

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**MEDIDAS ESTRUCTURALES DE DEFENSA CONTRA LAS
INUNDACIONES:
LAGUNAS DE LAMINACIÓN**

Sergio Fattorelli^{1,2}, Alberto Boccatto², Enrico Frank², Pedro Fernández³, Mónica M. Montoya C¹.

¹Universidad de Padua (Italia), sergio.fattorelli@unipd.it, monica.montoya@unipd.it

²BETA Studio srl, Padua (Italia), info@betastudio.it

³CONICET – INA, Mendoza (Argentina), pcfer@itcsa.net

RESUMEN:

La mitigación de las condiciones de riesgo hidráulico en un territorio es la combinación integrada de medidas que reducen la frecuencia y el impacto de los eventos de crecientes, dentro los límites compatibles con las características socio-económicas del territorio mismo.

Entre las medidas estructurales que han adquirido mayor importancia en los últimos decenios en la gestión del riesgo en Europa, en grado de asegurar una defensa eficaz contra las inundaciones, se encuentran las lagunas temporales de retención con llenado y vaciado controlados, o lagunas de laminación fluvial que pueden modificar el hidrograma de crecida disminuyendo su caudal pico.

La presente memoria describe los diferentes tipos de lagunas de laminación, una particular obra estructural normalmente elegida en Europa para la mitigación del riesgo, su funcionamiento hidráulico y sus elementos estructurales que las componen. El análisis se concluye con un ejemplo de una laguna de laminación en fase de realización en Italia.

ABSTRACT:

The mitigation of the hydraulic risk conditions on a territory is the integrated combination of measures that reduce the frequency and the impact of the flood events, within the limits compatible with the socio-economic characteristics of the same territory.

The structural measures have acquired great importance in the last decades on the management risk in Europe and they are able to guarantee an effective defense against the floods. Among these structural measures, there are temporal retention reservoirs with a filling and emptying controlled, or, the called fluvial lamination lagoons. These reservoirs can modify the flood hydrograph diminishing its peak discharge.

This paper describes the different types of the fluvial lamination lagoons, a particular structural work usually chosen in Europe for the risk mitigation, their hydraulic functioning and their structural elements that compose them. An example of a lamination lagoon in Italy, on project phase, concludes the analysis.

PALABRAS CLAVES:

Mitigación riesgo, Lagunas laminación, inundación.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de las intervenciones para la mitigación del riesgo hidrogeológico es proteger las poblaciones urbanas, las infraestructuras, los lugares con actividad de gran importancia contra los eventos de crecidas caracterizados por caudales de considerable magnitud y los fenómenos de inestabilidad de las vertientes, reduciendo el nivel de riesgo hasta llegar a valores compatibles con las actividades socioeconómicas presentes en el territorio. Una estrategia apropiada de planificación debe focalizar finalidades, tanto generales como ambientales, con miras a alcanzar una recalificación de la cuenca hidrográfica en su totalidad integrando las funciones y las exigencias del sistema fluvial, con las actividades de producción y de aprovechamiento de los recursos hídricos.

Entre las diversas soluciones disponibles para garantizar la seguridad hidráulica serán, por lo tanto, ventajosas aquellas en grado de:

- Preservar y ampliar, donde sea viable, las áreas naturales de inundación de los cursos de agua limitando las obras artificiales de contención de las crecidas realizadas a menoscabo de la expansión natural de los cursos de agua, y favoreciendo las acciones de laminación controlada, para no aumentar el flujo en los cauces principales.
- Limitar los flujos vertidos a la red hidrográfica natural, provenientes de sistemas artificiales de drenaje y evacuación de las aguas superficiales en las áreas urbanizadas. Incentivar acciones de gestión de las vertientes, con el fin de aumentar la permeabilidad de las superficies y los tiempos de retardo. Impulsar el mantenimiento de las obras de protección de los cauces, como instrumento imprescindible para preservar la eficiencia de los sistemas de defensa, asegurando así su confiabilidad en el tiempo. Promover la recuperación de las áreas de inundaciones naturales, la conservación de la destinación original del uso del suelo, con particular atención a la reforestación y a la regulación de los caudales de la red secundaria de escorrentía superficial, para la defensa contra los derrumbes, fenómenos torrenciales y de erosión.
- Reducir las interferencias antrópicas con la dinámica evolutiva de los sistemas fluviales.

Actuando según estas directrices, será posible devolver al sistema fluvial un rol central con respecto al equilibrio territorial de la cuenca hidrográfica, favoreciendo la recuperación de las funciones de los sistemas naturales, así como el restablecimiento, la recalificación y la salvaguardia de las características ambientales del territorio. De esta manera, a la vez, se obtienen condiciones de uso del suelo compatibles con las características de los sistemas hidrográficos.

TIPO DE MEDIDAS ESTRUCTURALES

La mitigación de la condición de riesgo debe realizarse a través de una serie de medidas (Figura 2) que reduzcan la *frecuencia* (estructurales) y el *impacto* (no-estructurales) de los eventos de crecientes, dentro de límites compatibles con las características socio-económicas de los territorios a proteger. Se deben valorar en términos objetivos los planes propuestos, de manera que las eventuales acciones de mitigación, puedan englobarse en una lógica relación costo-beneficio, por la cual el valor del daño causado a personas, viviendas, infraestructura, actividades productivas y comerciales justifique el costo de las acciones a iniciar (Fattorelli y Longhini, 2002).

Se definen como *no estructurales* todas aquellas medidas que buscan a reducir el riesgo en un territorio interviniendo sobre el valor de los elementos expuestos y su vulnerabilidad, o sea sobre el daño esperado. Pertenecen a esta categoría todas aquellas medidas tendientes a prevenir o atenuar los daños ocasionados por el evento de creciente sin la construcción de obras que interfieran con el flujo de las aguas. Acciones de este tipo pueden subdividirse en: medidas de tipo administrativo (destinadas a reglamentar la destinación del uso del suelo de un territorio con el modelo de desarrollo socioeconómico previsto), medidas destinadas a modificar el impacto "psicológico" de las inundaciones sobre los individuos y las comunidades, medidas que tienden a realizar sistemas de

alerta de crecientes, con difusión de la mismos a la población, la organización y gestión de la emergencia.

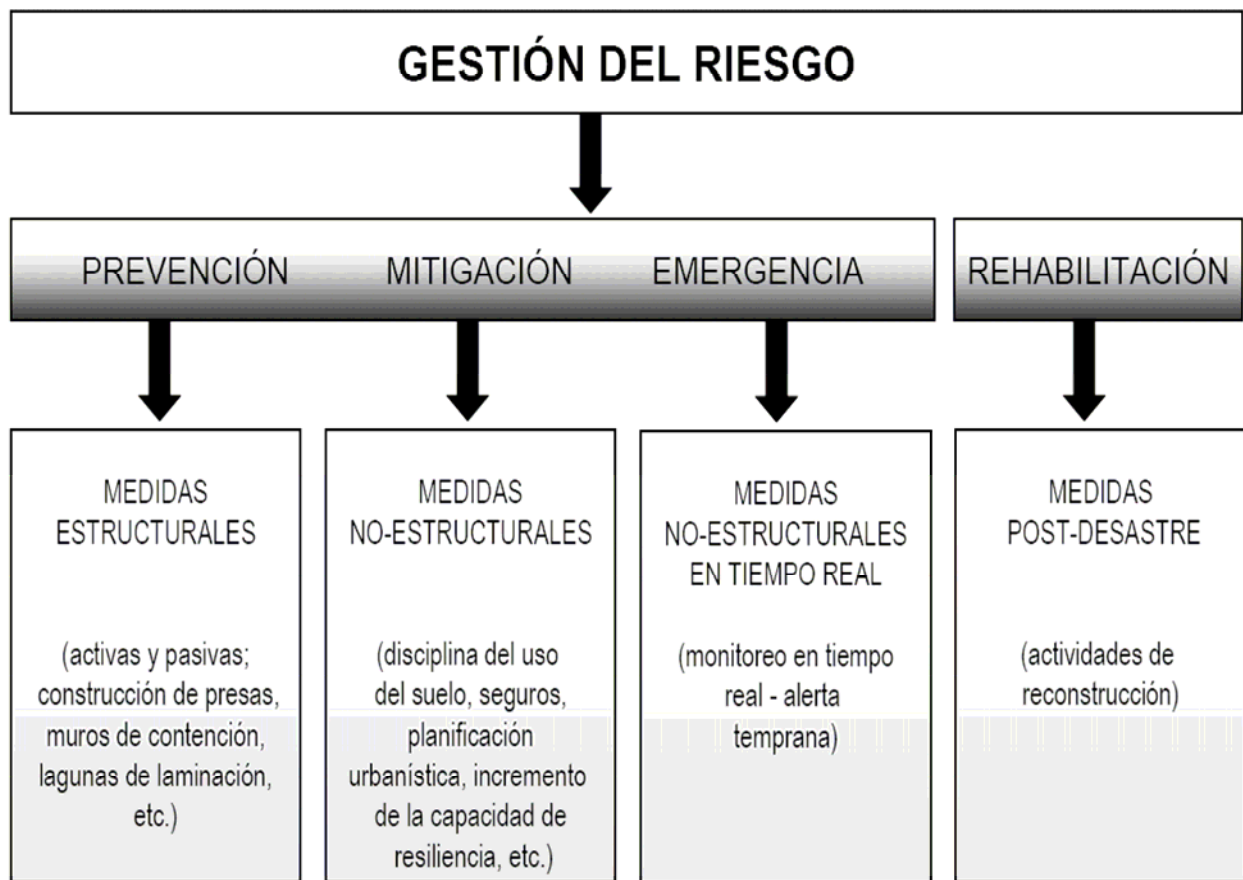


Figura 1. – Esquema de gestión del riesgo (Fattorelli, 2005)

Las medidas de tipo *estructural* son todas aquellas que reducen de riesgo desde el punto de vista de la amenaza del evento. Algunas de estas (medidas activas) tienden a mitigar la magnitud del fenómeno natural reduciendo la probabilidad de ocurrencia con una determinada intensidad (reducción de la frecuencia); otras (pasivas) se proponen en cambio aumentar la capacidad del territorio para soportar las sollicitaciones del evento natural sin sufrir daños (reducción del impacto).

Las acciones estructurales que permiten alcanzar el objetivo de la defensa del territorio contra las inundaciones se distinguen en: acciones extensivas en la cuenca hidrográfica tendientes a aumentar la capacidad de absorción del terreno y a atenuar los fenómenos de erosión y consecuente transporte sólido en la red (medida activa); re-seccionamientos del curso de agua y elevación de los diques que aumentan la capacidad de flujo de las aguas a nivel local (medida pasiva); canales de lámina libre o en galería (medida activa) que desvían las aguas de crecida alejándolas del río descargándolas agua abajo de la zona de riesgo o en un segundo curso de agua; lagunas de laminación temporales que modifican el hidrograma de crecida disminuyendo su caudal máximo (medida activa).

Las acciones del primer tipo, también definidas como extensivas, son siempre aconsejables, aunque raramente permiten obtener resultados significativos a corto plazo frente a una situación notablemente crítica (Fattorelli, 2005). La característica de las acciones del segundo tipo, es la de intervenir a nivel local con el propósito de preservar la seguridad de un determinado tramo del río con un consecuente aumento del caudal aguas abajo del mismo. Así, se consigue la disminución del margen de seguridad en porciones de territorio no reconocidas como zonas a riesgo, en cuanto a que

la parte del caudal que primero inundaba aguas arriba, se encuentra dentro del cauce con la construcción de lagunas de laminación.

En lo que respecta a los canales de desviación, es preciso distinguir entre los que contemplan la restitución de las aguas de avenida al mismo río (*by-pass*) y los que prevén el alejamiento definitivo de las aguas del río y su descarga en otro curso de agua o directamente en el mar. En el primer caso se obtiene una reducción de la amenaza sólo a nivel local, con empeoramiento de la situación en los tramos aguas abajo de la obra de restitución, ya sea por el aumento de la capacidad total de flujo (cauce principal + *by pass*) como por la menor capacidad de amortiguación de los canales artificiales en comparación con los naturales. En tal caso, no es completamente correcto hablar de medida activa. En el segundo caso, la intervención es en efecto una acción activa, pues se obtiene una modificación del hidrograma de crecida, lo cual trae beneficios a los territorios localizados aguas abajo.

En los últimos años se han difundido cada vez más las acciones tendientes a la laminación de las crecidas a través del almacenamiento temporal de las aguas dentro de zonas de expansión adecuadas que traen beneficios a toda la red hidrográfica ubicada aguas abajo. La realización de una obra de tales características es bastante dificultosa, dadas las notables dimensiones requeridas en términos de territorio ocupado; sin embargo, si la condiciones morfológicas presentan características favorables, dichas obras pueden integrarse adecuadamente al territorio, favoreciendo la mayoría de las veces la recalificación ambiental del área.

Los objetivos antes indicados, deben ser alcanzados a través de la coordinación de las medidas estructurales con oportunas disposiciones administrativas establecidas para gestionar correctamente el uso del suelo. Cabe mencionar que la realización de una obra de defensa longitudinal, si bien reduce la amenaza, crea condiciones de falsa seguridad que promueven el desarrollo económico del área y como consecuencia aumenta el daño esperado. En este caso, el nivel de riesgo asociado a los caudales más elevados (que pueden sobrepasar la obra de defensa) puede hacerse intolerable.

LAGUNAS DE LAMINACION

Las lagunas de laminación son almacenamientos temporales de agua en zonas de expansión adecuadas que traen beneficios a la red hidrográfica ubicadas aguas abajo de las mismas. Estas forman parte de las intervenciones estructurales activas para la mitigación del riesgo hidráulico que modifican el hidrograma de creciente disminuyendo el caudal pico. Sin embargo, son obras que se deben implementar con mucho cuidado, debido al gran impacto hidrológico, ambiental y social que pueden generar en la cuenca durante y después de su construcción. Adicionalmente, la laguna de laminación requiere porciones extensas de territorio e implica el diseño y construcción de un conjunto de obras de diferentes tipos que necesitan, a su vez, la disponibilidad de recursos, convirtiéndola de esta manera en un proyecto complejo articulado en diversas fases temporales.

Además de los aspectos constructivos, estrechamente relacionados con los tipos de construcción de cada obra hidráulica a realizarse, es imprescindible concentrar la atención en los aspectos ambientales, ya sea en aquellos debidos a la modificación permanente del territorio como en aquellos temporales que dependen de las actividades desarrolladas durante la ejecución de las obras. El impacto evidente sobre el régimen hidrológico de la cuenca, impone la reexaminación de toda la estrategia de planificación. Las acciones de defensa hidráulica deberán ser pensadas y dimensionadas en relación a la magnitud de los flujos establecidos por las obras de regulación de las lagunas de laminación. Se debe prestar particular cuidado en la definición de los objetivos a alcanzar, la ubicación del embalse, la elección del tipo de funcionamiento, la verificación del comportamiento hidráulico, la evaluación de los costos de realización, de gestión y ambientales, y, el examen de las implicaciones ambientales y de los tiempos de intervención.

Aspectos ambientales y sociales

La realización de un área de laminación requiere, como ya se ha dicho, la disponibilidad de porciones extensas de territorio, frecuentemente ubicadas en áreas destinadas para la agricultura, puede incidir por lo tanto, en manera considerable sobre la realidad social de la zona. Cabe mencionar que, dado que el territorio a defender coincide casi siempre con áreas de elevado grado de urbanización, la ubicación de dicha área se sitúa aguas arriba de éstas, mientras que donde la presencia de asentamientos de viviendas o de industrias es limitada las problemáticas hidráulicas no resultan ser evidentes.

El sacrificio, en términos de limitación del recurso suelo, se solicita a poblaciones que generalmente no disfrutan de sus beneficios, lo cual causa roces entre las Administraciones locales. Tal criticidad deberá ser compensada mediante la planificación de oportunas disposiciones tendientes a asegurar positivas relaciones de coexistencia (ejemplo: indemnización por el área ocupada). En el caso en que el área no sea clasificada como productiva, es aconsejable, ya en la fase de diseño, prever su transformación en área recreativa, a beneficio de la Administración Municipal. La destinación agrícola del área traerá como consecuencia que se garantice la posibilidad de seguimiento de las actividades productivas, no sólo cuando la obra esté en funcionamiento, sino también durante las fases de realización de la misma, previendo los gravámenes debido a la ejecución de obras temporales (plenamente funcionales), tales como las rampas de paso que permiten el acceso, a través de los diques, a las áreas que de lo contrario serían obstaculizadas.

La presencia de los terraplenes de protección crea una modificación de la red de drenaje local, tanto dentro del perímetro externo como a lo largo del mismo, la cual debe ser evaluada en el proyecto.

Si la laguna de laminación se encuentra en un área normalmente no afectada por inundaciones y donde el terreno sea muy permeable, será necesario tener en cuenta una posible interacción entre las aguas de avenida con el acuífero subterráneo analizando el grado de contaminación de las aguas de origen fluvial y evaluando su compatibilidad con las funciones del acuífero.

La construcción de los diques de protección que delimitan la laguna requiere la excavación y la movilización de grandes cantidades de material, con un considerable impacto sobre la viabilidad local (aumento del tráfico e interrupciones de carreteras). El mantenimiento de las vías de comunicación es uno de los aspectos más críticos del proyecto; por eso el acceso al sitio de las obras deberá organizarse estableciendo, dentro de lo posible, rutas alternativas al público, de manera de reducir el impacto sobre la movilidad local.

Funcionamiento hidráulico

El efecto de laminación es debido a un particular funcionamiento hidráulico activado sólo en las crecidas máximas, cuando la magnitud del caudal está cerca de la capacidad de flujo del tramo de aguas abajo. Con respecto a su funcionamiento hidráulico, las lagunas de laminación se dividen en dos tipos: lagunas de derivación y lagunas en línea. El tipo de obra debe ser elegida después que se hayan especificado los objetivos a alcanzar en términos de atención del riesgo de inundaciones. Este último evaluado a través del análisis de la cuenca hidrográfica aguas arriba que permita la estimación de los caudales involucrados, de las características del territorio que acoge la laguna y de la capacidad de evacuación de la red hidrográfica aguas abajo.

El funcionamiento de una laguna de laminación en derivación prevé que ésta se realice en una depresión ubicada en áreas distintas del cauce principal, generalmente mediante la construcción de un sistema de contención (Fattorelli y Fernández, 2007). El llenado de la laguna y la descarga de las

aguas se efectúan a través de aliviaderos construidos en el mismo dique. Se aconseja realizar una presa transversal para la estabilización del cauce con el fin de asegurar la altura del agua óptima de funcionamiento del aliviadero, permitiendo de este modo el control adecuado del caudal sin la introducción de elementos de regulación móviles.

La Figura 2a muestra la necesidad de tres obras hidráulicas en hormigón armado e importantes diques de contención. Por otra parte, con esta obra se pueden alcanzar elevados niveles de laminación y eficiencia en el funcionamiento.

La característica de las lagunas de laminación en línea es que pueden ser realizados por medio de la construcción de una sola obra hidráulica, o sea una presa de regulación transversal, y la eventual elevación de los terraplenes existentes en ambos lados del río, para contener la sobre-elevación causado por la presa. Por lo tanto, la laguna se realiza dentro del cauce fluvial (Figura 2b), en áreas de expansión de las aguas destinadas para frecuentes inundaciones. Si bien, esta obra provoca menor impacto ambiental, debe tenerse en cuenta que goza de una menor eficiencia hidráulica.

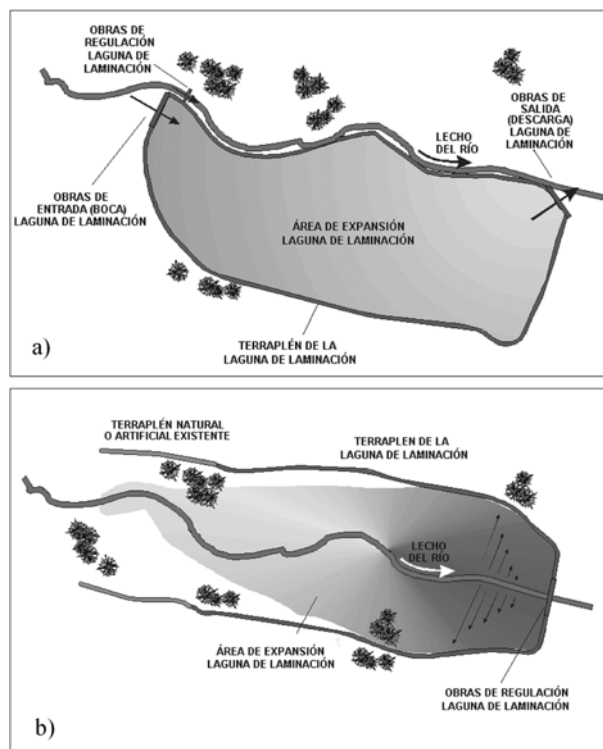


Figura 2. - Esquema de lagunas de laminación: a) de derivación, b) en línea.

Diseño preliminar

Las lagunas de laminación son obras de acumulación temporal de volúmenes de agua conformados por estructuras de entrada y salida, construidas en un río, con el fin de obtener una reducción en la magnitud de las inundaciones. El volumen almacenado se devuelve al cauce cuando sus condiciones hidrométricas dejan de ser peligrosas. Los factores que condicionan este fenómeno son la capacidad de la laguna, la configuración de las estructuras de alimentación y de drenaje.

La forma de la onda de creciente a la salida de una laguna de laminación en línea Figura 3 resulta de la solución de la ecuación de continuidad escrita de la siguiente manera:

$$Q_i(t) - Q_o(t) = \frac{dW}{dt} \quad [1]$$

Donde $Q_i(t)$ es el caudal de entrada, $Q_o(t)$ el caudal de salida y W el volumen almacenado en un tiempo t . cuando el caudal de salida es inferior al de entrada, la laguna de laminación se llena progresivamente, hasta un tiempo, t^* , después del cual se invierte la situación y esta comienza a vaciarse. El área comprendida entre los hidrogramas en el intervalo de tiempo de 0 a t^* , es igual al volumen total almacenado:

$$W = \int_0^{t^*} (Q_i(t) - Q_o(t)) \cdot dt \quad [2]$$

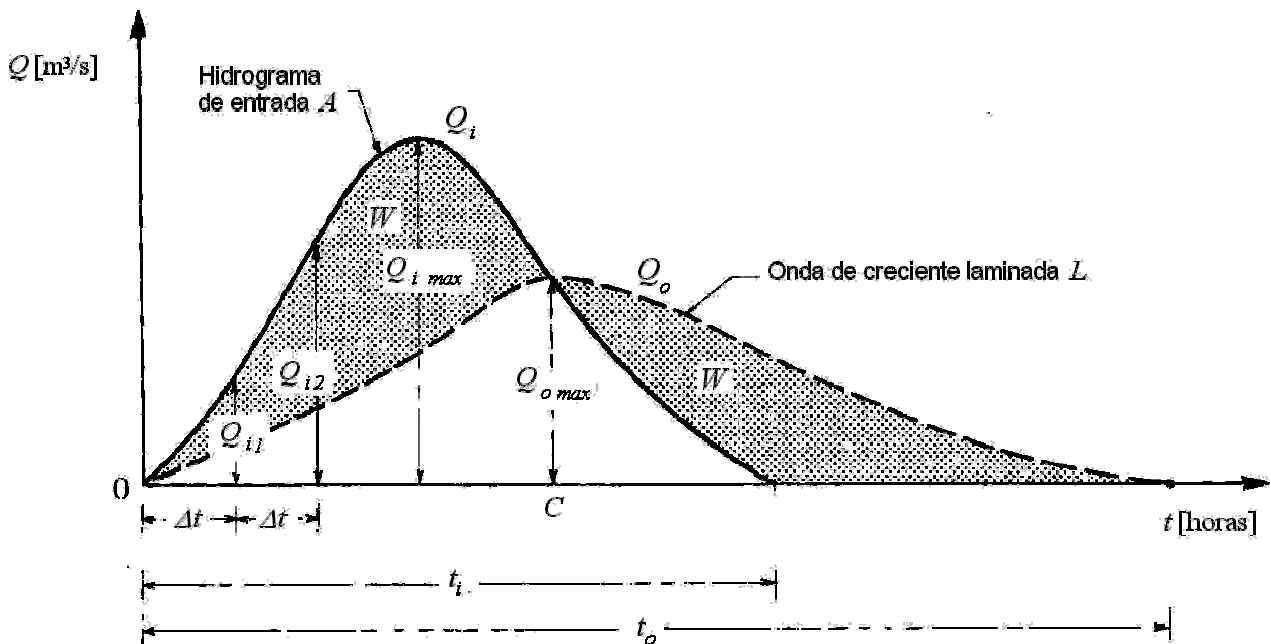


Figura 3. - Reconstrucción del hidrograma de creciente de salida de la laguna de laminación.

Si aguas abajo de la obra no se consiente la salida de un caudal superior a un umbral prefijado, Q_v^* , el volumen de la laguna de laminación debe ser tal de abatir el pico de la onda decreciente de la onda entrante hasta un valor de $Q_v^* = Q_{max_o}$. El volumen, W , es entonces el que se requiere para reducir el caudal pico máximo, Q_{max_i} , al valor de Q_{max_o} . Existen expresiones necesarias en la operación de estas estructuras que relacionan dichos caudales, tales como el coeficiente de laminación y eficiencia de la laguna de laminación, definidos respectivamente de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_{max_o}}{Q_{max_i}} \quad y \quad \varepsilon = 1 - \frac{Q_{max_o}}{Q_{max_i}} \quad [3]$$

Por medio de la regulación de las estructuras de alimentación y drenaje con componentes móviles, es posible obtener el máximo rendimiento laminando el hidrograma al valor de Q_{max_o} , para cualquier onda de creciente entrante, definiendo una sola condición de desbordamiento.

Otros parámetros importantes en la operación de las lagunas de laminación, son la relación de llenado (η_R) que indica el porcentaje de uso eficaz de la misma, y, tiempo de desfase (t) que determina la diferencia entre el pico de la onda de salida y de entrada, así:

$$\eta_R = \frac{W_{inv}}{W} \quad y \quad t = t_o - t_i \quad [4]$$

El funcionamiento hidráulico de este tipo de intervención de acuerdo al período de retorno de la creciente se evidencia claramente en la Figura 4, en la cual se presenta el caso de una laguna en línea diseñada para un $T_R= 100$ años. Se nota inmediatamente como la optimización de la laguna, desde el punto de vista del volumen de almacenado, no implica la optimización automática en los términos de eficiencia. Resulta evidente que la máxima eficiencia se presenta para eventos de creciente cincuentenarios, disminuye para un evento centenario. De la misma figura, se observa que el 83% y el 100% del volumen se usan para los eventos con períodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente. De este ejemplo, se concluye que la eficiencia máxima de una laguna de laminación se obtiene para los eventos con períodos de retorno menores a el de diseño y que su uso será cada vez más parcial a medida que la creciente sea menor, es decir, eventos correspondientes a bajos períodos de retorno. Así mismo, se evidencia la necesidad de analizar durante la etapa de diseño, el comportamiento de la laguna de laminación frente a eventos con diferentes formas del hidrograma entrante, $Q_i(t)$, períodos de retorno y probabilidades de ocurrencia.

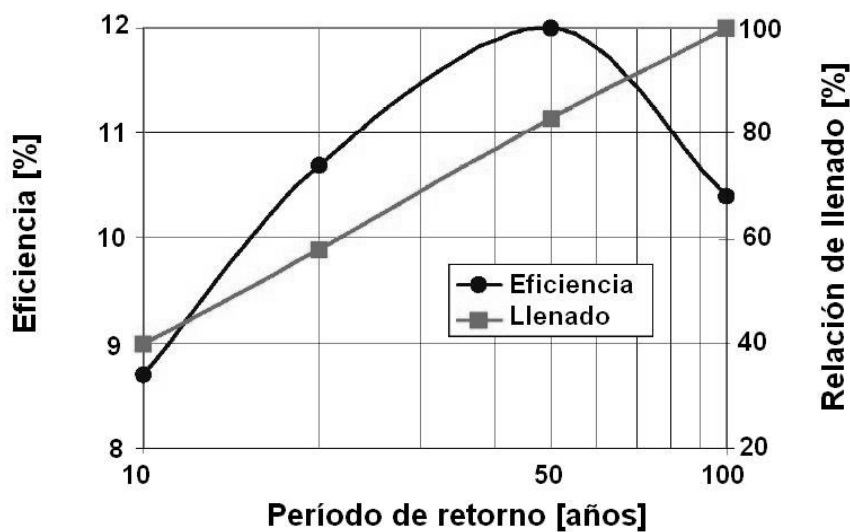


Figura 4. - Tendencia de eficiencia, η , y de relación de llenado, ε , en función del período de retorno (Maione, 2002)

Análisis de costos - beneficio

En la planificación y el diseño de las medidas estructurales para la reducción del riesgo contra inundaciones, no sólo basta tener en cuenta el aspecto hidráulico de las obras, sino también la realización de un análisis de costo-beneficio, la comparación de alternativas de solución, la cuantificación y la inclusión de los costos de las obras y los daños ocasionados por el uso de las mismas, con el fin de cuantificar los daños a los cuales se encuentra sometido un territorio a riesgo de crecientes. Los daños causados por inundaciones se pueden clasificar en:

- Tangibles o aquellos que pueden ser cuantificables, desde el punto de vista económico, dentro de un ámbito espacial y un tiempo definido. A su vez éstos, se clasifican en directos (causados por el contacto con el agua) e indirectos (causados por la interrupción o destrucción de actividades como consecuencia de los daños directos).
- Intangibles o aquellos que no pueden ser cuantificables, tales como daños psicológicos, pérdidas de vida, salud de la población, etc.

La evaluación de los daños sirve como soporte en la toma de decisiones en numerosas aplicaciones, como la planificación del territorio y el diseño de las medidas estructurales para la mitigación del riesgo. Existen dos métodos para calcular los daños producidos por una inundación (Fattorelli et al., 2004):

- Cálculo de los daños a posteriori, después de eventos reales ocurridos en el pasado (daño real).
- Cálculo de los daños a priori, basado en el valor del daño esperado para eventos con determinada probabilidad de ocurrencia.

El cálculo de los daños *a posteriori*, es un análisis aparentemente conservador, con limitaciones ligadas sobretodo a la dificultad de registrar y cuantificar los daños producidos por la inundación. Dado que la adopción de las medidas para la mitigación del riesgo no es normalmente posible evaluando eventos aislados, la probabilidad de ocurrencia obtenida con este método frecuentemente es inadecuada para el diseño de las obras de protección contra eventos de alta intensidad. Además, en las áreas susceptibles no siempre pueden ser previamente verificados eventos de considerable intensidad con documentación apropiada de los efectos producidos, lo que dificulta la aplicación de este método.

El cálculo de los daños *a priori*, es un método que se ha adoptado en los últimos años debido a que no supone que el evento extremo haya ocurrido, lo cual le permite ser aplicado en cualquier área, pudiendo verificar y comparar el impacto de diferentes alternativas de solución. Sin embargo, es un método no estandarizado que requiere un alto grado de especialización. El análisis *a posteriori* se puede usar como calibración de la simulación numérica de la estimación de los daños de inundaciones obtenidos a partir de este método. La estimación de los daños por inundación *a priori*, se efectúa determinando el valor del daño medio anual (*Expected Annual Damaged, EAD*) o daño que se espera ocurra anualmente, el cual para efectos de cálculo corresponde a una serie uniforme de pérdidas anuales estimadas que se producirían durante el período de análisis.

El modelo propuesto cuantifica estos daños mediante las funciones de daño o curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan a cada tipo de bienes en riesgo, la variación hidráulica y el porcentaje de daño esperado. En literatura existe una amplia gamma de curvas de vulnerabilidad típicamente obtenidas mediante levantamientos post-inundación o criterios de diferentes categorías de daño dados por expertos. Dichas curvas consideran generalmente como única variable hidráulica la altura de agua (h), aunque en algunas categorías de daños son importantes también otros parámetros hidráulicos, como la velocidad del agua (v) y el tiempo de residencia (t), (Fattorelli y Frank, 2005).

Simulando diferentes eventos se obtiene la curva daño-probabilidad de excedencia (Figura 5a) e integrándola es posible calcular el valor medio anual del daño:

$$E[X] = \sum_{i=1}^N x_i \cdot \left(\frac{I}{T_{R_i}^{Inf}} - \frac{I}{T_{R_i}^{Sup}} \right) \quad [5]$$

A partir de una comparación de las diversas alternativas, basados en el análisis de costo-beneficio, se selecciona la alternativa óptima para la mitigación del riesgo contra inundaciones (Figura 5b).

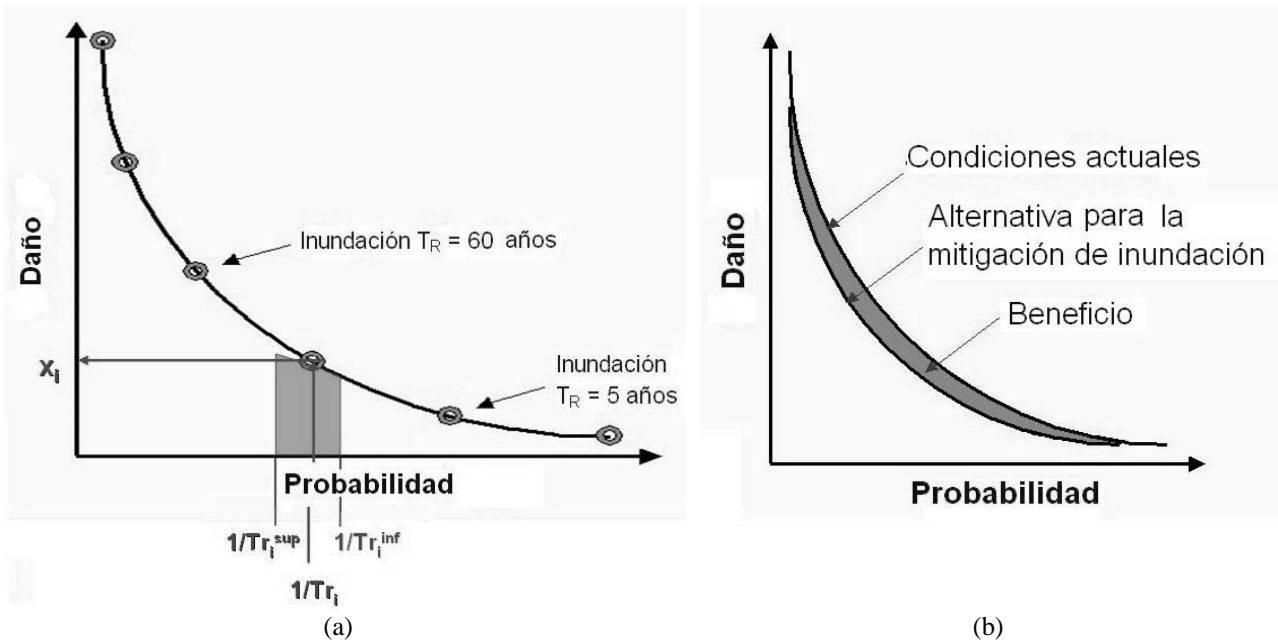


Figura 5. - Curva daño –probabilidad de excedencia a) una alternativa b) comparación.

RÍO AGNO-GUÀ (TRISSINO, ITALIA)

En el río Agno-Guà, se encuentra en fase de realización (BETA Studio srl, 2005) dos lagunas de laminación en serie que aprovechan un área particularmente deprimida aguas abajo de la población de Trissino que por su morfología es óptima para la laminación de las crecientes. Se trata de una zona de inundación que se originó tras la rotura de un dique en los años 1905 y 1907. La laguna de laminación de aguas arriba presenta un área de 60 ha y un volumen disponible de 2.7 millones de m^3 , mientras que la de aguas abajo presenta un área de 23 ha y un volumen disponible de 800.000 m^3 (Figura 6). La laguna aguas arriba se encuentra dividida en dos porciones: una laguna de laminación "en línea" con un volumen embalsado aproximadamente de 700.000 m^3 conectados a través de un vertedero lateral (Figura 7) a una laguna de laminación "en derivación" con un volumen embalsado alrededor de 2.0 millones de m^3 .

El factor crítico de esta cuenca es el aumento de los caudales de máxima creciente, debido al continuo desarrollo urbano que ha determinado una insuficiencia del sistema de defensa aguas abajo por períodos de retorno superiores a 35 años. El objetivo de las lagunas de laminación es lograr la reducción del caudal máximo de aproximadamente 100 m^3/s y, en consecuencia, poner el sistema de defensa en seguridad hidráulica hasta 200 años.

El dimensionamiento de las obras y la comprobación de los efectos producidos por la presencia de las dos lagunas de laminación, se realizó luego de un adecuado análisis hidrológico, con el cual se determinó el caudal máximo de creciente para diferentes períodos de retorno del tramo de interés de la intervención propuesta y en las secciones del río aguas debajo de la obra en proyecto. Para la determinación de los hidrogramas de creciente se utilizó el modelo matemático de precipitación-escorrentía HEC-HMS que permite una evaluación indirecta de las crecientes basados en las precipitaciones, observada o de proyecto, de las cuales se originaron. Las intervenciones se proyectaron y se verificaron mediante el uso de eventos con precipitaciones de diferentes duraciones (12, 15 y 24 horas). Posteriormente, se realizó un análisis hidráulico a través de un modelo mono-bidimensional SOBEK que permitió estimar los efectos de las obras de laminación en la cuenca de Trissino en la reducción de la probabilidad de inundación en el tramo de valle del río Agno-Guà.

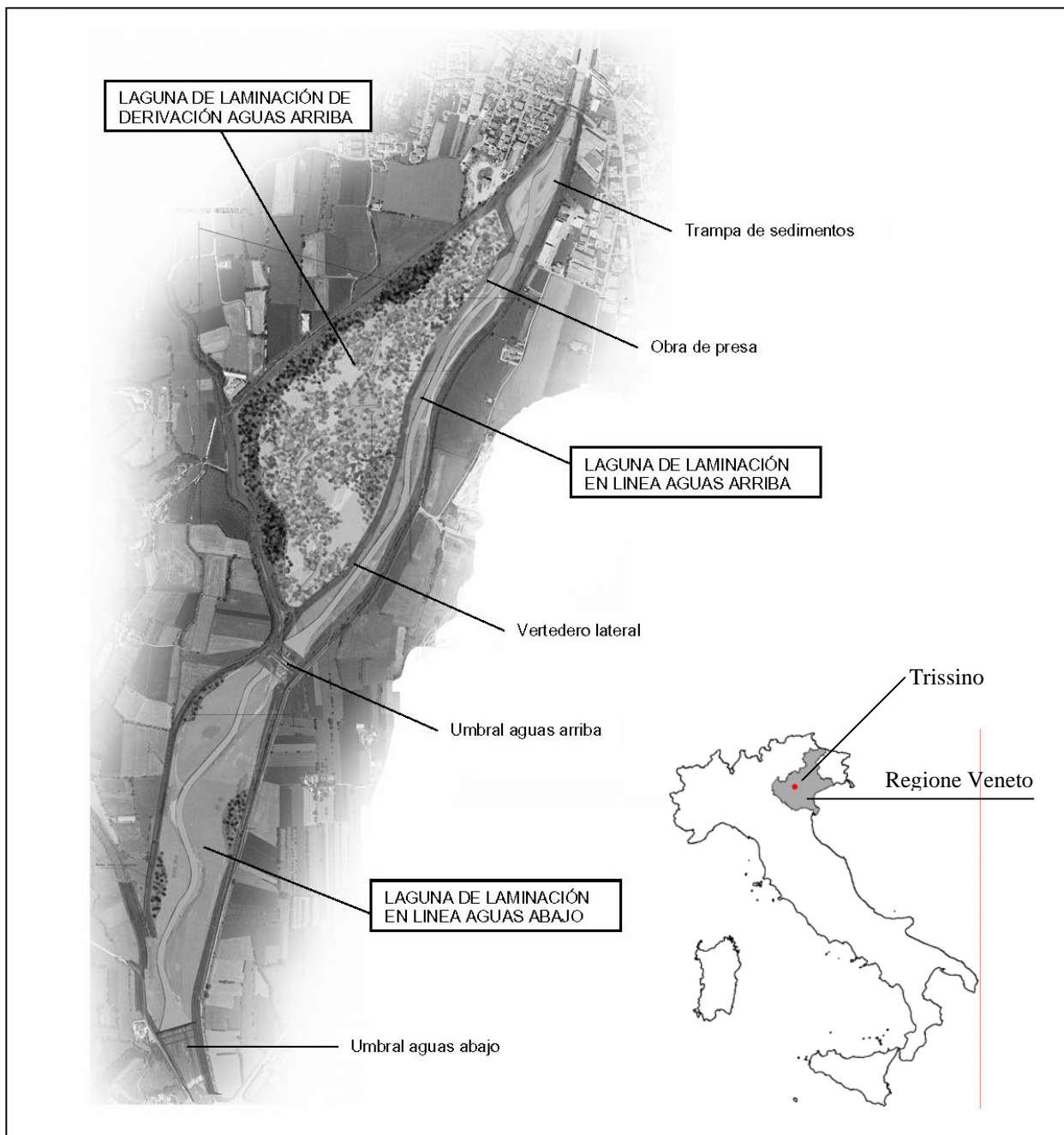


Figura 6. - Lagunas de laminación en serie en la población de Trissino (Italia).

A la salida de las lagunas en línea se colocaron dos umbrales de 5 y 6 m de altura, respectivamente. Estas obras transversales son estructuras de contención en hormigón, puestas normalmente en el eje del lecho y dotadas de amplias luces de fondo (4.50x2.20 m²), de tal manera de no interferir con el flujo normal de la corriente en régimen hidrológico de aguas bajas (Figura 8).

A aguas abajo de cada umbral se prevé la construcción de escalones para la disipación del resalto hidráulico producido. La definición de las dimensiones y el número de descargas de fondo, se efectuó mediante un modelo físico con miras a la optimización de los efectos a garantizar por las obras en proyecto.

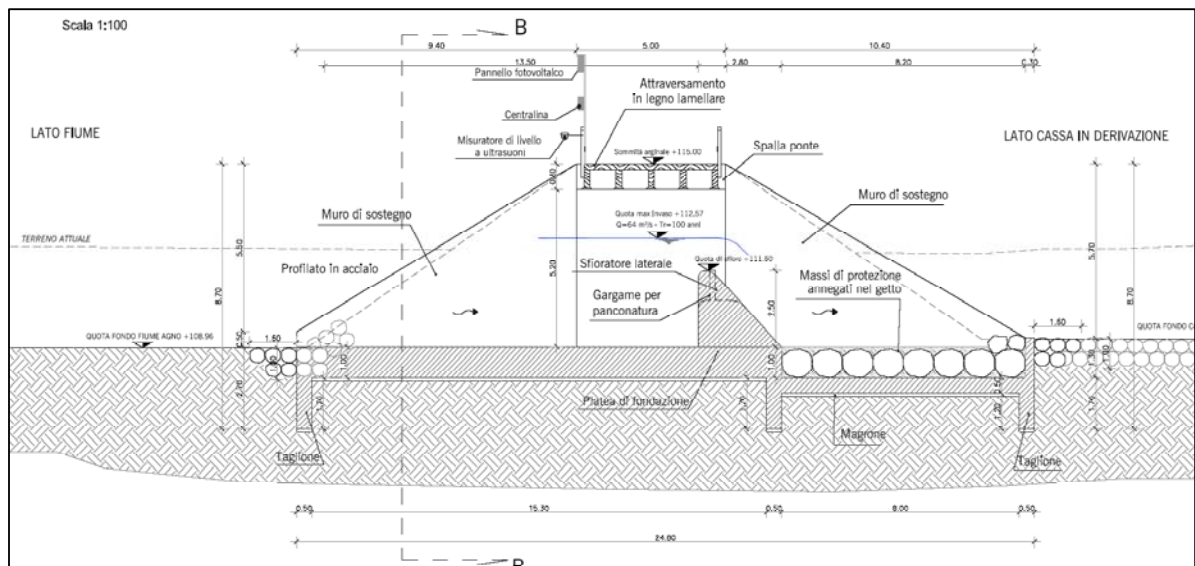


Figura 7. - Sección transversal del vertedero de alimentación de la laguna de laminación aguas arriba.

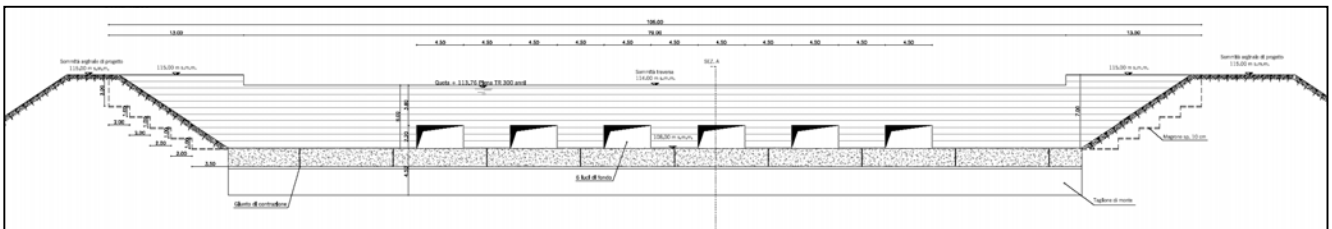


Figura 8. – Vista desde aguas abajo del umbral a la salida de la laguna de aguas arriba.

En el tramo inicial del río, aguas abajo del puente de Trissino, se realizará un ensanchamiento de la sección que sirve como una trampa de sedimentos, la cual debe mantenerse limpia mediante remoción periódica del material depositado. El proyecto pretende excavar el cauce y las lagunas de 3-4 m respecto al estado actual que, fuera de tener los volúmenes necesarios para la laminación, permite reducir la cota hidrométrica (respecto al terreno externo) y bajar y alargar las coronas de los diques aumentando el grado de seguridad de las áreas aledañas y disminuir el impacto ambiental de los diques existentes.

Efectuando el análisis de costo-beneficio se calculó el beneficio medio anual esperado después de la realización de la intervención, como la diferencia entre el daño ocasionado por inundación y el daño residuo (ver la figura 5b). Dicho beneficio, igual a 620.000 € permite recuperar la inversión en aproximadamente 36 años, considerando una tasa de interés del 5%.

El tipo de laguna propuesta en la zona de aguas arriba (en derivación) es hidráulicamente compatible con las intervenciones de reforestación. Por tal motivo, se pudieron considerar intervenciones de gran valor medioambiental con el fin de recrear una amplia variedad de hábitat que pueda enriquecer la biodiversidad faunística aumentando el valor del paisaje y las oportunidades recreativas ofrecidas por el sitio. Para este propósito, se consideraron obras de derivación de agua hacia la laguna lateral, de tal manera de crear una zona húmeda con funciones tanto ambientales como de recarga de acuíferos (Figura 6).

CONCLUSIONES

La progresiva edificación del territorio llevada a cabo en las últimas décadas y en particular la explotación de las áreas de expansión lateral de las crecidas, aprovechadas cada vez más para permitir la extensión de los asentamientos urbanos e industriales, ha causado un peligroso

acercamiento entre las áreas dentro las cuales se confinan los fenómenos que acompañan las avenidas y las áreas fuertemente antropizadas, exponiendo personas y bienes a las consecuencias destructivas de un posible hundimiento o desborde por encima del dique de protección.

Paralelamente, el progreso de las situaciones de vulnerabilidad, ha aumentado la sensibilidad a los problemas ambientales, que se impone en todos los sectores de la planificación territorial y ha obligado a redefinir las tradicionales directrices adoptadas en materia de defensa del suelo, pues éstas no siempre han actuado en el pasado respetando la dinámica evolutiva natural de los cauces y de los sistemas fluviales.

Entre las medidas estructurales para la mitigación del riesgo, la creación de una zona de expansión fluvial mediante un embalse controlado se adecua bien a los objetivos generales de la actividad de defensa hidráulica, que tiende tanto a la mitigación del riesgo como a la recalificación ambiental del territorio, evitando la artificialidad de las numerosas intervenciones que de otro modo serían necesarias para obtener resultados análogos.

La laguna de laminación es uno de los tipos de obras estructurales más usados en Europa para la mitigación del riesgo hidráulico en áreas urbanizadas. Su construcción no sólo garantiza la seguridad del sistema de defensa del territorio, sino que también es compatible con las exigencias, los criterios y los principios modernos para la gestión de las cuencas hidrográficas. Respecto de otras intervenciones (diques, ampliación de secciones, etc.), este tipo de obras es mayormente compatible con el ambiente favoreciendo la expansión de las aguas y reduciendo los caudales aguas abajo de las obras mismas (función activa).

Su realización requiere por otra parte la ocupación de vastas porciones de territorio y provoca la modificación del ambiente circundante interviniendo en la realidad social y económica local. Por lo tanto, es posible conseguir resultados positivos en términos de impacto ambiental sólo si las condiciones morfológicas del sitio se presentan favorables para la construcción de las estructuras sin exigir profundos sobre-dimensionamiento.

Este tipo de medidas implementadas para la mitigación del riesgo, puede ser aplicado en América Latina debido a los costos limitados y a la disponibilidad de áreas de expansión natural de los ríos.

REFERENCIAS

BETA Studio srl (2005). *Progetto Definitivo e Studio di Impatto Ambientale delle opere di laminazione delle piene del fiume Agno-Guà attraverso l'adeguamento dei bacini demaniali di Trissino e Tezze di Arzignano.* Regione del Veneto – Consorzio di Bonifica Riviera Berica.

Fattorelli, S., F. Longhini (2002). “Analisi del rischio idrogeologico e misure di prevenzione dei rischi naturali in America Latina.” Quaderni I.I.L.A., Serie Cooperazione 12, 262.

Fattorelli, S., E. Frank, A. Goio (2004). “Formulazione e validazione di una metodologia per il calcolo previsionale dei danni da esondazione”. XXIX Convegno Nazionale di Idraulica, Trento, 7-10 de septiembre, volume 3, pp. 423-429.

Fattorelli, S. (2005). “La experiencia italiana en la prevención y mitigación de riesgos de inundaciones”. Cambio Climático en Venezuela: la experiencia italiana. Caracas, 20-21 de junio.

Fattorelli, S., E. Frank (2005). “A distributed technique for flood damage assessment using GIS and a 2D hydraulic model”, In: Brebbia, C.A. and Antunes do Carmo, J.S. (Eds.) River Basin Management III, WIT Press, Southampton (UK), pp. 433-442.

Fattorelli, S., P. Fernández (2007). *Diseño Hidrológico.* Zeta editores. 604 páginas y un CD-ROM.

Maione, U., V. Riboni (2002). “Le casse di espansione”, La difesa idraulica delle aree urbane, Atti del corso di aggiornamento 1-5 ottobre 2001, Politecnico di Milano, Editoriale BIOS, Cosenza.