

# 1 Introducción

En los últimos años, los eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y periodos de sequía, han afectado de manera significativa al estado de Sinaloa, generando retos para la infraestructura y las comunidades. Debido a su ubicación geográfica y clima, Sinaloa es vulnerable a precipitaciones intensas, especialmente durante la temporada de huracanes, lo cual aumenta el riesgo de inundaciones y desbordamientos de ríos. La variabilidad climática y el cambio climático hacen imperativa una planificación cuidadosa de las infraestructuras hidráulicas, que incluyen presas, sistemas de drenaje y canales de riego.

La identificación de precipitaciones máximas probables en periodos específicos es fundamental para prever el impacto de estos eventos extremos y diseñar estructuras que soporten estos desafíos. En este contexto, contar con datos históricos y comprender su comportamiento probabilístico permite a los ingenieros evaluar riesgos y diseñar estructuras más resilientes. Sin embargo, la variabilidad de las precipitaciones representa un desafío para seleccionar la distribución estadística más adecuada, lo cual puede influir en la precisión de las estimaciones de riesgo.

Este estudio se enfoca en el análisis de datos históricos de precipitaciones máximas mensuales en Sinaloa, explorando diferentes modelos de distribución probabilística (Normal, Log-Normal, Exponencial, Gamma, Weibull y Gumbel) para identificar patrones y prever eventos de precipitación extrema. La selección de una distribución adecuada es clave para el diseño seguro de infraestructuras hidráulicas, considerando las crecientes demandas de adaptación ante el cambio climático.

# 2 Metodología

El análisis de precipitaciones históricas en Sinaloa se llevó a cabo utilizando datos de precipitaciones máximas mensuales entre 1994 y 2023. Se realizaron los siguientes pasos:

## 2.1 Análisis Descriptivo de Datos

Se calcularon medidas de centralización (media y mediana) y variación (desviación estándar) para las precipitaciones máximas. Los gráficos de histograma y boxplot se emplearon para visualizar la distribución de los datos, como se observa en la figura 1. El histograma mostró que las precipitaciones tienen un comportamiento asimétrico y presentan un rango significativo de valores. La tendencia en los máximos mensuales anuales sugiere la existencia de

patrones en la precipitación, con picos evidentes en ciertos años. Lo anterior se observa con mayor detalle en la Figura 2 y 3.

<b>Metrica</b> <chr>	<b>Valor</b> <dbl>
Media	230.9266667
Mediana	231.0000000
Desviación Estándar	59.8781172
Sesgo	0.8803158
Curtosis	3.2961284

Figure 1: Medidas de centralización y observación.

Como se puede observar, aunque el sesgo es positivo, no representa una inclinación extrema, pues la media y mediana están muy cercanas. De la misma manera, la desviación estándar refleja una variabilidad moderada, y, aunque la curtosis es alta, es debido a la infrecuencia de comportamientos inusuales, por lo que no es relevante para nuestro análisis.

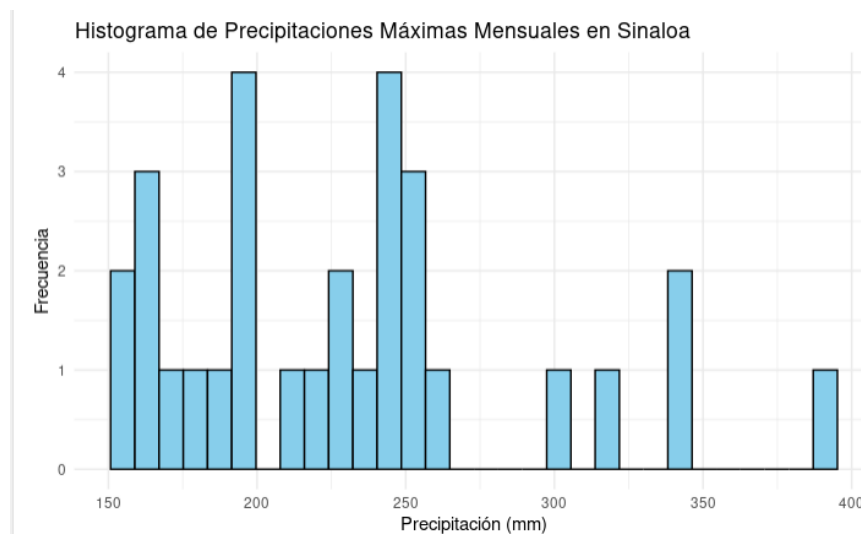


Figure 2: Histograma de precipitaciones máximas mensuales.

Como se puede observar, las frecuencias están más cercanas dentro de un rango de 150 a 300 mm, pues entre más alejada se encuentre la precipitación máxima, menos probable es que dé, debido a que son mayormente infrecuentes.

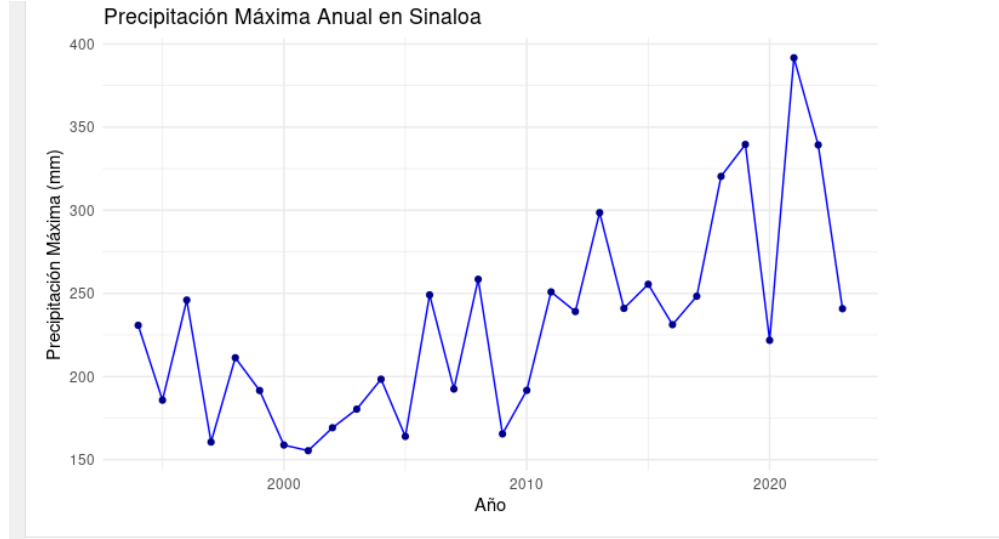


Figure 3: Precipitaciones máximas en Sinaloa a lo largo de los meses.  
 Como se puede observar, las precipitaciones máximas no parecen tener un patrón, pero pareciera ser que sigue una tendencia a la alza.

## 2.2 Análisis de Frecuencias Método Gráfico

Se analizaron las frecuencias de las precipitaciones máximas mensuales por medio del método gráfico, donde se siguió el siguiente procedimiento:

- Se ordenan los datos de precipitaciones máximas de mayor a menor.
- Se agrega una columna con el número de orden asignado a cada precipitación máxima (rank).
- Se le asigna el número de orden a cada dato en la columna creada, simbolizado como mm, indicando la posición de cada valor en el orden de mayor a menor.
- Se calcula la probabilidad de excedencia para cada precipitación máxima. Esta probabilidad indica la frecuencia con la cual un evento es igualado o superado y se calculó usando la fórmula:  $P_{exe} = \frac{m}{N+1}$ , donde m es el número de orden de cada valor y N es el total de datos.
- Posteriormente, se calcula la probabilidad de no excedencia para cada dato, que es el complemento de la probabilidad de excedencia ( $1 - P_{exe}$ ).
- Finalmente, se calcula el período de retorno para cada precipitación máxima, el cual representa el intervalo promedio entre eventos de igual magnitud y es el recíproco de la probabilidad de excedencia ( $P_{ret} = \frac{1}{P_{exe}}$ ).

De esta manera, se obtuvieron, las probabilidades de excedencia y retorno con respecto a la precipitación máxima, tal como se muestra en la Figura 4 y 5.

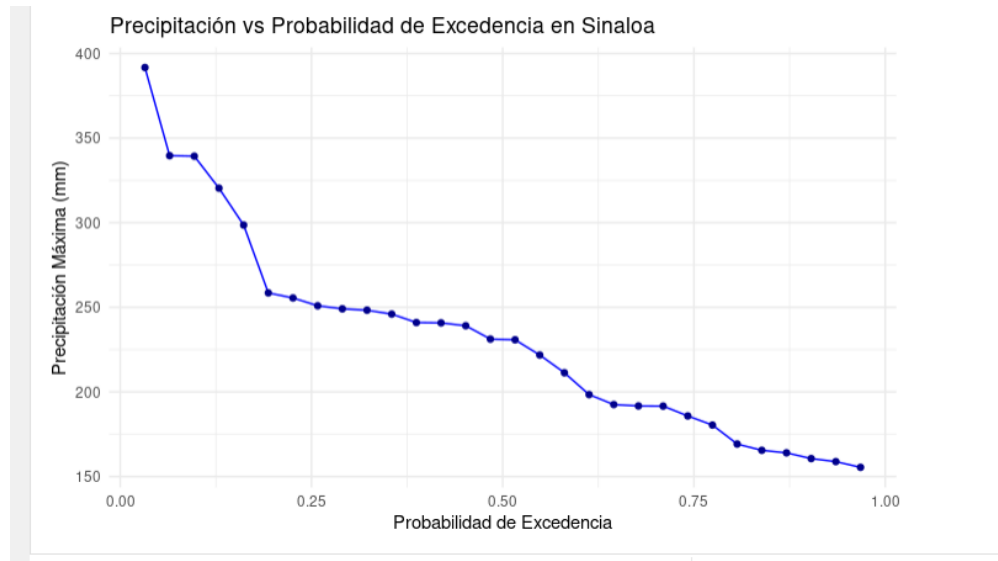


Figure 4: Probabilidad de excedencia empírica con respecto a la precipitación máxima  
Se observa que entre mayor la precipitación máxima, menor es la probabilidad de excedencia.

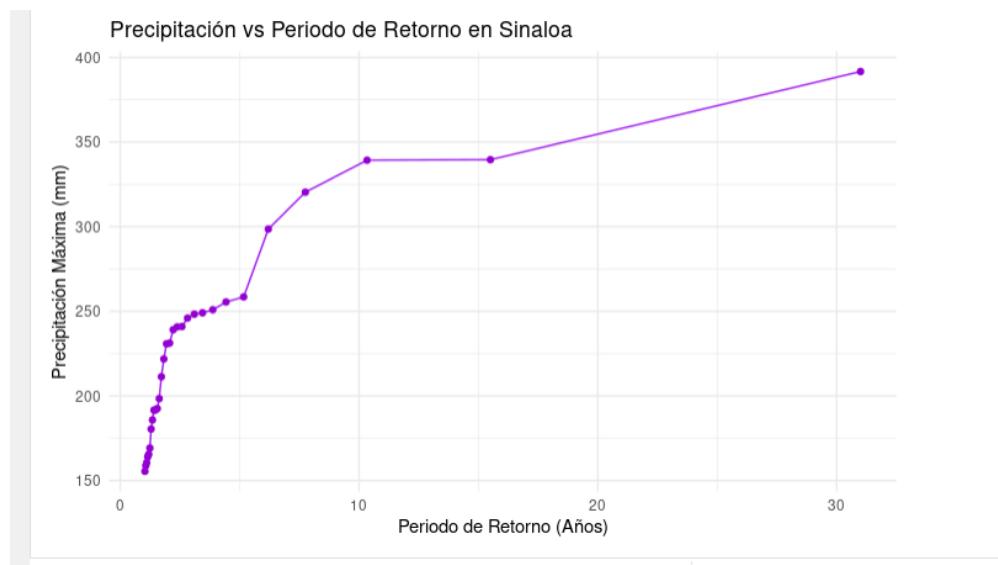


Figure 5: Probabilidad de retorno empírica con respecto a la precipitación máxima  
Se observa que entre mayor la precipitación máxima, mayor es la probabilidad de retorno, al ser la probabilidad inversa de la de excedencia.

## 2.3 Análisis de Frecuencias Método Analítico

Se ajustaron diversas distribuciones de probabilidad (Normal, Log-Normal, Exponencial, Gamma, Weibull, Gumbel) a los datos, donde se realizaron comparaciones de distribuciones acumuladas empíricas y teóricas, funciones de densidad empíricas y teóricas, y probabili-

dades de bondad de ajuste con un  $\alpha = 0.05$ .

Para ello, se utilizó el paquete `fitdistrplus` para estimar los parámetros de algunas distribuciones y se aplicaron pruebas de bondad de ajuste (Jarque-Bera y Anderson-Darling para la distribución normal, y Kolmogorov-Smirnov para el resto de las distribuciones ) A continuación, se describen las distribuciones utilizadas:

### **2.3.1 Distribución Normal**

La distribución normal es una de las distribuciones más comunes en estadística, caracterizada por su forma de campana simétrica. Se define por dos parámetros: la media y la desviación estándar. Aunque es muy utilizada, en este análisis los datos de precipitaciones en Sinaloa no se ajustaron adecuadamente a esta distribución, ya que presentaron sesgo y asimetría.

### **2.3.2 Distribución Log-Normal**

La distribución log-normal es adecuada para modelar variables que son el resultado del producto de múltiples factores independientes. Es utilizada para datos que son positivos y asimétricos, como las precipitaciones. En nuestro análisis, esta distribución mostró un buen ajuste, reflejando correctamente la variabilidad en los datos de precipitaciones mensuales.

### **2.3.3 Distribución Exponencial**

La distribución exponencial modela el tiempo entre eventos en un proceso de Poisson y se caracteriza por un único parámetro ( $\lambda$ ). Sin embargo, en el contexto de las precipitaciones, no ofreció un ajuste adecuado debido a la naturaleza acumulativa de los datos, y su capacidad para modelar precipitaciones extremas fue limitada.

### **2.3.4 Distribución Gamma**

La distribución gamma es flexible y se puede ajustar a una variedad de formas. Es útil para modelar variables continuas que son siempre positivas y se caracteriza por dos parámetros: la forma ( $k$ ) y la escala ( $\theta$ ). Esta distribución es especialmente valiosa en hidrología, pero en nuestro caso, no proporcionó un ajuste tan preciso como las distribuciones Gumbel y Log-Normal.

### **2.3.5 Distribución Weibull**

La distribución Weibull es utilizada en el análisis de confiabilidad y durabilidad. Tiene dos parámetros: la forma y la escala, lo que le permite modelar fenómenos con diferentes tasas de falla. En el contexto de las precipitaciones, aunque fue considerada, no resultó ser la mejor opción en comparación con Gumbel y Log-Normal.

### **2.3.6 Distribución Gumbel**

La distribución Gumbel es específica para modelar fenómenos extremos, como precipitaciones máximas. Esta distribución se utiliza frecuentemente en hidrología para calcular el riesgo de

eventos extremos y está definida por dos parámetros: ubicación y escala. En este análisis, la distribución Gumbel se destacó como una de las más viables, proporcionando estimaciones precisas de las precipitaciones extremas para períodos de retorno largos. La distribución Gumbel y la Log-Normal mostraron el mejor ajuste para los datos, lo cual se observa en los resultados de las pruebas de ajuste:

Distribución	P-Valor (Kolmogorov-Smirnov)	Estadístico
Gamma	0.628	0.1317
Log-normal	0.785	0.1145
Exponencial	3.68e-07	0.4898
Weibull	0.288	0.1742
Gumbel	0.824	0.1098

Table 1: Resultados de las pruebas de bondad de ajuste para diferentes distribuciones. Se observa que la distribución Gumbel y Log-Normal dan valores p y estadísticos más altos.

Los gráficos comparativos de las probabilidades acumuladas empíricas y teóricas, así como de las funciones de densidad (Figura 6 y 7), revelaron que las distribuciones Gumbel y Log-Normal se alinean más estrechamente con los datos observados, mientras que otras distribuciones como la Exponencial no lograron el mismo nivel de ajuste

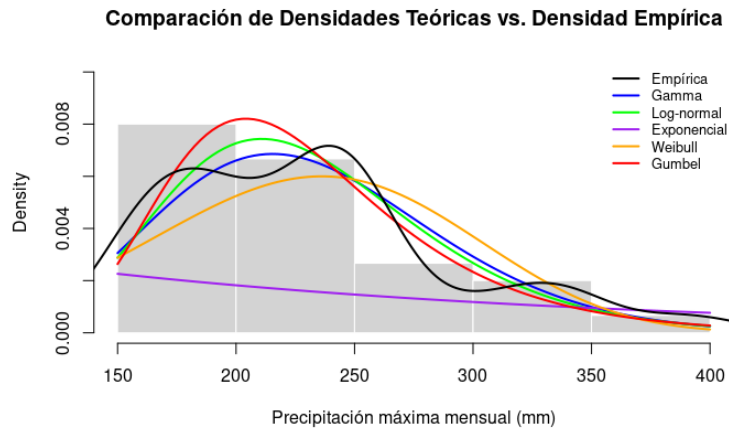


Figure 6: Comparación de densidades teóricas y la densidad empírica. Se observa que la densidad Gumbel y Lognormal se aproxima más a la densidad empírica que el resto de distribuciones.

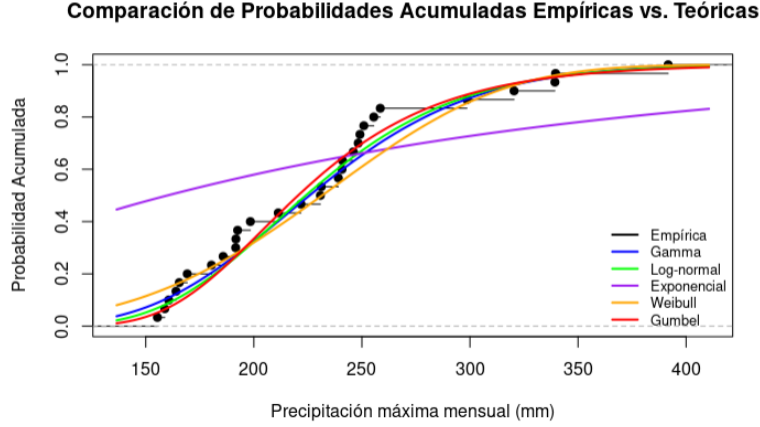


Figure 7: Comparación de probabilidades acumuladas empíricas y teóricas. Se observa que las probabilidades acumuladas para las distribuciones de Gumbel y Log-Normal se acercan más a la empírica que el resto.

## 2.4 Estimación de Precipitación para Períodos de Retorno

Con base en el ajuste de la distribución Gumbel y Log-Normal, se calcularon las precipitaciones máximas mensuales para diferentes períodos de retorno: el inferior recomendado (100 años), y otros como punto de comparación, incluyendo 50, 200 y 1000 años. Se utilizó la fórmula  $P_{\text{ret}} = \frac{1}{P_{\text{exc}}}$  para determinar la probabilidad de excedencia correspondiente.

Los resultados de las precipitaciones máximas mensuales para los diferentes períodos de retorno se presentan en la siguiente tabla:

Período de Retorno (años)	Gumbel (mm)	Log-Normal (mm)
50	378.94	368.88
100	410.23	391.13
200	441.40	418.74
1000	513.62	474.45

Table 2: Precipitaciones máximas mensuales estimadas para diferentes períodos de retorno. Se observa que Gumbel, la mejor distribución, muestra valores de precipitaciones máximas ligeramente mayores a la distribución Log-Normal, la segunda mejor distribución.

## 2.5 Interpretación de Resultados

Los resultados mostraron que las distribuciones Gumbel y Log-Normal se ajustaron adecuadamente a los datos. La probabilidad de excedencia empírica y teórica se comparó gráficamente, observando que la distribución Gumbel proporcionó un ajuste más preciso para los períodos de retorno seleccionados (50, 100, 200 y 1000 años).

## 2.6 Conclusiones

Se observa que el periodo de retorno tiene un impacto significativo en las estimaciones de precipitación máxima, evidenciando que un mayor período de retorno conlleva a mayores estimaciones de precipitación.

El caudal máximo para un periodo de retorno específico no será el mismo si utilizamos datos históricos de otro estado. Las condiciones climáticas, geográficas y ambientales varían significativamente entre regiones, lo que influye en los patrones de precipitación y, por ende, en los cálculos de caudal. Por lo tanto, es esencial utilizar datos locales para obtener estimaciones precisas y aplicables.

Las obras hidráulicas deben diseñarse en base a periodos de retorno sugeridos porque estos periodos representan la probabilidad de eventos extremos, lo que ayuda a mitigar riesgos de inundaciones y garantizar la seguridad de las estructuras y de las comunidades circundantes. Diseñar con un periodo de retorno adecuado significa que se está considerando la variabilidad climática y las proyecciones a largo plazo, lo cual es crucial para la resiliencia de la infraestructura.

Finalmente, conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos históricos permite realizar pronósticos más precisos sobre eventos futuros. La distribución proporciona un marco para entender la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, lo que es fundamental para la planificación y el diseño de proyectos hidráulicos.

## References

- United States Water Resources Council. (1981). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin No. 17B.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Resúmenes Mensuales de Lluvia y Temperatura. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Pon, S. (2023). *Períodos de Retorno Sugeridos*. Retrieved from [https://pon.sdsu.edu/periodos\\_de\\_retorno\\_cna.html](https://pon.sdsu.edu/periodos_de_retorno_cna.html)
- Smith, J. (2019). *Statistical methods in hydrology*. *Journal of Hydrological Research*, 12(3), 235-247.