

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Introducción

El agua es un recurso natural renovable esencial para el consumo humano, la producción de alimentos y la generación de energía eléctrica; sin embargo, aun cuando se trata de un recurso muy valioso, puede causar daños sustanciales al presentarse en grandes cantidades.

El objetivo principal para la que está diseñada una presa es regular los escurrimientos naturales de un río, para adecuar el régimen de extracciones a los requerimientos de la demanda; para ello se almacenan los volúmenes escurridos en la temporada de avenidas para luego utilizarlos en los periodos de estiaje.

El problema en el manejo de un sistema de varias presas hidroeléctricas consiste en determinar una política que indique el volumen de agua disponible en un momento dado para satisfacer la demanda con propósitos de generación.

Cuando se conocen tanto las demandas como los volúmenes de ingreso, el problema de determinar políticas de operación adecuada es relativamente sencillo. Pero cuando se considera el carácter aleatorio de los volúmenes de ingreso al vaso durante la vida útil de la presa, el problema se vuelve complejo debido a que implica procesos de decisión secuencial que algoritmos de optimización, tales como la programación dinámica estocástica, puede resolver. Otro problema importante es que en México comúnmente los registros históricos de las estaciones de medición son de pocos años para hacer el análisis de las demandas en el sistema, además de la dificultad que surge si se desea aplicar la misma política de operación para cualquier intervalo de tiempo, por ejemplo cuando la presa esté en época de estiaje o en una temporada donde se tenga más agua que la necesaria.

Es importante tener políticas de operación óptimas que se puedan simular con registros más largos que los históricos; con el fin de tener una visión del posible comportamiento del sistema en el largo plazo.

Dentro del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se han realizado estudios, desde hace más de una década, para determinar las políticas de operación de distintos sistemas de presas que operan en cascada en la República Mexicana; tales son los casos del sistema de presas del Río Grijalva, formado por las hidroeléctricas: La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas; en el que, debido a la escasa capacidad de regulación de dos de ellas, se lograron obtener políticas

considerando un sistema equivalente con las dos presas de mayor capacidad (La Angostura y Malpaso), considerando las aportaciones por carga y volumen de las presas Chicoasén y Peñitas (Domínguez y Mendoza, 2000, Domínguez et al, 2001, Arganis, 2004, Arganis J. M. L., et al., 2009).

Otro sistema analizado por dicha institución, es el sistema de presas del Río Fuerte, formado por las presas: Huites, Josefa Ortiz de Domínguez y Miguel Hidalgo, la primera con el objetivo de generación eléctrica y de riego el de las presas restantes; en este caso se realizó la optimización de las políticas para la presa Huites y se utilizó el concepto de presa equivalente para obtener las políticas de riego de Miguel Hidalgo y Josefa Ortiz de Domínguez (Domínguez et al, 2007, Arganis J. M. L., et al., 2009).

Recientemente se han construido nuevos embalses a lo largo del río Santiago, constituyéndose otro importante sistema cuyo fin principal es la generación de electricidad; además está en construcción el proyecto hidroeléctrico La Yesca, que formará parte del sistema formado por Santa Rosa, El Cajón y Aguamilpa.

La complejidad en las dimensiones del problema de optimización crece de manera exponencial, al contemplar un tercer embalse en el sistema. Pero la programación dinámica estocástica permite resolver este problema, siempre y cuando el algoritmo de optimización esté programado en un lenguaje de cómputo con lo que se logren disminuir los tiempos de cálculo.

Por otra parte, es importante generar registros sintéticos, de longitud mayor que la del registro histórico, de los volúmenes de ingreso al sistema analizado, con un método que preserve las autocorrelaciones existentes entre los registros por cuenca propia de cada presa del sistema en cascada; ya que al simular dichos registros se cuenta con mayor información sobre el funcionamiento del sistema, en cuanto a generación, déficit o derrames en el largo plazo, que la obtenga con el registro histórico cuyos registros son usualmente de pocos años ( menos de 50 ó de 30 años, según el sistema).

## **1.2 Objetivos generales**

Este trabajo tiene como objetivo general analizar el funcionamiento de vaso conjunto del sistema hidroeléctrico de presas en cascada del río Santiago, formado por La Yesca (incluyendo las aportaciones de Santa Rosa), El Cajón y Aguamilpa, bajo distintas políticas de operación, usando el concepto de curva guía; debido a su importancia como uno de los principales aprovechamientos en el país con propósitos de generación eléctrica. También se destaca la importancia de generar registros con longitud más larga que el histórico para tener un panorama del funcionamiento de estos sistemas en el largo plazo con el fin de disminuir la subjetividad e incrementar la seguridad para controlar y monitorear dicho sistema.

### 1.3 Estudios previos

En México en la década de los 70's, se realizaron diversos estudios relativos a la operación de sistemas hidroeléctricos, se puede mencionar entre otros: la política de operación de las presas La Juliana y los Arcos, del Estado de México realizada en el año 1977 por Correa A. Raúl (Correa A. Raúl, 1977).

En la década de los 80's, se analizó la operación óptima de sistemas de presas en cascada aplicada al río Grijalva, en 1989 se realizó un estudio relativo a la Operación óptima de un sistema de presas de agua potable: un caso de aplicación del método de sucesiones de aproximación a la programación dinámica hacia adelante, en dicho estudio el autor concluyó que por complejo que sea un sistema de presas y de estructuras donde se maneje el agua, es posible optimizar dicho sistema utilizando programación dinámica; en el año 1985 fue planteado un modelo de programación dinámica estocástica para optimizar la operación de presas, (Larios,1985); Domínguez (1989) propuso una Metodología de selección de una política de operación conjunta de una presa y su vertedor (Domínguez, 1989), el Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaboró las Políticas de operación mensual del sistema de presas en el río Grijalva, (Domínguez et al., 1988), en este estudio se concluyó que las políticas permitirán mantener la generación en el sistema y disminuir la posibilidad de derrames en las presas del río Grijalva.

En la década de los 90's se analiza la Operación óptima de un sistema hidráulico formado por dos presas en paralelo (Rebolledo,1990), relativo con la optimización en línea de presas hidroeléctricas, con el enfoque de la ingeniería eléctrica; en 1993 se realizó un estudio de Operación Integral del Sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva donde se concluye la necesidad de políticas de operación que minimicen los derrames por el vertedor de las presas del Grijalva por el peligro de inundación de poblados aguas abajo del sistema y al mismo tiempo maximizar la generación eléctrica en todo el sistema; en 1993 se determinaron políticas de operación mensual para el funcionamiento de la presa Aguamilpa (Domínguez et al., 1993), el informe permite determinar las políticas de operación que definen los volúmenes que deben ser turbinados cada mes y evalúa los beneficios netos (Domínguez, et al., 1993).

A partir del año 2000, se publicó un procedimiento para generar muestras sintéticas de series periódicas mensuales a través del Método Svanidze modificado aplicado a los datos de las presas La Angostura y Malpaso (Domínguez et al., 2001); Generación de muestras sintéticas y volúmenes de escurrimiento mensual de las presas La Angostura y Malpaso, para el XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad de la Habana 2002 (Domínguez et al, 2002).

En lo que se refiere al análisis de series de tiempo y generación de registros sintéticos, se pueden citar los trabajos sobre la importancia de la generación de muestras sintéticas en el análisis del comportamiento de políticas de operación de presas, (Domínguez et al., 2005), también un artículo para la revista Ingeniería Investigación y Tecnología relativo al cálculo de registros sintéticos de ingresos por cuenca propia de un sistema de presas de la región noroeste de México, caracterizada por efectos invernales (Domínguez y Arganis., 2007);

En Domínguez et al, 2006, se realizó la determinación de avenidas de diseño y ajuste de los parámetros del modelo de optimización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva, dicho estudio fue el antecedente de un proyecto realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en el año de 2009 , titulado Estudio Integral de la Cuenca Alta del Río Grijalva, (Domínguez et al, 2009), una parte de este estudio incluyó la actualización de las avenidas de diseño y la determinación de políticas de operación de las presas del río Grijalva, con el concepto de curva guía y considerando el pronóstico.

Para el caso del río Santiago, se destacan el trabajos de Domínguez y Arganis, (2008) relativo a la determinación de políticas de operación de las presas del río Santiago, pero sólo considerando a las presas el Cajón y Aguamilpa, en Domínguez et al, 2009, se realizó la determinación de sus políticas de operación; que es el precedente de este trabajo de tesis.

### 1.4 Conceptos básicos

En este apartado se mencionan los conceptos básicos de la hidrología, así como de la probabilidad y estadística, relacionados con la metodología empleada en este trabajo, dicha metodología se detallará en el capítulo siguiente.

#### 1.4.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico (Figura 1.1) describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido.



Figura 1.1. Elementos del ciclo hidrológico

Las fases del ciclo hidrológico son (Linsley, R. K, 1970):

Por tratarse de un ciclo, puede considerarse su inicio en cualquier etapa del mismo, tradicionalmente se menciona en el orden presentado a continuación.

**a) Evaporación**

El ciclo se inicia sobre todo en las grandes superficies líquidas (lagos, mares y océanos) donde la radiación solar favorece que continuamente se forme vapor de agua. El vapor de agua, menos denso que el aire, asciende a capas más altas de la atmósfera, donde se enfría y se condensa formando nubes.

**b) Precipitación**

Cuando por condensación las partículas de agua que forman las nubes alcanzan un tamaño superior a 0,1 mm comienza a formarse gotas, gotas que caen por gravedad dando lugar a las precipitaciones (en forma de lluvia, granizo o nieve).

**c) Retención**

Pero no toda el agua que precipita llega a alcanzar la superficie del terreno. Una parte del agua de precipitación vuelve a evaporarse en su caída y otra parte es retenida ("agua de intercepción") por la vegetación, edificios, carreteras, etc., y luego se evapora.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcas, lagos y embalses ("almacenamiento superficial") volviendo una gran parte de nuevo a la atmósfera en forma de vapor.

**d) Escorrentía superficial**

Otra parte circula sobre la superficie y se concentra en pequeños cursos de agua, que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos ("escorrentía superficial"). Esta agua que circula superficialmente irá a parar a lagos o al mar, donde una parte se evaporará y otra parte se infiltrará en el terreno.

**e) Infiltración**

Pero también una parte de la precipitación llega a penetrar la superficie del terreno ("infiltración") a través de los poros y fisuras del suelo o las rocas, rellenando de agua el medio poroso.

**f) Percolación**

La percolación se refiere al movimiento y filtración de fluidos a través de materiales porosos no saturados.

### **g) Evapotranspiración**

En casi todas las formaciones geológicas existe una parte superficial cuyos poros no están saturados en agua, que se denomina “zona no saturada”, y una parte inferior saturada en agua, y denominada “zona saturada”. Una buena parte del agua infiltrada nunca llega a la zona saturada sino que es interceptada en la zona no saturada. En la zona no saturada una parte de esta agua se evapora y vuelve a la atmósfera en forma de vapor, y otra parte, mucho más importante cuantitativamente, se consume en la “transpiración” de las plantas. Los fenómenos de evaporación y transpiración en la zona no saturada son difíciles de separar, y es por ello por lo que se utiliza el término “evapotranspiración” para englobar ambos términos.

### **h) Escorrentía subterránea**

El agua que desciende, por gravedad-percolación, y alcanza la zona saturada constituye la “recarga de agua subterránea.

El agua subterránea puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno. Otras veces, se produce la descarga de las aguas subterráneas, la cual pasará a engrosar el caudal de los ríos, descargando directamente en el cauce o a través de manantiales, o descarga directamente en el mar, u otras grandes superficies de agua, reiniciando así el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es un proceso continuo pero irregular en el espacio y en el tiempo. Una gota de lluvia puede recorrer todo el ciclo o una parte de él. Cualquier acción del hombre en una parte del ciclo, alterará el ciclo entero para una determinada región. El hombre actúa introduciendo cambios importantes en el ciclo hidrológico de algunas regiones de manera progresiva al desecar zonas pantanosas, modificar el régimen de los ríos, construir embalses, etc.

El ciclo hidrológico no sólo transfiere vapor de agua desde la superficie de la Tierra a la atmósfera sino que colabora a mantener la superficie de la Tierra más fría y la atmósfera más caliente. Además juega un papel de vital importancia: permite dulcificar las temperaturas y precipitaciones de diferentes zonas del planeta, intercambiando calor y humedad entre puntos en ocasiones muy alejados.

El concepto de ciclo hidrológico sienta las bases para el estudio del funcionamiento de vaso de un embalse, que se abordará en el capítulo siguiente.

### 1.4.2 Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico

Para el estudio de un aprovechamiento hidroeléctrico (Figura 1.2) deben tenerse claro los conceptos que se definen a continuación

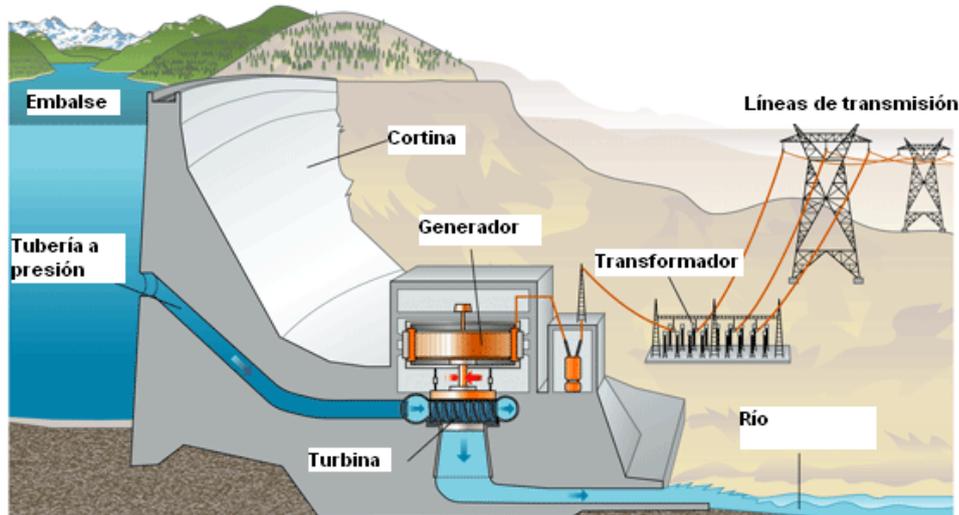


Figura 1.2 Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico

#### a) Cuenca fluvial

Es el área tributaria hasta un punto determinado sobre una corriente, y está separada de las cuencas adyacentes por el parteaguas.

#### b) Vaso de almacenamiento o embalse

Es una ampliación del valle por donde escurre una corriente, susceptible de cerrarse por medio de una presa, para acumular sus aguas.

#### c) Cortina

Obstáculo construido al paso de la corriente, principalmente para garantizar la estanqueidad de la presa ante la acción del agua. Es la encargada de obstaculizar el paso del agua, para el aprovechamiento de la misma, que puede ser para varios objetivos, tales como: riego, generación de electricidad o para el control de avenidas.

#### d) Obra de toma

Estructura que permite la extracción de agua del embalse para los fines deseados.

#### e) Obra de excedencias

Estructura que permite que los excedentes de agua pasen de nuevo a la corriente, sin peligro para la presa.

**f) Obra de control**

Permite el manejo de los excedentes, para proteger zonas aguas abajo.

**g) Obra de desvío**

Son obras de carácter temporal, que tienen por objeto controlar adecuadamente la corriente durante la construcción de la presa.

**h) Casa de máquinas**

En el caso de presas hidroeléctricas, es el sitio en donde se albergan las turbinas para la generación de electricidad, adicionalmente contiene sistemas de apoyo, sistemas de ventilación y el puesto de control de cada turbina. El cálculo de la energía total generada por cada embalse se detallará en el capítulo 4.

**i) Energía**

Se le llama energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos.

**j) Potencia**

Se define como la cantidad de energía eléctrica o trabajo, que se transporta o que se consume en una determinada unidad de tiempo, es la que posee el líquido inmediatamente antes de ser utilizado por una turbina hidráulica.

**k) Eficiencia**

Se define como la relación entre la energía útil y la energía invertida en un proceso.

### **1.4.3 Conceptos básicos de estadística y probabilidad**

Los escurrimientos en los cauces constituyen variables que se rigen por las leyes de la probabilidad; por lo que pueden ser modeladas a partir de funciones que son particulares para este tipo de variables. A continuación se presentan algunas definiciones importantes que se manejarán con detalle en capítulos posteriores.

**a) Variable aleatoria**

Una variable aleatoria es cualquier regla que asocia un número con cada resultado. No se sabe con certeza su ocurrencia, se rige por las leyes de la probabilidad (Jay L. Devore, 2008).

**b) Población**

En el ámbito de la estadística se le llama población al conjunto de elementos de referencia sobre el que se realizan las observaciones (Jay L. Devore, 2008).

**c) Muestra**

Se le llama al conjunto de casos de una población estadística (Jay L. Devore, 2008).

**d) Media**

Es un conjunto finito de números, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales (Jay L. Devore, 2008).

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{1.1}$$

**e) Desviación estándar**

Es una medida de centralización o dispersión para variables de razón y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva.

Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable (Jay L. Devore, 2008).

$$s = \sqrt{s^2} \tag{1.2}$$

Donde:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{S_{xx}}{n-1} \tag{1.3}$$

**f) Coeficiente de asimetría**

Mide si la muestra se distribuye de igual manera a ambos lados de la media:

- Si  $g_1 < 0$ , la simetría es negativa, siendo mayor la dispersión hacia la izquierda de la media.
- Si  $g_1 = 0$ , la muestra es simétrica alrededor de la media.
- Si  $g_1 > 0$ , la simetría es positiva, siendo mayor la dispersión hacia la derecha de la media.

**g) Coeficiente de autocorrelación**

Dados n pares de observaciones  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , en natural hablar de que  $x$  y  $y$  tienen una relación positiva si las  $x$  grandes se combinan con  $y$  grandes y las  $x$  pequeñas con  $y$  pequeñas. Asimismo, si las  $x$  grandes se combinan  $y$  pequeñas y las  $x$  pequeñas con  $y$  grandes, entonces se implica una relación negativa entre las variables (Jay L. Devore, 2008).

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (1.4)$$

**h) Coeficiente de correlación cruzada**

Indica la relación lineal entre dos variables al azar.

$$R_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{S_{x1}(k) S_{y2}(k)} \quad (1.5)$$

Donde:

$R_{xy}(k)$  Coeficiente de correlación cruzada de orden k.

$S_{x1}, S_{y2}$  Variables auxiliares que se definen como

$$S_{x1}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left\{ \frac{1}{(n-k)^2} (\sum_{i=1}^n X_i)^2 \right\}^2 \quad (1.6)$$

$$S_{y2}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left\{ \frac{1}{(n-k)^2} (\sum_{i=1}^n Y_{i+1})^2 \right\}^2 \quad (1.7)$$

**1.4.3.1 Funciones de distribución de probabilidad**

Algunas funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología son las siguientes:

**a) Función de distribución normal**

Se dice que una variable aleatoria continua X tiene una distribución normal con parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  ( o  $\mu$  y  $\sigma^2$ ), donde  $-\infty < \mu < \infty$  y  $\sigma > 0$ , si la función de densidad de probabilidad X es:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (1.8)$$

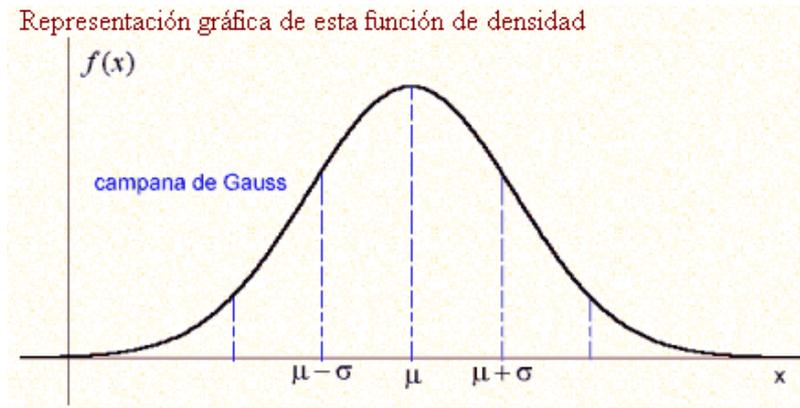


Figura 1.3 Función de densidad de la distribución normal

**b) Función de distribución lognormal**

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (1.9)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución, la media y desviación estándar son también  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente de los logaritmos de la variable aleatoria.

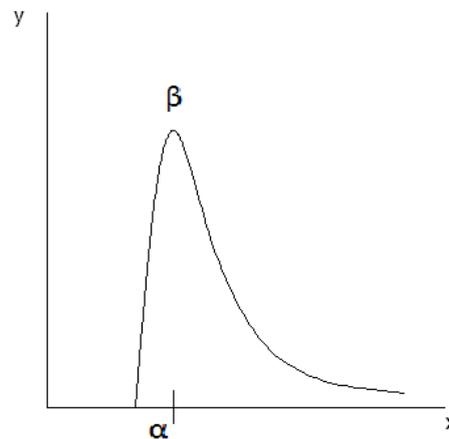


Figura 1.4 Función lognormal

La variable estandarizada se define como:

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta} \quad (1.10)$$

**c) Función de distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros**

La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (1.11)$$

Donde  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  y  $\delta_1$  se evalúan a partir de  $n$  datos medidos. Finalmente se obtiene la variable  $y$  de la siguiente forma:

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \quad (1.12)$$

#### d) Función de distribución Gumbel

Supóngase que se tienen  $N$  muestras, cada una de las cuales contiene  $n$  eventos. Si se selecciona el máximo  $x$  de los  $n$  eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que  $n$  aumenta, la función de distribución de probabilidad de  $x$  tiende a (Aparicio M. 2008):

$$f(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (1.13)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (1.14)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de la función

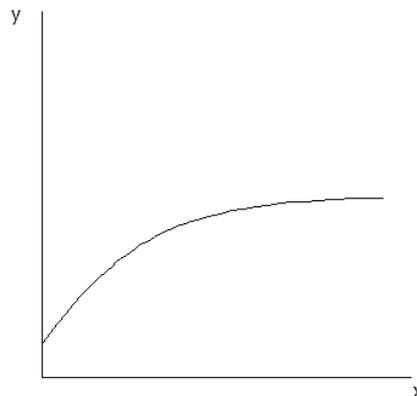


Figura 1.5 Función de distribución Gumbel

#### e) Función de distribución Doble Gumbel o Gumbel de dos poblaciones

La función de distribución de probabilidad Doble Gumbel permite analizar muestras de datos formadas por dos poblaciones distintas. Es muy útil cuando se tienen datos por ejemplo, de gastos máximos provocados por ciclones o las debidas a tormentas de invierno, los cuales sobresalen de los demás, ya que forman parte de otra población.

La función Doble Gumbel y los 5 parámetros que la definen:  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  y  $P$ , en donde los subíndices 1 y 2 indican las poblaciones que forman la muestra.  $P$  y  $1-P$  son las proporciones de datos de cada población (Jiménez, 1997)

El método de momentos consiste en estimar los parámetros de una función de distribución, para que se "ajuste" a un conjunto de datos, consiste en igualar los valores de las características estadísticas de la muestra con las de la población; esto es, hacer que la media de los valores muestreados sea igual a la de la función de distribución (a la que se llamará primer momento), que las variancias sean iguales (segundo momento), el coeficiente de asimetría (tercer momento), etc., hasta establecer tantas ecuaciones como parámetros tenga la función.

Otro método que existe, es el de máxima verosimilitud, se supone que el mejor parámetro de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada. Se utiliza la función de verosimilitud  $L(x)$ . Mientras mayor sea esta función mayor será el ajuste de la función de distribución a los datos.

La función de verosimilitud es el producto de los valores de la función de densidad de probabilidad teórica, calculada para cada valor  $x_i$  de la muestra, es decir:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) = f(x_1) * f(x_2) * f(x_3) * \dots * f(x_n) \quad (1.15)$$

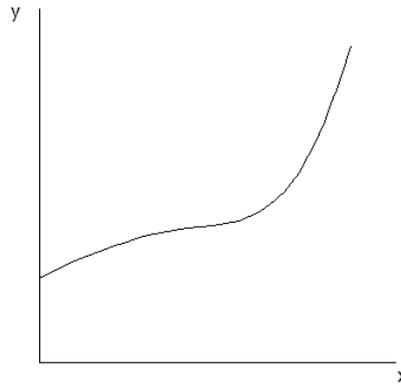
Donde  $\prod_{i=1}^n$  es el operador que indica el producto de los valores que comprende.

Debido a que varias funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, es conveniente trabajar con la función logaritmo de la función de verosimilitud

$$H = \ln L = \sum_{i=1}^n \ln[f(x_i)] \quad (1.16)$$

De esta manera para poder estimar los valores de los parámetros de la función que hacen máxima a la función  $H$ , se deriva dicha función con respecto a cada uno de los parámetros y el resultado se iguala a cero. Al igualar a cero cada una de las derivadas se tendrán tantas ecuaciones como parámetros tenga la función de probabilidad, y de estas se despejan los parámetros para hacer el ajuste respectivo.

Este método teóricamente es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información, ya que produce los estimativos de parámetros más eficientes, aquellos que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio, sin embargo para algunas distribuciones de probabilidad, no existe una solución matemática y al maximizar la función logaritmo de verosimilitud resulta bastante complicado, es por ello que en general el método de los momentos es más fácil de aplicar que el método de la máxima verosimilitud y resulta ser el más apropiado para los análisis prácticos en hidrología.



**Figura 1.6 Función de distribución doble Gumbel**

### 1.5 Conclusiones

Considerando la investigación efectuada en el capítulo, es notable considerar que la simulación de funcionamiento de vaso en un sistema de presas en cascada es un área que se ha estudiado y desarrollado con un enfoque teórico, que a través del tiempo se le han sumado aplicaciones y estudios en el caso particular los sistemas de presas en México; para conseguir mayor eficiencia en la operación de las presas lo cual trae consigo finalmente un beneficio económico y social.

Los estudios realizados en la última década, integran los avances y aportaciones que logró la investigación de los años 70's y 80's en el tema de políticas de operación de un sistema de presas en cascada. Toda la investigación realizada tiene la finalidad de buscar eliminar subjetividad y producir un cambio en la forma, un tanto empírica, que por muchos años se le ha dado a la operación de presas en el país.

Los conceptos básicos mencionados en este capítulo posteriormente serán utilizados con frecuencia en el desarrollo de este trabajo.

### 1.6 Referencias

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México, 2008.
2. Arganis Juárez, Maritza Liliana. Operación Óptima de un Sistema de Presas en Cascada para Generación Hidroeléctrica Tomando en Cuenta Condiciones Reales de Operación y el Uso de Muestras Sintéticas para el Pronóstico. Tesis Doctoral. UNAM. 2004.
3. Arganis Juárez, Maritza L. et al. Estudio Integral de la Cuenca Alta del Río Grijalva  
3. Manejo Óptimo de las Presas, elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería. UNAM. México 2009.

4. Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia, Hidrología, A.1.6 Análisis Estadístico. México 1982.
5. Domínguez, M. R. Metodología de Selección de una Política de Operación conjunta de una Presa y su Vertedor. Tesis Licenciatura. UNAM, 1989.
6. Domínguez, M. R., Mendoza R. R. Operación Integral del Sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva, elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 1993.
7. Domínguez, M. R., Mendoza, R. R. Funcionamiento de las Presas Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas sobre el Río Grijalva, elaborado para la CNA por el Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 2000.
8. Domínguez, M. R., Mendoza, R. R., Arganis, J. M. L. Revisión de Políticas de Operación de las Presas Angostura y Malpaso, en el Río Grijalva, elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM. México 2001.
9. Domínguez, M. R. Generación de Muestras Sintéticas y Volúmenes de Escurrimiento Mensual de las Presas La Angostura y Malpaso. Artículo para el XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad de la Habana. 2002.
10. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., Carrizosa E. E., Fuentes M. G. E., Echeverri V. C. A. Determinación de Avenidas de Diseño y Ajuste de los Parámetros del Modelo de Optimización de las Políticas de Operación del Sistema de Presas del Río Grijalva. Elaborado para la CFE por el Insituto de Ingeniería de la UNAM. Informe Final. Diciembre del 2006.
11. Domínguez M. R., Arganis J. M. L. Carrizosa E. E., De Luna, C. F, Esquivel G.G., Mendoza R. A. Determinación de Políticas de Operación del Río Fuerte. Para CFE. Informe Final Diciembre del 2007.
12. Domínguez, M. R., Arganis J. M. L, Carrizosa E. E., Esquivel G. G. "Determinación de Políticas de Operación del Río Santiago". Informe elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Diciembre del 2008 (Informe parcial).
13. Domínguez, M. R., Arganis, J M. L., Mendoza, R. R., Carrizosa, E. E., Alegría, D. A., Peña, D.F. Determinación de Políticas de Operación del Río Santiago, elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM. México 2009.
14. Jay L. Devore. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. USA, 2008.
15. Jiménez, E. M., et al. Manual de Operación de los Programas AX.EXE y CARACHID.EXE (para Hidrología). CENAPRED. México, 1997.
16. Larios Malanche, Raúl. Modelo de Programación Dinámica Estocástica para Optimizar la Operación de Presas. Tesis Licenciatura. UNAM, 1985.
17. Linsley, R. K. Hidrología para Ingenieros, México, Mc.Graw-Hill, 1970.