones asociadas con El Niño en muchas regiones.	c. Productividad agrícola y de los pastizales en las regiones expuestas a la sequía y a las inundaciones. c. Potencial de generación eléctrica en las regiones expuestas a la sequía.
7. Mayor variabilidad de las precipitaciones del monzón de verano en Asia.	a. Magnitud de las inundaciones y de las sequías y daños en las tierras templadas y tropicales de Asia.
8. Mayor intensidad de las tormentas de latitud media.	a. Riesgos para la vida y la salud humana. a. Pérdida de bienes materiales e infraestructura. a. Daños en los ecosistemas costeros.
Estas claves indican el grado de efecto: a. Aumento, b. Ampliación, c. Disminución.	

Adaptado de IPCC, 2001, mencionado por Garibaldi *et al.*, 2006.

Los gases de efecto de invernadero, determinados por el protocolo de Kyoto, son Bióxido de carbono, Metano, Oxido nitroso, Hidrofluorocarbonos, Perfluoro y Hexafluoruro de azufre; tienen la peculiaridad de ser eficientes en atrapar el calor que se emite en la superficie de la tierra, siendo sensible ante cualquier incremento que trae como consecuencia modificar las propiedades de la atmósfera y por consecuencia del clima (CICC, 2007 y Garibaldi *et al*, 2006)

De los resúmenes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, en su cuarto informe de evaluación 2007 (IPCC, 2007) denotan que: en los últimos cien años (1906-2006), la temperatura mundial ha sufrido un incremento del orden de 0.74 °C, y once de los doce años más cálidos han tenido lugar en 1995-2006; aumentó en el nivel del mar de 17 cm durante el siglo XX por el derretimiento de los casquetes y capas de hielo en un buen número de montañas, mares y en las regiones polares; otros cambios más regionales se reflejan en las alteraciones de las temperaturas y en el hielo del Ártico, cambios en la salinidad de los océanos, régimen de vientos, sequías, precipitaciones, frecuencia de olas de calor e intensidad de ciclones tropicales.

El Centro de Hadley del Reino Unido para la predicción y la investigación del clima (United Kingdom's Hadley Centre for Climate Prediction and Research) señalan una tendencia a la baja continua y significativa del hielo del mar Ártico por lo menos los últimos cincuenta años, esto es, la

superficie de hielo (en millones de km²) de septiembre del 2007 es casi 50% más bajo que durante los años 50's y los años 60's (ver figura 2.1.).

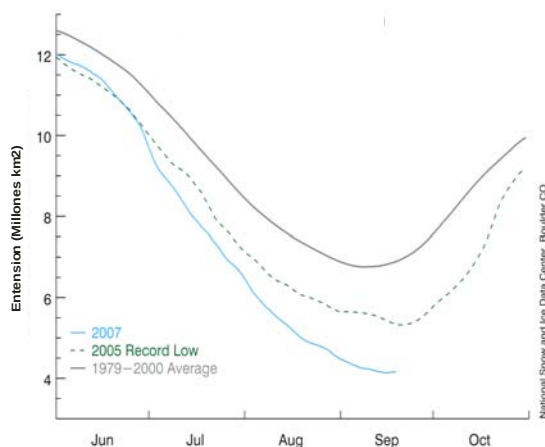


Figura 2.1. Grado del derretimiento de hielo del mar Ártico

Adaptado de: National Snow and Ice Data Center.

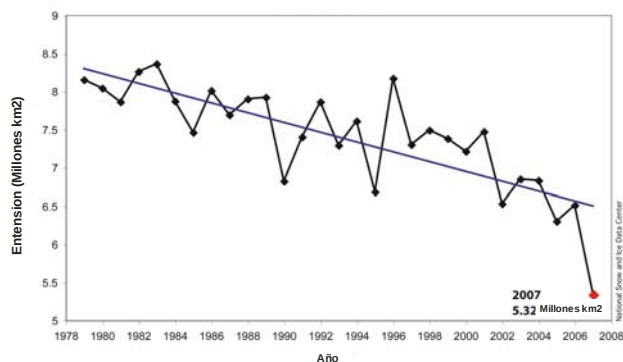


Figura 2.2. Comportamiento del derretimiento anual del polo norte.

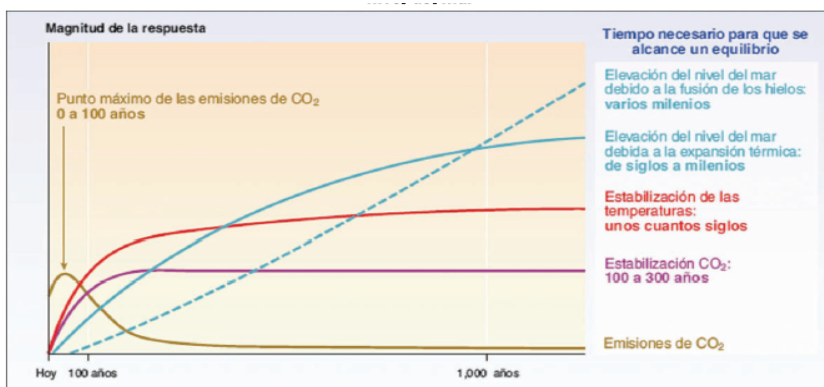
Adaptado de: National Snow and Ice Data Center.

El Nacional Snow and Ice Data Center de los Estados Unidos en sus registros mensuales y anuales menciona que el mar Ártico en agosto del 2007 el área de hielo bajó a 5.32 millones de kilómetros cuadrados, en comparación de agosto del 2005 que era de 6.30 millones de kilómetros cuadrados, es decir, la zona de hielo de agosto del 2007 es el 31% por abajo del promedio a largo plazo de 7.67 millones de kilómetros cuadrados, ver figura 2.2.

Según el IPCC, 2007, la perspectiva a futuro ante estos cambios son, aumento de la temperatura media mundial entre 1.8 y 4.0 °C del periodo que comprende de la década de 1980 hasta el fin del siglo XXI; hacia finales del siglo XXI se prevé un aumento de nivel medio del mar de entre 18 y 59 cm a escala mundial; otros cambios se reflejarán en la acidificación de los océanos, la disminución de la cubierta de nieve y del hielo marino, olas de calor y precipitaciones intensas más frecuentes, ciclones tropicales de mayor intensidad y corrientes oceánicas menos vigorosas; finalmente, si este calentamiento se prolonga durante muchos siglos podría provocar el derretimiento total del casquete polar de Groenlandia, que haría aumentar el nivel del mar en unos 7 metros.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001) reporta que ante una disminución de los gases de invernadero, los efectos inerciales continuarían; en el caso de la

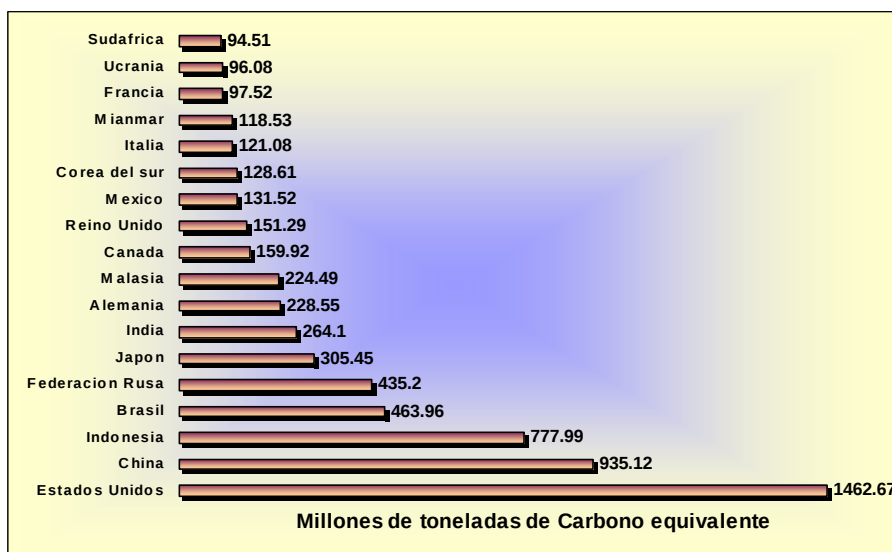
temperatura, de la superficie terrestre, seguirá con un incremento lento durante más de un siglo, la expansión térmica de los océanos continuará hasta mucho después de haberse reducido las emisiones de CO₂, y respecto a la fusión de las capas de hielo esta continuará aportando agua líquida durante muchos siglos a la elevación del nivel del mar. Ver gráfico 2.3.



Adaptado de: IPCC, 2001.

Figura 2.3. Lapso de tiempo para estabilizarse el nivel del mar, la temperatura y la concentración de bióxido de carbono.

En el periodo de 1950-2000, los mayores emisores de gases con efecto de invernadero por uso de energía fueron los Estados Unidos de América y la Unión Europea, y por deforestación y cambio del uso del suelo destacaron Indonesia y Brasil.



Fuente: World Resource Institute, 2003, Climate Analysis Indicators Tools (CAIT).

Figura 2.4. Emisión de Bióxido de carbono (CO₂) por país en el año 2000.



A nivel de América Latina y el Caribe, poco más del 70% de las emisiones de gas con efecto de invernadero proviene de Brasil, México, Venezuela y Argentina, y considerando también las emisiones de Colombia y Perú, el porcentaje alcanza el 83% (WRI, 2003).

Uno de los esfuerzos a que se ha llegado ante la preocupación del fenómeno del cambio climático es el Protocolo de Kyoto adoptado en 1997 y que entró en vigor hasta el 2005, en el cual se comprometió a 38 países y la Unión Europea, principales en generar el gas de efecto de invernadero, a reducir sus emisiones durante el periodo 2008-2012, teniendo como mecanismos de flexibilidad el apoyarse para la implementación, el comercio de emisiones y el mecanismo para un desarrollo limpio.

La ubicación de México como país en vía de desarrollo en su participación en el drástico cambio climático no es alentadora. El CICC (2007) menciona que en el año 2000 México contribuyó con alrededor del 1.5% de las emisiones anuales globales de gases de efecto de invernadero, ubicándolo en el lugar 13 entre los principales emisores del mundo, en el caso de la contribución histórica del periodo 1950-2000 ocupó el lugar 15 por emisiones de la quema de combustibles fósiles y de procesos industriales, y en la posición 16 por deforestación. Los principales impactos que se esperan a causa de esta situación se enumeran en el cuadro siguiente:

Cuadro 2.2. Impactos previsibles por el impacto del cambio climático en México.

Sector o área	Impactos
Condiciones climáticas y recursos hídricos	• Modificación de los regímenes de precipitación. • Mayor frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos (huracanes y ciclones tropicales, inundaciones, sequías, oscilación del Sur «El Niño-La Niña», etc.). • Incremento de escurrimientos superficiales y deslizamientos en algunas regiones. • Mayor azolvamiento en presas y embalses. • Intrusión de agua salada en acuíferos costeros por la elevación del nivel del mar. • Reducción drástica en la disponibilidad de agua por habitante en algunas regiones (D.F., Estado de México, Guanajuato, Jalisco).
Ecosistemas, biodiversidad y sus servicios ambientales	• Modificación de regiones ecológicas, migración de ecosistemas a mayores latitudes y altitudes. • Transformación de hábitats a tasas que excederán sus capacidades naturales de adaptación. • Extinción probable de bosques de coníferas y praderas de alta montaña y cambios importantes en al menos el 50% de los demás tipos de ecosistemas. • Reducción drástica de zonas de distribución de otros bosques de coníferas y encinos, así como bosques mesófilos de montaña. • Mayor incidencia de incendios forestales. • Pérdida de humedales que constituyen hábitats para especies migratorias. • Disminución en la abundancia de poblaciones de flora y fauna silvestres. • Incremento de la tasa de extinción, particularmente especies de distribución restringida. • Invasión de especies exóticas, que modificarán estructuras tróficas y eliminarán



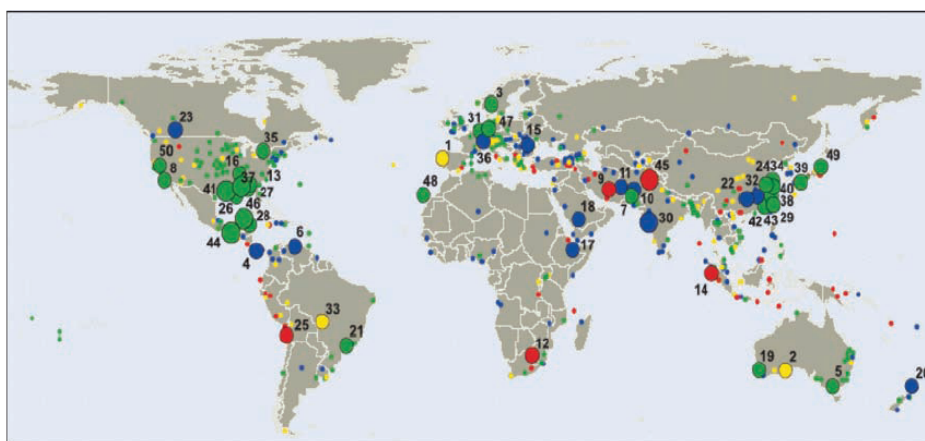
	- especies nativas. - Disminución de las capacidades de renovación de servicios ambientales de los ecosistemas. - Reducción de la producción de madera, celulosa y papel derivados de bosques de coníferas.
Zonas costeras	- Modificaciones en la distribución de las especies marinas de interés comercial y de la disponibilidad de recursos pesqueros, por cambios de temperatura y en las corrientes oceánicas. - Afectación de arrecifes coralinos, manglares, humedales, playas y zonas bajas, por elevación del nivel del mar. - Erosión de playas por mareas altas, tormentas y huracanes. - Riesgo de afectación a infraestructura costera; reducción del valor de inmuebles e infraestructura urbana. - Costos incrementales de las pólizas de aseguradoras. - Afectación a la piscicultura en zonas costeras y humedales. - Disminución de ingresos del sector turismo en las zonas costeras afectadas.
Degradación de tierras	- Incremento del deterioro, pérdida de suelos y avance de la desertificación en alrededor del 48% del territorio. - Incremento de la erosión hídrica y la incidencia de deslaves en zonas montañosas.
Agricultura y ganadería	- Disminución neta de la superficie apta para cultivar maíz de temporal y posible erosión de la agro-biodiversidad del maíz. - Reducción de los rendimientos de cultivos de maíz en algunas regiones. - Reducción de la superficie apta para la ganadería extensiva en el centro y norte del país debido a mayor aridez, sequías más agudas y degradación de tierras. - Riesgo incremental de siniestros causados por eventos hidrometeorológicos extremos en zonas productivas (sequías, inundaciones, huracanes). - Expansión de plagas por el cambio de condiciones ambientales. - Deterioro de los niveles de bienestar de la población rural.
Asentamientos humanos	- Riesgos incrementales de daños a infraestructuras urbanas, a las personas y a sus bienes. - Magnificación de las «islas de calor» en las ciudades (por carpeta asfáltica e inmuebles). - Riesgos incrementales de inundaciones y de sobrecarga en redes de alcantarillado. - Riesgos incrementales de inundaciones en zonas costeras y ribereñas. - Riesgos incrementales de deslaves y deslizamientos de tierra en zonas de pendientes. - Mayor contaminación atmosférica en cuencas urbanas. - Costos incrementales de las pólizas de aseguradoras. - Mayores requerimientos de energía para el control de temperaturas.
Energía	- Reducción de la capacidad de generación hidroeléctrica, debido a alteraciones en las precipitaciones y a mayor azolvamiento de presas y embalses. - Ampliación de la demanda de energía eléctrica en horas pico debida al incremento en el uso de sistemas de climatización. - Incremento en los costos de producción petrolera y de generación de energía eléctrica por la valorización económica de las emisiones de GEI a la atmósfera. - Riesgos incrementales de afectación a infraestructuras petroleras y petroquímicas por eventos hidrometeorológicos extremos, sobre todo en las costas del golfo de México. - Deterioro de torres y cables de transmisión eléctrica por eventos hidrometeorológicos extremos - Incremento de precios al consumidor.
Transporte y comunicaciones	- Daños a infraestructura (caminos, puentes, puertos, aeropuertos, ferrocarriles, torres y cableado de comunicación, etc.) por inundaciones y vientos asociados a eventos meteorológicos extremos. - Perturbación del transporte (especialmente aéreo y marítimo) por eventos meteorológicos extremos y por mayor incidencia de neblinas y lluvias torrenciales.
Industria	- Costos incrementales para el buen desempeño ambiental en instalaciones industriales. - Costos incrementales de las pólizas de aseguradoras. - Escasez e incertidumbre en el suministro de agua. - Disminución de la captura de divisas e ingresos por turismo, particularmente en zonas costeras. - Deterioro de las condiciones de trabajo en diversos sectores. - Mayores requerimientos energéticos para el control de temperatura.

Salud pública

- Incremento y redistribución de enfermedades transmitidas por vectores como los mosquitos (paludismo, dengue, etcétera).
- Mayor incidencia de enfermedades infecciosas relacionadas con la calidad del agua (cólera, tifoidea, etcétera).
- Incremento de la morbilidad y la mortalidad por ondas de calor y deshidratación.

Adaptado de CICC (2007).

Como una consecuencia de lo antes expuesto, en el 2005 las catástrofes relacionadas con eventos naturales extremos a nivel mundial relacionadas con el calentamiento global que más figuraron por su magnitud e intensidad, son los hidrometeorológicos que incluye a terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas, y las inundaciones y altas temperaturas (*Munich Re Group*, 2006).



El tamaño del círculo indica el grado del daño. Los colores indican las causas; **rojo**: geológicas (Terremoto, Tsunami y erupción volcánica); **verde**: hidrometeorológicas; **azul**: inundaciones; **amarillo**: altas temperaturas, deslizamientos de tierras y avalanchas.
FUENTE: Munich Re Group, 2006.

Figura 2.5. Catástrofes relacionadas con eventos naturales extremos en el mundo en el 2005.

La misma fuente antes citada indica que, en el 2005 los eventos extremos de origen hidrometeorológico-inundaciones, el costo de las aseguradoras ascendió a un pago superior a los 80 mil millones de dólares. Por su parte la aseguradora Swiss-Re (SWISS RE, 2006) reporta que el costo por las inundaciones de los huracanes que afectaron EEUU representan las mayores cifras de pérdidas tanto humanas como económicas: Katrina, 108.000 millones de Euros; Wilma, 16.000 millones de Euros y Rita, 12.000 millones de Euros. De esta última referencia, se deja ver que un país desarrollado incapaz en realizar bien la gestión en la prevención de riesgos naturales es muy susceptible a sufrir las mayores pérdidas económicas.



Cuadro 2.3. Número de desastres naturales en el mundo, periodo 1995-2004.

África	América	Asia	Europa		Oceanía	Total
Avalanchas / deslizamientos	11	44	112	19	8	194
Sequías	120	48	85	14	9	276
Terremotos / tsunamis	17	50	154	50	8	279
Temperaturas extremas	8	37	44	63	2	154
Inundaciones	277	267	432	199	35	1210
Incendios forestales	12	63	22	46	9	152
Erupciones volcánicas	4	23	13	2	6	48
Tormentas de viento	69	305	320	94	68	856
Otros	14	3	10	1	2	30
Total	532	840	1192	488	147	3199

Fuente: World Disasters Report 2005 de la International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, tomado del Grupo de Trabajo 23 Implicaciones Económicas y Sociales de los Riesgos naturales del Congreso Nacional del Medio Ambiente, España.

La tendencia de la ocurrencia de estos desastres del periodo de 2000-2004 ha presentado un incremento de 1.55 veces a lo presentado en el periodo de 1995-1999.

Las estadísticas de la población muerta y afectada por desastres naturales, promedio anual de la década de los 60's y 70's, en el mundo después de los terremotos se deben en su mayor parte a las sequías y a las inundaciones.

Cuadro 2.4. Estadística de población muerta y afectada, según el periodo.

Evento	Población muerta		Población afectada	
	1960-1969	1970-1979	1960-1969	1970-1979
Sequía	1010	23110	18,500,000	24,400,000
Inundaciones	2370	4680	5,200,000	15,400,000
Ciclones	10750	34360	2,500,000	2,800,000
Terremotos	5250	38970	200,000	1,200,000
otros	2890	12960	200,000	500,000

Fuente: Escalante y Reyes, 2005.

Los escenarios previstos, en caso de que las tendencias actuales persistan, es que para el año 2050 se tendrá una pérdida de 100,000 vidas por año bajo un costo de 300 millones de dólares.



2.2. LAS INUNDACIONES Y SEQUIAS EN EL CONTEXTO HIDROLOGICO

2.2.1. INUNDACIONES

De las múltiples definiciones de inundación, presentada por diversos investigadores, la oficial establecida por la OMM/UNESCO, “es el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”; definiendo al nivel normal como el tirante que alcanza el agua en su cauce definido. Por su parte el CENAPRED en su fascículo de Inundación (Salas y Jiménez, 2004) establecen una definición más completa y detallada, denominándola como, evento en el que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica resulta en un incremento del nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, la cual penetra hacia sitios en donde usualmente no la hay, generando daños en la población, la agricultura, la ganadería y la infraestructura.

En el caso de que el evento tenga una naturaleza de origen hidrometeorológico, su magnitud es función de la intensidad de la lluvia, de la distribución espacial y temporal, del tamaño de las cuencas hidrológicas en el que tiene lugar; también depende de las características del suelo, la infiltración o drenaje natural y artificial de las cuencas y el contenido de humedad en el suelo (Bremen y Lara, 2001 mencionado por Baró, et al. 2007¹).

El impacto de las inundaciones se evalúan con base en la susceptibilidad de una comunidad a presentar un alto grado de vulnerabilidad. Esta vulnerabilidad como depende de varios factores, como son: físicos, definido por la ubicación; aspecto social, referidos al nivel de bienestar y marginación de la población; económico, depende de la reserva monetaria, deudas, acceso al crédito y seguros; ecológicas, protección de la reserva ecológica y la biodiversidad; ello hace la necesidad de hacer un manejo adecuado de este conjunto de factores y procesos para anticiparse, hacer frente, resistir y recuperarse de la ocurrencia del peligro.

Es muy aventurado establecer una metodología de acción única contra las inundaciones para dar respuesta a todas las circunstancias y a todas las regiones y que asegure una protección completa, debido a la complejidad del evento. Por lo consiguiente, los planes de mitigación se han derivado del



resultado de diversos planes de acción tanto estructurales como no estructurales, tratando en primer lugar, como variables principales, a los factores directos que la provocan, como ejemplo esta la precipitación y su relación con la posición geográfica.

Dado a lo anterior se ha hecho un esfuerzo en profundizar en los trabajos que se realizan después de la presencia de un evento extremo de inundación, aunque las soluciones sean de carácter asistencialista en ese momento. Para esto han relacionado las características del fenómeno, datos hidrometeorológicos en días previos, láminas de lluvia y la intensidad, con los daños económicos y sociales; todo esto encaminado en realizar las estimaciones relativas a los daños que podrían evitarse al invertir en medidas preventivas, con la salvedad que a medida en que se adopta un criterio de minimizar los riesgos aumenta el costo de protección.

Una forma rápida y un tanto eficiente para caracterizar la magnitud de una inundación y estimar la severidad de los daños es a través de relacionar el caudal máximo instantáneo y la duración de la misma, así como la probabilidad de ocurrencia (Lopardo y Seoane, 2000).

Por su parte Kundzewicz y Takeuchi (1999) mencionado por Lopardo y Seoane, 2000, describieron a las inundaciones a través de características hidrológicas y socioeconómicas; dividiendo al aspecto hidrológico en directo que incluye al caudal máximo, altura máxima, volumen de la onda de crecida o área inundada, y en el caso del aspecto indirecto solo se incluye al período de retorno o la probabilidad de excedencia que implica la aplicación de un enfoque estadístico con modelos de valores extremos y la teoría de estimación de parámetros; y en el caso del aspecto socioeconómico que hace referencia a los impactos económicos de la ocurrencia, incluyen: número de víctimas y de evacuados, áreas inundadas, puentes destruidos, áreas de cultivo afectadas y pérdidas económicas.

Helweg (1992) y Boyle et al. 1998, mencionado por Baró *et al.* 2007² denotan que la estimación de los daños en zonas inundables, en su generalidad, implica cuatro tipos de análisis, estos son:

- Análisis de frecuencias. Consiste en realizar el pronóstico de eventos extremos.
- Análisis de peligros. Va aunado a los tipos de peligros que se relacionan ante inundaciones.

- **Análisis de vulnerabilidad.** Tiene por objeto estimar la extensión y severidad de los daños, y magnitud de las pérdidas, considerando el factor humano, hidrológico y el uso del suelo.
- **Análisis de daños.** Correlaciona el daño estimado y las características hidrológicas y económicas de la zona inundada.

La necesidad de definir estas medidas se fundamenta en el requerimiento de identificar objetivamente para qué crecida se toma la decisión de enfrentar la lucha contra inundaciones,

Baró *et al.* 2007¹, en su trabajo profundiza en la metodología para el establecimiento de las curvas por daños potenciales ocasionados por la inundación.

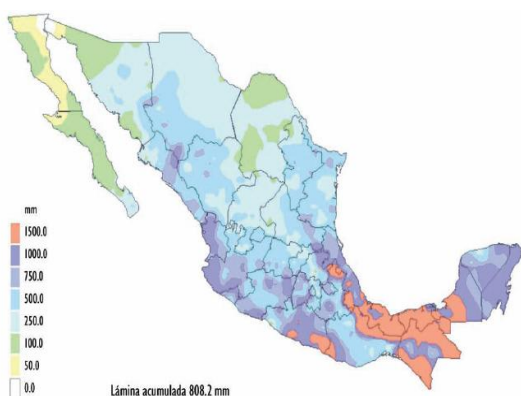
Clasificación de las inundaciones.

Según el CENAPRED (Salas y Jiménez, 2004), las inundaciones se pueden clasificar de la siguiente manera:

Por su origen.

❖ Inundaciones pluviales.

Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.



Fuente: Conagua, 2007.

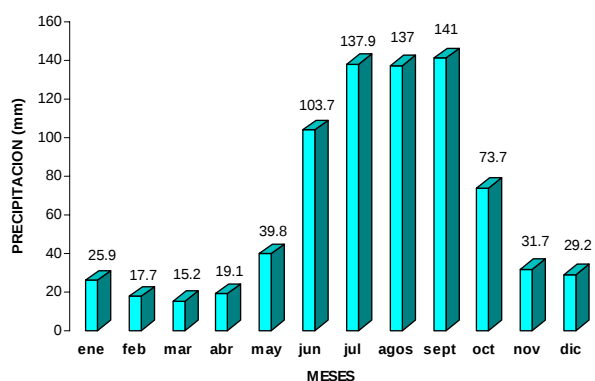


Figura 2.6. Mapa de precipitación anual registrada para el 2006 y media mensual histórica de 1941-2000.



Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte. Normalmente, en el caso de México estas precipitaciones son originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos, destacando los ciclones o huracanes, las lluvias orográficas, las lluvias invernales o frentes fríos, y las lluvias convectivas.

- o Para el caso de los ciclones o huracanes, éstos ocurren entre mayo a noviembre con pico de frecuencia a finales de agosto y durante septiembre, y cuya manifestación destructiva más conocida es en intensas precipitaciones, además de viento, oleaje y marea de tormenta. México se encuentra entre dos principales zonas generadoras de huracanes en el mundo, la del atlántico norte, que genera el 12% de los ciclones a nivel mundial, y la del pacífico nororiental, que genera el 20%, que es la más activa al concentrar la totalidad de los fenómenos en una franja mucho menos extensa que en el caso del atlántico, siendo esta situación única en el planeta.
- o Lo que concierne a las lluvias orográficas, éstas se originan por las corrientes de aire húmedo que choca con las barreras montañosas generando lluvias del lado del barlovento. En este tipo de lluvias el relieve es un factor determinante en la distribución de las lluvias.
- o Las lluvias invernales. Estas lluvias consisten en el desplazamiento de aire frío procedente de la zona del polo norte. En México se presentan en el noroeste con lluvias intensas, la vertiente del golfo de México y la Península de Yucatán.
- o Las lluvias convectivas. Se originan por el calentamiento de la superficie terrestre, en donde el aire que esta en contacto con esa zona cálida llega a calentarse más que los alrededores, dando lugar a corrientes verticales con las que asciende al aire caliente húmedo. Este tipo de lluvias en la ciudad de México cada año producen inundaciones en las zonas más bajas, pese a las obras de drenaje que se tienen.



❖ **Inundaciones fluviales.**

Se tienen cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. Son volúmenes de agua de precipitaciones registradas en algún punto de la cuenca tributaria. Las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con mayor desarrollo o que lleguen hasta las planicies costeras.

❖ **Inundaciones costeras.**

Tienen presencia cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno. Los vientos de los ciclones tropicales sobre la superficie del mar son los causantes de la marea de tormenta.

Otras inundaciones son por fallas de la infraestructura hidráulica, las cuales son poco frecuentes, y tienen su origen por un diseño escaso, mala operación, falta de mantenimiento o término de la vida útil.

Otra clasificación de las inundaciones basada en la duración, la magnitud de las áreas afectadas y el tipo de afectación es:

Inundaciones repentinas

Se generan por precipitaciones intensas en cuencas de respuesta rápida (*flash floods*). Ocurren con frecuencia en la periferia de las grandes concentraciones urbanas, donde el mismo desarrollo favorece los asentamientos humanos, como son barrancas deforestadas, etc. En México han tenido lugar en los ríos del poniente del Valle de México, arroyo del Topochico en Monterrey, arroyos de las serranías de Veracruz, Puebla y Acapulco.



Inundaciones de larga duración

Se presentan en zonas bajas, áreas extensas y se originan por el volumen acumulado de precipitación pluvial durante varios días o semanas. No son causantes de pérdidas humanas pero si de importantes pérdidas económicas en zonas urbanas y rurales.

Encharcamiento

Tienen lugar en sectores urbanos, con periodicidad anual y duración intermedia, con la consecuencia del retraso en el desarrollo de las actividades productivas de la población.

2.2.2. SEQUÍA

Las sequías como manifestación de las alteraciones climáticas asociada a las anomalías en gran escala de los patrones de circulación atmosférica, que a su vez son ocasionadas, entre otros factores, por el calentamiento global de la corteza terrestre y de las masas de agua, manifestado en fenómenos como El Niño, y también por los combustibles fósiles, la deforestación, el cambio de uso del suelo y la actividad antropogénica. Según Núñez *et al.*, 2007, la sequía es uno de los fenómenos naturales que afecta a más personas, se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, los efectos son acumulativos y pueden permanecer aún después de la culminación del evento; siendo este detalle lo que la distingue de otros fenómenos naturales.

Si la vulnerabilidad es un conjunto de condiciones y procesos que resultan de factores físicos, sociales, económicos, educativos, políticos y culturales de una región o sistema, que al final son los que incrementan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de un peligro (Escalante y Reyes, 2005), entonces los países desarrollados raramente la vulnerabilidad a las sequías representa una amenaza real debido a que disponen de los medios económicos, estructurales y no estructurales, suficientes para hacer frente a sus efectos; en tanto que en un país en vía de desarrollo la sequía trae como consecuencia conflictos sociales y el tinte que toma es de generadora de hambre, enfermedad y migración, es decir, más pobreza. Aparte de ello se ven aminorada la generación de energía y déficit en la recarga de acuíferos.



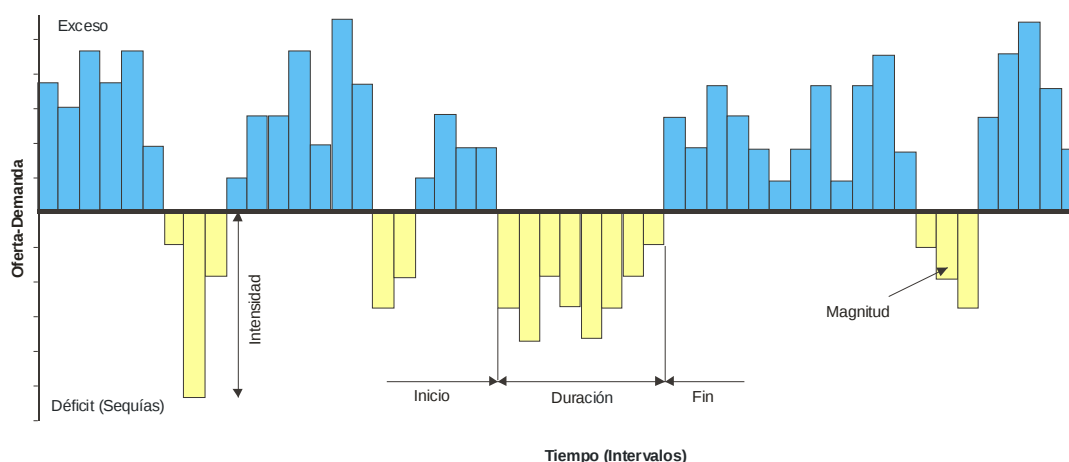
Existen en sí un sin número de definiciones de sequías que involucran diversos factores y enfoques y cuyas variables más empleadas para evaluarlas, solas o combinadas, son: precipitación, temperatura del aire, humedad del aire, evaporación en superficies libres, evapotranspiración, humedad del suelo, velocidad del viento y escorrentía. La conceptualización puede hacerse desde un punto de vista profesional (meteorología, hidrología, geografía, desarrollo de aprovechamientos hidráulicos, entre otros) o de la actividad económica que afectan (la agricultura, industria, producción de energía eléctrica, suministro de agua para consumo doméstico, navegación y recreación).

Alguna de las formas de apreciar a las sequías son:

- o La sequía es una situación en la que la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer las necesidades de los seres vivos, donde se condiciona la posibilidad de desarrollo adecuado a las poblaciones de plantas, animales y seres humanos.
- o La sequía es una propiedad normal y recurrente del clima, a la cual erróneamente se le considera algunas veces como un evento poco frecuente y aleatorio. Éste sucede virtualmente en casi todas las zonas climáticas, aun cuando sus características varían significativamente de una región a otra.
- o La sequía es un fenómeno temporal que resulta de la escasez o mala distribución prolongada de la precipitación. Estas anomalías de la precipitación dependen de las alteraciones en el comportamiento de los sistemas meteorológicos, que controlan el clima en los niveles de macro escala, meso-escala, o local.
- o Otra apreciación es considerarla como un desastre natural, originada por una deficiencia en la precipitación sobre un periodo extendido de tiempo. De tal manera que ocasiona escasez de agua para el desarrollo de actividades de grupos o sectores de la población.
- o Y otra forma de visualizarla es relacionando la ocurrencia temporal de las lluvias (retraso de las lluvias al inicio o ausencia de las lluvias en la temporada de crecimiento de cultivo), y la efectividad de las lluvias (intensidad y número de eventos).

Según la Universidad de Nebraska en Lincoln (UNL, 2003), la sequía es una característica intrínseca de la región, por lo que se deben definir acciones para predecir su frecuencia, intensidad y escala, en el tiempo y en el espacio.

Pero en lo general, se está de acuerdo en considerarlas como períodos prolongados de escasez de recursos hídricos capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos (Yevjevich *et al*, 1978; Beran y Rodier 1985: por Núñez-López, *et al.*, 2007, Escalante y Reyes, 2005).



Fuente: Fernández, 1997.

Figura 2.7. Identificación de sequías por el método de truncamiento, oferta menos demanda.

Según Dracup *et al.* (1980), Wilhite y Glantz (1985), y Chang y Kleopa (1991), mencionado por Núñez *et al.*, 2007, la sequía se clasifica en meteorológica, hidrológica y agrícola.

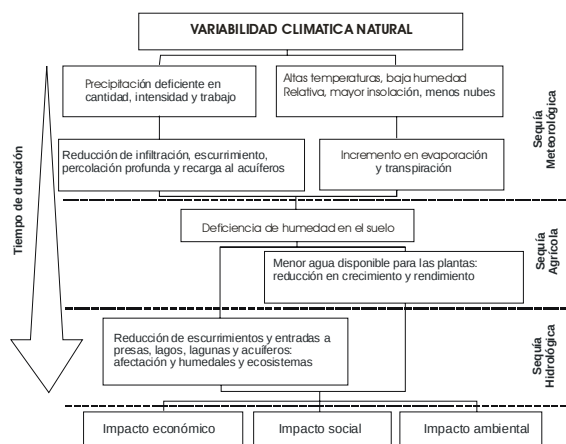
La sequía meteorológica se presenta cuando la precipitación durante un cierto periodo de tiempo es significativamente más pequeña que el promedio a largo plazo o que un valor crítico. Se caracteriza por la presencia de altas temperaturas, baja humedad relativa, alta radiación solar y vientos fuertes. De los tipos de sequía es la de duración más corta, y de unas pocas semanas, cuando debería ser ese periodo lluvioso (Velasco *et. al.*, 2005; y Escalante y Reyes, 2005).

La sequía hidrológica, tiene lugar cuando existe un déficit de agua, tanto de precipitación como de escurrimiento superficial y subterráneo, disminuye el volumen de escurrimiento e infiltración. Puede

causar severos daños a la población ya que sus efectos y recuperación son a largo plazo (Velasco, et. al. 2005). Se cataloga como sequía de largo plazo.

La sequía agrícola se presenta cuando se tiene una humedad insuficiente, en forma natural en el suelo, el cual hace que se tenga un desarrollo lento o nulo de los cultivos. Es de carácter estacional ya que se presenta en un periodo que se considera lluvioso, y afecta normalmente las áreas de temporal o secano. Su duración va de uno o varios meses (Quiring y Papakryiakou, 2003; Wu *et al.*, 2004; Narasimhan y Srinivasan, 2005; mencionado por Núñez *et al.*, 2007). Se cataloga como sequía de mediano plazo.

Según Escalante y Reyes, 2005, el criterio para establecer el valor crítico de la sequía depende generalmente de factores económicos y de los estándares de vida en la región, resaltando los primeros, por lo que deberán de usarse sus principios para definirla. Estos principios permiten denotar una única definición al aplicar los conceptos de suministro y demanda de agua, tanto para un individuo o a un conjunto de usuarios.



Tomado del Nacional Drought Mitigation Center, 2006.

Figura 2.8. Interrelación entre los diversos tipos de sequías.

Diferencia entre Sequía y Aridez.

La sequía como anomalía temporal se distingue de la aridez ya que ésta última se restringe a regiones de baja precipitación y es una característica permanente del clima. Operativamente, una



región se considera árida o semiárida si la cantidad o calidad del agua representa una variable crítica que controla la planeación y desarrollo. Al respecto, algunas definiciones formales están basadas en las causas que la originan, como es el cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial media anual (Índice de Aridez del Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas):

Cuadro 2.5. Definición del grado de aridez según el criterio del cociente de evapotranspiración.

Cociente (P/Etp)	Grado de aridez
<0.05	Hiper-árida
0.05-0.2	Árida
0.21-0.5	Semiárida
0.51-0.65	Subhúmedo seco
0.65-1.00	Subhúmedo
>1.00	Húmedo

Martonne, 1926, mencionado por INIFAP, 2006, desarrolló un índice de aridez basado en precipitación y temperatura a manera de balance hídrico y sirve para delimitar las zonas áridas:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{P}{T + 10}$$

Donde: P= precipitación media anual, en mm; T= temperatura media anual, en °C.

Cuadro 2.6. Clasificación climática, criterio de Martonne (De Martonne, 1926, mencionado por INIFAP, 2006).

Clima	Índice de aridez
Arido	0-10
Semiárido	10-20
Subhúmedo	20-30
Húmedo	30-60
Muy húmedo	>60



Otras subclasificaciones se derivan del valor de la temperatura, longitud anual del periodo seco y el régimen estacional de la precipitación.

Cuadro 2.7. Clasificación de la aridez según el criterio del cociente de evapotranspiración (Escalante y Reyes, 2005).

Región	Valor de la precipitación media anual
Árida	$\bar{h}_p \leq 400 \text{ mm}$
Semiárida	$400 \text{ mm} < \bar{h}_p \leq 600 \text{ mm}$
Semi-húmeda	$600 \text{ mm} < \bar{h}_p \leq 1500 \text{ mm}$
Húmeda	$\bar{h}_p > 1500 \text{ mm}$

Un escenario común en las zonas semiáridas es que el 90% de la precipitación total anual ocurren tan solo en el 10% del periodo de lluvias de la región.

Clasificación de las sequías.

Según SEGOB, 2000, mencionado por Escalante y Reyes, 2005, las sequías pueden clasificarse por el clima o su magnitud.

De acuerdo con el clima:

- o Permanente. Tiene lugar en zonas de clima áridos.
- o Estacionales. Se da en sitios con temporadas lluviosas y secas bien definidas.
- o Contingentes. Tienen lugar en cualquier época del año debido a periodos prolongados de calor, a falta de lluvias o coincidencia de ambos.
- o Invisibles. Se da cuando las lluvias de verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

Por su magnitud.

- o Leves. Tienen como causa la escasez parcial de lluvias y no repercuten de manera importante en la producción ni en la economía.
- o Moderadas. Se originan por una disminución significativa en la precipitación pluvial que tiene efecto en la producción agrícola.
- o Severas. Se producen por la disminución general o total de lluvias, con daños cuantiosos en la producción.
- o Extremadamente severas. Son producto del proceso permanente de escasez de agua que provoca crisis en las actividades agropecuarias, y por ende su efecto negativo en la economía y sociedad.

Otro tipo de clasificación es con base en la superficie afectada (Medina y Espinoza, 1998, mencionado por Escalante y Reyes, 2005), es:

Cuadro 2.8. Clasificación de las sequías con base en la superficie afectada (Medina y Espinoza, 1998).

Área (%)	Categoría
Menor al 10	Local
Del 11- 20	Vasta
Del 21- 30	Muy vasta
Del 31- 50	Extraordinaria
Mayor de 50	Catastrófica

Métodos de análisis de sequías del déficit del agua y sequía.

Byun y Wilhite (1999) mencionado por INIFAP, 2006, hace un resumen de algunos índices de sequía, relacionados la mayoría con variables meteorológicas o hidrológicas: índice de severidad de la sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index-PDSI), índice de anomalía de la lluvia (Rainfall Anomaly Index-RAI), Deciles, Índice de humedad de los cultivos (Crop Moisture Index-CMI), Índice de Sequía de Bhalme y Mooly (Bhalme and Mooly Drought Index-BMDI), Índice de Suplementación de agua superficial (Surface Water Supply Index-SCSI), Índice Nacional de Lluvia (National Rainfall Index-RI), Índice estandarizado de la precipitación (Standardized Precipitation Index-SPI), y el índice de reclamación de sequía (Reclamation Drought Index-RDI).



Estos índices son utilizados para realizar un monitoreo de las condiciones del ciclo actual de lluvia comparado con la serie histórica de datos de una estación dada; más no se utilizan para clasificar o definir donde están las zonas áridas y semiáridas en los que la presencia de problemas de sequía es inminente.

Porcentaje de la Normal. Se obtiene al dividir primero la precipitación de diferentes tiempos de escala entre la precipitación normal, siendo esta última el valor medio para un registro no menos de 30 años. Este valor de 30 años se debe a que periodos más largos puede provocar cambios naturales o antropogénicos que desvirtúan la información, caso contrario igual que con los periodos cortos en los cuales no reflejan las cualidades del fenómeno.

Cuadro 2.9. Clasificación de la sequía con base en el criterio de la Normal (INIFAP, 2006).

Nivel país o gran región		Nivel cuenca hidrológica	
Menor de 10	Local	Menor de 20	Local
11 a 20	Vasto	20 a 35	Vasto
21 a 30	Muy vasto	25 a 50	Muy vasto
31 a 50	Extraordinario	50 a 70	Extraordinario
Mayor de 50	Catastrófico	Mayo de 70	Catastrófico

Es importante anotar que la desventaja de este índice es que la precipitación media es frecuentemente diferente a la mediana, es decir, las series de precipitación mensual o estacional no tienen una distribución Normal, por lo tanto su uso puede generar serias confusiones (Escalante y Reyes, 2005).

Variabilidad de la precipitación. Está caracterizado por el coeficiente de variación de la precipitación anual, definido como la relación de la desviación estándar a la media. Para una sequía más frecuente el coeficiente es superior a 0.35, para el caso contrario el coeficiente varía entre 0.15 y 0.25.

Los deciles. Consiste en poner en orden los valores anuales o mensuales de lluvia, y dividir el conjunto en diez partes iguales. De esta manera el primer decil significa la cantidad de lluvia que no es excedida por el 10% del total, y así sucesivamente.

Cuadro 2.10. Clasificación de las sequías mediante la técnica de los deciles (Medina y Espinoza, 1998; mencionado por INIFAP, 2006).

Decil	Interpretación	Decil	Interpretación
10	Mucho muy arriba del promedio	5-6	Normal
9	Muy arriba del promedio	4	Ligeramente abajo del promedio
8	Arriba del promedio	Del 3	Abajo del promedio
7	Ligeramente arriba del promedio	2	Muy abajo del promedio
		1	Mucho muy abajo del promedio

Estos deciles se continúan calculando hasta que la cantidad de lluvia identificada por el décimo decil es la precipitación más grande registrada. Por ello, estadísticamente, el quinto decil es la mediana, y es la cantidad de precipitación que no es excedida por el 50% de las ocurrencias en el periodo de registro.

Con fines de cálculo los límites de cada decil se calculan ordenando la muestra de tamaño n , de menor a mayor magnitud, y al valor más grande registrado se le asigna la variable $Hp(n)$ y al más pequeño $Hp(1)$.

$$\text{decil} = Hp(1) + \text{Constante}$$

$$\text{decil}(i) = \text{decil}(i - 1) + \text{Constante}; \text{ para } i = 2 \text{ hasta } 10$$

$$\text{Constante} = \frac{Hp(n) - Hp(1)}{10}$$

Como una primera aproximación es útil pero insuficiente para describir la gravedad del fenómeno, es decir si la lluvia no supera el 10% de lo normal las condiciones resultantes son catastróficas, cosa que puede ser erróneo. Además de que para periodos anuales se pierde precisión y objetividad, lo que se recomienda es que los periodos de análisis sean mensuales.

Los percentiles. Considerando que de mediano a largo plazo las variaciones se atenúan, entonces los percentiles dan una mejor descripción. Se basa en que si el déficit para satisfacer una demanda normal es de 5 al 10%, la sequía es incipiente, del 10 al 20% es moderada, del 20 al 35% es severa y

del 35 al 50% es crítica: y en complemento se sugiere que si la lluvia supera el 50%, entonces la sequía es catastrófica.

Cuadro 2.11. Clasificación de la sequía, según criterio de los Percentiles de lluvia anual (INIFAP, 2006).

Percentil	Significado	Percentil	Significado
48 a 52	Normal	33 a 40	Severa
45 a 47	Incipiente	25 a 32	Crítica
40 a 44	Moderada	Menos de 25	Catastrófica

Índice de la precipitación estandarizado (Standardised Precipitation Index, SPI). Es uno de los índices más utilizados a nivel mundial para la evaluación y monitoreo de la sequía. Permite a un analista determinar la anomalía de una sequía a una escala de tiempo dada de interés para cualquier estación de lluvia con los datos históricos, así como para determinar periodos anómalos de humedad. No es una herramienta de predicción de sequía. El SPI fue originalmente calculado para periodos de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

El Nacional Drought Mitigation Center (NDMC, 2005) de Estados Unidos está usando el SPI para monitorear las condiciones de humedad. Los rasgos distintivos de este índice son que identifica sequías emergentes más pronto que el Índice de Palmer, que se calcula en varias escalas de tiempo.

La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual a una función de distribución Gamma incompleta y en la transformación de los datos resultantes a la función de distribución normal estándar. Cabe recordar que la deducción de la Ley Fuga empleando una distribución exponencial es un caso particular de la llamada familia de distribuciones Gamma. De esta forma, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Los registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente, tendrán valores positivos del SPI, (presencia de humedad), mientras que los registros de precipitación inferiores al promedio histórico arrojarán valores del SPI negativos (déficit de humedad).

En términos generales, puede mencionarse que un evento de sequía se inicia cuando se observa, a través del tiempo, una tendencia marcada de valores negativos continuos del SPI. De esta manera, el evento de sequía termina cuando el valor del SPI alcanza valores positivos. Como puede intuirse, la



estimación de índices de sequías requiere emplear numerosas variables. Entre las principales variables se pueden mencionar: precipitación, evapotranspiración, caudales en cauces naturales, niveles de lagos y embalses, niveles de acuíferos, etc. Si bien se han propuesto otros índices de sequía simplificados (Pita, 2003); a la fecha ningún trabajo ha incluido explícitamente el número de días lluviosos (intuitivamente incluido en la precipitación mensual) para estimar un índice de sequía.

El cálculo del SPI se basa en el registro a largo plazo de la precipitación para un periodo de tiempo específico. El registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidad, la cual es transformada a una distribución Normal, de tal manera que el valor medio del SPI para un sitio y periodo deseado es cero. Por lo ello, los valores positivos de SPI indican precipitaciones más grandes que la mediana.

Cuadro 2.12. Clasificación de la sequía, de acuerdo con el SPI (U.S. Drought Monitor, 1999, mencionado por Nuñez, 2007).

Criterio SPI	Condición
+1.91 o más	Excepcionalmente húmedo
+1.51 a +1.9	Extremadamente húmedo
+1.21 a +1.5	Muy húmedo
+0.71 a +1.2	Modestamente húmedo
0.51 a 0.7	Humedad incipiente
+0.51 a -0.5	Condiciones “normales”
-0.51 a -0.7	Sequía “anormal” o incipiente
-0.71 a -1.2	Sequía moderada
-1.21 a -1.5	Sequía severa
-1.51 a -1.9	Sequía extrema
-1.91 o menos	Sequía excepcionalmente catastrófica

Una sequía tiene lugar si en cualquier tiempo el SPI tiene valor igual o menor a -1, y concluye cuando el valor es positivo. Esta bondad hace que cada periodo de sequía se caracterice por el inicio, término y la intensidad para cada mes que el evento continúa. Por lo tanto, la suma de los valores negativos del SPI para todos los meses se considera como la magnitud de la sequía.



ASPECTOS TEÓRICOS DEL INDICE DEL SPI

La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual a la función de distribución probabilística de tipo “gamma incompleta” (Thorn 1966, mencionado por Edwards y Mckee, 1993).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.1)$$

donde:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad \text{Función Gamma} \quad (2.2)$$

Para obtener soluciones máximas de probabilidad se usan valores óptimos de α y β de la siguiente manera (Thorn 1947 mencionado por Caskey, 1958; citado por INIFAP, 2006).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \text{es el parámetro de forma} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad \text{es el parámetro de escala} \quad (2.4)$$

donde:

$\bar{x}$ es la media de los datos en mm

$$A \text{ se calcula con la siguiente fórmula: } A = \ln(x) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

donde

n es el número de observaciones de precipitación, y

x es el valor de la precipitación en mm

La distribución acumulada está dada por la ecuación:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (2.5)$$



Haciendo $x = t\bar{\beta}$ y sustituyendo en la ecuación 2.5, se obtiene la ecuación:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\bar{\alpha})} \int_0^x t^{\bar{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (2.6)$$

Esta función se llama Función de Distribución Gamma incompleta. Como en un registro de precipitación es frecuente encontrar valores cero de precipitación y como la función gamma no esta definida para $x=0$, entonces se hace la transformación a la siguiente ecuación:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (2.7)$$

donde:

q = la probabilidad de ceros y se obtiene con la ecuación, $q = \frac{m}{n}$

m = número de ceros en una especie de tiempo en la precipitación.

n = número de datos de precipitación, (Thorn 1966 citado por Edwards y Mackee, 1993).

La probabilidad acumulativa, $H(x)$ obtenida, se transforma entonces a la normal estándar Z , con una media de cero y desviación uno que es el valor del SPI. Para obtener la transformación de los datos resultantes a la función Z se utiliza una aproximación que proveen Abramowitz y Stegun (1970).

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.8)$$

$$Z = SPI = \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{Para } 0 < H(x) < 0.5 \quad (2.9)$$

donde:

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{[H(x)]^2} \right)} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.10)$$



$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{[H(x)]^2}\right)} \quad \text{para } 0.5 < H(x) < 1 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517 & d_1 &= 1.432788 \\ c_1 &= 0.802853 & d_2 &= 0.189269 \\ c_2 &= 0.010328 & d_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

La ecuación 2.8 calcula los valores de SPI negativos, y la ecuación 2.9 calcula los valores del SPI positivos. En otras palabras, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Bajo este contexto, valores negativos del SPI indica una intensidad en el déficit de humedad. Por otro lado, precipitaciones superiores al promedio histórico representan condiciones de humedad más alta de lo esperado.

La ecuación 2.5 calcula los valores del SPI negativos y la ecuación 2.6 calcula los valores del SPI positivos.

En la ecuación 2.1 la función Gamma no está definida para $x=0$; pero en una distribución de precipitación es frecuente que si tenga valores cero como datos, entonces la probabilidad acumulativa se convierte en:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (2.12)$$

donde:

q = es la probabilidad de cero

Índice de sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index, PDSI). Se basa en el concepto de demanda-suministro de agua, teniendo en cuenta el déficit d entre la precipitación real y la precipitación necesaria para mantener las condiciones de humedad climática o normal. Es usado en el campo de climatología y meteorología para señalar un prolongado déficit de humedad.



Palmer definió a **d** como una diferencia de humedad, el cual cuando los períodos son húmedos estas diferencias son positivas y cuando los períodos son secos toman valores negativos. Otro aspecto que determinó fue un índice de anomalía de humedad **Z** multiplicando los valores **d** por una constante **k** determinada para cada lugar y para cada período ($Z = d * k$)

donde:

$d = P - \bar{P}$; **P** es la precipitación real para un mes *i*; $\bar{P}$ es la precipitación climatológica normal es decir la necesaria para mantener la humedad climática normal que es calculada a partir de un balance de agua de un elemento suelo.

El factor **k** se determina empíricamente de los registros mensuales de clima para el área en estudio, utilizando la relación de demanda a suministro de humedad y la media mensual de los valores absolutos de **d** para todos los años de registro. El factor **k** ajusta las diferencias de humedad para crear una medida estandarizada mensual para diferentes climas.

Por lo tanto, el PDSI para cierto mes *i* se determina como:

$$PDSI_i = 0.897 PDSI_{i-1} + \frac{Z_i}{3} \quad (2.13)$$

Durante el mes inicial, el índice es igual a $\frac{Z}{3}$. En caso de que $Z=0$ (humedad normal, $d=0$, y el PDSI es 0.89 veces del mes previo.

La escala para las condiciones de humedad es arbitraria y esta basada en un estudio original para las regiones de Iowa central y Oeste de Kansas y es de amplia difusión en USA.

Cuadro 2.13. Clasificación de la sequía, Palmer, PDSI (Kart y Knight, 1985, citado por Escalante y Reyes, 2005).

4.00 o más	Extremadamente húmedo
3.00 a 3.99	Muy húmedo
2.00 a 2.99	Moderadamente húmedo
1.00 a 1.99	Levemente húmedo
0.50 a 0.99	Incipiente período húmedo



0.49 a -0.49	Casi normal
-0.50 a -0.99	Incipiente período seco
-1.00 a -1.99	Sequía débil
-2.00 a -2.99	Sequía moderada
-3.00 a -3.99	Sequía severa
-4.00 o menos	Sequía extrema

El uso del PDSI en México tiene algunas limitaciones por requerir variables no siempre disponibles (Velasco, 1999, mencionado por Núñez *et al.*, 2007).

2.3. TRATAMIENTO DE LOS EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS CON MODELOS PROBABILÍSTICOS

2.3.1. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES ALEATORIAS CONTINUAS

Los eventos hidrológicos, en su mayoría tienen la característica de evolucionar en el tiempo y en el espacio, el cual dada la complejidad que presentan los procesos físicos que en ella intervienen impide que se haga una estimación confiable por los métodos basados en las leyes de la mecánica o la física, y el acudir a ellas hace que el modelo derivado sea muy grande y difícil de manejar, por lo tanto es más conveniente aplicar en su estudio y conocimiento un análisis estadístico y probabilístico. El proceso hidrológico tiene variaciones espacio-temporal y cuyo comportamiento puede ser en parte determinístico y en parte aleatoria.

En una variable aleatoria, su comportamiento es descrito por una ley de probabilidades, la cual asigna medidas de probabilidad a posibles valores o rangos de ocurrencia. Estas variables pueden ser discretas, si toma valores específicos (por ejemplo la ley de Poisson) o continuas, si toma todos los valores en un rango de ocurrencia (modelo Exponencial). Para el caso de eventos hidrológicos extremos, inundaciones y sequías, es apropiado darles un tratamiento aleatorio, donde cada observación es independiente de las anteriores (no hay correlación) y las propiedades estadísticas de todas las observaciones son iguales.



El comportamiento de una variable aleatoria X se describe por su ley de probabilidades, y se especifica mediante la función de densidad o de distribución de probabilidad acumulada:

Usando la notación de Ven Te Chow, 1994, si x es un valor dado de la variable aleatoria X , $F_x(x)$ es la probabilidad acumulada $P(X \leq x)$, y se expresa como la integral de la función de densidad para el rango $X \leq x$:

$$P(X \leq x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.14)$$

El cual representa la probabilidad de que X sea menor o igual que un valor x .

La función de densidad de probabilidad de una población se expresa como:

$$f(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{F_s(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.15)$$

Donde $F(x)$ expresa la función de distribución de probabilidad.

Las funciones correspondientes a la población se obtienen en el límite cuando $n \rightarrow \infty$ y $\Delta x \rightarrow 0$.

En el límite, la función de frecuencia relativa dividida por el intervalo Δx , se convierte en la función de densidad de probabilidades $f_x(x)$:

$$f_x(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{f_s(x)}{\Delta x} \quad (2.16)$$

Donde la frecuencia relativa se expresa como:

$$f_s(x_i) = \frac{n_i}{n} \quad (2.17)$$

En caso de que la variable aleatoria sea continua, la función de densidad de probabilidades tiene las siguientes características:

$$a) \sum_{i=1}^n p(x \leq x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.18a)$$

$$b) P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a) = \int_{-\infty}^b f(x) dx - \int_{-\infty}^a f(x) dx = \int_a^b f(x) dx \quad (2.18b)$$



$$c) \int_b^b f(x)dx = 0 \quad (2.18c)$$

Cuando la variable aleatoria es discreta las anteriores propiedades se pueden denotar así:

$$d) \sum_{i=1}^n f(x_i) = 1 \quad (2.19a)$$

$$e) P(a \leq X \leq b) = \sum_{x_i \geq a}^{x_i \leq b} f(x_i) \quad (2.19b)$$

$$f) P(X \leq x_j) = \sum_{i=1}^{i=j} f(x_i) \quad (2.19c)$$

Parámetros estadísticos.

Para tratar de entender el comportamiento general de la población se determinan los parámetros estadísticos que son valores representativos de las características generales de una muestra de datos; además, definen las características de una población.

Estos parámetros y sus estimadores se relacionan con la tendencia central, la dispersión, la simetría y el sesgo. Para el caso de la esperanza $E(x)$ o media, representa el primer momento alrededor del origen y es una medida central de la distribución; en cambio μ es el estimador de la media a partir de una muestra. La varianza σ^2 , mide la variabilidad y representa el segundo momento respecto a la media; en el caso de la desviación estándar (σ) entre mayor sea su valor más aumenta la dispersión. La asimetría, medida a través del sesgo, es un coeficiente que mide la dispersión y esta dado por el tercer momento alrededor de la media (Chow *et al*, 1994).

Parámetro de la población

Estadístico de la muestra

Tendencia central o punto medio

a) Media aritmética

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$$

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



b) Mediana

x tal que $F(x)=0.5$

c) Media geométrica

 $x = \text{anti log}[E(\log x)]$

Valor de la información en el 50o percentil

$$\bar{x}_g = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}$$

Dispersión

a) Varianza

$$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2]$$

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

b) Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{E[(x - \mu)^2]}$$

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

c) Coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

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

Simetría

a) Coeficiente de asimetría

$$\gamma = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3}$$

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^3}$$

Según Escalante y Reyes, 2005, antes de hacer inferencia de cualquier modelo es importante la estimación de sus parámetros, en ello cada estimador de un parámetro es una función de los valores de la muestra, los cuales son observaciones de una variable aleatoria. Cualquier técnica empleada para la estimación de los parámetros es necesario que se cumpla con las siguientes propiedades:

a. Sesgo nulo, b. Consistencia, c. Eficiencia, y d. Suficiencia.

Alguno de los métodos para la estimación de los parámetros poblacionales, que son los más usados en hidrología, son: gráfico, mínimos cuadrados, método de los momentos y el método de máxima verosimilitud. Al respecto solo nos referiremos a los dos últimos.



Método de los Momentos.

Se basa en considerar que los mejores estimativos de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes a la transformación de la muestra: primer momento (μ , la media), segundo momento (σ^2 , la varianza), y tercer momento (γ , coef. de asimetría).

Método de Máxima Verosimilitud

Este método considera que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad es aquel que maximiza la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra.

La probabilidad conjunta de ocurrencia de dos eventos independientes se calcula como el producto de las probabilidades de cada evento (Chow *et al*; 1994; y Escalante y Reyes, 2005). Partiendo de esto la función de verosimilitud a maximizar es el producto de las probabilidades de cada evento de la muestra:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) \quad (2.20)$$

Algunas veces, por manejo, es conveniente usar la función logarítmica de la verosimilitud ya que muchas funciones de densidad son exponenciadas.

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln[f(x_i)] \quad (2.21)$$

El método de máxima verosimilitud es teóricamente el más apropiado para ajustar distribuciones de probabilidad porque produce los estimativos de parámetros más eficientes, sin embargo en ocasiones, no se puede aplicar a todas ellas ya que la maximización debe hacerse numéricamente y no de forma analítica. Por ello para propósitos prácticos el método de los momentos es el más fácil de aplicar y apropiado en análisis hidrológicos.



2.3.2. LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE POISSON

La función de distribución de Poisson, es discreta, representa los éxitos llegados como si fueran puntos de una línea continua. Predice el número de sucesos en un determinado período de tiempo; y en general permite representar situaciones en las cuales hay una numeración, ya que la variable toma valores enteros positivos.

Su expresión es la siguiente:

$$f(x) = P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad x > 0 \quad (2.22)$$

donde:

$$\lambda = \bar{x}$$

Las propiedades de la distribución como la media, varianza, sesgo, curtosis, función generadora de momento y función característica, son las siguientes:

$$\lambda = np; \mu = \lambda; \sigma^2 = \lambda; \gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}; k = 3 + \frac{1}{\lambda}; M(t) = e^{\lambda(e^t - 1)}$$

Siendo n las pruebas idénticas, y p la probabilidad de tener éxito en una sola prueba.

2.3.3. LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD EXPONENCIAL

La distribución exponencial tiene aplicación cuando una secuencia de eventos hidrológicos es considerada como un proceso de Poisson, donde los eventos suceden instantáneamente a lo largo del tiempo. El tiempo entre tales eventos, o de interarribo, se describe por una distribución exponencial cuyo parámetro β es la tasa media de ocurrencia de los eventos.



La ventaja que ofrece esta distribución es en la facilidad de estimar el parámetro β a partir de la información observada.

$$F(x) = 1 - \beta e^{-\beta x}; \quad x \geq 0 \quad (2.23)$$

$$f(x) = \beta e^{-\beta x} \quad (2.24)$$

Donde:

β es el parámetro de escala

$$\mu = 1/\beta; \quad \sigma^2 = 1/\beta^2.$$

Y los estimadores por momentos y máxima verosimilitud es: $\beta = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\bar{x}}$

En el caso de la función de distribución exponencial con parámetro β y x_0 .

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)} \quad (2.25)$$

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)} \quad (2.26)$$

donde:

x_0 es el parámetro de ubicación

β es el parámetro de escala

$$\mu = x_0 + \beta; \quad \sigma^2 = \beta^2, \text{ y } \gamma = 2$$

En este caso los estimadores por momentos son:

$$\beta = S, \text{ y } \bar{x}_0 = \bar{x} - S$$

Y por máxima verosimilitud:

$$\beta = \frac{\sum (x_i - x_{(1)})}{n-1} \quad (2.27)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum (x_i - x_{(1)})}{n-1} \left(\frac{1}{n} \right) = x_i - \frac{\beta}{n} \quad (2.29)$$

Donde $x_{(1)}$ es el primer valor de la muestra ordenada de menor a mayor



La desventaja del uso de la distribución exponencial es que se necesita que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente de sus vecinos; ese aspecto ha llevado a desarrollar procesos de Poisson compuestos

2.3.4. LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE GUMBEL

La distribución de valores extremos tipo I Gumbel es empleada frecuentemente para modelar eventos extremos y se origina de una distribución no acotada de tipo exponencial, que finalmente puede demostrarse que converge a una distribución exponencial (Kite, 1988). La deducción de la distribución tipo I, a partir de una distribución exponencial de un parámetro, puede deducirse de la siguiente forma:

Se define $X_{\max}$ como el valor máximo de una serie independiente de variables ε_i con una distribución acumulada de probabilidad dada por: $P(x) = P(\varepsilon_i \leq y)$:

$$P(X_{\max} \leq y) = P(\varepsilon_1 \leq y, \varepsilon_2 \leq y, \dots, \varepsilon_n \leq y) \quad (2.30)$$

$$P(X_{\max} \leq y) = [F(y)]^n \quad (2.31)$$

Tomando el extremo de la distribución $P(y)$ como una ley exponencial, se tiene:

$$F(y) = 1 - \beta e^{-y/\beta} \quad (2.32)$$

A partir de la ecuación (2.31) si se acepta que $\ln(\alpha n)$ es una constante normalizada, se tiene que:

$P[X_{\max} \leq y + \ln(\beta n)] = [P(y + \ln(\beta n))]^n$ y de la ecuación (2.32):

$$P[y + \ln(\beta n)] = 1 - \beta e^{-[y + \ln(\beta n)]} \quad (2.33)$$

$$P[X_n \leq y + \ln(\beta n)] = \left\{ 1 - \beta e^{-[y + \ln(\beta n)]} \right\}^n ; P[X_n \leq y + \ln(\beta n)] = \left[1 - e^{-y/n} \right]^n$$



Si $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[X_n \leq y + \ln(\beta n)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[1 - e^{-y/n}\right]^n$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[X_n \leq y + \ln(\beta n)] = e^{-e^{-y}} \quad (2.34)$$

Esta es una forma reducida de la distribución de probabilidad tipo I. Tomando la variable reducida $y = \beta(x - x_0)$, donde β es un parámetro de escala y x_0 es una medida de la tendencia central, la distribución de probabilidad tipo I puede escribirse como:

$$P(x) = e^{-e^{-\beta(x-x_0)}} = F(x) = e^{-e^{-\beta(x-x_0)}} \quad (2.35)$$

Y la función de densidad se representa como:

$$f(x) = \beta e^{-\beta(x-x_0)} e^{-e^{-\beta(x-x_0)}} \quad (2.36)$$

donde:

x_0 es el parámetro de ubicación

β es el parámetro de escala

$$\beta = \frac{1.2825}{S}; \quad x_0 = \bar{x} - 0.45 S$$

S es la desviación estándar.

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO: LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36 NAZAS-AGUANAVAL (RH-36)

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Región Hidrológica 36, Nazas-Aguanaval (RH-36) es parte de las 718 cuencas hidrográficas en las que está dividido el país, agrupadas en 37 regiones hidrológicas, y que a su vez se reagrupan en las 13 Regiones Hidrológico-administrativas.



Figura 3.1. Distribución espacial de las 13 regiones hidrológico-administrativas en México.



Figura 3.2. Distribución espacial de las 37 regiones hidrológicas en México.

Se localiza en la porción norte del Altiplano mexicano y cuyas coordenadas geográficas son 22° 40' y 26° 35' de latitud norte y 101° 30' y 106° 20' de longitud oeste, (ver figura 3.3). Es una región cerrada (endorreica) conocida con el nombre de Región Lagunera y corresponde a las cuencas cerradas de los grandes Ríos Nazas y Aguanaval, he allí su nombre, y se extiende desde la Sierra Madre Occidental, al oeste, hasta la Laguna de Mayrán y Viesca, al este; con una superficie total de aproximadamente 92000 km². En esta parte de la república mexicana el clima es árido y semiárido, caracterizado por baja precipitación pluvial que tiene una estrecha relación con la altitud, que va de los 3220 msnm hasta los 1000 msnm; caso de ellos es que en la sierra madre occidental las láminas pluviales son del orden de los 900 mm muy contrastante en la parte baja, Lagunas de Mayran y Viesca que es de los 200 mm.

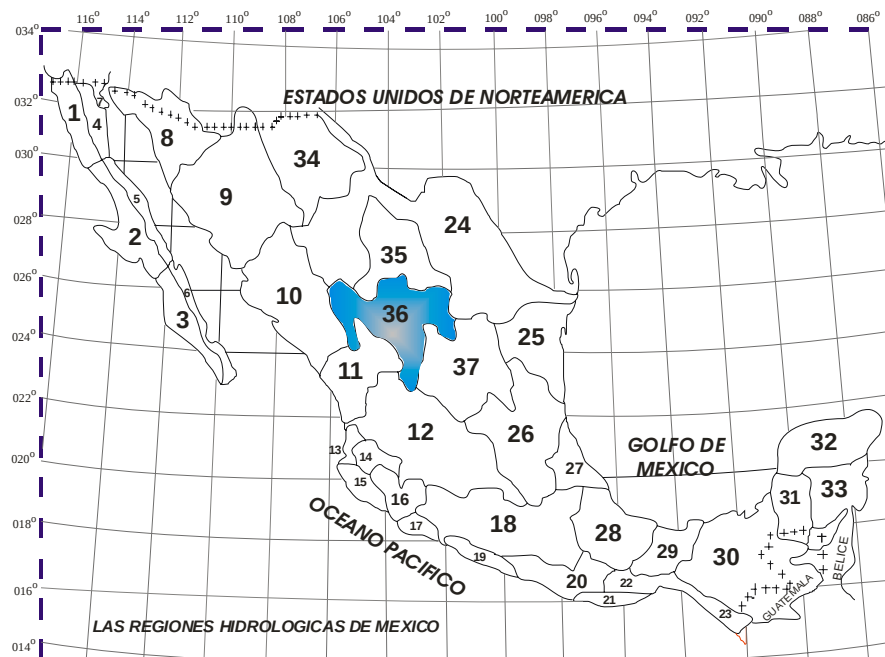


Figura 3.3. Localización geográfica de la Región Hidrológica 36.

Debido a la heterogeneidad que presenta la región por diversos factores como es la altitud, distancia al Pacífico, coordenadas geográficas y vegetación, principalmente, se divide en cuencas y subcuencas; de la parte alta hacia la parte baja, cuenca del río Nazas y río Aguanaval, y Bolsón Sur y las Lagunas Mayrán y Viesca, respectivamente.

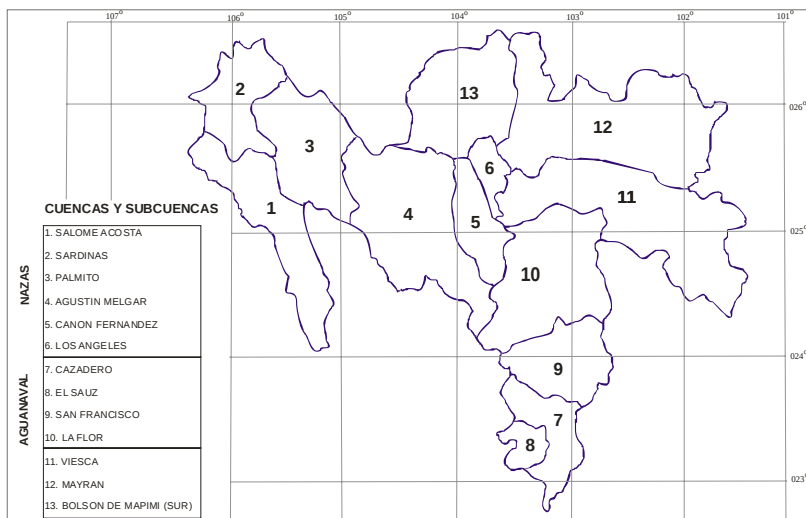


Figura 3.4. Cuencas y subcuencas de la Región Hidrológica 36.

3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

La distribución espacio-temporal de la precipitación en México esta estrechamente relacionada con las características físicas del territorio, entre los que resaltan la influencia de los 11 122 km de costa tanto en el Pacífico (7 828 km) como en el Atlántico (3294 km); la ubicación geográfica, particularmente en relación con los grandes cinturones de vientos y la trayectoria de los huracanes, su complicada topografía y su relieve accidentado con variaciones altitudinales tanto por la orografía como por los rasgos más prominentes de la circulación atmosférica. Según García, 2003, los máximos valores de láminas de precipitación tienen su origen en los ciclones tropicales, originados tanto en el Golfo de México como del océano Pacífico.

La posición geográfica del país, localizada entre los meridianos 118°42' y 86°42' de longitud oeste y entre las latitudes 14°32' y 32°43' norte, la ubica dentro de la zona tropical y zona subtropical, en las mismas latitudes que los desiertos del Sahara y Arábiga. Esta diversidad climática y complejo orográfico, principalmente las sierras Madre Occidental y Oriental sobre el altiplano, hace que las dos terceras partes del territorio se consideren áridas o semiáridas (norte, noroeste y altiplano). Por lo que la precipitación sufre una heterogeneidad espacio-temporal, caso de ello es que la zona norte y en el altiplano (52 % del territorio) la media anual es inferior a los 500 mm, y en sólo una porción del sureste (7 % del territorio) la precipitación alcanza valores superiores a los 2,000 mm anuales.

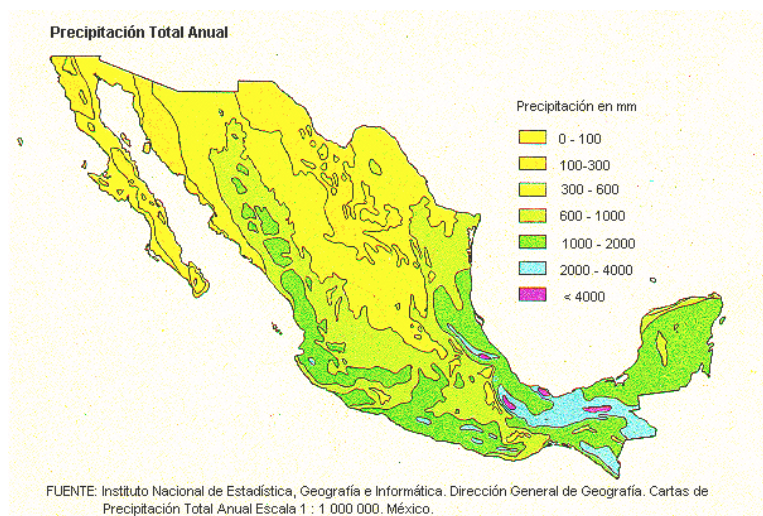


Figura 3.5. Distribución de la precipitación en la república mexicana.



Figura 3.6. Principales tipos de clima en México (Tomado del INEGI, 2007).

Cuadro 3.1. Climas de la república mexicana en relación a la lámina precipitada.

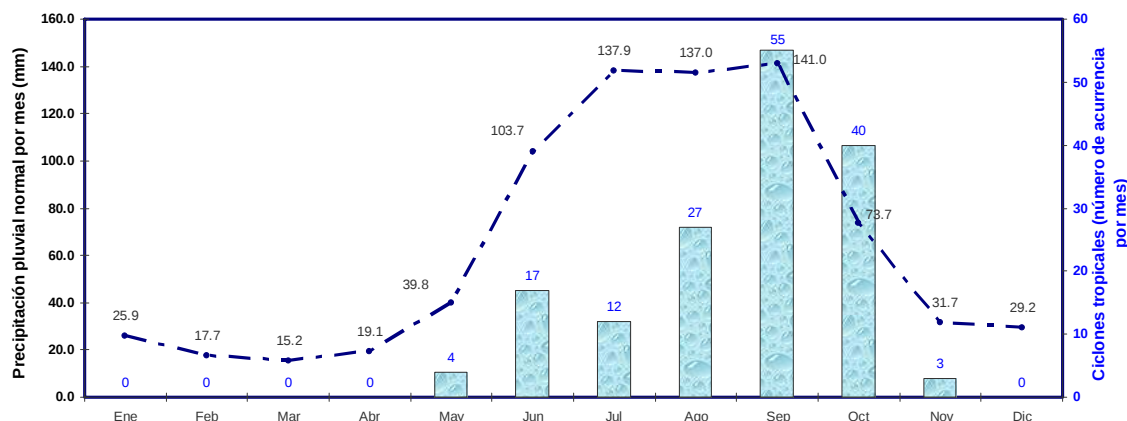
CLIMA	% DEL TERRITORIO	PRECIPITACION MEDIA ANUAL $\bar{h}_p$ (mm)	TEMPERATURA (°C)
Clima seco	28.3	300 y 600	22°C a 26°C 18°C a 22°C
Muy seco	20.8	100 y 300	18°C a 22°C 26°C
Cálido húmedo	4.7	2000 y 400	22°C a 26°C
Cálido subhúmedo	23	1000 y 2000	22°C a 26°C 26°C
Téplado húmedo	2.7	2000 y 4000	18°C a 22°C
Templado subhúmedo	20.5	600 y 1000	10°C a 18°C 18°C a 22°C

Con los mapas presentados y el cuadro anterior, es evidente el contraste de la distribución de la precipitación.

La precipitación en México es muy marcada y tiene presencia en dos ciclos anuales, una de ellas y más representativa es de mayo a noviembre, el cual concentra el 80% de las lluvias y obedece a que en la temporada tienen lugar el mayor número de huracanes y tormentas tropicales; y el otro ciclo se presenta de noviembre a abril y es producido por la invasión de masas de aire polar (“nortes”) que afectan gran parte del territorio nacional.



Los ciclones tropicales denominados huracanes (vientos superiores a los 119 km/h) o las tormentas tropicales (vientos de 61-119 km/h) desempeñan un papel fundamental como fuente transportadora de humedad del mar hacia las zonas semiáridas del país; además de aportar las laminas de precipitación más altas que son las más representativas del volumen almacenado.



NOTA: Ciclones tropicales, se refiere al periodo de 1970 a 2006; precipitación normal, se refiere al periodo de 1941 a 2000.

FUENTE: Conagua. Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de datos de la Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

Figura 3.7. Relación entre la frecuencia de impacto directo de ciclones tropicales y la precipitación normal.

Para el 2006, la precipitación acumulada ocurrida en la república mexicana del 1° de enero al 31 de diciembre del año 2006 fue de 808.2 mm, superior a un 3.6% de la media histórica normal del período de 1941 a 2005 (773.5 mm). Tal anomalía se presenta en el cuadro y gráfico siguiente.

Cuadro3.2. Información del comportamiento de la precipitación y datos históricos.

VALORES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media de 1941 a 2005 (mm)	25.40	18.30	15.30	19.00	40.00	103.00	138.20	136.60	141.70	75.30	31.60	28.20
Media de 2006 (mm)	18	8	11	10	49	105	150	160	147	88	31	32
Anomalía 2006(%)	-29	-59	-27	-46	22	2	8	17	4	17	-3	15

FUENTE: Conagua. Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

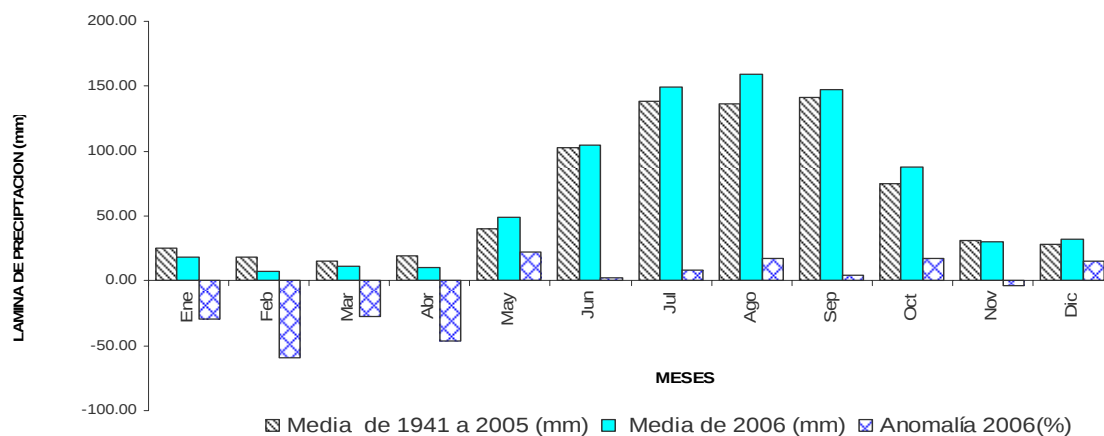


Figura 3.8. Comportamiento de la precipitación de México y la anomalía presentada en el 2006.

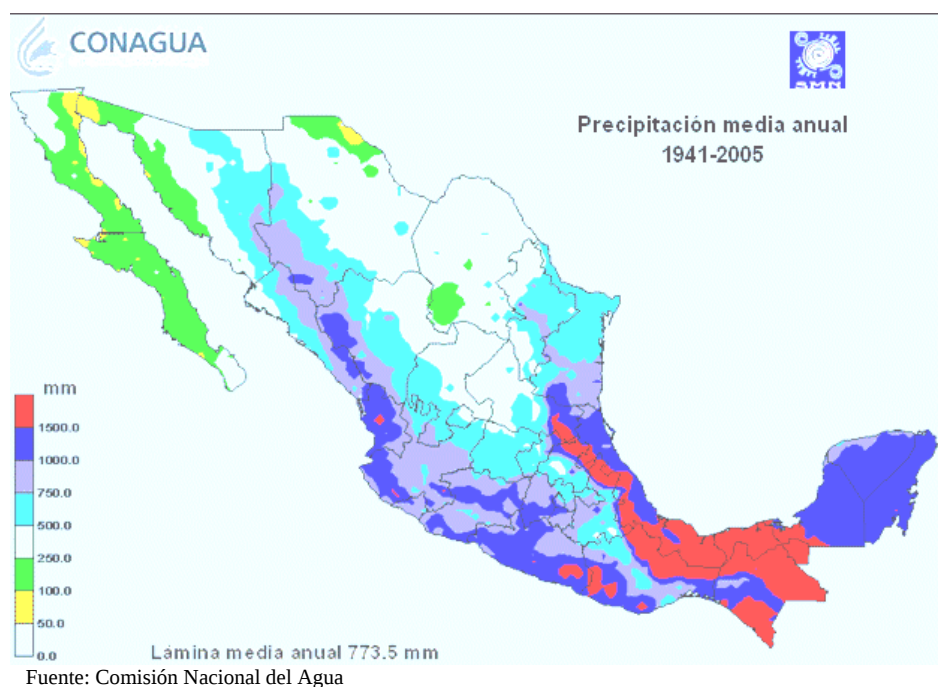


Figura 3.9. Distribución de la lámina media anual de lluvia para el periodo 1941-2005.

Respecto a la región hidrológica 36 (RH-36) esta forma parte de la región hidrológica-administrativa VII, y de la estadística del agua 2007 (CONAGUA, 2007) registra una precipitación media anual correspondiente al periodo de 1941-2000 de 394.3 mm, en tanto para el 2006 fue de 534.8 mm; para la RH-36 analizando el mismo periodo, el valor resulto de 464.6 mm la media anual y respecto al 2006 esta fue de 496.6 mm. Esta diferencia anómala indica que dentro del grupo de regiones

hidrológicas que forman la región hidrológica-administrativa VII existen otras cuyo régimen de precipitación es mucho más bajo.



Figura 3.10. Distribución espacial de las 37 regiones hidrológicas en México.

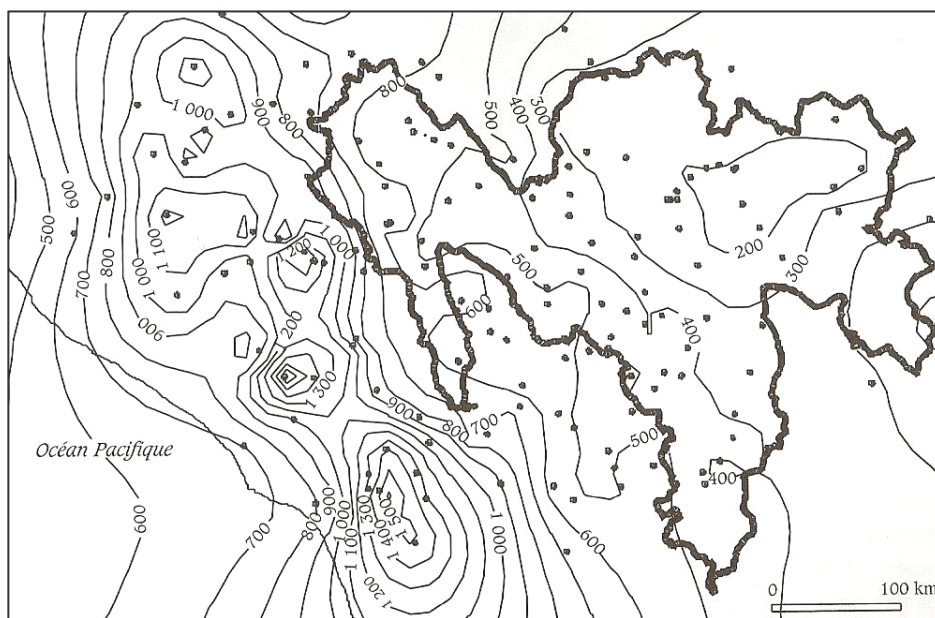


Figura 3.11. Isoyetas de la distribución espacial de la precipitación media anual en toda la RH-36.

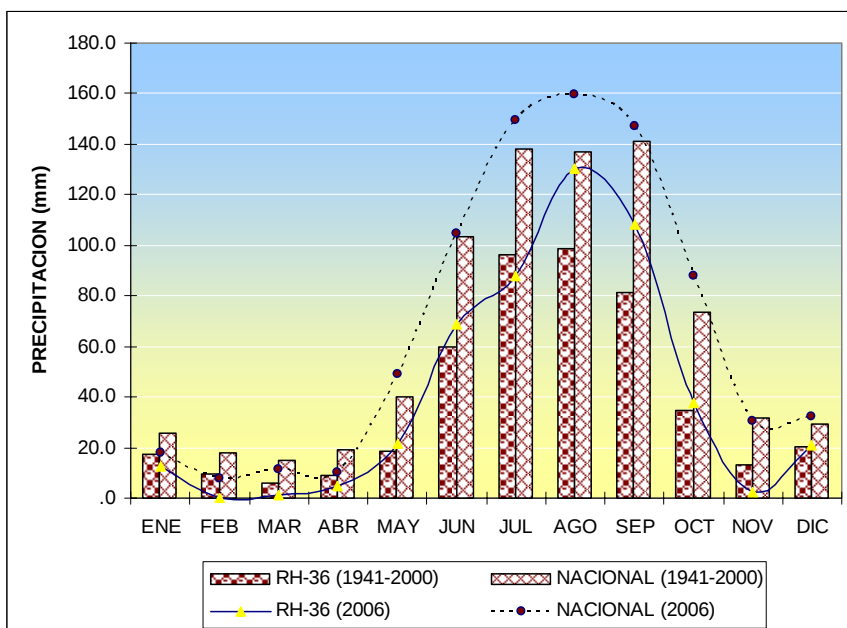


Figura 3.12. Comportamiento de la lluvia a nivel nacional y en la RH-36, histórica y al 2006.

Retomando la información anterior, la cantidad de precipitación en la RH 36 es del 60% respecto al promedio anual nacional y se ubica en una región hidrológica-administrativa que presenta el 50% de la precipitación media anual histórica de 1941-2005.

De la regionalización de la RH-36 que hace Descroix *et al*, 1997, al dividirla en tres sub-regiones geoclimáticas (árida, semiárida y subhúmeda) y analizando para cada una de ellas el comportamiento de las láminas de precipitación de una serie de estaciones climatológicas, apéndices B-2.1, B-2.2, y B-2.3, se encontró que del 50% al 60% de los años por cada estación presentaron láminas de lluvia inferiores al promedio histórico.

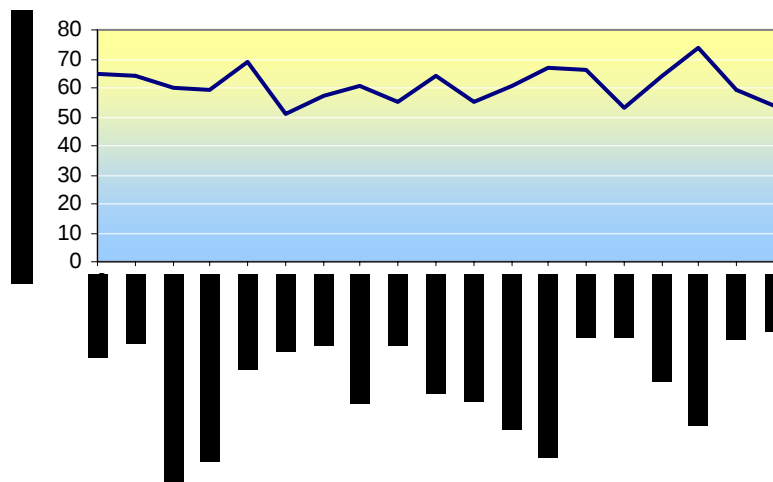


Figura 3.13a. Estaciones con porciento de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, sub-región árida.

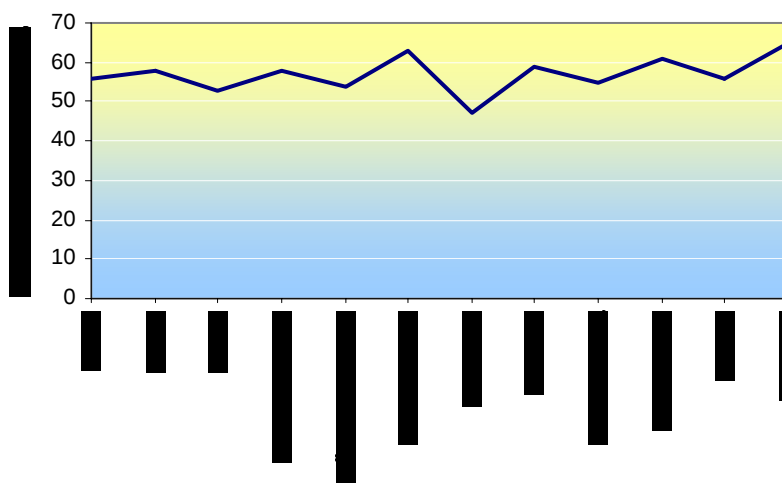


Figura 3.13b. Estaciones con porciento de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, semi-árida.

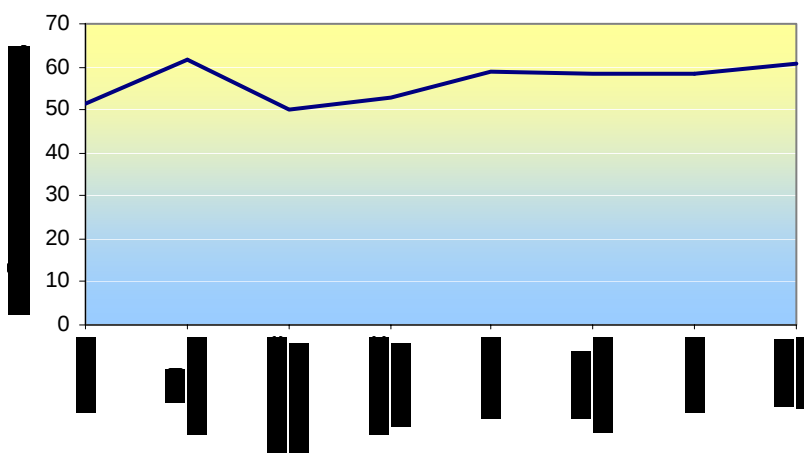


Figura 3.13c. Estaciones con porcentaje de años cuya lámina de lluvia es inferior al valor promedio histórico en la RH-36, sub-húmeda.

Esto constituye un indicador general que hace a la región RH-36 sea vulnerable a impactos causados por sequías.

Haciendo un tercer análisis con el empleo de la metodología del Índice de Precipitación Estándar (SPI), aplicada a tres estaciones representativas, correspondiente a cada una de las sub-regiones de la RH-36; para la sub-región árida, la estación 5036 de San Pedro Coahuila; para la sub-región semi-árida, la estación 10049 Nazas; y para la sub-región sub-húmeda, la estación 10021, Palmito. El comportamiento histórico del SPI representado en tres escalas de tiempo de uno, tres y doce meses (SPI-1, SPI-3 y SPI-12), periodo de 1980 al 2000 se muestra en los siguientes cuadros.

Cuadro 3.3 a,b y c. La Región hidrológica 36 sujeta a condiciones de sequía, determinado por el índice de precipitación estándar.

ARIDA							
Criterio de Clasificación		Frecuencia según criterio de clasificación			Porcentaje respecto al total		
Concepto cualitativo	Valor del SPI	SPI -1	SPI -3	SPI -12	SPI -1	SPI -3	SPI -12
Extremadamente húmedo	2 o más	6	7	6	2.39	2.81	2.50
Muy húmedo	1.5 a 1.99	12	8	14	4.78	3.21	5.83
Moderadamente húmedo	1 a 1.49	22	25	25	8.76	10.04	10.42
Normal	0.01 a 0.99	118	83	68	47.01	33.33	28.33
Normal seca	0 a -0.5	55	45	52	21.91	18.07	21.67
Sequía incipiente	-0.51 a -0.7	9	25	16	3.59	10.04	6.67
Sequía moderada	-0.71 a -1.2	24	38	26	9.56	15.26	10.83
Sequía severa	-1.21 a -1.5	2	5	20	0.80	2.01	8.33



Sequía extrema	-1.51 a -1.9	3	7	12	1.20	2.81	5.00
Sequía excepcional	<-1.91	0	6	1	0.00	2.41	0.42
		251	249	240			

(a)

SEMI-ARIDA							
Criterio de Clasificación		Frecuencia según criterio de clasificación			Porcentaje respecto al total		
Concepto cualitativo	Valor del SPI	SPI -1	SPI -3	SPI -12	SPI -1	SPI -3	SPI -12
Extremadamente húmedo	2 o más	5	2	0	1.99	0.80	0.00
Muy húmedo	1.5 a 1.99	11	10	12	4.38	4.02	5.00
Moderadamente húmedo	1 a 1.49	26	26	34	10.36	10.44	14.17
Normal	0.01 a 0.99	90	94	80	35.86	37.75	33.33
Normal seca	0 a -0.5	77	37	32	30.68	14.86	13.33
Sequía incipiente	-0.51 a -0.7	14	22	9	5.58	8.84	3.75
Sequía moderada	-0.71 a -1.2	17	35	35	6.77	14.06	14.58
Sequía severa	-1.21 a -1.5	7	9	14	2.79	3.61	5.83
Sequía extrema	-1.51 a -1.9	2	7	23	0.80	2.81	9.58
Sequía excepcional	<-1.91	2	7	1	0.80	2.81	0.42
		251	249	240			

(b)

SUB-HÚMEDA							
Criterio de Clasificación		Frecuencia según criterio de clasificación			Porcentaje respecto al total		
Concepto cualitativo	Valor del SPI	SPI -1	SPI -3	SPI -12	SPI -1	SPI -3	SPI -12
Extremadamente húmedo	2 o más	3	3	3	1.99	1.20	1.25
Muy húmedo	1.5 a 1.99	15	16	9	9.93	6.43	3.75
Moderadamente húmedo	1 a 1.49	19	27	36	12.58	10.84	15.00
Normal	0.01 a 0.99	10	91	74	6.62	36.55	30.83
Normal seca	0 a -0.5	45	48	49	29.80	19.28	20.42
Sequía incipiente	-0.51 a -0.7	17	16	9	11.26	6.43	3.75
Sequía moderada	-0.71 a -1.2	15	28	15	9.93	11.24	6.25
Sequía severa	-1.21 a -1.5	12	12	16	7.95	4.82	6.67
Sequía extrema	-1.51 a -1.9	12	5	28	7.95	2.01	11.67
Sequía excepcional	<-1.91	3	3	1	1.99	1.20	0.42
		251	249	240			

(c)

Del número de frecuencia (de un total de 251 para SPI-1, 249 para SPI-3 y 240 para SPI-12) respecto al valor del criterio de clasificación que presentó cada una de las estaciones, se puede observar que en promedio el 50% tiene una inclinación de normal a sequía extrema.

A través de este análisis se deja en claro que en la RH-36 la vulnerabilidad a la escasez de agua es alta, sobre todo por ser una zona en la que la precipitación es determinante para satisfacer la demanda de agua.

3.3. REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA RH-36

Los trabajos de regionalización de la precipitación en la RH-36 han permitido caracterizar el comportamiento de la distribución de la lluvia determinando el papel de los principales parámetros que en ella intervienen, muchos de las cuales su efecto es superior a otros. Estrada *et al*, 1993, citado por Descroix *et al*. 1997, realizó el análisis agrupando a las estaciones pluviométricas en función del gradiente altitudinal, y determinó que quedan correlacionadas con la altitud y la distancia al océano Pacífico; por su parte Descroix *et al*. 1997, realizó la regionalización de la precipitación en la RH-36 considerando a la precipitación anual, la altitud, la latitud, longitud, distancia al océano Pacífico, así como las densidades local y regional de la vegetación como variables principales; en ese contexto distingue cuatro grandes regiones pluviométricas: Sierra Madre Occidental, Mesetas del Aguanaval, Medio Nazas, y Lagunas y alrededores

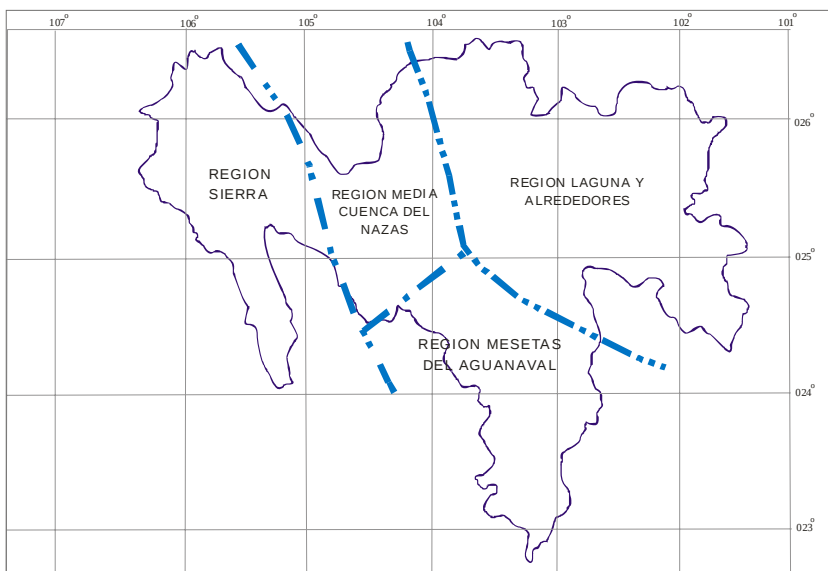


Figura 3.14. Regiones pluviométricas basadas en características climáticas y físicas.

Como un complemento de lo anterior y basándose en un análisis factorial de correspondencia de variables cualitativas suplementarias: la posición local (de unos km) como regional (decenas de km), la exposición, el tipo de sitio y la situación de la estación pluviométrica; todo esto le permitió dividir la región en tres zonas geoclimáticas: al oeste la Sierra Madre subhúmeda, hacia el centro las mesetas del Aguanaval y la cuenca media del Nazas, semiáridos, y al este, la Laguna, árida.

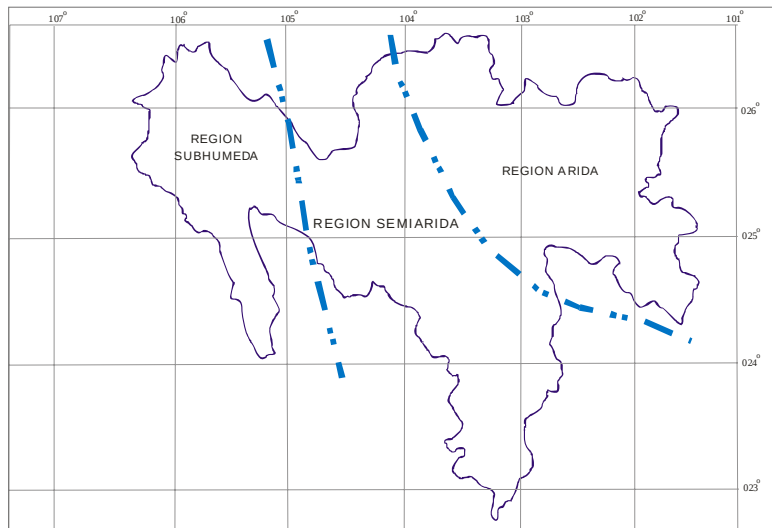


Figura 3.15. División de la RH 36 en tres regiones geoclimáticas.

En relación a la variación de la precipitación en la RH-36 evaluado con el coeficiente de variación ($Cv = \sigma/\overline{h_p}$), éste disminuye al incrementarse la precipitación anual, toma valores de 0.4 a 0.5 para precipitaciones de 200 mm (hacia el centro de la Laguna), y 0.15 a 0.3 para láminas de 600 mm (zona más húmeda de la sierra madre).

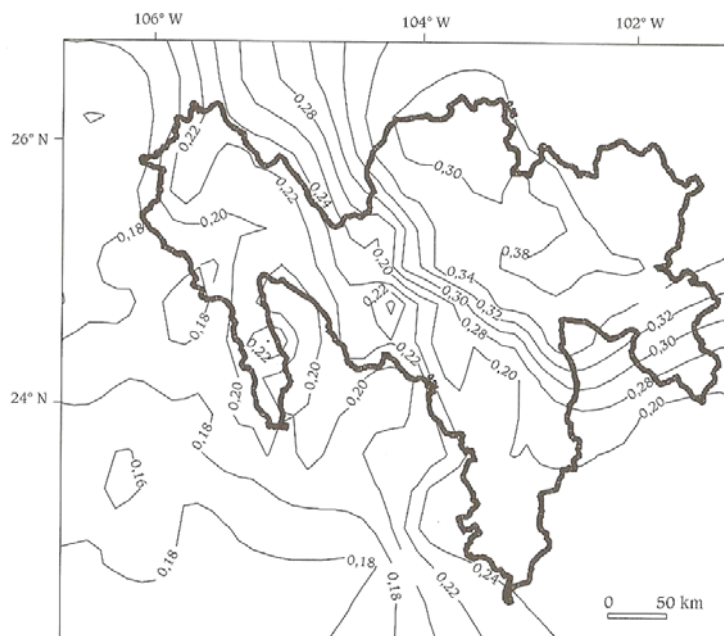


Figura 3.16. Distribución espacial del coeficiente de variación inter-anual en la RH-36. Tomado de Descroix et al, 2005¹.

De la figura 3.16 se puede notar que la variación de la lluvia es inferior al resto en la parte de la sub-región sub-húmeda, lo que indica que en esa área la precipitación es alta, en relación al resto.

El régimen pluviométrico en la RH 36 presenta una gran homogeneidad de la zona subhúmeda a la árida. De la distribución a lo largo del año, la temporada de lluvias de verano comprendida de junio a septiembre equivale a un 78% del total anual, y su máximo se obtiene en agosto; respecto a las lluvias de invierno no rebasan un ocho por ciento del total anual. En el caso de la zona norte y noreste, es un área más expuesta a las pocas entradas de aire del este (colas de los ciclones que provienen del Atlántico), y del noreste (originarias de frentes polares), en este caso las lluvias de verano son menor al 70% del valor anual y las lluvias de invierno alcanzan el 12%, en mayo y octubre tienen la presencia de lluvias más abundantes.

Cuadro 3.4. Comportamiento de la precipitación en la cuenca del Nazas (en porcentaje del total anual).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Zona N-NE	3.9	2.2	2.6	6.0	13.5	17.2	19.7	18.1	8.0	3.3	4.4
Resto Nazas	2.0	1.1	1.6	3.5	12.9	22.3	24.2	18.4	6.9	2.4	3.2

Tomado de Descroix, et al. 1997.



Del régimen pluviométrico, las lluvias de invierno son más o menos las mismas en toda la región; en cambio las lluvias de verano presentan un gradiente pluviométrico positivo de noreste a suroeste, el cual explica el mayor porcentaje de precipitación de invierno en la parte seca de la Región Hidrológica 36.



CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO RIESGO CONJUNTO INUNDACIÓN-SEQUÍA

4.1. LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONJUNTA POISSON-EXPONENCIAL

Una forma de trabajar la función de distribución de probabilidad conjunta, Ley de Poisson y distribución Exponencial, para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento y la magnitud media del mismo, es a través de la Ley Fuga, el cual tiene su origen en el estudio de series cronológicas de eventos separados por duraciones aleatorias. Las dos hipótesis de base son: la estacionariedad, que significa que las propiedades estadísticas de la serie cronológica no cambian con el tiempo, y la independencia que se refiere a que cada uno de dichos eventos ocurren de manera independiente de los demás. El nombre de “Ley Fuga” (*Loi de Fuites*) proviene del estudio que realizó M. Morlat (Babusiaux, 1969) en la distribución de los gastos que se fugaban de una red de distribución de gas en Francia (*Electricité de France*). Consiste en utilizar simultáneamente una Ley de Poisson, para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento y una distribución Exponencial para expresar la magnitud media de dicho evento. Esta ley ha sido utilizada para describir los regímenes de lluvia en África, en Benin (Lebel y Le Barbé 1997), en Togo (Seguis, 1988), en Nigeria (Le Barbé y Lebel, 1997) y en Burkina Faso (Tapsoba, (1997)

Si se considera una variable aleatoria, $y \geq 0$, que sigue una distribución exponencial simple, con parámetro de escala β , su función de densidad, ya presentada en el subcapítulo 2.3.3., puede expresarse como:

$$f(y) = \frac{1}{\beta} e^{-y/\beta} \quad (4.1)$$

Sea ℓ un número entero aleatorio (mayor a cero) que sigue una Ley de Poisson, presentada en el subcapítulo 2.3.2., de parámetro de forma $\lambda > 0$. El valor de su probabilidad estará dado por:

$$p(\ell) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^\ell}{\ell!} \quad (4.2)$$

De esta forma, una variable aleatoria $x = y_1 + y_2 + \dots + y_\ell$ puede representarse como la suma de $\ell > 0$ variables aleatorias independientes que siguen una Ley Fuga con parámetro de forma λ , y de escala β . Respecto a la duración, es equivalente decir: que un número de eventos $n(t)$ seguirá una Ley de Poisson para una duración t , o bien que el intervalo T entre dos eventos consecutivos sigue una ley exponencial de parámetro de escala μ_T , sobre el mismo tiempo t .

$$f(T) = \frac{1}{\mu_T} e^{-T/\mu_T} \quad (4.3)$$

donde:

μ_T parámetro de forma de la ley exponencial
 T intervalo entre dos eventos

Cabe recordar que la distribución exponencial es un caso particular de la llamada familia de distribuciones Gamma (Sapora, 1990).

Sea $t_r = T_1 + T_2 + \dots + T_r$ la suma de r variables que siguen una distribución exponencial (expresión 4.3). Es sabido que la función de densidad de la suma de r variables aleatorias independientes es el producto de convolución de las densidades de cada una de ellas (Tapsoba, 1997). De esta forma, la ley condicional de t_r será una distribución Gamma incompleta, con función de densidad de probabilidad igual a:

$$f(t_r) = \frac{\left(\frac{t_r}{\mu_T}\right)^{r-1} e^{-t_r/\mu_T}}{\mu_T (r-1)!} \quad (4.4)$$

Se cumple que $\text{Prob}(t_r \leq t) = \int_0^t f(t_r) dt_r = F_{t_r}(t)$; por lo que $\text{Prob}[n(t) = r] = \text{Prob}(t_r > t) = 1 - F_{t_r}(t)$ que también puede expresarse como: $\text{Prob}[n(t) = r] = \text{Prob}[n(t) < r + 1] - \text{Prob}[n(t) < r] = F_{t_r}(t) - F_{t_{r+1}}(t)$.

Desarrollando para x , se tiene:

$$\text{Prob}[n(t) = r] = \int_0^t \frac{\left(\frac{x}{\mu_T}\right)^{r-1} e^{-\frac{x}{\mu_T}}}{\mu_T (r-1)!} dx - \int_0^t \frac{\left(\frac{x}{\mu_T}\right)^r e^{-\frac{x}{\mu_T}}}{\mu_T r!} dx \quad (4.5)$$

Integrando por partes:

$$\text{Prob}[n(t) = r] = \frac{e^{-\frac{t}{\mu_T}} \left(\frac{t}{\mu_T}\right)^r}{r!} \quad (4.6)$$

Partiendo de una distribución exponencial como la duración entre dos eventos, con parámetro de forma μ_T , se ha demostrado que el número de eventos $n(t)$, sobre un periodo t , sigue una Ley de Poisson con parámetro $\left(\frac{t}{\mu_T}\right)$.

Función de densidad

Sea y una variable aleatoria positiva que sigue una distribución exponencial simple con parámetro de escala β y que tiene la función de densidad de probabilidad dada por la expresión (4.1). ℓ es un número entero aleatorio que sigue una Ley de Poisson, de parámetro de forma $\lambda > 0$, de probabilidad:

$$p(\ell) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^\ell}{\ell!}$$

Siendo $x = y_1 + y_2 + \dots + y_\ell$, $\ell > 0$, la suma de un número de variables independientes las cuales siguen una distribución Gamma incompleta, de densidad de probabilidad igual a:



$$f(x, \ell) = \frac{1}{(\ell-1)!} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\ell-1} \frac{e^{-x/\beta}}{\beta} \quad (4.7)$$

Si se trabaja con la variable reducida $U = x/\beta$ se tiene:

$$f(U, \ell) = \frac{1}{(\ell-1)!} U^{\ell-1} e^{-U} \quad (4.8)$$

A partir de éstas se obtiene la distribución marginal de U para ℓ tomando los valores de 1 a infinito, resultando:

$$f(U) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^{\ell}}{\ell!} \frac{1}{(\ell-1)!} U^{\ell-1} e^{-U} \quad (4.9)$$

o bien

$$f(U) = e^{-\lambda} \lambda e^{-u} \left[1 + \frac{\lambda U}{2} + \dots + \frac{(\lambda U)^i}{i!(i+1)!} + \dots \right] \quad (4.10)$$

Con ayuda de la función de Bessel modificada de primer orden, los términos entre corchetes pueden expresarse como:

$$I_1(2\sqrt{\lambda U}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sqrt{\lambda U})^{2n+1}}{n!(n+1)!} = \sqrt{\lambda U} + \frac{(\sqrt{\lambda U})^3}{1!2!} + \dots + \frac{(\sqrt{\lambda U})^{2i+1}}{i!(i+1)!} + \dots \quad (4.11)$$

De esta forma, la función de densidad de probabilidad de la llamada Ley Fuga para la variable reducida $U = x/\beta$ estará dada por la expresión:

$$f(U) = e^{-\lambda} \lambda e^{-u} \frac{I_1(2\sqrt{\lambda U})}{\sqrt{\lambda U}} \quad (4.12)$$

$$f(0) = f_0 = e^{-\lambda}$$

donde:

λ = es el parámetro de forma, $\lambda > 0$ (número de eventos dentro de un periodo de tiempo T)

β = es el parámetro de escala, $\beta > 0$ (lámina media de lluvia por evento)

I_1 = es la función de Bessel de primer orden

Esta ley es una distribución mixta que tiene una discontinuidad para el valor cero (excepto cuando $\lambda=1$), es decir la ordenada al origen tiene un valor de $\lambda e^{-\lambda}$. La ilustración 4.1 muestra las funciones $f(U = x/\beta)$ y $F(U = x/\beta)$.

Las principales hipótesis a considerar para emplear esta Ley en el análisis del régimen y distribución de la precipitación son: la lluvia sigue un proceso de ocurrencia sin memoria; es decir, la distribución de probabilidad del intervalo entre el inicio de un día cualquiera y el primer evento observado (día con lluvia), es la misma. La altura de la lámina de lluvia de cada evento sigue una distribución exponencial y el número de eventos (días con lluvia) registrados en una estación de medición en un intervalo t , sigue una distribución de Poisson. Si se considera que en la primera hipótesis el proceso es además estacionario, la distribución de la duración entre cada evento, seguirá una ley de distribución exponencial y el intervalo de tiempo T , del número de eventos λ sigue una Ley de Poisson. De esta forma se puede decir que la distribución propuesta es un proceso de Poisson con distribución exponencial como el llamado “ruido blanco”. Además, el parámetro β tiene una propiedad importante lo que representa una ventaja adicional haciendo posible la deducción de la distribución de la lluvia para cualquier intervalo de tiempo T^* ; a partir de la distribución calculada para el periodo T . Esta propiedad debe utilizarse como una validación de la Ley sobre una región dada (Gutiérrez-López *et al.*, 2002b).

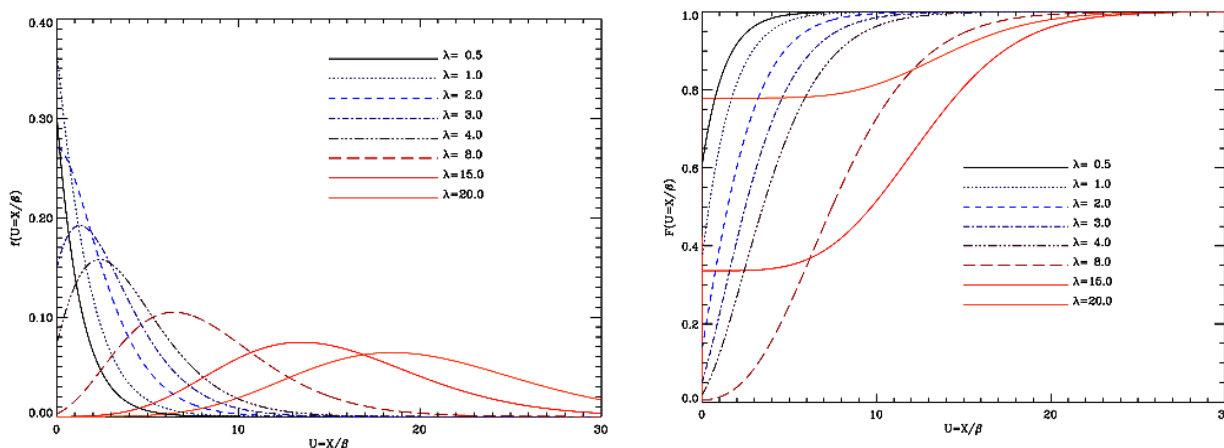


Figura 4. 1. Funciones de densidad y acumulada para diferentes valores de λ .

Estimación de parámetros

Considerando las hipótesis de esta Ley y el significado de los parámetros, se infiere que el procedimiento más eficaz depende del número de eventos nulos n_0 que existan en la muestra; es decir el número de días secos, en la serie histórica de datos. Si $n_0 \neq 0$, el procedimiento de estimación requiere, para una correcta solución, tomar en cuenta el tamaño n de la muestra (Tapsoba, 1997). De esta forma, los estimadores de los parámetros pueden obtenerse como:

$$\hat{\lambda} = \left[1 - (2 - \sqrt{2}) \sqrt{\frac{n_0}{n}} \right] \left[\frac{2\bar{x}^2}{S_x^2} - \text{Log}_e \frac{n}{n_0} \right] + \text{Log}_e \frac{n}{n_0} \quad (4.13)$$

$$\hat{\beta} = \left[1 - (2 - \sqrt{2}) \sqrt{\frac{n_0}{n}} \right] \left[\frac{s_x^2}{2\bar{x}} - \frac{\bar{x}}{\text{Log}_e \frac{n}{n_0}} \right] + \frac{\bar{x}}{\text{Log}_e \frac{n}{n_0}} \quad (4.14)$$

Para el caso de que $n_0 = 0$, sustituyendo en las expresiones anteriores, la estimación de los parámetros de la Ley Fuga, (método de momentos), se pueden estimar como:

$$\hat{\lambda} = \frac{2\bar{x}^2}{S_x^2} \quad \hat{\beta} = \frac{s_x^2}{2\bar{x}} \quad (4.15)$$

donde

$\bar{x}$ es el estimador del primer momento de la distribución de probabilidad.
 S_x es la desviación estándar de la muestra

Método de Máxima Verosimilitud

El logaritmo de la función de verosimilitud, de la cual se busca obtener el máximo, es la siguiente:

$$L = -\lambda n + \frac{(n - n_0)}{2} \text{Log}_e \frac{\lambda}{\beta} - \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{x_i}{\beta} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-n_0} \text{Log}_e x_i + \sum_{i=1}^{n-n_0} \text{Log}_e I_1 \left(2\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}} \right) \quad (4.16)$$



La anulaci3n de las derivadas parciales de L , respecto a λ y μ conducen a un sistema de ecuaciones de la forma:

$$-n + \frac{n - n_0}{2\lambda} + \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)} \frac{z_i}{2\lambda} = 0 \quad (4.17)$$

$$-\frac{n - n_0}{2\beta} + \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{x_i}{\beta^2} - \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)} \frac{z_i}{2\beta} = 0 \quad (4.18)$$

en donde

$$z_i = 2\sqrt{\frac{\lambda x_i}{\beta}} \quad (4.19)$$

$I_1'(z)$ es la primera derivada de $I_1(z)$. Resolviendo el sistema de ecuaciones miembro a miembro de las ecuaciones (4.17) y (4.18) se obtiene:

$$\bar{x} = \hat{\lambda}\hat{\beta} \quad (4.20)$$

Las propiedades de la funci3n de Bessel, permiten escribir la derivada de I_1 como:

$$I_1'(z) = I_0(z) - \frac{1}{z}I_1(z)$$

I_0 es la funci3n de Bessel de orden cero. Empleando esta expresi3n en la ecuaci3n (4.17) y

sustituyendo $\bar{x}$ en la expresi3n (4.19) $\frac{z_i}{2\lambda} = \sqrt{\frac{x_i}{\bar{x}}}$ se obtiene:

$$g(\lambda) = \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_0(z_i)}{I_1(z_i)} \sqrt{x_i} - n\sqrt{\bar{x}} = 0$$

cuya solución es un valor único y positivo de $\hat{\lambda}$. La función $g(\lambda)$ es monótona y decreciente; su solución se encuentra en el intervalo $[10^{-4}, 5\hat{\lambda}_{\text{mom}}]$ en donde, $\hat{\lambda}_{\text{mom}}$ corresponde al valor del parámetro estimado por el método de momentos. El valor de β se obtiene de la expresión (4.20).

Le Barbé y Lebel (1997) proponen un procedimiento alternativo para la estimación de los parámetros de la Ley Fuga. Este método propone emplear el número promedio de días secos n_0 dentro del periodo T del total de n días. Este procedimiento tiene una singular importancia ya que la información de los días secos no se emplea directamente en la estimación de parámetros de los métodos de momentos. De esta forma se tiene que los parámetros estarán dados por:

$$\hat{\lambda} = -\text{Log}_e\left(\frac{n_0}{n}\right) \qquad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\lambda}} \qquad (4.21)$$

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Del programa ERIC que facilita la extracción de la información del banco de datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), contenida en la base de datos CLICOM, se utilizaron las series históricas diarias de 41 estaciones, previa selección, ubicadas dentro de la Región Hidrológica 36 (RH-36); 20 de la sub-región pluviométrica árida, 12 de la sub-región pluviométrica semiárida, y 9 de la sub-región pluviométrica subhúmeda. A través del programa HYFRAN, desarrollado por el INRS-ETE de la Universidad de Québec y CRSNG, se estimaron los parámetros de la Ley Fuga empleando los tres procedimientos descritos anteriormente, presentados en el apéndice D (ver cuadros D-3.1 al D-4.3). Con base en el estadístico χ^2 el método de momentos es el que dio el mejor ajuste a las muestras de datos (ver cuadros del apéndice D, D-5.1 al D-8.6), tal como en un trabajo similar lo ha probado Gutiérrez-López, *et al.*, 2002b. La figura 4.2 muestra el ajuste de la Ley Fuga a la serie histórica de lluvia diaria en la estación Lerdo de la Sub-región Árida de la RH-36, para el periodo 1969-2003 empleando los estimadores de los parámetros por el método de momentos.

Como se mencionó anteriormente, el parámetro β ofrece una ventaja adicional, ya que con éste puede deducirse la distribución de la lluvia considerando diferentes intervalos de tiempo. De esta forma, los parámetros λ^* y β^* deducidos en forma simplificada, pueden estimarse directamente multiplicando por el intervalo de tiempo deseado. Es decir, los parámetros tienen un significado físico específico y pueden ser utilizados para diferentes valores de T . De esta forma, se tiene que el parámetro de escala β permanece constante a lo largo del tiempo y el parámetro de forma λ puede calcularse para cualquier duración T esto es:

$$\beta^* = \hat{\beta} \quad ; \quad \lambda^*_T = k\hat{\lambda}_T \quad (4.22)$$

Se aceptará que existe no estacionariedad en el caso de que el valor de λ tenga una variación mayor al 20% entre el valor máximo y mínimo dentro del periodo considerado. Según Gutiérrez *et al.*, 2002², se considerará como un proceso estacionario mientras se mantenga constante durante el 80% del periodo, en caso contrario el parámetro de escala debe estimarse como:

$$\lambda^*_T = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\lambda}(t) dt \quad (4.23)$$

Cuando se dispone de datos de lluvia diaria es recomendable elegir T igual a un día (Lebel y Le Barbé, 1997; Lebel *et al.*, 1997).

A continuación en las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y el cuadro 4.1 se muestran algunos de los resultados obtenidos como parte de la validación del modelo aplicado para las estaciones climatológicas de la RH-36: estación “Lerdo”, periodo 1969-2003 y ubicada en la sub-región árida; estación “Rodeo”, periodo 1940-2002 y ubicada en la sub-región semi-árida; y la estación “La Chaparra”, periodo 1972-1982, localizada en la sub-región sub-húmeda. Y de una manera más completa se muestran los resultados en el en el apéndice D y E.

En el cuadro 4.1 y apéndice D se presentan los parámetros estimados de la serie de datos original de lluvia, diarios y acumulados en 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días. Estos parámetros corresponden al método de momentos, que fue el que mejor ajustó los datos. De ellos se pueden deducir los parámetros λ^* , segundo objetivo de esta investigación. Partiendo de la ecuación 4.22 del parámetro β y λ , y en la

cual al valor de Lambda (λ) se le multiplica por cualquier intervalo de tiempo T: 5, 10, 15, 20, 25 o 30 días; hace que se pueda conocerse el número de eventos con lluvia dentro de ese periodo de tiempo (T), λ^* . Por ejemplo, en la sub-región árida la estación Lerdo, el valor de λ diario es de 0.973, y para el periodo de tiempo de T=10 días resultó de $\lambda_{10}=9.633$ (ver cuadro 4.1); si se hace el cálculo simplificado para ese mismo periodo $\lambda_{10}^*=10 \times 0.973=9.73$; obteniendo una diferencia relativa absoluta porcentual de 1.046 % (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.1. Parámetros de escala y forma usando simultáneamente la Ley de Poisson y función de distribución Exponencial.

ESTACIÓN	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MOMENTOS													
	Arida= 10108; Semi-Arida= 10098; Sub-Húmeda= 10096													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
LERDO 10108	7.072	0.973	7.844	4.421	7.357	9.633	9.162	11.355	7.507	18.671	4.538	36.471	8.053	26.107
RODEO 10098	5.537	1.486	5.841	7.053	5.865	14.048	5.147	24.162	6.238	26.417	4.713	43.633	5.854	42.490
LA CHAPARRA 10096	5.069	1.867	4.889	9.774	4.439	21.758	4.540	32.108	4.534	42.612	2.089	115.619	4.801	60.956

Cuadro 4.2. Validación de los valores de los parámetros de escala y forma de la Ley Fuga.

ESTACIÓN	VALIDACION DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS DE FORMA (λ)									
	1	10			20			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
LERDO 10108	0.973	9.633	9.734	1.046	18.671	19.467	4.268	26.107	29.201	11.851
RODEO 10098	1.486	14.048	14.860	5.779	26.417	29.721	12.506	42.490	44.581	4.920
LA CHAPARRA 10096	1.867	21.758	18.667	14.207	42.612	37.333	12.387	60.956	56.000	8.130

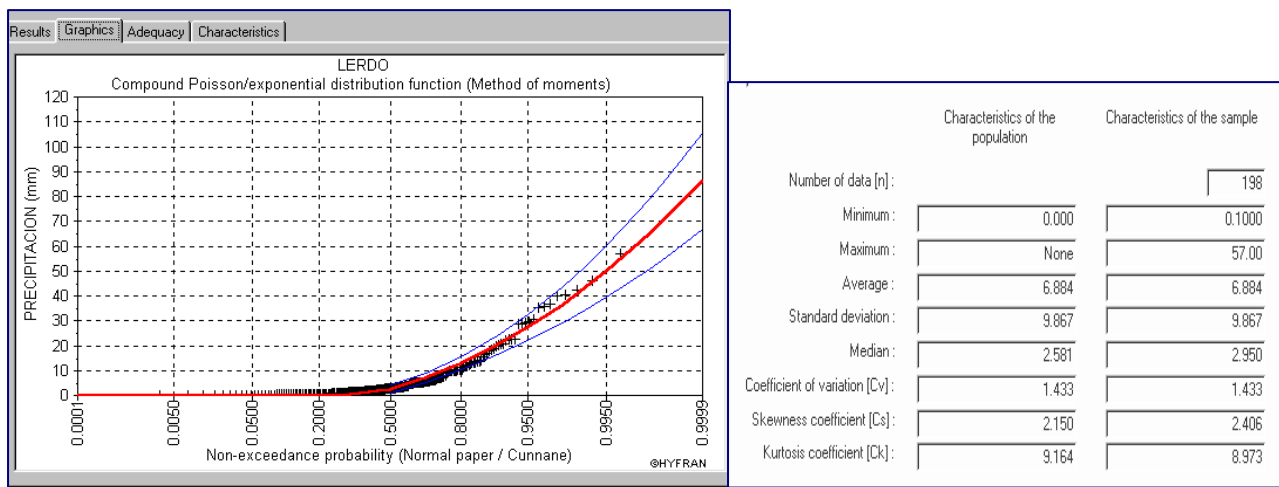


Figura 4.2. Distribución de la lluvia diaria para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003).

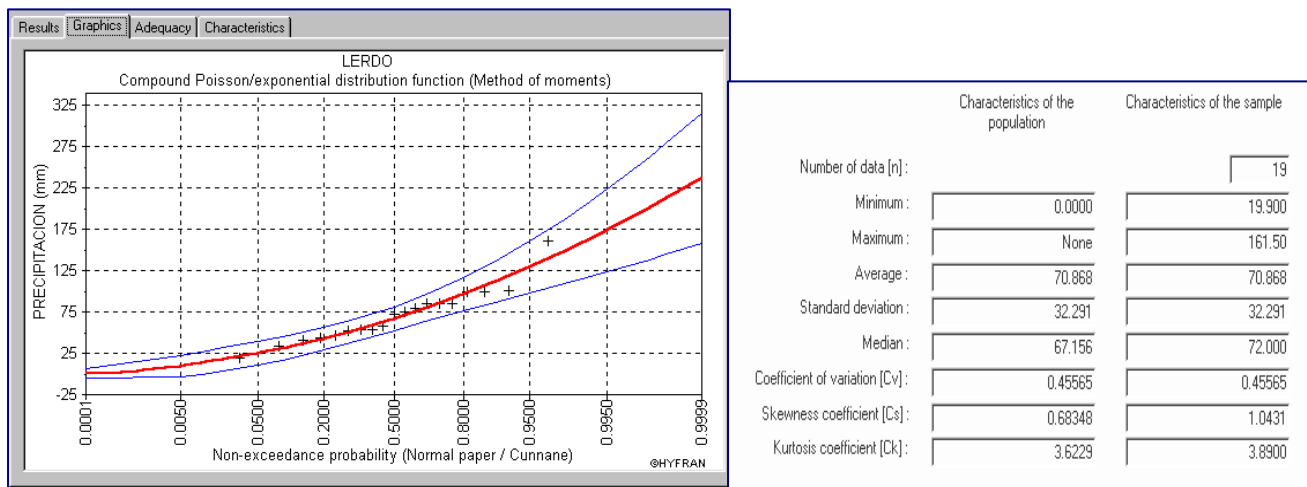


Figura 4.3 Distribución de la lluvia acumulada en diez días, para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003).

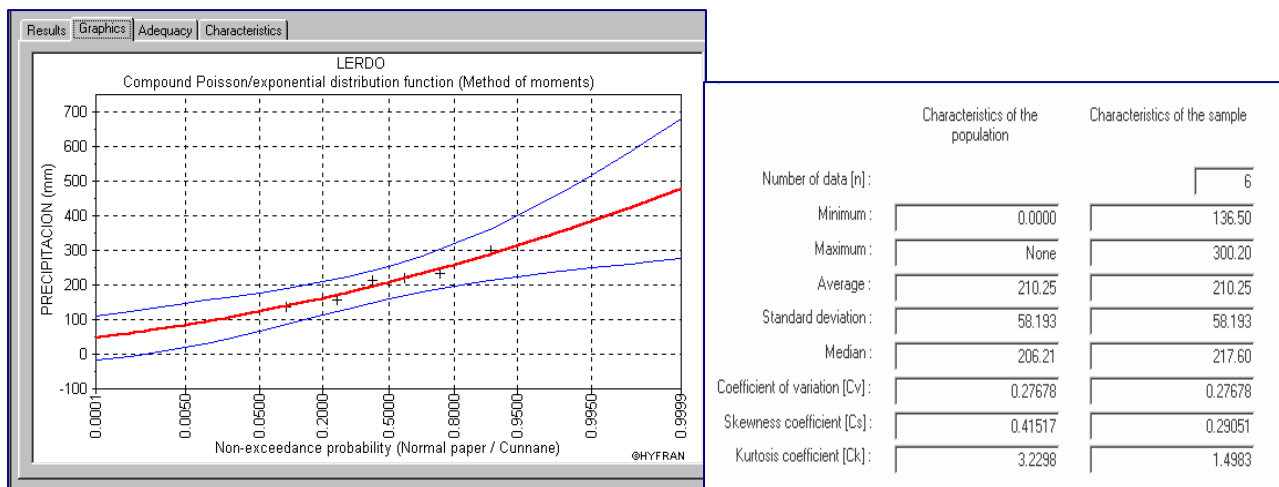


Figura 4.4. Distribución de la lluvia mensual para el mes de agosto en la estación Lerdo (1969-2003).

De un universo de estaciones climatológicas localizadas en la RH-36, ver apéndice 4, los cuadros D-4.1 a D-4.3, se determinó la frecuencia en que se presentaron los diferentes valores de frecuencia relativa, $\Delta\lambda = (\lambda_t^* - \lambda_t) / \lambda_t$, para periodos de tiempo T: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días, ver apéndice 4, los cuadros D-5.1 al D-7.5 y figuras D-7 a D-23. Considerando que la variación no fuera superior al 20% para presentar estacionariedad.

Específicamente para el periodo de tiempo $T=10$ días, se encontró que el para el grupo de estaciones de la sub-región árida el 85% de los valores de la frecuencia relativa presentaron estacionariedad por tener una variación inferior al 20%; para el grupo de la sub-región semi-árida esta fue del 60% y en el caso de la sub-región sub-húmeda resultó del 60%. El resto presentan una variación superior al rango fijado.

En forma global el universo de los valores de la frecuencia relativa para cada unas de las sub-regiones (árida, semi-árida y sub-húmeda) en todos los periodos de tiempo T resultó de 75%, 60% y 75%, respectivamente.

La figura 4.5 a la 4.7, muestra la distribución de las diferencias relativas de dicha validación $\Delta\lambda = (\lambda_T^* - \lambda_T)/\lambda_T$ para periodos de $T=10$ de las tres sub-regiones:

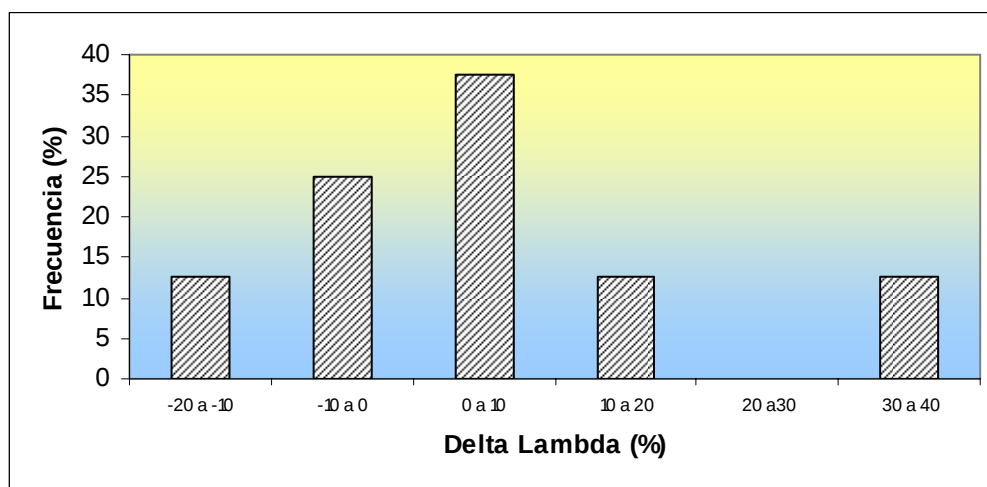


Figura 4.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=10$ días en la sub-región árida de la RH-36.

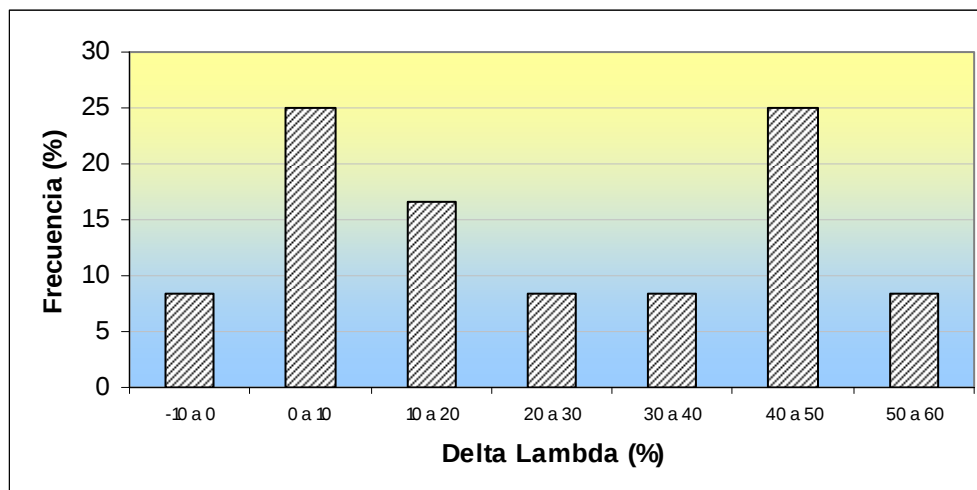


Figura 4.6. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 10$ días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

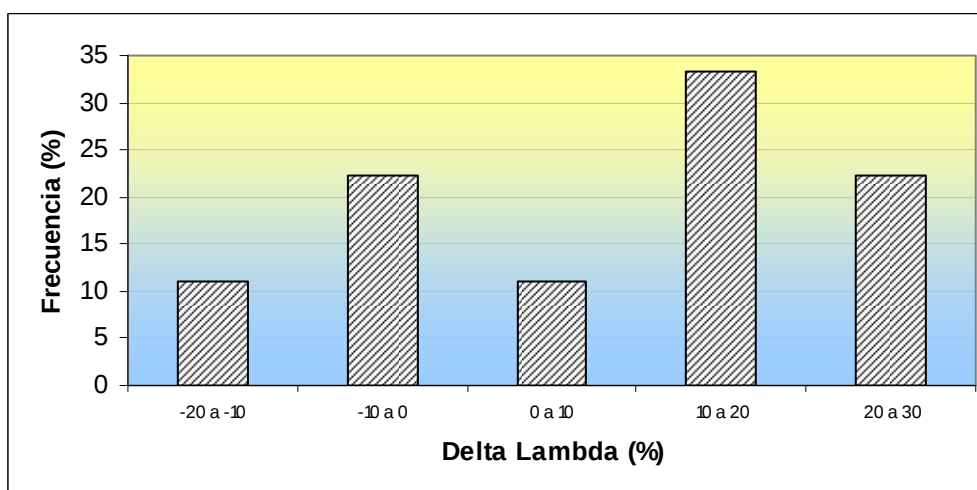


Figura 4.7. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 10$ días en la sub-región Sub-Húmeda de la RH-36.

De esta manera se puede decir que el parámetro de forma λ del modelo Poisson-Exponencial permite hacer en su manejo una desagregación temporal, ya que con solo multiplicar el parámetro por el intervalo de tiempo deseado T se obtiene el valor correspondiente de λ_T .

Riesgo hidrológico.

Otra aplicación del significado físico que representan los parámetros de la Ley Fuga radica en la posibilidad de asociarlos con conceptos de la gestión del riesgo hidrológico; en este caso el

parámetro β puede asociarse a una medida de la probabilidad de lluvia extrema y λ puede asociarse a la probabilidad de ocurrencia de lluvia (sequía), tal y como se desarrollará a continuación.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la distribución de valores extremos tipo I (Gumbel) es empleada frecuentemente para modelar eventos extremos y se origina de una distribución no acotada de tipo exponencial, expresión 4.24, y que puede demostrarse su convergencia a una distribución exponencial:

$$P(x) = e^{-e^{-\beta(x-x_0)}} \quad (4.24)$$

De acuerdo con el procedimiento propuesto por Lebel y Laborde (1988), se tienen numerosas aplicaciones del parámetro de escala de la distribución de Gumbel. Slimani y Lebel (1986), encontraron que esta distribución tiene un ajuste similar al de una distribución exponencial para los eventos máximos mensuales. Siguiendo con la misma idea, Tapsoba (1997), propone que el número de eventos registrados a partir de un día j_1 hasta un día j_2 siguen una distribución de Poisson con parámetro λ (suma de los días comprendidos entre estas dos fechas). Si Hx_{j1-j2} es la lámina máxima de lluvia registrada en cada año, durante el periodo comprendido entre los días j_1 y j_2 , $P(Hx_{j1-j2} \leq Hx)$ puede obtenerse como:

$$P(Hx_{j1-j2} \leq Hx) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda_T^* e^{-\lambda_T^*}}{i!} \left[1 - e^{-\left(\frac{Hx}{\beta}\right)} \right] \quad (4.25)$$

Simplificando se tiene:

$$P(Hx_{j1-j2} < 0) = 0 \quad (4.26)$$

$$P(Hx_{j1-j2} \leq Hx) = e^{-\lambda_T^* e^{(-Hx/\beta)}} \quad (4.27)$$

La expresión anterior es la distribución Gumbel, para valores positivos. Si se considera que los eventos son independientes y que el número medio de eventos dentro del intervalo de tiempo considerado son constantes, entonces las distribuciones Binomial y de Poisson pueden ser empleadas para evaluar el riesgo hidrológico. Si la ocurrencia de los eventos sigue una distribución de Poisson y las magnitudes de los eventos siguen una distribución Gumbel tipo I, los eventos de diseño y el riesgo estarán en función del parámetro λ .

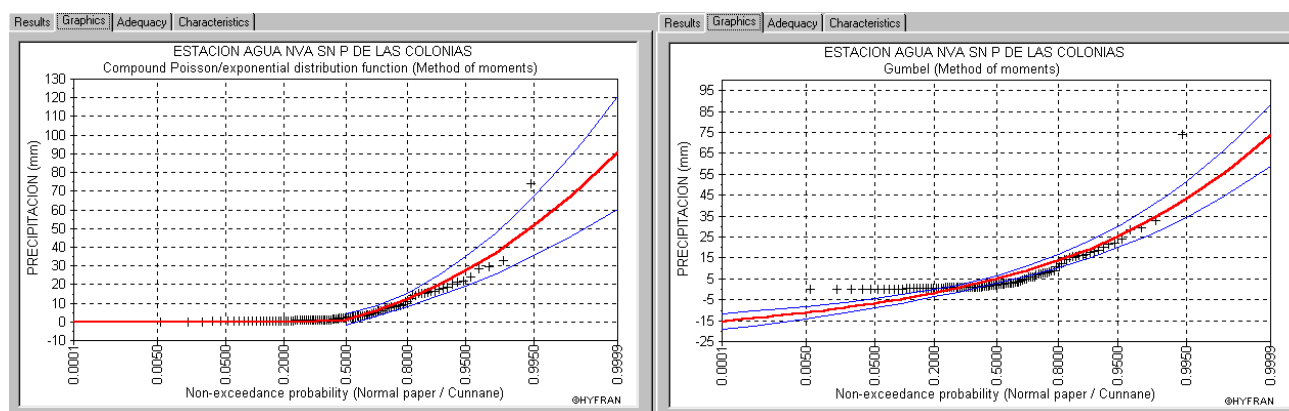


Figura 4.8. Comparación del ajuste con los parámetros de escala para el análisis de lluvia máxima aplicado al mes de agosto en la estación Agua Nueva San Pedro de las Colonias ($\beta_{\text{Poisson/Exp}}=7.89$; $\beta_{\text{Gumbel}}=7.78$).

De esta manera ajustando la distribución Gumbel tipo I a los eventos máximos anuales del mes de agosto para la estación Agua Nueva San Pedro de las Colonias ubicada en la sub-región árida de la RH-36, el parámetro de escala Gumbel resultó sensiblemente el mismo que el obtenido al hacer el ajuste con el modelo Poisson-Exponencial a la muestra de datos de lluvia diaria en el mes de agosto, para ese mismo periodo de registro; el ajuste con la ley de Gumbel a los valores máximos mensuales resultó de $\beta=7.78$, y aplicando el modelo Poisson-Exponencial a la lluvia diaria ($\beta=7.89$). En el apéndice 6 y cuadro F-2.2 se presentan los resultados obtenidos para un universo de estaciones climatológicas pertenecientes a la RH-36 y en el cual se corrobora la capacidad que tiene el modelo Poisson-exponencial para representar el régimen pluviométrico.

Relacionando los parámetros con variables físicas, la distribución espacial del parámetro β corresponde a una carta de riesgo de lluvia extrema, y la representación espacial de la distribución de λ_{31} representa un mapa de riesgo de sequía.

Efectivamente, la Ley Fuga se apoya sobre la propiedad que el número de eventos registrados durante un período de duración fija T sigue una distribución de Poisson de parámetro λ_T . Por lo anterior, se puede afirmar que el parámetro de escala de la Ley Fuga es igual al parámetro de escala de la distribución Gumbel; de esta forma, la distribución espacial del parámetro β representará el

riesgo de precipitación extrema sobre una región dada. De forma similar a las expresiones 4.28 y 4.29, si X_T es la lluvia máxima anual sobre esta duración T , se tiene que:

$$P(X_T \leq y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!} \left[1 - e^{\left(\frac{-y}{\beta} \right)} \right]^i \quad (4.28)$$

simplificando:

$$P(X_T \leq y) = e^{\left[-\lambda e^{(-y/\beta)} \right]} \quad (4.29)$$

$$P(X_T < 0) = 0 \quad (4.30)$$

El parámetro λ del modelo Poisson-Exponencial como índice de sequía

La presente aplicación indica una ventaja más del modelo Poisson-Exponencial al establecer una relación del parámetro de forma λ de dicha Ley con el índice SPI; basados en el hecho de que la duración de un evento de sequía puede definirse en función de la detección desde sus etapas iniciales hasta su etapa final a través del tiempo, por lo que parece apropiado introducir la variable correspondiente al número de días con lluvia.

Como se mencionó en el subcapítulo de sequías, el índice de precipitación estandarizado SPI (Standardized Precipitation Index) es uno de los índices utilizados a nivel mundial para evaluar y monitorear las sequías (McKee *et al.*, 1993, Edwards y McKee, 1997). En general este índice se calcula para intervalos de tiempo 1, 3, 6, 12 y 48 meses y permite identificar y clasificar posibles zonas susceptibles a presentar algún tipo de daño por sequía. Caso de ello se presentan los gráficos de SPI para las escalas de 3, 6 y 12 meses para la estación San Pedro localizada en Coahuila, valores obtenidos a través del programa desarrollado por el “National Agricultural Decision Support System”.

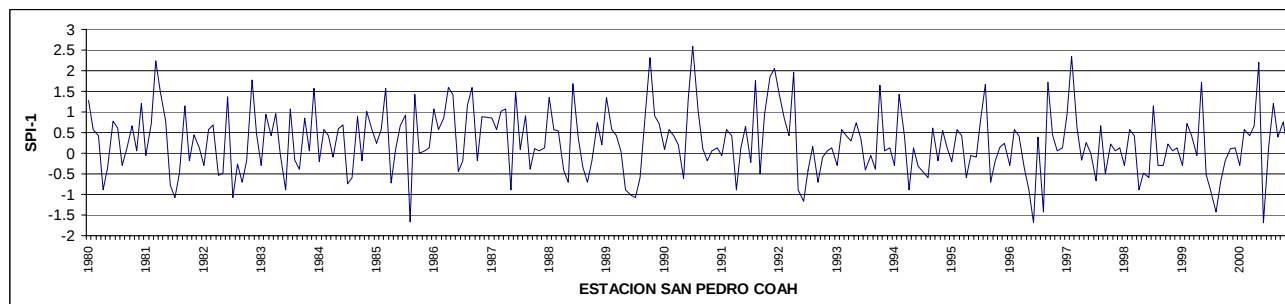


Figura 4.9. Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 1 mes para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.

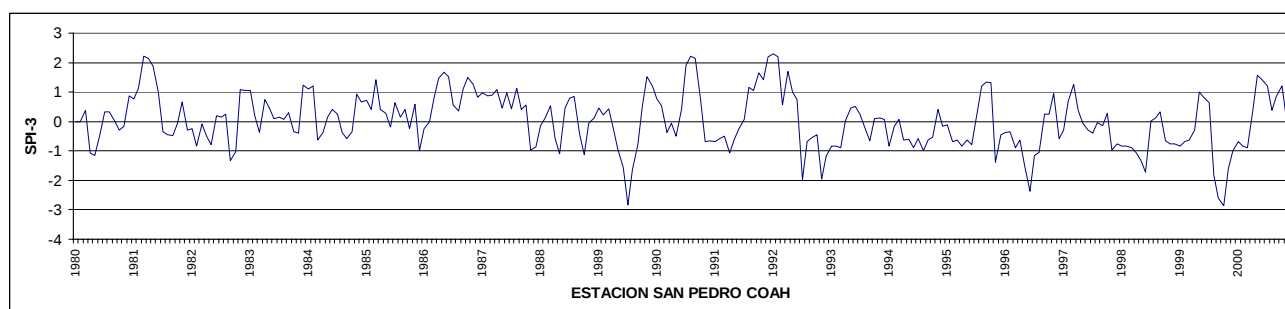


Figura 4.10. Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 3 meses para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.

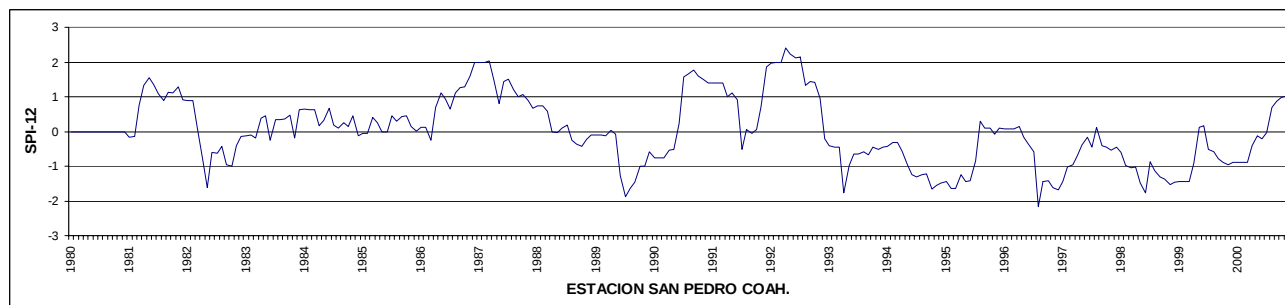


Figura 4.11. Gráfico de valores calculados del SPI a escala de 12 meses para el periodo de 1980-2000, aplicado a la estación San Pedro, localizada en la sub-región árida.

Si se calculan los valores de SPI por el método tradicional para un cierto número de estaciones climatológicas y se representa espacialmente, la distribución espacial que resulta muestra el mismo comportamiento a la de un plano de riesgo hidrológico; sin embargo la representación espacial del

índice SPI parece no tener relación alguna con el relieve y la topografía regional, en tanto que la distribución espacial de λ si refleja la influencia orográfica en la zona o región.

De esta forma, se propone ajustar los valores del SPI utilizando una relación que permita tomar en cuenta el efecto de la topografía de la zona. Así se obtiene una relación SPI- λ que permite estimar un índice modificado SPI*. Esta relación para el caso del norte de México (Gutiérrez, 2003) tiene la forma:

$$SPI^* = 1.734 - \frac{55.6303}{\lambda} \quad (4.31)$$

donde:

λ = es el número de eventos dentro de un periodo de tiempo T ,

SPI* = es el índice de sequía, estimado a partir del número de días con lluvia

Aplicando esta relación a tres estaciones localizadas en la RH-36 ubicadas en diferentes sub-regiones, áridas, semi-árida y sub-húmeda, se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 4.3. Valores obtenidos del SPI método tradicional y el valor de SPI* modificado.

ESTACIONES REPRESENTATIVAS	SALIDA DE HYFRAN	CALC. DIRECTO	SALIDA DE PROG. SPI	TIPO DE	SPI MODIFICADO	TIPO DE
ESTACION	λ_{diario}	λ_{*31}	SPI-1[1980/08]	SEQUIA	$SPI^*-1[\lambda_{*31}][1980/08]$	SEQUIA
San Pedro	1.59	49.29	0.62	Normal	0.61	Normal
Parras	1.09081	33.82	0.13	Normal	0.09	Normal
Sardinas	1.36464	42.30	0.25	Normal	0.42	Normal

El SPI por el método tradicional corresponde a una serie de datos de precipitación mensual del periodo 1980-2000, escala de 1 mes (SPI-1) y se escogió al mes de agosto de 1980.

Del cuadro 4.3, se puede ver que comparando los resultados obtenidos del SPI con el método tradicional respecto al SPI* modificado éstos resultan similares, coincidiendo el tipo de sequía. De este resultado se puede afirmar que el índice modificado SPI* reproduce de manera confiable la distribución espacial del parámetro λ ; definido ya previamente como un índice de riesgo de sequía.



CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL MODELO RIESGO CONJUNTO INUNDACIÓN SEQUÍA EN LA RH-36

5.1. ESTIMACIÓN CONJUNTA INUNDACIÓN-SEQUÍA

Como se mencionó en el capítulo tres, la distribución espacio-temporal de la precipitación en la RH-36 representa el 60% respecto a la media anual; el 60% de los años de registro de precipitación en las estaciones climatológicas tienen láminas de lluvia inferiores al promedio histórico; el coeficiente de variación de la lluvia en toda la región va de 0.18 para la zona más húmeda a 0.36 la más seca, que son valores comparables a los que se presentan en las regiones más áridas del mundo como es en África y Sudamérica; con el Índice de Precipitación Estándar (SPI), se encontró que el 50% de los valores clasificados de desviaciones estándar, en la que cada observación mensual se aleja de su promedio histórico, se inclina de normal a sequía extrema.

Este comportamiento de la ocurrencia de la precipitación en la RH-36 la hace una región donde la precipitación pluvial es muy variable: la presencia de años con cantidades normales o abundantes de lluvia, seguidos por otros escasos. La situación geográfica es un punto determinante de padecer esa condición; el efecto se agudiza al relacionarla con otras circunstancias como es la sensibilidad al cambio climático que se expresa en la región en largos periodos de sequía y también inundaciones provocadas por fenómenos meteorológicos extremos, además de otros efectos provocados por estar dentro de lo que se conoce como el “frente Tropical Mexicano”.



Expuesto el esquema anterior, a través de la aplicación del modelo Poisson-Exponencial, llamada Ley Fuga, se trata de profundizar en el conocimiento de la climatología regional relacionando los parámetros del modelo con el entorno geográfico y físico, la evolución del parámetro de forma λ a los cambios asociados a los fenómenos extremos; la estimación del riesgo hidrológico al resultar el valor del parámetro de escala β del modelo semejante al valor del parámetro de la distribución de Gumbel Tipo I, y la estimación de un índice de sequía resultado de un índice modificado SPI* al introducir entre su variable el valor de λ .

Aplicación 1. Los parámetros β y λ relacionados con variables físicas.

Una primera aplicación de los parámetros del modelo Poisson-Exponencial consiste en conocer la distribución espacio-temporal de la lluvia a través de la estimación conjunta de los valores de β , parámetro de escala que representa la lámina media de lluvia por evento, y de λ , parámetro de forma que representa el número de eventos dentro de un periodo de tiempo T, esto basado en los datos de láminas de lluvia de las estaciones distribuidas espacialmente en la RH-36.

Cuadro 5.1. Parámetros de escala (β) y forma (λ) diario en los cuatro meses consecutivos por el método de Momentos en la RH-36.

SUB-REGION	ESTACION	JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
		β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
ARIDA	5007	6.109	1.254	10.131	0.727	5.806	1.409	7.900	1.189
	10108	16.447	0.600	5.297	1.200	7.072	0.973	10.477	0.904
	5022	6.073	1.361	5.364	1.461	6.068	1.257	4.865	1.691
	5026	7.877	0.931	5.464	1.129	6.351	1.084	9.671	0.910
	5027	8.560	0.908	6.176	1.214	4.575	1.599	6.206	1.494
	5036	8.954	1.174	5.551	1.345	5.099	1.590	6.645	1.624
	5051	5.060	1.370	3.090	2.267	5.811	1.591	5.236	1.519
	5001	7.547	0.788	6.574	0.804	7.890	0.800	10.141	0.596
SEMI-ARIDA	10060	6.698	1.155	4.454	1.696	5.778	1.402	7.125	1.344
	10068	6.304	1.499	4.769	1.899	5.910	1.658	5.739	1.645
	10074	3.532	2.351	5.134	1.586	6.339	1.510	6.304	1.415
	10098	7.019	1.145	5.248	1.461	5.537	1.486	5.987	1.586
	32018	5.511	1.220	4.921	1.497	5.159	1.403	5.296	1.284
	10049	6.057	1.317	7.876	1.095	5.204	1.713	6.803	1.308
SUB-HUMEDA	10096	3.291	2.303	12.899	1.086	5.069	1.867	4.326	2.040
	10138	9.445	1.370	7.495	1.519	5.808	1.720	9.074	1.228
	10006	4.185	1.929	4.584	1.977	5.113	1.796	5.643	1.703



	10010	3.689	2.215	3.596	2.417	3.373	2.636	4.060	2.151
	10021	5.074	1.596	4.823	1.494	6.566	1.218	6.576	1.217
	10035	4.417	1.337	4.535	1.626	5.160	1.403	4.085	1.688
VALOR MEDIO		6.592	1.391	5.899	1.475	5.684	1.506	6.608	1.427
		PROMEDIO β		6.196		PROMEDIO λ		1.450	

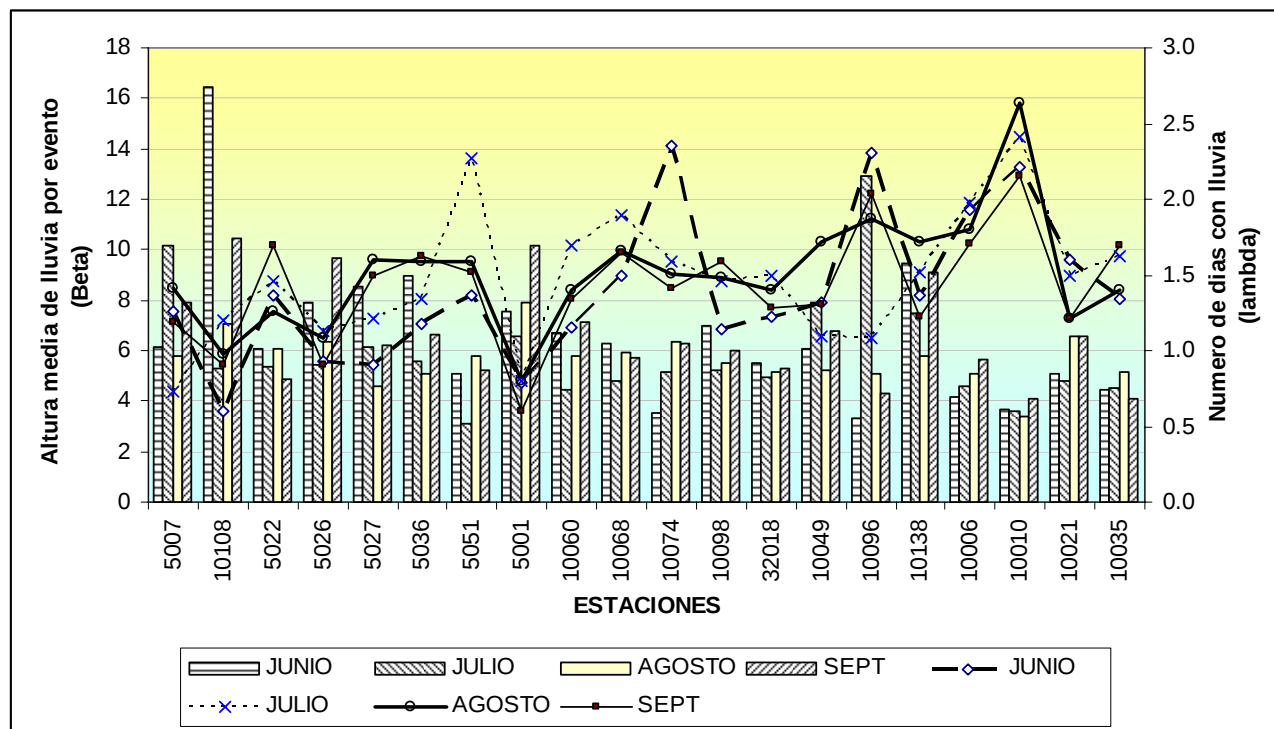


Figura 5.1. Comportamiento de los parámetros de escala (β) y forma (λ) diario en los cuatro meses consecutivos en la RH-36.

En el apéndice F se presentan los gráficos del comportamiento espacio-temporal de los parámetros λ y β para los meses de junio, julio y septiembre, ver apéndice F los gráficos del F-2 al F-3 y F-8 y del F-9 al F-10 y F-15. Para el caso del mes de agosto se hace un análisis más detallado por considerar que es el mes en el cual se presenta la mayor lámina de lluvia; la caracterización se realizó para los intervalos de 5, 10, 20, y 25 días. Para este último caso, los valores se presentan en el apéndice D, los cuadros D-2.1, D-2.2 y D-2.3 y el comportamiento se presenta en el apéndice F, para los valores de β las figuras F-4 al F-7, y para los valores de λ las figuras F-11 a la F-14. Como complemento se presentan una serie de planos donde se relacionan los valores de los parámetros con la orografía.

Con la cartografía de la RH-36, delimitada en tres sub-regiones, árida, semi-árida y sub-húmeda se trazaron las isoyetas de precipitación, encontrando una relación directa con la orografía al existir mayor precipitación conforme aumenta la altura topográfica; en ese sentido la evolución espacial de los dos parámetros de escala y forma presentan una relación entre la forma de las isoyetas de lluvia y el entorno topográfico de la región, muy dependiente de la posición de cada una de las sub-regiones de la RH-36.

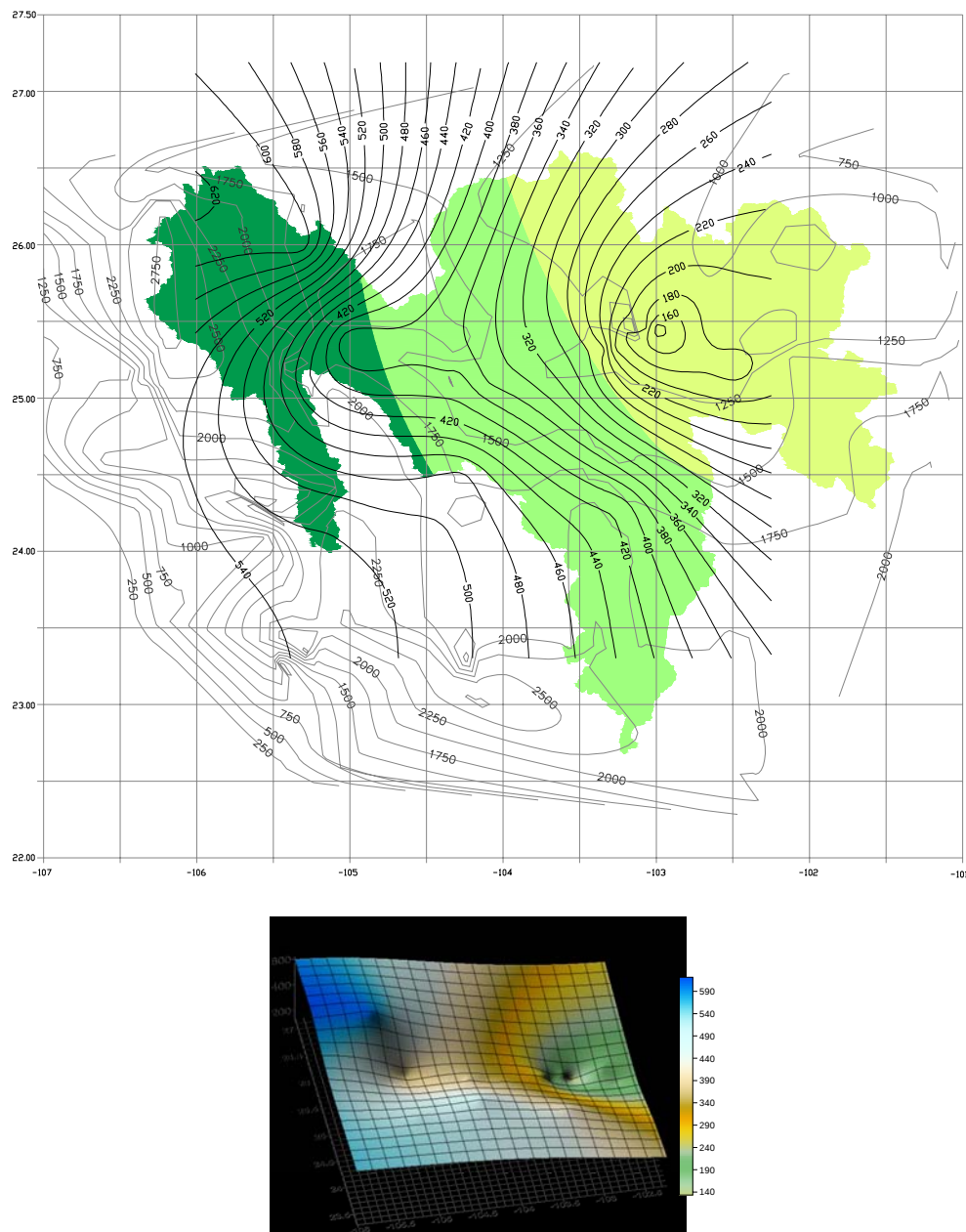


Figura 5.2. Relación de las isoyetas de lluvia anual respecto al entorno topográfico.



Para el mes de junio que es el inicio de la época de lluvias, el parámetro β tiene una distribución muy marcada, con sus máximos en la parte central de la sub-región semi-árida (S-A) de aproximadamente 6 a 9 mm y disminuye hacia sus extremos, la meseta de la sierra madre occidental, región sub-húmeda (S-H), de 9 a 4 mm y la oriental, sub-región árida (A), con láminas de 6 a 4 mm; en el mes de julio se nota un considerable aumento de las láminas de lluvia hacia la meseta de la sierra madre occidental (S-H), el norte y centro (S-A), con isolíneas de precipitación que van de los 10 a 7 mm y disminuye hacia el sur de la RH-36 y sub-región árida (A) con láminas de 6 a 3.5 mm; en el caso del mes de agosto que estadísticamente la temporada de lluvias alcanza su pico, la distribución es mas uniforme en toda la RH-36, láminas alrededor de los 5 a 6 mm, y concentrando los valores máximo hacia la meseta de la sierra madre occidental y el sur de la sub-región semi-árida, y los valores mínimos de 5 mm y valores inferiores se siguen concentrando en la parte de la sub-región árida; y finalmente para el mes de septiembre que es la temporada de descenso de las lluvias, su distribución espacial es uniforme en toda la extensión de la región, se visualiza una disminución hacia las mesetas de la sierra madre occidental, láminas de lluvia de 8-5 mm, y hacia la parte de la sub-región árida las láminas son mínimas de 7 a 5 mm, los valores mayores de 9 a 6 mm se concentran en la parte del centro de la región.

Como puede notarse, los valores máximos de β se sitúan hacia la sub-región sub-húmeda, indicando una fuerte probabilidad de lluvia sobre las zonas de altura superior al promedio, comparado con la poca pluviosidad hacia las zonas de planicie del este. Caso de ello, en la sub-región árida el valor máximo se presentó en la estación 10108 con valor de β diario promedio para los diferentes T de 7.36, y el valor mínimo promedio para los diferentes T lo presentó la estación 5036, $\beta=4.48$, el cual este último valor respecto al máximo se debe a la diferencia de altura entre estaciones y la posición de la misma; para la sub-región semi-árida, la estación 10080 y 32096 fueron las que presentaron valores de $\beta=8.95$ y $\beta=7.90$, y el valor mínimo lo presentó la estación 10131, $\beta=4.18$, que de igual manera coincide el efecto de esta fluctuación por la altura a la que se encuentran las estaciones, 2050 m.s.n.m y 1610 m.s.n.m; y finalmente para el caso de la sub-región sub-húmeda, la estación 10021 presento el valor máximo, $\beta=8.38$, y el valor mínimo lo presentó la estación 10010, $\beta=3.51$, el cual la diferencia estriba en que la estación 10010 está a una altura de 2250 m.s.n.m. y la 10021 a 1540 m.s.n.m, por lo tanto la posición geográfica es lo que provoca tal fluctuación en todos los aspectos.



Respecto a la distribución del parámetro λ , en toda la RH-36 tiene el siguiente comportamiento espacio-temporal: para el mes de junio, los valores mayores se concentran hacia la meseta de la sierra madre occidental o sub-región sub-húmeda, valores de 1.5 a 2.3 eventos, muy distinto a lo presentado en la parte semiárida y árida, valores de 1.6 a 0.8 eventos; respecto al mes de julio, el número mayor de eventos de lluvia se concentran a un en la sub-región sub-húmeda, con valores superiores a 1.6 a 1.9 eventos, y en el resto de la región se tiene la presencia de un número de eventos de 1.2 a 1.7, siendo mucho menor en la sub-región árida; para el mes de agosto, el mayor número de eventos es superior a los meses anteriores, alrededor de los 1.5 a 2.4 eventos y se concentra en la parte de la meseta de la sierra madre occidental, muy diferente a las sub-regiones semi-áridas y áridas que presentan una disminución de eventos de lluvia, alrededor de 1.6 a 1.1 eventos; y en el caso del mes de septiembre se tiene una marcada disminución del número de eventos con lluvias en la parte de la sub-región sub-húmeda, en promedio a 1.7 con máximos de 2.1 y mínimo de 1.3 eventos, y en el resto de la región se asemeja al mismo comportamiento que la del mes de junio, valor promedio de 1 evento.

Un aspecto que resalta al analizar cada uno de los planos de λ es que su comportamiento es más uniforme hacia la sub-región árida y semi-árida, situación que se atribuye a la topografía, y al tipo de clima. En relación a la topografía se encontró que a pesar de estar las estaciones climatológicas en un radio relativamente corto, estas muestran valores extremos; caso de ello en la sub-región árida las estaciones 5027, 5036, 5051 y 5001; esta última arrojó valores muy inferior al resto total, ya que es una depresión la que la hace diferente; en relación a la sub-región semi-árida, el comportamiento es uniforme y solo una estación, la 10131 que está más hacia el oeste fue la que presentó valores superior al promedio, $\lambda=2.33$; en tanto para la su-región sub-húmeda, la estación 10051 es la única que presentó un valor muy superior a todos los encontrados en la región, $\lambda=3.579$, esto se debe a la altura de 2400 m.s.n.m. en que se encuentra.

En general, el número de eventos con lluvias en esta región queda determinado por la orografía, el aspecto geoclimático y de los rasgos más prominentes de las configuraciones del flujo aéreo en escala sinóptica.

Por lo tanto puede decirse que en conjunto las tres sub-regiones de la Región Hidrológica 36 presentan una fuerte correlación entre el número de eventos lluviosos, su altura promedio y la topografía. Las alturas medias de lluvia están comprendidas entre 5.43 y 6.80 mm por evento, un promedio de 6.2 mm (ver apéndice F); lo que corresponde de una manera similar a los desiertos del mundo con las mismas latitudes; por ejemplo, al oeste y centro de África (desierto de Sahel que es de 5.5. a 7.5) o la Costa de Ecuador (6.5 a 7.5) (Tapsoba, 1997 , Descroix, et al, 1997).

Estos resultados pueden también expresarse en función de una variación espacio-temporal del régimen de lluvias, es decir, en función de la latitud o la distancia al océano. Este tipo de análisis puede llevarse a cabo con ayuda de los diagramas de Hovmöller (Gutiérrez *et al.*, 2005).

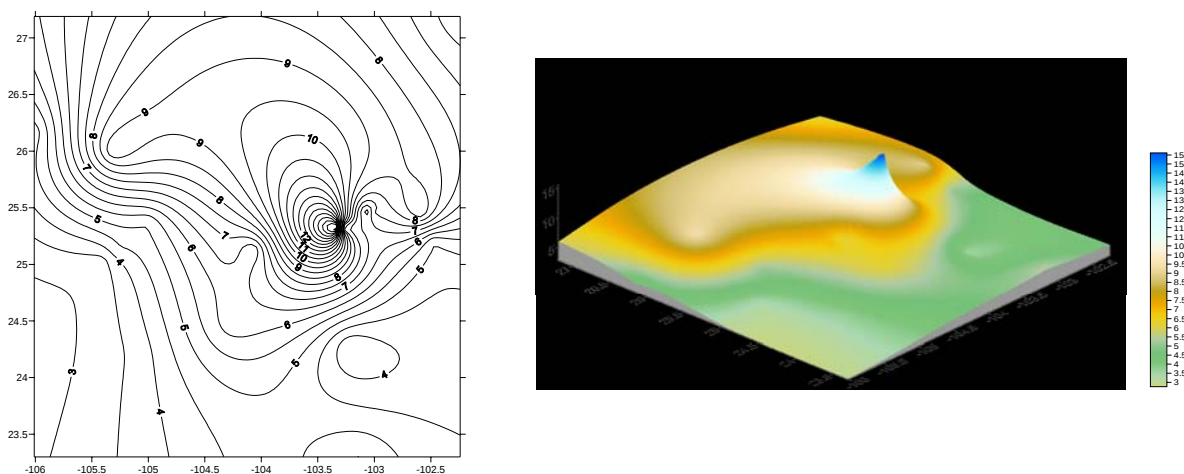


Figura 5.3. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1 de junio.

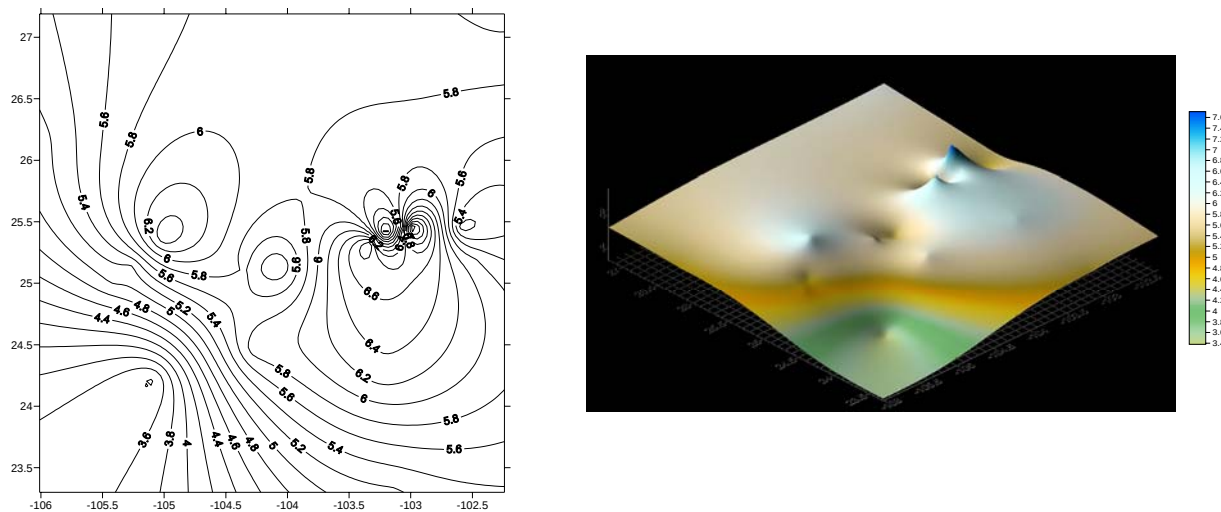


Figura 5.4. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1 de agosto.

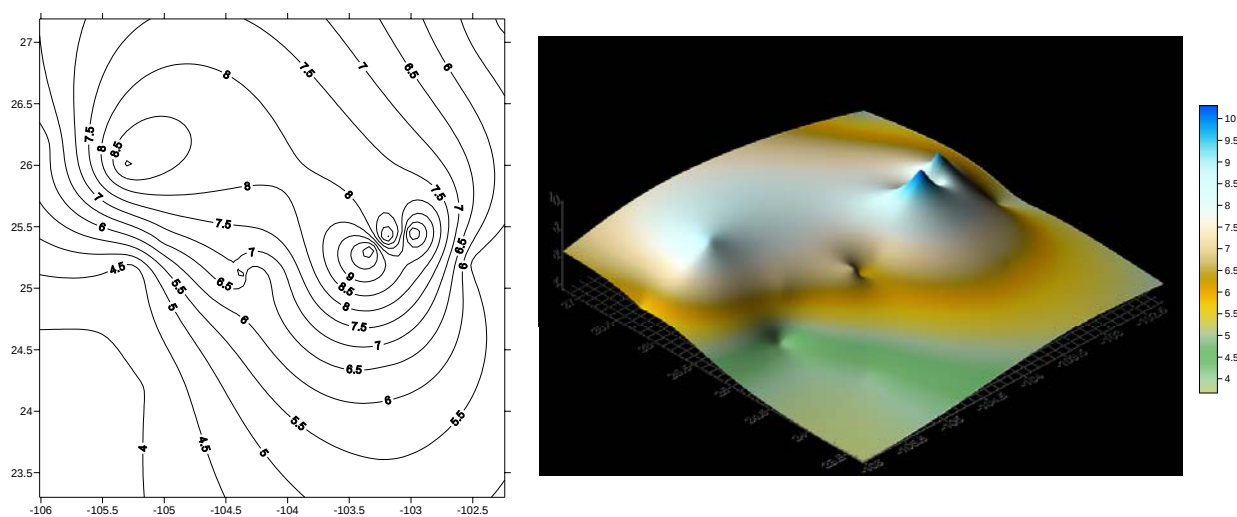


Figura 5.5. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de lluvia por evento (β) para el 1 de septiembre.

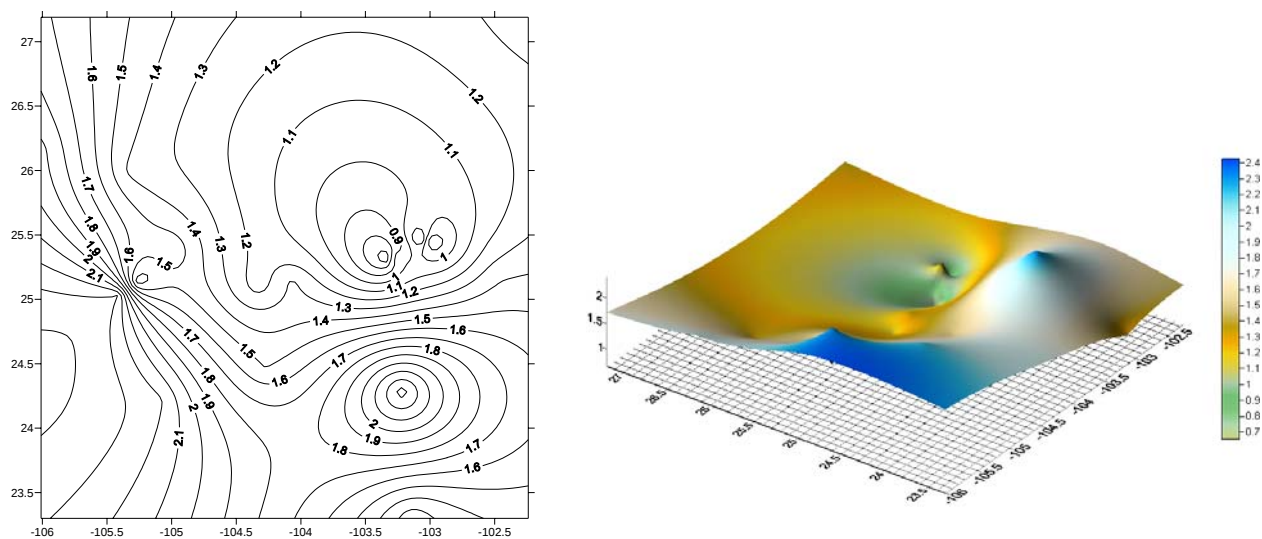


Figura 5.6. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1 de junio.

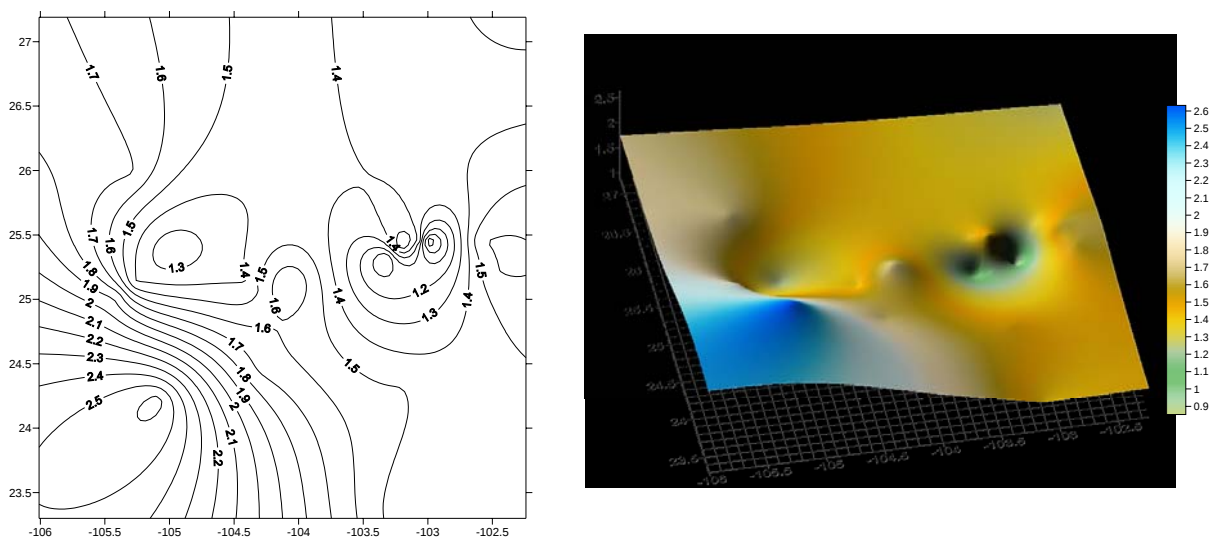


Figura 5.7. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1 de agosto.

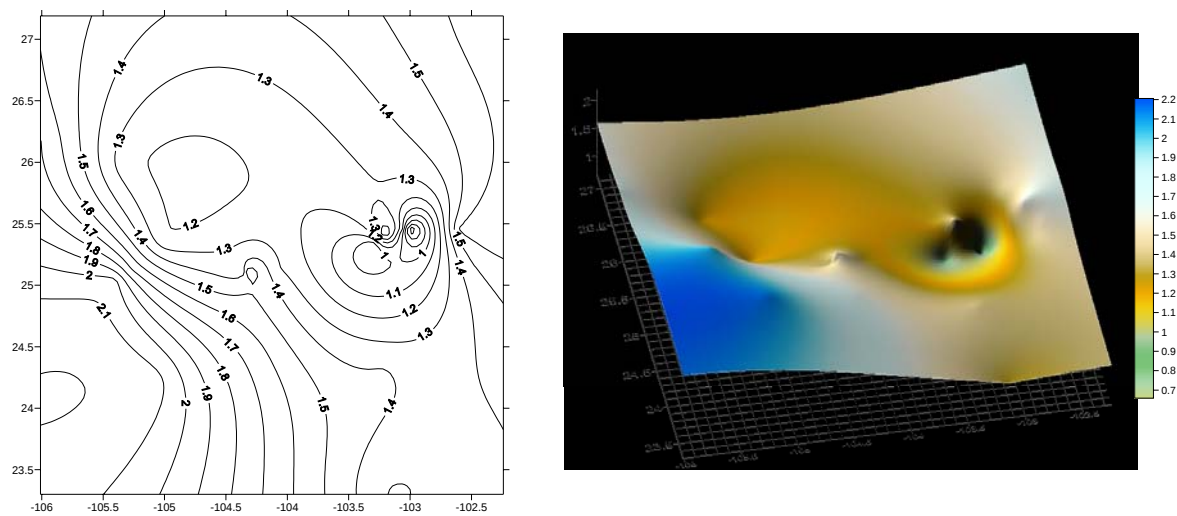


Figura 5.8. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia (λ) para el 1 de septiembre.



Aplicación 2. Estimación y representación del riesgo hidrológico.

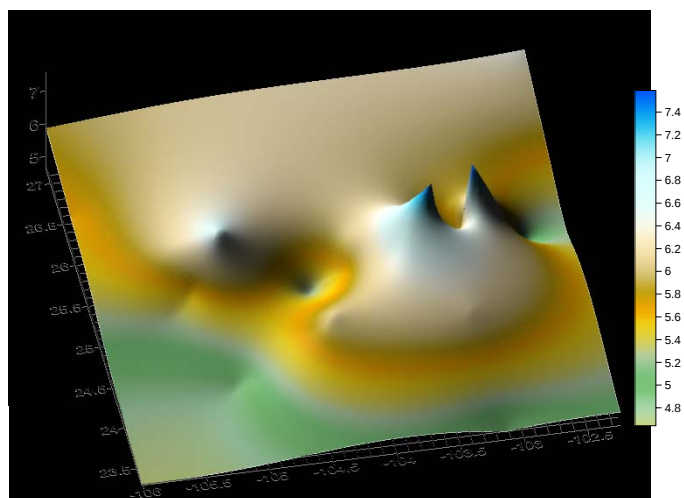
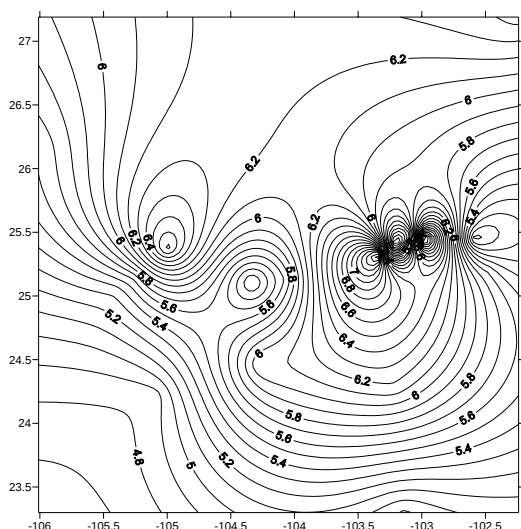
Otra aplicación del significado físico que representa los parámetros del modelo Poisson-Exponencial aplicado a la RH-36 es determinar el riesgo de lluvia extrema con los valores de β distribuidos espacialmente, y con los valores de λ_{31} se realiza el riesgo de sequía.

Como se mencionó en el capítulo 4, el parámetro de escala de la ley Gumbel es similar al obtenido por el modelo Poisson-Exponencial; tales valores se determinaron para el mes de agosto y se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.2. Determinación del riesgo de lluvia extrema (β_{Gumbel}) y sequía (λ_{Gumbel}) correspondiente al mes de agosto en toda la RH-36.

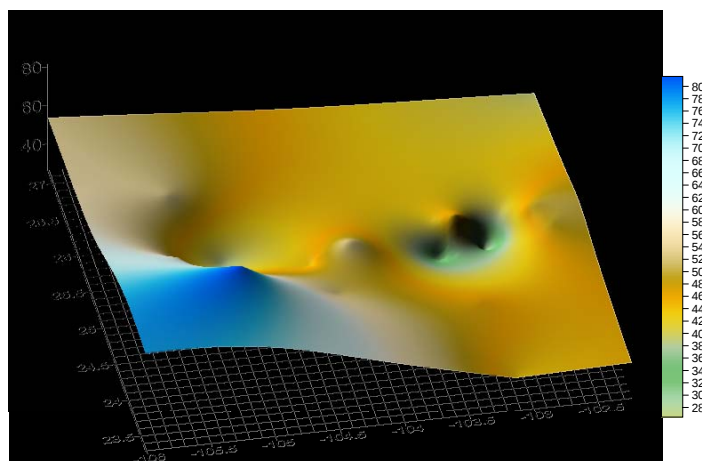
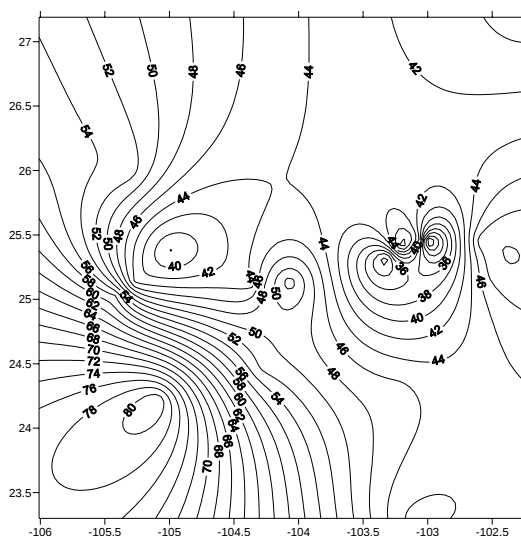
POISSON/EXPONENCIAL			RIESGO DE INUNDACION		RIESGO DE SEQUIA
	MET. AJUSTE: MOMENTOS		MET. AJUSTE GUMBEL		
ESTACION	β	λ	β	x_0	λ_{31}
5007	5.806	1.409	5.536	4.374	43.690
10108	7.072	0.973	7.694	2.443	30.174
5022	6.068	1.257	6.445	3.910	38.979
5026	6.351	1.084	6.138	3.341	33.604
5027	4.575	1.599	4.769	4.071	49.582
5036	5.099	1.590	4.944	4.631	49.297
5051	5.811	1.591	5.582	5.401	49.310
5001	7.890	0.800	7.780	1.818	24.786
10060	5.778	1.402	5.189	4.496	43.467
10068	5.910	1.658	6.104	5.644	51.392
10074	6.339	1.510	6.175	5.373	46.825
10080	6.121	1.829	6.771	6.617	56.688
10098	5.537	1.486	5.187	4.641	46.067
10131	4.324	2.334	5.948	6.232	72.366
32005	5.976	1.437	5.436	4.823	44.556
32006	5.148	1.317	5.637	3.525	40.823
32018	5.159	1.403	4.879	3.885	43.499
32020	6.150	1.187	6.392	3.611	36.798
32096	5.630	1.217	5.683	3.569	37.714
10049	5.204	1.713	5.620	5.180	53.108
10083	4.886	2.024	6.083	5.862	62.755
10096	5.069	1.867	5.328	5.985	57.867
10138	5.808	1.720	6.148	5.813	53.306
10006	5.113	1.796	5.611	5.467	55.683
10007	4.084	2.340	5.374	6.052	72.530
10010	3.373	2.636	4.854	5.759	81.723

10021	6.566	1.218	6.745	4.102	37.747
10035	5.160	1.403	5.594	4.009	43.482
10051	3.579	2.962	5.821	6.909	91.808



Beta de agosto

Figura 5.9. Media inter-anual de la altura media de lluvia por evento, riesgo de lluvia extrema para el mes de agosto en la RH-36.



Lambda agosto (λ_{31})

Figura 5.10. Media inter-anual del número de eventos por día para el mes de agosto, riesgo de sequía para el mes de agosto en la RH-36.

Las figuras 5.9 y 5.10 muestran el régimen de precipitación en toda la extensión de la RH-36 para el mes de agosto. La distribución espacial del parámetro de escala β corresponde a una carta de riesgo de lluvia extrema, mientras que la carta del parámetro λ_{31} representa una carta de riesgo de sequía

En la figura 5.9 de riesgo de lluvia extrema, los mayores valores de β o lámina de lluvia se concentran hacia la parte de la meseta de la sierra madre occidental, sub-región húmeda, y disminuye hacia la parte del centro de la sub-región semi-árida, alcanzando los valores mínimos hacia la sub-región árida, láminas de 7, 5 y 4 mm, respectivamente.

Respecto a la distribución del parámetro de escala λ como índice de sequía, el mapa de riesgo de sequía (λ_{31}) de la figura 5.10 los valores mayores de λ se concentran en la parte de la meseta de la sierra madre occidental, o sub-región húmeda, y disminuye hacia la parte de la sub-región árida. De esta distribución se puede observar que el comportamiento es muy inestable hacia la meseta de la sierra madre occidental, en tanto que para la parte árida es más estable, como se comentó anteriormente, esto se debe al clima árido que impide tener variación en el número de eventos que allí se presentan al ser estos mínimos.

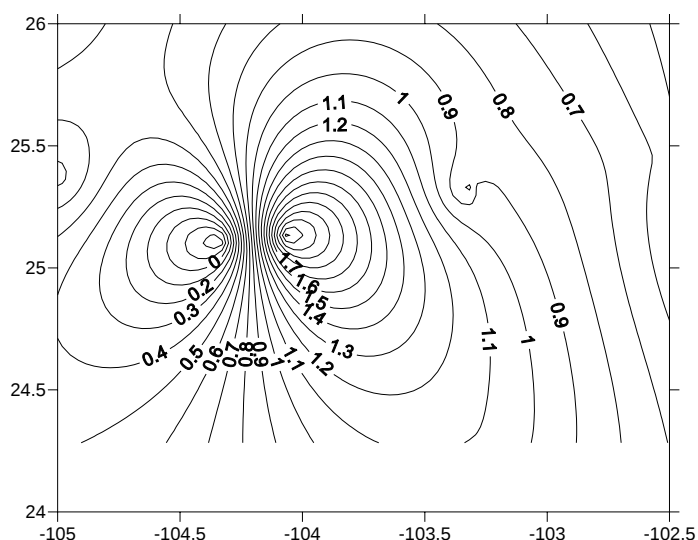
Con este análisis del parámetro de escala de la distribución Gumbel, cuyo comportamiento espacial es similar al parámetro obtenido por el modelo Poisson-Exponencial, se permite explorar la información contenida en la serie histórica de precipitación. La Región Hidrológica 36 es un ejemplo de una zona típica expuesta a fenómenos extremos presentándose la mayoría en la parte de la meseta de la sierra madre occidental.

Aplicación 3. El parámetro λ del modelo Poisson-Exponencial como índice de sequía.

De la aplicación anterior, como el parámetro λ representa aceptablemente un riesgo de sequía, es posible a través de una relación sencilla obtener el índice tradicional SPI. Por lo tanto, retomando la formulación mostrada en el capítulo 4, se aplicó la expresión SPI* modificado a nueve valores de

λ pertenecientes a las estaciones climatológicas distribuidas en la RH-36; aparte se calcularon los valores de SPI por el método tradicional para una escala de un mes perteneciente al año 1980 y mes de agosto. Los resultados se presentan en el apéndice G, cuadro G-1.2.

Con los valores del índice de sequía tradicional SPI-1 se realizó el mapa de la figura 5.11, el cual presenta un comportamiento de λ similar al presentado en la figura 5.10, con la salvedad que en el mapa de SPI-1 no está considerado el efecto del relieve y la topografía regional.



En el cuadro 5.3 se presentan los resultados de SPI aplicado para el año 1980 y mes de agosto así como la clasificación del tipo de sequía según el número de desviaciones estándar que cada dato de precipitación se desvía del promedio histórico; en la penúltima columna se muestran los valores del SPI* modificado y en la última columna su respectiva clasificación. Puede denotarse que el tipo de sequía derivado de la clasificación de los valores de SPI* modificado coinciden con la obtenida por el SPI tradicional. Por lo tanto, nuevamente puede decirse que el parámetro λ del modelo Poisson-Exponencial reproduce de manera confiable el valor de SPI como un índice de riesgo de sequía.

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La lluvia en el norte de México, tiene un comportamiento complejo de estudiar, sin embargo, los resultados de la aplicación del modelo Poisson-Exponencial, llamada Ley Fuga, en esta zona del país permite un completo conocimiento del fenómeno. El modelo mostró varias ventajas. Inicialmente permitió conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia en las tres sub-regiones de la RH-36 con la obtención de los dos parámetros de la distribución, λ y β . La sencillez de dichos parámetros permite encontrar relaciones simples con su entorno geográfico y físico.

Se demuestra que el modelo propuesto es significativamente consistente con la descripción de los cambios asociados a los fenómenos extremos, al permitir identificar en una forma confiable la temporada normal de lluvias así como los efectos de la temporada de huracanes, esto fue notorio a través de la evolución del parámetro λ . Se observa que a finales de septiembre λ disminuye debido al término de la temporada de lluvias; sin embargo, en algunas estaciones se registra un incremento de la precipitación ocasionado por los fenómenos extremos; que atraviesa la región hidrológica 36 de sur-oriental a nor-poniente, muy paralela a la sierra madre occidental.

La distribución del parámetro de escala β de la distribución de Gumbel tipo I, valor muy similar al obtenido con el modelo, representa un riesgo de lluvia extrema por lo que hace una herramienta adecuada para explorar la información contenida en una serie histórica de precipitación. La región hidrológica 36 muestra un comportamiento típico de una región afectada por fenómenos extremos, ya que los principales riesgos se presentan a lo largo y ancho de toda la región y en la zona de alta



pluviosidad. Por lo tanto, se considera que la metodología propuesta y el empleo de la Ley Fuga, se adaptan a las necesidades de estimación del riesgo hidrológico y permiten profundizar en el conocimiento de la climatología regional.

Respecto a la comparación entre el índice SPI y el número de días con lluvia, se puede observar que el parámetro λ por si solo representa aceptablemente un riesgo de sequía y que permite obtener a través de una relación sencilla el índice tradicional de sequía SPI. Y en relación al SPI modificado, puede afirmarse que el SPI*, relacionado con la distribución espacial del parámetro λ de la Ley Fuga, permite estimar de manera rápida y confiable un índice de sequía que en lo general es difícil estimar y sobre todo interpretar.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones a las que se llegó después de analizar cada apartado de la investigación se enumeran a continuación:

- a. Respecto al modelo de la Ley fuga, Poisson-Exponencial, en la formulación del riesgo conjunto, inundación-sequía.
- Presenta la bondad de tratar dos fenómenos extremos de inundación y sequía que tienen lugar en el contexto del clima a nivel local o global, esto a través del manejo de una sola variable que es la precipitación.
- La sencillez en la aplicación del modelo comparado con el significado a que equivalen los parámetros obtenidos, lo hace que se adquiriera como una herramienta poderosa y confiable para evaluar el riesgo climático de ocurrencia de lluvias extremas.
- El modelo probabilístico reproduce a través de sus parámetros bien definidos el número de días con lluvia (parámetro de forma λ) y la magnitud promedio de lámina de lluvia caída (β); también permite la desagregación temporal de los eventos estimados al multiplicar el valor del parámetro (λ) por un valor del intervalo de tiempo T .
- Debido al significado físico de los parámetros del modelo, y como el parámetro de escala (β) es igual al parámetro obtenido a través de la distribución Gumbel tipo I cuando se ajusta a una serie de máximos, entonces es posible asociar a la distribución mezclada Poisson-Exponencial con una ley de valores máximos.



- De la misma referencia del significado físico de los parámetros; por su parte el parámetro de forma (λ) de la distribución de Poisson, como lo han mencionado varios autores al emplearlo en la modelación de periodos de sequía, se correlacionó el obtenido por el modelo con un índice de aridez, reproduciendo la sequía de manera semejante a los valores obtenidos al emplear el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).
- b. Respecto a la aplicación del modelo de la Ley fuga, Poisson-Exponencial, en la formulación del riesgo conjunto, inundación-sequía, en la región hidrológica 36 (RH-36).
- La metodología empleada permitió conocer el régimen de precipitación en la RH-36, aprovechando de igual manera para sentar las bases teóricas al poder ser aplicada en cualquier región hidrológica de México y del mundo.
- La sencillez de los parámetros permiten encontrar relaciones simples con el entorno geográfico y físico del área de estudio.
- El modelo implementado es una herramienta útil que desencadena en varias aplicaciones, una de ellas es conocer la evolución espacio-temporal de la precipitación, definiendo las zonas más lluviosas por los altos valores de β y λ , la temporada de lluvias normales y la presencia de huracanes.
- Otra aplicación fue estimar el riesgo hidrológico, definido por el modelo al ubicar a los parámetros de forma y escala (λ y β) con valores máximos en las zonas de alta pluviosidad o muy cercanas a las costas, que son los lugares propensos de riesgos; también se hace hincapié en que el valor de λ por si mismo representa un riesgo de sequía por lo que es viable y se corroboró que a través de una relación se puede obtener el valor de SPI tradicional, al estimar de manera rápida y confiable un índice de sequía, que en lo general es difícil de estimar y sobre todo interpretar.



Como recomendación y líneas que se abren respecto al avance en este trabajo son:

- Para evitar sesgo en la caracterización completa del riesgo hidrológico derivado en episodios pluviométricos extremos que dan lugar a inundaciones o sequías, se necesita que la bases de registros de precipitaciones históricas sean de un rango amplio, que estén depuradas (completa y libre de errores).
- Las buenas estimaciones dependerán de amplio tratamiento de los datos de precipitación.
- Aprovechando el significado del parámetro λ , como riesgo de sequía, se puede realizar una series de tratamientos para afianzar la relación que presenta $SPI^*-\lambda$, ya que ayudaría mucho en resolver el problema que se tiene al momento de evaluar sequías del tipo meteorológicas.



CAPÍTULO 7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

ABI, Z.I., PARENT, É. Y BOBÉE, B. The stochastic modeling of low flows by the alternating point processes approach: methodology y application. *Journal of Hydrology*. Vol. 285, 2004, pp. 41-61.

ADAMOWSKI, K. Regional analysis of annual maximum and partial duration flood data by nonparametric and L-moment methods. *Journal of Hydrology*. Vol. 229, 2000, pp. 219-231.

ARORA, V.K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology*. Vol. 265, 2002, pp. 164-177.

BABUSIAUX, C. *Etude statistique de la loi de fuites*. Thèse 3^{ème} cycle. Paris: Faculté des sciences de Paris, 1969.

BACCHI, B., BECCIU, G. Y KOTTEGODA, N. T. Bivariate exponential model applied to intensities y durations of extreme rainfall. *Journal of Hydrology*. Vol. 155, 2004, pp. 225-236.

BARÓ, S.J., DÍAZ-DELGADO, C., ESTELLER, A. Y CALDERÓN, G. Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte I: propuesta metodológica. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 1, enero-marzo del 2007, pp. 71-85.¹

BARÓ, S.J., DÍAZ-DELGADO, C., ESTELLER, A. Y CALDERÓN, G. Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte II: caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 3, 2007, pp. 71-85.²

BAYAZIT, M. Y ÖNÖZ, B. Sampling variances of regional flood quantiles affected by intersite correlation. *Journal of Hydrology*. Vol. 291, 2004, pp. 42-51.

BEN, Z.A. Y AZMON, B. Joint use of L-moment diagram and goodness-of-fit test: a case study of diverse series. *Journal of Hydrology*. Vol. 198, 1997, pp. 245-259.

BURN, D.H., Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology*. Vol. 202, 1997, pp. 212-230.



CALDER, I.R. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, Vol. 89, 1986, pp. 65-71.

CAMERON, D., BEVEN, K. Y TAWN, J. An evaluation of three stochastic rainfall models. *Journal of Hydrology*. Vol. 228, 2000, pp. 130-149.

CASTELLARIN, A., BURN, D.H. Y BRATH, A. Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 241, 2001, pp. 270-285.

CAZANAVE Y NEREM. R. *Geophysic*. Vol. 42, no. 3, 2004.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. Y MAYS, L.W. *Hidrología Aplicada*. México: McGraw Hill, 1994.

COLES, S., PERICCHI, L.R. Y SISSON, S.A. fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *Journal of Hydrology*. Vol. 273, 2003, pp. 35-50.

COMISIÓN INTERSECRETARIAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (CICC). *Estrategia Nacional de Cambio Climático México 2007*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 39. [citado el 22 de septiembre 2007]. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/cambioclimatico/Pages/estrategia.aspx>

CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F. 2007, pp. 260.

CREUTIN, J., Y OBLED, C. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *J. Water Resources Research*. Vol. 18, núm. 2 de 1982, pp. 413-431.

CUNDERLIK, J.M. Y BURN, D.H. Analysis of the linkage between rain and flood regime and its application to regional flood frequency estimation. *Journal of Hydrology*. Vol. 261, 2002, pp. 115-131.

DELHOMME, J.P. Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau, Bulletin du B.R.G.M 4. France: section III, 1978, pp. 341-375.

DESCROIX, L., ESTRADA, J., GONZÁLEZ, B. Y VIRAMONTES, D. *La Sierra Madre Occidentale*. Paris: IRD, collection Patitudel 23, 2005, pp. 143-153.¹

DESCROIX, L., NOUVELOT, J.F. Y ESTRADA, A.J. *Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36*. Gómez Palacios, Durango: CENID-RASPA ORSTOM, 1997, pp. 52.²

DOMÍNGUEZ, M.R. Esguimientos extremos. *Tlálloc AMH*. núm. 20, octubre-diciembre de 2000, pp. 22-24.



EDWARDS, D. Y MCKEE T. *Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time scales*. Climatology Report No. 97-2. Colorado State University: Department of Atmospheric Science, Paper No. 634, 1997, 155 p.

ESCALANTE C. Y REYES, L. *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM, 2002, pp. 298.

ESCALANTE, C. Y REYES, L. *Análisis de sequías*, Vol. I. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM, 2005, pp. 472.

ESCALANTE, C. Y REYES, L. *Curvas Hp-d-T de la república mexicana para duraciones de 5 minutos*. XVII Congreso Nacional de Hidráulica. Monterrey. N. L., México: Asociación Mexicana de Hidráulica, 2002, pp. 575-580.

ESCALANTE, S.C. Caracterización de las sequías. *Tláloc AMH*, núm. 20, octubre-diciembre de 2000, pp. 10-13.

FERNÁNDEZ, L.B. Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del Agua*. Vol.4, núm. 4 de 1997, pp. 37-46.

FILL, H. Y STEDINGER, J. Using regional regression within index flood procedures and an empirical Bayesian estimator. *Journal of Hydrology*. Vol. 210, 1998, pp. 128-145.

GARCÍA, E. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, No. 50. México, D.F: UNAM., 2003, pp. 67-76.

GARCÍA, J.F., FUENTES, M.O. Y MATIAS, R.M. Fascículo Sequías [en línea]. CENAPRED, Ciudad de México, noviembre 2002 [citado el 24 de agosto 2007]. Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/2892006sequias.pdf>

GARIBALDI, A. Y REY, O. *El Cambio Climático en América Latina y el Caribe*. PNUMA, SEMARNAT, CITMA, Universidad de Sao Paulo, Brasil, y la Unidad de Cambio Climático, Ministerio de Salud y Medio Ambiente de Argentina. México, 2006, pp. 126.

GELLENS, D. Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium. *Journal of Hydrology*. Vol. 268, 2002, pp. 113-126.

GREHYS, Groupe de recherche en hydrologie statistique, Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 186, 1996, pp. 63-84.

GRUPO DE TRABAJO 23. Implicaciones Económicas y Sociales de los Riesgos naturales. Congreso Nacional del Medio Ambiente, España. [citado el 12 de octubre 2007]. Disponible en: http://www.colgeocat.org/web/pdf/doc_2007020717272314.pdf

GUTIÉRREZ, L.M. Modélisation stochastique des régimes pluviométriques a l'échelle régionale pour la prévision des crues au Nord-Mexique. Tesis doctoral. Francia: Institute National Polytechnique de Grenoble, 2003.



GUTIÉRREZ, L.A., DESCROIX, L. Y LEBEL, T. Rainfalls Regionalisation, in North Mexico generating Regional Vectors. Conference on Water Resources Planning and Management and Symposium on Managing the Extremes-Floods and Droughts. Virginia, USA: ASCE, EWRI, Roanoke, 2002.¹

GUTIÉRREZ, L.A., DESCROIX, L. Y LEBEL, T. Statistical Analysis for Modelling the Hydrological Risk in Northern Mexico. International Association for Hydraulic Research (IAHR) Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety of Hydraulic Structures, St. Petersburg, Russia, 2002.²

GUTIÉRREZ, L.A., LEBEL, T., Y MEJÍA, R. Estudio espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona meridional de la República Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*, IMTA. Vol. XX, núm. 1 del 2005, pp. 57-65.

HEO, J.H., SALAS, J.D. Y BOES, D. Regional flood frequency analysis based on a Weibull model: Part 2. Simulations and applications. *Journal of Hydrology*. Vol. 242, 2001, pp. 171-182.

HERNÁNDEZ, R.F., VILLASEÑOR, A.J. Y VAQUERA, H.H. La prueba de la razón de verosimilitudes para la distribución Poisson contra Binomial negativa o Binomial. *Agrociencia*. Vol. 35, 2001, pp. 211-222.

http://www.nsidc.org/news/press/2007_seaiceminimum/20070810_index.html

HUGHES, R.L. On detecting anomalous behaviour in runs. *Journal of Hydrology*. Vol. 278, 2003, pp. 253-266.

IMTA. *ERIC II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998*. 1 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA, Jiutepec, Morelos, 2000.

INIFAP. *Sequía: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México*. INIFAP, libro técnico No. 4, 2ª edición, México, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Fourth Assessment Report" ou AR4, Climate Change 2007. IPCC (Editores). Cambridge: University Press, 2007. <http://www.ipcc.ch/>

ISTOK, J.D. Y BOERSMA, L. A stochastic cluster model for hourly precipitation data. *Journal of Hydrology*, Vol. 106, 1989, pp. 257-285.

KITE, G.W. Frequency et risk analyses in hydrology. *Water Resources Publications*. USA, 1988, pp. 257.

KJELDSEN, T.R., SMITHERS, J.C. Y SCHULZE, R.E. Regional flood frequency analysis in the KwaZulu-Natal province, South Africa, using the index-flood method. *Journal of Hydrology*. Vol. 255, 2002, pp. 194-211.



- KOUTSOYIANNIS, D. Y ONOF, C. Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*. Vol. 246, 2001, pp. 109-122.
- KUNDZEWICZ, Z.W. Y TAKEUCHI, K. Flood protection and management: quo vadimus". *Journal Hydrological Science*. Vol. 44, 1999, pp. 417-432.
- LE BARBÉ, L. Y LEBEL, T. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*. Vols. 188-189, 1997, pp. 43-73.
- LE BARBÉ, L., LEBEL, T. Y TAPSOBA, D. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *Journal of Climate*. Vol. 15, 2002, pp. 187-202.
- LEBEL, T., TAUPIN, J.D. Y D'AMATO, N. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology*. Vol. 188-189, 1997, pp. 74-96.
- LEBEL, T. Y LABORDE, J. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*. Vol. 2, 1988, pp. 245-261.
- LE BARBÉ, L., LEBEL, T. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales. *Journal of Hydrology*. Vols. 188-189, 1997, pp. 97-122.
- LOPARDO, R.A. Y SEOANE, R. Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones. *Ingeniería del agua*. Vol. 7, 2000.
- LÓPEZ, S.L., VILLASEÑOR, A.J. Y VAQUERA, H.H. Dos pruebas de bondad de ajuste para procesos de Poisson no homogéneos. *Agrociencia*. Vol. 36, 2002, pp. 703-712.
- LOUKAS, A. Flood frequency estimation by a derived distribution procedure, *Journal of Hydrology*. Vol. 255, 2002, pp. 69-89.
- MARCHAND, W-D. Y KILLINGTVEIT, A. Statistical probability distribution of snow depth at the model sub-grid cell spatial scale. *Hydrological Processes*. Vol. 19, 2005, pp. 355-369.
- MARTÍNEZ, A. P. Análisis de las inundaciones en México: caso particular, la inundación del 2003 sobre el río Lerma en el estado de Michoacán. *Tlálloc AMH*, núm. 30, enero-abril de 2004, pp. 10-24.
- MARTÍNEZ, A. P. Simposio sobre Riesgos Hidrometeorológicos en Zonas Urbanas. Noticias y Reseñas. *TLÁLOC AMH*, núm. 35, septiembre 2005-enero 2006, pp. 30-32.
- MCKEE, T., DOESKEN N. Y KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology, 1993, pp. 233-236.
- MORALES, R., MAGAÑA, V., MILLÁN, C. Y PÉREZ, J. Escenarios de cambio climático en México. XVII Congreso Nacional de Hidráulica. Monterrey, N. L., México: Asociación Mexicana de Hidráulica, 2002, pp. 605-609.



MUNICH RE GROUP. Perspectivas. *Today's ideas for tomorrow world*. . [citado el 29 de septiembre 2007]. Disponible en:

http://www.munichre.com/app_resources/pdf/ts/geo_risks/04772_world_map_en.pdf

NACIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. [citado el 29 de septiembre 2007]. Disponible en: NATIONAL AGRICULTURAL DECISION SUPPORT SYSTEM – NADSS, 2004. SPI User Manual. Disponible en: <http://nadss.unl.edu/downloads/spi/spimanual.pdf>

NATIONAL AGRICULTURAL DECISION SUPPORT SYSTEM, NADSS, 2004. Código fuente programa Standardized Precipitation Index (SPI). [Online] Universidad de Nebraska-Lincoln, 2004. [Citado junio 2004] Disponible en la web: <http://nadss.unl.edu/downloads/>

NOUVELOT, J.F. Y DESCROIX, L. Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. *Revue Trace México*, núm. 30, 1996, pp. 9-25.

NÚÑEZ-LÓPEZ, D., MUÑOZ-ROBLES, C., REYES-GÓMEZ, V., VELASCO-VELASCO, I., Y GADSDEN-ESPARZA, H. Caracterización de la sequía a diversas escalas de Tiempo en chihuahua, México. *Agrociencia*. Vol. 41, 2007, pp. 253-262.

ONOF, C. Y WHEATER, H.S. Improvements to the modelling of British rainfall using a modified Ryom Parameter Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model. *Journal of Hydrology*. Vol. 157, 1994, pp. 177-195

ÖNÖZ, B. Y BAYAZIT. M. Troughs under threshold modeling of minimum flows in perennial streams. *Journal of Hydrology*. Vol. 258, 2002, pp. 187-197.

OUARDA, T.B., RASMUSSEN, P.F., BOBÉE, B. Y J. BERNIER. Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol. 11 (nSpécial), 1998, pp. 41-49.

OUARDA, TAHA, B.M., GIRARD, C., CAVADIAS, G.S. Y BOBÉE, B. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 254, 2001, pp.157-173.

PANDEY, G.R. Y NGUYEN, V.T. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 225, 1999, pp. 92-101.

PISARENKO V., BOLGOV, M., OSIPOVA, N. Y RUKAVISHNIKOVA, T. Application of the theory of extreme events to problems of approximating probability distributions of water flow peaks. *Water Resources*. Vol. 29, 2002, pp. 593-604.

PITA, M. Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. Vol.13, 2003, pp. 225-234.



RIBSTEIN, P. Loi des fuites. CAHIERS, ORSTOM, Série Hydrologie, Vol. XX, No. 2, 1983, pp. 117-141.

ROSSEL F. Y J. GARBRECHT. Variations spatiales et temporelles des précipitations des neuf division climatiques de l'Oklahoma et implications pour l'utilisation locale de l'indice régional. Revue des Sciences de l'Eau. Vol. 13, 2000, pp. 175-183.

SALAS, S.M. Y JIMÉNEZ, E.M. Fascículo Inundaciones [en línea]. CENAPRED, Ciudad de México, octubre 2004 [citado el 24 de agosto 2007]. Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/2892006Inundaciones.pdf>

SAPORTA, G. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip. 1990, pp. 193.

SHARMA, T.C. Simulation of the Kenyan longest dry y wet spells y the largest rain-sums using a Markov model. *Journal of Hydrology*. Vol. 178, 1996, pp. 55-67.

SINGH, P. Y KUMAR, N. Effect of orography on precipitation in the western Himalayan region. *Journal of Hydrology*. Vol. 199, 1997, pp. 183-206.

SIVAPALAN, M. Y BLÖSCHL, G. Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*. Vol. 204, 1998, pp. 150-167.

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. Vol. 240, 2001, pp. 147-186.

TAPSOBA, D. Caracterisation evenementielle des regimes pluviometriques Ouest Africains et de leur recent changement. Paris: Th. D., Université de Paris XI (Orsay), 1997.

The NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS). [citado el 29 de septiembre 2007]. Disponible en: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2005/>

VELASCO, I., OCHOA, L. Y GUTIÉRREZ, C. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*. Vol. XVII, núm. 34, 2005. pp. 35-71.

VILLASEÑOR, A.J. Y DÍAZ, C.M. Pruebas no paramétricas para procesos Poisson no homogéneos. *Agrociencia*. Vol. 37, 2002, pp. 21-31.

WILKS, D.S. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*. Vol. 210, 1998, pp. 178-191.

WILTSHIRE, S.E. Grouping basins for regional flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 30, 1985, pp. 151-159.

WORLD RESOURCE INSTITUTE (WRI). Climate Analysis Indicators Tools (CAIT) version 1.5. [citado el 29 de septiembre 2007]. Disponible en: <http://cait.wri.org>



WOTLING, G., BOUVIER, CH., DANLOUX, J. Y FRITSCH, J.M. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment. *Journal of Hydrology*. Vol. 233, 2000, pp. 86-101.

APÉNDICES

APÉNDICE A.

LA RH 36 EN LA ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIÓN A NIVEL DE REGION
HIDROLOGICA-ADMINISTRATIVA Y REGION HIDROLOGICA.

A-1. Precipitación pluvial normal mensual (mm) histórica por región hidrológico-administrativa, 1941-2000.

REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
I	22.4	19.7	13.8	4.9	1.4	1.0	14.3	35.5	40.4	14.0	11.2	23.4	202.1
II	29.1	24.7	14.5	5.4	3.7	18.4	114.6	110.4	61.4	26.1	18.5	36.0	462.8
III	31.6	17.4	8.6	5.2	9.3	66.4	184.5	181.4	138.7	49.4	24.7	36.9	754.0
IV	13.0	5.7	7.1	17.0	53.2	181.6	192.8	182.9	194.2	83.2	20.1	8.6	959.3
V	12.9	8.0	8.2	17.1	70.9	241.0	238.9	236.3	279.2	123.6	30.8	11.7	1 278.6
VI	14.8	13.1	9.6	17.0	28.4	44.6	71.8	74.1	75.6	37.5	14.8	15.2	416.4
VII	12.2	7.4	5.4	10.4	21.4	54.9	77.2	76.1	72.5	32.7	11.4	12.7	394.3
VIII	17.0	8.2	5.7	4.9	14.5	143.3	190.0	178.4	168.0	91.1	15.6	12.9	849.6
IX	19.5	14.9	19.1	36.2	64.4	126.2	124.6	122.1	164.3	78.8	27.2	18.3	815.6
X	57.7	40.9	41.3	47.5	92.4	271.4	312.1	283.8	338.6	217.7	109.8	76.8	1 889.9
XI	98.4	51.3	54.9	74.1	184.3	347.2	292.6	310.9	394.4	291.0	121.7	80.2	2 300.8
XII	41.6	32.0	31.4	35.6	86.8	172.9	155.8	158.4	198.8	145.1	65.7	47.0	1 171.2
XIII	9.9	5.1	9.5	23.1	50.6	133.2	157.9	142.3	125.9	57.8	14.6	7.3	737.1
NACIONAL	25.9	17.7	15.2	19.1	39.8	103.7	137.9	137.0	141.0	73.7	31.7	29.2	771.8

FUENTE: Conagua. Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Estadística del Agua 2007.

A-2. Precipitación media mensual (mm) por región hidrológico-administrativa, 2006.

REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
I	4.5	8.4	23.6	10.1	5.6	0.0	42.5	25.1	62.8	24.7	0.8	3.8	211.9
II	0.7	1.6	3.0	0.06	1.7	25.6	110.5	121.2	80.8	33.6	1.0	10.4	390.1
III	6.0	0.2	2.2	0.6	10.4	68.7	158.5	208.1	139.3	52.3	0.4	17.9	664.6
IV	12.6	6.4	7.5	12.0	75.3	172.5	214.7	215.5	199.2	123.3	40.9	9.5	1089.4
V	26.9	3.3	3.5	11.4	76.9	202.8	291.2	227.8	233.2	120.7	59.3	21.4	1278.4
VI	3.9	2.1	7.6	8.9	24.6	57.4	96.9	130.1	117.8	37.0	5.5	30.7	522.5
VII	12.4	1.4	5.3	9.3	32.9	56.0	90.4	111.2	121.2	54.0	14.9	25.7	534.8
VIII	9.2	0.1	1.4	5.1	38.5	103.8	173.2	219.2	161.1	91.3	11.7	9.1	823.7
IX	13.9	5.9	19.9	19.1	70.0	67.0	120.9	100.9	176.4	107.0	43.7	47.1	791.8
X	48.8	23.3	18.1	22.5	89.4	195.6	294.7	212.7	232.3	151.8	107.6	71.3	1468.2
XI	110.2	59.3	42.7	40.1	208.9	455.3	327.2	278.7	326.8	338.5	107.5	106.7	2402.0
XII	43.3	12.9	21.1	4.5	100.9	179.0	163.0	215.0	127.1	165.5	102.9	89.3	1224.5

XIII	7.4	2.0	15.0	26.5	79.6	53.2	112.7	158.9	148.5	77.4	35.7	10.1	726.8
NACIONAL	18.0	7.5	11.1	10.2	48.9	104.9	149.7	159.6	147.3	88.2	30.5	32.4	808.2

FUENTE: Conagua. Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Estadística del Agua 2007.

A-3. Precipitación pluvial (mm) normal mensual histórica por región hidrológico, 1941-2000.

REGIÓN HIDROLÓGICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1. B.C. Noroeste	37.4	32.6	38.1	15.5	4.5	1.3	1.4	4.8	6.2	8.8	21.1	31.9	203.6
2. B.C. Centro-Oeste	22.2	14.8	15.3	6.3	2.0	1.1	12.2	29.1	36.7	14.1	11.8	20.6	186.1
3. B.C. Suroeste	13.4	4.5	2.2	.9	.6	1.0	18.4	43.2	54.3	17.1	6.4	14.1	176.0
4. B.C. Noreste	37.4	32.6	38.1	15.5	4.5	1.3	1.4	4.8	6.2	8.8	21.1	31.9	203.6
5. B.C. Centro-Este	27.8	21.3	23.7	9.7	2.9	1.2	8.2	20.2	25.5	12.1	15.2	24.8	192.5
6. B.C. Sureste	13.4	4.5	2.2	.9	.6	1.0	18.4	43.2	54.3	17.1	6.4	14.1	176.0
7. Río Colorado	34.5	28.9	32.4	13.1	4.3	5.2	25.9	26.9	16.7	12.4	19.5	31.0	250.8
8. Sonora Norte	23.6	15.1	10.5	4.1	3.5	19.9	118.1	110.4	56.3	26.1	13.8	27.4	428.8
9. Sonora Sur	22.2	14.1	9.8	4.8	4.6	22.9	116.5	108.5	58.7	26.5	13.2	25.7	427.7
10. Sinaloa	22.9	11.3	9.0	7.7	10.1	52.2	149.0	149.8	116.6	44.8	17.3	26.8	617.4
11. Presidio-San Pedro	21.0	9.8	6.4	5.7	10.7	75.5	157.1	157.5	124.2	46.3	15.2	24.4	653.9
12. Lerma-Santiago	14.5	7.0	6.1	9.5	26.3	119.0	168.7	158.6	127.7	52.9	14.3	13.0	717.7
13. Río Huicicila	17.7	8.4	5.1	5.0	13.1	141.2	258.7	247.2	194.9	71.0	15.8	16.1	994.1
14. Río Ameca	15.6	7.8	6.1	6.1	20.8	143.6	223.3	205.3	160.9	65.1	15.9	14.0	884.6
15. Costa de Jalisco	15.3	7.4	6.2	6.1	22.7	140.8	199.1	185.9	154.0	67.4	17.1	13.0	835.0
16. Armería-Coahuayana	15.8	7.1	5.8	6.0	21.9	137.8	194.3	186.5	161.8	70.8	17.8	12.8	838.4
17. Costa de Michoacán	13.4	4.3	3.9	9.9	32.1	137.9	185.2	170.7	157.0	65.3	15.6	9.5	804.8
18. Balsas	16.3	9.7	9.7	19.4	54.4	176.7	203.6	195.9	209.5	97.9	30.8	15.5	1 039.4
19. Costa Grande de Guerrero	9.7	2.8	2.5	8.9	48.8	199.5	223.0	221.2	256.3	108.5	24.7	6.5	1 112.4
20. Costa Chica de Guerrero	21.6	16.4	13.8	21.9	71.4	231.3	249.5	242.3	276.9	133.2	47.3	24.6	1 350.3
21. Costa de Oaxaca	30.3	26.3	22.0	31.3	87.8	254.2	268.7	257.7	291.9	151.1	63.7	37.8	1 522.7
22. Tehuantepec	30.3	26.3	22.0	31.3	87.8	254.2	268.7	257.7	291.9	151.1	63.7	37.8	1 522.7
23. Costa de Chiapas	78.8	57.3	47.1	56.6	131.7	269.7	272.4	268.7	341.9	231.4	111.4	101.8	1 968.9
24. Bravo-Conchos	15.6	12.1	9.9	19.2	33.0	50.2	68.1	75.3	79.4	38.8	14.4	15.7	431.7
25. San Fernando-Soto La Marina	19.6	15.7	18.8	35.6	65.5	114.0	92.6	103.8	146.6	74.5	25.0	19.6	731.3
26. Pánuco	20.2	15.9	18.3	34.0	63.2	139.2	140.3	137.0	174.3	86.5	34.8	22.8	886.4
27. Norte de Veracruz	37.1	30.7	30.6	44.9	78.5	196.0	222.0	196.6	266.8	149.6	77.4	49.3	1 379.5
28. Papaloapan	36.2	30.2	28.2	39.6	81.9	223.1	247.8	224.1	286.1	154.6	75.7	47.8	1 475.3

29. Coatzacoalcos	65.8	48.2	39.0	46.5	89.5	229.7	244.9	230.7	310.3	194.8	103.8	77.6	1 680.9
30. Grijalva-Usumacinta	86.2	60.2	46.8	51.2	114.7	242.7	244.7	252.0	322.1	230.7	117.5	103.3	1 872.2
31. Yucatán Oeste	28.2	20.2	18.5	16.3	61.2	162.1	190.3	204.2	213.9	130.6	59.2	35.9	1 140.6
32. Yucatán Norte	41.2	32.8	29.3	30.4	81.5	166.3	161.0	164.1	193.9	127.1	62.2	51.9	1 141.6
33. Yucatán Este	57.8	34.8	28.9	30.4	89.1	174.1	137.7	151.4	208.5	155.3	85.8	70.4	1 224.2
34. Cuencas Cerradas del Norte	15.9	9.4	6.7	8.0	9.8	36.2	109.2	100.1	69.9	28.4	10.6	18.3	422.5
35. Mapimí	14.8	10.5	7.2	13.0	22.4	41.3	74.0	75.4	66.0	30.6	12.3	16.2	383.7
36. Nazas-Aguanaval	17.5	9.6	6.2	9.0	18.4	59.7	96.3	98.6	81.6	34.4	13.1	20.3	464.6
37. El Salado	17.9	13.2	12.8	24.5	46.6	107.0	113.7	120.0	138.8	65.3	23.6	19.7	703.4
Nacional	25.9	17.7	15.2	19.1	39.8	103.7	137.9	137.0	141.0	73.7	31.7	29.2	771.8

FUENTE: Conagua. Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Estadística del Agua 2007.

A-4. Precipitación media mensual (mm) por región hidrológica, 2006.

Región Hidrológica	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1. B.C. Noroeste	2.8	16.4	48.0	20.5	11.4	.0	1.5	.0	1.3	.7	1.7	6.2	110.5
2. B.C. Centro-Oeste	4.9	6.4	17.6	7.5	4.2	.0	52.6	31.3	77.9	30.7	.6	3.2	236.9
3. B.C. Suroeste	6.1	.6	.0	.0	.0	.0	82.2	49.4	122.3	48.0	.0	1.4	310.0
4. B.C. Noreste	2.8	16.4	48.0	20.5	11.4	.0	1.5	.0	1.3	.7	1.7	6.2	110.5
5. B.C. Centro-Este	4.1	10.1	28.7	12.3	6.8	.0	33.9	19.8	49.9	19.7	1.0	4.3	190.6
6. B.C. Sureste	6.1	.6	.0	.0	.0	.0	82.2	49.4	122.3	48.0	.0	1.4	310.0
7. Río Colorado	2.3	13.3	38.4	16.2	9.0	3.6	23.5	23.3	17.2	7.6	1.6	6.5	162.6
8. Sonora Norte	.5	1.7	2.4	.0	.1	17.3	106.2	111.3	77.1	33.5	1.1	7.7	358.9
9. Sonora Sur	.7	1.6	3.3	.1	2.4	29.3	112.3	125.5	82.4	33.7	.9	11.5	403.7
10. Sinaloa	4.2	.4	3.0	.4	8.7	64.3	161.3	214.2	132.2	54.5	.0	18.9	662.1
11. Presidio-San Pedro	9.3	.0	.6	.9	13.5	79.0	154.2	199.7	154.2	47.0	.7	16.2	675.5
12. Lerma-Santiago	11.2	.2	1.6	5.8	42.7	92.9	159.2	203.7	145.6	84.5	11.7	10.1	769.3
13. Río Huicicila	1.0	.0	.1	1.0	6.2	95.3	263.5	282.3	242.8	65.8	2.9	8.2	969.0
14. Río Ameca	1.9	.0	.3	2.5	15.0	128.8	213.5	266.0	190.8	83.6	6.8	9.2	918.4
15. Costa de Jalisco	2.5	.0	.3	2.9	18.7	140.0	195.2	250.2	188.8	102.7	10.4	8.5	920.2
16. Armería-Coahuayana	3.7	.0	.5	2.8	22.1	133.4	197.8	241.7	204.0	111.9	12.1	7.4	937.4
17. Costa de Michoacán	15.6	.1	2.9	6.4	70.6	114.8	157.4	206.1	160.1	133.9	18.0	4.1	890.0
18. Balsas	13.2	6.7	7.6	12.3	75.4	168.8	212.6	215.0	197.5	122.4	41.3	10.4	1 083.2
19. Costa Grande de Guerrero	.3	.0	.6	3.0	54.3	273.5	290.1	239.7	246.1	148.0	38.8	.3	1 294.7
20. Costa Chica de Guerrero	23.3	2.9	3.1	10.2	73.8	212.2	291.1	229.4	235.0	124.3	56.5	18.6	1 280.5

21. Costa de Oaxaca	40.0	5.0	4.9	15.5	88.0	167.8	291.8	221.9	226.9	107.2	69.4	31.8	1 270.2
22. Tehuantepec	40.0	5.0	4.9	15.5	88.0	167.8	291.8	221.9	226.9	107.2	69.4	31.8	1 270.2
23. Costa de Chiapas	78.4	47.3	32.2	49.2	229.7	447.0	356.7	285.1	339.4	323.5	94.4	71.3	2 354.2
24. Bravo-Conchos	4.7	2.4	7.7	11.6	28.7	48.8	82.2	109.8	121.8	38.1	7.3	31.3	494.4
25. San Fernando-Soto La Marina	2.3	3.8	21.4	16.0	58.6	49.9	91.3	46.4	200.3	95.3	23.3	50.0	658.7
26. Pánuco	16.3	5.5	17.5	21.8	76.7	64.4	123.7	132.5	160.1	99.9	47.7	35.9	802.0
27. Norte de Veracruz	47.5	30.9	24.6	26.1	94.9	192.2	272.1	205.7	228.5	158.3	114.9	77.4	1 473.0
28. Papaloapan	48.5	21.2	16.3	21.5	88.6	195.2	298.9	214.7	232.7	148.4	104.5	68.2	1 458.8
29. Coatzacoalcos	83.5	36.7	28.2	20.5	100.2	263.0	300.5	224.6	249.7	204.8	117.3	103.0	1 731.8
30. Grijalva-Usumacinta	92.7	48.3	35.3	33.8	190.9	424.2	303.8	283.1	296.8	315.9	103.5	97.6	2 225.9
31. Yucatán Oeste	31.0	7.4	8.4	5.9	112.9	303.6	198.8	300.0	170.9	231.1	91.3	71.4	1 532.6
32. Yucatán Norte	48.5	8.4	31.8	2.4	100.2	134.6	136.4	163.8	110.7	115.6	87.3	78.4	1 018.3
33. Yucatán Este	48.8	24.9	19.4	5.8	89.4	111.2	162.9	198.2	104.5	167.1	136.8	123.4	1 192.4
34. Cuencas Cerradas del Norte	1.7	1.2	7.4	.5	12.7	83.3	140.0	189.7	106.2	34.6	.0	28.8	606.0
35. Mapimí	6.2	.9	4.4	8.2	19.4	57.5	84.2	133.4	97.4	29.5	.8	26.9	468.8
36. Nazas-Aguanaval	12.8	.2	1.1	4.9	21.4	68.5	87.9	130.4	108.4	37.8	2.2	20.9	496.6
37. El Salado	12.5	2.9	10.5	14.4	47.3	40.3	97.2	86.8	136.6	76.5	31.8	31.0	587.9
Nacional	18.0	7.5	11.1	10.2	48.9	104.9	149.7	159.6	147.3	88.2	30.5	32.4	808.2

FUENTE: Conagua. Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Estadística del Agua 2007.

APÉNDICE B.

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS UBICADAS EN LA RH 36

B-1.1. Posición geográfica de las estaciones climatológicas en la RH 36 región árida.

No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
5	5058	LA ROSITA	251600	103130	1190
6	40	LA FLOR	250600	103200	1280
9	5001	AGUA NVA.SN.P.DE LAS COLONIAS	254500	103000	1094
12	5007	CONCORDIA SAN PEDRO DE LAS COL.	254700	103070	1100
16	5018	LAS NIEVES	254500	102000	1140
17	5022	OCAMPO	271900	102240	1050
18	5024	PARRAS	252630	102110	1520
19	5026	PRESA COYOTE	253200	103295	1140
20	5027	EL CUIJE	254140	103203	1120
21	5028	PRESA DE GUADALUPE	254530	103131	1110
22	5029	PRESA LA FLOR	250400	103170	1295
23	5036	SAN PEDRO, COAH.	254530	102590	1095
24	5037	SAN VICENTE PARRAS	253700	102130	750
27	5041	VIESCA	252000	102480	1100
31	5051	VIESCA	252000	102480	1093
34	5133	LA VENTANA	251930	103260	1240
35	5139	EMILIANO ZAPATA	253000	102560	1090
94	10045	MAPIMI	255000	103510	1300
142	10108	LERDO	253200	103313	1130
147	10124	LA FLOR	250600	103200	1260

B-1.2. Posición geográfica de las estaciones climatológicas en la RH 36 región semiárida.

No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
49	8130	SANTA BARBARA	264800	105400	1500
55	10001	ATOTONILCO	243830	103420	1960
58	10004	CAÑON DE FERNANDEZ	251600	103454	1200
64	10012	CUENCAME	245220	103420	1580
79	10028	FRANCISCO PRIMO VERDAD	245400	104280	1550
81	10030	GUADALUPE VICTORIA	242700	104080	2000
84	10033	IGNACIO ALLENDE	242800	103590	1950
97	10049	NAZAS	251330	104070	1260
100	10052	PANUCODECORONADO	243220	104193	2140
103	10055	PEDRICEÑA	250730	103470	1330
104	10056	PEÑON BLANCO	244710	104021	1680
107	10059	RAMON CORONA	241100	103373	2130
108	10060	RODEO	251100	104340	1850
111	10063	SAN BARTOLO	244100	103130	1687
114	10067	SAN JUAN DE GPE.	243800	102470	1520
115	10068	SAN JUAN DEL RIO	244700	104273	1700
116	10069	SAN LUIS DEL CORDERO	252500	104164	1480
117	10070	SAN MARCOS	241800	103330	2050

119	10072	SAN PEDRO DEL GALLO	253400	104173	1660
121	10074	SANTA CLARA	242830	103220	1800
126	10080	SIMON BOLIVAR	244120	103133	1525
139	10098	RODEO	251100	104333	1320
144	10118	ABASOLO	251900	104390	1380
151	10131	PEÑON BLANCO DGO.	244710	104021	1610
153	10135	CUAUHTEMOC	241630	103483	2175
154	10136	12 DE DICIEMBRE	244230	103341	1960
160	10146	YERBANIS	244420	103503	1890
163	10150	LUIS MOYA	243300	103575	1920
184	32005	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR	233700	102440	2020
185	32006	CAZADERO	234000	103070	1930
186	32012	CHALCHIHUITES	232900	103530	2280
187	32018	EL SAUZ	233000	103140	2100
188	32020	FRESNILLO	231100	102520	2200
191	32028	JUAN ALDAMA	241630	103250	1980
192	32038	NIEVES MURGUIA	240000	103000	1950
193	32045	RIOGRANDE	235000	103010	1850
199	32096	SAN ALTO	233500	103150	2050
201	32129	PRESA SUSTICACAN	233600	103080	2070

B-1.3. Posición geográfica de las estaciones climatológicas en la RH 36 región Subhúmeda.					
No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
60	10006	CENDRADILLAS GENERACION	261700	106010	2250
61	10007	CIENEGA DE ESCOBAR	253640	105443	2170
63	10010	IGNACIO ZARAGOZA	242200	105090	2250
67	10016	CHINACATES (SANTIAGO)	250100	105120	2080
72	10021	PALMITO	253730	105002	1540
77	10026	TARAHUMAR	254000	106210	2850
80	10029	GUANACEVI	255550	105573	2060
85	10035	SALOME ACOSTA	251330	105265	1670
99	10051	OTINAPA	240300	105010	2400
122	10075	STA. MA. DEL ORO	255700	105215	1700
124	10078	SARDINAS	260500	105340	1650
129	10083	TEJAMEN	244800	105080	2090
130	10084	TEPEHUANES	252030	105432	1800
138	10096	LA CHAPARRA	250300	105410	2100
140	10100	SANTIAGO PAPASQUIARO	250240	105251	1735
141	10102	GUATIMAPE,CANATLAN	244500	104550	1990
148	10125	LA ROSILLA GUANACEVI	260730	106200	2810
155	10138	SAN BERNARDO	260000	105313	1640
159	10143	INDE	255450	105134	1870
161	10147	EL ZAPE	254610	105473	1960

B-2.1. Años que registran precipitación por arriba y por abajo de la precipitación media en la sub-región árida de la RH 36.

No. CLICOM	ESTACIÓN	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL DE AÑOS	* AÑOS CON MENOR PRECIPITACIÓN	** AÑOS CON MAYOR PRECIPITACIÓN	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
5058	LA ROSITA	1968-1987	11	6	17	1983	1987	65
10124	LA FLOR	1975-2003	16	9	25	1979	1990	64
5001	AGUA NVA.SN.P.DE LAS COLONIAS	1943-1969	15	10	25	1965	1947	60
5007	CONCORDIA SAN PEDRO DE LAS COL.	1938-1973	20	14	34	1969	1938	59
5018	LAS NIEVES	1969-2004	25	11	36	2004	1969	69
5022	OCAMPO	1961-1998	19	18	37	1984	1981	51
5024	PARRAS	1961-2004	25	19	44	1995	1976	57
5026	PRESA COYOTE	1940-2003	39	25	64	1966	1978	61
5027	EL CUIJE	1940-2004	36	29	65	1999	1986	55
5028	PRESA DE GUADALUPE	1969-2004	23	13	36	1999	1986	64
5029	PRESA LA FLOR	1963-2004	23	19	42	2004	1963	55
5036	SAN PEDRO, COAH.	1963-2004	25	16	41	2001	1986	61
5037	SAN VICENTE PARRAS	1961-1983	14	7	21	1975	1968	67
5041	VIESCA	1969-2004	23	12	35	1977	1986	66
5051	VIESCA	1940-1973	18	16	34	1956	1968	53
5133	LA VENTANA	1977-1997	9	5	14	1980	1977	64
5139	EMILIANO ZAPATA	1978-2004	20	7	27	1999	1997	74
10045	MAPIMI	1963-2003	24	17	41	1969	1978	59
10108	LERDO	1969-2003	19	16	35	1995	1977	54

B-2.2. Años que registran precipitación por arriba y por abajo de la precipitación media en la sub-región semi-árida de la RH 36.

No. CLICOM	ESTACIÓN	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL DE AÑOS	* AÑOS CON MENOR PRECIPITACIÓN	** AÑOS CON MAYOR PRECIPITACIÓN	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
10049	NAZAS	1965-2003	22	17	39	2001	1965	56
10098	RODEO	1940-2002	34	25	59	1957	1974	58
10060	RODEO	1926-1999	39	34	73	1957	1986	53
10068	SAN JUAN DEL RIO	1939-2002	36	26	62	1957	1970	58
10131	PEÑON BLANCO DGO.	1976-2003	15	13	28	1980	1990	54
10080	SIMON BOLIVAR	1969-2003	22	13	35	1995	1978	63
32006	CAZADERO	1963-1998	15	17	32	1979	1992	47
32096	SAN ALTO	1974-2000	16	11	27	1995	1976	59
32005	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR	1958-1999	30	25	55	1999	1958	55
10074	SANTA CLARA	1963-2003	25	16	41	1999	1973	61
32018	EL SAUZ	1939-2000	35	27	62	1969	1958	56
32020	FRESNILLO	1949-2000	32	17	49	1969	1976	65

B-2.3. Años que registran precipitación por arriba y por abajo de la precipitación media en la sub-región sub-húmeda de la RH 36.

No. CLICOM	ESTACIÓN	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL DE AÑOS	* AÑOS CON MENOR PRECIPITACIÓN	** AÑOS CON MAYOR PRECIPITACIÓN	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
10021	PALMITO	1938-2003	34	32	66	1952	1967	51.515
10138	SAN BERNARDO	1977-2002	16	10	26	1999	1989	61.538
10006	CENDRADILLAS GENERACION	1961-2003	21	21	42	2003	1961	50.000
10007	CIENEGA DE ESCOBAR	1965-2002	20	18	38	1995	1967	52.632
10083	TEJAMEN	1969-2002	20	14	34	1982	1981	58.824
10010	IGNACIO ZARAGOZA	1970-2002	17	12	29	1999	1976	58.621
10051	OTINAPA	1963-2003	24	17	41	1995	1983	58.537
10035	SALOME ACOSTA	1969-2003	20	13	33	1979	1991	60.606

B-3.1. Estaciones de la sub-región árida de la RH 36. Comportamiento histórico de los extremos de la precipitación anual.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
5058													
PROMEDIO	10.94	4.66	8.42	16.93	15.53	24.45	26.74	22.29	17.65	22.96	11.46	16.97	198.99
MAXIMO **	17.00	0.00		78.50	15.50	19.00	13.00	22.80	17.50	101.00	0.00	0.00	284.30
MINIMO *	29.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	11.00	29.00	0.00	40.00	8.00	0.00	127.00
10124													
PROMEDIO	33.73	18.51	6.63	11.46	23.87	109.27	193.84	220.50	140.58	60.10	47.66	55.05	921.18
MAXIMO **	30.00	51.00	0.00	0.00	54.00	192.00	417.00	368.80	269.00	121.80	0.00	0.00	1503.60
MINIMO *	94.70	29.00	0.00	2.00	3.00	48.00	202.00	156.30	41.60	0.00	0.00	25.00	601.60
5001													
PROMEDIO	8.20	3.35	1.73	3.98	5.75	19.29	18.60	27.34	21.68	11.01	3.74	3.50	128.15
MAXIMO **	10.40	0.00	0.00	0.00	42.00	78.00	11.40	79.30	81.00	11.50	0.00	0.00	313.60
MINIMO *		0.70	0.00	0.00	0.00	1.40	0.20	4.10	7.10	0.00	0.40	1.60	15.50
5007													
PROMEDIO	8.63	4.62	2.62	6.56	17.22	27.04	24.54	33.45	35.91	18.25	5.71	7.19	191.74
MAXIMO **	85.50	13.50	0.00	96.00	20.50	10.50	122.50	40.00	62.00	0.00	0.00	0.00	450.50
MINIMO *	2.50	0.00	0.00	0.00	6.50	14.00	4.00	17.50	9.00	3.00	13.00	5.50	75.00
5018													
PROMEDIO	6.38	4.53	3.82	8.37	12.49	28.25	19.79	24.59	22.71	19.65	7.90	5.58	164.07
MAXIMO **	5.00	0.00	2.60	0.00	5.50	68.40	0.00	165.70	82.90	132.00	0.00	5.00	467.10
MINIMO *	0.20	0.50	0.20	0.70	11.00	13.60	17.00	4.70	1.00	0.00	0.20	2.80	51.90
5022													
PROMEDIO	12.38	6.97	6.34	15.18	36.30	35.35	34.16	36.27	47.24	21.20	11.00	12.43	274.84
MAXIMO **	33.00	0.10	0.20	131.50	79.50	120.60	16.50	8.50	11.50	105.50	0.00	6.00	512.90
MINIMO *	51.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.00	93.50
5024													
PROMEDIO	13.16	7.94	7.41	10.08	27.50	44.80	66.83	64.37	65.79	26.17	14.04	21.40	369.49
MAXIMO **	0.10	0.00	0.00	23.10	24.30	18.70	266.60	23.70	107.20	32.90	125.70	29.60	651.90
MINIMO *	0.50	0.00	0.00	0.00	12.70	28.50	14.00	46.00	9.70	11.00	1.50	5.00	128.90
5026													
PROMEDIO	8.69	4.09	1.41	4.78	15.22	30.05	31.43	35.10	42.29	18.24	6.93	9.28	207.50

MAXIMO **	7.00	2.00	2.50	0.00	78.10	5.50	50.00	127.80	147.50	63.50	0.00	10.00	493.90
MINIMO *	3.00	0.00	0.00	0.10	4.60	1.40	2.40	12.40	3.00	0.50	0.00	0.30	27.70
5027													
PROMEDIO	6.79	3.54	2.24	5.29	16.01	22.69	27.40	26.82	32.88	16.72	8.49	10.04	178.92
MAXIMO **	9.00	0.00	0.00	5.00	53.00	78.00	94.00	18.00	96.00	63.20	0.00	34.10	450.30
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00
5028													
PROMEDIO	10.34	2.50	2.52	5.93	13.23	27.58	30.10	30.64	33.71	22.28	9.21	10.55	198.59
MAXIMO **	0.00	7.00	0.00	0.00	33.50	89.00	18.00	46.50	94.50	88.00	4.50	42.50	423.50
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.50	7.50	57.00	16.00	12.00	2.00	0.00	103.00
5029													
PROMEDIO	10.43	5.20	4.48	3.92	14.88	47.23	42.07	46.39	40.72	19.04	8.72	9.64	252.72
MAXIMO **	0.00	13.00	0.00	11.60	36.00	137.00	45.00	10.00	145.00	54.20	17.50	40.00	509.30
MINIMO *	1.10	0.70	0.00	0.00	0.20	1.70	4.80	4.00	6.30	0.00	0.50	2.40	21.70
5036													
PROMEDIO	10.98	4.29	3.38	5.19	22.60	28.31	27.95	29.19	37.50	12.58	6.36	9.28	197.61
MAXIMO **	0.00	11.00	0.00	11.00	86.00	79.00	9.50	13.00	70.50	39.50	0.00	23.00	342.50
MINIMO *	0.00	0.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.00	9.00	15.00	9.00	1.00	80.00
5037													
PROMEDIO	8.33	6.73	3.47	6.84	15.46	22.34	23.85	49.79	40.42	10.47	8.26	9.62	205.58
MAXIMO **		37.80	25.00	19.30	4.60	41.10	96.60	200.40	211.90	0.00	0.00	12.30	649.00
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	26.00	0.00	20.00	0.00	19.00	105.00
5041													
PROMEDIO	11.72	2.89	2.76	4.04	7.15	20.86	25.50	27.43	29.70	13.04	8.38	10.72	164.18
MAXIMO **	0.00	11.50	0.00	0.00	31.20	89.00	29.00	21.40	97.00	39.00	12.30	35.00	365.40
MINIMO *	9.00	0.00	0.00	0.00	5.50	18.00	3.80	13.00	15.50	0.00	0.00	0.00	64.80
5051													
PROMEDIO	7.60	6.44	4.05	5.22	9.41	20.59	19.16	36.97	28.88	17.75	6.80	6.69	169.56
MAXIMO **	11.00	16.00	55.00		2.00	7.00	35.00	114.00	103.00	16.00	0.00	8.00	367.00
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00	5.00	6.50	5.00	2.50	3.50	26.50
5133													
PROMEDIO	14.97	6.23	32.54	21.71	19.63	41.08	60.76	54.44	23.83	31.74	5.27	14.73	326.92

MAXIMO **	26.00	0.00	0.00	130.00	10.00	123.00	99.00	123.00	25.00	201.00	0.00	0.00	737.00
MINIMO *	3.00	2.60	0.00	0.00	0.00	15.00	0.00	0.00	12.80	16.60	6.00	0.00	56.00
5139													
PROMEDIO	17.25	13.12	10.69	13.02	17.24	32.65	32.00	38.95	32.00	20.15	13.77	9.36	250.20
MAXIMO **	12.00	83.50	160.00	25.00	40.50	126.50	13.00	0.00	97.00	88.00	31.00	15.00	691.50
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10045													
PROMEDIO	7.91	3.53	2.42	5.54	16.79	49.99	54.33	73.75	59.34	17.70	6.43	6.48	304.21
MAXIMO **	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	29.00	311.00	225.80	24.60	0.00	0.00	615.40
MINIMO *	4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	12.50	7.00	12.40	22.70	0.10	80.20
10108													
PROMEDIO	10.80	4.04	1.62	7.15	17.92	46.18	38.32	40.60	55.43	20.45	7.31	10.43	260.24
MAXIMO **	13.80	0.00	0.00	19.50	0.60	363.00	37.50	36.00	30.90	16.30	0.00	1.50	519.10
MINIMO *	0.00	0.70	0.00	0.00	2.00	7.50	7.00	16.00	69.50	1.50	0.00	0.50	104.70

B-3.2. Estaciones de la sub-región semiárida de la RH 36. Comportamiento histórico de los extremos de la precipitación anual.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
10049													
PROMEDIO	8.53	3.99	4.87	6.50	17.92	46.79	78.58	79.74	58.42	25.90	9.42	11.12	351.77
MAXIMO **	45.00	0.00	0.00	0.00	1.50	30.00	300.00	27.00	23.50	100.00	28.50	45.00	600.50
MINIMO *	0.00	0.00	9.20	10.20	2.00	5.20	51.30	29.00	9.40	13.50	5.00	1.00	135.80
10098													
PROMEDIO	7.50	4.50	5.04	4.45	15.01	53.28	82.47	94.33	74.29	22.50	7.93	22.17	393.46
MAXIMO **	0.00	0.00	3.00	5.50	0.00	0.00	54.70	130.00	171.00	0.00	3.00	407.60	774.80
MINIMO *	0.00	1.00	1.50	1.00	15.50	0.00	15.50	20.50	16.00	57.50	0.00	0.00	128.50
10060													
PROMEDIO	8.00	4.61	1.73	4.39	12.90	49.72	86.72	92.15	81.97	25.54	7.66	7.86	383.26
MAXIMO **	1.00	3.50	0.00	27.00	32.00	158.50	110.10	86.40	98.30	87.50	3.00	22.00	629.30
MINIMO *	0.00	1.00	1.50	1.00	15.50	0.00	15.50	20.50	16.00	57.50	0.00	0.00	128.50

10068													
PROMEDIO	10.54	6.32	2.85	5.28	13.80	67.26	115.51	119.14	88.16	35.82	10.66	12.75	488.09
MAXIMO **	1.40	51.80	3.00	0.00	11.40	100.50	138.40	232.20	284.20	6.80	0.00	0.00	829.70
MINIMO *	0.50	0.50	2.50	0.00	19.00	4.00	54.00	51.70	32.70	45.30	0.00	0.00	210.20
10131													
PROMEDIO	12.99	4.03	3.09	7.21	19.71	74.65	96.30	112.60	75.43	28.00	13.47	17.19	464.66
MAXIMO **	19.00	4.00	0.10	0.00	14.00	34.50	185.50	230.90	153.00	63.00	0.00	3.50	707.50
MINIMO *	0.00	16.00	0.00	0.00	2.00	1.50	29.00	112.50	73.50	15.50	9.50	1.00	260.50
10080													
PROMEDIO	14.40	6.93	1.63	6.63	15.74	44.56	69.71	89.89	63.73	28.66	12.76	12.47	367.11
MAXIMO **	0.00	0.00	2.50	0.00	15.00	10.50	97.30	218.50	242.00	34.50	0.00	18.50	638.80
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	19.00	94.00	51.50	2.00		4.00	178.50
32006													
PROMEDIO	12.81	5.74	4.15	5.49	12.25	54.00	75.02	93.08	66.01	27.00	11.34	12.07	378.95
MAXIMO **	105.40	1.20	0.70	12.50	39.20	28.40	154.00	28.10	32.40	47.40	21.90	8.50	479.70
MINIMO *	0.00	9.50	0.00	0.00	4.90	33.20	66.90	37.20	11.10	0.00	10.30	32.00	205.10
32096													
PROMEDIO	14.38	5.17	1.58	5.06	13.49	55.05	81.66	79.03	60.20	33.59	15.26	18.15	382.61
MAXIMO **	2.00	0.00	0.00	5.00	1.00	34.00	246.00	44.00	134.00	32.00	79.00	47.00	624.00
MINIMO *	9.00	1.50	0.00	0.00	0.00	28.00	26.00	69.00	31.00	0.00	0.00	4.50	169.00
32005													
PROMEDIO	9.98	5.01	4.23	7.81	21.71	54.87	65.96	82.99	64.79	34.28	10.48	13.46	375.57
MAXIMO **	0.70	4.00	37.00	0.00	13.50	93.50	55.50	143.00	51.50	69.50	52.50	63.60	584.30
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.00	42.80	35.60	14.80	1.20	0.00	8.50	187.90
10074													
PROMEDIO	10.78	6.07	4.13	7.82	19.23	48.16	79.36	104.60	80.07	29.16	13.23	10.25	412.84
MAXIMO **	0.00	26.60	0.00	0.00	25.50	31.00	190.50	269.00	101.00	32.00	0.00	2.00	677.60
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.00	42.80	35.60	14.80	1.20	0.00	8.50	187.90
32018													
PROMEDIO	15.81	5.98	3.83	4.57	12.44	64.74	95.54	97.77	69.92	34.64	10.84	14.33	430.40
MAXIMO **	11.10	9.40	27.50	1.00	34.00	139.10	128.70	70.00	122.00	157.20	69.60	37.70	807.30
MINIMO *	0.00	6.50	0.00	0.00	1.60	6.70	38.80	79.80	44.40	11.30	39.00	4.30	232.40

32020													
PROMEDIO	12.76	5.43	4.18	7.13	14.49	66.76	75.64	92.84	68.21	36.51	12.14	12.85	408.94
MAXIMO **	3.00	0.00	0.00	2.40	0.00	60.70	271.30	39.00	91.50	33.50	92.00	52.90	646.30
MINIMO *	1.00	3.00	0.00	0.00	1.20	13.70	19.10	1.40	59.40	5.30	53.20	6.60	163.90

B-3.3. Estaciones de la sub-región subhúmeda de la RH 36. Comportamiento histórico de los extremos de la precipitación anual.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
10021													
PROMEDIO	7.34	2.64	1.58	3.81	10.91	47.95	82.22	93.55	72.79	24.53	7.74	6.43	361.51
MAXIMO **	14.30	0.00	3.40	0.00	11.90	100.00	82.30	219.80	99.10	49.80	0.80	10.50	591.90
MINIMO *	0.00	0.00	0.10	4.00	0.00	38.50	63.00	20.00	0.00	0.00	0.00	8.50	134.10
10138													
PROMEDIO	13.23	53.47	6.28	7.90	11.65	78.15	149.39	131.16	102.09	29.87	10.56	19.57	613.33
MAXIMO **	0.00	1110.50	0.00	6.00	0.00	0.00	186.70	194.40	142.60	40.70	53.60	23.50	1758.00
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	57.30	90.60	110.20	35.10	0.00	3.40	2.60	315.20
10006													
PROMEDIO	13.45	10.62	5.26	6.64	15.00	71.23	153.42	149.92	127.60	39.69	11.98	15.90	620.70
MAXIMO **	30.00	4.00	33.00	35.50	0.00	122.50	125.00	172.50	161.00	210.50	3.00	10.50	907.50
MINIMO *	4.50	35.50	0.00	0.00	2.50	13.50	136.50	0.00	82.50	29.50	0.00	43.00	347.50
10007													
PROMEDIO	14.42	8.62	7.05	6.21	10.24	62.19	139.38	140.15	111.23	28.64	20.49	22.05	570.69
MAXIMO **	30.00	3.00	2.00	0.00	7.00	251.00	166.50	277.50	86.00	11.00	0.00	27.40	861.40
MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.50	145.40	1.00	73.50	0.00	0.00	38.00	296.40
10083													
PROMEDIO	22.29	8.71	4.81	6.14	13.66	77.50	165.49	153.94	140.60	50.52	18.04	22.11	683.82
MAXIMO **	58.50	3.00	15.50	56.00	4.50	121.50	80.50	277.00	142.00	258.00	2.50	29.00	1048.00
MINIMO *	9.00	0.00	0.00	2.00	4.00	27.00	178.00	69.50	61.50	3.00	41.00	52.00	447.00
10010													
PROMEDIO	10.16	7.80	3.53	5.38	7.85	69.78	123.38	119.30	97.67	42.40	14.60	12.77	514.63
MAXIMO **	0.00	0.00	1.50	0.00	0.00	145.50	221.50	60.00	172.50	32.50	45.00	34.50	713.00

MINIMO *	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	127.90	153.60	27.10	0.00	12.80	0.00	0.00	321.40
10051													
PROMEDIO	22.99	8.44	8.00	4.21	14.78	83.07	169.89	154.37	117.68	36.83	15.15	33.69	669.10
MAXIMO **	22.00	0.00	15.00	0.00	84.00	80.00	203.00	262.00	279.00	51.00	2.00	10.00	1008.00
MINIMO *	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	128.00	86.00	74.00	0.00	0.00	4.00	402.00
10035													
PROMEDIO	9.53	4.99	1.42	3.16	7.18	43.49	113.81	112.64	75.88	28.65	11.38	8.66	420.79
MAXIMO **	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	4.50	225.20	221.60	144.50	6.10	28.50	33.30	665.00
MINIMO *	0.00	5.20	0.00	0.00	8.00	30.50	63.70	69.90	5.70	0.00	0.00	0.00	183.00

APÉNDICE C.

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS POR SUBREGIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36

C-1.1. Estaciones climatológicas en la sub-región árida de la RH-36.

No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
5	5058	LA ROSITA	251600	103130	1190
6	40	LA FLOR	250600	103200	1280
9	5001	AGUA NVA.SN.P.DE LAS COLONIAS	254500	103000	1094
12	5007	CONCORDIA SAN PEDRO DE LAS COL.	254700	103070	1100
16	5018	LAS NIEVES	254500	102000	1140
17	5022	OCAMPO	271900	102240	1050
18	5024	PARRAS	252630	102110	1520
19	5026	PRESA COYOTE	253200	103295	1140
20	5027	EL CUIJE	254140	103203	1120
21	5028	PRESA DE GUADALUPE	254530	103131	1110
22	5029	PRESA LA FLOR	250400	103170	1295
23	5036	SAN PEDRO, COAH.	254530	102590	1095
24	5037	SAN VICENTE PARRAS	253700	102130	750
27	5041	VIESCA	252000	102480	1100
31	5051	VIESCA	252000	102480	1093
34	5133	LA VENTANA	251930	103260	1240
35	5139	EMILIANO ZAPATA	253000	102560	1090
94	10045	MAPIMI	255000	103510	1300
142	10108	LERDO	253200	103313	1130
147	10124	LA FLOR	250600	103200	1260

C-1.2. Estaciones climatológicas en la sub-región semi-árida de la RH-36.

No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
97	10049	NAZAS	251330	104070	1260
108	10060	RODEO	251100	104340	1850
115	10068	SAN JUAN DEL RIO	244700	104273	1700
121	10074	SANTA CLARA	242830	103220	1800
126	10080	SIMON BOLIVAR	244120	103133	1525
139	10098	RODEO	251100	104333	1320
151	10131	PEÑON BLANCO DGO.	244710	104021	1610
184	32005	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR	233700	102440	2020
185	32006	CAZADERO	234000	103070	1930
187	32018	EL SAUZ	233000	103140	2100
188	32020	FRESNILLO	231100	102520	2200
199	32096	SAN ALTO	233500	103150	2050

C-1.3. Estaciones climatológicas en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

No.	No.	NOMBRE DE ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ETIQUETA	CLICOM		NORTE	OESTE	M.S.N.M.
60	10006	CENDRADILLAS GENERACION	261700	106010	2250
61	10007	CIENEGA DE ESCOBAR	253640	105443	2170
63	10010	IGNACIO ZARAGOZA	242200	105090	2250
72	10021	PALMITO	253730	105002	1540
85	10035	SALOME ACOSTA	251330	105265	1670
99	10051	OTINAPA	240300	105010	2400
129	10083	TEJAMEN	244800	105080	2090
138	10096	LA CHAPARRA	250300	105410	2100
155	10138	SAN BERNARDO	260000	105313	1640

C-2.1. Años que registran precipitación por arriba y por abajo a la media anual en la sub-región árida de la RH-36.

No. CLICOM	ESTACION	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL AÑOS	AÑOS CON MENOR PREC.	AÑOS CON MAYOR PREC.	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
5058	LA ROSITA	1968-1987	11	6	17	1983	1987	65
10124	LA FLOR	1975-2003	16	9	25	1979	1990	64
5001	AGUA NVA.SN.P.DE LAS COLONIAS	1943-1969	15	10	25	1965	1947	60
5007	CONCORDIA SAN PEDRO DE LAS COL.	1938-1973	20	14	34	1969	1938	59
5018	LAS NIEVES	1969-2004	25	11	36	2004	1969	69
5022	OCAMPO	1961-1998	19	18	37	1984	1981	51
5024	PARRAS	1961-2004	25	19	44	1995	1976	57
5026	PRESA COYOTE	1940-2003	39	25	64	1966	1978	61
5027	EL CUIJE	1940-2004	36	29	65	1999	1986	55
5028	PRESA DE GUADALUPE	1969-2004	23	13	36	1999	1986	64
5029	PRESA LA FLOR	1963-2004	23	19	42	2004	1963	55
5036	SAN PEDRO, COAH.	1963-2004	25	16	41	2001	1986	61
5037	SAN VICENTE PARRAS	1961-1983	14	7	21	1975	1968	67
5041	VIESCA	1969-2004	23	12	35	1977	1986	66
5051	VIESCA	1940-1973	18	16	34	1956	1968	53
5133	LA VENTANA	1977-1997	9	5	14	1980	1977	64
5139	EMILIANO ZAPATA	1978-2004	20	7	27	1999	1997	74
10045	MAPIMI	1963-2003	24	17	41	1969	1978	59
10108	LERDO	1969-2003	19	16	35	1995	1977	54

C-2.2. Años que registran precipitación por arriba y por abajo a la media anual en la sub-región semi-árida de la RH-36.

No. CLICOM	ESTACION	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL AÑOS	AÑOS CON MENOR PREC.	AÑOS CON MAYOR PREC.	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
10049	NAZAS	1965-2003	22	17	39	2001	1965	56
10098	RODEO	1940-2002	34	25	59	1957	1974	58
10060	RODEO	1926-1999	39	34	73	1957	1986	53
10068	SAN JUAN DEL RÍO	1939-2002	36	26	62	1957	1970	58
10131	PEÑON BLANCO DGO.	1976-2003	15	13	28	1980	1990	54
10080	SIMON BOLIVAR	1969-2003	22	13	35	1995	1978	63
32006	CAZADERO	1963-1998	15	17	32	1979	1992	47
32096	SAN ALTO	1974-2000	16	11	27	1995	1976	59
32005	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR	1958-1999	30	25	55	1999	1958	55
10074	SANTA CLARA	1963-2003	25	16	41	1999	1973	61
32018	EL SAUZ	1939-2000	35	27	62	1969	1958	56
32020	FRESNILLO	1949-2000	32	17	49	1969	1976	65

C-2.3. Años que registran precipitación por arriba y por abajo a la media anual en la sub-región semi-árida de la RH-36.

No. CLICOM	ESTACION	DATOS DEL PERIODO	AÑOS ABAJO	AÑOS ARRIBA	TOTAL AÑOS	AÑOS CON MENOR PREC.	AÑOS CON MAYOR PREC.	% DE AÑOS CON PRECIPITACIÓN INFERIOR A LA MEDIA
10021	PALMITO	1938-2003	34	32	66	1952	1967	51.515
10138	SAN BERNARDO	1977-2002	16	10	26	1999	1989	61.538
10006	CENDRADILLAS GENERACION	1961-2003	21	21	42	2003	1961	50.000
10007	CIENEGA DE ESCOBAR	1965-2002	20	18	38	1995	1967	52.632
10083	TEJAMEN	1969-2002	20	14	34	1982	1981	58.824
10010	IGNACIO ZARAGOZA	1970-2002	17	12	29	1999	1976	58.621
10051	OTINAPA	1963-2003	24	17	41	1995	1983	58.537
10035	SALOME ACOSTA	1969-2003	20	13	33	1979	1991	60.606

C-3.1. Láminas de precipitación promedio, máxima y mínima anual histórica en la sub-región árida de la RH-36.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
5058													
PROMEDIO	10.94	4.66	8.42	16.93	15.53	24.45	26.74	22.29	17.65	22.96	11.46	16.97	198.99
MAXIMO	17.00	0.00		78.50	15.50	19.00	13.00	22.80	17.50	101.00	0.00	0.00	284.30
MINIMO	29.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	11.00	29.00	0.00	40.00	8.00	0.00	127.00
10124													
PROMEDIO	33.73	18.51	6.63	11.46	23.87	109.27	193.84	220.50	140.58	60.10	47.66	55.05	921.18
MAXIMO	30.00	51.00	0.00	0.00	54.00	192.00	417.00	368.80	269.00	121.80	0.00	0.00	1503.60
MINIMO	94.70	29.00	0.00	2.00	3.00	48.00	202.00	156.30	41.60	0.00	0.00	25.00	601.60
5001													
PROMEDIO	8.20	3.35	1.73	3.98	5.75	19.29	18.60	27.34	21.68	11.01	3.74	3.50	128.15
MAXIMO	10.40	0.00	0.00	0.00	42.00	78.00	11.40	79.30	81.00	11.50	0.00	0.00	313.60
MINIMO		0.70	0.00	0.00	0.00	1.40	0.20	4.10	7.10	0.00	0.40	1.60	15.50
5007													
PROMEDIO	8.63	4.62	2.62	6.56	17.22	27.04	24.54	33.45	35.91	18.25	5.71	7.19	191.74
MAXIMO	85.50	13.50	0.00	96.00	20.50	10.50	122.50	40.00	62.00	0.00	0.00	0.00	450.50
MINIMO	2.50	0.00	0.00	0.00	6.50	14.00	4.00	17.50	9.00	3.00	13.00	5.50	75.00
5018													
PROMEDIO	6.38	4.53	3.82	8.37	12.49	28.25	19.79	24.59	22.71	19.65	7.90	5.58	164.07
MAXIMO	5.00	0.00	2.60	0.00	5.50	68.40	0.00	165.70	82.90	132.00	0.00	5.00	467.10
MINIMO	0.20	0.50	0.20	0.70	11.00	13.60	17.00	4.70	1.00	0.00	0.20	2.80	51.90
5022													
PROMEDIO	12.38	6.97	6.34	15.18	36.30	35.35	34.16	36.27	47.24	21.20	11.00	12.43	274.84
MAXIMO	33.00	0.10	0.20	131.50	79.50	120.60	16.50	8.50	11.50	105.50	0.00	6.00	512.90
MINIMO	51.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.00	93.50
5024													
PROMEDIO	13.16	7.94	7.41	10.08	27.50	44.80	66.83	64.37	65.79	26.17	14.04	21.40	369.49
MAXIMO	0.10	0.00	0.00	23.10	24.30	18.70	266.60	23.70	107.20	32.90	125.70	29.60	651.90
MINIMO	0.50	0.00	0.00	0.00	12.70	28.50	14.00	46.00	9.70	11.00	1.50	5.00	128.90
5026													
PROMEDIO	8.69	4.09	1.41	4.78	15.22	30.05	31.43	35.10	42.29	18.24	6.93	9.28	207.50

MAXIMO	7.00	2.00	2.50	0.00	78.10	5.50	50.00	127.80	147.50	63.50	0.00	10.00	493.90
MINIMO	3.00	0.00	0.00	0.10	4.60	1.40	2.40	12.40	3.00	0.50	0.00	0.30	27.70
5027													
PROMEDIO	6.79	3.54	2.24	5.29	16.01	22.69	27.40	26.82	32.88	16.72	8.49	10.04	178.92
MAXIMO	9.00	0.00	0.00	5.00	53.00	78.00	94.00	18.00	96.00	63.20	0.00	34.10	450.30
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00
5028													
PROMEDIO	10.34	2.50	2.52	5.93	13.23	27.58	30.10	30.64	33.71	22.28	9.21	10.55	198.59
MAXIMO	0.00	7.00	0.00	0.00	33.50	89.00	18.00	46.50	94.50	88.00	4.50	42.50	423.50
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.50	7.50	57.00	16.00	12.00	2.00	0.00	103.00
5029													
PROMEDIO	10.43	5.20	4.48	3.92	14.88	47.23	42.07	46.39	40.72	19.04	8.72	9.64	252.72
MAXIMO	0.00	13.00	0.00	11.60	36.00	137.00	45.00	10.00	145.00	54.20	17.50	40.00	509.30
MINIMO	1.10	0.70	0.00	0.00	0.20	1.70	4.80	4.00	6.30	0.00	0.50	2.40	21.70
5036													
PROMEDIO	10.98	4.29	3.38	5.19	22.60	28.31	27.95	29.19	37.50	12.58	6.36	9.28	197.61
MAXIMO	0.00	11.00	0.00	11.00	86.00	79.00	9.50	13.00	70.50	39.50	0.00	23.00	342.50
MINIMO	0.00	0.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.00	9.00	15.00	9.00	1.00	80.00
5037													
PROMEDIO	8.33	6.73	3.47	6.84	15.46	22.34	23.85	49.79	40.42	10.47	8.26	9.62	205.58
MAXIMO		37.80	25.00	19.30	4.60	41.10	96.60	200.40	211.90	0.00	0.00	12.30	649.00
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	26.00	0.00	20.00	0.00	19.00	105.00
5041													
PROMEDIO	11.72	2.89	2.76	4.04	7.15	20.86	25.50	27.43	29.70	13.04	8.38	10.72	164.18
MAXIMO	0.00	11.50	0.00	0.00	31.20	89.00	29.00	21.40	97.00	39.00	12.30	35.00	365.40
MINIMO	9.00	0.00	0.00	0.00	5.50	18.00	3.80	13.00	15.50	0.00	0.00	0.00	64.80
5051													
PROMEDIO	7.60	6.44	4.05	5.22	9.41	20.59	19.16	36.97	28.88	17.75	6.80	6.69	169.56
MAXIMO	11.00	16.00	55.00		2.00	7.00	35.00	114.00	103.00	16.00	0.00	8.00	367.00
MINIMO	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00	5.00	6.50	5.00	2.50	3.50	26.50
5133													
PROMEDIO	14.97	6.23	32.54	21.71	19.63	41.08	60.76	54.44	23.83	31.74	5.27	14.73	326.92

MAXIMO	26.00	0.00	0.00	130.00	10.00	123.00	99.00	123.00	25.00	201.00	0.00	0.00	737.00
MINIMO	3.00	2.60	0.00	0.00	0.00	15.00	0.00	0.00	12.80	16.60	6.00	0.00	56.00
5139													
PROMEDIO	17.25	13.12	10.69	13.02	17.24	32.65	32.00	38.95	32.00	20.15	13.77	9.36	250.20
MAXIMO	12.00	83.50	160.00	25.00	40.50	126.50	13.00	0.00	97.00	88.00	31.00	15.00	691.50
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10045													
PROMEDIO	7.91	3.53	2.42	5.54	16.79	49.99	54.33	73.75	59.34	17.70	6.43	6.48	304.21
MAXIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	29.00	311.00	225.80	24.60	0.00	0.00	615.40
MINIMO	4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	12.50	7.00	12.40	22.70	0.10	80.20
10108													
PROMEDIO	10.80	4.04	1.62	7.15	17.92	46.18	38.32	40.60	55.43	20.45	7.31	10.43	260.24
MAXIMO	13.80	0.00	0.00	19.50	0.60	363.00	37.50	36.00	30.90	16.30	0.00	1.50	519.10
MINIMO	0.00	0.70	0.00	0.00	2.00	7.50	7.00	16.00	69.50	1.50	0.00	0.50	104.70

C-3.2. Láminas de precipitación promedio, máxima y mínima anual histórica en la sub-región semi-árida de la RH-36.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
10049													
PROMEDIO	8.53	3.99	4.87	6.50	17.92	46.79	78.58	79.74	58.42	25.90	9.42	11.12	351.77
MAXIMO	45.00	0.00	0.00	0.00	1.50	30.00	300.00	27.00	23.50	100.00	28.50	45.00	600.50
MINIMO	0.00	0.00	9.20	10.20	2.00	5.20	51.30	29.00	9.40	13.50	5.00	1.00	135.80
10098													
PROMEDIO	7.50	4.50	5.04	4.45	15.01	53.28	82.47	94.33	74.29	22.50	7.93	22.17	393.46
MAXIMO	0.00	0.00	3.00	5.50	0.00	0.00	54.70	130.00	171.00	0.00	3.00	407.60	774.80
MINIMO	0.00	1.00	1.50	1.00	15.50	0.00	15.50	20.50	16.00	57.50	0.00	0.00	128.50
10060													
PROMEDIO	8.00	4.61	1.73	4.39	12.90	49.72	86.72	92.15	81.97	25.54	7.66	7.86	383.26
MAXIMO	1.00	3.50	0.00	27.00	32.00	158.50	110.10	86.40	98.30	87.50	3.00	22.00	629.30
MINIMO	0.00	1.00	1.50	1.00	15.50	0.00	15.50	20.50	16.00	57.50	0.00	0.00	128.50

10068													
PROMEDIO	10.54	6.32	2.85	5.28	13.80	67.26	115.51	119.14	88.16	35.82	10.66	12.75	488.09
MAXIMO	1.40	51.80	3.00	0.00	11.40	100.50	138.40	232.20	284.20	6.80	0.00	0.00	829.70
MINIMO	0.50	0.50	2.50	0.00	19.00	4.00	54.00	51.70	32.70	45.30	0.00	0.00	210.20
10131													
PROMEDIO	12.99	4.03	3.09	7.21	19.71	74.65	96.30	112.60	75.43	28.00	13.47	17.19	464.66
MAXIMO	19.00	4.00	0.10	0.00	14.00	34.50	185.50	230.90	153.00	63.00	0.00	3.50	707.50
MINIMO	0.00	16.00	0.00	0.00	2.00	1.50	29.00	112.50	73.50	15.50	9.50	1.00	260.50
10080													
PROMEDIO	14.40	6.93	1.63	6.63	15.74	44.56	69.71	89.89	63.73	28.66	12.76	12.47	367.11
MAXIMO	0.00	0.00	2.50	0.00	15.00	10.50	97.30	218.50	242.00	34.50	0.00	18.50	638.80
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	19.00	94.00	51.50	2.00		4.00	178.50
32006													
PROMEDIO	12.81	5.74	4.15	5.49	12.25	54.00	75.02	93.08	66.01	27.00	11.34	12.07	378.95
MAXIMO	105.40	1.20	0.70	12.50	39.20	28.40	154.00	28.10	32.40	47.40	21.90	8.50	479.70
MINIMO	0.00	9.50	0.00	0.00	4.90	33.20	66.90	37.20	11.10	0.00	10.30	32.00	205.10
32096													
PROMEDIO	14.38	5.17	1.58	5.06	13.49	55.05	81.66	79.03	60.20	33.59	15.26	18.15	382.61
MAXIMO	2.00	0.00	0.00	5.00	1.00	34.00	246.00	44.00	134.00	32.00	79.00	47.00	624.00
MINIMO	9.00	1.50	0.00	0.00	0.00	28.00	26.00	69.00	31.00	0.00	0.00	4.50	169.00
32005													
PROMEDIO	9.98	5.01	4.23	7.81	21.71	54.87	65.96	82.99	64.79	34.28	10.48	13.46	375.57
MAXIMO	0.70	4.00	37.00	0.00	13.50	93.50	55.50	143.00	51.50	69.50	52.50	63.60	584.30
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.00	42.80	35.60	14.80	1.20	0.00	8.50	187.90
10074													
PROMEDIO	10.78	6.07	4.13	7.82	19.23	48.16	79.36	104.60	80.07	29.16	13.23	10.25	412.84
MAXIMO	0.00	26.60	0.00	0.00	25.50	31.00	190.50	269.00	101.00	32.00	0.00	2.00	677.60
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.00	42.80	35.60	14.80	1.20	0.00	8.50	187.90
32018													
PROMEDIO	15.81	5.98	3.83	4.57	12.44	64.74	95.54	97.77	69.92	34.64	10.84	14.33	430.40
MAXIMO	11.10	9.40	27.50	1.00	34.00	139.10	128.70	70.00	122.00	157.20	69.60	37.70	807.30
MINIMO	0.00	6.50	0.00	0.00	1.60	6.70	38.80	79.80	44.40	11.30	39.00	4.30	232.40

32020													
PROMEDIO	12.76	5.43	4.18	7.13	14.49	66.76	75.64	92.84	68.21	36.51	12.14	12.85	408.94
MAXIMO	3.00	0.00	0.00	2.40	0.00	60.70	271.30	39.00	91.50	33.50	92.00	52.90	646.30
MINIMO	1.00	3.00	0.00	0.00	1.20	13.70	19.10	1.40	59.40	5.30	53.20	6.60	163.90

C-3.3. Láminas de precipitación promedio, máxima y mínima anual histórica en la sub-región Sub-Húmeda de la RH-36.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
10021													
PROMEDIO	7.34	2.64	1.58	3.81	10.91	47.95	82.22	93.55	72.79	24.53	7.74	6.43	361.51
MAXIMO	14.30	0.00	3.40	0.00	11.90	100.00	82.30	219.80	99.10	49.80	0.80	10.50	591.90
MINIMO	0.00	0.00	0.10	4.00	0.00	38.50	63.00	20.00	0.00	0.00	0.00	8.50	134.10
10138													
PROMEDIO	13.23	53.47	6.28	7.90	11.65	78.15	149.39	131.16	102.09	29.87	10.56	19.57	613.33
MAXIMO	0.00	1110.50	0.00	6.00	0.00	0.00	186.70	194.40	142.60	40.70	53.60	23.50	1758.00
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	57.30	90.60	110.20	35.10	0.00	3.40	2.60	315.20
10006													
PROMEDIO	13.45	10.62	5.26	6.64	15.00	71.23	153.42	149.92	127.60	39.69	11.98	15.90	620.70
MAXIMO	30.00	4.00	33.00	35.50	0.00	122.50	125.00	172.50	161.00	210.50	3.00	10.50	907.50
MINIMO	4.50	35.50	0.00	0.00	2.50	13.50	136.50	0.00	82.50	29.50	0.00	43.00	347.50
10007													
PROMEDIO	14.42	8.62	7.05	6.21	10.24	62.19	139.38	140.15	111.23	28.64	20.49	22.05	570.69
MAXIMO	30.00	3.00	2.00	0.00	7.00	251.00	166.50	277.50	86.00	11.00	0.00	27.40	861.40
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.50	145.40	1.00	73.50	0.00	0.00	38.00	296.40
10083													
PROMEDIO	22.29	8.71	4.81	6.14	13.66	77.50	165.49	153.94	140.60	50.52	18.04	22.11	683.82
MAXIMO	58.50	3.00	15.50	56.00	4.50	121.50	80.50	277.00	142.00	258.00	2.50	29.00	1048.00
MINIMO	9.00	0.00	0.00	2.00	4.00	27.00	178.00	69.50	61.50	3.00	41.00	52.00	447.00
10010													
PROMEDIO	10.16	7.80	3.53	5.38	7.85	69.78	123.38	119.30	97.67	42.40	14.60	12.77	514.63
MAXIMO	0.00	0.00	1.50	0.00	0.00	145.50	221.50	60.00	172.50	32.50	45.00	34.50	713.00
MINIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	127.90	153.60	27.10	0.00	12.80	0.00	0.00	321.40

10051													
PROMEDIO	22.99	8.44	8.00	4.21	14.78	83.07	169.89	154.37	117.68	36.83	15.15	33.69	669.10
MAXIMO	22.00	0.00	15.00	0.00	84.00	80.00	203.00	262.00	279.00	51.00	2.00	10.00	1008.00
MINIMO	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	128.00	86.00	74.00	0.00	0.00	4.00	402.00
10035													
PROMEDIO	9.53	4.99	1.42	3.16	7.18	43.49	113.81	112.64	75.88	28.65	11.38	8.66	420.79
MAXIMO	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	4.50	225.20	221.60	144.50	6.10	28.50	33.30	665.00
MINIMO	0.00	5.20	0.00	0.00	8.00	30.50	63.70	69.90	5.70	0.00	0.00	0.00	183.00

APÉNDICE D.

VALIDACIÓN DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE
ESCALA (β) Y FORMA (λ) DE LA LEY FUGA PARA ESTACIONES
DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36.

D-1.1. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Máxima de Verosimilitud en la sub-región árida de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION ARIDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
5007	3.281	2.494	6.256	6.565	6.458	12.917	3.741	32.935	4.978	33.198	4.742	44.005	0.000	0.000
10108	3.179	2.165	7.389	4.693	6.574	10.781	9.385	11.085	6.474	21.652	4.497	36.803	6.727	31.253
5022	3.137	2.432	5.233	7.214	4.110	18.372	8.197	14.029	3.669	41.157	2.181	90.065	0.000	0.000
5026	3.036	2.267	7.419	4.645	9.672	7.199	8.190	12.623	8.180	17.054	9.772	17.844	7.024	29.742
5027	2.771	2.641	4.698	7.802	4.975	14.734	6.435	17.088	3.978	36.851	7.260	25.244	5.189	42.643
5036	2.883	2.813	5.788	7.128	3.868	21.331	3.795	32.036	5.270	31.316	3.293	64.215	0.000	0.000
5051	3.177	2.909	4.727	9.677	5.168	17.176	6.810	20.149	4.479	39.110	7.720	28.525	0.000	0.000
5001	3.031	2.082	8.574	3.793	9.113	7.137	13.984	7.408	14.276	9.112	0.000	0.000	0.000	0.000

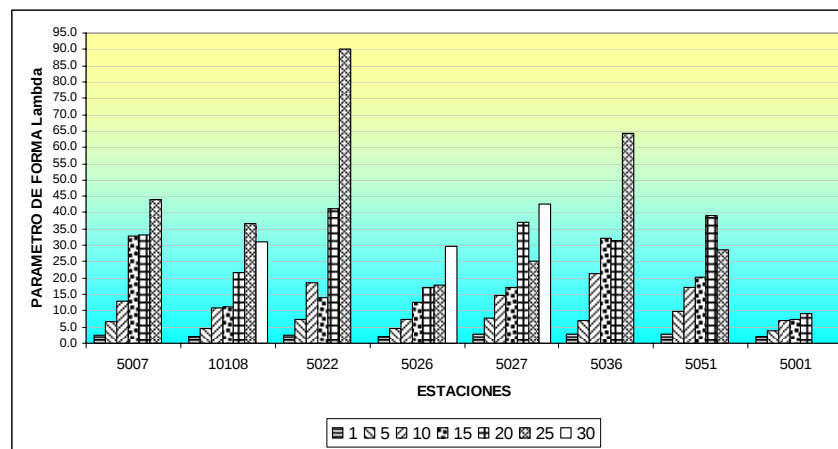
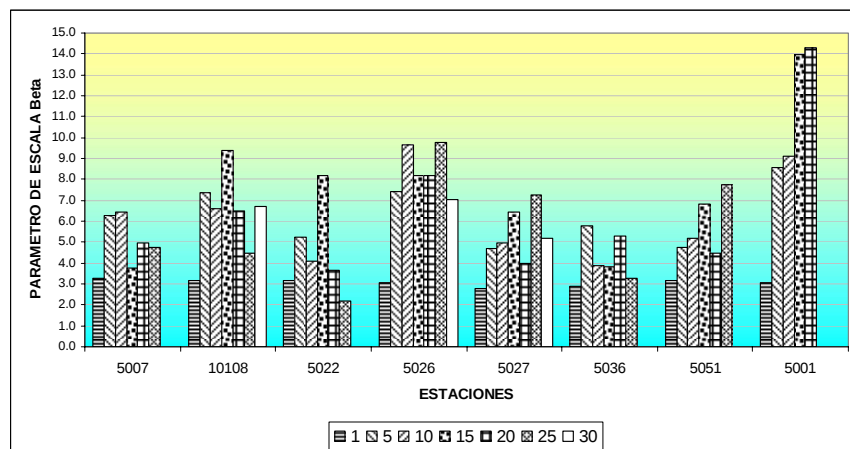


Figura D-1. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Máxima Verosimilitud, estaciones de la sub-región árida de la RH-36.

D-1.2. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Máxima de Verosimilitud en la sub-región semi-árida de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION SEMIARIDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
10060	3.094	2.622	6.066	6.689	5.371	15.110	6.702	18.006	5.122	31.684	6.697	30.030	5.861	41.179
10068	3.509	2.792	5.911	8.306	6.084	16.221	5.581	26.523	5.834	33.599	7.789	31.276	6.716	44.085
10074	3.592	2.665	7.483	6.423	9.306	10.285	5.818	24.786	7.925	24.270	6.495	36.960	5.553	51.958
10080	3.778	2.963	7.718	7.251	8.076	14.072	7.788	22.288	12.014	18.920	7.957	36.857	8.103	44.221
10098	3.056	2.693	5.521	7.462	5.705	14.441	5.071	24.527	6.444	25.571	4.906	41.919	5.601	44.410
10131	3.109	3.247	4.244	11.893	4.742	21.287	3.378	43.958	5.196	38.268	3.520	69.778	2.218	132.873
32005	3.223	2.665	6.143	6.985	7.454	11.512	6.995	18.401	8.383	20.620	5.296	41.065	7.729	33.308
32006	2.745	2.470	5.969	5.679	6.846	9.925	7.629	13.369	6.577	20.458	6.900	24.374	7.284	27.347
32018	2.905	2.492	5.110	7.084	6.312	11.469	6.779	16.055	7.228	20.031	8.313	21.772	5.547	39.496
32020	3.165	2.307	6.814	5.350	8.173	8.942	8.576	12.783	10.835	13.490	7.325	24.620	8.046	27.252
32096	2.768	2.475	5.676	6.034	7.593	9.021	7.270	14.133	10.708	12.793	5.777	29.642	9.825	20.916
10049	3.168	2.814	5.564	8.036	5.321	16.805	5.612	23.731	6.222	28.746	7.010	32.349	4.645	58.584

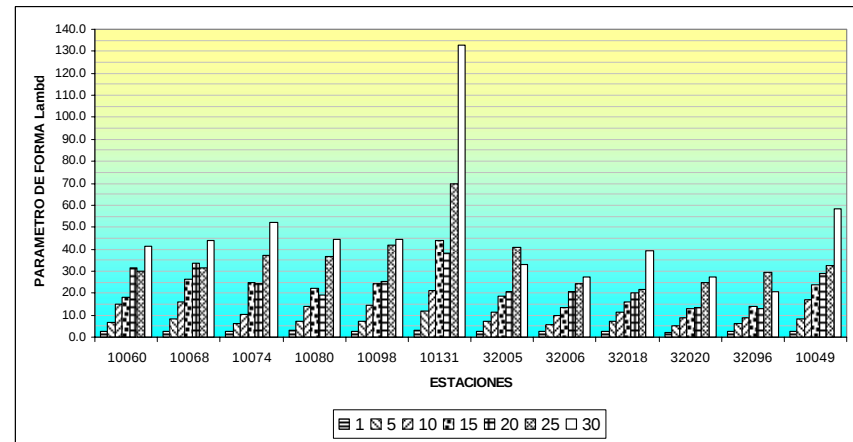
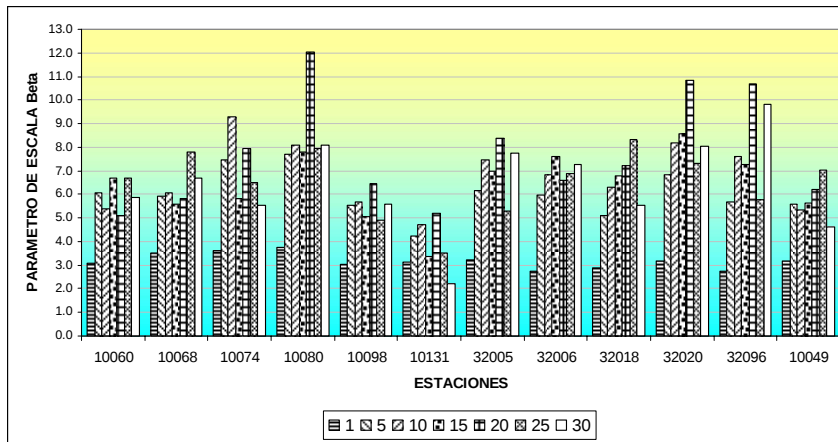


Figura D-2. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Máxima Verosimilitud, estaciones de la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-1.3. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Máxima de Verosimilitud en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION SUBHUMEDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
10083	3.323	2.977	5.055	9.786	6.154	16.054	7.052	21.014	7.582	26.129	6.939	35.571	9.144	32.415
10096	2.805	3.374	4.144	11.533	4.357	22.169	4.795	30.394	4.127	46.813	1.903	126.904	3.603	81.210
10138	3.476	2.873	5.742	8.710	6.089	16.427	4.827	31.083	6.780	29.505	7.246	34.507	4.023	74.581
10006	3.100	2.963	4.467	10.158	4.411	20.824	4.281	31.798	4.036	44.862	3.621	62.509	2.847	97.142
10007	2.761	3.461	4.426	10.784	3.563	26.835	4.812	29.753	5.114	37.390	5.442	43.856	4.886	59.097
10010	2.396	3.710	3.857	11.552	4.077	21.855	4.049	33.002	2.841	62.732	1.444	153.217	4.167	63.718
10021	3.300	2.423	7.147	5.586	7.784	10.258	9.811	9.099	6.605	24.177	9.975	20.159	7.364	32.528
10035	2.686	2.694	4.606	7.889	5.457	13.373	4.836	15.090	6.875	21.035	5.660	31.817	5.509	39.372
10051	2.799	3.787	4.833	10.959	4.121	25.404	5.526	19.692	4.324	48.426	3.927	65.935	4.742	65.163

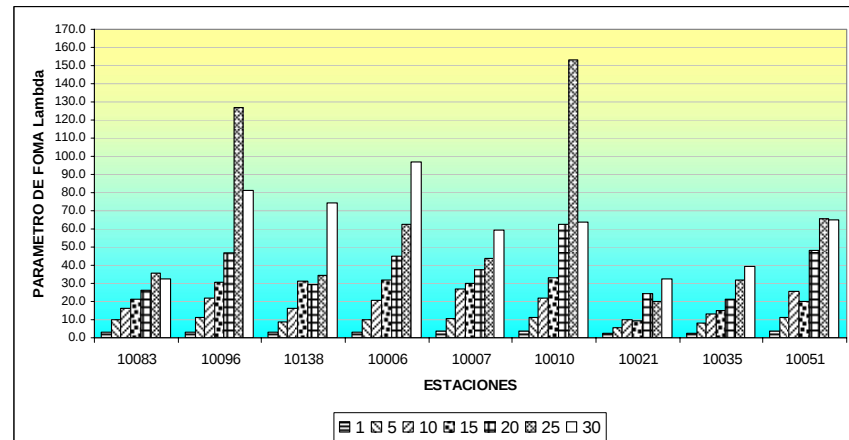
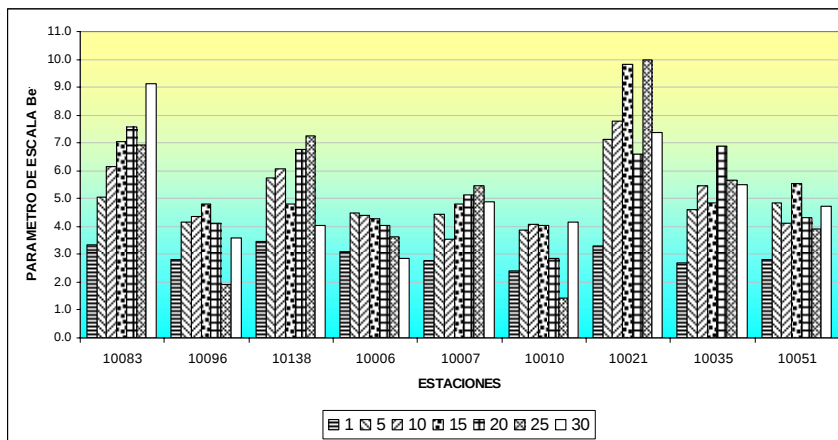


Figura D-3. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Máxima Verosimilitud, estaciones de la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-2.1. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Momentos en la sub-región árida de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION ARIDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MOMENTO													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
5007	5.806	1.409	8.093	5.075	6.458	12.917	4.936	24.960	6.160	26.828	6.338	32.926	0.000	0.000
10108	7.072	0.973	7.844	4.421	7.357	9.633	9.162	11.355	7.507	18.671	4.538	36.471	8.053	26.107
5022	6.068	1.257	5.719	6.601	5.475	13.790	10.042	11.452	4.511	33.473	2.790	70.414	0.000	0.000
5026	6.351	1.084	7.474	4.611	8.377	8.313	6.489	15.931	6.970	20.014	7.687	22.686	7.422	28.195
5027	4.575	1.599	4.946	7.411	5.169	14.181	7.456	14.748	4.450	32.947	8.776	20.885	6.370	34.741
5036	5.099	1.590	7.416	5.563	4.546	18.149	4.366	27.846	6.099	27.059	3.851	54.903		
5051	5.811	1.591	5.095	8.978	5.728	15.497	7.375	18.605	5.347	32.763	10.027	21.961		
5001	7.890	0.800	9.090	3.578	7.722	8.422	11.830	8.758	13.465	9.661				

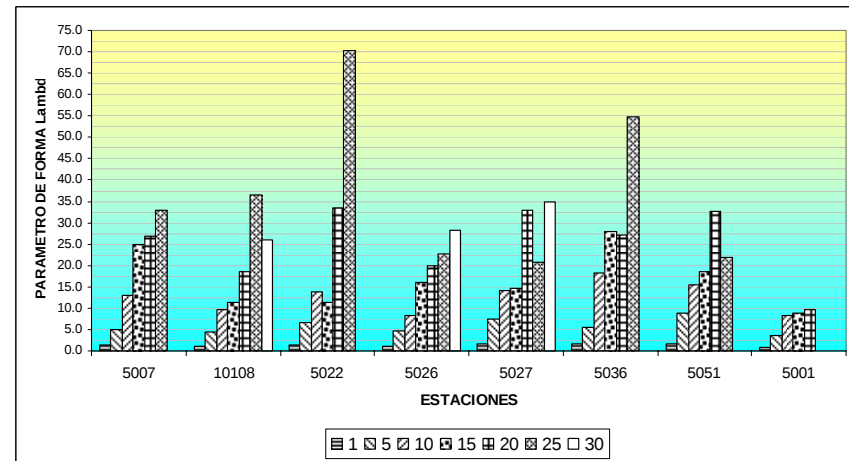
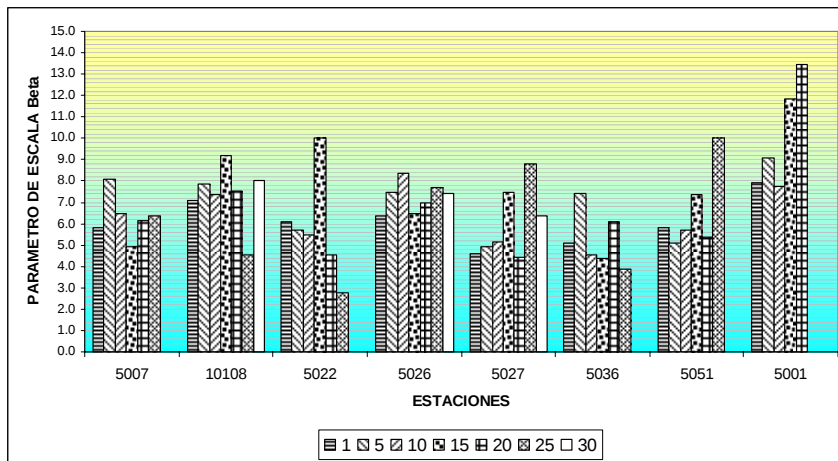


Figura D-4. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Momentos, estaciones de la sub-región árida de la RH-36.

D-2.2. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Momentos en la sub-región semi-árida de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION SEMIARIDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MOMENTO													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
10060	5.778	1.402	6.840	5.932	5.322	15.249	6.630	18.199	4.845	33.501	7.119	28.250	6.010	40.153
10068	5.910	1.658	6.166	7.963	6.428	15.352	5.748	25.753	5.990	32.725	8.403	28.991	6.920	42.784
10074	6.339	1.510	8.486	5.665	10.060	9.514	5.934	24.301	8.366	22.989	7.012	34.234	6.218	46.396
10080	6.121	1.829	7.951	7.039	7.236	15.706	7.916	21.927	10.937	20.783	8.482	34.575	9.115	39.313
10098	5.537	1.486	5.841	7.053	5.865	14.048	5.147	24.162	6.238	26.417	4.713	43.633	5.854	42.490
10131	4.324	2.334	4.404	11.461	4.719	21.391	3.437	43.203	5.901	33.696	3.886	63.214	2.639	111.687
32005	5.976	1.437	7.428	5.776	8.594	9.985	8.231	15.638	9.446	18.298	5.969	36.433	8.539	30.148
32006	5.148	1.317	6.305	5.376	7.384	9.203	8.127	12.549	6.635	20.280	8.019	20.974	8.581	23.213
32018	5.159	1.403	5.457	6.634	6.204	11.670	6.395	17.019	7.276	19.902	8.678	20.904	5.691	38.495

32020	6.150	1.187	6.627	5.502	7.182	10.177	8.318	13.179	9.367	15.606	6.982	25.830	7.685	28.531
32096	5.630	1.217	6.671	5.134	7.928	8.640	7.083	14.507	11.292	12.132	6.529	26.226	10.183	20.179
10049	5.204	1.713	7.022	6.367	6.915	12.932	6.612	20.142	7.467	23.951	7.242	31.315	5.354	50.827

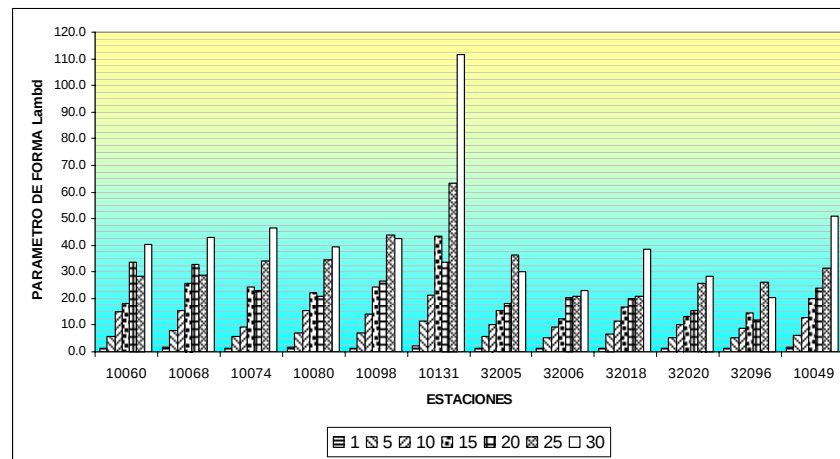
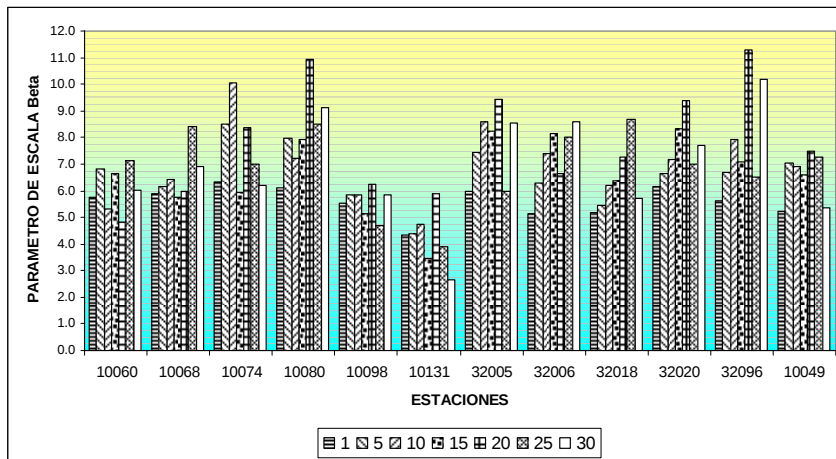


Figura D-5. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Momentos, estaciones de la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-2.3. Determinación de los parámetros de escala (β) y forma (λ) por el método de Momentos en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

ESTACION	SUB-REGION SUBHUMEDA													
	ESTIMACION DE PARAMETROS. METODO DE MOMENTO													
	1		5		10		15		20		25		30	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
10083	4.886	2.024	5.537	8.933	6.129	16.121	7.148	20.731	7.652	25.893	7.305	33.788	9.399	31.536
10096	5.069	1.867	4.889	9.774	4.439	21.758	4.540	32.108	4.534	42.612	2.089	115.619	4.801	60.956
10138	5.808	1.720	6.986	7.159	6.736	14.848	5.427	27.647	6.555	30.518	7.630	32.771	4.481	66.961
10006	5.113	1.796	4.836	9.384	4.628	19.846	4.893	27.824	4.416	41.004	3.941	57.434	3.136	88.187
10007	4.084	2.340	4.626	10.317	3.912	24.437	5.453	26.257	5.756	33.219	5.663	42.138	5.421	53.270
10010	3.373	2.636	3.970	11.221	3.854	23.118	3.996	33.444	3.012	59.158	1.539	143.740	4.848	54.767
10021	6.566	1.218	8.104	4.926	8.291	9.630	10.090	8.847	6.727	23.740	10.626	18.925	8.265	28.982
10035	5.160	1.403	5.040	7.210	5.698	12.807	4.831	15.107	6.982	20.710	5.818	30.951	5.783	37.507
10051	3.579	2.962	4.898	10.814	4.159	25.174	5.545	19.627	4.581	45.705	4.084	63.402	5.142	60.086

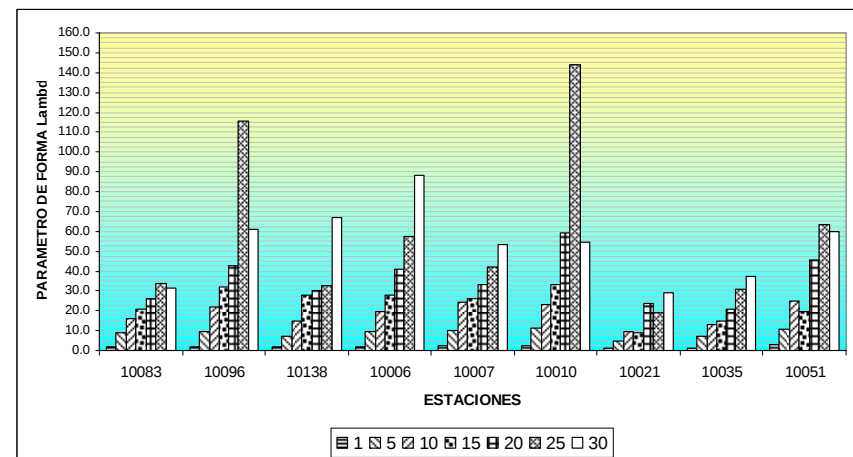
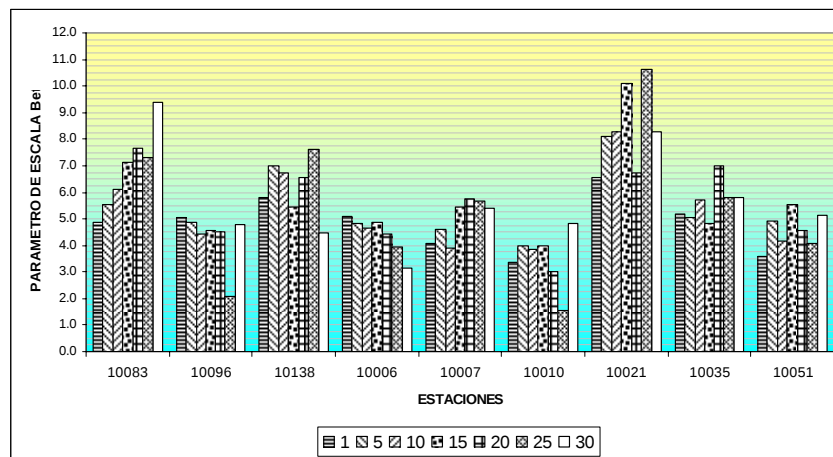


Figura D-6. Comportamiento de los parámetros de escala y forma por el método de Momentos, estaciones de la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-3.1. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Máxima Verosimilitud en la sub-región árida de la RH-36.

ESTACIÓN	SUB-REGION ARIDA																		
	DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD																		
	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
5007	2.494	6.565	12.470	89.937	12.917	24.940	93.078	32.935	37.410	13.587	33.198	49.880	50.253	44.005	62.350	41.691	0.000	74.820	
10108	2.165	4.693	10.826	130.673	10.781	21.652	100.838	11.085	32.478	192.984	21.652	43.304	100.000	36.803	54.130	47.080	31.253	64.956	107.844
5022	2.432	7.214	12.162	68.596	18.372	24.324	32.402	14.029	36.486	160.080	41.157	48.648	18.202	90.065	60.811	-32.481	0.000	72.973	
5026	2.267	4.645	11.337	144.056	7.199	22.673	214.946	12.623	34.010	169.418	17.054	45.346	165.899	17.844	56.683	217.663	29.742	68.019	128.695
5027	2.641	7.802	13.203	69.215	14.734	26.405	79.210	17.088	39.608	131.782	36.851	52.810	43.307	25.244	66.013	161.495	42.643	79.215	85.764
5036	2.813	7.128	14.065	97.320	21.331	28.129	31.870	32.036	42.194	31.706	31.316	56.258	79.650	64.215	70.323	9.513	0.000	84.388	
5051	2.909	9.677	14.547	50.327	17.176	29.095	69.387	20.149	43.642	116.595	39.110	58.189	48.784	28.525	72.737	154.992	0.000	87.284	
5001	2.082	3.793	10.408	174.422	7.137	20.817	191.686	7.408	31.225	321.490	9.112	41.633	356.903	0.000	52.042	#¡DIV/0!	0.000	62.450	

D-3.2. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Máxima Verosimilitud en la sub-región semi- árida de la RH-36.

ESTACIÓN	SUB-REGION SEMI-ARIDA																		
	DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD																		
	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
10060	2.622	6.689	13.109	95.967	15.110	26.217	73.507	18.006	39.326	118.405	31.684	52.434	65.492	30.030	65.543	118.257	41.179	78.651	90.999
10068	2.792	8.306	13.961	68.087	16.221	27.922	72.128	26.523	41.882	57.909	33.599	55.843	66.205	31.276	69.804	123.189	44.085	83.765	90.006
10074	2.665	6.423	13.326	107.467	10.285	26.653	159.138	24.786	39.979	61.295	24.270	53.305	119.636	36.960	66.632	80.280	51.958	79.958	53.889
10080	2.963	7.251	14.813	104.280	14.072	29.626	110.533	22.288	44.438	99.379	18.920	59.251	213.175	36.857	74.064	100.949	44.221	88.877	100.985
10098	2.693	7.462	13.464	80.439	14.441	26.928	86.475	24.527	40.392	64.687	25.571	53.857	110.613	41.919	67.321	60.596	44.410	80.785	81.908
10131	3.247	11.893	16.237	36.523	21.287	32.474	52.551	43.958	48.711	10.813	38.268	64.948	69.719	69.778	81.186	16.349	132.873	97.423	-26.680
32005	2.665	6.985	13.325	90.776	11.512	26.651	131.503	18.401	39.976	117.251	20.620	53.302	158.497	41.065	66.627	62.246	33.308	79.952	140.041
32006	2.470	5.679	12.350	117.466	9.925	24.700	148.856	13.369	37.050	177.130	20.458	49.400	141.469	24.374	61.750	153.342	27.347	74.100	170.960
32018	2.492	7.084	12.458	75.853	11.469	24.916	117.243	16.055	37.374	132.793	20.031	49.832	148.770	21.772	62.290	186.100	39.496	74.747	89.255

32020	2.307	5.350	11.533	115.553	8.942	23.065	157.939	12.783	34.598	170.650	13.490	46.131	241.951	24.620	57.663	134.214	27.252	69.196	153.910
32096	2.475	6.034	12.374	105.063	9.021	24.747	174.341	14.133	37.121	162.646	12.793	49.494	286.874	29.642	61.868	108.718	20.916	74.242	254.951
10049	2.814	8.036	14.072	75.117	16.805	28.144	67.477	23.731	42.216	77.898	28.746	56.289	95.815	32.349	70.361	117.508	58.584	84.433	44.124

D-4.3. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Máxima Verosimilitud en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

ESTACIÓN	SUB-REGION SUB-HUMEDA																		
	DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD																		
	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
10083	2.977	9.786	14.883	52.080	16.054	29.766	85.410	21.014	44.648	112.474	26.129	59.531	127.837	35.571	74.414	109.200	32.415	89.297	175.482
10096	3.374	11.533	16.868	46.268	22.169	33.737	52.180	30.394	50.605	66.497	46.813	67.473	44.134	126.904	84.342	-33.539	81.210	101.210	24.628
10138	2.873	8.710	14.366	64.939	16.427	28.732	74.907	31.083	43.098	38.653	29.505	57.464	94.760	34.507	71.830	108.158	74.581	86.196	15.574
10006	2.963	10.158	14.815	45.837	20.824	29.630	42.287	31.798	44.444	39.771	44.862	59.259	32.091	62.509	74.074	18.502	97.142	88.889	-8.497
10007	3.461	10.784	17.304	60.450	26.835	34.607	28.962	29.753	51.911	74.471	37.390	69.214	85.117	43.856	86.518	97.278	59.097	103.822	75.681
10010	3.710	11.552	18.552	60.600	21.855	37.105	69.777	33.002	55.657	68.646	62.732	74.209	18.295	153.217	92.762	-39.457	63.718	111.314	74.698
10021	2.423	5.586	12.115	116.872	10.258	24.229	136.205	9.099	36.344	299.447	24.177	48.458	100.430	20.159	60.573	200.475	32.528	72.688	123.462
10035	2.694	7.889	13.472	70.765	13.373	26.944	101.477	15.090	40.416	167.827	21.035	53.888	156.188	31.817	67.360	111.710	39.372	80.832	105.304
10051	3.787	10.959	18.936	72.784	25.404	37.871	49.078	19.692	56.807	188.470	48.426	75.742	56.408	65.935	94.678	43.592	65.163	113.613	74.352

D-4.1. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Momentos en la sub-región árida de la RH-36.

SUB-REGION ARIDA																			
DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MOMENTO																			
ESTA	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
5007	1.409	5.075	7.047	38.862	12.917	14.094	9.108	24.960	21.140	-15.302	26.828	28.187	5.068	32.926	35.234	7.009	0.000	42.281	
10108	0.973	4.421	4.867	10.087	9.633	9.734	1.046	11.355	14.601	28.584	18.671	19.467	4.268	36.471	24.334	-33.278	26.107	29.201	11.851
5022	1.257	6.601	6.287	-4.752	13.790	12.574	-8.817	11.452	18.861	64.693	33.473	25.148	-24.871	70.414	31.435	-55.357	0.000	37.722	
5026	1.084	4.611	5.420	17.557	8.313	10.840	30.403	15.931	16.260	2.068	20.014	21.680	8.324	22.686	27.100	19.459	28.195	32.520	15.340
5027	1.599	7.411	7.997	7.916	14.181	15.994	12.791	14.748	23.991	62.672	32.947	31.989	-2.909	20.885	39.986	91.459	34.741	47.983	38.114
5036	1.590	5.563	7.951	42.921	18.149	15.902	-12.381	27.846	23.853	-14.336	27.059	31.805	17.536	54.903	39.756	-27.588	0.000	47.707	
5051	1.591	8.978	7.953	-11.413	15.497	15.907	2.644	18.605	23.860	28.241	32.763	31.813	-2.899	21.961	39.766	81.077	0.000	47.720	
5001	0.800	3.578	3.998	11.741	8.422	7.995	-5.069	8.758	11.993	36.945	9.661	15.991	65.525	0.000	19.988		0.000	23.986	

D-4.2. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Momentos en la sub-región semi-árida de la RH-36.

SUB-REGION SEMI-ARIDA																			
DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MOMENTO																			
ESTA	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
10060	1.402	5.932	7.011	18.177	15.249	14.022	-8.050	18.199	21.032	15.566	33.501	28.043	-16.293	28.250	35.054	24.085	40.153	42.065	4.760
10068	1.658	7.963	8.289	4.094	15.352	16.578	7.984	25.753	24.867	-3.439	32.725	33.156	1.317	28.991	41.445	42.960	42.784	49.734	16.245
10074	1.510	5.665	7.552	33.321	9.514	15.105	58.762	24.301	22.657	-6.764	22.989	30.209	31.408	34.234	37.762	10.304	46.396	45.314	-2.331
10080	1.829	7.039	9.143	29.884	15.706	18.286	16.427	21.927	27.429	25.094	20.783	36.573	75.978	34.575	45.716	32.222	39.313	54.859	39.544
10098	1.486	7.053	7.430	5.346	14.048	14.860	5.779	24.162	22.290	-7.744	26.417	29.721	12.506	43.633	37.151	-14.856	42.490	44.581	4.920
10131	2.334	11.461	11.672	1.837	21.391	23.344	9.132	43.203	35.016	-18.950	33.696	46.688	38.555	63.214	58.360	-7.679	111.687	70.032	-37.296
32005	1.437	5.776	7.187	24.421	9.985	14.373	43.946	15.638	21.560	37.863	18.298	28.746	57.099	36.433	35.933	-1.375	30.148	43.119	43.023

32006	1.317	5.376	6.584	22.477	9.203	13.169	43.087	12.549	19.753	57.406	20.280	26.337	29.869	20.974	32.922	56.965	23.213	39.506	70.187
32018	1.403	6.634	7.016	5.760	11.670	14.032	20.241	17.019	21.048	23.675	19.902	28.064	41.014	20.904	35.080	67.819	38.495	42.096	9.354
32020	1.187	5.502	5.935	7.880	10.177	11.870	16.643	13.179	17.805	35.102	15.606	23.740	52.125	25.830	29.676	14.886	28.531	35.611	24.812
32096	1.217	5.134	6.083	18.491	8.640	12.166	40.812	14.507	18.249	25.796	12.132	24.332	100.567	26.226	30.415	15.972	20.179	36.498	80.872
10049	1.713	6.367	8.566	34.532	12.932	17.132	32.472	20.142	25.697	27.580	23.951	34.263	43.056	31.315	42.829	36.769	50.827	51.395	1.117

D-4.3. Cálculo de la diferencia relativa en porcentaje, del parámetro de forma (λ) obtenida y calculada *, método de Momentos en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

SUB-REGION SUB-HUMEDA																			
DIFERENCIA RELATIVA DE VALORES DE LAMBDA. METODO DE MOMENTO																			
ESTA	1	5			10			15			20			25			30		
	λ	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$	λ	λ^*	$\Delta=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$
10083	2.024	8.933	10.122	13.310	16.121	20.244	25.575	20.731	30.365	46.475	25.893	40.487	56.366	33.788	50.609	49.786	31.536	60.731	92.579
10096	1.867	9.774	9.333	-4.509	21.758	18.667	-14.207	32.108	28.000	-12.793	42.612	37.333	-12.387	115.619	46.667	-59.637	60.956	56.000	-8.130
10138	1.720	7.159	8.598	20.099	14.848	17.195	15.811	27.647	25.793	-6.704	30.518	34.391	12.691	32.771	42.989	31.180	66.961	51.586	-22.961
10006	1.796	9.384	8.981	-4.295	19.846	17.962	-9.491	27.824	26.944	-3.166	41.004	35.925	-12.388	57.434	44.906	-21.812	88.187	53.887	-38.895
10007	2.340	10.317	11.698	13.388	24.437	23.397	-4.257	26.257	35.095	33.660	33.219	46.794	40.864	42.138	58.492	38.810	53.270	70.190	31.764
10010	2.636	11.221	13.181	17.468	23.118	26.362	14.035	33.444	39.543	18.239	59.158	52.724	-10.875	143.740	65.906	-54.150	54.767	79.087	44.405
10021	1.218	4.926	6.088	23.587	9.630	12.176	26.439	8.847	18.265	106.448	23.740	24.353	2.580	18.925	30.441	60.852	28.982	36.529	26.039
10035	1.403	7.210	7.013	-2.725	12.807	14.026	9.521	15.107	21.039	39.270	20.710	28.053	35.452	30.951	35.066	13.295	37.507	42.079	12.188
10051	2.962	10.814	14.808	36.929	25.174	29.616	17.643	19.627	44.423	126.344	45.705	59.231	29.595	63.402	74.039	16.777	60.086	88.847	47.866

D-5.1. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las ocho estaciones en la sub-región árida de la RH-36. T=5 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=5 días. SUB-REGION ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	]				
-20.0	-10.0	-15.0	1.0	0.125	12.500
-10.0	0.0	-5.0	1.0	0.125	12.500
0.0	10.0	5.0	1.0	0.125	12.500
10.0	20.0	15.0	3.0	0.375	37.500
20.0	30.0	25.0	0.0	0.000	0.000
30.0	40.0	35.0	1.0	0.125	12.500
40.0	50.0	45.0	1.0	0.125	12.500
			8.0	1.000	100.000

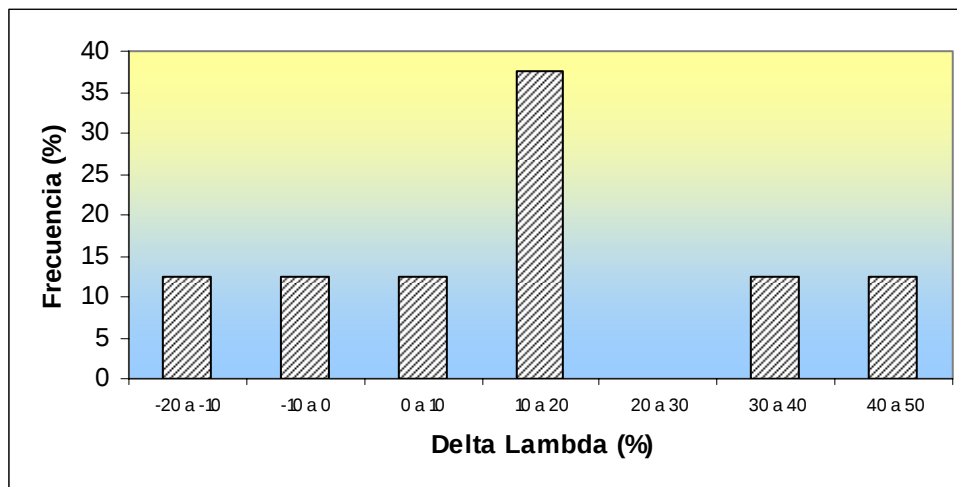


Figura D-7. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 5 días en la sub-región árida de la RH-36.

D-5.2. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las ocho estaciones en la sub-región árida de la RH-36. T=10 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=10 días. SUB-REGION ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	]				
-20.0	-10.0	-15.0	1.0	0.125	12.500
-10.0	0.0	-5.0	2.0	0.250	25.000
0.0	10.0	5.0	3.0	0.375	37.500
10.0	20.0	15.0	1.0	0.125	12.500
20.0	30.0	25.0	0.0	0.000	0.000
30.0	40.0	35.0	1.0	0.125	12.500
40.0	50.0	45.0	0.0	0.000	0.000
			8.000	1.000	100.000

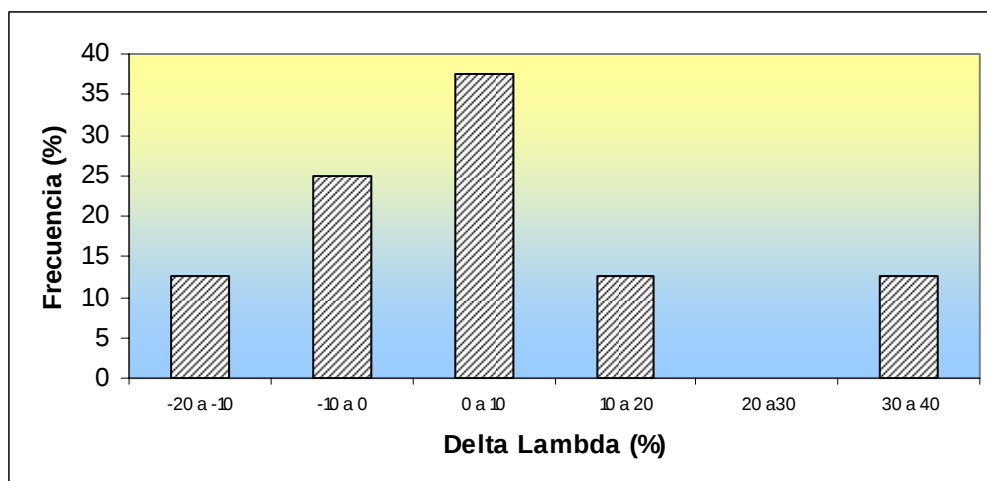


Figura D-8. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=10$ días en la sub-región árida de la RH-36.

D-5.3. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda = (\lambda^* - \lambda) / \lambda$ por el método de Momentos de las ocho estaciones en la sub-región árida de la RH-36. $T=15$ días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=15 días. SUB-REGION ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	]				
-20.0	0.0	-10.0	2.0	0.250	25.000
0.0	20.0	10.0	1.0	0.125	12.500
20.0	40.0	30.0	3.0	0.375	37.500
40.0	60.0	50.0	0.0	0.000	0.000
60.0	80.0	70.0	2.0	0.250	25.000
			8.000	1.000	100.000

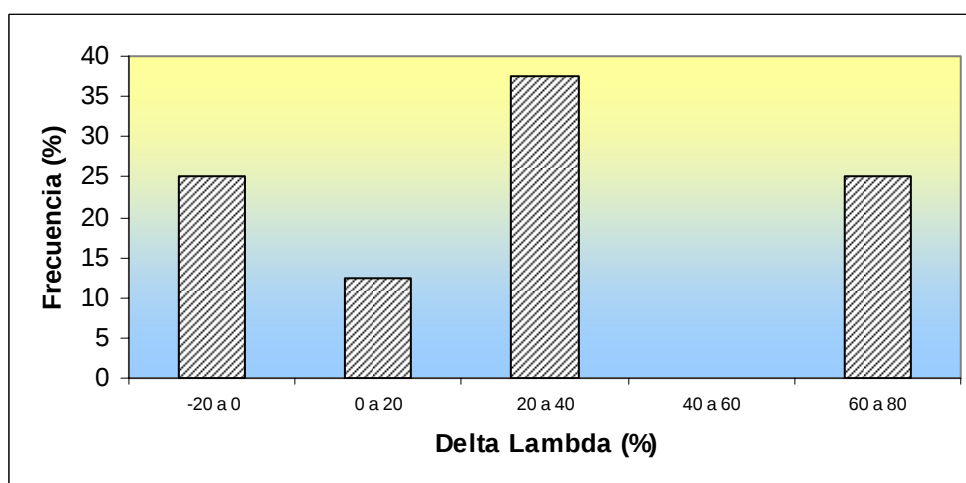


Figura D-9. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=15$ días en la sub-región árida de la RH-36.

D-5.4. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda = (\lambda^* - \lambda) / \lambda$ por el método de Momentos de las ocho estaciones en la sub-región árida de la RH-36. T=20 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=20 días. SUB-REGION ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-30.0	-20.0	-25.0	1.0	0.125	12.500
-20.0	-10.0	-15.0	0.0	0.000	0.000
-10.0	0.0	-5.0	2.0	0.250	25.000
0.0	10.0	5.0	3.0	0.375	37.500
10.0	20.0	15.0	1.0	0.125	12.500
20.0	30.0	25.0	0.0	0.125	12.500
30.0	40.0	35.0	0.0		
40.0	50.0	45.0	0.0		
50.0	60.0	55.0	0.0		
60.0	70.0	65.0	1.0		
			8.000	1.000	100.000

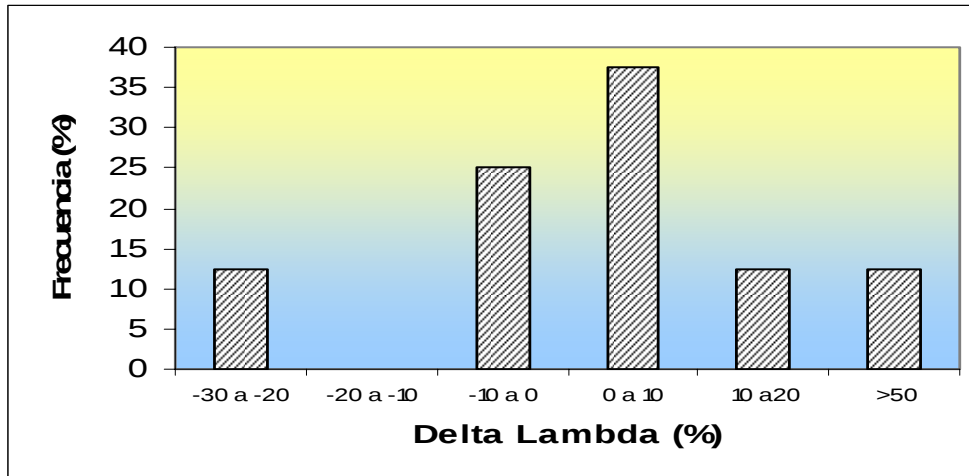


Figura D-10. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 20 días en la sub-región árida de la RH-36.

D-5.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda = (\lambda^* - \lambda) / \lambda$ por el Método de Momentos de las ocho estaciones en la sub-región árida de la RH-36. T=25 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=25 días. SUB-REGION ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-60.0	-30.0	-45.0	2.0	0.286	28.571
-30.0	0.0	-15.0	1.0	0.143	14.286
0.0	30.0	15.0	2.0	0.286	28.571
30.0	60.0	45.0	0.0	0.000	0.000
60.0	90.0	75.0	1.0	0.143	14.286
90.0	120.0	105.0	1.0	0.143	14.286
			7.000	1.000	100.000

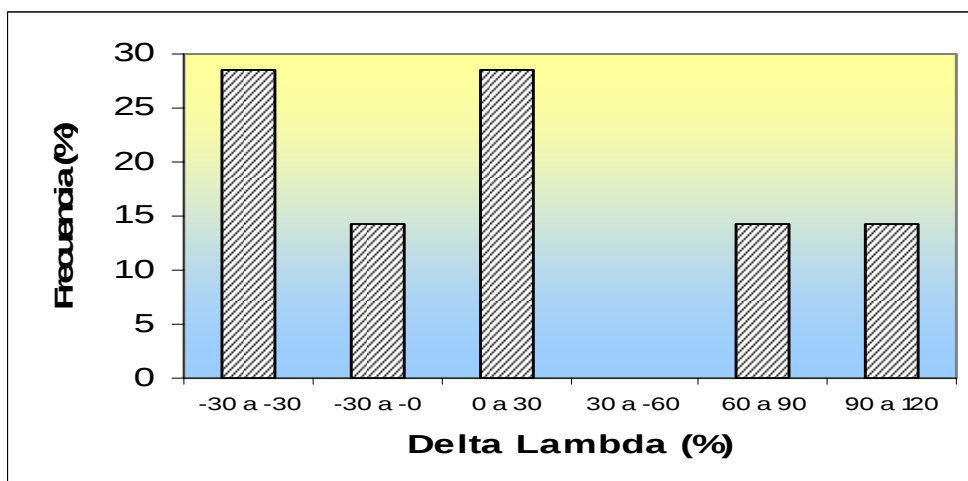


Figura D-11. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 25$ días en la sub-región árida de la RH-36.

D-6.1. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región semi-árida de la RH-36. $T=5$ días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=5 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	]				
0.0	5.0	2.5	2.0	0.167	16.667
5.0	10.0	7.5	3.0	0.250	25.000
10.0	15.0	12.5	0.0	0.000	0.000
15.0	20.0	17.5	2.0	0.167	16.667
20.0	25.0	22.5	2.0	0.167	16.667
25.0	30.0	27.5	1.0	0.083	8.333
30.0	35.0	32.5	2.0	0.167	16.667
			12.000	1.000	100.000

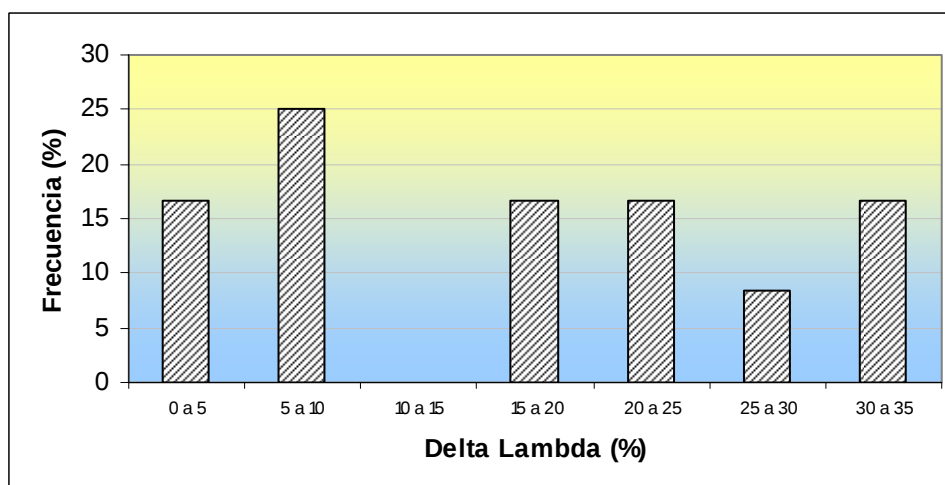


Figura D-12. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 5$ días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-6.2. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el Método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región Semi-Árida de la RH-36. T=10 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=10 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-10.0	0.0	-5.0	1.0	0.083	8.333
0.0	10.0	5.0	3.0	0.250	25.000
10.0	20.0	15.0	2.0	0.167	16.667
20.0	30.0	25.0	1.0	0.083	8.333
30.0	40.0	35.0	1.0	0.083	8.333
40.0	50.0	45.0	3.0	0.250	25.000
50.0	60.0	55.0	1.0	0.083	8.333
			12.000	1.000	100.000

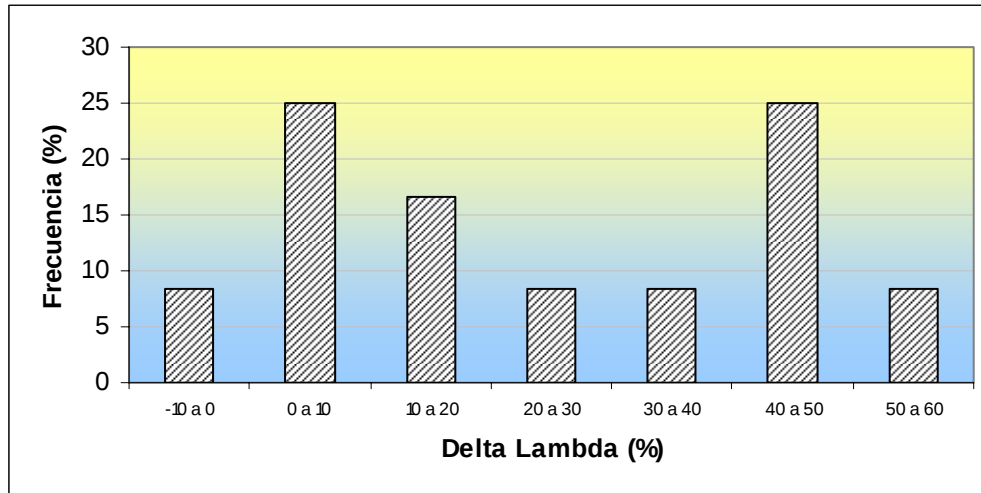


Figura D-13. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 10 días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-6.3. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región semi-árida de la RH-36. T=15 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=15 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-20.0	-5.0	-12.5	3.0	0.250	25.000
-5.0	10.0	2.5	1.0	0.083	8.333
10.0	25.0	17.5	2.0	0.167	16.667
25.0	40.0	32.5	5.0	0.417	41.667
40.0	55.0	47.5	0.0	0.000	0.000
55.0	70.0	62.5	1.0	0.083	8.333
			12.000	1.000	100.000

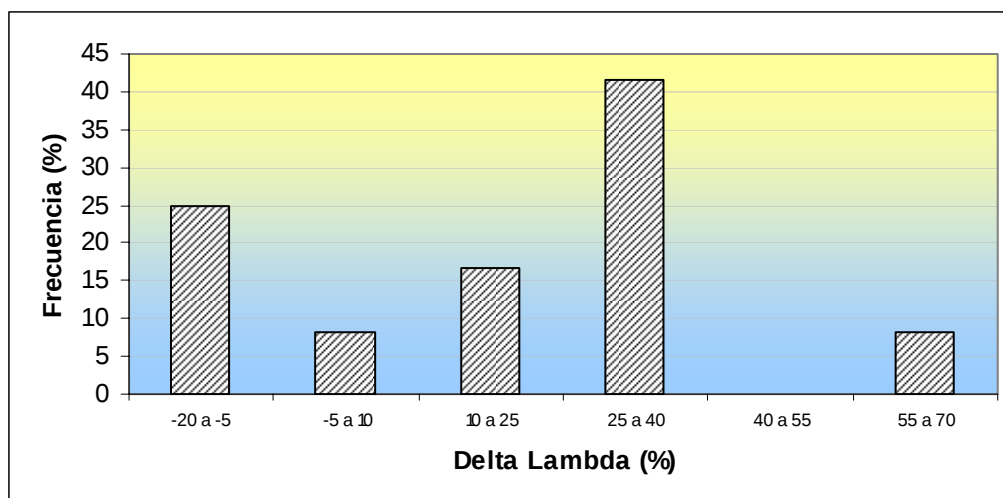


Figura D-14. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=15$ días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-6.4. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región semi-árida de la RH-36. $T=20$ días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=20 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	]				
-25.0	0.0	-12.5	1.0	0.083	8.333
0.0	25.0	12.5	2.0	0.167	16.667
25.0	50.0	37.5	5.0	0.417	41.667
50.0	75.0	62.5	2.0	0.167	16.667
75.0	100.0	87.5	1.0	0.083	8.333
100.0	125.0	112.5	1.0	0.083	8.333
			12.000	1.000	100.000

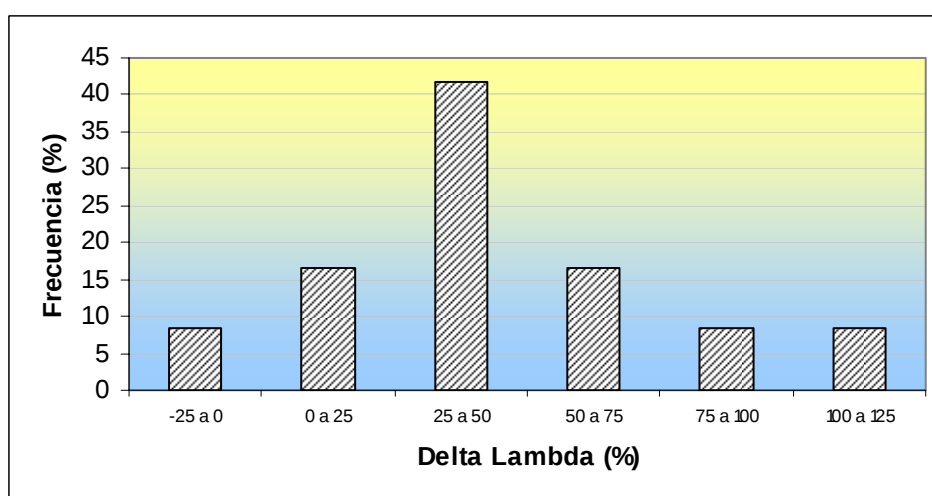


Figura D-15. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=20$ días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-6.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región semi-árida de la RH-36. T=25 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=25 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-20.0	0.0	-10.0	3.0	0.250	25.000
0.0	20.0	10.0	3.0	0.250	25.000
20.0	40.0	30.0	3.0	0.250	25.000
40.0	60.0	50.0	2.0	0.167	16.667
60.0	80.0	70.0	1.0	0.083	8.333
			12.000	1.000	100.000

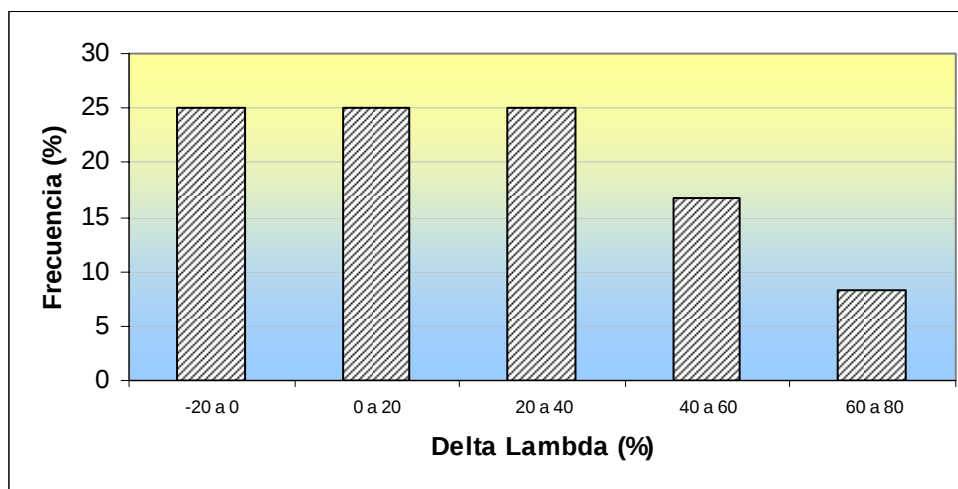


Figura D-16. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 25 días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-6.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las doce estaciones en la sub-región semi-árida de la RH-36. T=30 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=30 días. SUB-REGION SEMI-ARIDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-40.0	-20.0	-30.0	1.0	0.083	8.333
-20.0	0.0	-10.0	1.0	0.083	8.333
0.0	20.0	10.0	5.0	0.417	41.667
20.0	40.0	30.0	2.0	0.167	16.667
40.0	60.0	50.0	1.0	0.083	8.333
60.0	80.0	70.0	1.0	0.083	8.333
80.0	100.0	90.0	1.0	0.083	8.333
			12.000	1.000	100.000

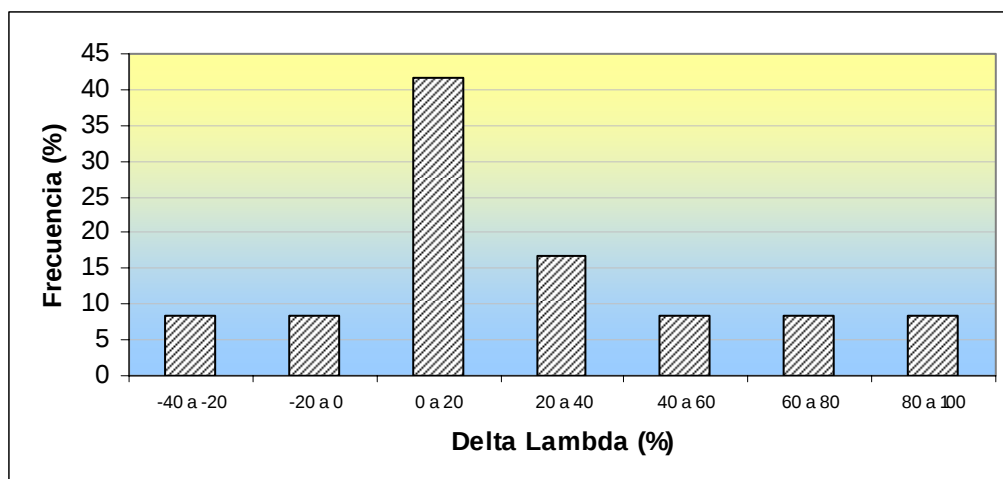


Figura D-17. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 30$ días en la sub-región semi-árida de la RH-36.

D-7.1. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. $T=5$ días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=5 días. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	)				(%)
-10	0	-5.0	3.0	0.333	33.333
0	10	5.0	0.0	0.000	0.000
10	20	15.0	3.0	0.333	33.333
20	30	25.0	2.0	0.222	22.222
30	40	35.0	1.0	0.111	11.111
			9.000	1.000	100.000

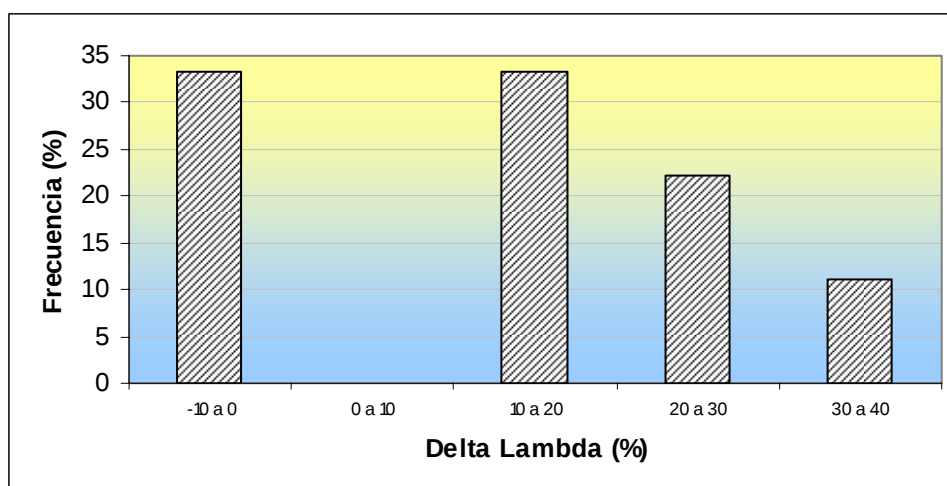


Figura D-18. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T= 5$ días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-7.2. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. T=10 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=10 días. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-20	-10	-15.0	1.0	0.111	11.111
-10	0	-5.0	2.0	0.222	22.222
0	10	5.0	1.0	0.111	11.111
10	20	15.0	3.0	0.333	33.333
20	30	25.0	2.0	0.222	22.222
			9.000	1.000	100.000

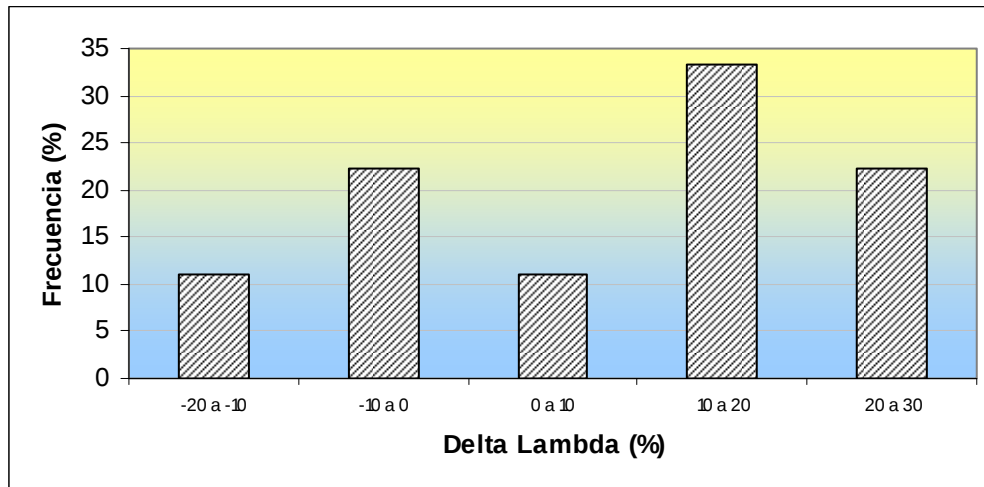


Figura D-19. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 10 días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-7.3. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. T=15 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=15 días. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	]				(%)
-20	0	-10.0	3.0	0.333	33.333
0	20	10.0	1.0	0.111	11.111
20	40	30.0	2.0	0.222	22.222
40	60	50.0	1.0	0.111	11.111
60	80	70.0	0.0	0.000	0.000
80	100	90.0	0.0		11.111
100	120	110.0	1.0	0.111	11.111
120	140	130.0	1.0	0.111	
			9.000	1.000	100.000

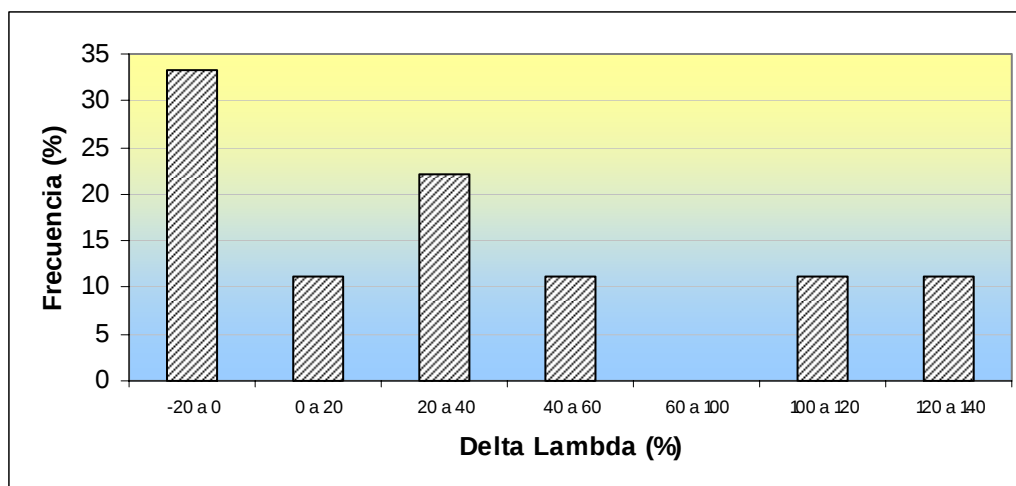


Figura D-20. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=15$ días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-7.4. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. $T=20$ días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=20 dias. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
(	)				
-15.0	0.0	-7.5	3.0	0.333	33.333
0	15	7.5	2.0	0.222	22.222
15	30	22.5	1.0	0.111	11.111
30	45	37.5	2.0	0.222	22.222
45	60	52.5	1.0	0.111	11.111
			9.000	1.000	100.000

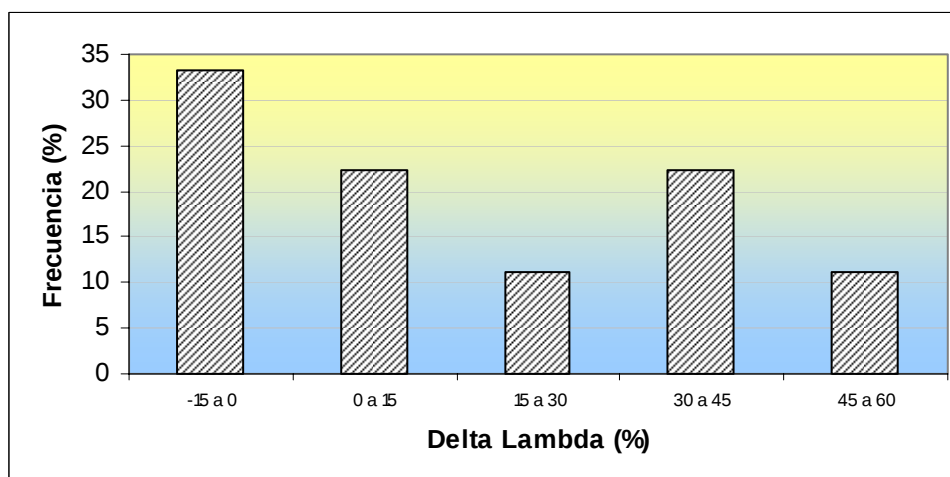


Figura D-21. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para $T=20$ días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-7.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. T=25 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=25 días. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	)				(%)
-60.0	-30.0	-45.0	2.0	0.222	22.222
-30.0	0.0	-15.0	1.0	0.111	11.111
0.0	30.0	15.0	2.0	0.222	22.222
30.0	60.0	45.0	3.0	0.333	33.333
60.0	90.0	75.0	1.0	0.111	11.111
			9.000	1.000	100.000

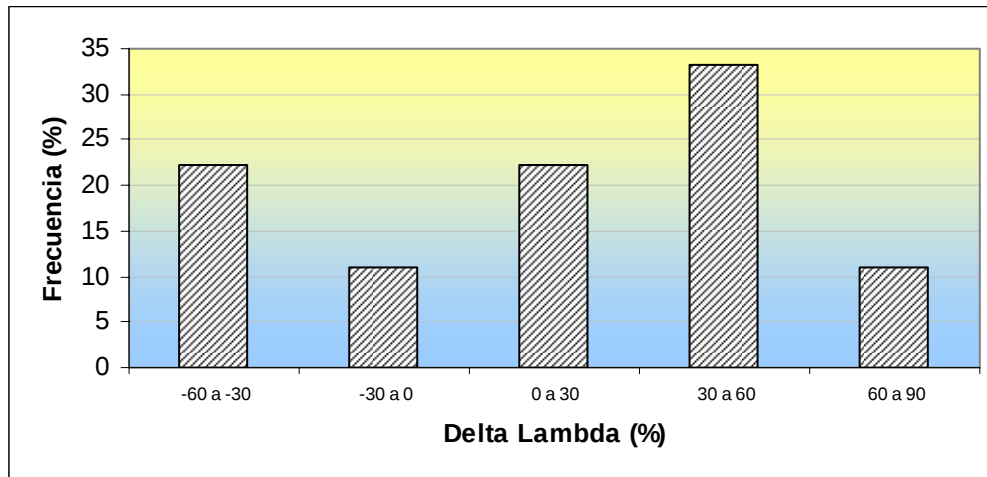


Figura D-22. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 25 días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-7.5. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda=(\lambda^*-\lambda)/\lambda$ por el método de Momentos de las nueve estaciones en la sub-región sub-húmeda de la RH-36. T=30 días.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA UNA DURACION T=30 días. SUB-REGION SUB-HUMEDA					
INTERVALO DE CLASE		MEDIO INTERVALO	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA
(	)				(%)
-60	-30	-45.0	1.0	0.111	11.111
-30	0	-15.0	2.0	0.222	22.222
0	30	15.0	2.0	0.222	22.222
30	60	45.0	3.0	0.333	33.333
60	90	75.0	0.0	0.000	0.000
90	120	105.0	1.0	0.111	11.111
			9.000	1.000	100.000

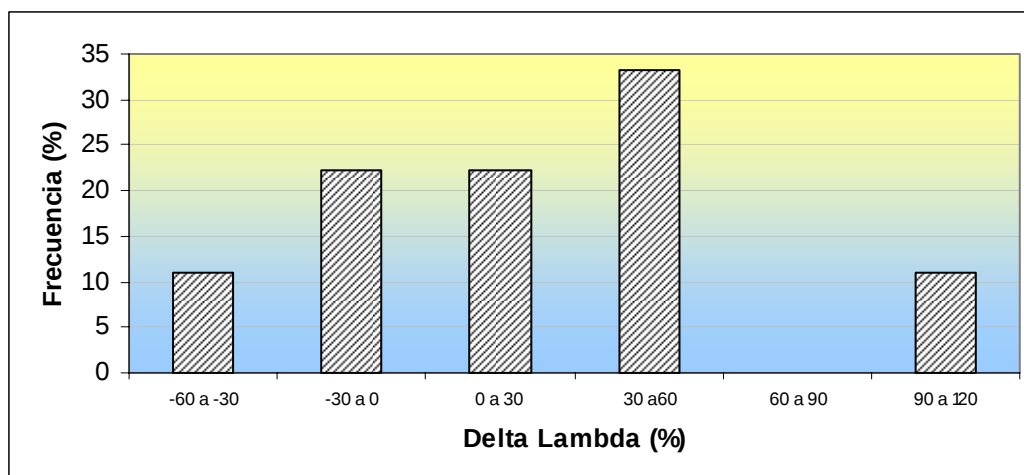


Figura D-23. Histograma de frecuencias de $\Delta\lambda$ para T= 30 días en la sub-región sub-húmeda de la RH-36.

D-8.1. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región árida. Método de Máxima Verosimilitud.

SUB-REGION ARIDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
5007	22.368	46.368	4.282	44.637	43.184	598.562
10108	27.793	43.666	112.729	86.608	44.370	139.903
5022	16.106	11.654	110.581	9.229	112.588	583.781
5026	31.598	84.486	107.586	141.217	212.900	172.318
5027	17.671	41.268	102.429	38.582	201.423	135.079
5036	27.370	13.144	19.562	88.470	4.245	675.101
5051	13.044	39.057	101.171	50.046	214.985	698.270
5001	33.639	71.920	145.329	203.228	416.334	499.601
suma	189.588	351.563	703.669	662.018	1250.029	3502.615
Media por Duracion	37.918	35.156	46.911	33.101	50.001	116.754
chi 5,0.95	11.070	11.070	11.070	11.070	11.070	11.070

D-8.2. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región semi-árida. Método de Máxima Verosimilitud.

SUB-REGION SEMI-ARIDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
10060	37.724	56.466	138.699	98.541	230.899	214.238
10068	27.488	58.833	67.590	106.328	255.187	225.553
10074	42.908	120.616	69.282	189.787	158.555	117.660
10080	46.320	97.992	132.486	329.441	224.296	269.249
10098	32.109	69.491	74.782	178.264	115.014	196.544
10131	13.945	46.244	5.566	131.519	19.236	154.797

32005	36.204	103.193	139.731	240.466	117.681	326.552
32006	43.240	106.051	181.629	203.474	271.472	353.980
32018	27.814	87.084	145.934	213.856	316.267	199.502
32020	39.771	103.773	165.055	277.139	227.222	305.096
32096	38.976	119.929	170.822	326.574	201.433	459.627
10049	31.071	54.824	97.135	161.725	246.431	94.966
suma	417.571	1024.497	1388.711	2457.112	2383.694	2917.765
Media por Duracion	83.514	102.450	92.581	122.856	95.348	97.259
chi 9,0.95	16.920	16.920	16.920	16.920	16.920	16.920

D-8.3. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región sub-húmeda. Método de Máxima Verosimilitud.

SUB-REGION SUB-HUMEDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
10083	15.708	56.847	112.600	168.675	182.481	326.104
10096	15.191	35.698	72.648	56.936	193.308	35.570
10138	20.042	47.428	30.144	122.430	174.532	14.086
10006	13.172	23.553	32.387	31.479	16.251	6.898
10007	22.105	15.709	85.119	131.697	189.330	173.403
10010	23.773	56.408	82.993	15.975	354.606	183.161
10021	31.664	72.509	183.821	109.500	242.675	199.693
10035	20.822	61.516	142.828	180.266	168.791	191.390
10051	30.240	36.940	218.235	88.664	78.531	185.954
suma	192.717	406.607	960.775	905.623	1600.505	1316.261
Media por Duracion	38.543	40.661	64.052	45.281	64.020	43.875
chi 6,0.95	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59

D-8.4. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región árida. Método de Momentos.

SUB-REGION ARIDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MOMENTO					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
12	4.415	0.786	5.520	0.525	1.209	338.246
142	0.327	0.008	5.772	0.261	48.425	2.623
17	0.125	0.940	23.282	22.049	386.670	301.774
19	0.967	4.714	0.053	1.024	5.753	4.602
20	0.344	1.646	28.488	0.230	72.995	29.233
23	5.737	2.540	5.345	5.664	46.167	381.655
31	1.056	0.084	9.257	0.227	63.778	381.756
9	0.353	0.182	6.983	20.047	159.907	191.888
suma	13.325	10.901	84.700	50.025	784.904	1631.777
Media por Duracion	2.665	1.090	5.647	2.501	31.396	54.393
chi 5,0.95	11.070	11.070	11.070	11.070	11.070	11.070

D-8.5. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región semi-árida. Método de Momentos.

SUB-REGION SEMI-ARIDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MOMENTO					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
108	1.990	1.290	4.579	12.748	15.848	1.042
115	0.154	1.088	0.379	0.067	44.911	11.655
121	5.661	24.831	1.431	20.709	3.954	0.310
126	5.808	4.368	13.246	81.808	32.580	52.865
139	0.230	0.532	1.885	4.407	13.572	1.176
151	0.046	1.961	22.971	43.381	4.845	297.316
184	3.322	16.076	19.514	45.569	0.084	46.821
185	2.661	14.329	31.527	16.718	52.032	80.632
187	0.250	4.772	9.256	28.489	68.748	3.696
188	0.380	2.900	14.423	33.447	5.979	16.888
199	1.778	12.264	9.208	73.409	6.923	87.558
97	6.772	12.352	14.411	37.245	37.145	0.075
suma	29.052	96.762	142.830	397.997	286.620	600.036
Media por Duracion	5.810	9.676	9.522	19.900	11.465	20.001
chi 9,0.95	16.920	16.920	16.920	16.920	16.920	16.920

D-8.6. Ajuste del parámetro de forma obtenido con el calculado, sub-región sub-húmeda. Método de Momentos.

SUB-REGION SUB-HUMEDA ESTACION	AJUSTE DEL PARAMETRO DE FORMA, METODO DE MOMENTO					
	AJUSTE DE λ Y λ^* CON LA PRUEBA CHI (JI)					
	T=5	T=10	T=15	T=20	T=25	T=30
129	1.257	7.557	27.513	47.349	50.320	126.315
138	0.187	4.607	5.423	6.716	916.921	3.947
155	2.167	2.885	1.199	3.926	21.858	41.242
60	0.163	1.777	0.259	6.464	31.453	196.494
61	1.468	0.416	20.031	35.441	41.151	36.711
63	2.623	3.594	8.468	7.065	827.304	67.305
72	1.996	4.792	43.702	0.139	39.210	14.032
85	0.050	0.954	15.055	17.296	4.346	4.470
99	9.694	5.995	124.573	27.801	13.753	83.792
suma	19.604	32.577	246.224	152.196	1946.317	574.309
Media por Duracion	3.921	3.258	16.415	7.610	77.853	19.144
chi 6,0.95	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59

APÉNDICE E.

RESULTADOS DEL PROGRAMA HYFRAN PARA DETERMINAR LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE ESCALA (β) Y FORMA (λ), A TRAVÉS DEL MÉTODO DE MOMENTOS, USANDO SIMULTANEAMENTE LA LEY POISSON Y LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL, EN LAS ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36.

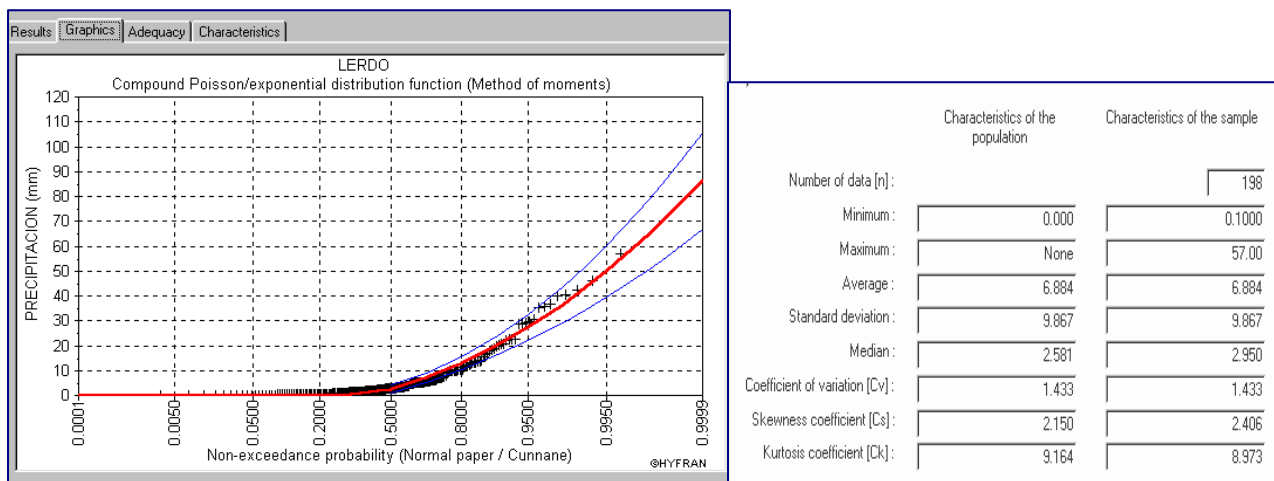


Figura E-1. Distribución de la lluvia diaria para el mes de agosto, de la estación Lerdo, sub-región árida de la RH-36.

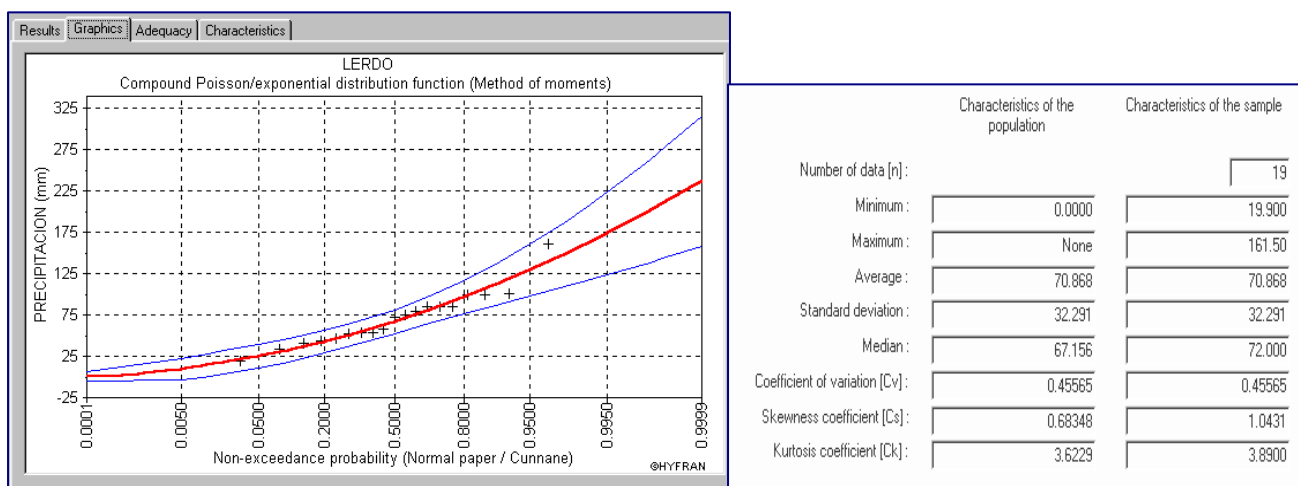


Figura E-2. Distribución de la lluvia acumulada en diez días para el mes de agosto, de la estación Lerdo, sub-región árida de la RH-36.

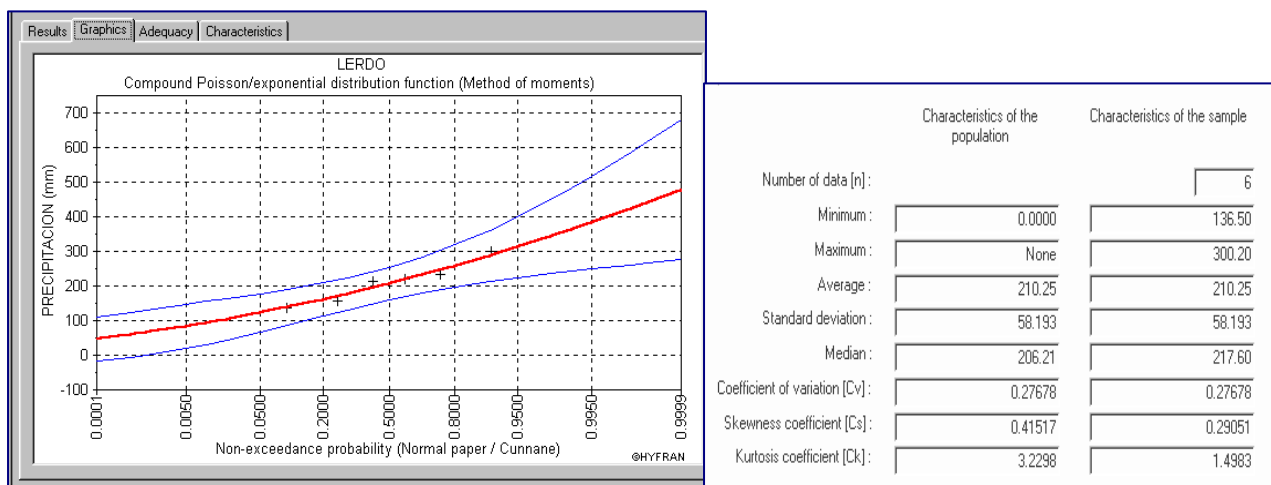


Figura E-3. Distribución de la lluvia acumulada en treinta días para el mes de agosto, de la estación Lerdo, sub-región árida de la RH-36.

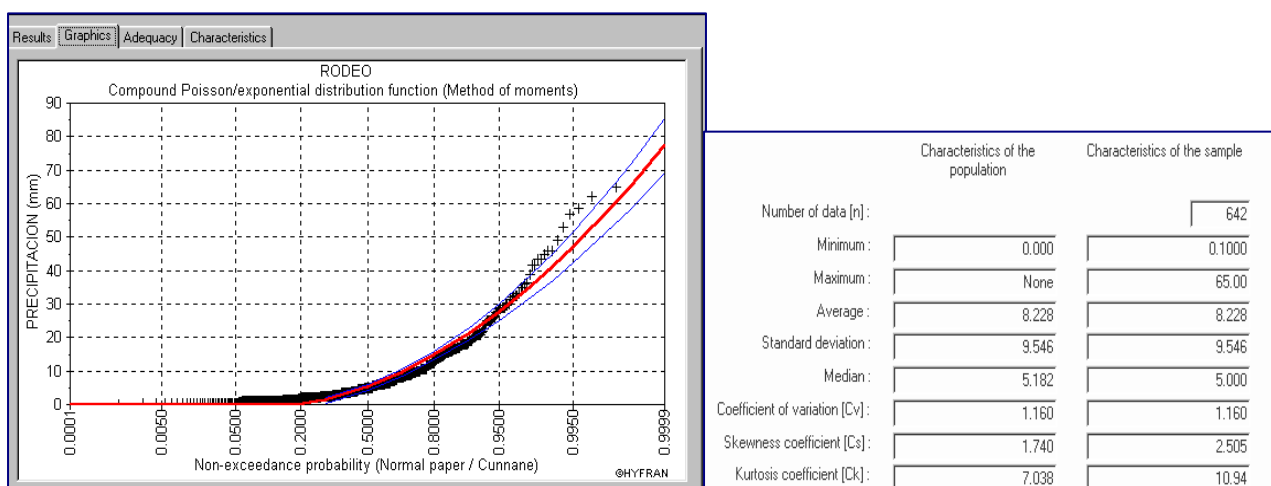


Figura E-4. Distribución de la lluvia diaria para el mes de agosto, de la estación Rodeo, sub-región semi-árida de la RH-36.

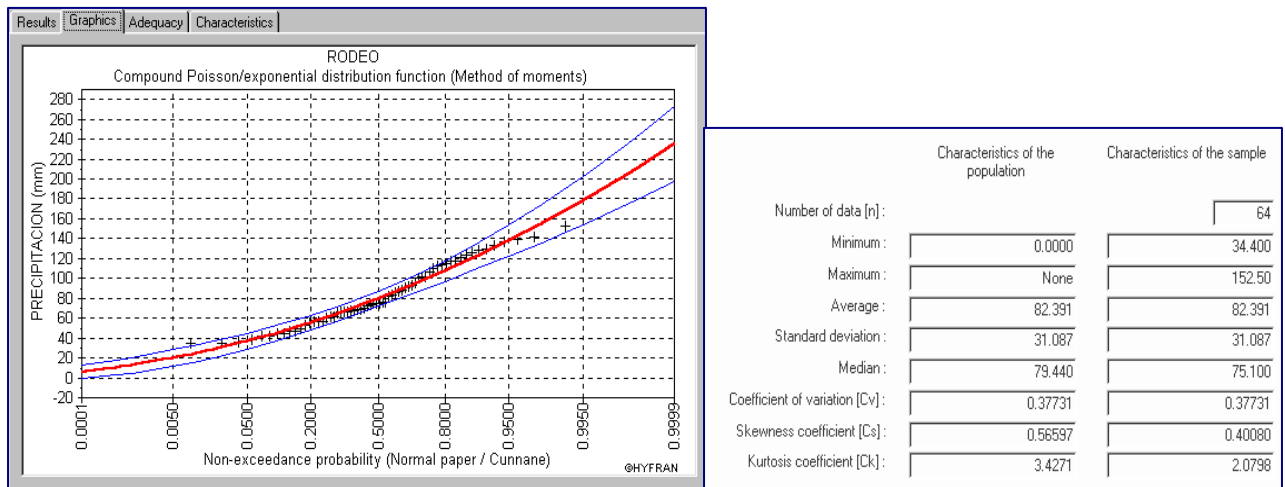


Figura E-5. Distribución de la lluvia acumulada en diez días para el mes de agosto, de la estación Rodeo, sub-región semi-árida de la RH-36.

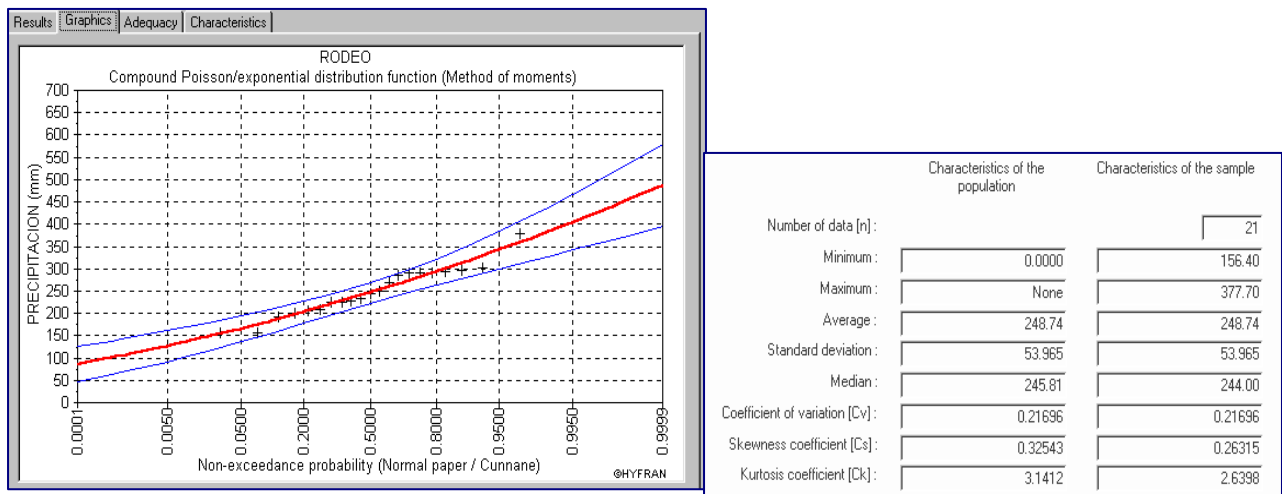


Figura E-6. Distribución de la lluvia acumulada en treinta días para el mes de agosto, de la estación Rodeo, sub-región semi-árida de la RH-36.

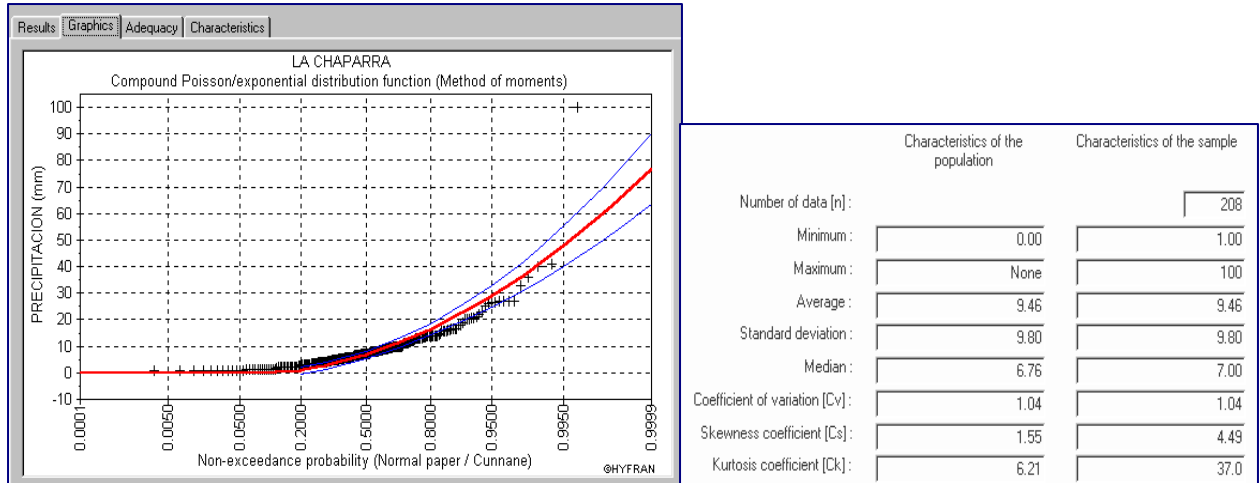


Figura E-7. Distribución de la lluvia diaria para el mes de agosto, de la estación La Chaparra, sub-región sub-húmeda de la RH-36.

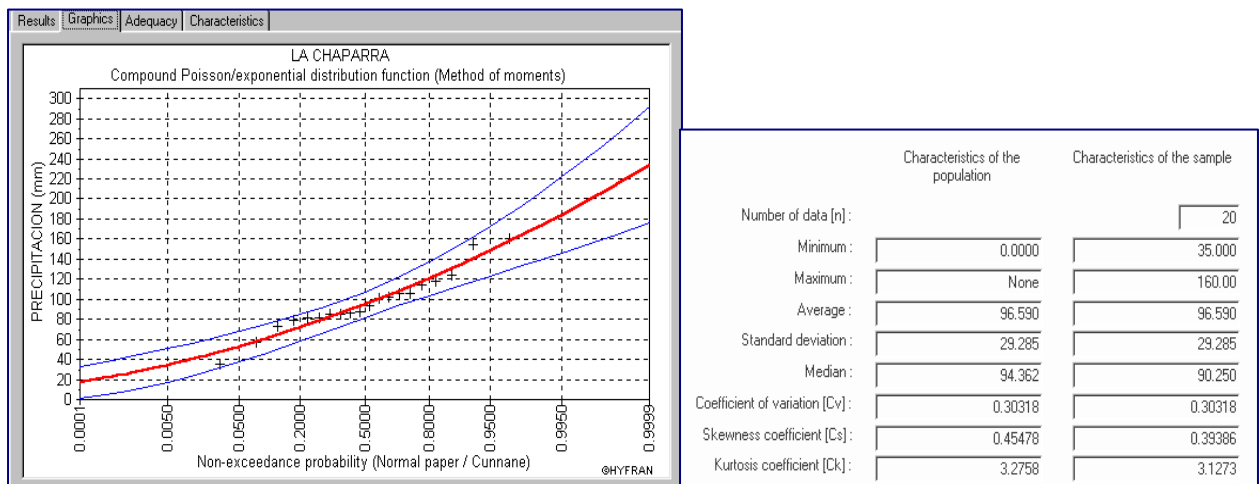


Figura E-8. Distribución de la lluvia acumulada en diez días para el mes de agosto, de la estación La Chaparra, sub-región sub-húmeda de la RH-36.

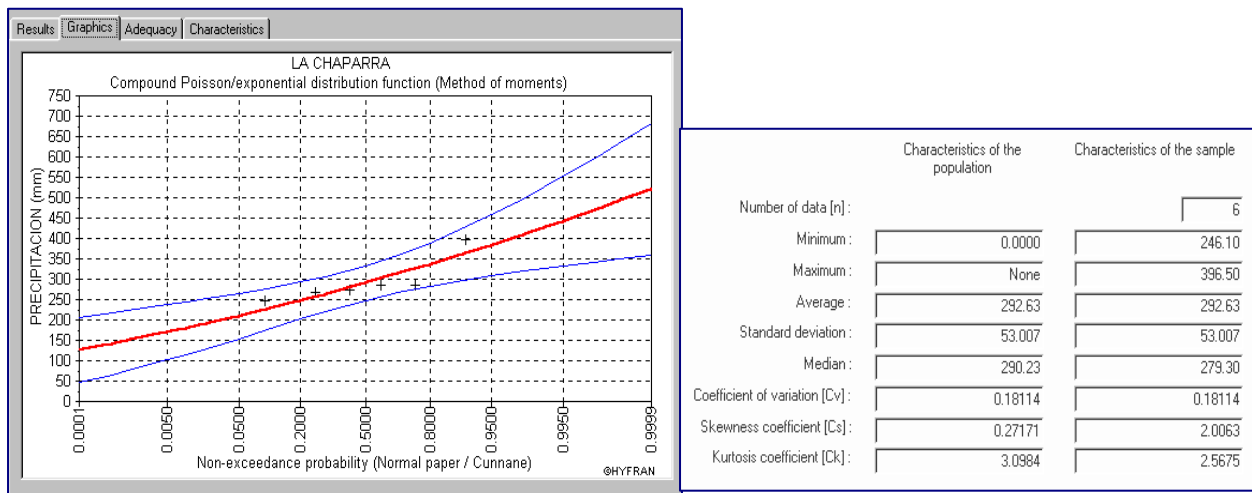


Figura E-9. Distribución de la lluvia acumulada en treinta días para el mes de agosto, de la estación La Chaparra, sub-región sub-húmeda de la RH-36.

APÉNDICE F.

EVOLUCION ESPACIAL DEL NUMERO DE DIAS CON LLUVIAS (λ)
Y EVOLUCION ESPACIAL DE LA ALTURA MEDIA DE LLUVIA POR
EVENTO (β) EN TODA LA RH-36, Y EL RIESGO HIDROLOGICO (β
GUMBEL).

Cuadro F-1.1. Parámetros de escala (β) y forma (λ) diario en los cuatro meses consecutivos por el método de Momentos en la RH-36.

SUB-REGION	ESTACION	JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
		β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
ARIDA	5007	6.109	1.254	10.131	0.727	5.806	1.409	7.900	1.189
	10108	16.447	0.600	5.297	1.200	7.072	0.973	10.477	0.904
	5022	6.073	1.361	5.364	1.461	6.068	1.257	4.865	1.691
	5026	7.877	0.931	5.464	1.129	6.351	1.084	9.671	0.910
	5027	8.560	0.908	6.176	1.214	4.575	1.599	6.206	1.494
	5036	8.954	1.174	5.551	1.345	5.099	1.590	6.645	1.624
	5051	5.060	1.370	3.090	2.267	5.811	1.591	5.236	1.519
	5001	7.547	0.788	6.574	0.804	7.890	0.800	10.141	0.596
SEMI-ARIDA	10060	6.698	1.155	4.454	1.696	5.778	1.402	7.125	1.344
	10068	6.304	1.499	4.769	1.899	5.910	1.658	5.739	1.645
	10074	3.532	2.351	5.134	1.586	6.339	1.510	6.304	1.415
	10098	7.019	1.145	5.248	1.461	5.537	1.486	5.987	1.586
	32018	5.511	1.220	4.921	1.497	5.159	1.403	5.296	1.284
	10049	6.057	1.317	7.876	1.095	5.204	1.713	6.803	1.308
SUB-HUMEDA	10096	3.291	2.303	12.899	1.086	5.069	1.867	4.326	2.040
	10138	9.445	1.370	7.495	1.519	5.808	1.720	9.074	1.228
	10006	4.185	1.929	4.584	1.977	5.113	1.796	5.643	1.703
	10010	3.689	2.215	3.596	2.417	3.373	2.636	4.060	2.151
	10021	5.074	1.596	4.823	1.494	6.566	1.218	6.576	1.217
	10035	4.417	1.337	4.535	1.626	5.160	1.403	4.085	1.688
VALOR MEDIO		6.592	1.391	5.899	1.475	5.684	1.506	6.608	1.427
		PROMEDIO BETA		6.196		PROMEDIO LAMBDA		1.450	

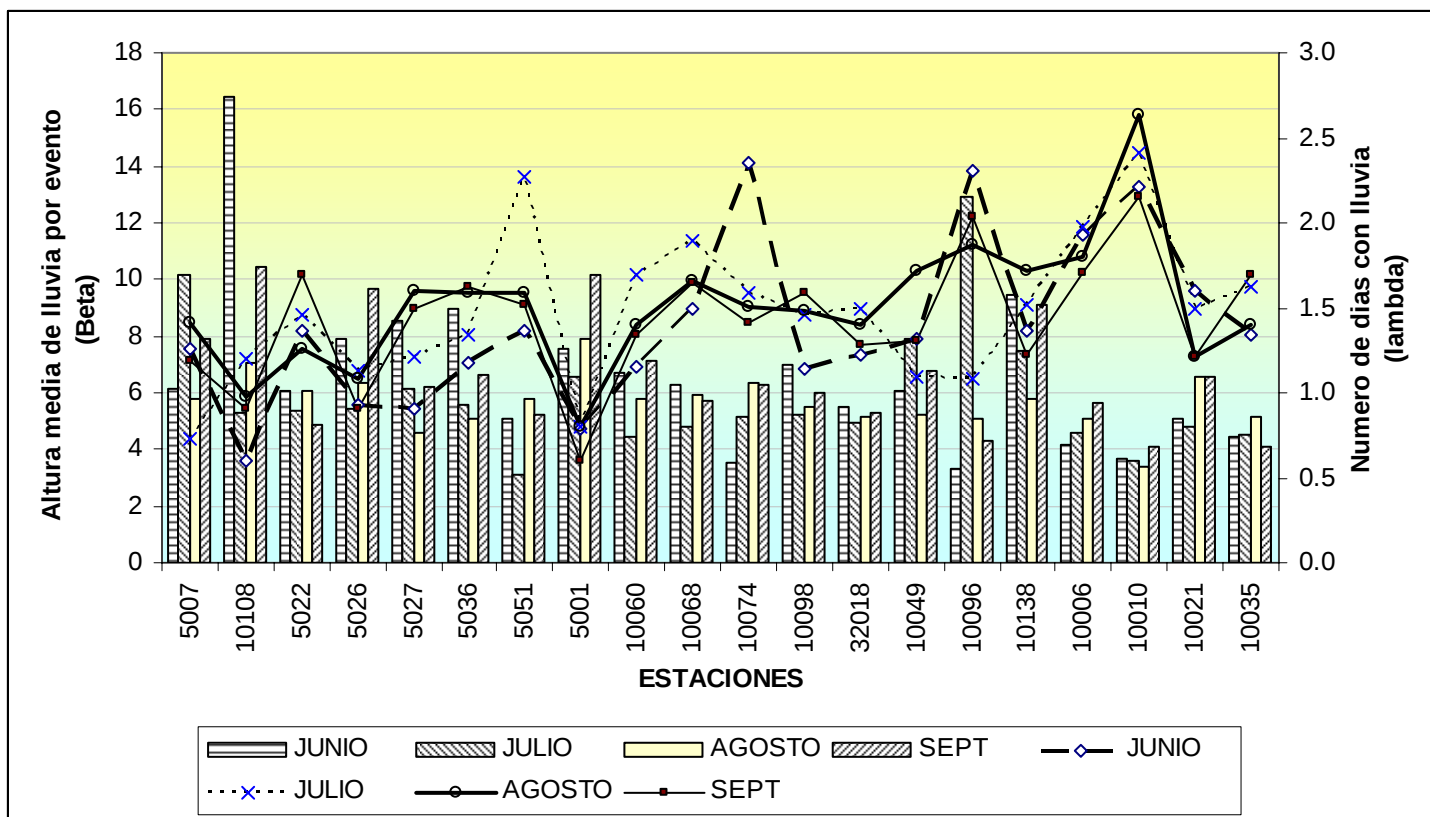


Figura F-1. Distribución de la altura media de la lluvia por evento y el número de días con lluvia en cuatro meses consecutivos dentro de la RH-36.

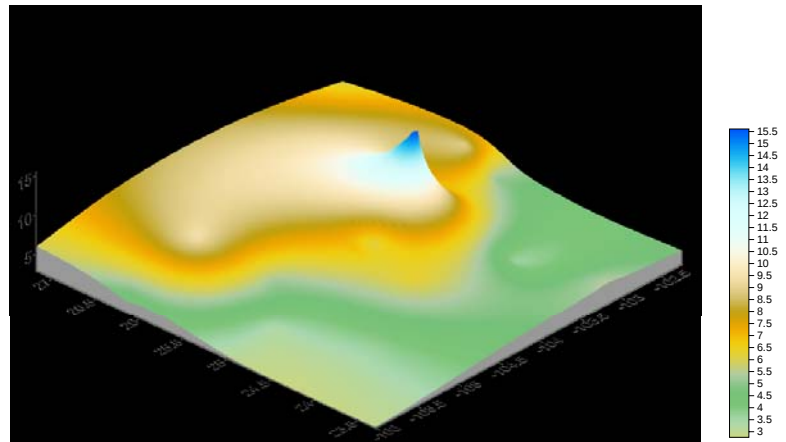
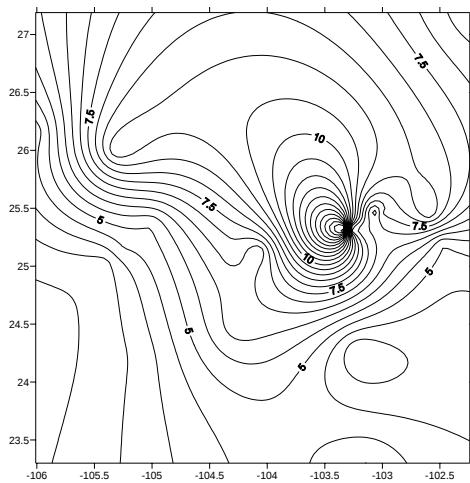


Figura F-2. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de la lluvia por evento dentro de la RH-36, β del 01 de junio.

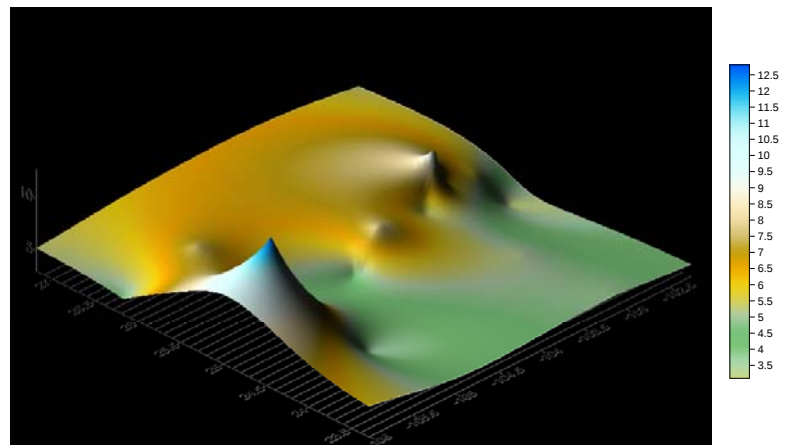
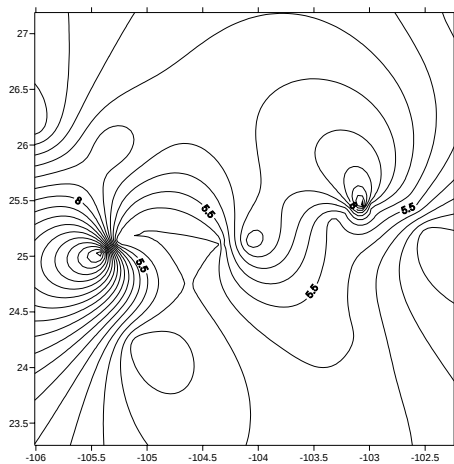
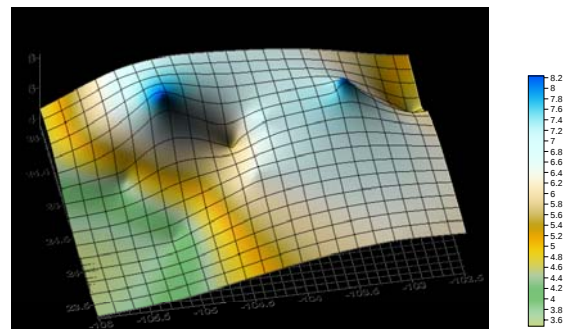
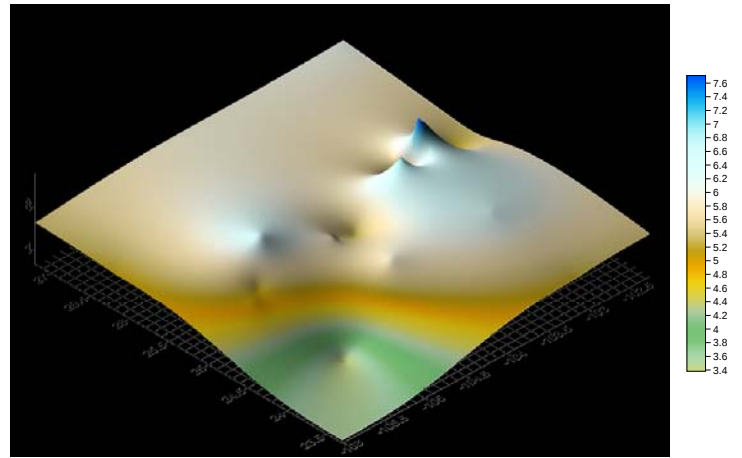


Figura F-3. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de la lluvia por evento dentro de la RH-36, β del 01 de julio.



174

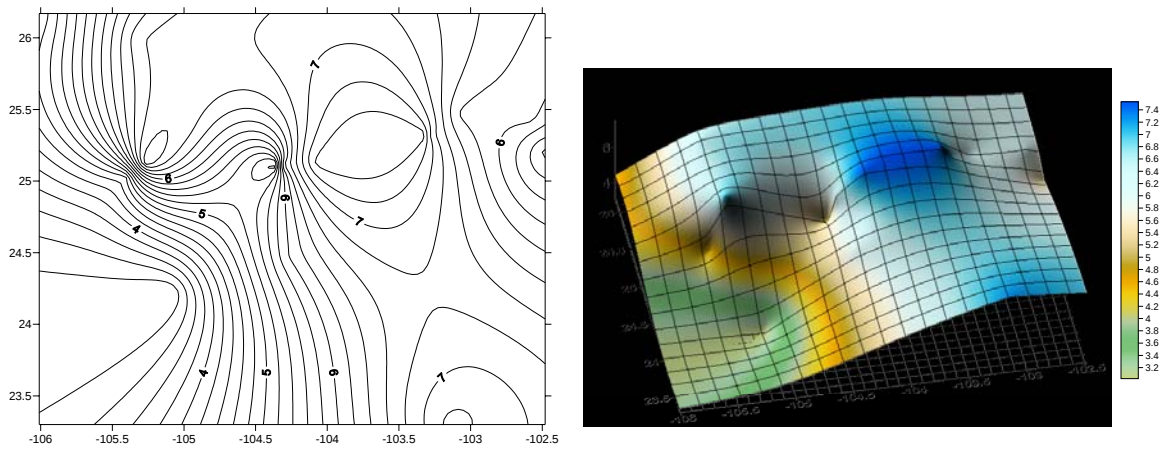


Figura F-6. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de la lluvia por evento dentro de la RH-36, β del 20 de agosto.

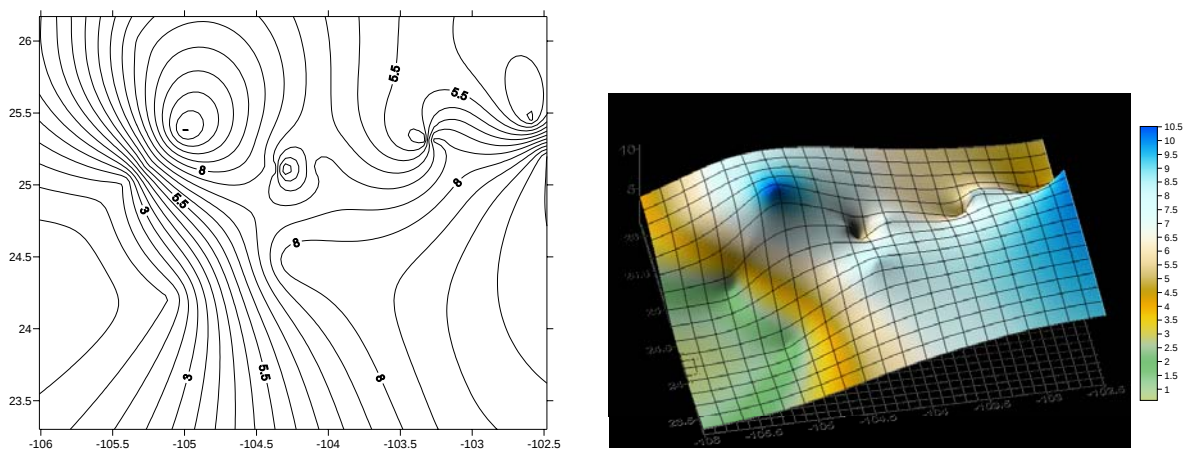


Figura F-7. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de la lluvia por evento dentro de la RH-36, β del 25 de agosto.

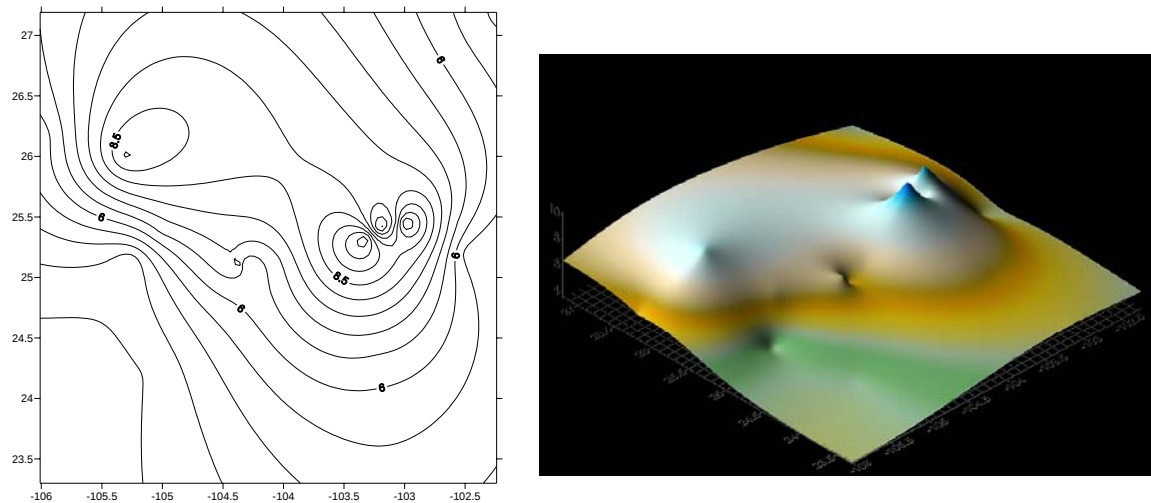


Figura F-8. Cartografía de la evolución espacial de la altura media de la lluvia por evento dentro de la RH-36, β del 01 de septiembre.

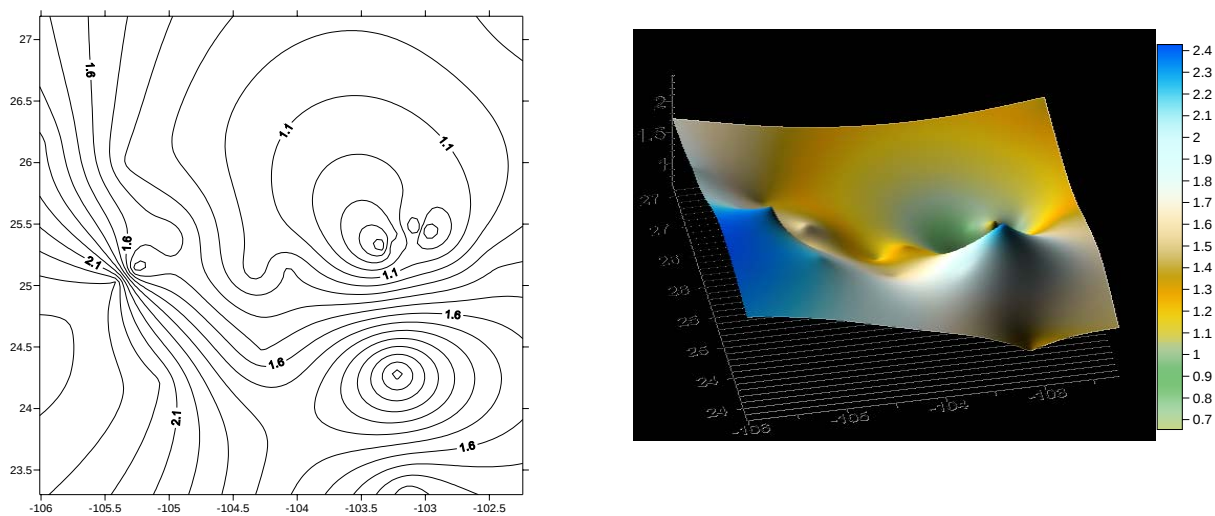


Figura F-9. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 01 de junio.

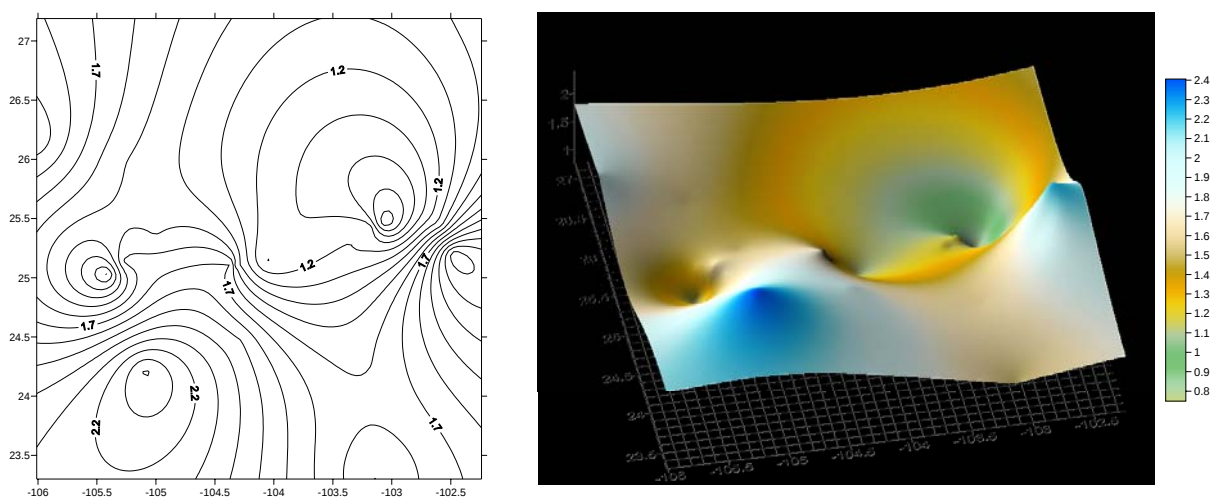


Figura F-10. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 01 de julio.

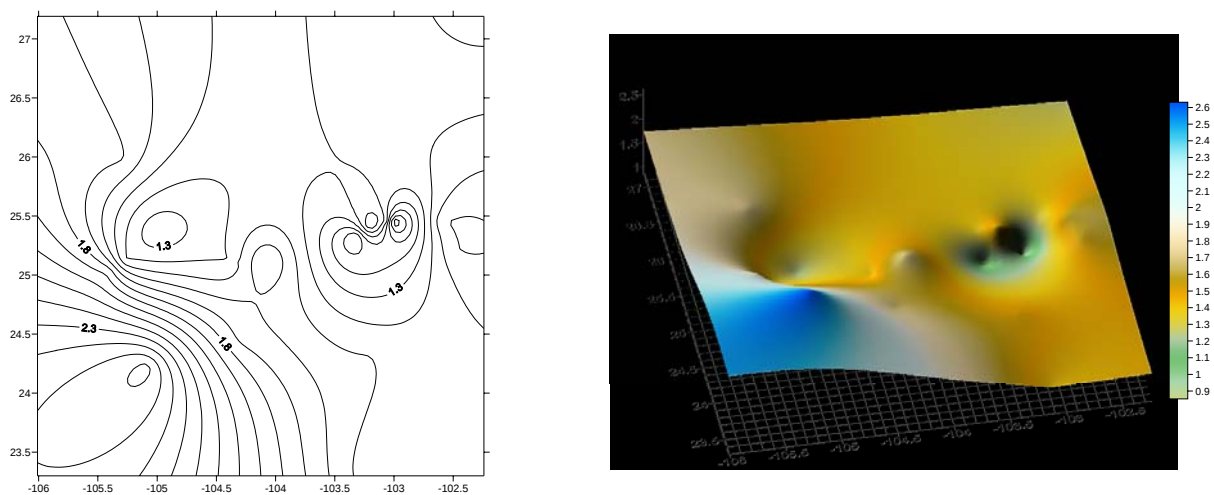


Figura F-11. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 01 de agosto.

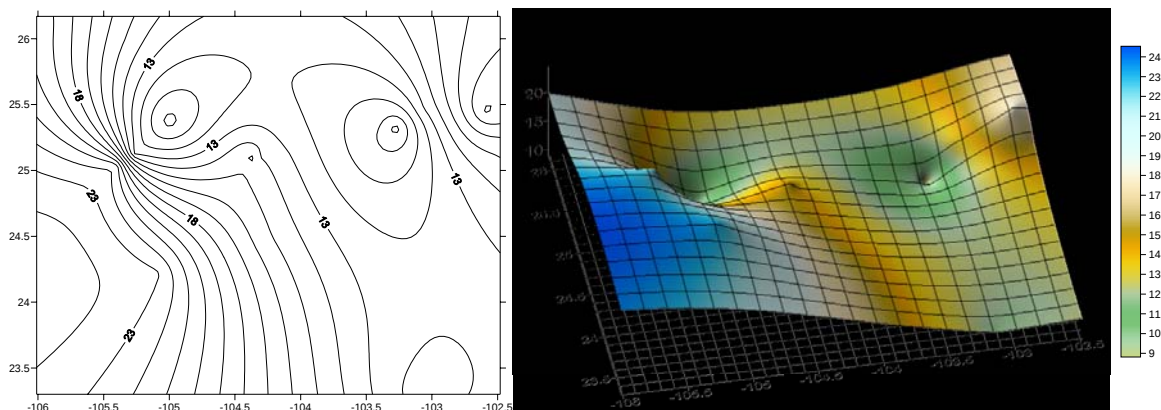


Figura F-12. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 10 de agosto.

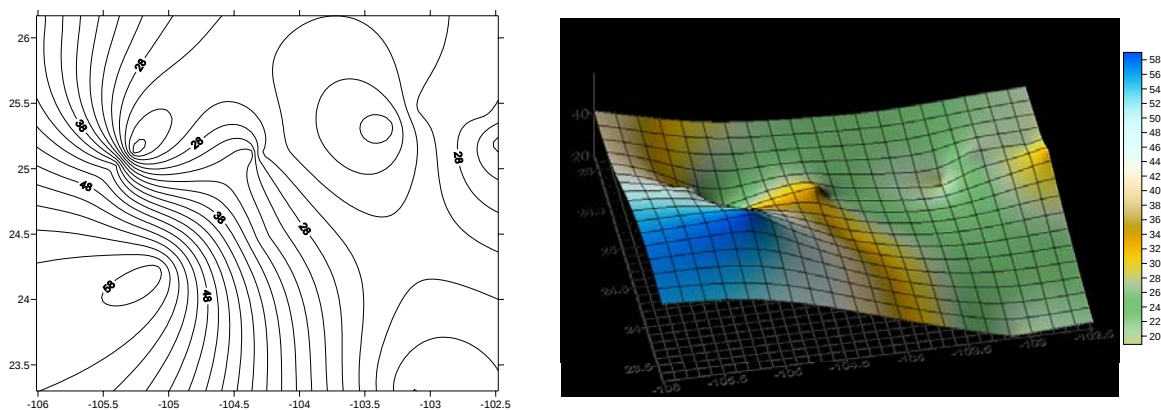


Figura F-13. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 20 de agosto.

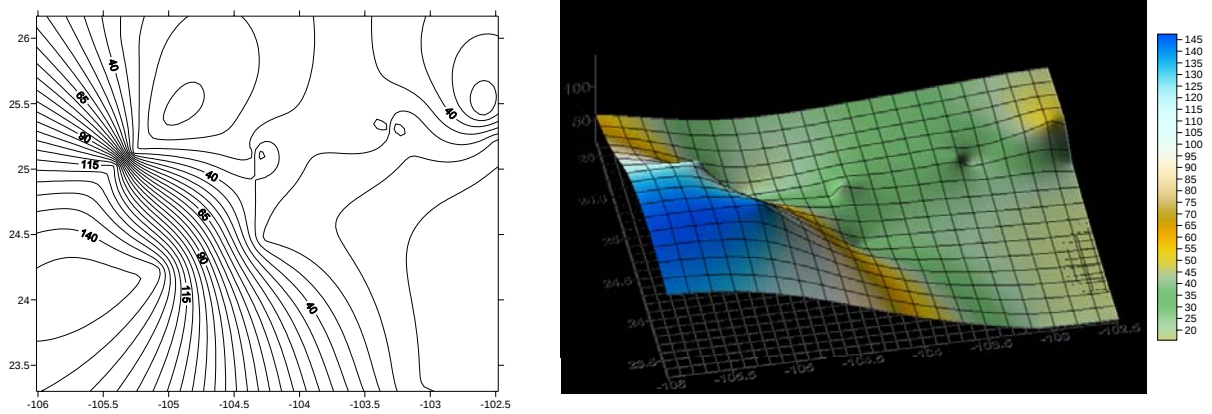


Figura F-13. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 25 de agosto.

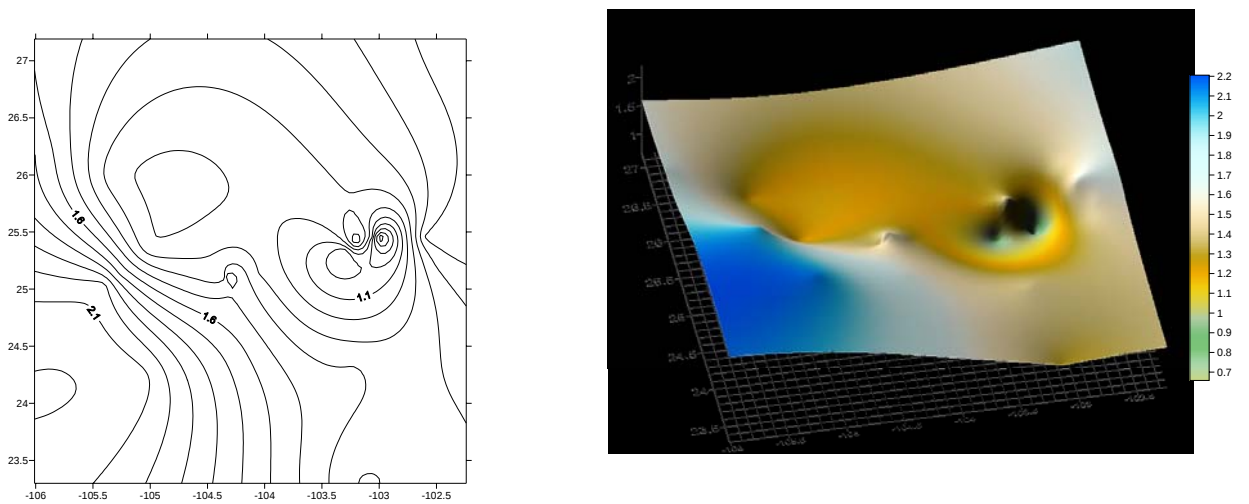


Figura F-14. Cartografía de la evolución espacial del número de días con lluvia dentro de la RH-36, λ del 01 de septiembre.

Cuadro F-2.1. Comparación del ajuste con los parámetros de escala (β) para el análisis de lluvia máxima correspondiente al mes de agosto en toda la RH-36.

POISSON/EXPONENCIAL			DISTRIBUCION GUMBEL					
	MET. AJUSTE: MOMENTOS		MET. AJUSTE NORMAL		MET. AJUSTE PONDERADO		MET. AJUSTE MAX. VEROSIM.	
ESTACION	β	λ	β	x0	β	x0	β	x0
5007	5.806	1.409	7.600	3.796	6.774	4.273	5.536	4.374
10108	7.072	0.973	7.694	2.443	6.398	3.191	4.998	3.259
5022	6.068	1.257	7.503	3.299	6.445	3.910	5.106	3.980
5026	6.351	1.084	7.291	2.676	6.138	3.341	4.861	3.426
5027	4.575	1.599	6.379	3.634	5.779	3.981	4.769	4.071
5036	5.099	1.590	7.091	4.016	6.153	4.557	4.944	4.631
5051	5.811	1.591	8.081	4.578	6.828	5.301	5.582	5.401
5001	7.890	0.800	7.780	1.818	6.051	2.816	4.761	2.867
10060	5.778	1.402	7.545	3.747	6.422	4.395	5.189	4.496
10068	5.910	1.658	8.391	4.955	7.409	5.521	6.104	5.644
10074	6.339	1.510	8.590	4.616	7.482	5.256	6.175	5.373
10080	6.121	1.829	9.127	5.925	8.132	6.500	6.771	6.617
10098	5.537	1.486	7.443	3.932	6.395	4.537	5.187	4.641
10131	4.324	2.334	7.285	5.890	6.870	6.129	5.948	6.232
32005	5.976	1.437	7.900	4.029	6.713	4.714	5.436	4.823
32006	5.148	1.317	6.514	3.019	5.637	3.525	4.517	3.609
32018	5.159	1.403	6.738	3.349	5.964	3.797	4.879	3.885
32020	6.150	1.187	7.388	3.036	6.392	3.611	5.177	3.708
32096	5.630	1.217	6.848	2.897	5.683	3.569	3.626	4.461
10049	5.204	1.713	7.511	4.580	6.667	5.068	5.620	5.180
10083	4.886	2.024	7.666	5.467	7.150	5.765	6.083	5.862
10096	5.069	1.867	7.637	5.055	6.206	5.881	5.328	5.985
10138	5.808	1.720	8.398	5.139	7.426	5.700	6.148	5.813
10006	5.113	1.796	7.557	4.823	6.622	5.363	5.611	5.467
10007	4.084	2.340	6.889	5.580	6.232	5.959	5.374	6.052
10010	3.373	2.636	6.039	5.406	5.570	5.677	4.854	5.759
10021	6.566	1.218	7.989	3.384	6.745	4.102	5.354	4.196
10035	5.160	1.403	6.739	3.348	5.594	4.009	4.582	4.107
10051	3.579	2.962	6.791	6.679	6.521	6.835	5.821	6.909

Cuadro F-2.2. Selección del mejor ajuste del parámetro de escala y determinación del riesgo de lluvia extrema (β_{Gumbel}) y sequía (λ_{Gumbel}) correspondiente al mes de agosto en toda la RH-36.

POISSON/EXPONENCIAL			RIESGO DE INUNDACION		RIESGO DE SEQUIA
	MET. AJUSTE: MOMENTOS		MET. AJUSTE GUMBEL		
ESTACION	β	λ	β	x0	λ_{31}
5007	5.806	1.409	5.536	4.374	43.690
10108	7.072	0.973	7.694	2.443	30.174
5022	6.068	1.257	6.445	3.910	38.979
5026	6.351	1.084	6.138	3.341	33.604
5027	4.575	1.599	4.769	4.071	49.582
5036	5.099	1.590	4.944	4.631	49.297

5051	5.811	1.591	5.582	5.401	49.310
5001	7.890	0.800	7.780	1.818	24.786
10060	5.778	1.402	5.189	4.496	43.467
10068	5.910	1.658	6.104	5.644	51.392
10074	6.339	1.510	6.175	5.373	46.825
10080	6.121	1.829	6.771	6.617	56.688
10098	5.537	1.486	5.187	4.641	46.067
10131	4.324	2.334	5.948	6.232	72.366
32005	5.976	1.437	5.436	4.823	44.556
32006	5.148	1.317	5.637	3.525	40.823
32018	5.159	1.403	4.879	3.885	43.499
32020	6.150	1.187	6.392	3.611	36.798
32096	5.630	1.217	5.683	3.569	37.714
10049	5.204	1.713	5.620	5.180	53.108
10083	4.886	2.024	6.083	5.862	62.755
10096	5.069	1.867	5.328	5.985	57.867
10138	5.808	1.720	6.148	5.813	53.306
10006	5.113	1.796	5.611	5.467	55.683
10007	4.084	2.340	5.374	6.052	72.530
10010	3.373	2.636	4.854	5.759	81.723
10021	6.566	1.218	6.745	4.102	37.747
10035	5.160	1.403	5.594	4.009	43.482
10051	3.579	2.962	5.821	6.909	91.808

Nota: λ_{31} se determinó con el método directo $\lambda_{31} = \lambda_1 \cdot \text{No días}$

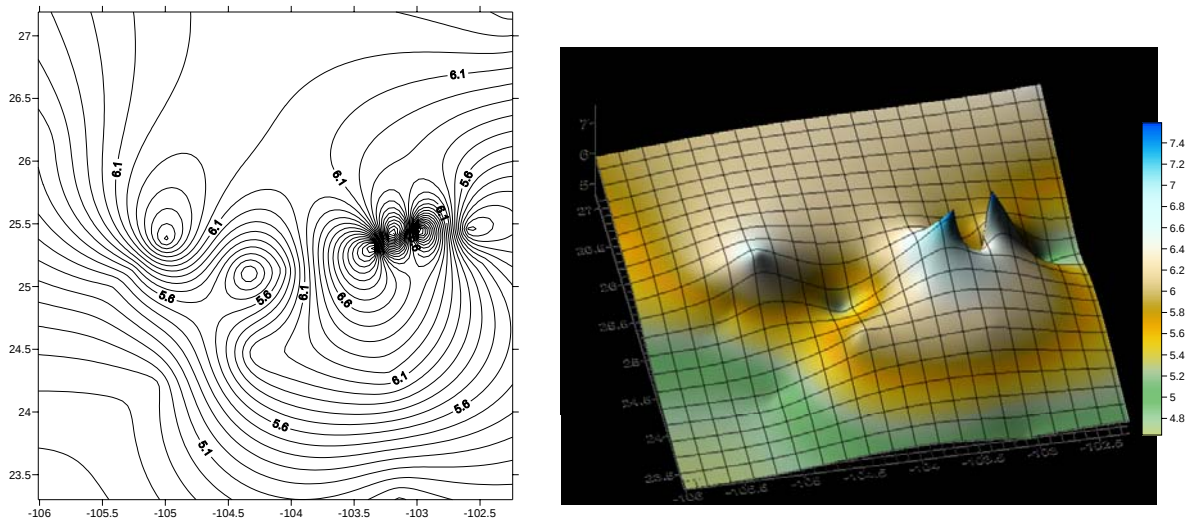


Figura F-15. Media inter-anual de la altura media de lluvia por evento, riesgo de lluvia extrema para el mes de agosto (β_{Gumbel}) dentro de la RH-36.

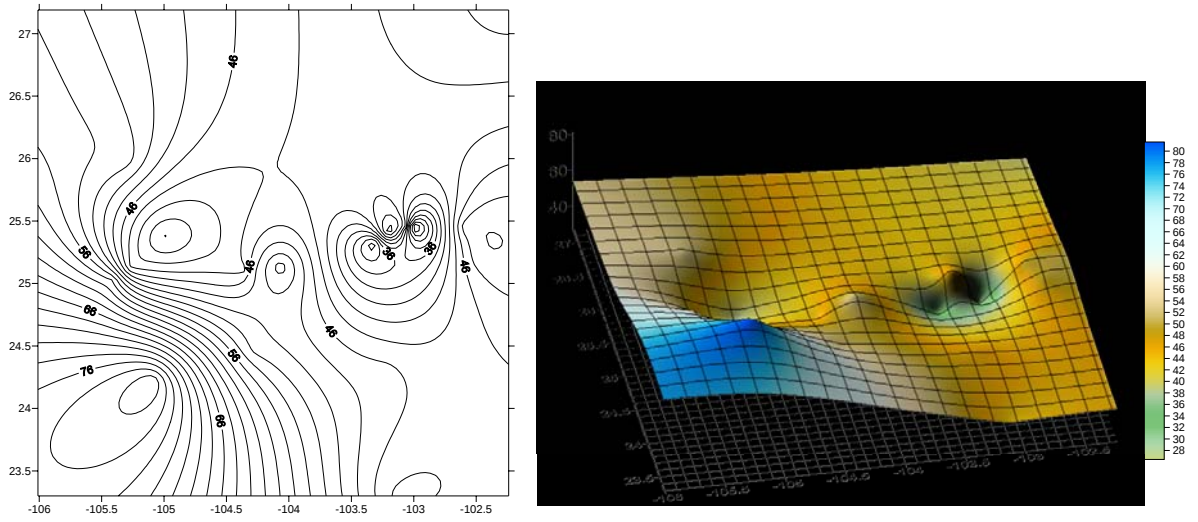


Figura F-15. Media inter-anual del número de eventos por día, riesgo de sequía para el mes de agosto (λ_{31}) dentro de la RH-36.

APÉNDICE G.

EL PARAMETRO (λ) DE LA LEY FUGA Y SU PAPEL COMO ÍNDICE DE SEQUÍA.

G. 1.1. Clasificación de SPI por (Hayes, 2000) y (U.S. Drought Monitor, 1999).

Concepto cualitativo	Valor del SPI
Extremadamente húmedo	2 o más
Muy húmedo	1.5 a 1.99
Moderadamente húmedo	1 a 1.49
Normal	0.01 a 0.99
Normal seca	0 a -0.5
Sequía incipiente	-0.51 a -0.7
Sequía moderada	-0.71 a -1.2
Sequía severa	-1.21 a -1.5
Sequía extrema	-1.51 a -1.9
Sequía excepcional	<-1.91

G. 1.2. Comparación de los valores de SPI por el método tradicional y el método modificado.

ESTACIONES REPRESENTATIVAS		SALIDA DE HYFRAN	CALC. DIRECTO	SALIDA DE PROG. SPI	TIPO DE	SPI MODIFICADO	TIPO DE
SUB-REGION	ESTACION	λ_{diario}	λ_{*31}	SPI-1[1980/08]	SEQUIA	$SPI*-1[\lambda_{*31}][1980/08]$	SEQUIA
ARIDA	5036	1.59	49.29	0.62	Normal	0.61	Normal
	5026	1.084	33.60	0.94	Normal	0.08	Normal
	10108	0.973	30.17	0.75	Normal	-0.11	Normal seca
	5024	1.09081	33.82	0.13	Normal	0.09	Normal
SEMI-ARIDA	10049	1.713	53.11	2.23	Extremadamente húmedo	0.69	Normal
	10098	1.486	46.07	-0.3	Normal seca	0.53	Normal
	10074	1.510	46.82	1.08	Normal	0.55	Normal
SUB-HUMEDA	10021	1.218	37.75	0.75	Normal	0.26	Normal
	10078	1.36464	42.30	0.25	Normal	0.42	Normal

