



Artículo

Evaluación probabilística de las características de la lluvia para el periodo de 1970 a 2024 en Chimaltenango, Guatemala

Probabilistic evaluation of rainfall characteristics for the period 1970 – 2024 in Chimaltenango, Guatemala

USAC

Rudy Machorro Sagastume ⁽¹⁾

CUNOR

⁽¹⁾ Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales, -ASGA-, Guatemala

Carrera de Geología

rudy.machorro@yahoo.com<https://orcid.org/0009-0001-5822-1020>

Recepción: 11/05/2025

Aceptado: 15/08/2025

Publicado: 24/11/2025

Palabras clave:

Chimaltenango, Excel, Gumbel, log-Pearson III, lluvia

Keywords:

Chimaltenango, rainfall, Gumbel, log-Pearson III, Excel

RESUMEN

El comportamiento estacional y la variabilidad de la lluvia son estratégicos para la planificación y manejo de los recursos hídricos. Se realizó un análisis exploratorio y una evaluación probabilística de la lluvia mediante análisis de frecuencias para San Martín Jilotepeque (SMJ) y Santa Cruz Balanyá (SCB), en Chimaltenango, obteniéndose los siguientes resultados. Existen diferencias significativas en la intensidad de lluvia anual y mensual entre ambas estaciones. En SMJ, la lluvia anual aumentó aproximadamente un 30 % entre 1970 (1 431 mm) y 1998, año del huracán Mitch (2 107 mm en SMJ; 1 228 mm en SCB). A partir de ese evento, se observa un descenso sostenido hasta 2021 (911 mm en SMJ; 688 mm en SCB), equivalente a una disminución de alrededor del 57 % y 56 %, respectivamente. El análisis mensual muestra que SMJ presenta mayores promedios de lluvia que SCB durante todo el año, con picos en junio y septiembre. Además, SMJ evidencia una variabilidad mensual y anual más alta que SCB. Los modelos probabilísticos de lluvia anual y mensual, ajustados con las distribuciones de Weibull, log-Pearson III y Gumbel, indican alteraciones significativas asociadas a cambios climáticos. Para SMJ, la proyección de lluvia anual máxima a 100 años según la distribución Gumbel (2 216 mm) muestra mayor coherencia con el registro del huracán Mitch (2 107 mm) que la estimación log-Pearson III (1 820 mm). En SCB, la extrapolación mensual a 100 años arroja resultados similares entre las distribuciones Gumbel y log-Pearson III (449 mm y 445 mm, respectivamente). Se recomienda considerar la tendencia negativa en la intensidad de lluvia anual registrada en los últimos 20 años en SMJ y SCB, pues refleja una menor disponibilidad de agua y una reducción en la recarga de los acuíferos de Chimaltenango

Abstract

Seasonal rainfall behavior and variability play an extremely strategic role in water resource planning and management. An exploratory analysis and probabilistic rainfall assessment using frequency analysis were conducted for San Martín Jilotepeque (SMJ) and Santa Cruz Balanyá (SCB) in Chimaltenango, yielding the following results. Significant differences in annual and monthly rainfall intensity were identified between SMJ and SCB. The annual rainfall assessment for SMJ records an approximate increase in rainfall of +30% between 1970 (1,431 mm) and Hurricane Mitch in 1998 (2,107 mm in SMJ; 1,228 mm in SCB). Since Hurricane Mitch, there has been a notable decrease in annual rainfall intensity until 2021 (911 mm in SMJ; 688 mm in SCB), with an approximate decrease in rainfall of -57 % in SMJ and -56 % in SCB. Exploratory analysis of monthly rainfall indicates that for all months, the average monthly rainfall in SMJ is higher than in SCB, and that June and September are the months with the highest precipitation. Much higher variability is clearly identified for monthly and annual rainfall recorded in SMJ compared to SCB. Probabilistic models of annual and monthly rainfall with the Weibull, log-Pearson III, and Gumbel distributions constructed using an Excel spreadsheet provide the following results. The probabilistic annual rainfall models for SMJ and SCB suggest significant changes due to climate alterations. The 100-year maximum annual rainfall projection for SMJ with the Gumbel distribution (2216 mm) is more consistent with Hurricane Mitch (2107 mm) than with the log-Pearson III distribution (1820 mm). In terms of monthly rainfall, the 100-year extrapolation in SCB shows a notable similarity in the rainfall values obtained with the Gumbel and log-Pearson III distributions: 449 mm and 445 mm, respectively. It is recommended that the negative trend in annual rainfall intensity identified over the last 20 years in SMJ and SCB be considered for the planning and management of Chimaltenango's water resources. This negative trend indicates lower water availability for different uses, as well as lower recharge of Chimaltenango's aquifers.

Citar este artículo:

Machorro Sagastume, R. (2025). Evaluación probabilística de las características de la lluvia para el periodo de 1970 a 2024 en Chimaltenango, Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra*, 12 (01), 11-26.

1. Introducción

“La diferencia entre la realidad y la verdad es que la realidad siempre está contigo, pero sin importar lo mucho que te esfuerces, la verdad siempre está en el horizonte” (Huntington-Klein, 2022).

El ámbito de lluvias en Guatemala normalmente se caracteriza por la alternancia de un periodo seco y un período húmedo durante el año. La mayor cantidad de lluvia se concentra en el invierno con el verano siendo seco y caliente.

Esta característica estacional de la lluvia juega un rol fundamental en la planificación y manejo de recursos hídricos. La estimación de lluvia anual y/o mensual es un componente crítico para el manejo de la escorrentía, el manejo ambiental de las inundaciones y sequías, y una amplia gama de proyectos agrícolas.

La planificación y el diseño de un proyecto de recursos hídricos debe tomar en cuenta también los eventos futuros cuyo tiempo de ocurrencia o magnitud son muy difíciles de predecir. Por lo tanto, es necesario un análisis probabilístico para estimar un determinado caudal, o cierta cantidad de lluvia, que podría ser igualado o excedido.

El nivel de probabilidad para el diseño, o el riesgo que se considera aceptable, depende de las condiciones económicas y políticas (Linsley y otros, 1975).

Diseñar con el 10 % de probabilidad o para un caudal con 10 años de período de recurrencia significa aceptar un riesgo calculado.

Diseñar contra el peor evento posible es sumamente costoso y se justifica solamente cuando las consecuencias de la falla pueden ser especialmente graves.

2. Marco teórico del problema

“No existe nada más práctico que una buena teoría” (Lewin, 1952).

La teoría de probabilidad puede utilizarse en los modelos de recursos hídricos mediante la aplicación de una probabilidad de excedencia, P_e , a eventos hidrológicos. La probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un evento dado sea excedido en cualquier año. El número promedio de años entre excedencias se denomina período de retorno, T , el cual se relaciona con la probabilidad de excedencia, P_e , mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{P_e} \quad (1)$$

Tal y como indica la ecuación, el período de retorno y al probabilidad son recíprocos. El periodo de retorno también se denomina *Intervalo Promedio de Recurrencia (IPR)* y constituye un criterio para seleccionar eventos de diseño en la ingeniería de recursos hídricos. El periodo de retorno representa el número de años que transcurren en promedio para que un evento sea *igualado o excedido*. La magnitud de un evento raro es inversamente proporcional a su probabilidad de ocurrencia: los eventos de gran magnitud se manifiestan con menor frecuencia que los eventos moderados.

Es de suma importancia *definir la escala espacial y temporal de análisis*. Por ejemplo, si el objetivo consiste en evaluar el comportamiento de inundaciones en una microcuenca urbana que tiene un tiempo de concentración muy corto, el uso de datos de lluvia mensual no tendría ningún sentido. Lo contrario también es acertado: resulta inútil utilizar datos de lluvia en intervalos de tiempo

de un minuto para evaluar la cuenca del Río Motagua.

¿Inundación de los 100 años?

Un evento hidrológico máximo suele describirse mediante el período de retorno y no con la probabilidad de excedencia. Por ejemplo, una planicie de inundación se delimita para la “crecida de los 100 años” la cual tiene una probabilidad de excedencia de 1% para cualquier año dado. La interpretación del período de retorno origina el concepto erróneo de que la crecida de los 100 años se manifiesta cada 100 años cuando en realidad el evento máximo de los 100 años puede ocurrir en cualquier año dado, ya sea antes del siguiente siglo o incluso el año entrante. Por lo tanto, es recomendable utilizar las probabilidades anuales de excedencia en vez del periodo de retorno.

El intervalo de recurrencia no implica que la crecida máxima con un periodo de retorno T_r ocurrirá precisamente con esa frecuencia. Por ejemplo, podría esperarse que la crecida de los 5 años sea igualada o excedida 20 veces en un periodo de 100 años. Sin embargo, la recurrencia podría manifestarse en años sucesivos o podría presentarse un espacio de tiempo considerablemente mayor entre recurrencias de 5 años.

Selección de datos de lluvia

“Razonar sin datos no es más que ilusión” (Holmes, 1913).

“Un modelo no puede ser mejor que la calidad de los datos disponibles” (Haan, 1977).

Los datos hidrológicos generados para un modelo probabilístico deben de ser *significativos, adecuados y precisos*. Los datos *significativos* están estrechamente relacionados con el problema. Para un análisis de crecidas los datos deben consistir en caudales picos observados. Los datos *adecuados* se refieren a la longitud del registro. Si la muestra es muy pequeña las probabilidades obtenidas no son confiables. Para un análisis de frecuencias no se recomienda usar series de datos con un registro menor de 20 años.

Los datos *precisos* están relacionados con la *homogeneidad*. La estación de monitoreo hidrológico debe operar adecuadamente generando datos que sean confiables para el análisis de frecuencias.

Los datos dejan de ser homogéneos cuando *la cuenca hidrológica ha experimentado cambios significativos en el uso de la tierra, urbanizaciones, canales para riego, presas* lo cual introduce inconsistencias en la serie de datos. En este caso los datos deben ajustarse previamente a elaborar el modelo.

Para la construcción de los modelos probabilísticos de lluvia de Chimaltenango (Figura 1) se ha utilizado las bases de datos mensual y anual que tiene el INSIVUMEH para las estaciones de Santa Cruz Balanyá (1972 – 2024) y San Martín Jilotepeque (1970 – 2023).

Figura 1.

Mapa de Chimaltenango que muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas en Santa Cruz Balanyá (SCB) y San Martín Jilotepeque (SMJ).

**3. Metodología**

“El desarrollo y conservación de recursos hídricos no puede llevarse a cabo sin el uso extensivo de los métodos provenientes de la de teoría de probabilidad” (Yevjevich, 1972).

La primera fase de la investigación incluyó el análisis estadístico descriptivo de lluvia mensual y anual para San Martín Jilotepeque (SMJ) y Santa Cruz Balanyá (SCB) que se incluye en el Anexo I.

La metodología específica para elaborar los modelos probabilísticos de lluvia incluye la implementación de un análisis de frecuencias. El análisis de frecuencias es un método estadístico de predicción que consiste en estudiar eventos pasados que son característicos de un proceso hidrológico particular con fines de determinar las probabilidades de ocurrencia de esos eventos en el futuro (Meylan y otros, 2008).

El enfoque inicial simplificado para elaborar el modelo de frecuencias consistió en construir histogramas para estudiar la forma de la distribución de la muestra y evaluar el grado de simetría ya sea positiva (sesgada a la derecha) o negativa (sesgada a la izquierda).

El histograma aporta una primera aproximación de la frecuencia con que ocurre un evento particular. El modelo inicial de frecuencias también puede aproximarse con diagramas de caja para la lluvia mensual que ilustran los rangos de lluvia para cada mes, así como el valor medio mensual, primero y tercer cuartil, la media (segundo cuartil), valores atípicos, y valores extremos de lluvia.

El análisis de frecuencias detallado consiste en los siguientes pasos (Viessman y Lewis, 2003):

- Evaluar la homogeneidad de los datos tratando de identificar si han existido cambios en la cuenca que ocasionarían la presencia de dos o más poblaciones de datos.
- Establecer rangos para los conjuntos de datos en magnitud descendente y determinar el intervalo de recurrencia.
- Utilizar la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los datos y graficar la función de distribución de los datos.
- Identificar si existen valores atípicos que tengan un intervalo de recurrencia mayor al periodo de registro. Eliminar los atípicos y recalcular la curva de frecuencia.
- Comparar la estadística descriptiva con los valores regionales y de ser apropiado ajustar la curva de frecuencia.
- No extrapolar la curva de frecuencia a un periodo mayor de dos veces el registro histórico.

La ecuación general para el análisis de frecuencias hidrológico ha sido propuesta por Chow (1951):

$$x = \bar{x} + Ks \quad (2)$$

donde

x = magnitud de la variable hidrológica con un periodo de retorno T ;

\bar{x} = media de la variable hidrológica;

K = factor de frecuencia;

s = desviación estándar.

K es función del intervalo de recurrencia T y varía con el coeficiente de asimetría en distribuciones sesgadas estando afectado notablemente por el número de años del registro histórico.

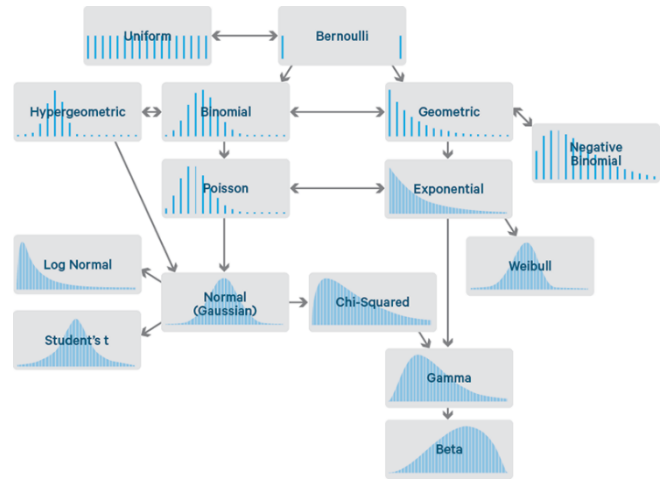
El análisis de frecuencias requiere establecer un orden de clasificación, estableciendo rango y/o categoría de los datos, que permita conectar las magnitudes y probabilidades de ocurrencia de una variable aleatoria (McCuen, 2003).

La variable hidrológica puede consistir en lluvia media anual, caudal pico, caudal de verano, o un parámetro de calidad de agua. El análisis de frecuencias se realiza utilizando una función de densidad de probabilidad.

A pesar sus nombres exóticos las funciones de densidad de probabilidad utilizadas en el análisis de frecuencias se relacionan una con otra de manera intuitiva e interesante (Figura 2).

Figura 2

Diagrama que muestra la relación entre algunas distribuciones de probabilidad (Owen, 2015)



La ecuación de Weibull (1939) es la más utilizada para estimar las probabilidades y/o el periodo de retorno:

$$Pe = \frac{m}{n+1} \quad o \quad Tr = \frac{n+1}{m} \quad (3)$$

donde,

n = número de años del registro hidrológico

m = clasificación del evento según su orden de magnitud. El mayor evento tiene un orden $m = 1$.

La distribución *log-Pearson III (1902)* es la distribución estándar para el análisis de frecuencias de caudales anuales máximos en Estados Unidos. Se utiliza la transformación logarítmica de los datos con fines de reducir el sesgo asimétrico positivo que suelen presentar. Para utilizar esta distribución el primer paso consiste en tomar los logaritmos de base 10 de los datos hidrológicos, $y = \log x$. Se calcula la media \bar{x} la desviación estándar s , y el coeficiente de asimetría C_s para los logaritmos de los datos con las siguientes ecuaciones.

Media $\bar{x}_{\log x}$

$$\log X = \frac{\sum_{i=1}^n \log X_i}{n} \quad (4)$$

Desviación estándar $s_{\log x} = \sqrt{\frac{\sum (\log X - \log \bar{X})^2}{n-1}}$ (5)

Coefficiente de Asimetría

$$C_s = \frac{n \sum (\log X - \log \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)(s_{\log x})^3} \quad (6)$$

Posteriormente se estima el factor de frecuencia K utilizando una tabla específica para la distribución log-Pearson III disponible en textos básicos de Hidrología (Chow y otros, 1988; Maity, 2018) según el período de retorno T_r (o el nivel de probabilidad en %) y el coeficiente de asimetría C_s .

El valor de X para cualquier nivel de probabilidad se calcula con la ecuación

$$\text{Log } X = \log \bar{X} + K s_{\log x} \quad (7)$$

La distribución *Gumbel (1958)* de extremos hidrológicos, también conocida como distribución Tipo I de Valor Extremo, para muestras de tamaño n se aproxima a una distribución límite cuando el tamaño de la muestra aumenta. La distribución es bastante útil para determinar los periodos de retorno de eventos extremos tal como caudal máximo anual, lluvia máxima, y velocidad máxima del viento.

El Servicio Nacional del Tiempo de Estados Unidos aplica esta distribución para analizar la precipitación máxima anual de diferentes duraciones. La distribución puede presentar colas que se aproximan, con una función exponencial la cual está dada por

$$p = 1 - e^{-e}$$

donde

p = probabilidad de que un caudal sea igualado o excedido;

e = base de logaritmo neperiano = logaritmo natural, logaritmo en base al número e = 2.71828;

y = variable reducida, la cual es función de la probabilidad y de la longitud del registro histórico de caudales.

La ecuación de Gumbel para el análisis de frecuencias se simplifica con la siguiente expresión

$$X = \bar{X} + \left(\frac{y - y_n}{\sigma_n} \right) \sigma_x \quad (9)$$

donde,

\bar{X} = media de la serie de datos,

σ_x = desviación estándar de la serie de datos

σ_n, y_n = funciones de la longitud de la serie de datos (registro histórico de caudales)

K es el factor de frecuencia indicado por el término en paréntesis $\left(\frac{y - y_n}{\sigma_n} \right)$

El factor de frecuencia K para la variable reducida y, períodos de retorno, y longitudes de registro histórico se estima utilizando una tabla específica para la distribución Gumbel disponible en textos básicos de Hidrología (Linsley y otros, 1992; Viessman y Lewis, 2003).

Para la construcción de los modelos probabilísticos de lluvia anual y mensual con las distribuciones de Weibull, log-Pearson III, y de Gumbel se utilizó la hojas electrónica Excel.

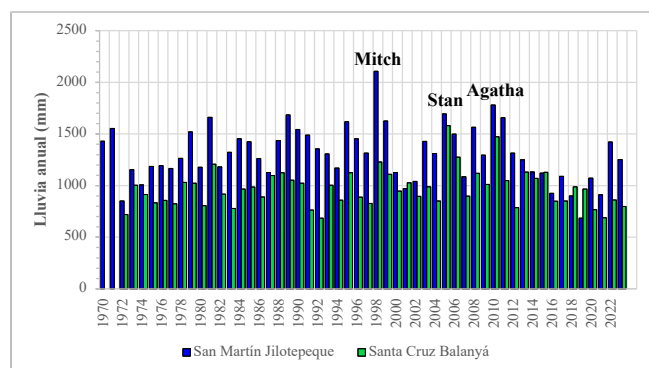
4. Resultados y discusión

“Justo por encima de la Tierra, se forman pequeñas gotas que se juntan con otras gotas, hasta que finalmente el agua desciende en forma de lluvia”. Meteorológica, Aristóteles, 384-322 BC.

Los resultados del análisis de estadística descriptiva para SMJ y SCB se incluyen en el Anexo I. Ambas estaciones muestran un registro de lluvia muy distinto a escala anual y mensual. SMJ (1800 msnm) tiene una lluvia anual promedio de 1274 mm mientras que SCB (2080 msnm) registra un promedio anual de lluvia de 972 mm. La Figura 3 ilustra la serie anual de lluvia donde se nota que, de manera consistente, para casi todo el periodo de monitoreo, SMJ ha tenido una cantidad anual de lluvia mayor a la lluvia anual de SCB.

Figura 3

Diagrama de barras de lluvia anual mostrando eventos de lluvia extremos para el año 1998 (Mitch), 2005 (Stan), y 2010 (Agatha)



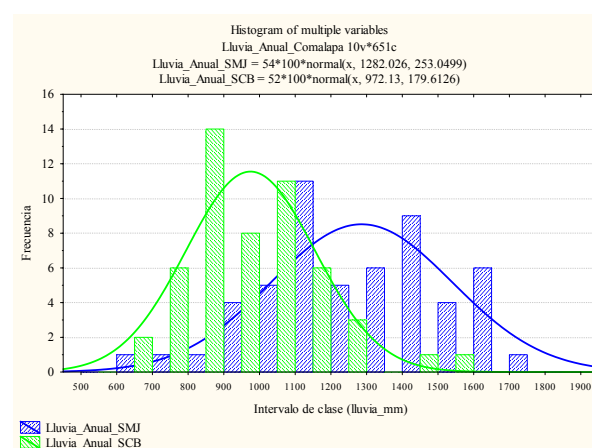
La variabilidad anual de lluvia tomando como referencia el evento máximo anual de lluvia (2107 mm en SMJ; 1228 mm en SCB) durante el huracán Mitch en el año 1998 es la siguiente. SMJ registra una tendencia a la alza entre 1970 (1431 mm) y 1998 (2107 mm) y una fuerte tendencia a la baja entre 1998 (2107 mm) y 2019 (685 mm). SCB manifiesta una variabilidad de lluvia mucho menor entre 1972 y

2002, con ascensos y descensos menores en la intensidad de lluvia y un promedio de 950 mm; entre 2005 y 2022 la tendencia en SCB es a la baja pasando de 1582 mm en 2005 a 688 mm en 2021.

El histograma (Figura 4) aporta una primera aproximación de la frecuencia con que ocurren distintos eventos de lluvia anual con diferentes intensidades. SCB muestra de manera aproximada una distribución normal. SMJ tiene una distribución de lluvia anual más compleja pudiendo distinguirse dos poblaciones de lluvia distintas con promedio anual de 1150 mm y de 1450 mm.

Figura 4

Histogramas de lluvia anual

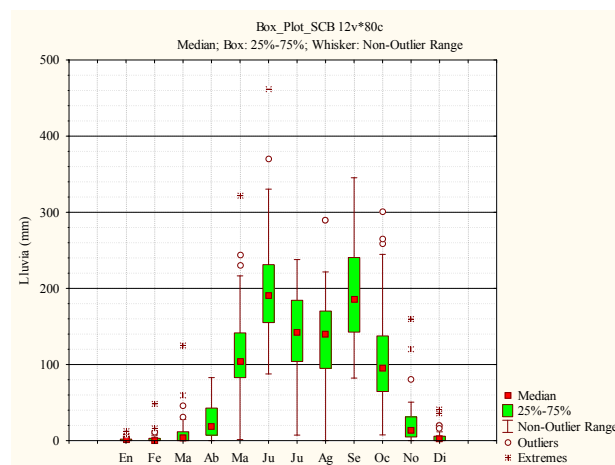
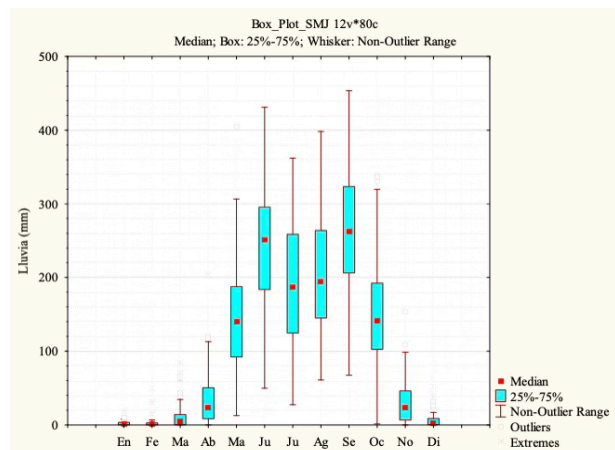


Los diagramas de caja para la lluvia mensual (Figura 5) ilustran claramente los rangos de lluvia para cada mes, así como el valor medio mensual, primero y tercer cuartil, la media (segundo cuartil) mensual de lluvia, valores atípicos, y valores extremos de lluvia. Para prácticamente todos los meses, el promedio mensual de lluvia en SMJ es mayor al de SCB. Los valores extremos de lluvia son más persistentes en SCB que en SMJ. Para ambas estaciones de lluvia junio y septiembre son los meses con mayor precipitación. El inicio del invierno en mayo y el fin de la época lluviosa en

octubre destaca en el diagrama de caja de SMJ y SCB.

Figura 5

Diagramas de caja de lluvia mensual para SMJ (arriba) y SCB (abajo)



Los modelos probabilísticos de lluvia anual y mensual con las distribuciones de Weibull, log-Pearson III, y de Gumbel construidos con la hoja electrónica Excel se muestran en el Anexo II para la lluvia anual en SMJ y en el Anexo III para la lluvia mensual en SCB. Con los parámetros estadísticos estimados para las distribuciones puede calcularse la intensidad de lluvia para distintos intervalos de recurrencia. Se muestra el cálculo de lluvia anual en SMJ para 10 y 100

años de retorno, así como la lluvia mensual máxima en SCB para 10 y 100 años de retorno.

Lluvia anual en SMJ Log-Pearson III

$$\text{Log } X = \overline{\log X} + K\sigma_{\log x}$$

A partir de hoja Excel

$$\text{Log } X = 3,11$$

$$\sigma_{\log x} = 0,091$$

$$g = -0,847$$

El factor de frecuencia K log-Pearson III obtenido de tablas en libro de Hidrología

$$K_{10} = 1,135$$

$$\text{Log } X_{10} = 3,21$$

$$X_{10} = \text{antilog} = 1,622 \text{ mm}$$

$$K_{100} = 1,625$$

$$\text{Log } X_{100} = 3,26$$

$$X_{100} = \text{antilog} = 1,820 \text{ mm}$$

Lluvia mensual en SCB Gumbel

A partir de hoja Excel

$$\text{lluvia media } \overline{X} = 248$$

σ_x = desviación estándar de la serie de datos de lluvia anual = 59

El factor de frecuencia K Gumbel obtenido de tablas en libro de Hidrología; valores de K para $n = 53$, Tr , 10 y Tr 100

$$K_{10} = 1,43$$

$$K_{100} = 3,41$$

$$\text{Lluvia } 10 = 248 + 1,43 \cdot 59 = 332 \text{ mm}$$

$$\text{Lluvia } 100 = 248 + 3,41 \cdot 59 = 449 \text{ mm}$$

La tabla 1 resume los resultados probabilísticos anual y mensual para 10 y 100 años en SMJ y SCB.

Tabla 1

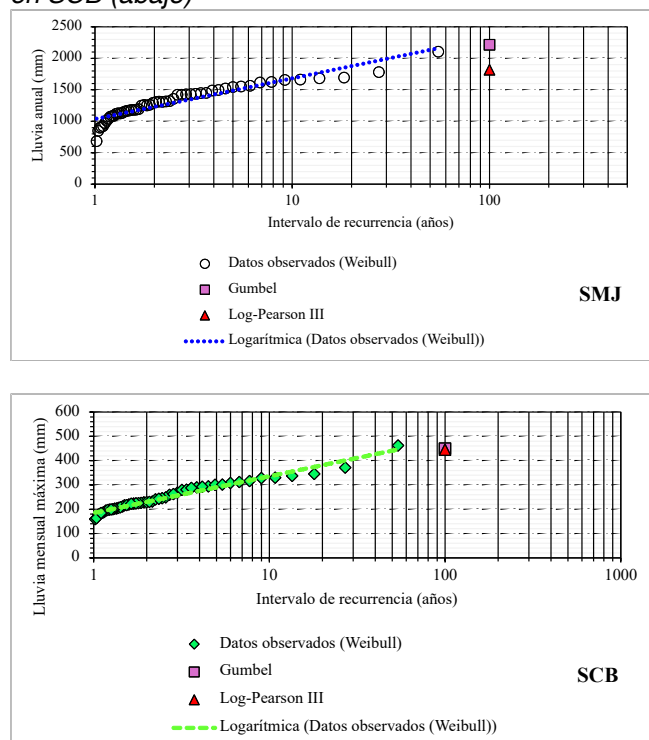
Resultados de los modelos probabilísticos de lluvia a 10 y 100 años

Lluvia anual (mm)	SMJ		SCB	
	Gumbel	Log-Pearson III	Gumbel	Log-Pearson III
10 años	1,688	1,622	1,227	1,202
100 años	2,216	1,820	1,585	1,479
Lluvia mensual (mm)	SMJ		SCB	
	Gumbel	Log-Pearson III	Gumbel	Log-Pearson III
10 años	429	415	332	311
100 años	569	501	449	445

La Figura 6 ilustra los modelos probabilísticos de lluvia anual para SMJ (Anexo II) y de lluvia mensual para SCB (Anexo III), donde puede notarse que en una escala temporal anual la extrapolación de lluvia a 100 años en SMJ difiere notablemente para la distribución Gumbel y la log-Pearson III.

Figura 6

Diagramas que muestran los resultados obtenidos con los diferentes métodos para la lluvia anual máxima en SMJ (arriba) y la lluvia mensual máxima en SCB (abajo)



Los modelos probabilísticos de lluvia anual para SMJ y SCB sugieren cambios significativos derivados de alteraciones climáticas. La proyección de lluvia anual máxima a 100 años para SMJ con la distribución Gumbel (2 216 mm) tiene mejor consistencia con el huracán Mitch (2 107 mm) que con la distribución log-Pearson III (1 820 mm). En términos de lluvia mensual para la extrapolación a 100 años en SCB se registra una notable similitud en los valores de lluvia manifestados con la distribución Gumbel y la log-Pearson III (Tabla 1; Figura 6).

5. Conclusiones y recomendaciones

“La gran pregunta es: ¿cómo enfrentamos la incertidumbre.? La respuesta es: hazla tan pequeña como puedas.” Adrien-Marie Legendre (1752-1833).

“El pasado, o cualquier serie de datos que decidamos analizar, es sólo un fragmento de la realidad.” Bernstein (1996).

El análisis exploratorio de lluvia aporta diferencias significativas en la intensidad de lluvia anual y mensual entre SMJ y SCB. La evaluación de lluvia anual para SMJ identifica un ascenso de lluvia aproximado de +30 % entre el año 1970 (1 431 mm) y el año 1 998 del huracán Mitch (2 107 mm en SMJ; 1 228 mm en SCB).

A partir del huracán Mitch se registra un descenso notable en la intensidad de lluvia anual hasta el año 2021 (911 mm en SMJ; 688 mm en SCB), con el decremento aproximado de lluvia de -57% en SMJ y de -56 % en SCB. Esta disminución de lluvia tiene un impacto negativo en los ecosistemas y en la dotación de agua para diferentes usos en Chimaltenango. La elevación del terreno puede afectar la intensidad de lluvia de manera indirecta.

En el caso de Chimaltenango, se registra una relación inversa entre la elevación y la intensidad de lluvia anual con SCB (2 080 msnm) manifestando una intensidad promedio anual de 972 mm la cual es menor a la de SMJ (1800 msnm) de 1 274 mm. Excepto el año 2015, la intensidad de lluvia anual en SMJ excede la lluvia anual de SCB para todo el registro de monitoreo (Figura 3).

El análisis exploratorio de lluvia mensual indica que para todos los meses el promedio mensual de lluvia en SMJ es mayor al de SCB (Anexo I; Figura 5). En ambas estaciones de lluvia junio y septiembre son los meses con mayor precipitación. El efecto estacional es altamente registrable en SMJ y SCB con el inicio del invierno en mayo y el fin de la época lluviosa en octubre. Se identifica claramente una variabilidad mucho más alta para la lluvia mensual registrada en SMJ en comparación con SCB (Varianza en Anexo I; Figura 5).

El análisis probabilístico de eventos extremos anuales de lluvia con intervalo de recurrencia a 100 años muestra consistencia en SMJ entre las distribuciones de Weibull y Gumbel (2 216 mm), con un valor máximo menor obtenido con la distribución log-Pearson III (1 820 mm). El Tabla 1 y la Figura 6 revelan que la proyección de lluvia anual con un horizonte de 100 años para SCB muestra una diferencia de casi 100 mm entre la distribución de Gumbel (1 585 mm) y la de log-Pearson III (1 479 mm).

La evaluación probabilística de lluvia mensual máxima a 100 años en SCB muestra una alta coincidencia entre las tres distribuciones con un promedio máximo de 449 mm (Tabla 1, Figura 6). Para SMJ existe una diferencia de 68 mm en cuanto a la proyección de lluvia mensual máxima a 100 años con la distribución Gumbel

registrando 569 mm y la distribución log-Pearson III manifestando 501 mm.

Aunque no existe una distribución probabilística particular que se adapte a los datos hidrológicos una estación determinada ni una distribución que funcione para todos los sistemas hidrológicos, la distribución log-Pearson Tipo III que ha sido recomendada por las agencias federales de los Estados Unidos para los modelos de lluvia se ajustó mejor para datos mensuales de SCB.

La distribución de Gumbel que consiste en una distribución asintótica de valores extremos también se ajustó para los datos mensuales de SCB y fue consistente con el modelo log-Pearson tipo III para SCB.

La principal desventaja de la fórmula de Weibull es que es asintóticamente exacta (a medida que el número de observaciones se acerca al infinito) únicamente para una población con una distribución subyacente uniforme, lo cual es relativamente raro en la naturaleza.

Las características de la lluvia en SMJ son más complejas que en SCB, registrando por lo menos dos poblaciones distintas de lluvia en SMJ (Figura 4), lo cual repercute en un ajuste menos preciso para SMJ con los modelos probabilísticos empleados en esta investigación.

Se recomienda que la tendencia negativa en la intensidad de lluvia anual identificada durante los últimos 20 años en SMJ y SCB se tome en cuenta para la planificación y manejo de los recursos hídricos de Chimaltenango. Esta tendencia negativa indica menor disponibilidad de agua para diferentes usos, así como menor recarga hídrica de los acuíferos de Chimaltenango.

El comportamiento mensual de la lluvia documentado para SMJ y SCB puede ser integrado al diseño de proyectos de riego agrícola y para la planificación de dotación de agua en las comunidades de la zona.

Existen modelos probabilísticos más complejos para las series de tiempo anuales y para la caracterización de la lluvia mensual en SCB y SMJ los cuales estuvieron fuera del alcance de la presente investigación y que pueden aportar una cuantificación a mayor detalle de las características de lluvia de la región.

5. Referencias

- Aristotle, *Meteorologica*¹. Traducción al Inglés (1951) por H.D.P.Lee. Harvard University Press. 433 p.
- Bernstein, P., 1996, *Against the gods: The remarkable story of risk*. John Wiley & Sons. 383 p.
- Chow, V., 1951, A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis: *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 32, p. 231-237.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L., 1988, *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. 572 p.
- Gumbel, E., 1958, *Statistics of Extremes*: Columbia University Press. 375 p.
- Haan, C., 1977, *Statistical Methods in Hydrology*: Iowa University Press. 378 p.
- Holmes, A., 1913, *The Age of the Earth*. Harper & Bros. 189 p.
- Huntington-Klein, N., 2022, *The Effect. An Introduction to Research Design and Causality*: CRC Press. 615 p.
- Linsley, R., Kohler, M., y Paulhus, J., 1975, *Hidrología para ingenieros*. 2da edición. McGraw-Hill. 386 p.
- Linsley, R., Franzini, J., Freyberg, D., and Tchobanoglous, G., 1992, *Water-Resources Engineering*. 4th Edition. 841 p.
- Maity, R., 2018, *Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology*: Springer. 444 p.
- McCuen, R., 2003, *Modeling Hydrologic Change: Statistical Methods*. CRC Taylo & Francis Group. 433 p.
- Meylan, P., Favre, A-C., and Musy, A., 2008, *Predictive Hydrology A Frequency Analysis Approach*: CRC Press. 212 p.
- Owen, s., 2015, *Common Probability Distributions: The Data Scientist's Crib Sheet*. <http://blog.cloudera.com/blog/2015/12/common-probability-distributions-the-data-scientists-crib-sheet/>
- Pearson., K., 1902, On the systematic fitting of curves to observations and measurements: *Biometrika*, v. 1, p. 265-303.
- Viessman, W., and Lewis, G., 2003, *Introduction to Hydrology*. 5th Edition. Prentice Hall. 612 p.
- Weibull, W., 1939, A statistical theory of the strength of materials: *Ingeniors Vetenskapsakad Akademien (The Royal Swedish Institute for Engineering Research)*, proceedings no. 51, p. 545.
- Yevjevich, V., 1972, *Probability and Statistics in Hydrology*: Water Resources Publications, LLC. 302 p.

¹Aristóteles (384-322 A. de C.), en *Meteorologica* desarrolló el marco teórico para la consolidación de la meteorología como ciencia, siendo el tratado dominante en la materia durante casi 2,000 años, desde la antigüedad hasta el siglo XVII.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Acceso Abierto

Este artículo está protegido por una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre y cuando se cite adecuadamente al autor o autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de

terceros que aparece en este artículo están incluidos en la licencia *Creative Commons* del artículo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia *Creative Commons* del artículo y el uso que se pretende darle no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, será necesario obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



ANEXO I

Resultados de estadística descriptiva para la lluvia en San Martín Jilotepeque y Santa Cruz Balanyá

Resumen estadístico de lluvia anual (mm) para San Martín Jilotepeque (SMJ) y Santa Cruz Balanyá (SCB)

	N	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar	Asimetría
SCB	52	972	966	Múltiple	684	1582	32261	180	1.09
SMJ	54	1307	1301	1453	685	2107	71172	267	0.29

Resumen estadístico de lluvia mensual (mm) para San Martín Jilotepeque (1970-2023). N = 54.

	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar	Asimetría
Enero	3	1	0	0	19	12	3.5	2.62
Febrero	3	1	0	0	50	68	8.2	4.43
Marzo	13	5	0	0	84	411	20.4	2.03
Abril	36	24	0	0	204	1567	39.8	1.99
Mayo	144	140	132	5	404	4978	70.5	0.79
Junio	241	249	262	50	431	8478	92	-0.03
Julio	194	191	88	27	362	6727	82.1	0.06
Agosto	197	194	194	61	398	6476	79.1	0.31
Septiembre	263	263	Múltiple	67	454	7377	85.1	0.03
Octubre	153	141	82	1	338	7324	85.6	0.50
Noviembre	32	23	Múltiple	0	154	1097	33.4	1.55
Diciembre	7	3	0	0	52	129	11.5	2.34

Resumen estadístico de lluvia mensual (mm) para Santa Cruz Balanyá (1972-2024). N = 52.

	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar	Asimetría
Enero	2	1	0	0	12	7	3	2.4
Febrero	3	0.5	0	0	48	53	7	5.1
Marzo	11	3	0	0	125	408	20	4
Abril	25	19	Múltiple	0	83	489	22	0.89
Mayo	117	104	Múltiple	1	322	3508	59	0.92
Junio	200	193	203	88	462	5142	72	1.14
Julio	140	142	Múltiple	7	238	2910	54	-0.35
Agosto	138	139	95	0	290	3560	60	0.03
Septiembre	195	187	Múltiple	82	345	4658	68	0.44
Octubre	111	96	Múltiple	8	301	4479	67	1.04
Noviembre	22	13	0	0	160	858	29	2.97
Diciembre	6	3	0	0	41	79	9	2.28

Anexo II. Análisis de probabilidad de lluvia máxima anual en San Martín Jilotepeque											
n = 54	Lluvia (mm)	Weibull (1939)				Log-Pearson III (1930)					
		Rango m	T _r (años) (n+1)/m	p m/n+1	%	X - X̄	(X - X̄) ²	log X	(log X - log X̄)	(log X - log X̄) ²	(log X - log X̄) ³
1970	1431	18	3.056	0.327	32.727	124	15376	3.156	0.03563963	0.001270183	4.52689E-05
1971	1553	10	5.500	0.182	18.182	246	60516	3.191	0.07117146	0.005065376	0.00036051
1972	851	53	1.038	0.964	96.364	-456	207936	2.93	-0.19007044	0.036126772	-0.006866631
1973	1154	39	1.410	0.709	70.909	-153	23409	3.062	-0.05779419	0.003340169	-0.000193042
1974	1008	48	1.146	0.873	87.273	-299	89401	3.003	-0.11653947	0.013581448	-0.001582775
1975	1185	34	1.618	0.618	61.818	-122	14884	3.074	-0.04628165	0.002141991	-9.91349E-05
1976	1194	33	1.667	0.600	60.000	-113	12769	3.077	-0.04299567	0.001848628	-7.9483E-05
1977	1166	38	1.447	0.691	69.091	-141	19881	3.067	-0.05330145	0.002841045	-0.000151432
1978	1265	29	1.897	0.527	52.727	-42	1764	3.102	-0.01790947	0.000320749	-5.74445E-06
1979	1520	12	4.583	0.218	21.818	213	45369	3.182	0.06184359	0.003824629	0.000236529
1980	1179	36	1.528	0.655	65.455	-128	16384	3.072	-0.04848619	0.002350911	-0.000113987
1981	1662	5	11.000	0.091	9.091	355	126025	3.221	0.10063102	0.010126602	0.00101905
1982	1182	35	1.571	0.636	63.636	-125	15625	3.073	-0.04738252	0.002245104	-0.000106379
1983	1322	23	2.391	0.418	41.818	15	225	3.121	0.00123146	1.51648E-06	1.86748E-09
1984	1453	15	3.667	0.273	27.273	146	21316	3.162	0.04226561	0.001786382	7.55025E-05
1985	1424	20	2.750	0.364	36.364	117	13689	3.154	0.03350999	0.001122919	3.7629E-05
1986	1262	31	1.774	0.564	56.364	-45	2025	3.101	-0.01894065	0.000358748	-6.79492E-06
1987	1128	42	1.310	0.764	76.364	-179	32041	3.052	-0.06769090	0.004582058	-0.000310164
1988	1436	17	3.235	0.309	30.909	129	16641	3.157	0.03715444	0.001380452	5.12899E-05
1989	1684	4	13.750	0.073	7.273	377	142129	3.226	0.10634209	0.01130864	0.001202584
1990	1544	11	5.000	0.200	20.000	237	56169	3.189	0.06864730	0.004712451	0.000323497
1991	1488	14	3.929	0.255	25.455	181	32761	3.173	0.05260293	0.002767068	0.000145556
1992	1355	22	2.500	0.400	40.000	48	2304	3.132	0.01193930	0.000142547	1.70191E-06
1993	1307	27	2.037	0.491	49.091	0	0	3.116	-0.00372441	1.38712E-05	-5.16622E-08
1994	1170	37	1.486	0.673	67.273	-137	18769	3.068	-0.05181414	0.002684705	-0.000139106
1995	1617	8	6.875	0.145	14.545	310	96100	3.209	0.08871002	0.007869468	0.000698101
1996	1449	16	3.438	0.291	29.091	142	20164	3.161	0.04106839	0.001686612	6.92664E-05
1997	1315	24	2.292	0.436	43.636	8	64	3.119	-0.00107425	1.15401E-06	-1.23969E-09
1998	2106	1	55.000	0.018	1.818	799	638401	3.323	0.20345837	0.041395307	0.008422222
1999	1625	7	7.857	0.127	12.727	318	101124	3.211	0.09085337	0.008254334	0.000749934
2000	1126	41	1.341	0.745	74.545	-181	32761	3.052	-0.06846161	0.004686992	-0.000320879
2001	971	49	1.122	0.891	89.091	-336	112896	2.987	-0.13278077	0.017630733	-0.002341022
2002	1040	47	1.170	0.855	85.455	-267	71289	3.017	-0.10296666	0.010602133	-0.001091666
2003	1428	19	2.895	0.345	34.545	121	14641	3.155	0.03472821	0.001206048	4.18839E-05
2004	1311	25	2.200	0.455	45.455	4	16	3.118	-0.00239731	5.74709E-06	-1.37775E-08
2005	1695	3	18.333	0.055	5.455	388	150544	3.229	0.10916970	0.011918024	0.001301087
2006	1498	13	4.231	0.236	23.636	191	36481	3.176	0.05551181	0.003081561	0.000171063
2007	1085	45	1.222	0.818	81.818	-222	49284	3.035	-0.08457026	0.007152129	-0.000604857
2008	1565	9	6.111	0.164	16.364	258	66564	3.195	0.07451434	0.005552387	0.000413732
2009	1294	28	1.964	0.509	50.909	-13	169	3.112	-0.00806572	6.50559E-05	-5.24723E-07
2010	1781	2	27.500	0.036	3.636	474	224676	3.251	0.13066392	0.01707306	0.002230833
2011	1657	6	9.167	0.109	10.909	350	122500	3.219	0.09932251	0.009864961	0.000979813
2012	1314	26	2.115	0.473	47.273	7	49	3.119	-0.00140463	1.973E-06	-2.77134E-09
2013	1249	32	1.719	0.582	58.182	-58	3364	3.097	-0.02343756	0.000549319	-1.28747E-05
2014	1132	40	1.375	0.727	72.727	-175	30625	3.054	-0.06615357	0.004376295	-0.000289508
2015	1120	43	1.279	0.782	78.182	-187	34969	3.049	-0.07078198	0.005010088	-0.000354624
2016	925	50	1.100	0.909	90.909	-382	145924	2.966	-0.15385827	0.023672366	-0.003642189
2017	1090	44	1.250	0.800	80.000	-217	47089	3.037	-0.08257350	0.006818383	-0.000563018
2018	900	52	1.058	0.945	94.545	-407	165649	2.954	-0.16575749	0.027475546	-0.004554278
2019	685	54	1.019	0.982	98.182	-622	386884	2.836	-0.28430943	0.080831851	-0.022981257
2020	1072	46	1.196	0.836	83.636	-235	55225	3.03	-0.08980521	0.008064977	-0.000724277
2021	911	51	1.078	0.927	92.727	-396	156816	2.96	-0.16048162	0.025754351	-0.0041331
2022	1423	21	2.619	0.382	38.182	116	13456	3.153	0.03320490	0.001102565	3.66106E-05
2023	1251	30	1.833	0.545	54.545	-56	3136	3.097	-0.02274269	0.00051723	-1.17632E-05
Sumatoria =	70,558					-20	3,768,268	168		0.448	-0.03267
Media =	1,307				Log 'X	3,1162		3,11			
Desviación=	266.64							0,091		0,091084007	
Coefficiente de asimetría C _s						-0,847			Desviación standard ³	0,00075566	
Log-Pearson III					Gumbel						

Anexo III. Análisis de probabilidad de lluvia mensual máxima en Santa Cruz Balanyá												
n = 53		Weibull (1939)					Log-Pearson III (1930)					
Año	Mes	Lluvia (mm)	Rango m	T _r (años) (n+1)/m	p		X - X̄	(X - X̄) ²	log X	(log X - log X̄)	(log X - log X̄) ²	(log X - log X̄) ³
1972	junio	228	28	1.929	0.519	51.852	-20	400	2.358	-0.03206515	0.001028174	-3.29686E-05
1973	agosto	198	44	1.227	0.815	81.481	-50	2500	2.297	-0.09333481	0.008711387	-0.000813076
1974	junio	259	20	2.700	0.370	37.037	11	121	2.413	0.02329976	0.000542879	1.2649E-05
1975	octubre	231	25	2.160	0.463	46.296	-17	289	2.364	-0.02638802	0.000696328	-1.83747E-05
1976	junio	226	29	1.862	0.537	53.704	-22	484	2.354	-0.03589156	0.001288204	-4.62357E-05
1977	junio	294	12	4.500	0.222	22.222	46	2116	2.468	0.07834733	0.006138304	0.00048092
1978	junio	229	27	2.000	0.500	50.000	-19	361	2.36	-0.03016452	0.000909898	-2.74466E-05
1979	septiembre	345	3	18.000	0.056	5.556	97	9409	2.538	0.14781910	0.021850485	0.003229919
1980	junio	203	40	1.350	0.741	74.074	-45	2025	2.307	-0.08250396	0.006806904	-0.000561597
1981	septiembre	300	11	4.909	0.204	20.370	52	2704	2.477	0.08712125	0.007590113	0.00066126
1982	septiembre	223	32	1.688	0.593	59.259	-25	625	2.348	-0.04169514	0.001738484	-7.24863E-05
1983	junio	159	53	1.019	0.981	98.148	-89	7921	2.201	-0.18860288	0.035571045	-0.006708801
1984	julio	205	39	1.385	0.722	72.222	-43	1849	2.312	-0.07824614	0.006122458	-0.000479059
1985	mayo	230	26	2.077	0.481	48.148	-18	324	2.362	-0.02827216	0.000799315	-2.25984E-05
1986	junio	216	36	1.500	0.667	66.667	-32	1024	2.334	-0.05554625	0.003085386	-0.000171382
1987	julio	225	30	1.800	0.556	55.556	-23	529	2.352	-0.03781748	0.001430162	-5.40851E-05
1988	agosto	290	14	3.857	0.259	25.926	42	1764	2.462	0.07239800	0.00524147	0.000379472
1989	septiembre	328	6	9.000	0.111	11.111	80	6400	2.516	0.12587384	0.015844225	0.001994373
1990	septiembre	268	18	3.000	0.333	33.333	20	400	2.428	0.03813479	0.001454263	5.5458E-05
1991	junio	177	51	1.059	0.944	94.444	-71	5041	2.248	-0.14202673	0.020171593	-0.002864905
1992	junio	188	47	1.149	0.870	87.037	-60	3600	2.274	-0.11584215	0.013419404	-0.001554533
1993	junio	248	21	2.571	0.389	38.889	0	0	2.394	0.00445168	1.98175E-05	8.8221E-08
1994	agosto	219	34	1.588	0.630	62.963	-29	841	2.34	-0.04955589	0.002455786	-0.000121699
1995	septiembre	316	7	7.714	0.130	12.963	68	4624	2.5	0.10968708	0.012031256	0.001319673
1996	septiembre	279	17	3.176	0.315	31.481	31	961	2.446	0.05560420	0.003091827	0.000171919
1997	septiembre	180	50	1.080	0.926	92.593	-68	4624	2.255	-0.13472749	0.018151498	-0.002445506
1998	octubre	245	22	2.455	0.407	40.741	-3	9	2.389	-0.00083392	6.95415E-07	-5.79918E-10
1999	junio	292	13	4.154	0.241	24.074	44	1936	2.465	0.07538285	0.005682574	0.000428369
2000	septiembre	211	37	1.459	0.685	68.519	-37	1369	2.324	-0.06571754	0.004318796	-0.000283821
2001	septiembre	240	24	2.250	0.444	44.444	-8	64	2.38	-0.00978876	9.58198E-05	-9.37957E-07
2002	junio	262	19	2.842	0.352	35.185	14	196	2.418	0.02830129	0.000800963	2.26683E-05
2003	septiembre	224	31	1.742	0.574	57.407	-24	576	2.35	-0.03975198	0.00158022	-6.28169E-05
2004	septiembre	208	38	1.421	0.704	70.370	-40	1600	2.318	-0.07193667	0.005174884	-0.000372264
2005	junio	462	1	54.000	0.019	1.852	214	45796	2.665	0.27464198	0.075428215	0.020715754
2006	junio	371	2	27.000	0.037	3.704	123	15129	2.569	0.17937391	0.032174999	0.005771355
2007	junio	217	35	1.543	0.648	64.815	-31	961	2.336	-0.05354027	0.00286656	-0.000153476
2008	junio	280	16	3.375	0.296	29.630	32	1024	2.447	0.05715803	0.003267041	0.000186738
2009	junio	222	33	1.636	0.611	61.111	-26	676	2.346	-0.04364703	0.001905063	-8.31503E-05
2010	septiembre	308	9	6.000	0.167	16.667	60	3600	2.489	0.09855072	0.009712244	0.000957149
2011	octubre	301	10	5.400	0.185	18.519	53	2809	2.479	0.08856650	0.007844024	0.000694718
2012	mayo	194	46	1.174	0.852	85.185	-54	2916	2.288	-0.10219827	0.010444486	-0.001067408
2013	septiembre	287	15	3.600	0.278	27.778	39	1521	2.458	0.06788190	0.004607952	0.000312797
2014	junio	330	5	10.800	0.093	9.259	82	6724	2.519	0.12851394	0.016515833	0.002122515
2015	septiembre	337	4	13.500	0.074	7.407	89	7921	2.528	0.13762990	0.01894199	0.002606984
2016	septiembre	196	45	1.200	0.833	83.333	-52	2704	2.292	-0.09774393	0.009553876	-0.000933833
2017	junio	185	48	1.125	0.889	88.889	-63	3969	2.267	-0.12282827	0.015086784	-0.001853084
2018	septiembre	202	41	1.317	0.759	75.926	-46	2116	2.305	-0.08464863	0.007165391	-0.000606541
2019	octubre	243	23	2.348	0.426	42.593	-5	25	2.386	-0.00439373	1.93048E-05	-8.48201E-08
2020	mayo	163	52	1.038	0.963	96.296	-85	7225	2.212	-0.17781240	0.031617248	-0.005621939
2021	mayo	200	42	1.286	0.778	77.778	-48	2304	2.301	-0.08897000	0.007915662	-0.000704256
2022	junio	199	43	1.256	0.796	79.630	-49	2401	2.299	-0.09114692	0.008307762	-0.000757227
2023	octubre	184	49	1.102	0.907	90.741	-64	4096	2.265	-0.12518218	0.015670577	-0.001961677
2024	junio	312	8	6.750	0.148	14.815	64	4096	2.494	0.10415459	0.010848179	0.001129888
Sumatoria =		13,139					-5	184,699	126		0.504	0.01280
Media =		248		Log 'X	2.3943				2.38			
Desviación=		59.59777							0.098		0.097516327	
Coefficiente de asimetría C _s						0.2758					Desviación standard ³	0.000927325
Log-Pearson III						Gumbel						

