

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA

**PRIMER CONGRESO INTERNACIONAL DE HIDRÁULICA,
HIDROLOGÍA, SANEAMIENTO Y MEDIO AMBIENTE**

HIDRO 2006

CONFERENCIA

**LA PROBLEMÁTICA DE LA SEDIMENTACIÓN DE EMBALSES
EN EL APROVECHAMIENTO DE LOS RÍOS PERUANOS,
APLICADA AL EMBALSE DE POECHOS**

Dr.- Ing. Arturo Rocha Felices
Consultor de proyectos hidráulicos

CONTENIDO

Presas y embalses, 2
Embalses frontales y laterales, 6
El aporte sólido de la cuenca, 9
El azolvamiento: la pérdida de volumen útil, 13
La sedimentación de Poechos, 17
Control de la sedimentación y de sus consecuencias, 21
Perspectivas, 26
Referencias, 28

Presas y embalses

Los ríos, que son indiscutible fuente de vida, constituyen parte muy importante de la riqueza de un país; y es por eso que su aprovechamiento ha marchado parejo con el progreso de la humanidad, desde sus más remotos inicios hasta nuestros días. En épocas antiguas el aprovechamiento de los ríos se hacía mediante sencillas obras de ingeniería; en los tiempos actuales se requiere de obras complejas con una intensa participación de la más avanzada ingeniería para satisfacer la creciente demanda de agua, debida tanto al crecimiento poblacional como a la búsqueda de una mejor calidad de vida para cada ser humano.

Muchas veces el aprovechamiento fluvial se ve dificultado porque, por lo general, los caudales de los ríos son irregulares en el tiempo. Es conocido que las variaciones de las descargas de los ríos son muy notorias a lo largo del año hidrológico. Los ríos de la costa norte peruana, a los que se refiere fundamental, pero no exclusivamente este trabajo, lo son en mucho mayor grado. Es así como hay un periodo que usualmente es de avenidas y, otro, al que llamamos de estiaje, en el que los caudales de los ríos disminuyen notablemente y, a veces, desaparecen completamente. Así ocurre con el río Chira sobre el cual se encuentra la presa de Poechos, estructura clave del Proyecto Chira-Piura, que tiene para su masa media mensual de marzo un valor de 397 m³/s, en cambio para el mes de noviembre dicho promedio es de 29 m³/s, lo que significa una relación de casi 14:1. Además de esta importante variación estacional hay otra que corresponde a las masas anuales; es así como hay años de abundancia de agua y otros de escasez. Si pensásemos en las masas anuales para el mismo río tendríamos en 1998 un máximo de 17 733 millones de metros cúbicos (MMC) y para el año 1968 un mínimo de 634 MMC, dentro de un periodo de estudio bastante largo, lo que muestra entre los valores extremos una relación de 28:1. Estos fuertes contrastes describen claramente la gran irregularidad de las descargas fluviales, a lo que debe añadirse que en los ríos hay, eventualmente, varios años seguidos, sea de abundancia o de escasez.

Para desarrollar un proyecto de aprovechamiento hidráulico se requiere un cierto grado de regularidad en la disponibilidad de agua, que permita satisfacer oportunamente las demandas. Por lo tanto, cuando se trata del aprovechamiento de ríos de régimen irregular surgen las presas y los respectivos embalses de almacenamiento y regulación, como una necesidad inherente al proyecto. Los embalses, o pantanos, como se les dice en España, son lagos artificiales, es decir, construidos por el hombre, con el fin de almacenar y regular las aguas de un río para poderlas utilizar en un proyecto de riego, de generación hidroeléctrica, de abastecimiento poblacional o industrial, o para otros fines como el control de avenidas. Eventualmente, los embalses tienen varios de estos usos y constituyen así embalses de propósito múltiple. Los embalses cumplen, pues, la función de efectuar el almacenamiento y la regulación temporal de las descargas naturales. Su importancia social y económica es innegable.

En correspondencia con las necesidades de almacenamiento y regulación y con las características de los ríos, los embalses pueden ser pequeños o grandes. En un caso extremo pueden ser de una simple regulación horaria y, en otro, de una regulación plurianual. Así por ejemplo, el embalse de Tablachaca, sobre el lecho del río Mantaro, que abastece a la Central Hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo, sólo requiere de muy pocos millones de metros cúbicos de regulación (dos o tres) para garantizar el caudal requerido por la central, pues el río Mantaro no presenta grandes variaciones en sus descargas, sobre todo si se le compara, por ejemplo, con el río Chira, antes mencionado, sobre cuyo lecho se encuentra el embalse de Poechos que se proyectó con un volumen total de 885 millones de metros cúbicos. Dentro de los embalses grandes se podría recordar también el embalse de Cazaderos, que se estudió para el proyecto binacional Puyango-Tumbes, con una capacidad de 12 000 millones de metros cúbicos.

Cuando las presas requeridas para la creación de embalses están ubicadas sobre el lecho del río, como por ejemplo las de Poechos y Gallito Ciego,

provocan grandes transformaciones fluviales, que se manifiestan básicamente en la forma de agradación aguas arriba de la presa y degradación aguas abajo. La agradación consiste en que una gran parte de los sólidos transportados por la corriente deposita en el embalse y causa la disminución de su volumen de almacenamiento. La pérdida de volumen útil de los embalses es un fenómeno natural, que se desarrolla en el tiempo y que en determinadas circunstancias puede acelerarse. A esto debe añadirse que la deposición de sólidos puede ser de tales características que produzca la obstrucción de las tomas, lo que crearía un grave problema, aun sin pérdida significativa de volumen de almacenamiento.

No todo embalse, que pueda resultar factible desde diversos puntos de vista técnicos, como podrían ser los aspectos topográficos, hidrológicos o geológicos, es necesariamente factible y conveniente desde el punto de vista sedimentológico. Así como algunas veces durante los estudios se abandona un probable lugar de embalse porque sus condiciones geológicas son desfavorables, o no pueden ser manejadas a un costo razonable, también debe ser posible descartar un embalse porque no reúna las condiciones sedimentológicas adecuadas; es decir, porque se estima que el Riesgo Sedimentológico de pérdida de su capacidad de almacenamiento es muy alto. Se diría entonces que no hay Factibilidad Sedimentológica para el embalse. La Factibilidad Sedimentológica, como se verá más adelante, está asociada a diversos aspectos del Proyecto. Algunos de ellos podrían estar fuera de control del proyectista.

Es indudable que para la creación de embalses se ha requerido la construcción de grandes presas, que han contribuido notablemente al progreso humano, y que, en las próximas décadas se continuará haciéndolo, prueba de ello es que en la actualidad hay en el mundo aproximadamente unas 40 000 grandes presas (las presas que pasan de 15 m de altura de denominan “grandes”) y que representan unos 6 352 km³ de capacidad de embalse.

Pero, la construcción de grandes presas implica, como toda obra de ingeniería, no sólo un beneficio, sino, eventualmente, un impacto ambiental que debe evitarse o contrarrestarse. A veces estos impactos ambientales son inevitables y, por lo tanto, deben incorporarse a un balance entre los aspectos positivos y los negativos del proyecto. Es, pues, tarea de la ingeniería procurar que en un proyecto el impacto negativo de las grandes presas sea mínimo. En tal sentido, el impacto de las presas y los embalses resultantes deben estudiarse como parte del Manejo Integrado de la Cuenca. Nuestra legislación establece la obligación de realizar un Estudio de Impacto Ambiental. En la actualidad, y desde hace algunos años, existen en diversas partes del mundo corrientes de opinión que sostienen que no debería seguirse construyendo grandes presas, pues sus impactos negativos serían mayores que los beneficios. No deja de ser significativo que quienes sostienen estas teorías pertenezcan a países que hace muchos años construyeron muchas grandes presas y que ya han logrado un desarrollo social, infraestructural y económico significativo.

Uno de los impactos negativos más común es la sedimentación que se produce aguas arriba de la presa y la consiguiente pérdida de volumen útil, que atenta contra la existencia misma del proyecto. Como en un embalse se trata de regular caudales es necesario guardar agua en épocas de abundancia, que es precisamente cuando los ríos traen la mayor cantidad de sedimentos, los que quedan en gran parte retenidos en el embalse dando lugar al fenómeno llamado agradación. Las grandes avenidas siguen hacia aguas abajo de la presa, con menor cantidad de sedimentos y producen, si existen determinadas condiciones, el fenómeno llamado degradación.

En la costa norte peruana se tiene graves problemas de sedimentación de embalses, lo que hace necesario una evaluación del estado de la cuestión con relación a la factibilidad de construcción de presas de regulación sobre el lecho fluvial en zonas muy erosionables, semiáridas, sujetas al Fenómeno de El Niño y concebidas con una vida útil excesivamente corta y sin un proyecto sustitutorio evidente. Este problema no es exclusivo de la costa norperuana, sino que ocurre en diversas partes del mundo. Se calcula que a

nivel mundial se pierde anualmente hasta el 1% de la capacidad total de los embalses existentes, según lo expresa K. Mahmood, quien señala también que en términos del costo de reposición esto equivale a unos 6 000 millones de dólares. Sin embargo, en muchos embalses la sedimentación media es mayor y, en algunos, ha ocurrido una sedimentación acelerada que ha dado lugar a que en pocos años ciertos embalses pierdan una parte significativa de su volumen útil. El Boletín de ICOLD sobre Colmatación de Reservorios señala que en cuencas pequeñas ha habido colmataciones del orden del 4 a 5% anual. En trabajos anteriores del autor hay numerosas referencias a embalses con colmatación acelerada.

El éxito sedimentológico de un proyecto de embalse depende de la capacidad del sistema para mantener un volumen útil todo el tiempo que sea necesario. El análisis de la sedimentación de embalses es el tema del presente trabajo, visto desde la perspectiva de la presa de Poechos, como caso emblemático de la costa norperuana, puesta en servicio en 1976, y que luego de soportar dos Meganiños ha perdido, como se verá más adelante, una parte importante de su volumen de almacenamiento.

Embalses frontales y laterales

En la ingeniería del aprovechamiento de los recursos hidráulicos se distingue usualmente dos clases de embalses, cuya diferenciación es fundamental desde el punto de vista sedimentológico y, por lo tanto, de la conservación de su capacidad de almacenamiento. Unos, que se encuentran sobre el lecho fluvial, a los que podríamos llamar frontales y, otros, ubicados fuera de la corriente principal a los que se llama laterales. Los primeros, como Poechos sobre el río Chira, Gallito Ciego sobre el río Jequetepeque o Tablachaca sobre el río Mantaro, reciben la totalidad del aporte sólido fluvial. En cambio, los segundos, los laterales, como por ejemplo el de Tinajones, reciben sólo una parte del aporte sólido fluvial y, además, pueden y deben protegerse con un desarenador de eficiencia adecuada. Así por ejemplo, el embalse de Palo Redondo del proyecto CHAVIMOCHIC fue concebido en el estudio de factibilidad como un embalse

lateral, con respecto al canal de derivación, al que sólo ingresarían los caudales que requerían regulación y que eran excedentes con respecto a la demanda en un momento dado.

Los embalses frontales reciben, como se ha dicho, la totalidad del transporte sólido del río, gran parte del cual queda retenido en el embalse. Poechos retiene bastante más del 90% de la cantidad total de sólidos que ingresa al embalse. Sedimentológicamente se distingue dos grandes tipos de embalses frontales, cuya diferencia consiste en que en unos se admite la imposibilidad práctica de eliminar una cantidad sustancial de los sólidos depositados en el embalse y, por lo tanto, se considera en el diseño un volumen adicional al útil, al que se denomina Volumen Muerto, que es diferente del volumen muerto por cota de derivación, para el depósito y acumulación de los sólidos durante un cierto número de años que se asocia a la llamada vida útil del embalse (cuando este concepto es aplicable), tal como se proyectó el embalse de Poechos. Esta solución implica, naturalmente, una mayor altura de presa. En cambio, en el otro tipo de embalses frontales existen y se aprovechan las condiciones naturales para realizar la eliminación de los sólidos que se presentan durante las grandes avenidas, además de los depositados en el embalse, mediante una operación de purga, generalmente anual, como se realiza en el embalse de Tablachaca. En todos los embalses no se puede realizar una purga hidráulica, pues es necesario que concurren varias condiciones entre las que están: determinadas condiciones geométricas del embalse, presencia de materiales básicamente no cohesivos, caudales disponibles para la purga, posibilidad de implementar compuertas adecuadas, posibilidad de disminuir o interrumpir el servicio, etc. En los embalses pequeños puede pensarse en eliminación mecánica de los sólidos depositados.

Al constituir los embalses laterales almacenamientos ubicados fuera de la corriente principal sólo reciben una parte de los sólidos transportados por la corriente, la que puede ser un río o un canal. Por lo tanto, desde el punto de vista sedimentológico, sólo podría considerarse propiamente como un embalse lateral, aquél que cumpla dos condiciones:

- i) Que sólo ingresen a él los caudales excedentes del sistema de aprovechamiento; es decir, que el embalse no sea un elemento de paso para caudales que no necesitan regulación, y
- ii) Que el embalse esté convenientemente protegido por un adecuado desarenador.

Si se cumplen estas dos condiciones se podrá analizar el funcionamiento del embalse considerándolo sedimentológicamente como lateral. Naturalmente que el Volumen Muerto reservado para el depósito de sedimentos será mucho menor que en un embalse frontal. De acá que, sedimentológicamente, es preferible tener un embalse lateral y no uno frontal. La ventaja de los embalses frontales reside en que por lo general se puede almacenar una mayor cantidad de agua. En los embalses laterales el volumen de almacenamiento está limitado por la capacidad de la obra de toma y en muchas oportunidades por su propia capacidad topográfica de almacenamiento.

En el momento de elaborar un proyecto se establece la vida del embalse, cualquiera que sea su clase, lo que debe hacerse en concordancia con sus fines y sus costos y aceptando, desde el punto de vista de la pérdida de su volumen útil, un riesgo razonable de falla, que acá denominamos Riesgo Sedimentológico.

El estudio de factibilidad del proyecto Chira-Piura finalizó en 1968 y se realizó después de haber efectuado en 1967 un estudio de alternativas de aprovechamiento de las aguas de los ríos Chira y Piura, de modo de lograr el afianzamiento del riego en el valle de Piura, el que por esa época era un rico valle algodonero dependiente de las erráticas descargas del río Piura y de la explotación de sus aguas subterráneas. La solución finalmente adoptada fue la de construir una gran presa sobre el cauce del río Chira, de modo de regular sus descargas y afianzar así el riego de los valles del Chira y del Piura. El río Catamayo-Chira es un río peruano-ecuatoriano, cuya

cuenca hasta Poechos es de 13 220 km², la mayor parte de la cual se encuentra en territorio ecuatoriano y cuyo aprovechamiento se realiza en virtud de un convenio binacional específico. Es útil recordar que la presa de Poechos no fue concebida como de control de avenidas, sino como de regulación de riego. La presa de Poechos es una estructura de material suelto, cuyo cuerpo principal tiene una altura de 48 m; consta además de dos diques laterales de altura variable. El embalse resultante tiene un volumen total de 885 MMC, en su cota normal de operación. Su largo es de 24 km y el ancho máximo es de 7,4 km. La presa fue diseñada de modo que su altura pueda eventualmente sobreelevarse en 5 m, con lo cual el volumen total del embalse, en su cota de operación normal, llegaría a 1 234 MMC.

Poechos es, pues, una presa frontal a cuyo embalse ingresa la totalidad de los sedimentos originados en la cuenca Catamayo-Chira. Las características geométricas del embalse no permiten efectuar su purga, por lo que la solución adoptada consistió en darle al embalse un volumen adicional al requerido para las necesidades de riego, de modo que en él depositen los sedimentos acarreados por el río. El punto crucial, en este tipo de embalses, además ciertamente de la determinación confiable del aporte sólido de la cuenca, es el de asociar la sedimentación (el azolvamiento) a un determinado número de años conocido como la “vida útil del embalse”, que para Poechos fue establecido en 50 años. Este importante punto será discutido más adelante.

El aporte sólido de la cuenca

El conocimiento de la magnitud del aporte sólido de la cuenca, producto de su erosión, es de vital importancia para el éxito sedimentológico de un proyecto de embalse. La Erosión Específica de una cuenca, es decir, su producción de sedimentos por unidad de área y por unidad de tiempo es muy variable de una cuenca a otra y, en una misma cuenca, a lo largo del tiempo también lo es. Durante años o décadas una cuenca puede tener una Erosión Específica relativamente pequeña y, de pronto, en coincidencia con

un evento hidrometeorológico extraordinario que podría ser un Meganiño, la Erosión Específica se multiplica varias veces. De acá que la determinación de la producción de sedimentos de una cuenca se enfrenta, entre otras, a la dificultad de que en el mejor de los escenarios podamos disponer de datos del pasado, pero la obra debe funcionar en el futuro. En los problemas de erosión, no siempre el futuro es igual al pasado. Lo mismo ocurre con la determinación de caudales, especialmente en lo que respecta a eventos extremos.

La selección de la clase y tipo de embalse, su vida probable, sus condiciones de operación y la factibilidad misma de realizar el proyecto deberían estar asociadas al grado de incertidumbre que exista en la determinación del aporte sólido de la cuenca respectiva. No debemos perder de vista que la idea de regular las descargas fluviales mediante embalses surgió en lugares en los que no había un transporte sólido intenso. Por el contrario, las cuencas de la costa norperuana, así como muchas otras del Perú, sufren un agudo proceso de erosión que da lugar a un fuerte transporte sólido. Son muy conocidos los varios factores determinantes de la erosión de las cuencas. Pero, una cosa es establecer la existencia de esos factores y señalar la posibilidad teórica de controlarlos y otra, muy diferente, es conocer y controlar realmente el aporte de sólidos de la cuenca en los próximos 50 o 100 años, sobre todo en cuencas sujetas a la aparición eventual, con gran magnitud, del Fenómeno de El Niño.

Debemos, pues, aceptar como una realidad que el cálculo a futuro del aporte sólido de una cuenca no es algo sencillo de realizar. Uno de los factores que incide de un modo mayor en la producción de sedimentos de la costa norperuana es la aparición eventual del Fenómeno de El Niño (FEN) con características de Meganiño. Las grandes lluvias que ocurren durante el FEN, de cantidad, intensidad y duración inusitadas, son la causa de una extraordinaria producción de sedimentos, tanto en la parte de la cuenca donde usualmente hay erosión, como en las partes de la cuenca donde llueve sólo excepcionalmente y que se encuentran completamente desprotegidas. Si a estas grandes cantidades de sedimentos se asocian las

enormes descargas fluviales de larga duración, resultantes de las lluvias extraordinarias se tiene caudales sólidos inusualmente altos que se dirigirán inevitablemente hacia nuestros embalses, como efectivamente ha ocurrido en los últimos años.

La experiencia vivida en las últimas décadas ha demostrado que aunque se tuviese una serie histórica de precipitaciones, digamos de 30 años, que sería aparentemente larga para nuestra realidad, ésta sólo sería representativa en la medida en la que incluyese eventos extremos. Así por ejemplo, entre 1927 y 1982 transcurrieron 56 años sin que se presentase un Meganiño en la costa norperuana. En cambio en los últimos 22 años, menos de la mitad del intervalo anterior, han ocurrido dos Meganiños (1983 y 1998). La consecuencia directa de las grandes lluvias es la erosión de la cuenca. Así por ejemplo, en la cuenca Catamayo-Chira la relación entre la Erosión Específica máxima y la Erosión Específica media es casi de 9:1 y la relación entre la Erosión Específica máxima y la mínima es de 360:1. Estos notables contrastes explican muchos aspectos del comportamiento sedimentológico de la cuenca.

Como consecuencia de la gran erosión de la cuenca y de los caudales extraordinarios se tiene que los ríos transportan durante los Meganiños enormes cantidades de sólidos. En general, el cálculo de los caudales está basado en un estudio hidrológico, muy dependiente de la longitud y calidad de las series históricas disponibles, así como de los métodos probabilísticos usados. Por lo tanto, el cálculo de los caudales que pueden presentarse en el futuro es esencialmente retrospectivo, porque mira al pasado. En cambio, el cálculo de la erosión de la cuenca y, por lo tanto, del transporte sólido, debería ser esencialmente prospectivo, porque mira al futuro. ¿Cómo saber cual es el tratamiento que se va a dar a la cuenca en los próximos años o décadas?

El transporte sólido fluvial resultante de la erosión de la cuenca se realiza de dos modos característicos: suspensión y fondo. El gasto sólido en suspensión se determina a partir de las mediciones efectuadas; en cambio

el de fondo se encuentra a partir de la determinación analítica de la capacidad de transporte de la corriente fluvial. En general, en los ríos de un caudal relativamente importante, la mayor parte del transporte sólido corresponde a la suspensión. El gasto sólido, de fondo o de suspensión, depende mucho de los caudales fluviales. Por lo tanto, además de la acuciosidad de las mediciones y cálculos sedimentológicos, el resultado final dependerá mucho de los caudales que se presenten y de la predicción que se haya hecho de ellos. Las mediciones hidrológicas y sedimentológicas, que deberían realizarse durante muchos años, no siempre están disponibles en el momento de estructurar un proyecto. Generalmente son escasas y de baja confiabilidad. Casi nunca incluyen las mediciones correspondientes a los caudales altos. Por lo tanto, la curva gasto líquido-gasto sólido no es muy confiable, pero es lo único de lo que se dispone y generalmente se extrapola, con gran imaginación, todo lo que sea necesario.

La determinación de la capacidad total de un embalse implica el cálculo del volumen útil requerido para las necesidades del servicio y el cálculo del volumen adicional necesario (Volumen Muerto) en función del aporte sólido y del funcionamiento hidráulico del sistema, además de otras consideraciones.

La experiencia de las recientes décadas nos indica que la producción de sedimentos de una cuenca en los próximos años (relacionados con la vida del embalse) depende de la probabilidad de que se presenten uno o más eventos hidrometeorológicos extremos (Meganiños). Aún más, la pérdida de volumen del embalse depende de la oportunidad en la que se presente un evento extremo: no es lo mismo, para efectos de la pérdida de volumen útil de un embalse, que el evento extremo se presente al principio o hacia el final de su vida útil.

Ha sido frecuente que con gran optimismo se declare en el momento de desarrollar los estudios de un proyecto, cuyo éxito depende de la conservación del volumen útil del embalse respectivo, que se ejecutarán

medidas de conservación de la cuenca, reforestación, control de la erosión, manejo de la cuenca, etc. Estas acciones no son fáciles de implementar y, en cuencas relativamente grandes, prácticamente imposible de llevarse a la realidad. En la literatura mundial hay numerosos ejemplos de control de la erosión en cuencas pequeñas, pero en cuencas relativamente grandes y, además, muy erosionables y ubicadas en áreas sujetas a la aparición eventual de Meganiños, la situación es completamente diferente.

En conclusión, debemos aceptar la existencia de grandes incertidumbres asociadas a la determinación de la erosión de la cuenca y, por lo tanto, en el cálculo de su aporte sólido. Su valor debe considerarse meramente referencial y este hecho no debe dejarse de lado en la concepción de un sistema de almacenamiento y regulación de las aguas de un río mediante un embalse frontal.

A pesar de la incertidumbre señalada llama poderosamente la atención, y debería ser objeto de reflexión, que en el cálculo del Volumen Muerto de un embalse, que es función directa de algo tan incierto como la producción de sedimentos de la cuenca, no se considere un coeficiente de seguridad, como se suele hacer en los diseños de ingeniería. Llama más la atención que se proyecte para algunos embalses vidas tan cortas como la de 50 años, que nunca más deberían utilizarse.

El Azolvamiento: la pérdida de volumen útil

El azolvamiento es el proceso mediante el cual los sólidos acarreados por la corriente fluvial depositan dentro de un embalse y originan su pérdida de volumen útil. El nombre viene de la palabra azolve que significa "sedimento". Hay varios sinónimos como atarquín, que viene de tarquín, palabra de origen árabe que significa lodo, y aterramiento, que se usa en España. En el Perú suele usarse la palabra sedimentación y también está muy extendido el uso de la expresión colmatación. La sedimentación de embalses es un proceso inevitable, que se desarrolla en el tiempo con

velocidad variable. La sedimentación acelerada se presenta cuando la pérdida de volumen útil de un embalse se produce a una velocidad mayor que la prevista, lo que afecta o puede afectar en el futuro, el éxito del proyecto.

Para conocer la pérdida de volumen útil que ocurrirá en un embalse con el paso del tiempo hay que resolver varios problemas, entre los que están:

- a) la determinación del aporte de sólidos de la cuenca en el futuro,**
- b) la eficiencia de retención de sólidos en el embalse,**
- c) la ubicación de los sólidos depositados dentro del embalse, y**
- d) el peso específico aparente de los sólidos depositados.**

El primer problema, el de la determinación del aporte de sólidos de la cuenca, ha sido comentado en el punto anterior de este trabajo.

El segundo problema, el de la eficiencia de retención, entendida como la relación entre los sólidos depositados aguas arriba de la presa y los sólidos totales que aporta la cuenca, depende de varios factores, entre los que están el tamaño y forma del embalse, los caudales que se presentan, el tamaño de las partículas sólidas (específicamente, su velocidad de caída), las reglas de operación del embalse, la existencia de sistemas de purga y la formación de corrientes de densidad. En embalses grandes, como el de Poechos, con material sólido predominantemente fino y sin sistemas de purga, la eficiencia de retención es bastante alta. Las estimaciones de campo indican para Poechos un valor del 94%. En cambio en los embalses muy pequeños la eficiencia de retención suele ser bastante baja. Existen algunos procedimientos empíricos, desarrollados a partir de informaciones provenientes de un cierto número de embalses de determinadas características, que ofrecen valores de la eficiencia de retención. Estos valores deberían considerarse como meramente referenciales y no deberían aplicarse en lo absoluto cuando la forma o las condiciones de operación del embalse y otras características del sistema en estudio, difieran

notablemente de las correspondientes a los embalses que sirvieron para establecer dichas relaciones empíricas.

El tercer problema se refiere a la ubicación de los sólidos depositados aguas arriba de la presa. Al construirse una presa frontal y crearse un embalse se produce una profunda transformación fluviomorfológica. Los sólidos que venían siendo transportados por la corriente sedimentan en diversos lugares, cada uno de los cuales tiene diversas implicancias para el funcionamiento del sistema de almacenamiento. Los lugares de esta distribución de los sólidos son los siguientes:

- i) *Dentro del embalse útil* (referido a la cota normal de operación). Este tipo de depósitos es el que causa un efecto negativo inmediato. Cada metro cúbico de sólidos depositado dentro del volumen útil reduce en un metro cúbico el volumen de regulación y, en bastante más, la capacidad de regulación del sistema.
- ii) *Dentro del volumen muerto por cota de derivación*. Este tipo de depósitos no causa un efecto negativo inmediato, puesto que el volumen muerto, por su propia ubicación topográfica, no es aprovechable. Desafortunadamente, los sólidos no depositan en el lugar que nosotros quisiéramos, es así como podría ocurrir una pérdida importante de volumen útil, sin que se haya ocupado totalmente el volumen muerto por cota de derivación. Eventualmente estos depósitos, por su cercanía a la toma, pueden obstaculizar o impedir la captación.
- iii) *Fuera del embalse*. Estos depósitos se producen cuando por circunstancias excepcionales el nivel del embalse sube temporalmente por encima de su nivel normal de operación, lo que puede deberse al tránsito de una avenida. Esta avenida excepcional trae gran cantidad de sólidos que depositan por encima del embalse y más allá de la curva de remanso, definidos por la cota normal de operación. Estos depósitos pueden permanecer allí muchos años, sin causar disminución del volumen útil del embalse, pero constituyen una fuente potencial de sedimentos, que en

algún momento, como cuando se produzcan lluvias sobre el embalse, podrían ingresar a él y disminuir su volumen útil. El conocimiento de la magnitud de estos depósitos es indispensable, tanto para el análisis del embalse a largo plazo, como para pensar en alguna sobreelevación del nivel normal de operación, por cuanto el volumen aparente que se ganaría podría estar ya parcialmente ocupado por sedimentos.

iv) *Aguas abajo del embalse.* Una cierta cantidad de sólidos, constituida por las partículas de menor tamaño, no sedimenta en ninguno de los tres lugares antes mencionados y sigue de largo hacia aguas abajo de la presa y, finalmente, deposita en algún lugar. El ideal sería que en un embalse la mayor cantidad de sólidos siga hacia aguas abajo, es decir, que su eficiencia de retención sea mínima, lo que puede lograrse en ciertos embalses con sistemas de purga, corrientes de densidad y reglas de operación adecuadas.

A propósito de la distribución de sólidos en el embalse es conveniente recordar que en varios embalses el mayor depósito de sólidos se produce, desgraciadamente, dentro del volumen útil y no dentro del volumen muerto por cota de derivación, donde hubiera sido deseable que ocurra.

El cuarto problema se refiere el peso específico aparente de los sólidos depositados dentro del embalse, el que varía con el paso del tiempo como consecuencia de la compactación que sufren. Los estudios iniciales de Poechos consideraron un valor final de $1,1 \text{ t/m}^3$.

Estas y otras consideraciones son las que se toman en cuenta para determinar el Volumen Muerto que debe darse a un embalse, como parte de su volumen total, para asegurar el servicio durante un cierto número de años que corresponde a la vida del embalse. El tema de la vida útil de un embalse frontal, sin purga, está íntimamente ligado a la naturaleza del proyecto y a la existencia de un proyecto sustitutorio. Es particularmente interesante lo que ocurre con las irrigaciones, que corresponde a los

grandes proyectos hidráulicos de la costa norte, cuyo periodo de maduración es lento, pues corresponde al de la incorporación de las tierras agrícolas a la producción, lo que puede tomar muchos años. De otro lado, por su propia naturaleza los proyectos de irrigación significan una transformación de la naturaleza en provecho del hombre que implica una actividad permanente. Por lo tanto, resulta muy difícil relacionar el concepto de que un embalse pueda tener una “vida útil”, que obviamente es limitada, con la duración de un proyecto de irrigación que es prácticamente ilimitada. Mucho menos sentido tiene pensar en una “vida útil” de 50 años para un proyecto de riego.

La sedimentación de Poechos

Desde que surgió la posibilidad de construir una presa sobre el cauce del río Chira y crear así un embalse frontal con el objeto de regular y almacenar sus caudales para su trasvase a la cuenca del Piura, luego de satisfacer la necesidades del valle del Chira, hubo preocupación por el tema de los sedimentos y la probable pérdida de capacidad del embalse con el paso del tiempo. Este era uno de los puntos fundamentales para determinar el volumen total del embalse. Por razones no precisadas y cuya fundamentación no conozco se escogió para el embalse una vida útil de 50 años. Esto significaba que transcurridos 50 años el volumen útil empezaría a disminuir. Esta cortísima vida útil, incompatible con un proyecto de riego, se repitió en otros embalses como en el de Gallito Ciego, el de Limón y el de Palo Redondo.

Una de las primeras determinaciones del transporte de sedimentos del río Chira fue la estimación preliminar realizada por International Engineering Company, Inc. (IECO) en 1965, prácticamente sin información de campo, en la que fijó en 356 MMC el volumen de sedimentos en 50 años. Este valor fue corregido por IECO como consecuencia de que la Dirección de Irrigaciones del Ministerio de Fomento y Obras Públicas mostró que el Consultor había incurrido en un error.

Posteriormente, en el estudio de alternativas de 1967 de aprovechamiento del río Chira se plantearon varias posibilidades, las que incluían algunos embalses entre los que estaba el de Poechos. En aquella oportunidad, con poquísima información sedimentológica, se estimó que en 50 años el aporte sólido del río Chira sería de 530 MMC, los que se distribuirían de la siguiente manera: 350 MMC (66%) quedarían dentro del embalse, 106 MMC (20%) depositarían aguas arriba del embalse y 74 MMC (14%) seguirían hacia agua abajo. Naturalmente que de los 350 MMC, una parte depositaría dentro del volumen muerto por cota de derivación.

En 1968, en el Estudio de Factibilidad del Proyecto Chira-Piura se dispuso de las mediciones de sólidos en suspensión realizadas entre los años 1965 y 1967 y se consideró para el embalse de Poechos un Volumen Total de 690 MMC (referido a la cota normal de operación) y se determinó que al cabo de 50 años de funcionamiento los sólidos depositados ocuparían un volumen de 260 MMC. El volumen útil considerado fue de 430 MMC, que es el que sirvió de base para determinar los alcances agrícolas del proyecto.

Al pasar a una etapa más avanzada de los estudios y al disponer de nuevas mediciones, especialmente las de 1972, que correspondían a un Fenómeno de El Niño fuerte (aunque no, a un Meganiño) se encontró mayores concentraciones de sólidos en suspensión y, además, que el tamaño medio de las partículas en suspensión era superior al que se había previsto en el estudio de factibilidad, lo que evidentemente significaba un mayor depósito de sólidos. En vista de que el aporte sólido resultó mayor que el previsto, según los cálculos que para el efecto realizó Energoprojekt, se decidió, justamente cuando estaba por iniciarse la construcción de la presa, incrementar su altura en 5 m, con lo que el volumen total, referido a la cota normal de operación, llegó a 885 MMC. Esto significó pasar de la cota normal de operación 98 a la cota 103 (ambas son cotas relativas y no están referidas al nivel del mar). Las estimaciones topográficas preliminares, realizadas a base de la extrapolación de la curva altura-volúmenes existente, llevaron erróneamente a considerar que en la cota 103 el volumen total era de 1 000 MMC (cuando en realidad fue de 885 MMC). Tal como se señaló

antes se previó la posibilidad de sobreelevar la presa en 5 metros en el futuro, llevando así el nivel normal de operación a la cota 108, lo que significaría un incremento del volumen de almacenamiento de 349 MMC y un total de 1 234 MMC.

En el Estudio Integral que realizó Energoprojekt incorporó las nuevas mediciones efectuadas en el periodo 1972-76 y esto llevó a los proyectistas a considerar que el transporte sólido medio de sólidos del río Chira era alrededor de 18 millones de toneladas por año (el 90% del cual correspondía a sólidos en suspensión), es decir, 900 millones de toneladas en 50 años. Como el caudal medio plurianual del río Chira se estimó en 105 m³/s, la concentración media de sólidos estimada fue de 5,4 kg/m³.

En lo que respecta al embalse se consideró que el volumen total sería de 885 MMC, del cual 180 MMC corresponden al volumen muerto por cota de derivación. Del volumen disponible remanente se reservó una parte importante para el depósito de sólidos (Volumen Muerto), con lo que al cabo de 50 años se tendría un volumen útil de 400 MMC (ligeramente inferior al del Estudio de Factibilidad, que era de 430 MMC). Es decir, que se previó que en 50 años se perderían 305 MMC del volumen inicial (el 43,3%). El aporte sólido en 50 años sería de 834 MMC que depositarían con la siguiente distribución:

- 305 MMC (37%) dentro del volumen útil,
- 80 MMC (10%) dentro del volumen muerto por cota de derivación,
- 399 MMC (48%) quedarían fuera del embalse (por encima de la cota 103 y más allá de la correspondiente curva de remanso), y
- 50 MMC (5%) seguirían hacia aguas abajo.

Esto significa que al cabo de 50 años habría depositado dentro del embalse un total de 385 MMC.

En la actualidad los sólidos depositados dentro del embalse se acercan a los 400 MMC. Una parte de ellos se encuentra dentro del volumen muerto por cota de derivación y, por lo tanto, no representan pérdida de volumen

útil. El volumen útil del embalse de Poechos a diciembre del 2005, luego de 30 años de operación, debe estar alrededor de 400 MMC. Este es, precisamente, el valor que debería tener el volumen útil al cabo de 50 años. ¿Qué ocurrirá, por ejemplo, en los próximos 20 años? Para intentar dar una respuesta debemos tener en cuenta lo señalado en el párrafo siguiente.

En el periodo de 30 años comprendido entre los años 1976 y 2005, un poco más de un tercio de los depósitos de Poechos se produjo con el Meganiño de 1982-83, un tercio durante el Meganiño de 1997-98 y casi un tercio durante los 28 años restantes. Es decir, que los dos Meganiños ocurridos en el lapso de 30 años de operación del embalse han producido las dos terceras partes de su pérdida de volumen útil. Como los grandes aportes de sólidos durante los Meganiños se producen en unos pocos meses, y no durante todo el año, se tiene que, en cifras redondas, el 71% de la masa sólida del río Chira descargó en el 3,5% del tiempo total de operación del embalse.

Por lo tanto, el cálculo de la producción de sedimentos y de la pérdida de volumen útil del embalse no puede, ni debe, independizarse de la probabilidad de ocurrencia de uno o más Meganiños en un periodo dado. En consecuencia, para dar respuesta a la pregunta planteada habría que dilucidar antes otra cuestión: ¿Cuál es la probabilidad de que en los próximos 20 años se presente un Meganiño en la costa norte?

Los estudios efectuados por el autor sobre la ocurrencia de Meganiños en el pasado le han permitido establecer un periodo de retorno, naturalmente tentativo, de 50 años. Existe, por lo tanto, una probabilidad del 40% de que en los próximos 20 años se presente un Meganiño que reduciría drásticamente la capacidad del embalse de Poechos, en una proporción importante que dependería de la oportunidad de su aparición. De no ser así, la reducción del volumen útil, necesario para el proyecto, sería gradual, pero inevitable, a razón de unos 6 MMC anuales, en promedio.

En el punto siguiente de esta exposición se analiza algunas de las medidas que suelen tomarse para el control de la sedimentación de embalses y de sus consecuencias.

Control de la sedimentación y de sus consecuencias

La pérdida de volumen útil de los embalses con el paso del tiempo es un fenómeno natural, prácticamente inevitable, que se presenta con diferentes grados de intensidad en diferentes partes del mundo. Algunas veces el fenómeno ocurre a una velocidad mayor que la prevista. Es entonces cuando constituye un problema de sedimentación acelerada. Podríamos empezar por preguntarnos por qué ocurre, eventualmente, la sedimentación acelerada de un embalse, entendiendo como tal el fenómeno mediante el cual se produce la pérdida de volumen útil a una velocidad mayor que la prevista.

Muchas veces se menciona como causa de este fenómeno la gran producción de sedimentos de la cuenca. Pero, ¿es esta la única causa? Evidentemente que es una de ellas, pero podríamos preguntarnos con igual razón si la causa no pudiese haber sido que el volumen reservado para el depósito de los sólidos dentro del embalse haya sido muy pequeño. Así sucesivamente podríamos intentar establecer varias causas probables. Se presenta a continuación un ensayo de establecimiento de las causas por las que un embalse frontal podría perder su volumen útil antes de lo previsto y convertirse así en un caso de colmatación acelerada; ellas podrían ser, entre otras, las siguientes:

- I. Que la cuenca produzca sedimentos en una cantidad mayor que la prevista en los estudios respectivos. Ésta es una de las causas más comunes de sedimentación acelerada de embalses. Podría ser que en los estudios se suponga, con mucho optimismo, que en el futuro la producción de sedimentos de la cuenca va a disminuir. Generalmente, de acuerdo en lo sucedido en diversas partes del mundo, es frecuente

que en el momento de elaborar un proyecto se subestime la producción de sedimentos de la cuenca.

- II. Que la vida útil escogida para el embalse haya sido demasiado corta. Hoy sabemos, por ejemplo, que una vida de 50 años es absolutamente inaceptable para un proyecto de riego.
- III. Que la curva altura-volumen del embalse no haya sido determinada con la exactitud topográfica requerida.
- IV. Que la granulometría u otras propiedades físicas del material sólido sean diferentes y más desfavorables que las consideradas en los estudios respectivos, lo que trae como consecuencia que la sedimentación se produzca en una proporción mayor que la pensada originalmente. Es decir, habría un aumento de la Eficiencia de Retención.
- V. Que el régimen hidrometeorológico sea diferente al previsto y que la ocurrencia de grandes lluvias y avenidas sea mayor que lo que se había calculado. Podría ocurrir también que las series hidrológicas, específicamente en lo que respecta a la oportunidad de presentarse una gran avenida, sean diferentes a las supuestas.
- VI. Que el régimen de operación del embalse sea diferente al previsto. Esto puede deberse a tres causas. Una de ellas es que las necesidades del servicio sean diferentes a las previstas originalmente. Otra causa es que surjan determinadas restricciones en la operación del embalse y, por último, que por negligencia, se opere inadecuadamente. Dentro de esta última causa se incluye la prevalencia del interés comercial inmediato en desmedro de la visión de largo plazo para la conservación del volumen útil del embalse.
- VII. Que la sedimentación se produzca en un lugar diferente al previsto.

- VIII. Que el “peso específico”, a largo plazo, del material sólido sumergido sea diferente al previsto.**
- IX. Que los sistemas de purga no funcionen de acuerdo a lo previsto. Una causa de ello podría ser la falta de los altos caudales requeridos para la purga. A veces se presentan años secos sucesivos lo que no permite efectuar la purga. Como las purgas significan pérdida de agua y disminución del servicio, tienen un costo que a veces se trata de soslayar, lo que conduce eventualmente a una pérdida mayor del volumen útil del embalse.**
- X. Que no se produzcan las corrientes de densidad que pudieran haber sido previstas.**
- XI. La aparición del Fenómeno de El Niño, especialmente con características de Meganiño.**

En los embalses laterales podría deberse, además de la mayor parte de las causas citadas, a una concepción equivocada del embalse o a un diseño inadecuado del desarenador.

Las consecuencias de la pérdida de volumen útil de un embalse son de tipo social, económico, político o de otros órdenes. Su importancia depende de la del proyecto servido por el embalse y de la existencia o no de un proyecto sustitutorio.

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) ha señalado cuatro grupos de medidas que pueden tomarse para minimizar la pérdida de volumen útil por sedimentación (azolvamiento) que ocurre en los embalses. Ellos son:

a) Reducir el aporte de sólidos al embalse

Sin la menor duda que la solución ideal para disminuir la pérdida de volumen útil de los embalses sería la de disminuir el aporte de sólidos al embalse. Como los sólidos provienen de la erosión de la cuenca, esto se lograría disminuyendo su erosionabilidad. La disminución de la erosión de la cuenca es una tarea ardua, que toma mucho tiempo y dinero, y que está vinculada a un conjunto de decisiones que trascienden la actividad del ingeniero proyectista.

Es evidente que lo primero que se piensa es que la pérdida de volumen de los embalses se origina en la alta producción de sedimentos de la cuenca, es decir en su erosión por causa de diferentes agentes, perfectamente conocidos. Los ríos transportan los sólidos producto de la erosión de la cuenca y lo hacen en mayor cantidad en correspondencia con las grandes avenidas. En consecuencia, en la elaboración de un proyecto de embalse debe tomarse en cuenta la erosión de la cuenca, tanto la pasada, como la actual y la futura. El estudio de la erosión de la cuenca no debe ser sólo retrospectivo, sino también prospectivo. Hay eventos que pueden ocurrir en el futuro, de algún modo previsible, que darían lugar a un incremento de la erosión de la cuenca y, por lo tanto, de la producción de sedimentos. Se ha visto lugares en los que ha ocurrido la destrucción de la cobertura vegetal de la cuenca después de haber ejecutado el proyecto. De acá surge la idea de intentar disminuir la erosión de la cuenca para disminuir la producción de sedimentos y alargar así la vida útil de un embalse. Se trata de una tarea costosa, que toma mucho tiempo y que en algunos lugares está vinculada a problemas socioeconómicos (pobreza, tala de árboles, etc.).

Hay otra forma de disminuir el ingreso de sedimentos a un embalse y consiste en construir aguas arriba una o más presas cuya función sea la de retener sedimentos (check dams). Por ejemplo, podría identificarse el afluente que aporta más sólidos al sistema y, si no es posible controlar la erosión de esa subcuenca, existe la alternativa de construir sobre su lecho

una presa de retención de sólidos. Sin embargo, este tipo de presas tiene numerosos problemas y desventajas que deberían ser cuidadosamente analizados.

b) Disminuir la retención de sólidos en el embalse

Luego de tratar de actuar sobre la cantidad de sólidos que ingresa al embalse, se puede tratar de disminuir la cantidad que deposita en el embalse. El ideal sería que todos los sólidos que llegan al embalse sigan de largo hacia aguas abajo y, por lo tanto, la deposición y la pérdida de volumen útil disminuirían. Pero, en los embalses frontales sin purga la realidad es diferente. Generalmente deposita en el embalse un gran porcentaje de los sólidos entrantes; es decir, hay una alta eficiencia de retención. Hay soluciones como favorecer la formación de corrientes de densidad u operar el embalse de modo que las grandes avenidas pasen de largo. En general, tampoco es fácil disminuir el porcentaje de sólidos que sedimenta.

c) Eliminar los sólidos depositados

La tercera posibilidad de control de la pérdida de volumen de un embalse es la de eliminar los sólidos depositados. Esto puede realizarse mediante la purga hidráulica del embalse, cuando sus condiciones lo permitan. En algunos lugares la purga se ha hecho por dragado, el que eventualmente se ha combinado con sifones. Pero, los ejemplos mencionados por la Comisión Internacional de Grandes Presas se refieren a embalses pequeños.

d) Compensar el volumen perdido por sedimentación

Esta compensación puede hacerse de varias maneras. Una de ellas es el aumento de la altura de la presa, que se le conoce con el nombre de recrecimiento de la presa. Esta acción requiere de un detenido estudio que

incluya múltiples aspectos, dentro de los cuales está un análisis de las condiciones de sedimentación para el nuevo embalse creado con el recrecimiento y, previamente, la verificación de cual es el volumen que podría ganarse, que no es necesariamente igual al que había topográficamente a la puesta en servicio de la obras, puesto que puede haber habido depósitos por encima del antiguo nivel de operación normal. De otro lado, hay que tener en cuenta que la sobreelevación de presas exige estudiar y considerar diversos aspectos como los señalados por ICOLD: a) problemas políticos, b) problemas socio económicos (por inundación de tierras), c) aumento de pérdidas por filtración y evaporación, d) seguridad de la presa, y muchos otros más. En conclusión, no es evidente que un aumento de la altura de una presa resuelva fácilmente el problema de compensar el volumen perdido por sedimentación.

Otra forma de recuperar volumen de almacenamiento es la creación de uno o más embalses adicionales con los que se compense el volumen perdido, lo que depende de las condiciones de cada lugar. También se ha estudiado, eventualmente, la disminución del borde libre existente.

Por último, y no por eso menos importante, otra forma, indirecta, de compensación de la pérdida de volumen útil podría ser, en un proyecto de irrigación, mejorar la eficiencia en el uso del agua.

Algunos de los problemas vinculados a la sedimentación y purga de embalses pueden y deben ser estudiados mediante modelos físicos y matemáticos. Cada uno de estos tipos de modelos tiene sus alcances y limitaciones. Así por ejemplo, el HEC-6 se utiliza desde hace muchos años, especialmente para procesos a largo plazo. Los modelos físicos son muy útiles. Deben ser de fondo móvil y su utilidad principal es para el estudio de los procesos de purga. ICOLD señala las ventajas del uso simultáneo de modelos físicos y matemáticos.

Perspectivas

La presente exposición permite al autor llegar a algunas conclusiones sobre la problemática de la sedimentación de embalses en el aprovechamiento de los ríos peruanos y, en especial, lo concerniente al embalse de Poechos.

Para efectos del planeamiento del desarrollo debemos reconocer que las cuencas áridas y semiáridas, como las de la costa norte, producen una gran cantidad de sólidos producto de la erosión de la cuenca, y su cálculo para el desarrollo de proyectos es muy incierto y está sujeto a grandes errores.

Las cuencas que sufren el impacto ocasional del Fenómeno de El Niño ven agravada la situación anterior. Prueba de ello es que el 71% de los sólidos depositados en el embalse de Poechos en 30 años de operación se produjo en el 3,5% del tiempo, el que correspondió a la ocurrencia de los Meganiños de 1983 y 1998. No disponemos de estadísticas hidrometeorológicas, que tendrían que cubrir varios cientos de años, para poder calcular la frecuencia de ocurrencia de los Meganiños, pero los trabajos del autor, a partir de diversas fuentes y consideraciones, permiten señalar tentativamente que para la costa norperuana el periodo de retorno de los Meganiños es del orden de los 50 años.

El cálculo de la producción de sedimentos de una cuenca y el del Volumen Muerto de un embalse no pueden, ni deben, independizarse de la probabilidad de ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como los Meganiños.

En ningún caso debe pensarse para un proyecto de riego, en embalses con una vida tan corta como la de 50 años, incompatible con el tiempo de desarrollo agrícola de un proyecto y con la necesidad de mantener en el tiempo la profunda transformación de la naturaleza en provecho del hombre que significa un proyecto de irrigación.

Diversas consideraciones llevan al convencimiento de que los embalses cuya vida y razón de ser depende la conservación de su volumen útil deben concebirse a partir de la realidad señalada en los puntos anteriores, cuya consideración es fundamental para evaluar el Riesgo Sedimentológico involucrado, así como la Factibilidad Sedimentológica de ejecutar determinado embalse.

En 30 años de operación el embalse de Poechos ha perdido un volumen equivalente al Volumen Muerto que se consideró para 50 años. Han pasado 30 años y todavía no se termina la tercera y última etapa del proyecto. De ahora en adelante el volumen útil previsto irá disminuyendo a razón de unos 6 MMC por año, en promedio. Hay un 40% de probabilidades de que en los próximos 20 años se presente un Meganiño, que dejaría el volumen de almacenamiento reducido a su mínima expresión.

Existen diversas maneras de enfrentar el problema: desde el ahorro de agua hasta la ejecución de costosas soluciones infraestructurales. ¿Es que no se puede, por lo menos, estudiar el problema y trazar un plan de acción para evitar que el embalse de Poechos se convierta en el desarenador más grande del Perú y que el proyecto Chira-Piura, base del desarrollo agrícola piurano, termine en la aridez que lo vio nacer?

REFERENCIAS

1. ARAUJO, Wilder **Operación del reservorio de Poechos como prevención a desastres naturales**. Memorias del Encuentro: "Los desastres naturales y los planes de desarrollo económico y social de la Región Grau". CISMID. UNI. 1990.
2. BUSTAMANTE DAWSON, Jorge **Colmatación y Purga de Embalses- Aplicación al embalse de la central hidroeléctrica del Mantaro**. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería Civil. UNI. Lima, 1976.
3. CAMPAÑA TORO, Roberto **Estudio sedimentológico de la cuenca Catamayo-Chira con fines de aprovechamiento**. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería Civil UNI. Lima, 1996.
4. COMISIÓN INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS **Las presas y el medio ambiente**. Boletín 86, COPEGP Lima, 1995.
5. COMISIÓN INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS **Sedimentación de embalses**.

6. COMISIÓN INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS **Declaración de ICOLD sobre las presas y el medio ambiente.** Mayo 1997.
7. CONSORCIO CHIMÚ **Estudio de Factibilidad del embalse de Palo Redondo.** 1990
8. CORPORACIÓN PERUANA DE INGENIERÍA S. A. **Proyecto Chao Virú Moche Chicama (CHAVIMOCHIC).** Informe de Factibilidad. 1983.
9. DELGADO LOAYZA, Rafaela **Estudio Inicial de aporte de sedimentos del río Jequetepeque al embalse Gallito Ciego.**
10. DIRECCIÓN EJECUTIVA DEL PROYECTO CHIRA-PIURA **Comentarios sobre “El proyecto de almacenamiento y derivación Chira-Piura, alternativa del embalse en San Agustín”.** Lima, diciembre 1971.
11. EINSTEIN, H. A. y LONG J. S. **Report on the sediment inflow into the proposed Poechos reservoir.** Estudio de Factibilidad del Proyecto Chira-Piura (Volumen III), San Francisco, USA. Diciembre 1968.
12. ENERGOPROJEKT-HIDROINZENJERING **Estudio Hidrológico, de sedimentación y determinación de los límites de inundación aguas abajo de la presa Poechos.** Belgrado, Diciembre, 2000.
13. ENERGOPROJEKT ENGINEERING AND CONTRACTING Co. **Almacenamiento y Derivación Chira-Piura. Informe Final sobre la sedimentación del embalse de Poechos.**1978.
14. g&y ESTUDIOS Y PROYECTOS S.R.L. **Complejo hidroeléctrico Gral. José Antonio Páez. Sedimentos en el embalse.** CADAFE. Caracas, 1975.
15. GOLDSMITH, Edward y HILDYARD, Nicholas **Sedimentation: the way of dams.** Wadebridge Ecological Centre. U.K. 1984.
16. H. R. WALLINGFORD **Reservoir sediment management, Tarbela Dam.** 1998.
17. INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY, INC. (IECO) Y OTROS **Planning Study Piura-Chira water & power potentials and feasibility study Chira valley development.** 1967.
18. INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY, INC. (IECO) **Chira-Piura Storage and Diversion Project. Feasibility Study.** 1968.
19. KASHIWAI, Josuke **Reservoir sedimentation and sediment management in Japan.** Hydraulic Engineering Research Groupe. Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan.
20. KRUMDIECK, A. y CHAMOT, P. **Sediment flushing at the Santo Domingo Reservoir.** Water Power and dam Construction. Diciembre, 1979.
21. KRUMDIECK, Alfonso y CHAMOT, Philippe **Limpeza de sedimentos en el embalse de Santo Domingo.** ELECTROWATT. Zurich.
22. MOROCHO CALLE, Francisco **Sedimentación del Reservoirio de Poechos y recuperación del volumen de agua de regulación para sistema Chira-Piura.** Proyecto **Especial Chira-Piura.** Piura, Abril 2004.
23. MORRIS, Gregory L. y otros **Reservoir Sedimentation Handbook : Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use.**
24. PAUL, T. C. y Dhillon, G. S. **Sluice dimensioning for desilting reservoirs.** Water Power and dam Construction. Mayo, 1986.
25. PRIALÉ JAIME, Alfonso **Presas en peligro (La sedimentación en dos grandes reservorios peruanos, su vida útil y su función controladora de las grandes avenidas).** Revista del Colegio de Ingenieros “El Ingeniero de Lima”. Oct-Nov. 1999.
26. PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC **Términos de Referencia para el Estudio del Decantador Pampa Blanca.** Trujillo, Noviembre, 2003.
27. PROYECTO ESPECIAL CHIRA-PIURA **Términos de referencia para el estudio hidrológico, de sedimentación del reservorio y determinación de los límites de inundación aguas abajo de la presa Poechos.** Piura 1999.
28. PROYECTO ESPECIAL JEQUETEPEQUE-ZAÑA **Términos de Referencia del Estudio de Factibilidad para la protección del embalse Gallito Ciego de la colmatación por acarreo.** Yonán – Cajamarca, Enero, 2003.

29. ROCHA FELICES, Arturo **Asesoría en la supervisión del modelo hidráulico del embalse de Tablachaca.** Informe. Corporación de Energía Eléctrica del Mantaro. 1967.
30. ROCHA FELICES, Arturo **Revisión de los Aspectos Hidrológicos y Sedimentológicos del Estudio definitivo del Proyecto Olmos.** Informe 1981.
31. ROCHA FELICES, Arturo **Algunos aspectos de erosión, transporte y control de sedimentos en el río Amarillo (China) aplicables a la realidad peruana.** II Congreso Nacional de Ingeniería. Lima, 1982.
32. ROCHA FELICES, Arturo **Sedimentación Acelerada de Embalses.** El Ingeniero Civil N° 25, 1983.
33. ROCHA FELICES, Arturo **Problemática de la sedimentación en los proyectos de irrigación.** Conferencia. VII Seminario Latinoamericano de Riego y Drenaje. Santiago de Chile. Noviembre 1983.
34. ROCHA FELICES, Arturo **Sedimentación de embalses.** Conferencia. Universidad de Chile. Santiago, diciembre 1983.
35. ROCHA FELICES, Arturo **El desarrollo de la Región Grau y el Convenio Peruano-Ecuatoriano de aprovechamiento hidrográfico conjunto.** El Ingeniero Civil N° 69, 1990.
36. ROCHA FELICES, Arturo **Consideraciones para las determinaciones de los Volúmenes Muertos y Volúmenes Totales de los embalses de Marcabelí y Cazaderos.** Proyecto Binacional Puyango-Tumbes. INADE, 1991.
37. ROCHA FELICES, Arturo **Sedimentación y purga del reservorio de Puente Cincel.** Supervisión del modelo hidráulico. ELECTROPERÚ, 1992.
38. ROCHA FELICES, Arturo **La Sedimentación de Poechos.** El Ingeniero Civil N° 77, 1992.
39. ROCHA FELICES, Arturo **El Desembalse de Poechos.** El Ingeniero Civil N° 81, 1992.
40. ROCHA FELICES, Arturo **Sedimentación dentro del embalse.** Seminario: Diseño de presas de tierra. Comité Peruano de Grandes Presas. Lima, 1993.
41. ROCHA FELICES, Arturo **La sedimentación de Poechos.** Conferencia con motivo de las Bodas de Plata del Proyecto Chira-Piura. Dirección Ejecutiva del Proyecto. Piura, setiembre 1995.
42. ROCHA FELICES Arturo **Plan general para la Preservación del Volumen de regulación disponible en el Proyecto Chira-Piura.** Dirección Ejecutiva del Proyecto Chira-Piura. Setiembre, 1995.
43. ROCHA FELICES Arturo **Sedimentación en embalses.** Conferencia. . Asamblea anual del Comité Peruano de Grandes Presas. Diciembre 1996.
44. ROCHA FELICES, Arturo **Control del Material Sólido en el Sistema de Aprovechamiento del Proyecto Especial CHAVIMOCHIC.** Informe. 1999.
45. ROCHA FELICES, Arturo **Términos de Referencia para el estudio en modelo hidráulico de la purga de embalse de la C. H. de Chimay y supervisión de la primera parte de la investigación en modelo,** por encargo de EDEGEL (2000).
46. ROCHA FELICES, Arturo **Asesoría en la supervisión de la investigación en modelo hidráulico del cuenco amortiguador del aliviadero de la presa de Poechos.** 2002.
47. ROCHA FELICES, Arturo **La Ingeniería frente al Fenómeno de El Niño.** Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Civil - UNI, Año 01 N° 1, Lima, 2003.
48. ROCHA FELICES, Arturo **El riesgo sedimentológico (ERS) en los proyectos de embalse.** XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, 2003.
49. ROCHA FELICES, Arturo **Consideraciones de diseño de estructuras hidráulicas sujetas al FEN.** XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, 2003.
50. ROCHA FELICES, Arturo **Caracterización hidrometeorológica de los Meganiños en la costa norte peruana.** XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, 2003.

51. ROCHA FELICES, Arturo **Aspectos sedimentológicos del manejo de cuencas en zonas áridas sujetas al Fenómeno de El Niño.** II Simposio Latinoamericano de Control de la Erosión. Lima 2004.
52. ROCHA FELICES, Arturo **Problemas en el diseño de presas a la luz del Fenómeno de El Niño y de la escasez de mediciones.** Conferencia. . Asamblea anual del Comité Peruano de Grandes Presas. Febrero 2004.
53. ROCHA FELICES, Arturo **Revisión del Estudio “Evacuación de descargas del aliviadero de emergencia y evaluación de daños a producirse en el río Chira por inundaciones” (Presa de Poechos),** por encargo del proyecto Chira-Piura.2004.
54. ROCHA FELICES, Arturo **Asesoría especializada en la supervisión de la investigación en modelo hidráulico del embalse de Tablachaca.** ELECTROPERÚ, 2005.
55. ROCHA FERNANDINI, Arturo **La sedimentación de embalses** Conferencia. Sociedad Peruana de Irrigación y Fuerza Motriz Hidráulica. Lima, 1957.
56. ROCHA FERNANDINI, Arturo **Revisión del estudio de sedimentación de Poechos efectuado por IECO en 1965.** Dirección de Irrigaciones. Ministerio de Fomento y O.P. Julio, 1965.
57. ROCHA FERNANDINI, Arturo **Comentario al Informe sobre el gasto sólido del río Jequetepeque presentado por Salzgitter.** Dirección de Irrigación, Ministerio de Agricultura. Abril, 1970.
58. ROOVERS, M. **The removal, treatment and use of sediment from reservoirs.** Water Power and dam Construction. Marzo, 1989.
59. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES **Informe sobre el Complejo hidroeléctrico de Santo Domingo “General José Antonio Páez”.** Mérida, Venezuela, 1978.
60. SALZGITTER INDUSTRIEBAU GmbH **Informe sobre transporte y depósito de material sólido en los ríos Jequetepeque y Cajamarca.** 1969.
61. SALZGITTER INDUSTRIEBAU GmbH **Proyecto Jequetepeque-Zaña – Estudio de Factibilidad Técnica y Económica.** 1973.
62. SANTANA VERA, Gerardo **Gallito Ciego: Necesidad de un programa permanente de control de erosión y sedimentos.** II Conferencia Nacional de Control de la Erosión. Piura, 1999.
63. SILVA DÁVILA, Marisa **Operación de compuertas para la purga de sedimentos del embalse de la Central Hidroeléctrica Chimay, Junín.** Ciclo de Conferencias: Investigación en Modelos Físicos y Matemáticos de Obras Hidráulicas. Laboratorio Nacional de Hidráulica, UNI. 2003.
64. UNIVERSIDAD DE PIURA **Amenazas y opciones para el reservorio de Poechos-Discusión**
65. VIVAR, Oswaldo **Transporte de Sedimentos Río Huancabamba.** Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2004