

**AVENIDAS DE DISEÑO PARA LOS TÚNELES  
DE CONDUCCIÓN DEL RÍO GRIJALVA**

**INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

Tres cuartas partes de la superficie de la Tierra están cubiertas por mares, lagos, lagunas y ríos.

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633,000 km, en la que destacan 50 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie de la extensión territorial continental del país (CONAGUA, 2008).

Dos terceras partes del escurrimiento superficial pertenece a siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá.

La superficie de sus cuencas representa el 22% de la del país. Los ríos Balsas y Santiago pertenecen a la vertiente del Pacífico y los otros cinco a la vertiente del Golfo de México. Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma, Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior (CONAGUA, 2008).

El río Grijalva, que nace a 4,026 metros de altura en el volcán Tacaná en Guatemala; se alimenta de los ríos San Miguel y San Gregorio para tener una cuenca total de 53 mil kilómetros cuadrados y una longitud de 600 kilómetros, el segundo más caudaloso del país y el mayor en potencial hidroeléctrico instalado en México.

El complejo hidroeléctrico del río Grijalva fue construido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el estado mexicano de Chiapas, con el objeto de regular avenidas y generar energía eléctrica; está compuesto por cuatro presas con sus respectivos embalses; de aguas arriba hacia aguas abajo son La Angostura (1975), Chicoasén (1980), Malpaso (1969) y Peñitas (1987) (Marengo, 2003).

Debe señalarse que cada año, el Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas (CTOOHR) (integrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la CFE, el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), el Instituto de Ingeniería (II) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)), establece niveles de seguridad para el comportamiento de las presas en México (Marengo, 2003), y tanto en la presa de La Angostura como en la de Malpaso, se fija la generación media anual considerando los niveles que tienen el primero de enero de cada año y se alcanzan niveles de conservación en los meses de lluvias.

La planicie de los ríos Grijalva y Usumacinta se localiza aguas abajo de la central hidroeléctrica Peñitas, misma que está conformada por una gran cantidad de ríos, lagunas y arroyos. Entre los principales ríos que forman este complejo están: el río Mezcalapa, que recibe los escurrimientos de la cuenca del río Grijalva, registrados en la estación Peñitas, y que va de sur a norte hasta la altura de la ciudad de Cárdenas, Tabasco, donde cambia su rumbo hacia el este y se bifurca formando los ríos Samaria y Carrizal. El río Samaria escurre al norte y en dirección paralela al Carrizal, posteriormente cambia su rumbo hacia el noreste hasta su confluencia con el río González, hasta desembocar en el Golfo de México a la altura del puerto de Dos Bocas. El río Carrizal escurre en dirección paralela al Golfo de México hasta la ciudad de Villahermosa (CFE, 2009). La precipitación de la región es la mayor del país y una de las más altas del mundo.

## Introducción

Durante los meses de mayo a noviembre el Golfo de México se ve influenciado por la presencia de sistemas meteorológicos, tales como huracanes y ondas tropicales. Adicionalmente a partir de septiembre empiezan a incidir sobre el territorio del sureste los frentes fríos. Sin embargo, el final de la época de lluvias es la que ocasiona los peores daños en el sureste mexicano, ya que se producen superposiciones de frentes fríos y tormentas tropicales que tradicionalmente han ocasionado avenidas hasta de 8,000 m<sup>3</sup>/s en la Presa de Peñitas (Marengo, 1999).

La temporada de lluvias del 2007 fue especialmente severa en el sureste de México, particularmente en los meses de septiembre y octubre, lo que provocó la mayor inundación que ha ocurrido en el territorio tabasqueño (CFE, 2009).

El mes de octubre se caracterizó por la ocurrencia de tres eventos meteorológicos importantes en cuanto a precipitación: el frente frío No. 2, que se combinó con la circulación de una baja presión sobre Guatemala y que ocasionó lluvias intensas durante los días 10 y 11 de octubre, con precipitaciones superiores a 150 mm. Posteriormente, se presentó del 22 al 24 de octubre, la entrada del frente frío No. 4 hacia Tabasco y Chiapas, el cual generó precipitaciones intensas con máximos de 100 a 200 mm. En los días del 28 al 30 de octubre, entró una masa de aire frío intensa y se desplazó hacia el sur afectando el suroeste del Golfo de México y el sureste del país en asociación con el frente estacionario No. 4. En este tercer evento, las lluvias extraordinarias sobre Tabasco y Chiapas fueron ocasionadas por la convergencia de sistemas de origen tropical e invernal: una masa de aire polar y la tormenta tropical “Noel”, más el efecto orográfico del viento sobre las zonas montañosas; en solo 4 días, tuvieron la equivalencia al 25% de la precipitación promedio anual en esa zona (1,077 mm) (CFE, 2009). Prácticamente quedó inundado todo el estado de Tabasco.

Debe tenerse en cuenta un hecho muy importante que ocurrió en la cuenca del río Grijalva, en 1983 hizo erupción el Chichonal, el cual expulsó grandes cantidades de ceniza, que con el transcurso de los años llegaron al río, con lo cual disminuyó sensiblemente la capacidad hidráulica del cauce, al extremo de que al operar las turbinas de Peñitas a plena carga (1,440 m<sup>3</sup>/s), el río se desborda en varios puntos.

A esto debe unirse el desordenado crecimiento demográfico en la zona, que ha provocado la invasión en cauces y riveras, por lo que al momento de producirse descargas extremas en los ríos, estos afectan a la población (Marengo, 2003).

Por otra parte, el día 4 de noviembre de 2007 se produjo un deslizamiento súbito de tierra y roca de 55 millones de m<sup>3</sup>, que fue causado por la saturación del suelo y las particularidades del fracturamiento y la estratificación de la roca, en la ladera derecha del río Grijalva, en el municipio de Ostuacán, Chiapas, ubicado a unos 16 km aguas arriba de la C.H. Peñitas y a 56 km aguas abajo de la C.H. Malpaso (CFE, 2009).

El alud de roca, tierra y árboles (equivalente a 125 millones de toneladas), de los cuales 18 millones de m<sup>3</sup> obstruyeron por completo el cauce del río Grijalva (CFE, 2009), al precipitarse sobre el cauce del río, provocando una ola de aproximadamente 50 metros de altura, que destruyó la comunidad Juan de Grijalva, consecuentemente fue necesario parar

la generación hidroeléctrica de las cuatro presas del Grijalva que estaban prácticamente llenas.

El aumento progresivo del nivel del agua en el embalse superior del tapón representó un factor de riesgo de falla masivo o derrame incontrolado por encima del tapón, que podría afectar la cortina de la presa Peñitas con consecuencias catastróficas para las poblaciones situadas aguas abajo (CFE, 2009).

La situación en cuanto a riesgos era enorme; se tenía como antecedente la mayor precipitación de la historia en la zona del sureste mexicano, estaba prácticamente bajo el agua todo el estado de Tabasco y las presas aguas arriba del deslizamiento estaban prácticamente llenas (se tenían almacenados del orden de 37,500 millones de  $m^3$ ); no se contaba con accesos suficientes al sitio del deslizamiento y el pronóstico climatológico era que seguiría lloviendo sobre la zona (CFE, 2009).

El riesgo más grave (CFE, 2009) era en cuanto a un posible desbordamiento del deslizamiento que por su naturaleza y experiencias a nivel mundial anteriores, podría ser enormemente catastrófico (hay que recordar que la experiencia mundial en casos similares, arroja la cifra de que un 70% de caídos fallaron catastróficamente por acumulación del agua, aguas arriba del mismo).

La avenida (gasto pico y volumen) de agua sobre la presa de Peñitas, era muy grande (CFE, 2009); se podrían llegar a liberar del orden de 800 millones de  $m^3$  (**entre el deslizamiento y la corona de la presa de Peñitas, solo cabían 600 millones de  $m^3$** ) y el gasto pico de la avenida calculada con las ecuaciones de Froehlich (1995) de 32,672  $m^3/s$ ; Mc Donald (1984) de 87,681  $m^3/s$ , el mismo Mc Donald (1984) 26,931  $m^3/s$  y en el caso más optimista Barros (2003) de 17,902  $m^3/s$ .

Por otro lado, las avenidas que se podían liberar sobre la planicie tabasqueña ya inundadas eran por su magnitud verdaderamente catastróficas; según Froehlich (1995) 24,298  $m^3/s$ , Mc Donald (1984), 39,875  $m^3/s$ , el mismo Mc Donald (1984) 22,263  $m^3/s$  y Barros (2003), 12,721  $m^3/s$ ; en todos los casos el volumen susceptible de derramarse sobre las ciudades de Humanguillo, Cárdenas, Comalcalco y Villahermosa, era del orden de 600 millones de  $m^3$ . Con objeto de definir la estrategia a seguir, se contó con la opinión técnica de ingenieros especializados de la CFE, CONAGUA y el II UNAM, así como de especialistas independientes y del CTOOHR (CFE, 2009).

La recomendación del grupo fue construir de manera inmediata, en una primera etapa, un canal en el taponamiento para controlar y conducir el agua almacenada en el embalse superior y evitar el riesgo de daño inmediato.

En estas condiciones, se proyectó e inició la excavación de un canal en el nivel más bajo posible.

Uno de los puntos que había que abordar con urgencia era la remoción del material depositado en el cauce (18 millones de  $m^3$ ) y cuyo objetivo era restablecer la comunicación del río.

## Introducción

El 5 de noviembre de 2007 la CFE en coordinación con la CONAGUA, inició labores en la zona a fin de lograr la seguridad de la población en zonas aledañas, la integridad de las presas, y la viabilidad de la generación hidroeléctrica en el corto plazo (CFE, 2009).

Como primera acción, se planteó excavar antes del 15 de diciembre de 2007 en una primera etapa a la cota 100, con una cubeta de seis metros de ancho y un volumen de excavación del orden de 900,000 m<sup>3</sup>. Posteriormente, en la segunda etapa, los trabajos estuvieron encaminados a ampliar el canal a una cubeta de 70 m a la elevación 85.

Dado que las lluvias extraordinarias continuaban, y el caudal del río Tzimbac (afluente del río Grijalva que fluye sin control) incrementaban el nivel del agua en el embalse superior del tapón a razón de 10 cm cada día, los trabajos iniciaron con toda celeridad, convocando a las principales empresas constructoras del país para trasladar maquinaria y personal al sitio de manera inmediata, a pesar de las grandes dificultades para el acceso (CFE, 2009).

Para llevar a cabo la programación de los trabajos de remoción del material fue necesario revisar y actualizar de manera urgente la hidrología de detalle de la zona y estimar los posibles hidrogramas asociados a diferentes condiciones.

Se elaboraron modelaciones matemáticas, donde como resultado de ellas se obtuvieron posibles hidrogramas generados ante una ruptura súbita del deslizamiento de tierra, lo cual se estimó podría presentarse en un tiempo cercano a 8 horas, para ello se utilizó la modelación de flujo no permanente unidimensional del cauce que se forma entre el deslizamiento y la cortina de la central hidroeléctrica Peñitas (CFE, 2009).

Dicha simulación se hizo con el objeto de estimar el tiempo de traslado de la onda generada por el rompimiento súbito del tapón de tierra y los posibles niveles alcanzados en el vaso de Peñitas, ya que la ruptura ocasionaría un incremento rápido de ella. Esto se hizo para garantizar que los niveles se mantuvieran dentro de los rangos de seguridad de las presas.

También se elaboraron modelos de transferencias de volúmenes de un almacenamiento a otro para estimar los posibles niveles iniciales y finales para diversas combinaciones de operación de la Presa Malpaso y avenidas que se podrían presentar por los ríos que descargan al vaso formado entre la Presa Malpaso y el deslizamiento.

La comunicación se restableció mediante la excavación de un canal con lo que se garantizó el flujo del agua entre los vasos.

En la segunda etapa, se realizó un monitoreo detallado de la erosión y el comportamiento del canal donde se identificaron entre otros aspectos, su evolución en el tiempo y localización de la sección de control que se presentaba desde la salida del canal hacia aguas arriba (erosión regresiva), debido a la forma heterogénea del acomodo del material deslizado en conjunto con las velocidades del flujo (CFE, 2009).

Para aumentar la capacidad de conducción, de manera paralela al funcionamiento del canal se realizaron obras de ensanchamiento del mismo, se estimó la capacidad requerida, y se determinó bajar la elevación de la plantilla, con la problemática de los procesos

constructivos y el movimiento del material respectivo que esto implica ya que los tiempos disponibles eran cortos.

A partir de la información recopilada sobre el funcionamiento del canal, se realizaron modelaciones matemáticas para estimar su comportamiento con diferentes anchos y a diferentes elevaciones de plantilla, para dar la capacidad de tránsito a una avenida de diseño con pico de 2,700 m<sup>3</sup>/s (CFE, 2009).

A finales de 2007 se llevó a cabo la construcción del canal ante el deslizamiento del río Grijalva, se removieron aproximadamente 1,200,000 m<sup>3</sup> de material en 44 días, equivalentes al 12% del volumen removido en la C.H. El Cajón durante dos años. A principios de 2008 se amplió el canal para garantizar la conducción adecuada del caudal del sistema hidroeléctrico del río Grijalva, así como reducir el nivel de los embalses en las presas aguas arriba del tapón. Durante esta etapa se removió un volumen total de 1,909,653 m<sup>3</sup> de materiales. El 11 de marzo de 2008 se restableció la generación del Sistema Grijalva.

En lo que respecta a la tercera etapa, dentro de los trabajos realizados, se presentaron modelaciones matemáticas para estimar la superficie libre del agua y las velocidades en el canal que se formaron el cual tiene una longitud de 600 m. Aunado a lo anterior, se elaboró un modelo físico en el laboratorio de hidráulica de la CFE, para corroborar los resultados obtenidos y predecir el comportamiento del agua en el canal, lo cual en la realidad, fue muy semejante (CFE, 2009).

La construcción inmediata del canal permitió restablecer parcialmente el flujo del río, la operación de las presas aguas arriba y evitar la erosión de la masa deslizada. El 11 de junio de 2008, CFE reportó que las presas del Grijalva (Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas) se encontraban dentro de los niveles de almacenamiento fijados por el CTOOHR para recibir la próxima temporada de lluvias, asimismo, se reportó que el canal funcionaba de manera normal.

En nuestro país, lo ocurrido en Juan de Grijalva es un fenómeno que sale de lo convencional principalmente por tres razones, primera el aspecto social ya que al interrumpir el flujo de uno de los ríos más caudalosos del país puso en riesgo los asentamientos humanos ubicados aguas arriba y aguas abajo del tapón, debido a la posible ocurrencia de inundaciones; segunda el aspecto económico, ya que imposibilitó la operación normal de las centrales hidroeléctricas Malpaso y Peñitas y finalmente, por la magnitud del deslizamiento.

Este deslizamiento planteó uno de los mayores retos a la ingeniería mexicana de que se tenga noticia.

Ya estando controlada la emergencia, dentro de la tercera etapa se planeó el diseño de estructuras permanentes que permitan el manejo del río Grijalva en caso de otro posible deslizamiento en la misma zona, ya que es muy probable por el tipo de material y condiciones geológicas presentes en la zona y la alta precipitación de la misma.

Se debe recordar que la estimación de avenidas de diseño es uno de los análisis hidrológicos más importantes, ya que es la base para el diseño hidráulico de vertedores, obras de desvío rectificación de cauces, bordos de protección contra inundaciones y todo tipo de presas o embalses para el control de avenidas. El diseño hidrológico se emplea para dimensionar las obras y el diseño hidráulico para asegurar su buen funcionamiento (Campos, 2006).

En todo análisis probabilístico de datos hidrológicos y principalmente en el de avenidas, el proceso se inicia con una recopilación de información concerniente a la cuenca y su comportamiento hidrológico.

Cuando se cuenta con información hidrométrica (gastos o niveles máximos anuales) en o cerca del sitio de las obras en proyecto, la estimación de las avenidas se realiza bajo las técnicas conocidas como Análisis probabilístico de avenidas, el cual consiste en realizar la predicción de crecientes asociadas a periodos de retorno, basándose en técnicas de estadística (Campos, 2006).

Las estimaciones de crecientes realizadas a través del análisis probabilístico de sus datos, para obtener avenidas de diseño, son cuantificaciones que requieren que sean lo más precisas posible, ya que una sobreestimación puede conducir a un gran incremento del costo de una obra, mientras que una subestimación generará un mayor riesgo de daños e incluso pérdidas de vidas humanas. Las reflexiones anteriores destacan la importancia de las estimaciones de crecientes en el campo de los diseños hidrológicos de infraestructura hidráulica, buscando su seguridad y economía (Campos, 2006).

Según la *International Commission of Large Dams (ICOLD)*, la avenida de diseño se define generalmente como la avenida más grande que puede pasar en un sitio sin causar destrucción. En el caso de una presa, las obras que deben resistir los efectos de las avenidas son la cortina y el vertedor.

La avenida de diseño está en función directa con el grado de riesgo que se puede admitir en cada obra (Marengo, 1994), ya que puede diferir para cada tipo o tamaño de presa, e incluso para cada país.

La importancia de la estimación de la avenida de diseño, aunada a los avances y a los progresos en el campo de las matemáticas en los últimos años, permiten contar a la fecha con una gran variedad de métodos disponibles para el cálculo de las mismas; los más simples son de aplicación rápida, pero pueden ser imprecisos, poco confiables y generalmente están asociados a una sobrevaloración del gasto pico de entrada (Marengo, 1994).

Los métodos complicados (Marengo, 1994) toman en consideración en forma más minuciosa todos los fenómenos que se originan sobre la cuenca en estudio y permiten hacer una evaluación más realista de las avenidas importantes, pero pueden aplicarse únicamente en la medida que exista una base confiable y detallada de datos. Requieren además de mucho cuidado; por tanto, solo pueden ser elaborados por personal altamente especializado.

Describir con detalle los criterios de diseño ante avenidas puede ser materia de extensas discusiones y detallados desarrollos que escapan del objetivo de esta tesis; sin embargo, se puede decir que existen básicamente tres tipos de criterios: los empíricos, los estadísticos y los hidrometeorológicos. A continuación se mencionan algunos de los aspectos más importantes que se relacionan con el diseño de avenidas, cuyas variables influyen en la evaluación del riesgo de falla.

### **Criterios empíricos**

Agrupan a los métodos que evalúan la avenida de diseño en función de uno o más parámetros físicos de la cuenca, como superficie y pendiente media. Han tenido gran uso para proyectos ya construidos, y a la fecha se utilizan para verificar el orden de los gastos obtenidos con otros programas (Marengo, 1994).

En general, estos criterios se han establecido con base en calibraciones reales e históricas de cuencas que tienen ciertas características fisiográficas similares, y su aplicación se ha hecho al considerar que se debe tener similitud entre las cuencas analizadas, las cuales se pueden subdividir en las siguientes variantes:

- Definición directa del gasto pico de la avenida, solo en función de las características de la cuenca en cuestión.
- Especificación del hidrograma de la avenida, en relación con la lluvia máxima y las características de la cuenca. Entre estos métodos está el racional y el del servicio de conservación de los suelos (*United State Bureau Reclamation, USBR*), etc.
- Determinación de la envolvente de gastos máximos observados en una región dada, para los que se han establecido envolventes, generadas en diversas regiones del mundo. Permiten hacer una evaluación rápida de la avenida de diseño al nivel de estudios e inventarios de sitios, o bien para verificar los resultados obtenidos por medio de otros métodos como los estadísticos o hidrometeorológicos.

### **Criterios estadísticos**

#### **▪ Práctica actual**

El principio de aplicación de estos criterios consiste en ajustar una distribución estadística conocida a un registro de datos; donde lo que generalmente se hace es recabar la información de gastos y volúmenes mixtos en una estación dada para  $N$  años de registro y se procede a hacer el ajuste mencionado. Estas distribuciones fundamentalmente son la Gumbel, la Gumbel mixta o doble Gumbel, la log-normal (o de Galton-Gibrat), la log-normal de tres parámetros, la de Pearson tipo III, la log-Pearson tipo III, etc.

En nuestro país es práctica usual la Gumbel con la misma clase de ajuste.

El ajuste de estas distribuciones se puede hacer por medio del método estadístico de los segundos momentos y el de máxima verosimilitud. Existen pruebas estadísticas que permiten verificar si un tipo de distribución se ajusta o no a un grupo de datos, sin embargo, se acostumbra utilizar el mínimo error cuadrático obtenido entre la serie experimental y la teórica como el criterio de mejor ajuste (Marengo, 1994).



El gran inconveniente de este método es que el periodo de registros es generalmente pequeño (de 25 a 50 años como máximo) y se hace una extrapolación a gastos que se fijan con periodos de retorno 200 ó 400 veces mayores, por lo que los errores por extrapolación pueden ser considerables.

▪ **Método de Pegram**

El método propuesto por Pegram (1992), se basa en la función de densidad de probabilidad normal bivariada de una muestra estandarizada de los logaritmos del gasto pico y del volumen (valores máximos anuales) con igual período de retorno.

Con base en hidrogramas históricos, se obtiene pares de datos del gasto pico y el volumen asociados a períodos de retorno fijos.

Se obtiene entonces con una función de distribución bivariada lognormal los valores estandarizados de igual valor de período de retorno.

Estos valores se correlacionan entre sí para distintos niveles de significancia (100%, 75%, 50% y 25%) y se obtiene como resultado para cada período de retorno dado, el gasto pico y el volumen asociados simultáneamente entre sí, que dibujados se pueden aproximar a hipérbolas teóricas.

Las curvas ajustadas permiten elaborar tablas de período de retorno-probabilidad-gastos pico-volumenes de las distintas variables estandarizadas.

▪ **Método de Domínguez**

Domínguez (1989) propuso utilizar avenidas sintéticas obtenidas a partir de métodos estadísticos, las cuales están basadas en la determinación conjunta de las funciones de densidad de probabilidades del gasto y el volumen de las avenidas.

Domínguez propone utilizar toda la información disponible de las avenidas máximas registradas cada año. Para ello se trabaja no solo con el valor máximo y el volumen total de cada avenida, sino que se considera la información de los gastos máximos anuales para todas las duraciones parciales que se requieran. Así, si una avenida máxima anual tiene una duración de 8 días, además de su valor máximo y su volumen, se considera el gasto máximo promedio en dos, tres días, y así sucesivamente hasta el gasto medio máximo para la duración total (Marengo, 1994).

De esta forma, con la información de las avenidas máximas anuales registradas, se puede estimar una función de distribución de probabilidad en la que los coeficientes dependen de la duración parcial considerada.

Este método se considera como el de mejor aplicación en el desarrollo de este trabajo, fundamentalmente porque se considera que permite un mejor manejo de la información real respecto a cada una de las funciones de distribución de probabilidad analizadas.

Con este método se estimaron las avenidas de diseño de las cuatro presas del sistema hidroeléctrico Grijalva y para los ríos Tzimbac y Sayula, éstas se muestran en el capítulo 3.

### **Criterios hidrometeorológicos**

Estos criterios se basan en la llamada Precipitación Máxima Probable (PMP), que se define como la máxima tormenta meteorológica posible para una cuenca y una duración dadas, la cual se produciría si en dicha cuenca ocurrieran simultáneamente los valores máximos de un número razonable de factores que causan la precipitación. Se pueden seguir varios métodos para estimar la PMP; los meteorológicos propiamente dichos, que se pueden aplicar a zonas orográficas y no orográficas, y el método de Hershfield, que puede emplearse cuando sean escasos los datos meteorológicos, pero existan en cambio datos de precipitación (Marengo, 1994).

Para garantizar que el embalse de la presa Peñitas pueda funcionar a largo plazo, se propuso como solución definitiva, además del canal existente, construir 2 túneles de 14 x 14 m sección portal, cuyo principal objetivo es permitir el paso del flujo que se produce en la presa de Malpaso, los cuales están actualmente en construcción.

La obra, que se ubica en el ejido Paso de la Virgen, municipio de Ostucán, en Chiapas, garantizará que aunque ocurra otro deslizamiento en la zona de Juan de Grijalva que obstruyera el canal, los túneles tienen la capacidad de transitar de manera segura una avenida de diseño con periodo de retorno ( $T_r$ ) igual a 100 años.

La obra tiene el objetivo de garantizar la seguridad de la planicie tabasqueña durante las crecidas del río.

Los objetivos que se pretenden cubrir en el desarrollo de este trabajo de tesis son los siguientes:

Describir el deslizamiento en el río Grijalva, desde sus causas, daños, riesgos derivados de éste y el manejo de la emergencia.

Presentar las avenidas de diseño utilizando métodos estadísticos y funciones de probabilidad para las cuatro presas que se encuentran a lo largo del río Grijalva y para las aportaciones de los ríos Sayula y Tzimzac al río Grijalva.

Justificar la construcción de los túneles intercomunicadores en el río Grijalva, su diseño y funcionamiento hidráulico.

Para cubrir los objetivos propuestos se han desarrollado cinco capítulos:

El primer capítulo se dedica a una recopilación breve de antecedentes, los deslizamientos similares registrados en el mundo, las características fisiográficas de la cuenca, así como, los principales datos técnicos de las centrales hidroeléctricas instaladas a lo largo del río Grijalva, que por su potencial hidroeléctrico instalado es el más importante y el segundo en cuanto al caudal en nuestro país. Se describe la situación meteorológica de la zona previa al deslizamiento. También se presenta un resumen de las medidas de mitigación de inundaciones que se han realizado en la planicie en caso de emergencia.

## Introducción

El segundo capítulo es una descripción del deslizamiento que se presentó en Noviembre de 2007 y que generó un tapón en la zona inmediata aguas arriba del vaso de la presa Peñitas, que obstruyó por completo el cauce del río Grijalva; sus causas, los daños, los riesgos y el manejo de la emergencia, ya que lo anterior generó un vaso de almacenamiento que puso en riesgo la presa Peñitas en caso de falla súbita.

El capítulo tres presenta las avenidas de diseño utilizando métodos estadísticos y funciones de probabilidad para las cuatro presas que se encuentran a lo largo del río Grijalva, para los ríos Sayula y Tzimbac y para los embalses superior e inferior del deslizamiento.

El capítulo cuatro comprende el objetivo, diseño, construcción y funcionamiento hidrológico e hidráulico de los túneles intercomunicadores.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones de diseño que se derivan del trabajo realizado. Además se incluye un Anexo, donde expone la Norma Hidrológica de 1996, que establece los periodos de retorno de diseño.