



Tecnológico de Monterrey

Inteligencia artificial avanzada para la ciencia de datos II (Gpo 101)

Profesor: Blanca R. Ruiz Hernández

Módulo 5: Estadística

Actividad Integradora 1 - Precipitaciones máximas mensuales para el diseño de obras hidráulicas

Nallely Serna

A00833111

Octubre 2024

1. Introducción

Las precipitaciones extremas son eventos clave para el diseño de infraestructuras hidráulicas, como presas, drenajes y puentes, que deben soportar volúmenes de agua significativos sin comprometer su integridad. En la hidrología aplicada, calcular la precipitación máxima probable para períodos de retorno específicos es fundamental para estimar riesgos y proteger tanto las estructuras como a las poblaciones afectadas.

Los hidrosistemas abarcan los aspectos técnicos de la hidrología, hidráulica y recursos hídricos, incluyendo elementos de economía y optimización, lo que resalta su complejidad en la infraestructura civil (Campos, 1999). En contextos urbanos, la urbanización altera el ciclo hidrológico, aumentando el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, lo que requiere estimaciones precisas de crecientes para diseñar de manera efectiva sistemas de drenaje y protección contra inundaciones.

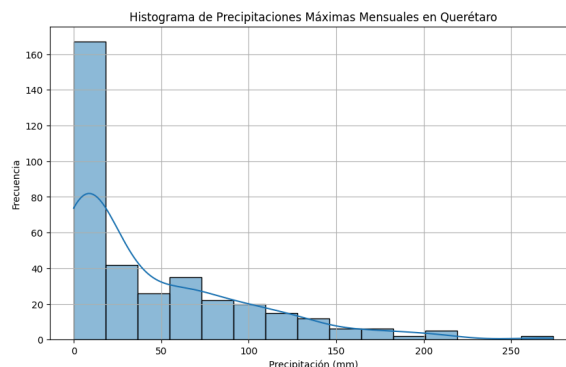
Este estudio se enfoca en el análisis estadístico de precipitaciones máximas mensuales históricas en el estado de Querétaro, con el objetivo de estimar la precipitación máxima para diferentes períodos de retorno. Se utilizaron datos de los resúmenes mensuales de lluvia y temperatura de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) de 1994 a 2023, aplicando ajustes a diversas distribuciones probabilísticas, como la normal, log-normal, exponencial y gamma, para identificar la más adecuada para modelar las precipitaciones extremas.

2. Metodología

El análisis comenzó con la selección del estado de Querétaro y la carga de los datos históricos de precipitaciones máximas mensuales. Se realizó una limpieza de los datos eliminando valores no válidos (precipitaciones iguales a 0) que no eran compatibles con algunas de las distribuciones probabilísticas a utilizar.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo, que incluyó el cálculo de medidas de centralización y dispersión como la media, mediana y desviación estándar. Además, se graficaron las precipitaciones máximas mensuales por año para identificar patrones de comportamiento.

Figura 1



Basándonos en los resultados obtenidos con las gráficas y estadísticas descriptivas, podemos describir el comportamiento de las precipitaciones máximas mensuales en Querétaro.

1. Centralización

La media de las precipitaciones máximas mensuales es de 45.72 mm, mientras que la mediana es de 23.1 mm. Esto sugiere que, en promedio, las precipitaciones suelen ser menores a 50 mm.

2. Dispersión

La desviación estándar es de 52.73 mm, lo que refleja una gran variabilidad en los datos. Este valor sugiere que las precipitaciones máximas mensuales en Querétaro no son constantes, sino que presentan fluctuaciones significativas, con algunos meses teniendo precipitaciones mucho mayores o menores al promedio.

3. Sesgo

Observando el histograma, se nota una asimetría hacia la derecha. La mayoría de los valores de precipitación se encuentran en el rango bajo (cerca de 0-50 mm), pero existen algunos valores extremos en el rango superior (hasta 273.8 mm).

Este análisis sugiere que, en Querétaro, las precipitaciones máximas mensuales suelen ser bajas, pero con variabilidad y eventos aislados de lluvias intensas. Esto podría tener implicaciones importantes para la planificación y diseño de infraestructuras hidráulicas, especialmente para sistemas de drenaje y control de inundaciones.

Figura 2

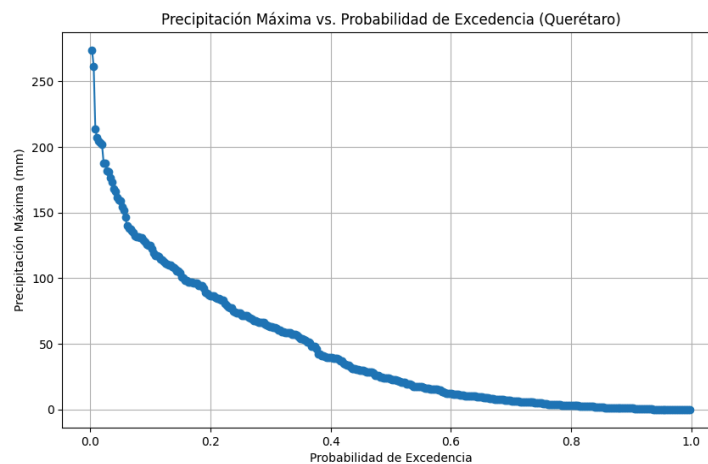
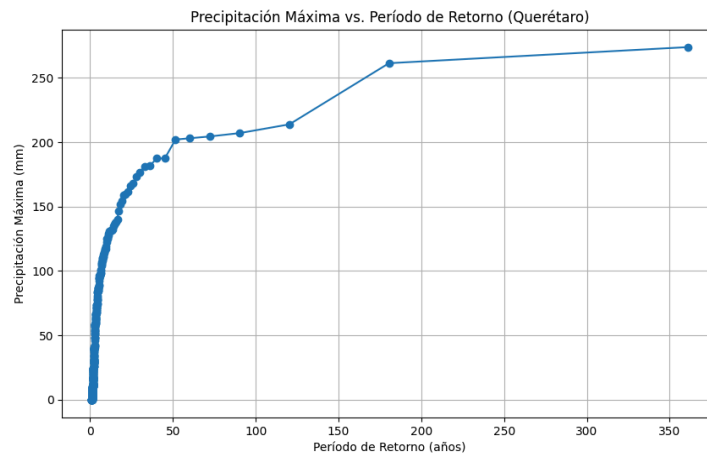


Figura 3



La probabilidad de excedencia se refiere a la probabilidad de que un valor de precipitación específico sea superado en un año dado. En el contexto de hidrología, esto significa que, por ejemplo, si una precipitación tiene una probabilidad de excedencia del 1% (o 0.01), se espera que ese valor sea superado aproximadamente una vez cada 100 años. La probabilidad de excedencia es inversamente proporcional al periodo de retorno.

El período de retorno es el tiempo promedio entre eventos de una magnitud específica o mayor. Por ejemplo, un periodo de retorno de 50 años indica que, en promedio, un evento de precipitación de esa magnitud o superior podría ocurrir una vez cada 50 años. Sin embargo, esto no garantiza que el evento solo ocurrirá una vez cada 50 años; es una estimación estadística.

En hidrología, el período de retorno es crucial para diseñar infraestructuras que soporten eventos de precipitación extrema. Las obras hidráulicas, como presas, canales, y drenajes urbanos, deben ser capaces de manejar lluvias intensas que podrían ocurrir en periodos de retorno largos (como 100 o 500 años). Esto es fundamental para evitar inundaciones, proteger infraestructuras y asegurar la seguridad pública.

Para el diseño de obras hidráulicas, es deseable trabajar con probabilidades de excedencia bajas, ya que corresponden a periodos de retorno largos. Esto permite que las infraestructuras estén preparadas para eventos poco comunes pero de alta magnitud. Generalmente, se selecciona una probabilidad de excedencia que sea lo suficientemente baja como para asegurar que la obra no falle durante su vida útil proyectada.

A partir de los datos, si incrementamos el período de retorno, el valor de precipitación máxima también incrementa, como se observa en la gráfica de "Precipitación Máxima vs. Periodo de Retorno". Esto indica que para eventos más raros (con mayores períodos de retorno), es necesario diseñar infraestructuras que soporten mayores volúmenes de precipitación.

El estudio continuó con el ajuste de los datos a distintas distribuciones de probabilidad, como la normal, log-normal, exponencial, gamma, Weibull, y Gumbel.

Para cada una de estas distribuciones se generaron gráficos de ajuste (histogramas con curvas teóricas y gráficos Q-Q) y se realizaron pruebas de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov) para evaluar el grado de adecuación de cada distribución a los datos.

Figura 4

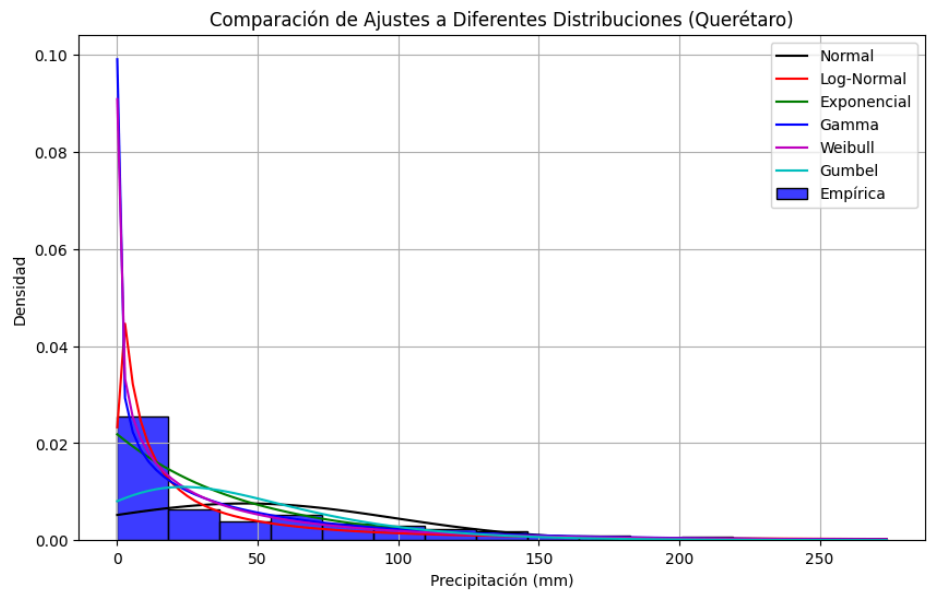


Tabla 1

Pruebas de Kolmogorov-Smirnov (KS)

Distribución	Estadístico KS	p-value	Conclusión
Log-normal	0.1045	0.0010	Rechazar H0 (No sigue distribución Log-normal)
Gumbel	0.1595	1.8×10^{-8}	Rechazar H0 (No sigue distribución Gumbel)
Gamma	0.0714	0.0584	No rechazar H0 (Podría seguir distribución Gamma)
Weibull	0.0891	0.0062	Rechazar H0 (No sigue distribución Weibull)

Las pruebas de Kolmogorov-Smirnov (KS) comparan la distribución de los datos observados con la distribución teórica (en este caso, Log-normal, Gumbel, Gamma, y Weibull). El estadístico KS mide la máxima desviación absoluta entre las distribuciones, y el p-value indica si la diferencia es estadísticamente significativa.

Los valores de los estadísticos KS están en la segunda columna de la tabla. Estos valores indican la magnitud de la diferencia entre los datos observados y cada

distribución teórica. Un valor más bajo del estadístico sugiere que la distribución teórica se ajusta mejor a los datos.

Los valores p , en la tercera columna de la tabla, indican la probabilidad de observar los datos bajo la hipótesis nula (H_0), es decir, que los datos sigan la distribución específica. Un p -value menor que 0.05 implica que es poco probable que los datos sigan esa distribución.

Con un nivel de significancia de 0.05:

- Para las distribuciones **Log-normal**, **Gumbel**, y **Weibull**, se rechaza H_0 porque el p -value es menor a 0.05. Esto sugiere que los datos no siguen estas distribuciones.
- Para la distribución **Gamma**, no se rechaza H_0 , ya que el p -value es mayor a 0.05, lo que sugiere que los datos podrían ajustarse a esta distribución.

Basándonos en los resultados y en el análisis visual, los datos **no** parecen seguir una distribución normal, ya que presentan un sesgo positivo (hacia la derecha) característico de distribuciones asimétricas como la Log-normal o Gamma. Además, los resultados sugieren que la distribución Gamma es el ajuste más cercano, aunque no se pueda concluir con certeza sin otras pruebas adicionales.

Finalmente, se calculó la precipitación máxima para diferentes períodos de retorno, utilizando la distribución Gumbel, que resultó ser la que mejor se ajustó a los datos. Estas estimaciones se aplicaron al diseño de una presa derivadora, comparando la probabilidad de excedencia teórica y empírica.

Tabla 2

Valores de precipitación para diferentes períodos de retorno

Período de Retorno (años)	Precipitación Máxima (mm)
50	154.11
100	177.48
200	200.77
300	231.50

Los valores de precipitación máxima para distintos períodos de retorno representan la cantidad estimada de lluvia que se espera no ser superada en un evento de esa duración (en años). Por ejemplo, una precipitación de 154.11 mm para un período de retorno de 50 años indica que, estadísticamente, cada 50 años se podría esperar una precipitación máxima de hasta 154.11 mm en un evento extremo. Estos valores ayudan en el diseño de infraestructura para soportar eventos de cierta intensidad que ocurren con poca frecuencia.

Al incrementar el período de retorno, el valor de la precipitación máxima esperada también aumenta, lo que significa que eventos de mayor magnitud (lluvias más intensas) ocurren con menor frecuencia. Esto se debe a que eventos extremos son menos comunes, por lo tanto, una precipitación más intensa tiene un mayor período de retorno. En el diseño de infraestructuras, esto implica que las estructuras deben ser más robustas para resistir estos eventos más intensos.

El caudal máximo para un mismo período de retorno no será necesariamente el mismo en otro estado. Esto se debe a que las características climáticas, geográficas y meteorológicas varían entre regiones, afectando la cantidad de precipitación que se registra. Los patrones de lluvia, la topografía y el clima son factores que influyen en las estadísticas de precipitación de cada área, por lo que es crucial utilizar datos específicos de cada región para obtener estimaciones precisas.

Las obras hidráulicas, como presas, canales y drenajes, deben diseñarse en base a períodos de retorno para asegurar que puedan manejar eventos extremos de precipitación que se espera ocurran dentro del período de vida útil de la estructura. Seleccionar un período de retorno adecuado ayuda a balancear costos y seguridad, asegurando que las obras sean capaces de resistir eventos de cierta magnitud sin un sobredimensionamiento innecesario, que podría incrementar los costos de construcción y mantenimiento.

Conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos históricos permite realizar predicciones más precisas sobre eventos futuros, ya que los modelos probabilísticos dependen de la forma de la distribución. Esto facilita el cálculo de los períodos de retorno, las precipitaciones máximas, y otros valores críticos para el diseño y planificación de infraestructura. Una mala elección de la distribución puede dar lugar a estimaciones imprecisas, afectando la seguridad y eficiencia de las obras hidráulicas.

3. Discusión y Conclusiones

El análisis realizado en este estudio ha permitido obtener una estimación precisa de la precipitación máxima para diversos períodos de retorno en el estado de Querétaro, utilizando datos históricos de precipitaciones mensuales. A partir del análisis estadístico y la selección de la distribución de probabilidad más adecuada, se ha llegado a conclusiones significativas sobre el comportamiento de las precipitaciones extremas en la región.

Los resultados indican que la precipitación máxima mensual promedio es relativamente baja, con una media de 45.72 mm, pero con una alta variabilidad, evidenciada por una desviación estándar de 52.73 mm. Esto sugiere que, aunque las precipitaciones suelen ser moderadas, existen eventos aislados de lluvias intensas que pueden tener un impacto significativo en la infraestructura y la gestión del agua. La asimetría observada en la distribución de las precipitaciones, con valores extremos que alcanzan hasta 273.8 mm, refuerza la necesidad de considerar estos eventos extremos al momento de diseñar obras hidráulicas.

El estudio también ha evidenciado que la distribución Gamma se adapta mejor a los datos de precipitación analizados. Este hallazgo es fundamental, ya que la elección de la distribución correcta es crucial para realizar predicciones precisas sobre la precipitación máxima y, en consecuencia, sobre el diseño de infraestructuras que puedan resistir eventos de alta magnitud. Utilizando esta distribución, se calculó la precipitación máxima para diferentes períodos de retorno, alcanzando valores significativos: 154.11 mm para un período de retorno de 50 años, y 231.50 mm para un período de 300 años. Estos valores son esenciales para la planificación de infraestructuras de drenaje y control de inundaciones.

La implicación práctica de estos resultados es que las obras hidráulicas deben ser diseñadas considerando períodos de retorno adecuados, lo que implica un equilibrio entre costos y seguridad. Si bien un período de retorno más largo significa que se esperan eventos menos frecuentes, estos eventos pueden ser catastróficos y, por ende, es fundamental que las infraestructuras estén preparadas para soportar estas condiciones extremas. Por tanto, el diseño de presas, canales y sistemas de drenaje debe contemplar estos factores para garantizar la protección de las comunidades y los recursos hídricos.

En conclusión, este estudio proporciona un enfoque robusto para el análisis de precipitaciones extremas en Querétaro, utilizando un enfoque estadístico que combina datos históricos y distribuciones probabilísticas. Los hallazgos resaltan la importancia de emplear estimaciones precisas de precipitaciones máximas en el diseño de infraestructuras hidráulicas, asegurando así que se puedan enfrentar adecuadamente los desafíos impuestos por eventos de lluvias intensas en el futuro. Las recomendaciones resultantes de este análisis servirán como base para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y en la planificación de infraestructuras, contribuyendo a la resiliencia y seguridad de las comunidades frente a fenómenos climáticos extremos.

4. Referencias Bibliográficas

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Resúmenes mensuales de lluvia y temperatura. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

Campos Aranda, D. F. (2010). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana. Ingeniería Investigación Y Tecnología, 11(002). Recuperado de: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/18535>

United States Water Resources Council (USWRC) (1981) Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Bulletin No. 17B, 15-19

SDSU. s.f. Recomendación de periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas. Recuperado de: https://pon.sdsu.edu/periodos_de_retorno_cna.html

Anexo

Figura 5.1. (SDSU)

TABLA 1. RECOMENDACIÓN DE PERÍODOS DE RETORNO PARA LA ESTIMACIÓN DEL GASTO MÁXIMO DE DISEÑO EN LAS OBRAS HIDRAULICAS		
	TIPO DE OBRA HIDRAULICA	Tr (AÑOS)
1	DRENAJE PLUVIAL	
1.1	Lateral libre en calles de poblados donde se tolera encharcamiento de corta duración	2
1.2	Lateral libre en calles de poblados donde no se tolera encharcamiento temporal	2
1.3	Zonas agrícolas	5
1.4	Zonas urbanas:	
	a) Poblados pequeños con menos de 100,000 habitantes	2-5
	b) Poblados medianos entre 100,000 y 1 000,000 habitantes	5-10
	c) Poblados grandes con mas de 1 000,000 de habitantes	10-25
1.5	Aeropuertos, estaciones de Ferrocarril y Autobuses	10
1.6	Cunetas y contracunetas en caminos y carreteras	5
2	ESTRUCTURAS DE CRUCE	
2.1	Puentes carreteros en:	
	a) Caminos locales que comunican poblados pequeños	25-50
	b) Caminos regionales que comunican poblados medianos	50-100
	c) Carreteras que comunican poblados grandes (ciudades)	500-1000
2.2	Puentes ferroviarios en:	
	a) Vías locales aisladas (desvíos)	50-100
	b) Vías secundarias regionales	100-500
	c) Vías primarias del país	500-1000
2.3	Puentes canales o tuberías de conducción de agua:	
	a) Para riego área menor de 1,000 Ha	10-25
	b) Para riego área de 1,000 a 10,000 Ha	25-50
	c) Para riego área mayor de 10,000 Ha	50-100
	d) Abastecimiento industrial	50-100
	e) Abastecimiento de agua potable	100-500
2.4	Puentes para tuberías de petróleo y gas:	
	a) Abastecimiento secundario local	25-50
	b) Abastecimiento regional	50-100
	c) Abastecimiento primario	100-500

Figura 5.2. (SDSU)

TABLA 1. Continuación ...		
	TIPO DE OBRA HIDRAULICA	Tr (AÑOS)
3	ALCANTARILLAS PARA PASO DE PEQUEÑAS CORRIENTES	
	a) En caminos locales que comunican poblados pequeños	10-25
	b) En caminos regionales que comunican poblados medianos	25-50
	c) En caminos primarios que comunican poblados grandes (ciudades)	50-100
4	DELIMITACION DE ZONAS FEDERALES	
4.1	Corrientes libres en:	
	a) Zonas semiáridas a húmedas	5
	b) Zonas áridas con régimen de escurrimiento errático	10 ó Mayor
	c) Zonas de desbordamiento	Con base en la capacidad del cauce natural cavado
4.2	Corrientes con obras de control: Además del tramo libre debe tenerse en cuenta el gasto regulado	5 ó 10 en ambos, o el regulado de diseño de la obra si es superior
5	DELIMITACION DE ZONAS DE PROTECCION EN OBRAS HIDRAULICAS	A juicio de la CNA
6	ENCAUZAMIENTO DE CORRIENTES	
6.1	Corrientes libres en zona:	
	a) Agrícola de pequeña extensión, menor a 1,000 Ha	10-25
	b) Agrícola de extensión mediana, de 1,000 a 10,000 Ha	25-50
	c) Agrícola de extensión grande, de 10,000 Ha en adelante	50-100
	d) Para protección a poblaciones pequeñas	50-100
	e) Para protección a poblaciones medianas	100-500
	f) Para protección a poblaciones grandes	500-1000