

OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES

Narciso Arcos
Maldonado
Ingeniero Civil
Ciudad universitaria
Chilpancingo. Gro. México
narciso_am@hotmail.com

Francisco Javier
Vázquez Jiménez
Ingeniero civil
Ciudad universitaria
Chilpancingo. Gro. México
ingenieria@uagro.mx

José Luis Dionicio
Apreza
Ingeniero Civil
Ciudad universitaria
Chilpancingo. Gro. México
ingenieria@uagro.mx

Eduardo Corona
Cerecero
Maestro en Ingeniería
Ciudad universitaria
Chilpancingo. Gro. México
ingenieria@uagro.mx

RESUMEN

Los sismos en el estado de Guerrero se encuentran entre los peligros naturales más espectaculares; sin embargo, con el cambio climático, las fuertes lluvias han afectado a más personas y provocado mayores daños en los últimos años. De ahí que es importante poner atención a los problemas relacionados con las inundaciones.

El presente trabajo sirve para describir las diferentes estructuras, su objetivo, conceptos básicos de funcionamiento y principales normas y consideraciones para su diseño.

Área Temática

Ingeniería civil.

Palabras Clave

Obras, Inundaciones, Estructuras.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como finalidad ilustrar los aspectos más importantes del proyecto de obras de protección contra inundaciones. Primeramente tenemos que definir lo que es una avenida, una inundación, un gasto en condiciones normales.

Cuando se dan condiciones de inundación, es porque se dio una avenida extraordinaria con gastos que nunca se han presentado en un periodo de retorno. Las avenidas se presentan repentinamente y es imposible predecirlas; por ello es importante considerar las condiciones hidrológicas del sitio, cuando se realiza el proyecto de tales obras, como son gastos hidráulicos, niveles de aguas máximas, mínimas y extraordinarias.

Los daños que puede provocar una inundación son muy cuantiosos como la pérdida de los bienes y muchas veces irreparables como la pérdida de vidas y comunidades enteras.

Las zonas planas son las más susceptibles de sufrir inundaciones y en las zonas cuyo caudal tiene pendientes fuertes o se a modificado o reducido; lo común es la erosión y la socavación en puentes y viviendas o incluso en zonas de cultivo que se encuentran junto a los ríos, por eso es importante determinar zonas de riesgo.

Las normas para ejecutar el proyecto de este tipo de obras son emitidas por CONAGUA, SCT, o reglamentos de construcción de los municipios sin embargo cuestiones que no aparecen en dichas normas deben de ser resueltas por el ingeniero con un espíritu de lógica, o siguiendo un criterio personal o el sentido común.

2. OBRAS DE PROTECCIÓN

EMERGENTES

Las obras de este tipo se caracterizan por la emergencia y la necesidad de retener el caudal de la corriente en forma rápida. A

continuación se presentan las ideas para planear y diseñar una serie de obras, que por su tiempo de elaboración, construcción y colocación se le han denominado emergentes:

2.1 Bordos

Son terraplenes de arcilla, cuyo objetivo principal es proteger la zona de interés contra la sobreelevación del nivel del agua en el cauce de inundación.

Su alineamiento debe seguir la configuración de la zona que se desea proteger, así también si se requiere colocar drenes o realizar algún tipo de excavación, no se deberá realizar al pie del talud ya que se incrementaría la inestabilidad del mismo.

Hay que tener presente que el bordo es una barrera que evita que el río se desborde al impedir su paso hacia la zona protegida, pero también representa un obstáculo para desalojar el agua que cae dentro de la misma, por eso mismo es recomendable colocar un sistema de drenaje capaz de desalojar el agua que cae dentro de la zona a proteger.

Para el diseño y construcción se puede enfrentar a varios problemas ya que los proyectos varían uno de otro, pero un diseño adecuado requiere de una serie de estudios y actividades que a continuación se mencionan.

- Estudios Geológicos. En ellos se conocen las condiciones geológicas del terreno, e identificar los posibles problemas a enfrentar en el diseño, construcción y operación de la estructura o tomar como alternativa la relocalización del trazo como trayectorias alternativas.
- Exploración Final. Define el perfil estratigráfico del subsuelo en donde será desplantado el bordo, además recaba información detallada de las áreas de préstamo.
- Estimación de Terraplenes. Se realiza una primera estimación de la geometría de la sección transversal, así como las condiciones de la cimentación.
- Propuesta de Secciones Típicas. Se definen longitudes de tramos con altura similar, condiciones de desplante afines y el mismo material de relleno, con la finalidad de trazar una sección representativa de cada tramo.
- Flujo subterráneo y a través del terraplén. Para cada sección transversal se llevará a cabo el estudio del flujo (por debajo y a través ésta), la estabilidad de sus taludes y los posibles asentamientos.
- Identificación de zonas problemáticas. Se identifican cuáles son las zonas que requieran un tratamiento especial para mejorar las condiciones de desplante de los bordos.
- Definición de secciones típicas. Una vez realizadas los análisis anteriores, se definen las secciones típicas para cada tramo.

- Volúmenes de obra. Una vez determinada la geometría de las secciones, se procede a cuantificar el material necesario para la construcción.
- Zonas de préstamo. Los bancos de materiales se ubican en función de los volúmenes requeridos.
- Protección del terraplén. De ser necesario, se diseña la protección requerida por el terraplén.

2.2 Cauces de Alivio

Su función principal es desviar mediante un canal parte del volumen de agua que escurre sobre el cauce principal hacia otro cauce, una laguna, el mar o alguna zona previamente definida, reduciendo así la magnitud del hidrograma de la avenida y al mismo tiempo reducir la altura de los bordos o muros de encauzamiento localizados aguas abajo del sitio.

La principal variable por considerar para su diseño es la selección del sitio donde se almacenara el volumen desviado.

2.3 Cajones de Piedra y Madera

En lugares donde hay abundante madera se puede construir este tipo de protección. Los cajones son colocados de dos posiciones: horizontalmente en la base de talud o inclinados sobre el talud. Esta clase de defensa se usa cuando las fuerzas de arrastre son pequeñas. Las maderas se utilizan a manera de tablestacados y como pilotes. La manera más sencilla de utilizar la madera es hincando los pilotes y en medio de ellos colocar madera rolliza, formando una especie de muro de contención. Hay que tratar en lo posible de utilizar la madera sumergida con el fin de evitar su rápida descomposición.

En ocasiones se utiliza prefabricados tipo «Criba», dejando espacios en forma de cuadrícula, los cuales se cubren con vegetación o con piedras unidas con mortero. Estos elementos también pueden fundirse en el sitio.

Otro tipo de enchape puede consistir en piedra partida o cantos de roca.

2.4 Atados de Fibra de Coco

Se utilizan atados alargados en forma de tubo de fibra de coco u otros compuestos vegetales, los cuales se colocan a lo largo de la orilla del río para absorber la energía de los flujos de agua y reducir la erosión. Cada elemento puede tener aproximadamente 30 centímetros de diámetro y 6.0 metros de largo. Los elementos de fibra de coco son anclados con estacas de aproximadamente 120 centímetros de longitud. Se acostumbra anclarlos con estacas vivas, con el objeto de obtener una protección con arbustos, una vez haya desaparecido el atado de fibra de coco. Es importante proveer una protección adicional para la superficie arriba de los atados, utilizando un revestimiento que permita la formación de una cobertura vegetal.

2.5 Miniespigonos

Consisten en elementos de longitudes generalmente inferiores a dos metros que se colocan perpendiculares a la dirección de la corriente a lo largo de la orilla, para que actuando como espigones pequeños, desvíen la corriente y ayuden a la protección de la orilla. Estos mini espigones pueden ser de los siguientes materiales:

1. Troncos de madera.

En el caso de utilización de troncos se acostumbra dejar las raíces del árbol hacia la corriente y complementar la protección con un enrocado longitudinal, y/o un proceso de revegetalización de la orilla. Se reporta la utilización de troncos hasta de 6 metros de longitud.

2. Enrocado.

Los mini espigones de enrocado tienen una sección longitudinal triangular con mayor espesor hacia dentro de la corriente.

3. Prefabricados de concreto.

Tetrápodos, hexápodos, camarones, etc.

4. Tubos de geotextil rellenos.

Se utilizan membranas en forma de tubo de geotextil a base de poliéster de diámetro hasta de 1.6 metros y se rellenan con arena bombeada del mismo río. Su orientación es de aproximadamente 15° hacia aguas arriba. La duración de estos tubos es de muy pocos años debido a que el geotextil se deteriora con los rayos UV del sol, y se recomienda complementar el sistema con un proceso de revegetalización de la orilla con estacas vivas.

6. Combinaciones de diversos materiales.

Se utilizan materiales como pilotes y enrocado o madera y enrocado.

2.6 Desvíos Temporales

El proyecto de estas obras obedece a la existencia de zonas bajas, lagunas o depósitos artificiales que puedan ser inundados momentáneamente, mientras se presenta la avenida. Debido a que las zonas afectadas fueron elegidas de antemano para ese fin, los daños ocasionados son pequeños. (Ver Figura 1).

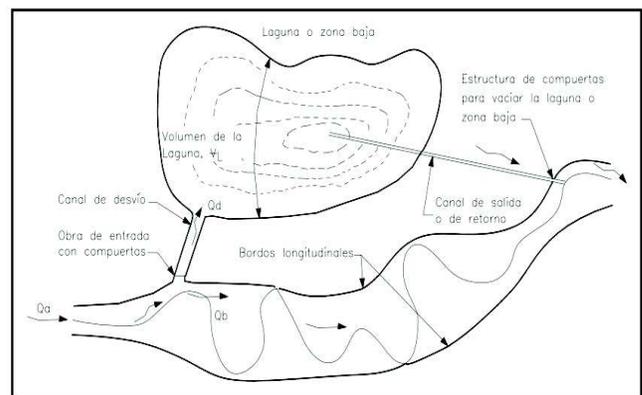


Figura 1. Arreglo general para un desvío temporal.

La principal diferencia con respecto a un desvío permanente es que mientras éste puede desviar volúmenes muy grandes, los temporales sólo están en posibilidad de desviar un volumen prefijado (que corresponde al de la zona o depósito artificial seleccionado para tal fin). Otra diferencia es que al descender los niveles del río, el agua desviada retorna a él.

Consideraciones de Diseño

- Gasto de diseño. Conviene que el gasto máximo para el diseño de las obras aguas abajo del desvío corresponda con el mostrado en la, es decir, que durante el diseño del desvío así como el de los bordos no se olvide la interacción volumen desviado - gasto máximo.

- Canal de desvío. La conducción entre el río y la zona por inundar puede ser semejante a uno de alivio; su capacidad de conducción está en función del desnivel entre la zona inundada y el río, mientras que la sección transversal depende del tiempo disponible para llenar la laguna.

- Estructura de control. Se debe contar con una estructura de este tipo, que permita controlar el flujo de agua en ambas direcciones (del río al depósito y viceversa).

- Canal de retorno. No tiene razón de ser cuando sólo ocurre una avenida al año, o bien la infiltración y evaporación permiten contar con el tiempo suficiente para el vaciado.

- Obras auxiliares. Son un buen complemento cuando se utilizan bordos longitudinales ya que el dimensionamiento de éstos se realiza con caudales menores.

- Depósitos artificiales. Su utilización debe limitarse para pequeñas corrientes con avenidas poco voluminosas, en caso contrario, los volúmenes para almacenamiento requeridos se incrementan notablemente.

2.7 Corte de Meandros

Una opción más para reducir las inundaciones, consiste en rectificar el río, con lo que se aumenta la capacidad hidráulica del cauce. El efecto de esta solución es evidente sólo a lo largo de la rectificación y en el tramo inmediatamente aguas arriba de ella. (Ver Figura 2).

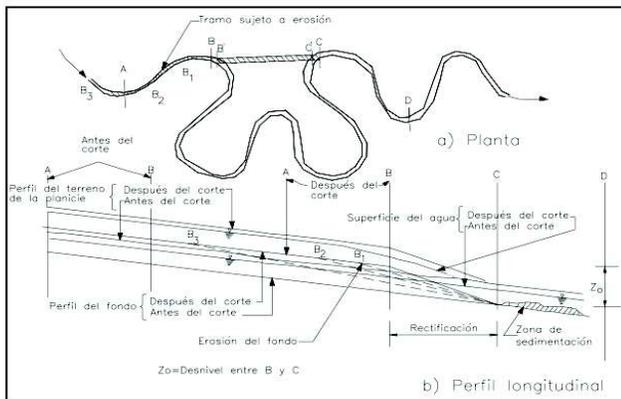


Figura 2. Corte de un meandro y sus consecuencias.

Cuando un río presenta meandros, lo que se persigue al rectificarlo es incrementar su capacidad hidráulica, aumentando la pendiente por medio del corte de una o varias de sus curvas.

Lo más importante es recordar que en el río existe una relación de equilibrio entre los gastos sólido y líquido que pasan por un determinado tramo, las dimensiones de la sección transversal del cauce, la pendiente hidráulica en el mismo y las propiedades físicas del material que forma su fondo y orillas. Por lo que al cortar un meandro se rompe ese equilibrio y el río tiende a estabilizarlas nuevamente. Para recuperarlas, tiende el río a suavizar la pendiente desarrollando nuevos meandros. Así pues, para que las obras sean efectivas se deben proteger las márgenes del río (por ejemplo, con espigones o recubrimientos

marginales) si no, la corriente volverá a formar nuevos meandros.

Debido a la alteración de sus condiciones de equilibrio, la inestabilidad de la corriente provoca una erosión en el extremo de aguas arriba de la rectificación (el río trata de suavizar su pendiente) y como consecuencia aumenta el área hidráulica que a su vez aumenta la capacidad hidráulica. Por lo anteriormente descrito, es factible aprovechar el corte de meandros como obra de protección contra inundaciones.

El principal inconveniente de esta solución es que las máximas velocidades ocurren precisamente dentro de la rectificación, por lo que el material erosionado tiende a depositarse inmediatamente aguas abajo del tramo rectificado, lo que disminuye la capacidad hidráulica al final de la rectificación. La única forma de evitarlo es dragar el tramo donde ocurren los depósitos, tratando de mantener las condiciones anteriores a la obra.

Al diseñar este tipo de obras en un cauce de tipo arenoso, se debe tener en cuenta que la ampliación del cauce piloto se produce hacia las márgenes, lo que implica un ensanchamiento de las secciones, por lo que el radio hidráulico aumenta y esto origina un incremento de la velocidad media que a su vez genera un mayor transporte de sedimentos. Lo anterior sucede mientras el gasto desviado es menor al del río. A medida que el caudal que pasa por el corte tiende a ser igual al del río, se reduce el proceso erosivo.

En caso de contar con material más resistente por tener mayor tamaño, pero sobre todo por tener cohesión (por ejemplo, suelos de tipo arcilloso) se debe excavar una sección más ancha, de manera que el flujo alcance velocidades capaces de erosionar la sección, en caso de no ocurrir lo anterior, la sección de la rectificación deberá ser casi igual a la del ancho del río.

3. OBRAS DE PROTECCIÓN ESPECIALES

3.1 Muros de Encauzamiento

Están constituidos por paredes prácticamente verticales. (Ver figura 3)

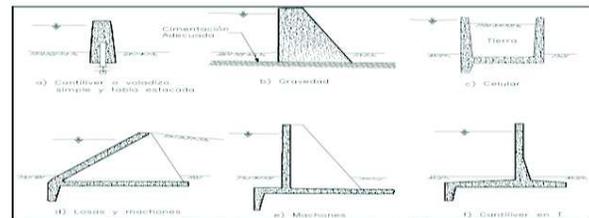


Figura 3. Tipos de muros de encauzamiento.

Los tipos de muros de encauzamiento desde el punto de vista de diseño y operación se utilizan principalmente en zonas bajas. Durante el diseño, se debe tomar en cuenta que el cauce principal estará ubicado entre ellos, dejando una planicie de inundación no apta para asentamientos urbanos ni industriales. Se utilizan, principalmente, cuando los taludes de los bordos resultan muy tendidos y por tanto el volumen de obra es muy grande, o bien al cruzar zonas urbanas o terrenos muy costosos donde no hay espacio suficiente para construirlos. Estas estructuras pueden construirse a base de concreto en masa o armado, gaviones o mampostería.

Son estructuras que trabajan de manera similar a los bordos, por lo que el diseño también sigue los lineamientos generales de ese tipo de obras, a saber:

- Gasto de diseño. Al igual que en el caso anterior, depende de la zona por proteger.
- Estructura. El diseño debe considerar la presión hidrostática, incluyendo la subpresión esperada con el nivel del agua alcanzado cuando se presente la avenida máxima.
- Drenaje. Deberá proveerse de un sistema de drenaje adecuado para la zona protegida.
- Altura. La variable principal a considerar para este aspecto es el gasto de diseño, ya que en función de éste, se alcanzarán diferentes elevaciones.

Aún y cuando su diseño es muy parecido al de los bordos, cabe mencionar que pese a que los muros requieren de un espacio menor que los bordos, y por tanto menor volumen de obra, su costo puede ser mucho mayor que el de aquéllos.

3.2 Espigones

Los espigones son estructuras interpuestas a la corriente, uno de cuyos extremos está unido a la margen. Sirven para alejar las líneas de corriente con alta velocidad de la orilla, y evitar así que el material de la margen pueda ser transportado y ella se erosione. Además, los espigones facilitan que los sedimentos se depositen entre ellos. Con lo que se logra una protección adicional de la orilla.

Forma de los espigones

Los espigones pueden también clasificarse de acuerdo a su forma en planta, así:

1. Espigón recto formando un ángulo con la orilla y que tiene una cabeza con un sistema de protección contra la socavación en la punta.
2. Espigón en forma de T, el ángulo a es generalmente de 90 grados y el dique en la punta es paralelo a la dirección del flujo.
3. Espigón en forma de L, que permite mayor espacio para sedimentación entre espigones y menos socavación en su cabeza y son más efectivos para facilitar la navegación. (Ver Figura 4).

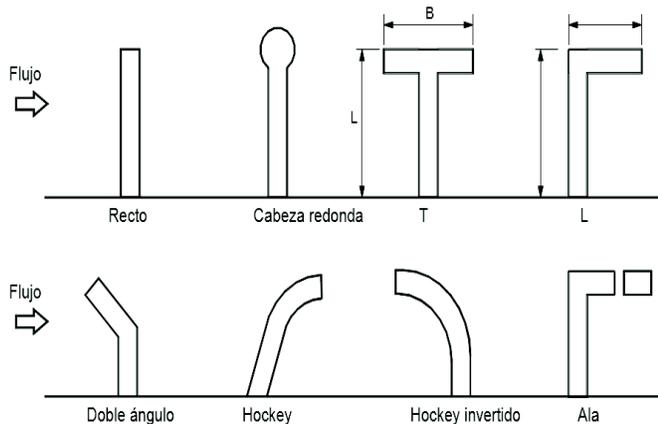


Figura 4. Forma en planta de espigones.

3.3 Tablestacas

Las tablestacas son piezas aplanadas y largas, de madera, acero o concreto reforzado o presforzado, que se hincan en el suelo, unidas o acopladas entre sí, de forma que constituyan cortinas planas o cilíndricas, como se muestra en la Figura 1 de esta Norma, con el objeto de resistir los esfuerzos transversales de empuje, para servir como obras de retención de agua o de tierra. (ver Figura 5).

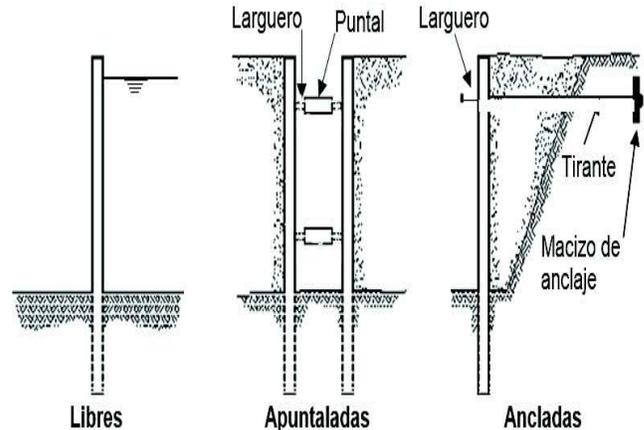


Figura 5. Tipos y colocación de tablestacas.

3.4 Canalización o Entubamiento de un Cauce

El objetivo es desalojar rápidamente los volúmenes que escurren en un cauce confinándolos en secciones menores a las naturales mediante muros (canal) o tubos, tratando de reducir las inundaciones o para aprovechar los terrenos aledaños.

La canalización de un cauce consiste en revestir tanto el fondo como las márgenes, construyendo puentes y alcantarillas en los cruces de la corriente con vías de comunicación o tuberías.

Normalmente, al entubar un cauce los ductos quedan debajo del terreno natural por lo que al poner en práctica esta alternativa la superficie que queda por encima de la obra se puede destinar para otros usos.

Se recomienda que el periodo de retorno con el que se diseñe este tipo de obras sea mayor de 50 años. Con el propósito de evitar sobre-elevaciones del nivel de agua al inicio o al final de la canalización, se deben considerar transiciones tanto a la entrada como a la salida de la obra.

Desde el punto de vista económico, para amortizar el costo de las obras, se puede considerar que la canalización o el entubamiento de alguna corriente, dentro de una zona habitada, incrementa el valor comercial de los terrenos aledaños debido a que con la venta de esos terrenos es posible absorber parte del costo de las obras mencionadas.

3.5 Presas de Almacenamiento

Una forma de hacer frente al problema de las inundaciones es modificando el hidrograma de la avenida, disminuyendo el gasto máximo que deberá conducir la corriente; la forma más efectiva y por tanto más utilizada a nivel general, consiste en atenuar el pico

de la avenida y desfasarlo en el tiempo. Este fenómeno se conoce como regulación.

Con la idea anterior (disminuir el tamaño de la avenida, almacenando parte de la misma en un embalse), es posible conseguir propósitos adicionales como: generación de energía eléctrica, riego, abastecimiento de agua potable, etc. Al tener en cuenta el control de inundaciones y al mismo tiempo el uso del agua para los fines señalados, el resultado es un conflicto de intereses ya que cuanto más vacío se encuentre el embalse se dispone de una mayor capacidad para el control de las avenidas, pero conviene guardar en el embalse el mayor volumen de agua para utilizarlo posteriormente de acuerdo con los usos señalados. (Ver Figura 6).

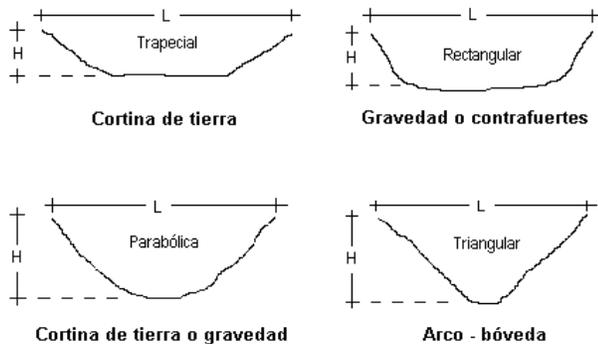


Figura 6. Tipos de cortina en función de la morfología de la boquilla.

3.6 Presas Rompe-Picos

El objetivo de este tipo de estructura es regular las avenidas que se generen a lo largo del cauce sobre el que están construidas. Normalmente, se emplean en corrientes pequeñas y su principal característica es la poca altura de su cortina y, consecuentemente, su reducida capacidad de almacenamiento.

De acuerdo con las características antes mencionadas, la ventaja más clara estriba en los costos relativamente bajos, haciendo factible la proyección de sistemas en cascada (cuando la capacidad de regulación necesaria sea relativamente grande y se advierta la necesidad de construir dos o más presas, o bien, cuando la topografía de la zona en cuestión sea demasiado plana y sea inevitable utilizar varias estructuras); sin embargo, el control de la crecida se lleva a cabo reteniendo por corto tiempo los volúmenes embalsados sin posibilitar el aprovechamiento de los mismos, siendo éste quizá su mayor inconveniente. (Ver Figura 7)

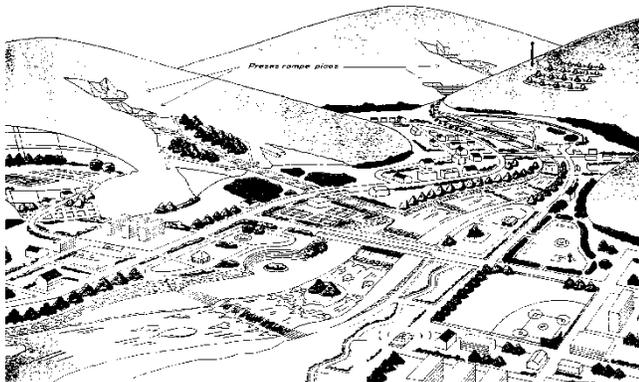


Figura 7. Disposición de presas rompe-picos

3.7 Presas Retenedoras de Azolves

Su función consiste en "atrapar" la mayor cantidad de sedimentos procedentes de la parte alto de la cuenca (figura 8). Generalmente son presas de poca altura, cuyo volumen de almacenamiento es reducido y aunque en poco tiempo se colmatan, su efecto es positivo debido a que disminuyen la pendiente del fondo del cauce y con ello, su capacidad de arrastre de sedimentos.

Es recomendable que al seleccionar el periodo de retorno de la avenida para diseñar este tipo de obras se considere la aportación de sedimentos de la cuenca tributaria, con la finalidad de conseguir un buen funcionamiento durante la vida útil de la obra (comúnmente el $Tr \geq 50$ años) y no se presenten problemas relacionados con una disminución significativa en la capacidad estimada durante la etapa de proyecto.

Debido a que son estructuras relativamente bajas, pueden diseñarse considerando descargas por encima del cuerpo de la cortina, por lo que ésta debe ser de concreto, o bien, formarse a base de gaviones. (Ver Figura 8)

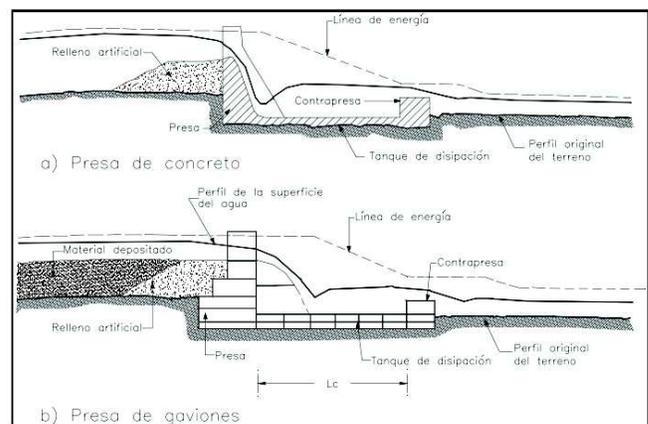


Figura 8. Esquema de una presa retenedora de azolves.

3.8 Reforestación de la Cuenca

La pérdida o destrucción de la vegetación y cobertura vegetal de una cuenca ocasiona una serie de alteraciones en perjuicio de las comunidades asentadas aguas abajo de dichas zonas, debido a que las variables que controlan la relación lluvia-escorrentía (transformación del volumen que llueve en gastos que escurren a través de las corrientes) experimentan un efecto amplificador (se infiltra o retiene menos agua, generando mayores caudales que se presentan en periodos de tiempo más cortos). Entre otros, los efectos más acusados son:

a) Tiempo de concentración

El tiempo de respuesta de la cuenca se reduce, es decir, la rapidez con la que se presenta una avenida en algún punto de interés es mayor, dura menos tiempo, pero los gastos máximos aumentan.

b) Infiltración

Este parámetro disminuye, sobre todo si la pendiente del terreno es alta, por lo que el volumen que escurre es mayor, con lo que la avenida que se traslada hacia aguas abajo aumenta.

c) Sedimentos

La cantidad de material arrastrado por la corriente se incrementa considerablemente, si la capacidad de arrastre en los cauces no es suficiente para transportarlo (al material arrastrado) éstos se azolvan y se pierde capacidad hidráulica.

Para lograr una mejor regulación (hidrogramas con mayor duración y menor gasto de pico) se debe evitar la destrucción de la cobertura vegetal de la cuenca tributaria o reforestarla

4. ASPECTOS IMPORTANTES DEL PROYECTO

Tabla 1. Periodo de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección.

Periodo de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección.	
Tipo de Obra	Tr (en años)
bordos perimetrales, para proteger:	
a) Instalaciones industriales	50 - 100
b) Poblados	500 - 1,000
Bordos y muros longitudinales, para proteger:	
a) Parcelas agrícolas aisladas sin población	10
b) Distritos de riego, sin riesgo de pérdida de vidas humanas	25 - 50
c) Zonas agrícolas poco pobladas	25 - 100
d) Zonas agrícolas con poblados	50 - 200
e) Zonas industriales y urbanas	100 - 500
f) Zonas densamente pobladas	500 - 1,000
g) Ciudades	1,000
Desvíos, asociados a bordos longitudinales	25 - 1,000
Presas de almacenamiento. Obra de excedencias	
a) Sin pérdida de vidas humanas	500 - 1,000
b) Pocas pérdidas humanas	1,000 - 10,000
c) Considerables pérdidas humanas	10,000
Presas rompe-picos	1,000 - 10,000
Presas para retener azolves (según su altura)	10 - 1,000
Presas derivadoras (según su altura y daños estimados)	50 - 1,000
Canalizaciones y entubamientos	
a) En poblaciones pequeñas	50 - 100
b) En poblaciones medianas	100 - 500
c) En poblaciones grandes y ciudades	500 - 1,000
Puentes carreteros	
a) Caminos locales	25 - 50
b) Carreteras con tráfico constante	50 - 200
c) Carreteras con tráfico intenso	200 - 1,000
Puentes de ferrocarril	
a) Vías secundarias	50 - 200
b) Vías principales	200 - 1,000
Vados (según su importancia)	10 - 100

4.1 Criterios de Riesgo

La confiabilidad es una medida de qué tan seguro es un sistema (obras de protección contra inundaciones, una hidroeléctrica, un sistema para abastecimiento de agua, etc.) para satisfacer los requerimientos para lo que fue establecido. Se puede expresar en función de diversos parámetros: grado de protección (en el caso de obras de protección), generación firme (para el caso de la hidroeléctrica), probabilidad de satisfacer las demandas durante un intervalo de tiempo específico (cuando se trata de abastecimiento), etc. Por su parte, el riesgo es una medida de la

probabilidad de falla durante el suministro del servicio; esto es, el tiempo durante el que la obra cumple su cometido.

Para que un sistema sea rentable (que sus beneficios sean mayores respecto a los daños o pérdidas) requiere de una evaluación desde una perspectiva de confiabilidad o riesgo, debido a que variables como el escurrimiento que se caracterizan por lo aleatorio de su naturaleza o la incertidumbre misma de sus registros, son la base para su diseño. Más aún, al diseñar obras de protección contra inundaciones, generalmente como consecuencia de su costo, no deben construirse de una magnitud tan grande como para evitar los daños provocados por todas las posibles avenidas. Por lo que el problema para definir la magnitud de las obras es un problema de optimización (maximizar los beneficios minimizando los costos).

Aunque el planteamiento del problema en términos de una relación costos – beneficios es conceptualmente correcto, la cuantificación de los conceptos que intervienen en dicha relación es difícil, de manera que ha sido necesario recurrir a otras metodologías para dimensionar adecuadamente las obras.

A continuación se describen tres métodos para estimar el riesgo (o el periodo de retorno) adecuado para el diseño. Primero se describe un método que se basa en la relación costos - beneficios expresados estos últimos en valor monetario. El segundo método se refiere a los conceptos tradicionales y las herramientas necesarias para utilizarlos. Mientras que el tercero se basa en la simulación del funcionamiento hidráulico de diversas opciones de diseño y compara costos vs beneficios, pero sin la necesidad de expresar ambos conceptos en términos monetarios.

4.1.1 Relación costo - beneficio

Una de las principales limitantes de las metodologías tradicionales es la toma de decisiones, ya que para el diseño únicamente se utiliza una sola tormenta, sin tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de otras tormentas (sobre todo mayores que la seleccionada) y la magnitud de sus potenciales daños, la finalidad del estudio es determinar el diseño más adecuado en términos económicos para lo cual debe tomar en cuenta los conceptos siguientes:

a) Un estudio estadístico de la magnitud de las avenidas que pueden presentarse durante la vida útil de la obra.

b) Un estudio de opciones de diseño que refleje, en términos monetarios, el monto de los daños asociados a las avenidas identificadas en el inciso anterior.

El problema principal de esta metodología radica en estimar correctamente el valor monetario de los daños asociados a una inundación.

4.1.2 Metodología tradicional

La práctica usual consiste en definir un riesgo aceptable, en términos del periodo de retorno de la avenida máxima que puede manejar la obra sin presentar daños. Esta metodología se ha generalizado debido a su sencillez, ya que relaciona la magnitud de la obra con el periodo de retorno de la avenida de diseño; no obstante, los principales inconvenientes que presenta son:

a) Está basada en una gran experiencia, pero subjetiva.

b) No se toma en cuenta explícitamente la magnitud de los daños que podrían causar avenidas mayores que la de diseño.

c) No siempre es correcto extrapolar las experiencias que se tienen como resultado de los diseños en un determinado sitio a otro diferente (menos aún de un tipo de obras a otro tipo diferente).

La aplicación de este método se resume, básicamente, en tres pasos:

a) Selección del periodo de retorno

En la mayoría de las ocasiones el periodo de retorno de la tormenta de diseño se elige en función del tipo de zona que será protegida por la obra, tomando en cuenta los daños directos que podría causar una inundación, así como con sus correspondientes daños indirectos. Para ello, es común auxiliarse con tablas similares a la 1.

b) Cálculo de la tormenta de diseño

Una vez seleccionado el periodo de retorno de la tormenta de diseño, ésta se obtiene mediante los procedimientos tradicionales (maximizando la tormenta histórica, PMP, etc.).

c) Diseño de la obra

El diseño de la obra debe permitir un buen manejo de cualquier tormenta cuya magnitud sea igual o menor que la de diseño y, en general, el correcto funcionamiento hidráulico de la obra, con la finalidad de evitar problemas derivados de ello.

4.1.3 Determinación del criterio de riesgo mediante simulación

La dificultad para definir, en términos monetarios, el costo asociado a una inundación de determinada magnitud, ha llevado a desarrollar criterios que consisten básicamente en simular el funcionamiento hidráulico de las diferentes opciones de diseño para tormentas con diversos periodos de retorno, presentando a quien deberá tomar las decisiones una descripción organizada de las consecuencias asociadas para cada opción, pero sin traducirlas a valores monetarios.

Con el análisis de inundaciones (ocurrencia, en el tiempo, y magnitud, en el espacio) se estima la probabilidad de exceder una combinación específica gasto - volumen durante un cierto intervalo de tiempo. Sin embargo, para una adecuada cuantificación de los daños, se deben tomar en cuenta aspectos hidrológicos, hidráulicos y económicos para con ello proponer las medidas necesarias para reducir los daños debidos a inundaciones.

La clave para evaluar económicamente proyectos encaminados al control de inundaciones es la relación - inundación - periodo de retorno que se basa en la estimación de los daños anuales esperados.

Los beneficios por la reducción de daños debidos a inundaciones son evaluados en función del decremento de los daños anuales esperados, resultado de la puesta en marcha de acciones particulares. El aumento de estos beneficios es consecuencia de una adecuada planeación durante la concepción del proyecto (por ejemplo, un mejor aprovechamiento del uso de las planicies de inundación al cambiar cosechas de bajo valor por otras de valor más alto, sabiendo que hasta el momento de levantar la cosecha no existirá peligro de inundación). Por otra parte, los beneficios debidos a la disminución en los daños son el resultado de la reducción de inundaciones en las planicies ocupadas (por ejemplo, al considerar bordos longitudinales los beneficios equivalen a los

daños anuales esperados sin construir las obras, menos los daños anuales esperados una vez realizado el proyecto).

Las relaciones gasto máximo - periodo de retorno, gasto máximo - elevación de la superficie libre del agua y elevación de la superficie libre del agua - daños esperados, se obtienen mediante estudios que parten del reconocimiento en campo y la modelación matemática de los fenómenos (probabilidad de ocurrencia, área de afectación, consecuencias asociadas al evento, etc.). Mientras que la función periodo de retorno - daños esperados es derivada de las tres funciones anteriores.

La relación gasto máximo - periodo de retorno define la probabilidad de ocurrencia de los gastos capaces de provocar inundaciones y se lleva a cabo utilizando metodologías de ingeniería hidrológica. La relación hidráulica entre la elevación de la superficie libre del agua y el gasto máximo se basa en el cálculo del perfil de la superficie libre del agua, que se obtiene por medio del tránsito de la avenida. La relación superficie libre del agua - daños esperados representa las pérdidas ocasionadas en el caso de que la inundación alcanzara diferentes niveles. Ahora bien, para obtener la relación superficie libre del agua - daños esperados, se aprovechan tres factores: el uso de información referente a daños de avenidas históricas en el área de estudio, la estimación del costo de los daños (suponiendo diferentes niveles de inundación) y la relación entre la profundidad de la inundación y el porcentaje de los daños.

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de realizar rutinariamente análisis para estimar los daños anuales. El esquema general se debe basar en la siguiente información: las relaciones básicas para definir los daños anuales esperados en función de la probabilidad de ocurrencia, la evaluación del impacto de las diferentes obras (afectaciones, medidas no estructurales, desarrollo de cuencas y otras modificaciones) y tomar en cuenta las posibles incertidumbres en los datos básicos.

5. CONCLUSIONES

Cuando se presenta una inundación en la zona aledaña a algún río que cuenta con obras de protección y en ella existen asentamientos humanos, la mayor parte de responsabilidad de las pérdidas humanas y destrucción de las viviendas y pertenencias de esas personas es de las autoridades que hayan tolerado dichos asentamientos así como de los grupos políticos u organizaciones que los hayan alentado y propiciado. En caso de no retirar la vegetación, no limpiar los cauces de inundación o permitir que los accesos de los puentes obstruyan los escurrimientos en dichos cauces, esas mismas autoridades serán culpables de la falla de las obras y las consecuentes afectaciones. Para minimizar esos riesgos es fundamental que durante la concepción del proyecto se defina cuáles serán las avenidas que pueden manejarse con las obras proyectadas sin incrementar el riesgo de quienes están protegidos por ellas, al operar la infraestructura hidráulica disponible.

A pesar de las grandes inversiones en medidas estructurales (obras de protección contra inundaciones) para disminuir los daños por avenidas en alguna zona, la experiencia de otros países demuestra que el producto de los daños potenciales y su probabilidad de ocurrencia se incrementan a medida que la población se siente más segura, por lo que las acciones no estructurales cobran mayor relevancia. Más aún, Como se comentó en su momento, nunca se podrá eliminar totalmente el riesgo de sufrir una inundación por lo

que aún con la construcción de obras físicas debe aprenderse a convivir con el río y sus crecidas.

Dada la frecuencia con la que se presentan las inundaciones en diferentes regiones del territorio nacional, es de particular importancia estar preparados para enfrentarlas y responder adecuadamente. Por lo que las principales medidas complementarias a las anteriores son:

a) Usos del suelo. En la mayoría de los casos, es la medida más eficaz, pero contrariamente a lo que pueda pensarse, es poco aplicada. Con una adecuada ordenación se deben evitar aquellos usos que agraven la problemática respecto a daños por inundación en las zonas con mayor riesgo. Una opción es el establecimiento de tres zonas:

- Un corredor para las crecidas, constituido por el cauce y una franja adyacente donde exista total prohibición de usos. Esta zona corresponde a un alto riesgo.
- Una zona con fuertes restricciones, correspondiente a las inundaciones de riesgo medio.
- Una zona con restricciones menores, correspondiente a inundaciones de bajo riesgo.

La aplicación de esta zonificación requiere la elaboración de mapas donde se marquen las regiones se presentan inundaciones para advertir a la población asentada en ellas o bien impedir que en éstas se ubiquen más personas para vivir.

a) Sistemas de alerta y control. Sus funciones son predecir la posible presencia de alguna avenida, evaluar su correspondiente riesgo de daños (con base en su magnitud), difundir el aviso de la ocurrencia del fenómeno y preparar la respuesta al aviso2.

Para optimar la utilización de este tipo de medidas, es importante recordar dos puntos:

- La educación y la información del público en general y de los responsables de coordinar tales medidas ayuda a disminuir los daños al encontrar una población más preparada.
- El tiempo de "pre-aviso" es la suma del tiempo de respuesta de la cuenca menos el tiempo de cálculo. Su utilidad se centra en la prevención de daños y su eficacia aumenta con el tiempo de pre-aviso.

Es posible hablar de más medidas (adecuación de la infraestructura urbana, etc.); sin embargo, las antes mencionadas son las más representativas.

El establecimiento de medidas estructurales para la defensa contra inundaciones puede disminuir el valor intrínseco de la planicie de inundación y los terrenos aledaños al río, sin llegar a compensar sus beneficios, o bien, su diseño pueden variar según el criterio y experiencia del ingeniero proyectista, por lo que el mejor arreglo dependerá de la conjunción de los aspectos tanto económico como técnico, así como el tiempo de ejecución.

Por otra parte, de acuerdo con las metodologías empleadas para el análisis de riesgo, es indispensable tratar de introducir, sino todas las variables cuya intervención es clave para el diseño de las estructuras, al menos aquéllos parámetros que tienen influencia directa para la selección y dimensionamiento de la mejor opción.

Finalmente, para llevar a buen término el propósito anterior (y que no quede sólo en esto) es indispensable que, por una parte, el ingeniero proyectista se preocupe por integrar en sus cálculos las variables realmente representativas y, por otra, los organismos

encargados de registrar variables, en este caso hidroclimatológicas, se preocupen por lograr un registro representativo y confiable de las mismas.

6. RECONOCIMIENTOS

El autor agradece la colaboración del Ing. Francisco Javier Vázquez Jiménez director de este trabajo, por sus acertados comentarios para el enriquecimiento de este artículo.

Finalmente a los revisores de este artículo, M en I. Eduardo Corona Cerecero y el Ing Jose Luis Dionicio Apreza.

7. REFERENCIAS

- [1] Bianchini A. "Defensas Fluviales con gaviones metálicos", Barcelona.
- [2] Carbajal M.P., Gamboa E. "Evaluación de sistemas de defensa para la protección de riberas en ríos de alto caudal". Proyecto de grado - Universidad Industrial de Santander.
- [3] Maza J.A. "Diseño de Espigones" - Revista Recursos Hidráulicos de México - Vol. 4.
- [4] Gaviones Lemac S A, "Principales características y aplicaciones del gavión Lemac", México.
- [5] Japan's Ministry of Construction, "Protecting Comfortable and Healthy Lives", Sabo Department, River Bureau, Japan's Ministry of Construction, Tokyo, 1992.
- [6] Martín M., J.M., "Los recursos hidráulicos", Primera parte: panorámica mundial, CEDEX, Centro de Estudio Hidrográficos, Madrid 1996.
- [7] Torres, F., "Obras hidráulicas", Ed. Limusa, México 1980.
- [8] SRH, "Atlas del Agua de la República Mexicana", Secretaría de Recursos Hidráulicos, México.
- [9] Secretaría de Gobernación, "Atlas Nacional de Riesgos", México.