

Ubicación de bocatomas en embalses en partes altas de ríos de gran capacidad de arrastre

Zivko Gencel, Ingeniero Civil, M.Sc.
Docente. Universidad Nacional de Piura, Perú.
email: zaugencel@yahoo.com

RESUMEN:

Las captaciones de agua en reservorios ubicados en la parte alta de cauces están expuestos a recibir aportes importantes de sedimentos. Los dispositivos de evacuación de agua con sedimentos reducen este peligro al mínimo posible. Los modelos hidráulicos físicos son de gran utilidad al proyectista. Para tomar decisiones se recomienda: (1) iniciar la investigación en el modelo hidráulico con la ubicación y diseño de la toma definidos por analogía (de ser posible) con diseños de experiencias positivas; (2) simular, mediante modelo, el paso de avenidas para definir la extensión del espacio libre de sedimentos frente a la entrada de los dispositivos de evacuación de excedencias, espacio a veces llamado “cono de llamada” (en el Perú) y ubicar la captación dentro de ese espacio.

Palabras clave: bocatoma, ubicación, reservorio alto, cono de llamada, modelo hidráulico.

Correct location of water intakes located in small mountain reservoirs

ABSTRACT:

The answer to the question: where to situate the intake structure in small mountain water reservoirs for hydro-energy projects? seems to be easy. The only way to correctly solve the problem, which implies a safe intake structure against sediment invasion, would come as a result of hydraulic physical model research. The article mentions two cases of such researches concluding that the analogy, if possible, allows making the proper decision before modeling but most certainly it is necessary to learn about the position and magnitude of the “cone free of sediments” in front of the big bottom outlet structures to define properly the final position and design of the water intake.

Keywords: water intake, reservoir site, small mountain reservoir, sediment invasion, hydraulic model.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo ha surgido como consecuencia natural del proceso de búsqueda de soluciones técnicas aceptables para una bocatoma, la cual fue diseñada a partir de una analogía con bocatomas laterales con barraje móvil o represamiento causado por una serie de compuertas, pero situada en un escenario con reservorio en la parte alta de un valle (Gencel 2007).

Casualmente, el Laboratorio de la Universidad de Piura había investigado el modelo del reservorio y presa Tablachaca (Gencel 2006) situados en alto Mantaro (río) - sierra central del Perú solo un año antes. La problemática de esta anterior investigación estuvo orientada hacia la protección de la margen derecha cercana a la presa durante las operaciones de lavado de sedimentos de un reservorio angosto y la definición de los caudales más eficientes para ello.

Sin embargo, ese estudio permitió observar que la bocatoma situada dentro del espacio que quedaba libre de sedimentos junto a la presa no experimentaba mayores problemas de invasión de sedimentos. Esta favorable condición se lograba gracias a la permanente y coordinada operación de desagües de fondo o estructuras de desfogue en cotas bajas. La práctica de diseñar desfogues bajos controlados por compuertas radiales se ha hecho notoria en los últimos sesenta años y también fue parte de la solución adoptada para la presa con bocatoma modelada últimamente.

PROBLEMAS DE OPERACIÓN DE RESERVORIOS EN VALLES ALTOS

La principal característica de los ríos en la parte alta de su perfil longitudinal es la fuerte pendiente del fondo, erosión y consiguiente alta capacidad de arrastre y transporte de sedimentos. Por otro lado, la creación de reservorios de acumulación (embalses de regulación) en partes altas de los valles tiene poco sentido por el reducido volumen disponible, tratándose casi siempre de valles angostos y de laderas empinadas. No obstante, las presas en tales sitios pueden ser atractivas desde el punto de vista de aprovechamiento hidroenergético, por ejemplo.

En tales casos, los diseñadores se aseguran de poder realizar el lavado del sedimento del reservorio que se acumula principalmente durante las épocas lluviosas. Los periodos de mayores caudales del río se aprovechan para operar el reservorio a un nivel mínimo tal que permita continuar con la captación para la central hidroenergética pero también realizar la operación de purga de los sedimentos acumulados. Debe señalarse que los caudales idóneos para la purga del reservorio no se presentan en todas las épocas lluviosas necesariamente. A veces pasan varios años antes que la magnitud de los caudales resulte adecuada para la limpieza del fondo del embalse. Durante esos años la central tiene que operar y el nivel de sedimentos depositados va elevando las cotas en el perfil longitudinal del fondo del embalse amenazando, no solamente con la reducción del volumen útil del embalse (que actúa generalmente como reservorio de regulación de la central hidroeléctrica) sino también con dejar inoperante la bocatoma de la central.

En estas circunstancias los sedimentos tienden a invadir la bocatoma y la única opción operativa que queda es interrumpir la operación de la central, reducir el nivel en el embalse hasta el límite posible y purgar con más o menos éxito, dependiendo del caudal que viene por el río.

El mercado energético, por otro lado, necesita fuentes confiables pero una central que interrumpe su operación cada vez que se presentan grandes caudales –cuando debería generar más energía–, incrementa considerablemente las pérdidas económicas. Como este desfavorable escenario es muy conocido, los diseñadores acuden a investigaciones en modelo hidráulico con fondo móvil de los dispositivos evacuadores y bocatoma, para asegurarse de que la bocatoma no experimentará este tipo de problema.

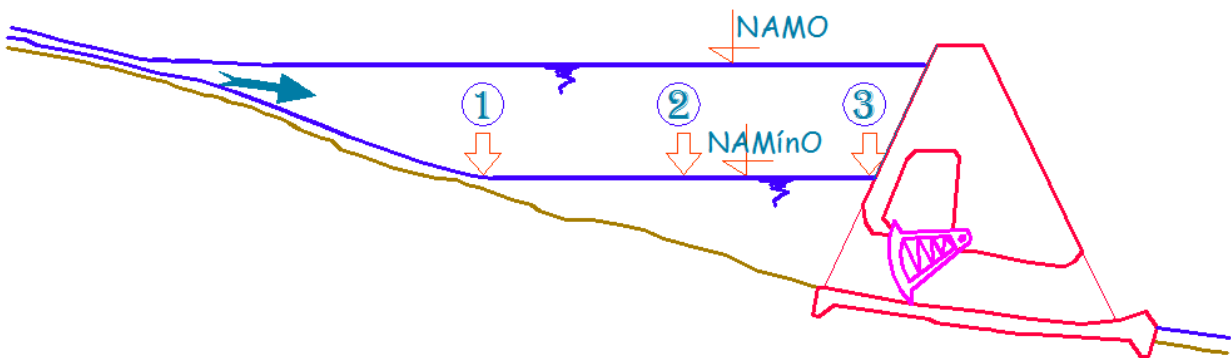


Figura 1. Ubicaciones tentativas de la bocatoma sobre el perfil del reservorio
(NAMO : Nivel de Agua Máximo de Operación,
NAMínO: Nivel Agua Mínimo de Operación)

LA UBICACIÓN CORRECTA DE LA BOCATOMA

Podría pensarse que definir correctamente la ubicación de la bocatoma, su diseño y órganos que permitirán que funcione sin problemas es fácil. Pero, a pesar de experiencias positivas en este sentido, tomar decisiones completamente correctas es una tarea más compleja de lo que pueda parecer.

ANÁLISIS DE POSIBLES OPCIONES

A primera vista cualquier ubicación, de la captación, entre las 1, 2 y 3 señaladas en las figuras 1 y 2 es posible siempre y cuando esté sumergida suficientemente por debajo del nivel mínimo en el reservorio.

Sin embargo esta hipótesis se muestra infundada al comparar estas ubicaciones en el reservorio (operando todo el tiempo con el nivel máximo) con los alcances de depósitos de sedimentos al final de un periodo de avenidas: Las captaciones en ubicaciones 1 y 2 se quedarían sepultadas bajo sedimentos quedando como única opción colocar la captación en el espacio libre de sedimentos frente a la compuerta del desagüe de fondo que suele llamarse “cono de llamada” – delimitado por el frente de los sedimentos acumulados, las caras de la represa y la compuerta y la superficie del agua.

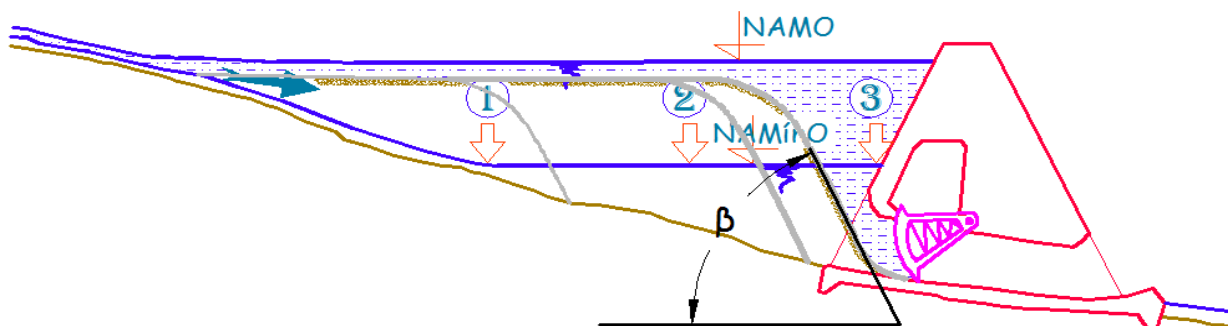


Figura 2: Los sedimentos invaden el reservorio durante meses de abundancia de agua hasta tal punto que queda solo una opción de ubicación de la captación; esta opción está marcada con el número 3.

El volumen útil del reservorio se ve afectado por la progresiva acumulación de sedimentos que pueden, como en la figura 2, asumir una magnitud muy preocupante si no se toman medidas adecuadas en la operación.

En el caso de que no se pueda evitar el crecimiento de los niveles de sedimentos acumulados en el reservorio las buenas prácticas operacionales indican iniciar maniobras de compuertas de niveles inferiores manteniendo el mínimo nivel de agua en el reservorio, de modo que induzcan a la creación de cárcavas en el cuerpo del sedimento depositado y la consecuente evacuación de los depósitos que amenazan bloquear la captación. Este tipo de maniobras, naturalmente, solo se pueden realizar si se dispone de importantes caudales ingresando al reservorio.

En todo caso la bocatoma solo funcionará sin alteraciones siempre y cuando su posición sea seleccionada correctamente. Pronto se interpone la inquietud: ¿cuál sería la posición correcta y cómo saberlo? En este, como en muchos otros casos de dilemas, la respuesta se encuentra investigando el caso concreto, o se obtiene de algún caso de funcionamiento exitoso siempre que sea factible aplicar la analogía.

SOLUCIONES QUE FUNCIONAN

Por experiencia de casos conocidos sería necesario ubicar la bocatoma en un espacio en que los sedimentos no puedan invadir ni tan siquiera logren alcanzar la altura del orificio de captación. Si las líneas de corriente que transportan los sedimentos de arrastre y en suspensión y las de mayores concentraciones se encuentran por debajo de la(s) abertura(s) de la bocatoma entonces esa es la ubicación correcta. Pero es necesario determinar: ¿dónde se daría semejante situación?

La respuesta se encuentra analizando, como se mencionó al principio, las pautas del flujo de agua y de los sedimentos en las situaciones críticas para el reservorio que ocurren cuando el funcionamiento de los órganos de captación de agua solo se puede mantener bajando el nivel del

reservorio al mínimo y evacuando grandes cantidades de sedimento con el agua mediante desfuegos ubicados en las cotas más bajas posibles de la presa.

Esto, a la vez, indica que la bocatoma debería diseñarse después de culminar la fase de investigación en modelos hidráulicos que definen los parámetros de evacuación de los sedimentos. Y también que si se analizan ejemplos semejantes como aplicables, eventualmente se descubriría que es posible dar propuestas que van a funcionar.

A PESAR DE LAS DIFICULTADES ES POSIBLE DISEÑAR CON ÉXITO

Tomando en consideración la captación de la presa Tablachaca del valle del río Mantaro, y también basándose en resultados de investigaciones en dos modelos hidráulicos que se condujeron en la Universidad de Piura, se puede decir que el espacio que está libre de un transporte importante de sedimentos y, por ende, resulta adecuado para ubicar la captación se encuentra situado a un costado o por encima de los grandes desagües de fondo (estructuras de desfogue) situados en los niveles inferiores de las presas. Al abrir las compuertas de estos desagües dentro del reservorio, enfrente de las compuertas, se forma con rapidez una zona libre de sedimentos.

Este espacio libre está limitado, según lo registrado en modelos, en su lado inferior por una rampa formada de sedimentos que abarca un ángulo respecto a la horizontal “ β ” de 20° a 35°. En el caso del modelo de la presa Tablachaca (ver figura 3- fotografía 1- Gencel 2006) donde la diferencia entre la cota del desagüe o desfogue inferior y el nivel mínimo de operación del reservorio es del orden de 25 m el ángulo de la rampa bordeaba los 35°, mientras que, en el caso del segundo modelo hidráulico de una captación dentro del reservorio (Gencel 2007), el ángulo de la rampa se encontró más cerca de 20° disponiéndose allí de solamente unos 12 m de diferencia de altura entre el nivel mínimo de operación y el fondo del dispositivo de desfogue.

Los resultados de la operación se mantienen satisfactorios mientras el caudal de entrada al reservorio no supera la capacidad conjunta de descarga de los desagües de fondo – pues el nivel en caso contrario empieza a crecer y la purga debe terminar. A pesar de lo que se podría suponer por lógica, el caudal máximo NO es el de máxima eficiencia en evacuación de sedimentos. Si la proporción de sedimentos gruesos en la masa de sedimentos transportados aumenta, el ángulo de la rampa crece. Cuanto mayor sea el espacio libre de sedimentos frente a los desagües de fondo se tendrá más comodidad para ubicar la bocatoma. De no prestar atención a estas advertencias o de ser imposible la creación de tales condiciones, las dificultades en la operación de las bocatomas no cesarán y la única solución será ubicar la bocatoma justo por encima del desagüe, lo que en muchos casos implica ubicarla en el cuerpo de la presa.

En el caso de la presa de Tablachaca el cono de llamada es apreciable y ha permitido situar la captación de agua durante purgas a un costado de la presa (figura 3 – fotografía 1).

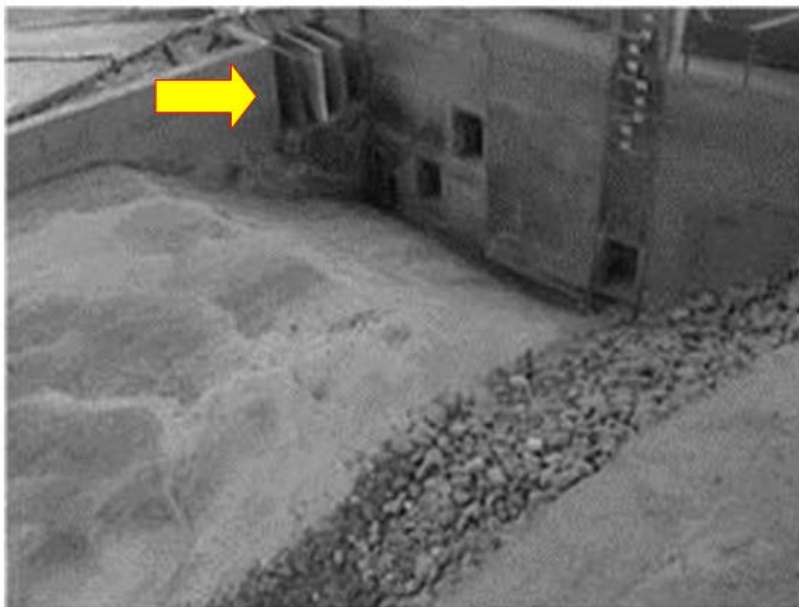


Figura 3. (fotografía 1). El cono de llamada frente a la presa Tablachaca permite que la toma opere sin ser fuertemente afectada por los sedimentos (fotografía del modelo hidráulico a escala 1:25 sin agua). La flecha señala a la bocatoma.

HALLAZGOS DE LAS INVESTIGACIONES EN DOS MODELOS HIDRÁULICOS FÍSICOS

Tal como se expresó en la introducción de este trabajo, el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Piura investigó en los años 2005 y 2006 el modelo de la presa y reservorio de Tablachaca, obra existente y en operación desde hace más de 20 años.

En la figura 3 (fotografía 1) se pueden apreciar cuatro orificios en el cuerpo de la presa. Se trata de dispositivos de evacuación correspondientes a cuatro desagües en cotas que permiten mantener controlada la acumulación de sedimentos en el reservorio. Se identifican los desagües del uno al cuatro iniciando la numeración desde el lado derecho hacia el izquierdo.

Los desagües uno y tres son de idénticas dimensiones y se ubican en la misma cota a 11.5 m por debajo de la cota del umbral de la bocatoma. El desagüe dos, proyectado como una facilidad de evacuación de objetos flotantes, está a solo 2.5 m por debajo del nivel de la bocatoma y el cuatro está a 14 m por debajo del mismo. En condiciones normales de operación con cotas del reservorio altas (25.5 m por encima del umbral de la bocatoma) el agua ingresa directamente al túnel hacia las centrales hidroeléctricas sin pasar por la bocatoma (llamada pre-toma) que funciona solamente cuando el nivel del reservorio es bajo – la cota mínima de operación es de 8.5 m por encima del umbral de la bocatoma.

El nivel del reservorio se baja a su mínimo durante la época de lluvias en la cuenca del río Mantaro. Los caudales de varios centenares de m^3 se aprovechan para lavado del fondo que se cubre de sedimentos durante periodos sin purgas – sin mayores caudales. El desagüe cuatro es el que opera más frecuentemente que los otros porque, por su cercanía a la bocatoma, mantiene los sedimentos acumulados por debajo de la misma. De esta manera, la bocatoma de la presa Tablachaca opera siempre en estas condiciones: libre de la invasión de sedimentos. Entonces, es posible tomarlo como un ejemplo de solución técnica exitosa de la bocatoma.

Lo que se ha podido medir en el modelo es el ángulo que forma la rampa frente a la presa – sus órganos evacuadores– con la horizontal. Este ángulo varió entre 19° y 37.5° en distintas circunstancias. Más frecuentemente estaba entre 20° y 30° . El cono de llamada en Tablachaca se extiende más allá de las dimensiones mínimas necesarias para que la bocatoma tenga debida seguridad contra la invasión de sedimentos (ver figura 3-fotografía 1).

El segundo modelo (ver figuras 4 a 9, fotografías 2 a 7 – Gencel 2007) se investigó a partir del fin del año 2006 y durante el primer semestre del año 2007. Tenía desagües de fondo pero la diferencia entre las cotas inferiores de los dos más grandes y la cota inferior de la entrada de la bocatoma era solamente de 6.35 m.

El nivel mínimo de operación del reservorio estaba definido a solamente 4 m por encima del fondo de la bocatoma, que estaba equipada con trampa de gravas la que fue finalmente retirada por insuficiente capacidad (debía haber sido un dispositivo de evacuación – un desagüe, para que hubiera funcionado adecuadamente. Las figuras 5 y 6 (fotografías 2 y 3) muestran la ubicación y entrada inicial de la bocatoma.

Después de una serie exhaustiva de ensayos se comprobó que la solución tenía que modificarse variando su ubicación hacia un costado del desagüe más cercano. En efecto, muy pronto se había confirmado que la solución, tal como estaba diseñada, era insostenible y solo por el nivel de avance del diseño y contrato para la construcción no se acudió a cambios más radicales del proyecto, adaptándolo en la medida de lo posible en su nueva ubicación para que pudiera funcionar sin molestias.

Los ángulos verticales entre la rampa de sedimentos y la horizontal aguas arriba del desagüe más cercano a la bocatoma (los otros no tuvieron influencia para la captación estando muy alejados de ella por el ancho del valle frente a la presa) variaron alrededor de 20 grados. Con menores caudales el frente de sedimentos se ubicaba más lejos del desagüe de fondo y la rampa presentaba ángulos “ β ” de hasta 50° que se suavizaban en la medida que el frente de sedimentos se aproximaba a la compuerta.

Las influencias del grosor de los sedimentos, del caudal y demás sobre la extensión y ángulo de la rampa que se describieron en los párrafos anteriores son fruto del análisis conducido una vez terminadas las pruebas.



Figura 4. (fotografía 2). La ubicación y diseño inicial de la bocatoma del proyecto nuevo después de un ensayo que confirma la necesidad de modificaciones.



Figura 5. (fotografía 3). La ubicación y diseño inicial de la bocatoma del proyecto nuevo después de una serie de ensayos que confirmaron la necesidad de modificaciones.

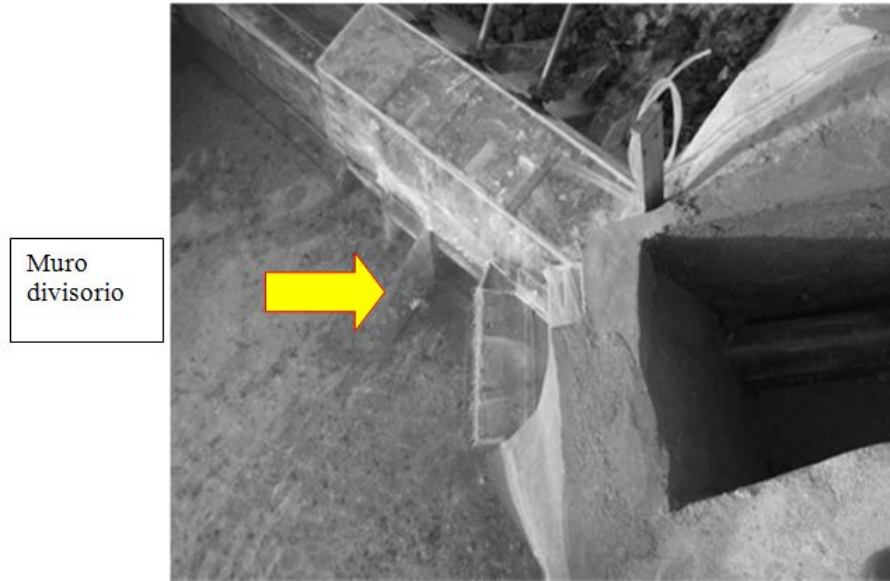


Figura 6. (fotografía 4). La bocatoma reubicada al costado del desagüe de fondo; se agregó muro divisorio entre este desagüe y los adyacentes hacia la margen izquierda. (el muro divisorio se puede identificar con toda claridad en la figura 8)



Figura 7. (fotografía 5). La bocatoma operando en la nueva ubicación sigue teniendo graves problemas (con el muro divisorio)

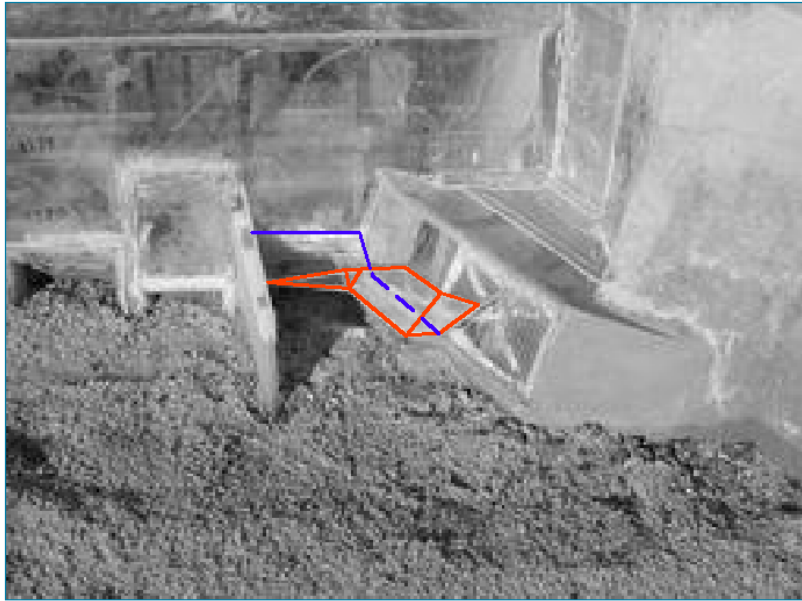


Figura 8. (fotografía 6). La solución final, ligeramente forzada, se obtuvo después del traslado de la bocatoma ya mostrado, cierre parcial de algunas de sus ventanas y creación de una bandeja especialmente diseñada.

En la figura 8 se han delimitado el fondo de la bandeja (-techo del espacio por encima del evacuador bajo) y las paredes que, junto con muro y orificios frontales de la captación forman (la bandeja) un espacio reservado solo para ingreso de agua sin mayores cantidades de sedimentos.



Figura 9. (fotografía 7). La solución final presentada en la figura 8 funcionando con uno de los caudales mayores.

CONCLUSIONES:

Concluyendo, en breve, a quienes les toque el problema de definir la mejor ubicación de la captación simple en el reservorio tienen dos opciones para proceder:

1) Iniciar la investigación en el modelo hidráulico con la ubicación y diseño de la toma definida en base a analogía (de ser posible) con algunas de las obras existentes y de buenas experiencias en funcionamiento.

2) Esperar los resultados de la simulación, mediante modelo, del paso de avenidas para definir la extensión del “cono de llamada” (espacio libre de sedimentos frente a la boca de los dispositivos inferiores de evacuación de excedencias) y solo después definir la ubicación y diseño de la bocatoma y continuar con la investigación hasta tener confirmación de resultados positivos.

La solución definida como final en el presente, a pesar de haberse comprobado su adecuado comportamiento, inclusive con mayores caudales entrando al reservorio, ha sido construida limitándose en las reglas de operación al cierre con caudales entrantes al reservorio de orden mayor de 100 m³/s aproximadamente. En términos más explícitos y fuera de las circunstancias que impedían grandes modificaciones del diseño de la captación, en este y en casos semejantes debe pensarse en incorporar la captación al cuerpo de la presa por encima de desagües de fondo de gran capacidad.

Naturalmente el problema tiene algunas otras soluciones ligeramente más complejas como lo son las conocidas de algunos ejemplos clásicos de diseño como torres de captación con múltiples orificios distribuidos en la vertical controlados por compuertas y semejantes (Bouvard 1984, US Bureau of Reclamation 1987).

REFERENCIAS

- Bouvard Maurice IAHR** (1984). “Barrages mobiles et ouvrages de dérivation”, Eyrolles, Paris, Francia.
- Gencel Zivko** (2006). “Informe final (borrador) sobre la investigación en modelo hidráulico físico de la presa y reservorio Tablachaca”. IHHS, Universidad de Piura, Perú (en las mediciones y procesamientos de datos participaron como auxiliares varios alumnos, el informe final fue redactado íntegramente por el autor de este artículo)
- Gencel Zivko** (2007). “Informe final (borrador) sobre la investigación en modelo hidráulico físico de la presa y reservorio Capillucas”. IHHS, Universidad de Piura, Perú (en las mediciones y procesamientos de datos participaron como auxiliares varios alumnos, el informe final fue redactado íntegramente por el autor de este artículo)
- US Bureau of Reclamation** (1987). “Design of Small Dams”. Denver, Colorado, EE.UU.