

## INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA PARA ACUICULTURA.

Un aporte en la compilación y adaptación del conocimiento ingenieril a la Acuicultura

SÁNCHEZ ORTIZ Iván Andrés<sup>1</sup> - SALAZAR CANO Roberto<sup>2</sup> .

<sup>1</sup> Ing. Civil Esp. Profesor Asistente Ingeniería en Producción Acuícola Universidad de Nariño. <sup>2</sup> Ing. Civil M. Sc. Profesor Titular Ingeniería Civil Universidad de Nariño

Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola  
año II, vol. 2, 2007. ISSN 1909 - 8138

### INTRODUCCIÓN

Colombia es considerado como uno de los países con mayor biodiversidad y riqueza hídrica del mundo; sin embargo, los fenómenos sociales, económicos y ambientales tanto nacionales como globales afectan cada vez más a las especies animales y vegetales y desafían seriamente a las fuentes hídricas (incluso llevándolas en algunos casos hasta su desaparición) alterando dramáticamente sus características de cantidad y calidad y disponibilidad desde el punto de vista geográfico. Ante la inquietud sobre si el agua es un recurso finito o infinito GIJZEN y GALVIS (2000) afirman que el agua no posee una distribución uniforme en el tiempo y el espacio, por ello una cuestión importante es saber si se estará en capacidad de proporcionar suficiente cantidad de agua, con la correcta calidad y en el momento preciso. La anterior reflexión no es únicamente aplicable a los proyectos de abastecimiento para consumo humano sino que trasciende hasta la mayoría de los proyectos productivos tales como los dedicados a la acuicultura. Según los datos reportados por la FAO (2004) en cuanto a proyecciones de la demanda de pescado para consumo humano y crecimiento demográfico, se prevé un desequilibrio importante respecto a la cantidad de toneladas que regularmente proporciona la pesca de captura, pues se supone que, aún en el caso de que el consumo humano de pescado per cápita se mantenga en el nivel de 1995/96 de 15,6 kg por persona, el crecimiento demográfico generará una demanda (126,5 millones de toneladas) que será superior a los 99,4 millones de toneladas disponibles en 2001.

La Acuicultura entendida como el cultivo y explotación de organismos hidrobiológicos bajo condiciones controladas por el hombre hasta su cosecha, procesamiento, comercialización y consumo fundamenta sus actividades en la producción de especies en el medio acuático que cada vez requiere un mayor y más eficiente manejo gracias a la evidente escasez tanto en calidad como en cantidad. Según la FAO (2004) La producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura suministró alrededor de 101 millones de toneladas de pescado para el consumo humano en 2002, lo que equivale a un suministro per cápita aparente de 16,2 kg (equivalente de peso en vivo), cuyo crecimiento desde 2000 se debió a la acuicultura. Igualmente afirma que la producción acuícola de pescado para la alimentación humana continúa siendo principalmente (57,7 %) de agua dulce. En una sociedad con una distribución tan inequitativa de los ingresos como la colombiana y con un elevado número de fuentes de agua superficial y cuerpos de agua disponibles cobra cada vez más importancia el desarrollo de la acuicultura como alternativa para la producción de alimento y generación de recursos.

Justamente en respuesta al evidente y necesario crecimiento de la acuicultura como uno de los mecanismos para garantizar seguridad alimenticia y fuente de empleo e ingresos a las poblaciones más desfavorecidas se hace necesario optimizar el uso del recurso agua antes, en y después del proceso productivo. Para lograr ese propósito es preciso –

desde el punto de vista ingenieril- la correcta conceptualización del proyecto, con el acopio de suficiente información técnica, productiva y biológica y la aplicación de los métodos de diseño apropiados que permitan ejecutar obras lo más seguras, económicas y funcionales posibles. Ello implica la formalización de algunos de los métodos de diseño y construcción tradicionalmente aplicados en las estaciones y empresas piscícolas pues con cierta regularidad se aprecia instalaciones e infraestructura fruto de diseños muy empíricos (en algunos casos carentes de tal diseño) o que han sido ejecutados por personal sin el perfil profesional más adecuado.

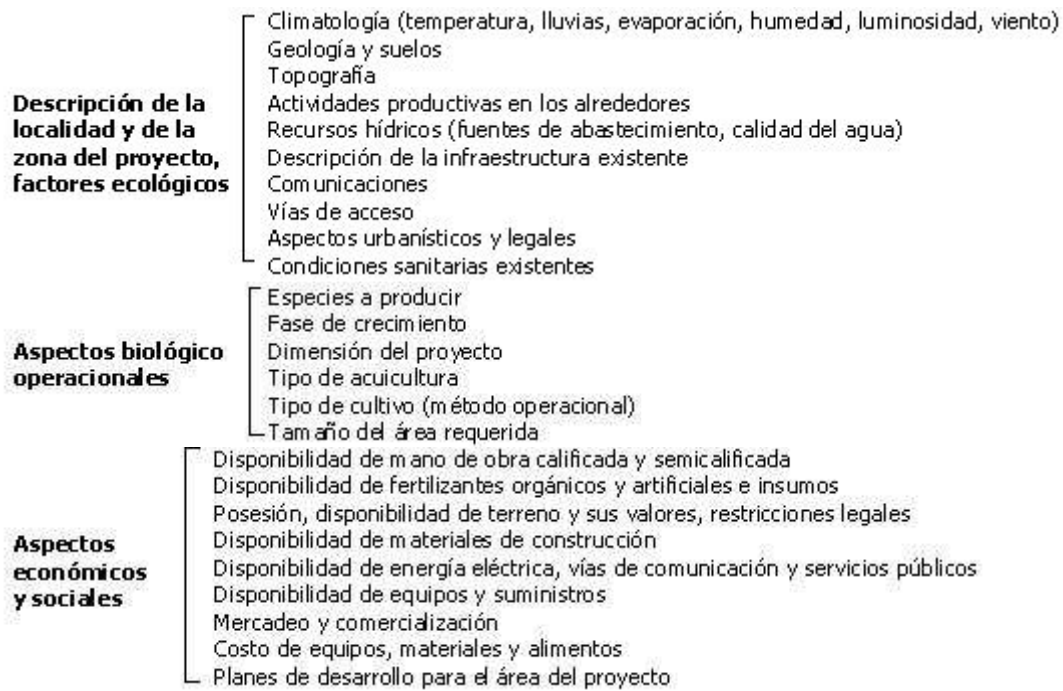
Según lo expresó PILLAY (1984), la equivocada selección de lugares para los proyectos y el defectuoso diseño y ejecución de las instalaciones y construcciones para acuicultura fueron con frecuencia la causa de algunos fracasos. Lo anterior pone en evidencia la importancia de planear, diseñar y ejecutar proyectos acuícolas con criterios más holísticos en donde se apliquen conocimientos y criterios ingenieriles como complemento al criterio del productor en los aspectos biológicos y productivos.

Según la FAO (2004), entre los diez principales grupos de especies en la producción de la acuicultura por volumen y crecimiento se encuentran las Carpas y otros ciprínidos; los Salmónidos como la trucha; y las tilapias y otros cíclidos; además, según lo citado por TIMMONS et al (2002), se requiere del orden de 21.000 y 210.000 litros de agua por kilogramo de tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*) o de trucha arco iris (*Onchorynchus mykiss*) producidos en acuicultura. Las grandes cantidades de agua que precisa la producción piscícola pone en evidencia el rol definitivo que ejerce la infraestructura hidráulica en el cultivo de especies hidrobiológicas y particularmente la infraestructura para piscicultura continental.

El libro “Infraestructura Hidráulica Para Acuicultura” es el resultado del acopio y adaptación de una gran variedad de temas que guían de manera detallada en los procesos de análisis y los cálculos a realizar para efectos del dimensionamiento y diseño de infraestructura hidráulica: estimación del caudal, bocatoma, conducción, desarenado y transporte del agua para acuicultura continental de aguas frías, medias y cálidas, especialmente en las etapas de levante y ceiba.

## 1) INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

Consiste en la recolección y clasificación de toda la información para el buen diseño y correcta ejecución y operación –desde el punto de vista hidráulico- del proyecto productivo de especies hidrobiológicas de aguas continentales. Como función de las dimensiones e importancia del proyecto puede ser necesaria la ejecución de estudios más profundos y minuciosos pues la cantidad de agua necesaria puede remitirse a la toma y transporte de un par de litros por minuto o a la captación, desarenado, transporte, almacenamiento y distribución hasta varios metros cúbicos por segundo. Entre los factores a considerar para la selección de lugares destinados a proyectos de acuicultura continental de aguas frías, medias o cálidas, están:



## 2) COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN ACUÍCOLA

### 2.1 Conceptualización básica de Sistemas de Producción Acuícola

Al hacer referencia a un “Sistema de Producción Acuícola”, es preciso tener presente que un sistema puede considerarse, según GRANT (2001) como un conjunto de componentes interrelacionados que poseen un límite y actúan como una unidad, o como un conjunto de procesos interconectados entre sí y que presentan muchas vías recíprocas de causa y efecto. Precisamente, el éxito en la solución de un problema puede radicar en la correcta comprensión del mismo considerándolo como un todo.

De manera particular, los sistemas de producción acuícola tienen que ver con la interrelación que existe entre los diferentes componentes que propician la explotación controlada de especies hidrobiológicas. Entre los aspectos que deben desarrollarse adecuadamente están: la selección de la semilla, el control de variables y parámetros físicos, químicos y bacteriológicos del agua, la aplicación de técnicas apropiadas de manejo, transporte, profilaxis, alimentación, cosecha, transporte y postprocesado de los individuos cultivados, la conceptualización, diseño, construcción, mantenimiento y administración de la infraestructura que soporta los procesos de cultivo, entre otros.

Con base en lo expuesto por WEATHON (1993), los sistemas de producción acuícola se diferencian de los sistemas acuáticos naturales por el grado de modificación y control que se tiene de las condiciones que soportan el proceso productivo. En los sistemas acuáticos naturales se presenta un comportamiento de sus componentes generalmente balanceado y su productividad suele ser baja pues su desarrollo es comparativamente lento con respecto a las necesidades o expectativas del hombre para lograr satisfacer sus necesidades alimenticias y/o económicas.

Para incrementar la productividad de los sistemas acuáticos se involucra la intervención del hombre generando así básicamente tres tipos de sistemas: Sistemas abiertos, sistemas semicerrados y sistemas cerrados. El sistema abierto puede considerarse como la producción en un cuerpo natural de agua, generando o no modificaciones mínimas a dicho cuerpo. En el sistema semicerrado, la producción de especies hidrobiológicas de cultivo se obtiene de tal manera que el agua proveniente de un cuerpo acuático natural

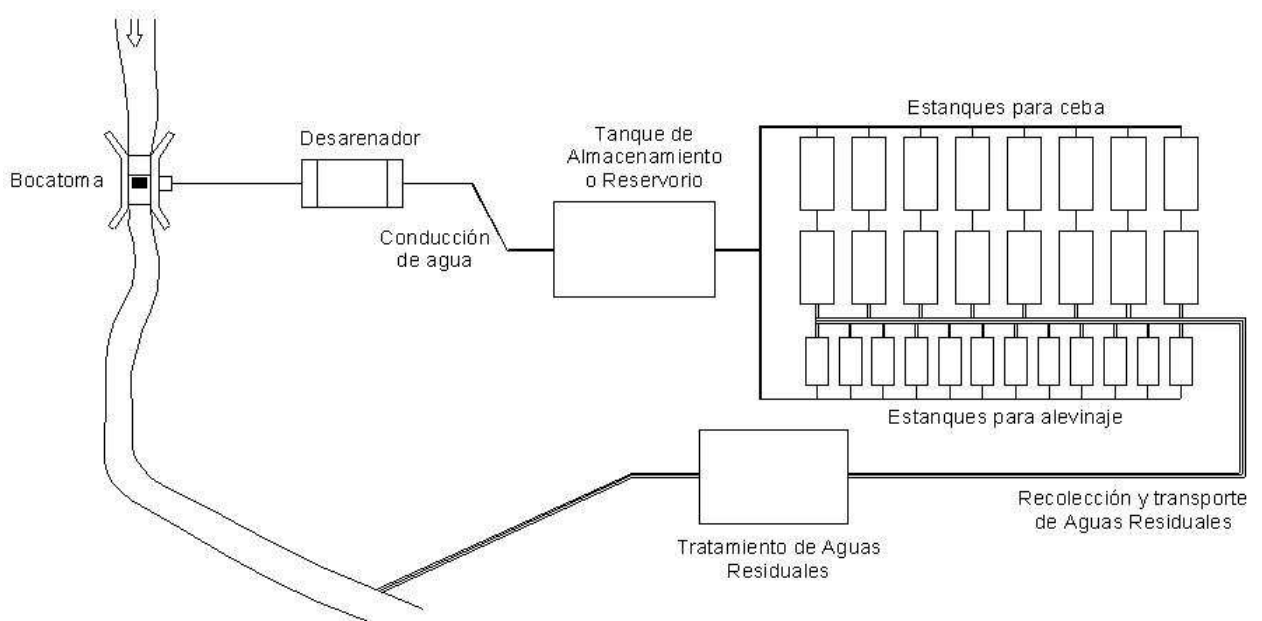
es pasada una sola vez a través del sistema y es devuelta al cuerpo natural tratando de conservar sus características iniciales para evitar la contaminación de la fuente. En el sistema cerrado el agua destinada para la producción acuícola se utiliza y reutiliza en su gran mayoría o en su totalidad mediante procesos de tratamiento del agua y sistemas de bombeo.

## 2.2 Componentes Hidráulicos Básicos del Sistema de Producción Acuícola

Dentro de la infraestructura hidráulica para abastecimiento de un sistema de cultivo de especies hidrobiológicas se puede encontrar una serie de componentes cuyo grado de complejidad puede variar significativamente en función, entre otros, del tipo de proceso productivo a desarrollar; fases de crecimiento de la(s) especie(s); grado de transformación del producto y el reuso o no del agua (recirculación).

En el caso específico de la infraestructura para la acuicultura continental de aguas frías, medias o cálidas en las etapas de levante y engorde de las especies a producir sin recirculación del agua residual, el sistema básicamente puede constar de los siguientes elementos (Figura 1).

- **Captación o Bocatoma.** Su función es captar por gravedad o extraer por bombeo una determinada cantidad de agua de una fuente.
- **Desarenador.** Componente destinado a la remoción de sólidos (arena) que estén en suspensión en el agua, mediante el proceso de sedimentación.
- **Conducción de Agua.** Componente que transporta el agua mediante un conducto desde la captación al desarenador o desde el desarenador hasta la zona o dispositivo de almacenamiento o al sitio donde se inicia la red de distribución. Su trabajo puede desarrollarse a flujo libre (canal) o mediante un sistema a presión que trabajará por gravedad o gracias a un sistema de bombeo.
- **Almacenamiento.** Componente que almacena un determinado volumen de agua. Puede estar formado por la topografía natural del terreno o puede construirse parcial o totalmente mediante diques o tanques semienterrados, enterrados o elevados.
- **Distribución.** Componente destinado a distribuir el agua por medio de una red de tuberías o canales hacia la zona de producción.
- **Recolección de Aguas Residuales.** Su función es la recolección de las aguas después de su uso en el proceso productivo y su transporte hacia el sistema de tratamiento o hacia la fuente o sitio de disposición final.
- **Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales.** Componente enfocado a la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos; y en algunos casos, la remoción de nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo. En sistemas productivos con amplia disponibilidad de área se suele recurrir al uso de lagunas de estabilización para cumplir con dicho propósito.



**Figura 1. Sistema de Abastecimiento de agua para la producción acuícola**

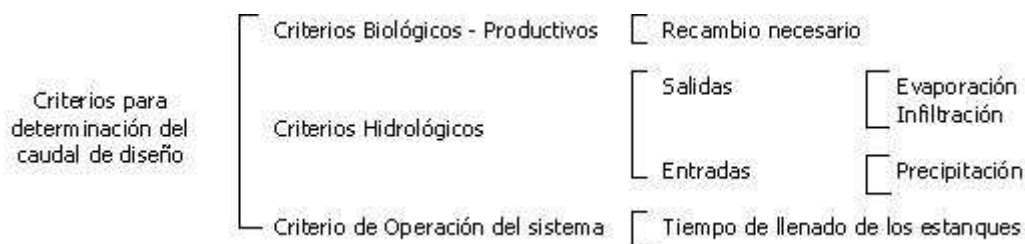
### 2.3 Capacidad Hidráulica de los Componentes de un Sistema de Producción Acuícola

En el caso que un proyecto se ejecute por fases la infraestructura hidráulica debe diseñarse para asumir las condiciones más críticas de requerimiento de caudal, por ello es muy importante realizar estimaciones adecuadas de necesidades de agua. Generalmente la obra de captación se diseña para extraer de la fuente un caudal superior al caudal requerido por el sistema de producción pues debe prever los efectos provocados por obstrucciones o daños. El resto de elementos como el desarenador y la conducción de agua deben dimensionarse en función del caudal de diseño del sistema contemplando las pérdidas que se generan en el mismo por concepto de evaporación o filtración y las necesidades de agua adicional.

### 3) ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO

La determinación del caudal de diseño del sistema hidráulico que abastecerá la producción acuícola es de gran relevancia ya que el diseñador de esa manera debe garantizar que se cubrirá la demanda de agua para habilitar los requerimientos biológicos de la especie y realizar la reposición de volumen de agua que se pierde en el sistema debido a evaporación y/o filtración; de igual manera se pretende que los estanques puedan ser llenados en un periodo de tiempo no muy grande. Por ello es preciso realizar un balance hídrico en el cual se involucre las posibles entradas y salidas de agua en el sistema para así determinar la cantidad de agua que requiere dicho sistema, expresada como caudal.

Los tres criterios fundamentales que permitirán determinar el caudal de diseño del sistema son:



**Figura 2. Criterios para determinación del caudal de diseño.**

### 3.1 Criterios Biológicos - Productivos

En el cultivo de una especie hidrobiológica es muy importante la calidad del agua utilizada pues ella propicia las condiciones óptimas de manejo y cría de la misma. Durante el proceso productivo se modifican progresivamente los parámetros físico químicos del agua ya que disminuye el contenido de oxígeno disuelto, se modifica el pH, se incrementa la turbidez, aumenta la presencia de materia orgánica y amonio, entre otros. Dichos cambios se generan por descomposición de materia orgánica, presencia de alimento no consumido, heces y secreciones de los animales, salida de oxígeno del agua hacia la atmósfera, presencia de animales muertos, etcétera.

Uno de los mecanismos para garantizar la conservación de la calidad del agua respecto a sus parámetros fundamentales (oxígeno disuelto, temperatura, pH, sólidos disueltos, nitrito y amonio) es la sustitución parcial o total del volumen de agua con una cierta periodicidad que puede ser muy exigente como en el caso de los salmónidos, del orden de varias veces por hora, ó con una exigencia pequeña como para algunas especies de aguas cálidas, del orden del 20% diario. Dependiendo de la rusticidad de la especie a cultivar existe una gran variabilidad en el grado de sensibilidad ante los parámetros físicos y químicos del agua y por ello también existe gran variabilidad en las exigencias de recambio.

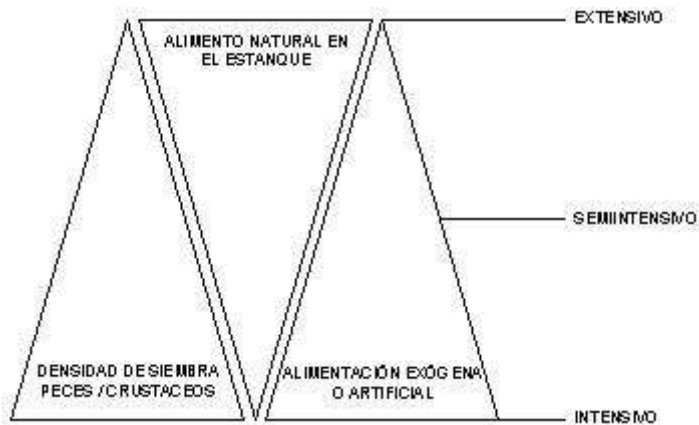
Asociado a la rusticidad de la especie se encuentra el tipo de producción y de piscicultura a ejecutar en el proyecto de explotación acuícola.

#### 3.1.1 Tipo de Acuicultura

Según el Tratado de Cooperación Amazónica en su libro “Piscicultura Amazónica con Especies Nativas”, de acuerdo al nivel de uso del alimento natural, número de peces sembrados por metro cuadrado, recambio de agua, tipo de producción, nivel de manejo y tecnología aplicada, la piscicultura se divide en:

- Extensiva
- Semi-intensiva
- Intensiva

Según la estrategia de alimentación (el nivel de uso de alimento natural) y teniendo en cuenta la pirámide trófica, las modalidades o tipos de piscicultura pueden ser:



**Figura 3. Modalidades de piscicultura según estrategia de alimentación.**

**Piscicultura extensiva.** Se practica como una actividad complementaria a otras. Por ejemplo, cuando se construye una represa con fines de riego, turismo, producción de energía eléctrica, etc. y se siembran peces con fines recreativos o de alimentación. En estas condiciones, los peces no reciben alimento complementario, y se alimentan sólo de la producción natural del agua.

La densidad de carga en estas condiciones es baja, y las tareas a realizar están limitadas a la siembra y cosecha de los peces. En cuerpos de agua como las represas, los pobladores hacen siembras y pescas temporales para autoconsumo, pesca deportiva, y pueden vender los excedentes.

**Piscicultura semiintensiva.** Este sistema de cultivo se caracteriza principalmente, por construir o usar estanques no tan sofisticados, tales como embalses (construidos en hondonadas; y con limitado manejo de sus aguas). Además, el alimento suministrado es complementario al alimento natural producido por efectos de fertilización. Los alimentos naturales proporcionados por el hombre, constituyen productos de la región como yuca, maíz, desechos de cocina, termitas, polvillo de arroz, pijuayo o chonta duro, plátano, etc.

El alimento concentrado, si se da, normalmente no satisface los requerimientos totales del pez y es una dieta de bajo valor nutritivo que complementa a su alimento natural. La densidad de carga va desde 0,5 a 1 pez por metro cuadrado, con prospección de 8 000 a 12 000 kg./ha/año. No se hace un rígido control de la calidad del agua, existiendo parámetros que no son evaluados.

**Piscicultura intensiva.** En este caso deben considerarse dos líneas de producción: en estanques y en jaulas flotantes. En el primer caso se requiere la construcción de estanques técnicamente diseñados, que permitan un adecuado control de la salida y entrada del agua. Las cosechas y las siembras se realizan anualmente y en época de aguas altas, cuando el pescado es escaso y tiene un buen precio. En este tipo de cultivo se requiere un buen control de la calidad del agua, principalmente referido al oxígeno disuelto, al pH, alcalinidad, dióxido de carbono libre, emanaciones, etc.

La alimentación se hace con dietas de alto valor nutritivo, con un tenor de proteína de 25%-30% y en forma permanente. La densidad de siembra depende de la especie y el grado de producción esperado. Esta tecnología requiere de implementos para aumentar la concentración de oxígeno del agua (por ejemplo mediante aireadores de paletas, o mediante recirculación del agua).

### 3.1.2 Prácticas de Cultivo

Según Gustavo Salazar Ariza en INPA (2001), la acuicultura se puede realizar en un mismo cuerpo de agua con una o varias especies, tratando de aprovechar toda la

columna de agua, dependiendo de los diferentes niveles tróficos de las especies a cultivar. Cuando en el cultivo interviene una sola especie se trata de monocultivo, que es el sistema que se practica más comúnmente en el país; si intervienen dos o más especies se denomina policultivo.

**Monocultivo.** El monocultivo se fundamenta en la utilización de una sola especie durante todo el proceso de producción. Este tipo de cultivo es practicado en la mayoría de las explotaciones de tipo intensivo del país bien sea trucha, tilapia roja, cachama o camarón.

**Policultivo.** El policultivo es el cultivo de dos o más especies en un mismo estanque, con el propósito de dar el mayor aprovechamiento al espacio y a la productividad del estanque, lo que no se sucede cuando se utiliza una sola especie o monocultivo. Mediante este sistema se aumenta la producción total del estanque y se pueden obtener diferentes productos que demanda el mercado o para autoconsumo.

**Cultivos integrados.** La importancia del cultivo integrado, animales de la granja con peces, radica en que los primeros proveen materia orgánica (estiércol) a los estanques, que al descomponerse mediante la acción de las bacterias, aportan los nutrientes y minerales esenciales para la producción primaria representada en los organismos presentes en el plancton (fitoplancton y zooplancton), que se constituyen en el alimento base de la cadena trófica y que es empleado directamente por los peces micrófagos y filtradores.

### 3.1.3 Necesidades Específicas de Recambio

Adicionalmente es importante definir qué tipo de fases de desarrollo y en qué proporción se manejarán dentro del proyecto de explotación acuícola; es decir, se debe determinar cuáles de las siguientes etapas formarán parte de la infraestructura a implementar:

- Incubación, para desarrollar el trabajo con ovas
- Alevinaje mediante estanques, tanques o canaletas
- Instalaciones para trabajo con reproductores
- Producción de juveniles y adultos

Lo anterior debido a que las necesidades de calidad y cantidad de agua en el recambio varían de manera significativa según la fase de crecimiento de la(s) especie(s) de cultivo y la densidad de siembra específica.

El recambio es uno de los elementos que garantizan la disponibilidad de oxígeno disuelto en cantidad suficiente para el desarrollo de los especímenes; por ello, en el evento de disponer de un buen sistema de aereación del agua, las necesidades de recambio pueden disminuir.

A continuación se presenta algunos valores específicos de recambio en etapa de engorde.

**Cultivo de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) y plateada (*Oreochromis niloticus*).** Según Carlos Espejo Gonzáles y Enrique Torres Quevedo en: INPA (2001), en el cultivo de tilapia a nivel superintensivo (muy elevadas densidades del orden de 100 animales/m<sup>2</sup> para 300 g. de peso) en canales excavados en tierra o con paredes revestidas con cemento con áreas que oscilan entre los 100 y 1000 m<sup>2</sup> la movilización del agua puede ser del orden de 8 a 12 m<sup>3</sup> por segundo (recambios de 20 a 30 veces por hora). Para la producción en estanques de tierra bajo el modelo de piscicultura semi-intensiva (10 a 15 peces/m<sup>2</sup>) en estanques con áreas superiores a 1000 ó 2000 m<sup>2</sup> se recomienda mantener un recambio permanente del agua entre 10 a 50 litros por segundo (recambios superiores al 9% del volumen por hora).



**Cultivo de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*).** Los salmónidos como la trucha son especies altamente exigentes en cuanto a la calidad del agua del medio de cultivo, y una de los parámetros más importantes que garantizan la producción de truchas a altas densidades de siembra es el oxígeno disuelto, por lo tanto en ausencia de aireación mecánica eficiente es indispensable que el recambio se realice permanentemente para que sea el agua que entra al estanque la que garantice el nivel de oxígeno disponible para el buen desarrollo de los animales.

Según BLANCO (1992) la cuantía de recambio es la correcta cuando la relación entre la capacidad de almacenamiento de agua del estanque ( $m^3$ ) y el caudal que lo abastece en una hora ( $m^3/h$ ) es igual a uno o menos de uno. Dependiendo del número de recambios que se producen cada hora y del contenido del agua en oxígeno, así será la carga de peces que es posible colocar en cada metro cuadrado de estanque.

**Cultivo de cachama blanca (*Colossoma bidens* o *Piaractus brachypomus*) y/o cachama negra (*Colossoma macropomum*).** Según RAMOS HENAO (1988), para el cultivo de cachama se requiere agua básicamente para mantener el nivel constante en los estanques durante el cultivo; sin embargo, existe un estimativo de recambio de 23.5 litros por minuto para cada 1000 metros cuadrados de estanques; si la profundidad media del agua es de 1 metro se tendrá un recambio del orden del 3.4% del volumen por día.

Oscar Valencia Ramos en: INDERENA (1992) presenta resultados de investigaciones realizadas en cultivos intensivos con alimentación suplementaria a: monocultivos de cachama blanca, con una densidad de un animal/ $m^2$ ; policultivos intensivos de cachama negra y blanca, con densidad de un individuo/ $m^2$  y monocultivos intensivos de cachama negra con una densidad de siembra de 2 animales/ $m^2$ . En todos los casos el recambio fue prácticamente nulo pues únicamente se realizó la reposición del volumen de agua perdido en los estanques por evaporación y filtración.

### 3.2 Criterios Hidrológicos para Determinación del Caudal de Diseño

Los criterios hidrológicos tienen que ver con los efectos que producen los factores climatológicos y del tipo de suelo en la conservación del volumen necesario para la producción acuícola. Considerando que el agua en la biosfera hace parte del “ciclo hidrológico” y que una cuenca hidrográfica puede definirse como una porción de terreno geográficamente delimitada en la cual el agua confluye hacia un solo lugar, en un estanque se puede generar fenómenos asimilables a lo que ocurre en el análisis de una microcuenca hidrográfica: Aportes (entradas), Salidas (pérdidas) de agua y cambio de almacenamiento de agua en el sistema.

#### 3.2.1 Pérdidas de Agua por Evaporación

Consiste en el retorno a la atmósfera de las aguas precipitadas en diversas formas (lluvia, granizo, rocío, entre otros), almacenadas de manera natural en lagos, lagunas, ríos o de manera artificial en embalses, reservorios, estanques. La evaporación es un factor determinante en la viabilidad de los proyectos acuícolas pues permite estimar el caudal necesario para reponer las pérdidas de agua en el sistema de producción.

**Naturaleza del proceso.** El cambio del agua de su estado líquido al gaseoso ocurre cuando algunas moléculas en la masa de agua tienen suficiente energía cinética para desprenderse de la superficie de agua. Las moléculas que se escapan son atraídas por otras moléculas que tienden a mantenerse juntas en el agua. Sólo aquellas moléculas con energía cinética mayor que el promedio en el líquido escapan de la superficie. La

temperatura del líquido decrece como consecuencia del escape de las moléculas, por lo que la evaporación origina un enfriamiento del agua.

Las moléculas que escapan chocan con otras y algunas caen de nuevo al agua. Cuando el número de moléculas que escapan es igual al número que regresa se alcanza un equilibrio entre la presión ejercida por las moléculas que escapan y la presión de la atmósfera adyacente. Esta condición de equilibrio se conoce como saturación. La evaporación es más rápida que la condensación si el espacio sobre la superficie de agua no está saturado, entonces, la rata de evaporación está determinada por la diferencia entre la presión de vapor de agua y la del aire sobre la superficie líquida.

**Factores que afectan la evaporación.** Entre los más importantes están.

- Temperatura
- Viento
- Presión Atmosférica
- Sólidos Solubles
- Naturaleza y forma de la superficie

#### **Estimación de la Evaporación**

La evaporación del agua en un determinado sitio se cuantifica en unidades de lámina de agua, generalmente en mm. Existen métodos de medición directa o estimativos basados en balances hídricos o energéticos, métodos aerodinámicos, o empleando ecuaciones basadas en la Ley de Dalton.

La FAO (1981) recomienda como métodos apropiados para estimación de las pérdidas de agua por evaporación el método de Penman y el uso del Tanque Evaporímetro Clase A.

#### 3.2.1.1 Medición Directa

##### **A- Evaporímetro piche.**

Formado por un tubo de vidrio cerrado por un extremo y abierto por el otro, que se llena de agua destilada o agua de lluvia; su extremo abierto se tapa mediante un disco de papel secante sujeto por una arandela de alambre. El aparato se cuelga dentro de una caseta meteorológica con el extremo abierto hacia abajo; el disco impide que el agua se derrame pero se impregna con ella y la deja evaporar sobre toda su superficie con mayor o menor rapidez según las condiciones de humedad relativa. El tubo lleva una escala graduada en milímetros y por diferencia de lecturas se obtiene la cantidad de agua evaporada en un período de tiempo.

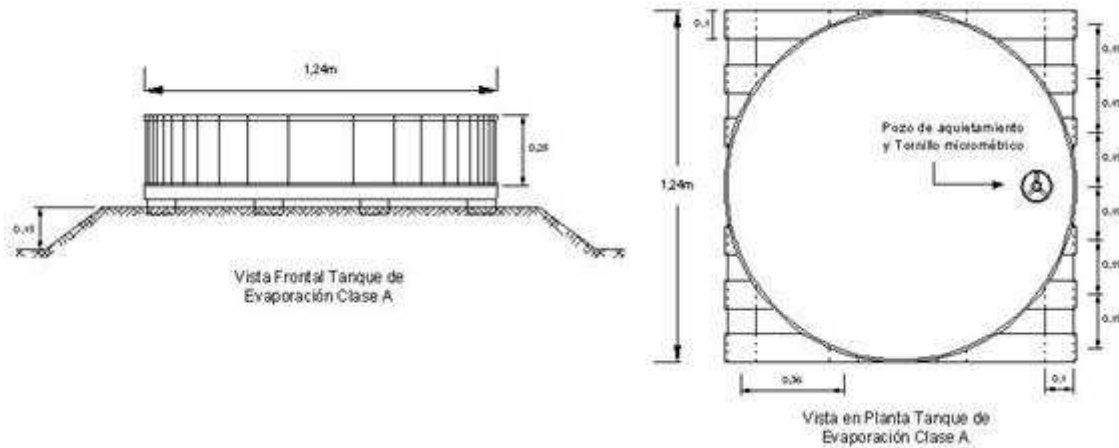
##### **B- Evaporímetro registrador.**

Consiste en un aparato que registra automáticamente la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo. Consta de una cubeta metálica de evaporación donde se llena el agua y que tiene una superficie de evaporación determinada. La pérdida de peso causada por la evaporación provoca una deflexión del brazo registrador, el cual es solidario con el soporte de la cubeta por un sistema de palanca. Un sistema de relojería incorporado permite registrar continuamente estas variaciones de peso que son proporcionales a sus correspondientes valores de evaporación

##### **C- Tanques de evaporación.**

Son depósitos de un diámetro de 1 a 5 m y una profundidad de algunos decímetros, que pueden estar instalados superficialmente sobre un entramado de madera a algunos centímetros del suelo, enterrados en el suelo, o parcialmente sumergidos en un lago sostenidos por una estructura que le permite flotar. La más común de las tres formas de exposición es el tanque superficial; entre los tipos de tanques superficiales, el tanque patrón clase A del Weather Bureau es el tanque de evaporación más ampliamente usado.

Está hecho de hierro galvanizado, tiene un diámetro de 120,7 cm (4 pies) y una profundidad de 25,5 cm (10 pulgadas) cuyo fondo es pintado de negro y sus paredes de color blanco. Este tanque se coloca sobre una armadura de madera, de manera que el fondo del mismo quede a unos 15 cm. del suelo con el objeto de que el aire pueda circular libremente por debajo del tanque (Figura 4).



**Figura 4. Tanque evaporímetro Clase A**

Además del tanque de evaporación, las estaciones evaporimétricas disponen del siguiente instrumental: a) un anemómetro, que sirve para determinar el movimiento del aire sobre ésta por medio de la medición de la velocidad y/o dirección del viento; b) un pluviómetro que mide la cantidad de lluvia caída en un periodo de tiempo; c) termómetros en el agua, que sirven para determinar las temperaturas máximas, mínimas y medias del agua contenida en el tanque y d) termómetros de máxima y mínima para medir la temperatura de aire.

La estimación de la evaporación del agua desde un embalse a partir de los datos medidos en el tanque, consiste en multiplicar el valor de la evaporación del tanque por un factor o coeficiente que considera, las condiciones de exposición. Este coeficiente varía entre 0.65, para zonas frías, y 0.85, para áreas más calientes. Sin embargo, para efectos del cálculo de las pérdidas de agua por evaporación para piscicultura, la FAO (1981) recomienda utilizar un valor medio de Coeficiente de corrección de 0.75, cuya aplicación se ilustrará más adelante.

### 3.2.1.2. Métodos Indirectos para Estimar la Evaporación

Hay varios métodos indirectos para estimar la evaporación. Entre ellos está: el de balance energético, que se basa en, obtener la suma de energía conducida como calor sensible y la utilizada para la evaporación; el método de transferencia de masa, basado en los conceptos de mezcla continua y discontinua aplicados a la transferencia de masa en la capa límite; el método del balance hídrico, el cual es una medida de la continuidad del flujo del agua y consiste en la aplicación de la ecuación.

$$E = P - Q - \Delta S$$

E : Evaporación

P : Precipitación total

Q : Escorrentía

?S : Variación por almacenamiento

Se usa también muchas ecuaciones empíricas o semiempíricas que se han desarrollado para estimar la evaporación desde superficies libres de agua. Entre esas ecuaciones se encuentra la fórmula de Dalton, la cual se analizará brevemente a continuación.

### Fórmula de Dalton – Fórmula de PENMAN:

Según SILVA G. M. (1985), la fórmula de Dalton es la base de muchas de las fórmulas experimentales que se han desarrollado para el cálculo de la evaporación potencial. Esta fórmula se expresa:

$$E_0 = f(V) * (e_s - e_d)$$

$E_0$  : Evaporación potencial (mm/día)

$f(V)$  : Es una función de la velocidad del aire que pasa sobre la superficie evaporante.

$e_s$  : Presión de vapor para atmósfera saturada a la temperatura de la superficie evaporante

$e_d$  : Presión de vapor de punto de rocío a la temperatura del aire

De las numerosas fórmulas que utilizan la ecuación de Dalton, es muy conocida la fórmula de Penman, 1956, la cual fue deducida a partir de experiencias realizadas en el lago Hefner, Oklahoma. El volumen de agua que el lago pierde por evaporación se relaciona con las variables propuestas por Dalton según la expresión:

$$E_L = 0.35 * \left( 0.5 + \frac{V_2}{160} \right) * (e_s - e_d)$$

$E_L$  : Evaporación real del lago, en milímetros/día

$V_2$  : Velocidad del viento que circula sobre la superficie del lago, medida a 2 metros sobre la superficie evaporante, en kilómetros/día

$e_s$  : Presión de vapor para atmósfera saturada a la temperatura de la superficie evaporante en milímetros de mercurio

$e_d$  : Presión de vapor de punto de rocío a la temperatura del aire en milímetros de mercurio

Como en un lago el suministro de humedad a la superficie evaporante es óptimo, la evaporación del lago equivale a la evaporación potencial de la masa de agua. Por tanto:

$$E_0 = E_L$$

$$E_0 = 0.35 * \left( 0.5 + \frac{V_2}{160} \right) * (e_s - e_d)$$

La fórmula presentada de esta forma ofrece dificultades de tipo práctico para su uso por que el término “ $e_s$ ” se calcula a partir de la temperatura de la superficie evaporante,  $t_s$ , y ese registro generalmente no se tiene. Sin embargo, la fórmula de Penman se combina con un “balance de energía” entre la atmósfera y la superficie evaporante para obtener una fórmula modificada en la cual se elimina el término “ $e_s$ ”.

MONSALVE SÁENZ (1999) presenta la ecuación que permite la determinación del calor disponible para evaporación “ $E'_0$ ” basada en la expresión modificada de Penman así:

$$E'_0 = \frac{(\Delta * H) + (\gamma * E'_a)}{\Delta + \gamma}$$

$E'_0$  : Calor disponible para evaporación (cal/cm<sup>2</sup>día) = Evaporación potencial

$\Delta$  : Tana: Pendiente de la curva de saturación de vapor a la temperatura  $t_a$  en milímetros de mercurio por cada grado centígrado (mmHg/°C)

$H$  : Energía remanente en la superficie terrestre disponible para varios fenómenos

$\gamma$  : Constante psicrométrica = 0,49 mm Hg/°C

$E'_a$  : Evaporación de la superficie libre de agua en el caso hipotético en que las temperaturas del agua y del aire sean iguales (cal/cm<sup>2</sup>día)

La Food and Agriculture Organization (FAO) recomienda como métodos válidos para la estimación de las pérdidas de agua por evaporación los datos obtenidos a partir del tanque evaporímetro Clase A y los determinados por el método de Penman. Por ello, se presenta los procedimientos y consideraciones para su cálculo.

**Cálculo de la pendiente de la curva de saturación de vapor “?” a la temperatura  $t_a$ .**  
Según APARICIO M. F. (1992), para el cálculo de la pendiente se recurre a la expresión:

$e'_s$  : Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura  $t'_s$  de la capa limitante entre el agua y el aire, en mm de Hg

$e'_a$  : Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura  $t$  del aire, en mm de Hg

$t'_s$  : Temperatura de la capa limitante entre el agua y el aire, en °C

$t_a$  : Temperatura del aire, en °C

Para calcular la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor “?” a la temperatura del aire  $t_a$ , se calcula los valores de  $e'_s$  y  $e'_a$  para valores de  $t'_s$  y  $t'_a$ :

$$t'_s = t_a - 0.05 \text{ °C y}$$

$$t'_a = t_a + 0.05 \text{ °C.}$$

Con base en las ecuaciones:

$$\Delta = \frac{e'_s - e'_a}{t'_s - t'_a}$$

$$e'_a = 611 * e^{\left(\frac{17.27 * t'_a}{237.13 + t'_a}\right)}$$

**Cálculo de la radiación neta que llega a la superficie evaporante “H”.**

Según MONSALVE (1999), la energía remanente en la superficie terrestre disponible para varios fenómenos “H” o Radiación neta que llega a la superficie evaporante “ $R_N$ ” se calcula con la expresión:

$$e'_s = 611 * e^{\left(\frac{17.27 * t'_s}{237.13 + t'_s}\right)}$$

$R_I$ : Es la radiación de onda corta retenida en la superficie terrestre (Energía almacenada), en Cal/cm<sup>2</sup>día

$$H = R_N = R_I - R_B$$

$R_C$  : Radiación que llega a la superficie terrestre en cal/cm<sup>2</sup>día

$\gamma$  : Albedo de la superficie evaporante en estudio. El albedo es la proporción de energía que refleja una superficie, su valor se encuentra entre 0 y 1; el límite inferior corresponde a un cuerpo “negro” o no reflejante.

$$R_I = R_c * (1 - \gamma)$$

$R_a$  : Radiación en el límite superior de la atmósfera en cal/cm<sup>2</sup>día. Su valor es una función de la latitud geográfica en la que se encuentra el lugar de estudio y del mes del año en el cual se desea evaluar la evaporación potencial.

$n$  : Número de horas de sol por día; son datos que se obtienen a partir de la lectura del tiempo en horas que ha incidido el “sol franco” sobre el heliógrafo.

$D$  : Máximo número de horas de sol por día durante el mes en estudio. De igual manera, su valor es función de la latitud del lugar y del mes del año.

$$R_c = R_a * \left(0.20 + \left(0.48 * \frac{n}{D}\right)\right)$$

$R_B$ : Es la radiación de onda larga reflejada a la atmósfera, en cal/cm<sup>2</sup>día. La cual se calcula mediante la expresión:

$$R_I = R_a * \left(0.20 + \left(0.48 * \frac{n}{D}\right)\right) * (1 - \gamma)$$

$s$  : Constante de presión de Stefan Boltzman para cuerpos negros

$$R_B = \sigma * T_a^4 * \left(0.47 - \left(0.077 * \sqrt{e'_a}\right)\right) * \left(0.20 + 0.80 * \left(\frac{n}{D}\right)\right)$$

$T_a^4$  : Temperatura absoluta del aire (°K = 273+temperatura del aire en °C)

$e_d$  : Presión de vapor a la temperatura ambiente, en milímetros de mercurio

$n$  : Número de horas de sol por día (datos según heliógrafo)

$D$  : Máximo número de horas de sol por día durante el mes en estudio

### **Determinación de la energía remanente en la superficie terrestre disponible para varios fenómenos "H"**

La energía remanente en la superficie terrestre disponible para varios fenómenos "H", también llamada: Radiación neta que llega a la superficie evaporante " $R_N$ ". Se determina mediante la expresión:

$$\sigma = 117.4 * 10^{-9} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 * \text{día} * \text{°K}^4}$$

$R_1$  : Radiación de onda corta retenida en la superficie terrestre, en cal/cm<sup>2</sup>día

$R_B$  : Radiación de onda larga reflejada a la atmósfera, en cal/cm<sup>2</sup>día

### **Determinación del calor disponible para evaporación $E'_0$**

El balance de calor H en un área dada de agua es utilizado de cuatro maneras:

$$H = E'_0 + K + \Delta_s + A$$

$E'_0$  : Calor disponible para evaporación (cal/cm<sup>2</sup>día)

$K$  : Abastecimiento de calor por convección (Transporte de calor por movimiento de materia) de la superficie del agua al aire que se mueve alrededor de esa superficie (cal/cm<sup>2</sup>día)

$\Delta_s$  : Cambio de almacenamiento de calor, incremento de calor sensible de la masa de agua (cal/cm<sup>2</sup>día)

$A$  : Advección: incremento de calor sensible del medio ambiente (cal/cm<sup>2</sup>día)

El abastecimiento de calor por convección " $K$ " se calcula a partir de los valores de H y  $E'_0$

El cambio de almacenamiento de calor  $\Delta_s$  puede ser no tomado en cuenta si el cuerpo de agua es poco profundo (Como comúnmente ocurre con los estanques de la producción acuícola):  $\Delta_s = 0$

El incremento de calor sensible del medio ambiente A se toma como cero si el estanque o cuerpo de agua en estudio es grande. Generalmente y además de los argumentos anteriores, los valores del cambio de almacenamiento de calor " $\Delta_s$ " y el incremento de calor sensible del medio ambiente " $A$ " se toman como cero ya que aproximadamente el 98% de la radiación neta se utiliza en los procesos de evaporación y transferencia de calor. Con base en lo anterior:

$$H = E'_0 + K + \Delta_s + A$$

Para calcular  $E'_0$  se recurre a la expresión [3.6]:

$$H = E'_0 + K$$

### **Cálculo de la evaporación de la superficie libre de agua " $E'_a$ ":**

El valor de la evaporación de la superficie libre de agua en el caso hipotético en que las temperaturas del agua y del aire sean iguales  $E'_a$  se calcula con la expresión:

$$E'_0 = \frac{(\Delta * H) + (\gamma * E'_a)}{\Delta + \gamma}$$

$e_s$  : Presión de saturación del vapor de agua para atmósfera saturada a la temperatura  $t_a$  del aire,

$$e_s = 611 * e^{\left(\frac{1727 * t_a}{237.13 + t_a}\right)}$$

$e_d$  : Presión de vapor actual a la temperatura  $t_a$  del aire, en mm de Hg

$U_2$  : Velocidad promedio del viento (en m/s) a una altura de 2 metros sobre la superficie del cuerpo de agua; dicha velocidad se determina mediante el anemómetro, aparato que

se ubica a 10 o 12 metros de altura y que se utiliza para medir el recorrido horizontal del viento y para determinar su velocidad media.

Según SILVA (1985), aproximadamente en un espesor de 30 metros adyacente a la superficie terrestre, es válida la expresión de Prandtl, llamada también “Ley exponencial de velocidades”, la cual permite estimar la velocidad del viento a la altura Z1 cuando se ha medido a la altura Z0 en el mismo lugar así:

$$V_1 = V_0 * \left( \frac{Z_1}{Z_0} \right)^n$$

V1 : Velocidad del viento a la altura para la cual se desea hacer el estimativo

V0 : Velocidad del viento a la altura a la cual se hizo la medición inicial

Z1 : Altura para la cual se desea conocer la velocidad del viento

Z0 : Altura a la cual se midió la velocidad del viento

n : Exponente cuyo valor es 1/7

El valor de  $e_d$  se puede obtener de dos maneras:

- Si se dispone del valor de la Humedad Relativa “HR”

La humedad relativa puede obtenerse a partir del “Hidrógrafo”.

Se despeja  $e_d$  a partir de la ecuación que proponen LINSLEY R. K. et al (1977):

$$HR = 100 * \frac{e_d}{e_s}$$

$$e_d = \frac{HR * e_s}{100}$$

HR : Humedad relativa, en porcentaje

$e_s = e_d$  : Presión de vapor actual a la temperatura  $t_a$  del aire, en mm de Hg

- Si no se dispone del valor de la Humedad Relativa “HR”:

En caso de no tener datos de Humedad Relativa es necesario trabajar con los datos del psicrómetro, que consiste en un conjunto de dos termómetros denominados “seco” y “húmedo”, utilizados para medir la temperatura del aire y con ella calcular la humedad relativa, la tensión de vapor y el punto de rocío.

Con los datos de la temperatura del termómetro de bulbo húmedo “tw” y el valor de la temperatura del termómetro de bulbo seco “ta” se determina la temperatura de punto de rocío “td” así: Mediante el uso de la tabla psicrométrica se ingresa con los datos de  $t_a$  y  $t_w$  para la determinación preliminar de la temperatura de punto de rocío mediante lectura directa o interpolación lineal de los mismos. Cuando la presión atmosférica del lugar es menor a 1000 mb (para altitudes superiores a 323 m.s.n.m), debe hacerse una corrección en la temperatura de punto de rocío.

### 3.2.2 Pérdidas de Agua por Infiltración

En la producción de especies hidrobiológicas debe considerarse las pérdidas de agua por infiltración como un componente importante en la determinación del caudal de diseño para dimensionamiento y concepción de la infraestructura pertinente, ya que en caso de no optar por un control riguroso de dichas pérdidas (tal como la impermeabilización de estanques con capas de material arcilloso, núcleos de material impermeable en los diques o el uso de plásticos o geomembranas) se debe dimensionar hidráulicamente el proyecto de manera que sea capaz de garantizar la compensación de esas pérdidas mediante un abastecimiento permanente o periódico del agua.

El libro contiene las definiciones de infiltración y permeabilidad, los factores que afectan la infiltración y cita valores típicos según varios autores relativos a las clases de permeabilidad del suelo

### 3.2.2.5 Estimación de las pérdidas por infiltración

En un estanque el agua de infiltración se refiere al agua que se pierde verticalmente a través del fondo del estanque, horizontalmente a través de las paredes por infiltración y por el sistema de desagüe del mismo. Si los terraplenes del estanque están bien contruidos y mantenidos y el sistema de desagüe es impermeable, la cantidad de agua perdida por infiltración horizontal será muy pequeña, por ello solo se hace necesario calcular la infiltración vertical.

Para estimar las pérdidas por infiltración de manera conservativa se puede recurrir a multiplicar el índice de permeabilidad por el área superficial ya que de esta manera se contempla parcialmente las posibles pérdidas de agua por infiltración horizontal. De lo contrario, se estima utilizando en la misma expresión el valor del área de fondo de los estanques y reservorios.

$$P_1 = A * k$$

$P_1$  : Pérdidas por infiltración, en metros cúbicos por unidad de tiempo  
 $A_s$  : Área superficial de los espejos de agua (para estimar las pérdidas de manera conservativa) ó Área de fondo de estanques y reservorios, en metros cuadrados  
 $k$  : Índice de permeabilidad, en metros por unidad de tiempo

Para determinar el caudal que se encargará de reemplazar el agua perdida por infiltración se expresa el volumen perdido por día en términos de un volumen por unidad de tiempo considerando la duración del proceso de recambio (permanente o por períodos de tiempo definidos).

### 3.2.3 Entradas de Agua por Precipitación

#### 3.2.3.1 Definición de precipitación, unidades

Según GUILARTE, R. J., la precipitación agrupa todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca o zona determinada. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha). La precipitación es la cantidad de agua meteórica total, líquida o sólida, que cae sobre una superficie determinada, llamada sección pluviométrica; ésta puede ser la superficie colectora de un pluviómetro. Se denomina altura de precipitación a la altura de la capa o lámina de agua que se acumularía sobre una superficie horizontal si todas las precipitaciones quedasen inmovilizadas sobre ella. Se asimila al volumen de agua caída, expresado en metros cúbicos, dividido por la sección pluviométrica evaluada en metros cuadrados; tiene las dimensiones de una longitud y se expresa comúnmente en milímetros. La altura de precipitación puede estar referida a diversos intervalos de tiempo: día, mes, año, etc.

#### 3.2.3.2 Formación de la precipitación

El vapor de agua del cual se deriva la precipitación, está presente como gas en la atmósfera en cantidades variables y todo el tiempo. La cantidad absoluta de humedad en el aire, en peso por unidad de volumen, depende de la temperatura del aire, y de si éste ha pasado sobre lugares de la tierra de los cuales se pueda desprender humedad. El



contenido de humedad disminuye con la altitud. Alrededor de la mitad de la humedad total de la atmósfera está localizada por debajo de los 2.000 m.

Para que pueda ocurrir la lluvia es necesario primeramente que se enfríe una porción de la atmósfera hasta que el aire se sature con vapor de agua. En consecuencia, ocurre la condensación dando lugar a la formación de diminutas gotas que son visibles colectivamente en la forma de nubes o neblinas. La producción de lluvia requiere tres condiciones:

- Un mecanismo que produzca el enfriamiento del aire húmedo: (Orografía, Convección, Convergencia, Frentes)
- Un mecanismo que produzca la condensación del vapor.
- Un mecanismo que produzca el crecimiento de las gotas en las nubes.

### 3.2.3.3 Medición de la precipitación

La precipitación se mide por medio de pluviómetros y pluviógrafos.

Los pluviómetros están formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal “a” al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia y cuya área de captación es “A”, se acostumbra colocar en el embudo un par de mallas para evitar la entrada de basura u otros objetos. El área de captación A es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente “a”, con el objeto de que, por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente.

Los registros pluviométricos se toman, por lo general, cada 24 horas en zonas de fácil acceso o cada mes en áreas alejadas de viviendas; en este último caso los aparatos se llaman “pluviómetros totalizadores”.

Cuando es necesario estudiar lluvias de corta duración, los registros pluviométricos no son suficientes; en tal caso, se utilizan los registros gráficos que se obtienen con aparatos registradores o pluviógrafos. Los registros pluviográficos o “pluviogramas” permiten conocer la duración de los aguaceros y su intensidad.

### 3.2.3.4 Entradas de agua por precipitación

En los sistemas de cultivo al aire libre tales como los estanques, presas y algunos tipos de canales o tanques, al caer la precipitación sobre ellos existe un incremento en el nivel del agua proporcional a la intensidad y duración del fenómeno. La consideración de los efectos del ingreso de agua a la infraestructura del cultivo puede ser importante en el diseño de los sistemas de regulación y evacuación o drenaje del agua tales como los monjes o codos abatibles para estanques de derivación o los “spillways” en estanques presa.

Para tener estimativos del posible aporte o ingreso de agua a los estanques se puede utilizar los datos generados por pluviómetros mediante registros diarios o de totalizadores. La intención de su estudio es disponer dentro del balance hídrico para el proyecto un valor del posible aumento del nivel de agua en las estructuras que la contienen para efectos de cultivo o almacenamiento. Sin embargo suele no considerarse esas posibles entradas en el sistema debido a la variabilidad de las precipitaciones en el tiempo y el espacio, y por el contrario, se las contempla como un elemento que en caso de presentarse generará aereación al agua y por ende mejorará los niveles de oxígeno disuelto, lo anterior siempre y cuando se tomen las medidas necesarias para evitar el ingreso de agua de escorrentía con altos niveles de turbiedad y demás efectos negativos en la calidad del líquido que pueden afectar a las especies de cultivo.

Es importante tener en cuenta los eventos extremos como las tormentas (precipitaciones de alta intensidad y poca duración), que pueden generar desbordamientos en estructuras como canales, reservorios y estanques y con ello producir erosión, desgaste y el posible colapso de las estructuras. Para ello, es necesario el diseño y dimensionamiento correcto de un sistema de evacuación de excesos del agua y de control de niveles en los estanques.

Pese a lo anteriormente mencionado, en algunas zonas de alta pluviosidad con estanques excavados se puede considerar la precipitación como principal mecanismo de ingreso de agua y de control del nivel en los estanques, en consecuencia el diseño del sistema de abastecimiento de agua para la producción se asume como un mecanismo de emergencia o complementario.

### 3.3 Criterio de Operación del Sistema: Tiempo de Llenado de Estanques

En el diseño de la infraestructura hidráulica de grandes estaciones para el cultivo de especies hidrobiológicas puede ser un factor de importancia el tiempo de llenado de los estanques; la FAO (1992), recomienda que para estanques cuyo volumen sea inferior a 1500 m<sup>3</sup>, un tiempo de llenado de ocho días es un período razonable. Sin embargo, los criterios de operación que establece el productor son los que determinan el tiempo para llenado de los estanques ya que entran en juego consideraciones tales como la necesidad de llenarlos nuevamente después de un vaciado rápido por: cosecha, mantenimiento de diques, caída o vertimiento accidental de sustancias nocivas o contaminantes, entre otros motivos.

Es muy probable que en el diseño y dimensionamiento de la infraestructura hidráulica para el cultivo de especies poco exigentes en cuanto a necesidades de agua por recambio (como la cachama) el criterio que predomine en la estimación del caudal sea el tiempo de llenado de los estanques pues usualmente se debe conservar el nivel del agua en los estanques compensando las pérdidas por evaporación e infiltración.

En el dimensionamiento hidráulico de la infraestructura para estanques que soportan la producción de especies hidrobiológicas bastante rústicas es probable que el criterio que predomine para el diseño obras hidráulicas de toma y abastecimiento sea el tiempo de llenado de los estanques ya que puede representar necesidades de caudal mucho mayores que las del recambio y mantenimiento del nivel del estanque por pérdidas debidas a la evaporación e infiltración.

El libro desarrolla ejemplos de cálculo de las necesidades de caudal para la producción piscícola por los diversos conceptos y clarifica de manera particular la adecuada secuencia de cálculos y correcto uso de los datos meteorológicos para aplicar el método de Penman en la estimación de pérdidas de agua por evaporación.

## 1) CAPTACIONES PARA LA PRODUCCIÓN ACUÍCOLA

### 4.2 Tipos de Captaciones

Existen diferentes tipos ya que cada captación (o bocatoma) es un problema con características de diseño específicas. El ingeniero en producción acuícola en cada caso particular debe guiarse por su criterio para escoger el tipo que sea más conveniente, de acuerdo con las condiciones ideales del proyecto en cuestión.

Las captaciones se dividen en dos grupos: superficiales y subterráneas, subdividiéndose las mismas así:

#### **Cuadro 4.2 Tipos de Captaciones**

#### **Captaciones Superficiales**

- Toma de rejilla
- De fondo o sumergidas
- Laterales
- Mixtas
- Captaciones dinámicas
- Toma en manantiales
- Toma directa

#### **Captaciones Subterráneas**

- Pozos profundos
- Galerías filtrantes

### 4.3 Captaciones Superficiales

#### 4.3.1 Localización de la Captación

Respecto a la localización y condiciones generales de la captación, es pertinente citar lo estipulado por las normas RAS 2000 en su capítulo B.4 enfocado a Captaciones de Agua Superficial:

- Ubicación de la captación
- Seguridad
- Estabilidad
- Facilidad de operación y mantenimiento
- Lejanía de toda fuente de contaminación
- Aprovechamiento de la infraestructura existente
- Interferencia a la navegación
- Accesos
- Cerramientos
- Iluminación

#### 4.3.2 Toma de Rejilla

La captación de aguas superficiales a través de rejillas se utiliza especialmente en los ríos de zonas montañosas, los cuales están sujetos a grandes variaciones de caudal entre los periodos de estiaje y los periodos de crecientes máximas. El elemento base del diseño es la rejilla de captación, la cual debe ser proyectada con barras transversales o paralelas a la dirección de la corriente.

El uso de las rejillas se extiende hacia los otros tipos de toma, con el fin de limitar la entrada de material flotante hacia las estructuras de captación. El libro hace referencia a algunos requisitos que deben cumplirse para garantizar el buen diseño y funcionamiento de captaciones mediante rejillas y desarrolla los aspectos necesarios para el dimensionamiento y diseño de dichas rejillas, tales como: Inclinación de las rejillas, Separación entre barrotes, Ancho de la rejilla, Velocidad del flujo y Coeficiente de pérdidas menores.

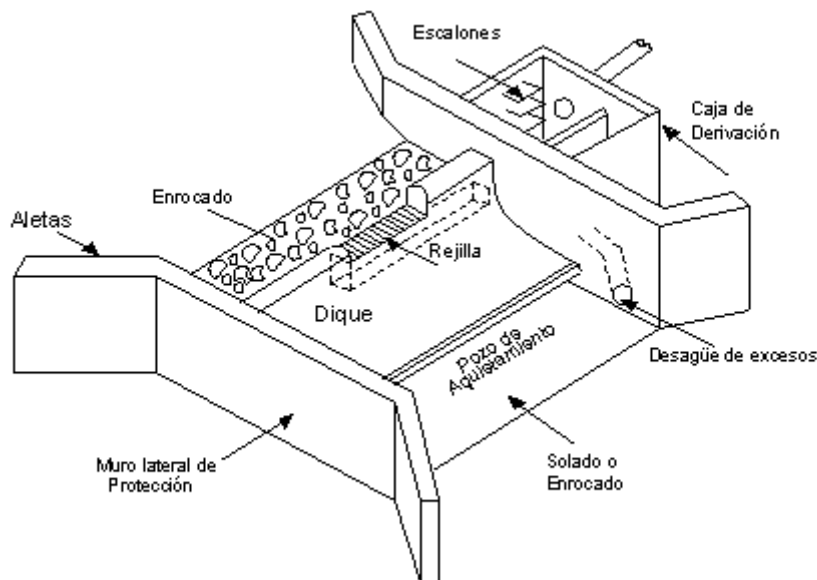
#### 4.3.3 Captaciones de Fondo o Sumergidas.

Son empleadas para captaciones de pequeñas cantidades de agua en quebradas, en las cuales la lámina de agua se reduce considerablemente. La idea del diseño de este tipo de captación, es la de proyectar una estructura que se acomode a la forma del lecho del río, procurando que en épocas de caudal mínimo el agua pase sobre la rejilla. El agua

captada mediante la rejilla localizada en el fondo del río, se conduce a una caja de donde la tubería sale al desarenador.

Este tipo de bocatomas no se pueden emplear en cursos de agua de poca pendiente, ya que la aducción como el desagüe quedan profundos. En este caso se utiliza un muro transversal de altura suficiente para que la tubería de salida quede a una profundidad aceptable (se conoce como tipo de captación “dique toma”). Las bocatomas sumergidas constan de los siguientes elementos (Figura 5)

- Una presa para acumular el agua (dependerá de la pendiente del río) colocada de manera perpendicular a la corriente
- Muros laterales de contención para proteger la presa y encauzar el río.
- Una rejilla colocada sobre la presa cubriendo la canaleta de aducción
- Una canaleta de aducción o toma colocada dentro de la presa y debajo de la rejilla.
- Una cámara de recolección de agua situada al final de la canaleta.
- Un vertedero de excesos que se construye dentro de la cámara de recolección para arrojar al río los excesos de agua que no se transporten por la tubería de conducción.



**Figura 5.**  
**Captación de Fondo tipo “Dique Toma”**

En el libro se explican las expresiones de cálculo, los elementos y variables que intervienen en cada una de ellas y se ejemplifica los pasos para su diseño y chequeo. De manera particular se desarrolla el tema de rejillas de barras paralelas con poca inclinación según lo describen CORCHO ROMERO, F. H. (1993) y MATERÓN MUÑOZ (1991)

Cuando los volúmenes de agua adquieren proporciones considerables y en condiciones de aguas mínimas el volumen de agua es importante como para que se vierta por toda la estructura, el método más utilizado es el de la energía, considerándose a la estructura como un solo vertedero con niveles mínimos y máximos.

- Cálculo del vertedero de rebose. Se calcula mediante la expresión:

$$Q_{med} = K * L * H_{med}^{3/2}$$

$$H_{med} = \left[ \frac{Q_{med}}{K * L} \right]^{2/3}$$

$Q_{med}$  : Caudal medio del río  
 $K$  : Valor constante = 1,56, valor que es comúnmente utilizado, (Para mayor precisión de  $K$  deberá tenerse en cuenta que varía con la altura de la cresta  $H$  y con  $h$ , ver SOTELO AVILA, Gilberto - 1985)  
 $L$  : Ancho del vertedero  
 - Cálculo del vertedero de crecida. Se refiere al vertedero que va a lado y lado del vertedero de rebose. Su cálculo sirve:

- Para determinar la altura de los muros de protección de la bocatoma.
- Para prever los efectos de las posibles inundaciones aguas arriba

La capacidad del vertedero está dada por:

$$Q_c = K * (m - B) * h^{3/2} + K * B * (H_{med} + h)^{3/2}$$

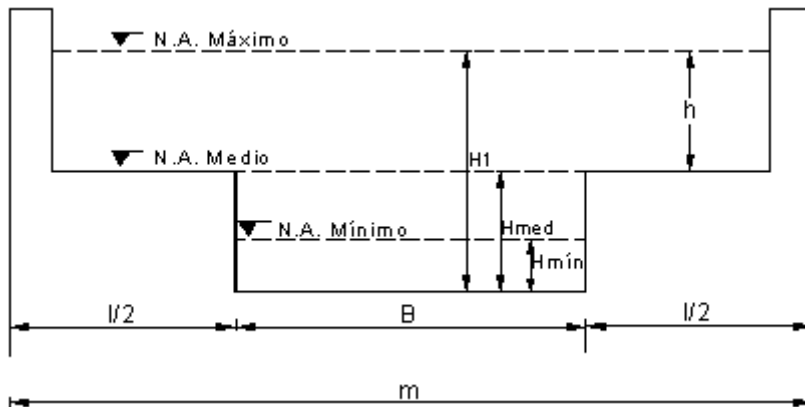


Figura 6. Vertedero de rebose

### Vertederos de excedencias (aliviaderos)

En el trazado de la sección transversal de las obras de excedencia se busca adoptar la forma más satisfactoria de perfil de agua teniendo en cuenta el flujo de la lámina vertiente. Se ha adoptado un vertedero central que permite el paso del gasto medio de la fuente superficial y un vertedero de crecida que permite el paso del gasto máximo estimado cuando se produce la creciente.

Las obras de excedencia pueden ser de diferentes formas, estas se seleccionan de acuerdo con la topografía del lugar, por la magnitud del caudal de diseño, por el costo y por las condiciones de la cimentación de la estructura. La forma ideal es aquella que favorece el caudal o descarga y que al mismo tiempo, impide la eventualidad de efectos nocivos a la estructura, tales como vacío parcial, las pulsaciones de la vena, vibraciones, entre otros. El trazado de la cresta debe ser hecho para el caudal máximo esperado, o sea, para la mayor carga de diseño (caudal de crecida).

Para el caso de pequeñas obras de excedencias, es frecuente utilizar vertederos de planta recta y perfil tipo Creager (Waterways Experiment Station: WES), este vertedero se caracteriza por que adopta a partir de la sección de control la forma del flujo de agua.

El vertedero tipo Creager consta básicamente de las siguientes partes:

- Sección de control
- Pozo amortiguador o disipador de energía
- Canal de descarga

Para el diseño hidráulico de un vertedero tipo Creager, se tienen en cuenta variables como las siguientes:

Cabeza de velocidades, altura del agua sobre la cresta del vertedero, carga total sobre la cresta del vertedero, altura del dique desde el lecho del río hasta la cresta del vertedero, coeficiente de descarga, longitud total de la cresta del vertedero, caudal máximo de velocidad crítica, profundidad crítica, número de Froude al pie de la presa, velocidad al pie de la presa, altura medida desde el nivel máximo aguas arriba de la estructura hasta el nivel del pozo de amortiguación, altura del resalto hidráulico en el pozo de amortiguación, altura del agua a la salida del canal de descarga, longitud del pozo de amortiguación y altura del diente del dique en el pozo de amortiguación

La forma general de la ecuación del perfil Creager es:

$$X^n = K * H_d^{n-1} * Y$$

Donde X y Y son las coordenadas del perfil de la cresta con su origen en el punto mas alto de ésta, los valores de K y n están en función de la pendiente del paramento aguas arriba: vertical; 3:1; 3:2; 3:3 (45°).

#### **Cálculo del canal recolector**

Se tendrá en cuenta las dimensiones pre-establecidas en la estructura. Bajo la rejilla de la bocatoma se ubicará un canal cuya función es recibir el agua que penetra a través de dicha rejilla. En la práctica es usual que la sección sea rectangular.

El canal se diseñará para condiciones de flujo subcrítico ya que es más estable que el supercrítico ( $V_L < V_c$ ).

#### **Cálculo de la Caja de derivación**

Dentro del diseño de la caja de recolección se efectuará los siguientes diseños:

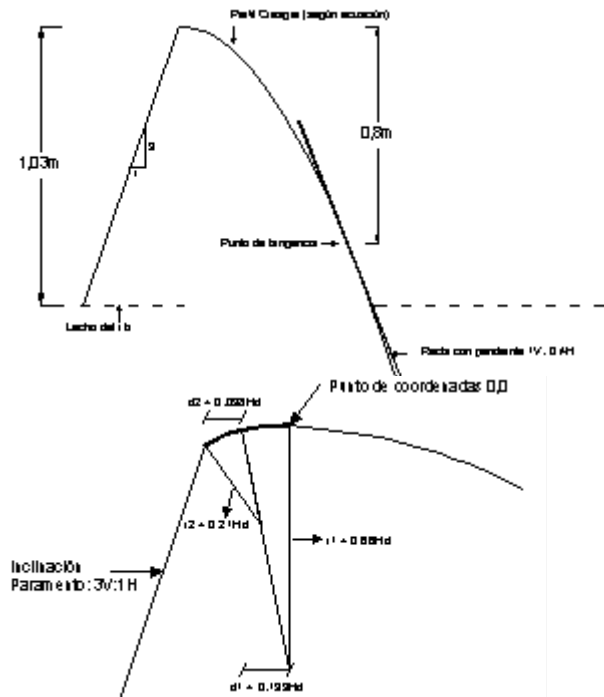
- Cálculo de la cámara de recolección
- Cálculo del vertedero de excesos
- Cálculo del desagüe
- Dimensionamiento y ubicación del tubo de salida al desarenador, calculado para condiciones mínimas y máximas determinando el caudal de excesos a evacuar a la entrada del desarenador

#### **Ejemplo Captación tipo Dique - Toma**

El libro desarrolla con claridad y paso a paso el diseño hidráulico de cada uno de los elementos constitutivos de la captación partiendo de unas condiciones hidrológicas, topográficas y de necesidades de agua. Explica el dimensionamiento de la rejilla para condiciones específicas de espesor de barrotes, espaciamiento entre varillas y caudal de diseño de la misma. Calcula la eficiencia hidráulica de la rejilla y las dimensiones necesarias a partir del método de la energía asumiendo algunos valores de partida y calculando por aproximaciones sucesivas las dimensiones complementarias.

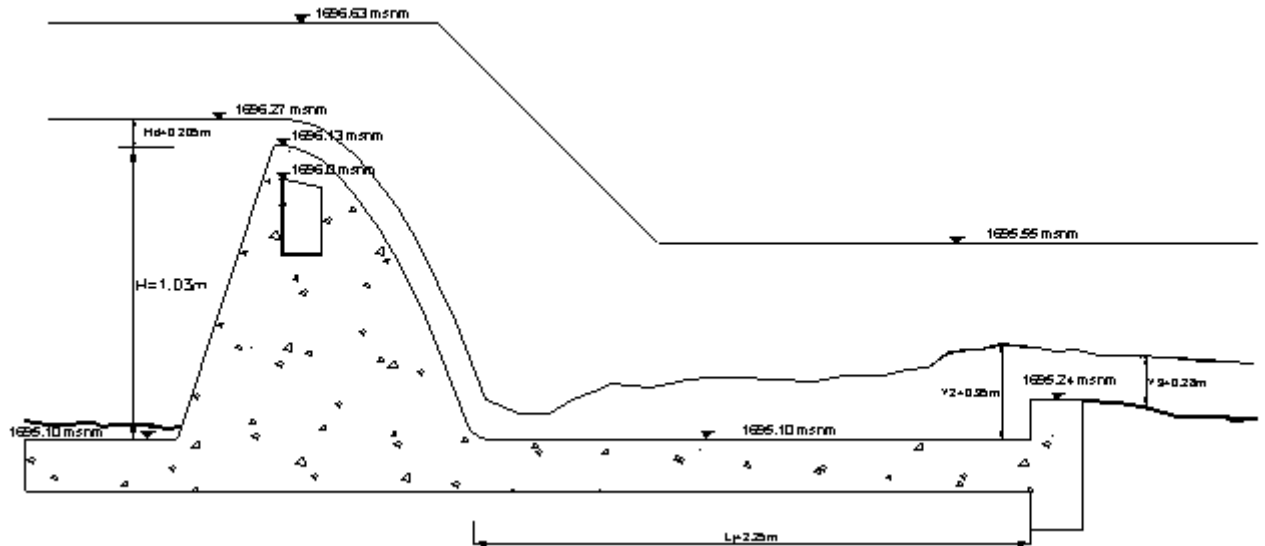
Para el diseño de los vertederos se recurre a los datos de ancho de río, dimensiones de la rejilla y caudales mínimo, medio y máximo. Con una serie de ecuaciones se determina los valores de los niveles mínimo, medio y máximo del agua que fluirá sobre los vertederos y a partir de ello dimensionar el vertedero de crecida; considerando el borde libre entre la máxima altura del agua sobre el vertedero hasta la corona del muro de protección y encauzamiento se obtienen las dimensiones definitivas de dicho muro.

Se ejecutan los pasos necesarios para el diseño del vertedero tipo WES con una pendiente 3V: 1H, para cuyas condiciones  $K=1.936$  y  $n=1.836$  dentro de la fórmula general, se resalta con detalle la obtención del punto de tangencia y las curvaturas en la parte superior del perfil.



**Figura 7. Punto de tangencia y detalle curvaturas sobre el perfil Creager**

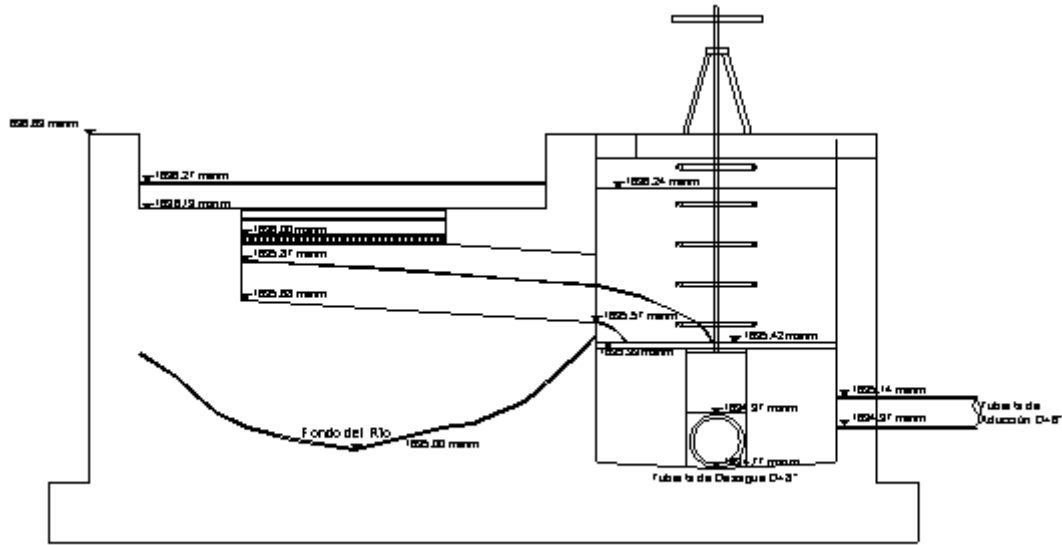
Se calcula la velocidad del flujo al pie del vertedero, la altura del agua a la salida o pie de la presa, la altura del diente del dique a partir del número de Froude, la altura máxima del resalto hidráulico, la profundidad del flujo a la salida del pozo y la longitud del pozo de amortiguación



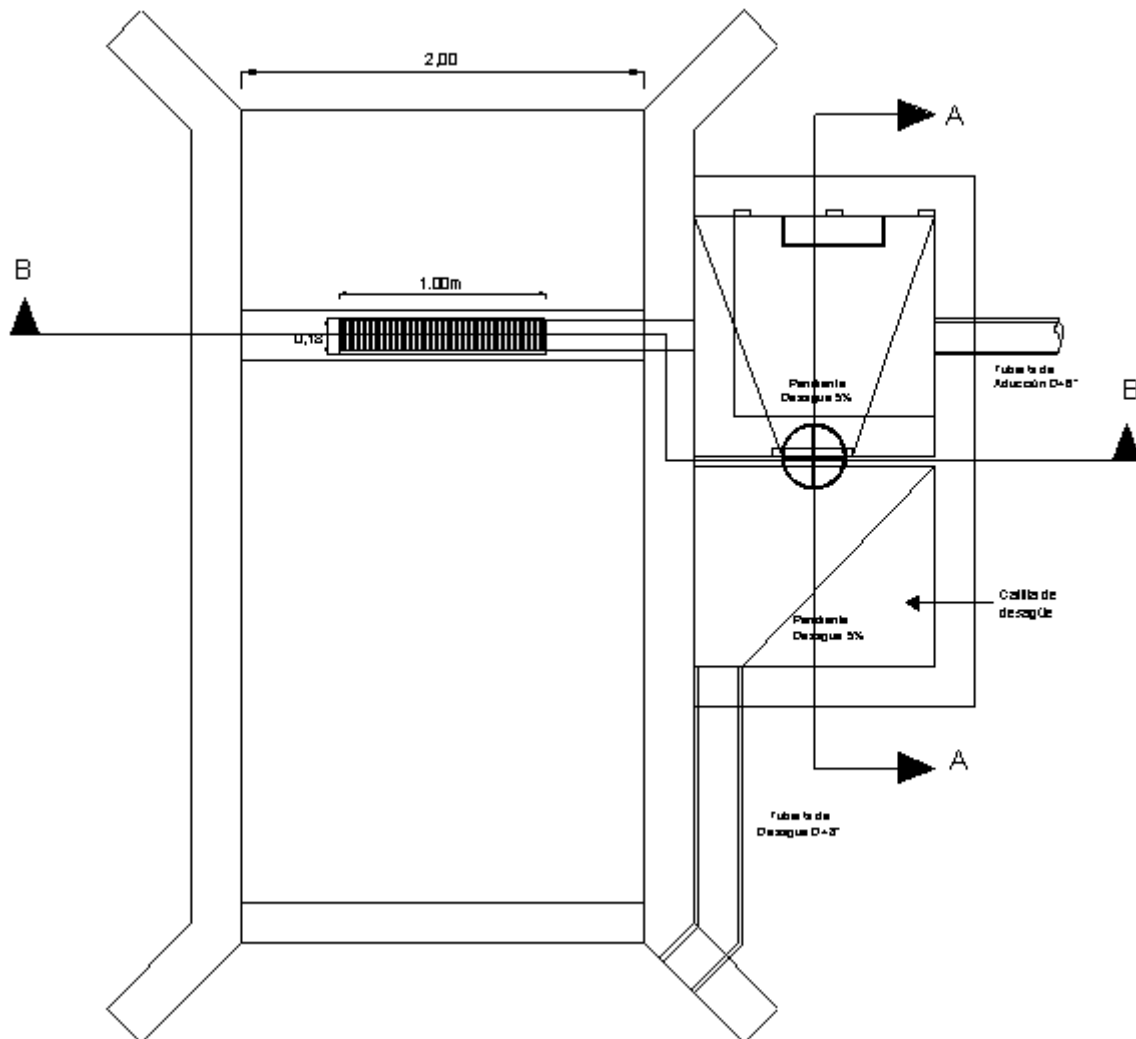
**Figura 8. Esquema vertedero WES bocatoma tipo Dique Toma**

Se calcula el canal recolector (mediante un flujo subcrítico) que transportará el agua dentro del dique hacia la cajilla de derivación y dentro de ella se calcula la cámara de recolección, las dimensiones del vertedero de excesos y de la tubería de desagüe; se realiza las estimaciones de los niveles del agua dentro de la cajilla en condiciones mínimas, medias y máximas y a partir de dichos niveles más las consideraciones

topográficas se diseña el sistema de transporte del agua desde la cajilla hasta el desarenador y se calcula el caudal captado en cada condición para dimensionar el dispositivo de evacuación de excesos a la entrada del desarenador.



**Figura 9. Vista frontal y corte B-B bocatoma tipo Dique Toma**



**Figura 10. Vista en Planta bocatoma tipo Dique Toma**

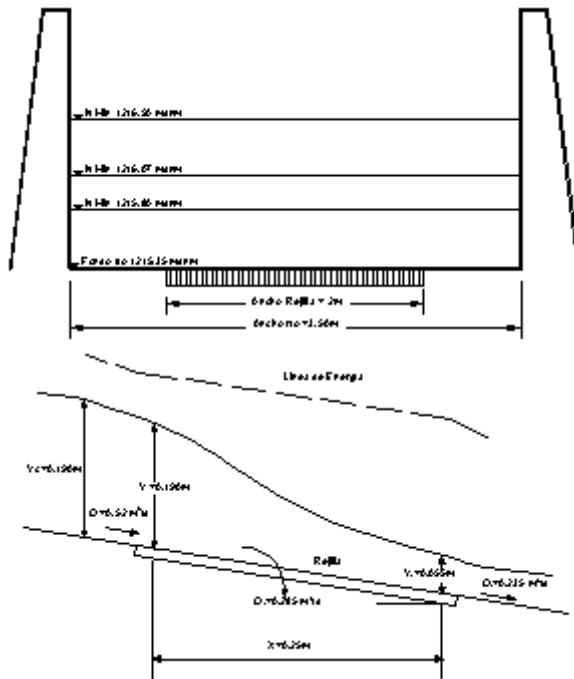


#### 4.3.4. Captación Mediante Rejilla de Fondo

En los casos en que existe caudales considerables y una gran variabilidad en los niveles del río que sirve de fuente de abastecimiento para la producción de especies hidrobiológicas es recomendable disponer rejillas al nivel del lecho del río sin necesidad de realizar un represamiento de la fuente; dichas rejillas se diseñan por el método de la energía. Por no tener dique se considera la estructura como un solo vertedero con niveles mínimos y máximos.

##### **Ejemplo Diseño rejilla para captación de fondo**

Se presenta paso a paso el diseño hidráulico de cada uno de los elementos constitutivos de la captación parcial de fondo diseñando la rejilla por el método de la energía y partiendo de datos hidrológicos, topográficos y de caudal de diseño.



**Figura 11. Vista frontal bocatoma mediante rejilla de fondo y Esquema del flujo sobre la rejilla, captación parcial**

#### 4.3.5. Captaciones Laterales

Las bocatomas laterales se usan para captar el agua en ríos caudalosos de gran pendiente y con reducidas variaciones de nivel a lo largo del período hidrológico. En este tipo de captación la estructura se ubicará en la orilla y a una altura conveniente sobre el fondo. Está constituida entre otras, por las siguientes partes (Ver Figura 4.28):

- Un muro ortogonal o inclinado con respecto a la dirección de la corriente para asegurar un nivel máximo de aguas.
- Un muro lateral para proteger y acondicionar la entrada de agua al conducto o canal de conducción y colocar los dispositivos necesarios para regular el flujo o impedir la entrada de material extraño. En este tipo de captación se busca mantener una carga constante sobre la rejilla.
- Válvulas de limpieza.

La bocatoma debe estar ubicada por debajo del nivel de aguas mínimas y por encima del probable nivel de sedimentación del fondo.

La obra debe tener un canal o conducto de entrada provisto de rejilla que impida el acceso de elementos flotantes y algunas especies hidrobiológicas indeseables como posibles peces predadores de la(s) especie(s) a cultivar. Las aguas captadas se conducirán a un pozo receptor ubicado más adelante, de donde se conducirán ya sea por bombeo o por gravedad al desarenador, tanque de almacenamiento, reservorio o a la zona de estanques.

Básicamente existen dos tipos de bocatomas laterales:

- Captaciones totalmente sumergidas
- Captaciones parcialmente sumergidas.

### Ejemplo Diseño de una bocatoma lateral totalmente sumergida

Se resuelve de manera alternativa una captación lateral totalmente sumergida a partir de las mismas necesidades de caudal que para la captación tipo dique-toma y de condiciones topográficas e hidrológicas similares. Se estiman los niveles de agua sobre el vertedero para los caudales de crecida, medio y mínimo, se predimensiona la rejilla partiendo de datos como diámetro de barrotes y espaciamiento entre los mismos y por tanteos se determina las dimensiones definitivas de la rejilla teniendo como dato importante para su diseño una velocidad de paso de 0.15 m/s.

Se diseña del vertedero tipo WES con una pendiente vertical del paramento aguas arriba, para cuyas condiciones  $K=2$  y  $n=1.85$  dentro de la fórmula general, nuevamente se detalla la obtención del punto de tangencia y las curvaturas en la parte superior del perfil. Se dimensiona la cámara de recolección, se calcula el vertedero de excesos y la tubería de desagüe; se realiza las estimaciones de los niveles del agua dentro de la cajilla en condiciones mínimas, medias y máximas y a partir de dichos niveles más las consideraciones topográficas se diseña la tubería desde la cajilla hasta el desarenador y se calcula el caudal captado en cada condición para así dimensionar el dispositivo de evacuación de excesos a la entrada del desarenador.

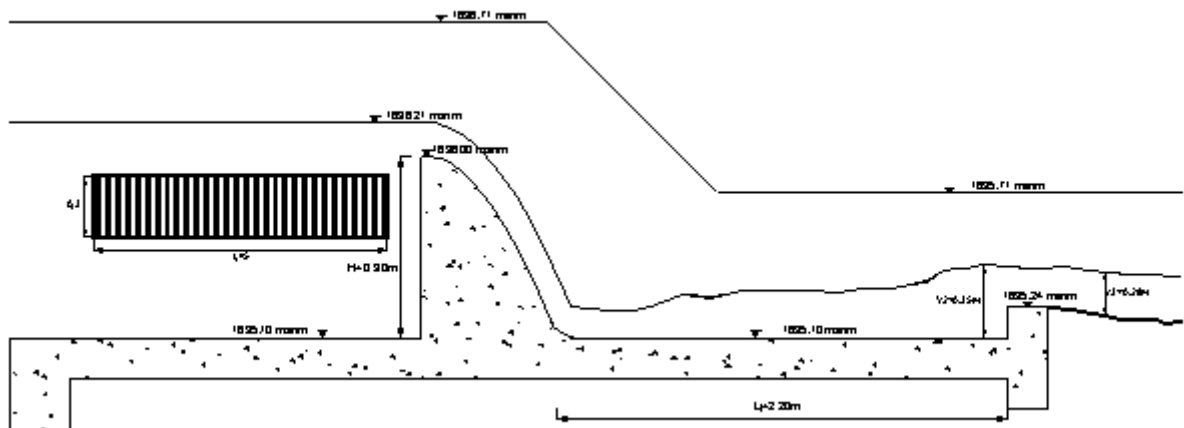


Figura 12. Vertedero WES y rejilla para captación lateral totalmente sumergida

#### 4.3.5.2 Bocatoma lateral parcialmente sumergida

En este caso, el dimensionamiento de la rejilla parte del método de la energía aplicado cuando dicha rejilla sobresale de la superficie del agua. Las consideraciones teóricas de diseño (espaciamiento y diámetro de barrotes recomendado, disposición de la rejilla) y

las expresiones de cálculo (dimensionamiento de rejilla y pérdidas de carga) para la bocatoma lateral son extractadas del libro de MATERÓN MUÑOZ (1991).

### Ejemplo Diseño de una bocatoma lateral parcialmente sumergida

Se resuelve una captación lateral parcialmente sumergida a partir de las mismas necesidades de caudal que para la captación tipo dique-toma y totalmente sumergida y con condiciones topográficas e hidrológicas similares.

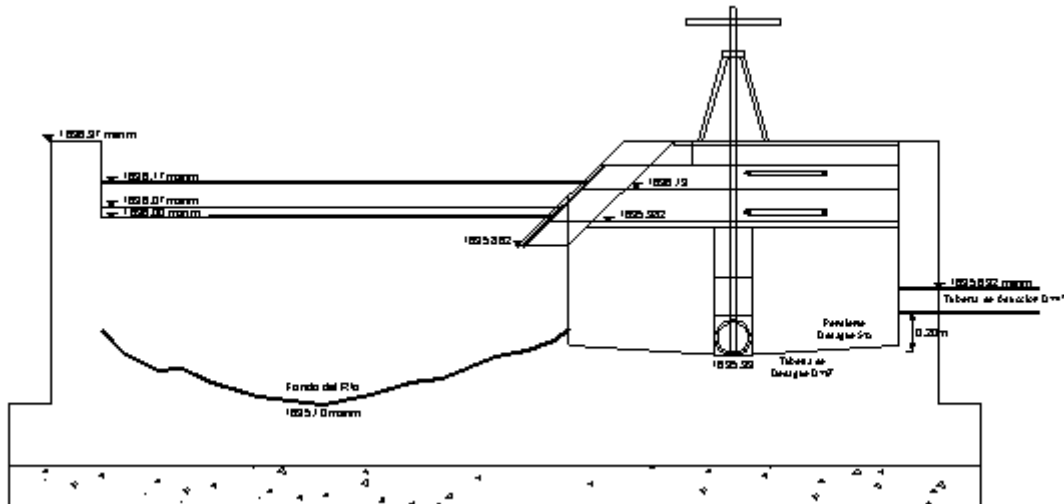
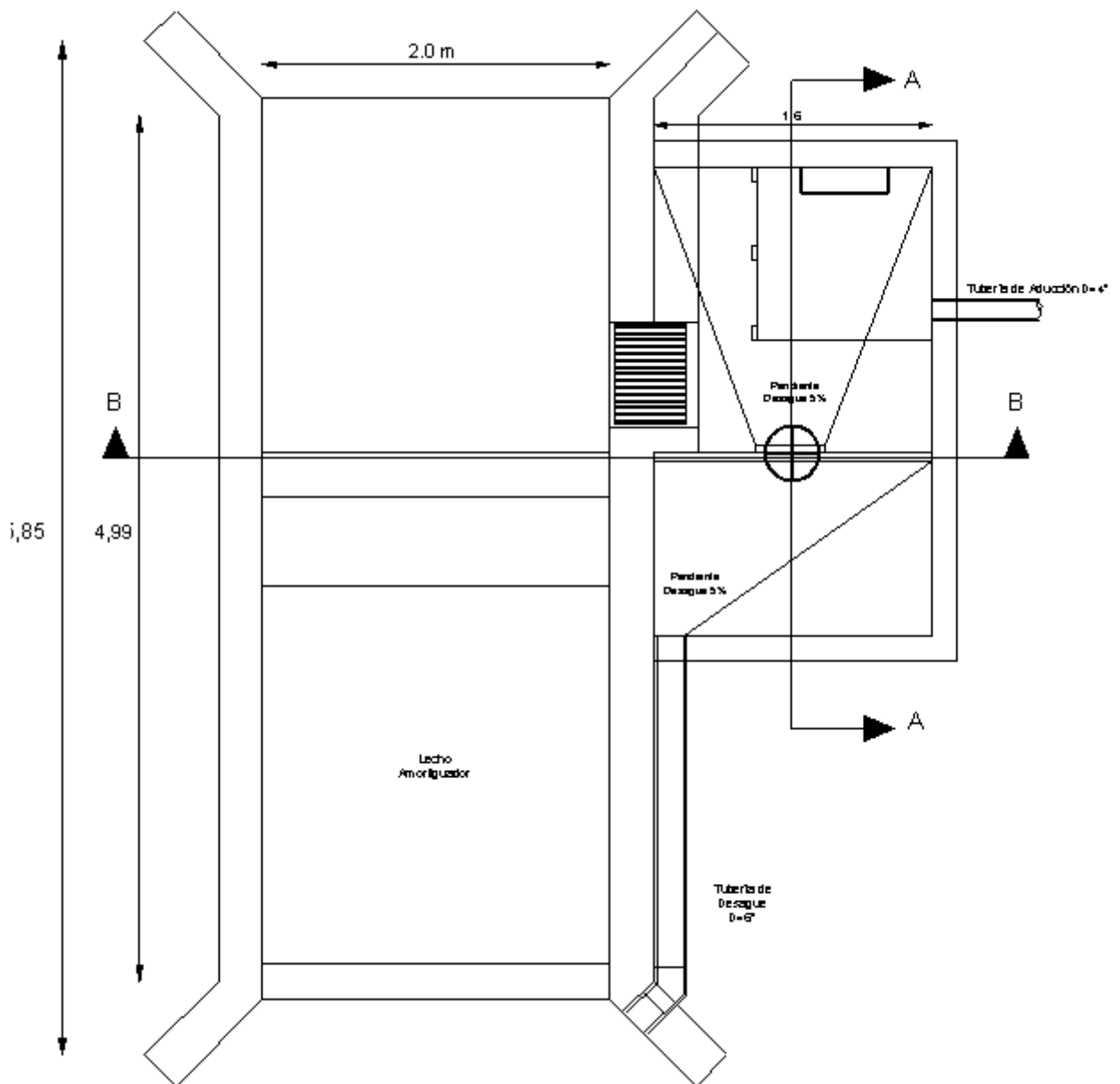


Figura 13. Corte A-A bocatoma lateral parcialmente sumergida



Con base en las dimensiones de la cámara de recolección, se calcula el vertedero de excesos y la tubería de desagüe; se realiza las estimaciones de los niveles del agua dentro de la cajilla en condiciones mínimas, medias y máximas y a partir de dichos niveles más las consideraciones topográficas se diseña la tubería desde la cajilla hasta el desarenador y se calcula el caudal captado en cada condición para así dimensionar el dispositivo de evacuación de excesos a la entrada del desarenador.

#### 4.3.6. CAPTACIONES DINÁMICAS DE LECHO FILTRANTE

La captación dinámica de lecho filtrante, es una estructura que se utiliza como sistema de toma o captación, como acondicionamiento y protección en los sistemas de abastecimiento de agua de alta calidad. Su ubicación depende de la utilización que se requiere y de la dificultad de acceso.

Este tipo de captación es muy importante cuando la toma de agua se realiza con múltiples propósitos, por ejemplo cuando el agua se destinará a consumo humano y a la producción acuícola como en la producción de salmónidos, donde se requiere de alta calidad en los parámetros físico químicos del agua.

Según SALAZAR CANO, R. (1991), el sistema consiste en una rejilla por la cual se deriva un caudal que pasa por un orificio sumergido y posteriormente se filtra en forma descendente a través de un lecho de grava donde se retienen las partículas y objetos gruesos contenidos en el agua, realizándose de esta manera su acondicionamiento para posterior tratamiento.

Parte del caudal captado se filtra y la otra parte barre continuamente la superficie del lecho, evitando que algunas partículas sedimenten sobre él, permitiendo a su vez, mejores carreras de filtración. Cuando las calidades del agua cruda presentan gran deterioro físico por cortos períodos, la captación dinámica cumple la función de protección al sistema de abastecimiento ya que el lecho filtrante se colmata rápidamente evitando que el agua de muy baja calidad entre al sistema.

Las captaciones dinámicas de lecho filtrante son una buena opción para asegurar la calidad del agua requerida en los sistemas de producción acuícola bien sea como mecanismo previo a un desarenado o tratamiento del agua o como mecanismo de mejoramiento de la calidad del agua antes del proceso de producción acuícola.

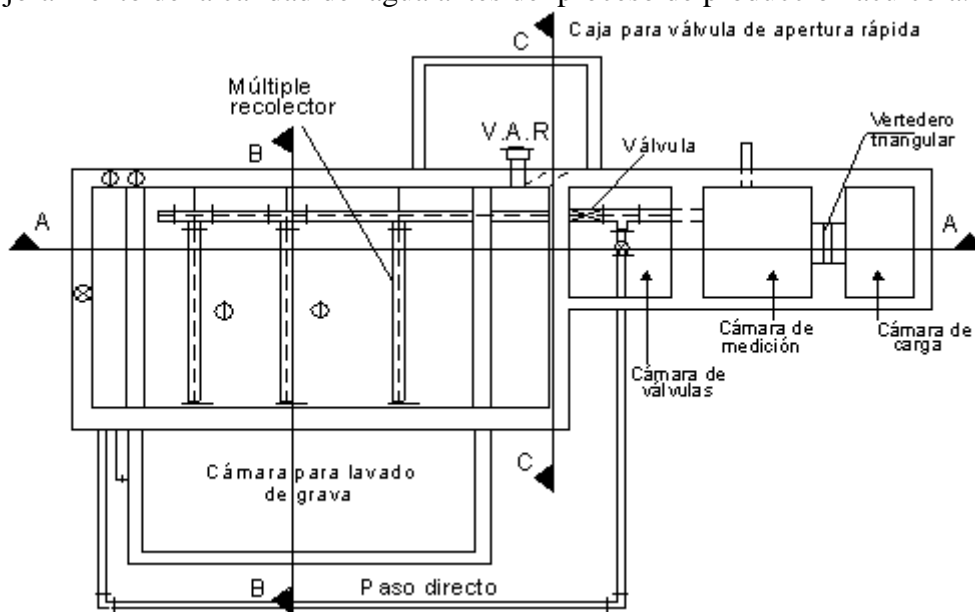


Figura 15. Vista en planta zona de filtración de captación dinámica

### Componentes de la captación dinámica

La captación dinámica cuenta con los siguientes componentes:

#### Estructura de entrada.

Distribuye uniformemente el flujo en el compartimiento principal y está compuesto de:

- Rejilla lateral o sumergida para captar agua de la fuente y no permitir el paso de piedras grandes y material grueso (ramas, hojas grandes)
- Orificio sumergido en donde se capta, regula o controla el flujo del agua (con válvula tee o compuertas)
- Canal de distribución. Estabiliza el flujo de entrada y logra una distribución sobre el lecho filtrante.

#### Compartimiento principal.

Donde se realiza el acondicionamiento del agua captada y consta de:

- Sistema de drenaje. Ubicado debajo del lecho filtrante, cumple la función de coleccionar uniformemente el agua filtrada a través de toda el área de filtración. Los sistemas de drenaje utilizados son los llamados múltiples, que consisten en una tubería o colector principal con varios ramales denominados colectores secundarios, los cuales cuentan con orificios uniformemente distribuidos a lo largo del tubo. Los orificios deben ser perforados formando un ángulo de 90° entre ellos y colocados hacia abajo para evitar zonas muertas donde se acumule el lodo.

Estructura de excesos.

Recoge el agua de lavado y de barrido superficial para retornarla nuevamente al río, consta de:

- Vertedero frontal de descarga libre: permite en forma conjunta con la estructura de entrada la distribución uniforme del flujo en la superficie del lecho filtrante.
- Canal de desagüe: a él llegan las aguas de barrido y lavado para ser retomadas del río. Es importante que el desagüe y el canal no produzcan represamiento y ahoguen el vertedero de salida, para evitar la disminución de la velocidad de arrastre durante la operación de lavado.

Estructura de salida.

Tiene por finalidad la medición y control del caudal; su construcción al lado de la captación puede estar condicionada por la facilidad de acceso o por la existencia de otras estructuras donde se puede realizar el control y aforo del caudal, por ejemplo, se puede componer de:

- Cámara de válvulas: aquí se encuentran ubicadas las válvulas de control de agua filtrada y paso directo. Es importante que esta cámara sea instalada junto al lecho filtrante aunque la estructura de salida esté colocada en otro sitio del sistema de abastecimiento, para permitir reparaciones en la línea de conducción del agua filtrada.
- Cámara de medición de caudal: en ella se afora el caudal filtrado por medio de vertederos que pueden ser chequeados fácilmente para hacer el respectivo control de caudal.
- Cámara de carga: envía el caudal filtrado hacia el sitio de producción acuícola (si la calidad del agua ya es apta para dicho efecto) o a otras estructuras como un tanque de almacenamiento.

Otras estructuras.

La toma para la estructura de filtración dinámica podrá efectuarse por medio de una rejilla de fondo o lateral diseñada para captar el caudal necesario, represando el río por medio de una presa o dique.

Para evitar la suspensión del suministro de agua a causa de la operación de limpieza, es conveniente disponer de un by-pass mediante la colocación de una tubería o canal de paso directo que permita el flujo de agua cruda hacia el sistema. Dentro de las consideraciones de diseño a tener en cuenta se encuentran: El caudal a filtrar, la velocidad de filtración y la velocidad superficial de lavado.

Se ejemplifica para efectos de predimensionamiento los pasos para la determinación del área filtrante en una captación de este tipo.

#### 4.3.7. Captación de Agua por Derivación de un Canal Principal Reservorio

Es común encontrar en la producción de algunas especies de peces y de camarones la toma de agua a partir de un canal reservorio de grandes dimensiones mediante el uso de compuertas o mediante tubería y su salida hacia un canal de menores dimensiones que el principal o directamente hacia los estanques.

#### 4.3.7.1 Toma Mediante Compuerta

El flujo bajo una compuerta vertical se puede definir como un problema de un orificio cuadrado siempre que la altura de la abertura “a”, bajo la compuerta, sea pequeña comparada con el nivel de energía aguas arriba  $H_0$  y el nivel del agua aguas abajo  $H_2$ , no tenga influencia sobre el flujo.

En este tipo de toma se pueden presentar básicamente tres casos:

- Descarga libre
- Descarga sumergida o ahogada
- Descarga influenciada (retardada) por las condiciones aguas abajo

La temática relacionada con este tipo de tomas se desarrolló a partir del documento: “Inland Aquaculture Engineering”, FAO (1983)

Los tres casos se determinan teniendo en cuenta si la profundidad o nivel del agua después de la compuerta afecta o no las condiciones del flujo.

El caudal que fluirá a través de una compuerta depende entre otros de los siguientes parámetros:

Ancho de la compuerta, coeficiente de velocidad, profundidad del agua “contraída” (después de pasar la compuerta), aceleración gravitacional, altura de la línea de energía aguas arriba de la compuerta, velocidad de aproximación del agua aguas arriba de la compuerta, profundidad del agua, aguas arriba de la compuerta, altura de apertura de la compuerta, coeficiente de descarga.

En este tipo de diseños debe considerarse la importancia del dimensionamiento del solado, enrocado o losa en concreto aguas arriba y abajo de la compuerta pues la turbulencia producida por el flujo bajo la compuerta puede generar erosión en el lecho poniendo en riesgo la estabilidad de la cimentación de la estructura; dichas longitudes dependen básicamente de los valores de la altura de la línea de energía aguas arriba de la compuerta, la diferencia de nivel entre la superficie del solado y el nivel del suelo aguas abajo del solado, la longitud del resalto hidráulico, la profundidad subcrítica conjugada, el tipo de suelo de base en la compuerta de toma y la diferencia de alturas entre la máxima altura del líquido aguas arriba de la compuerta y el nivel del suelo del canal aguas abajo

Se desarrollan ejemplos tendientes a la determinación del caudal que fluye bajo una compuerta en condiciones de flujo libre; flujo ahogado o sumergido y bajo una compuerta en condiciones de descarga retardada por condiciones aguas abajo

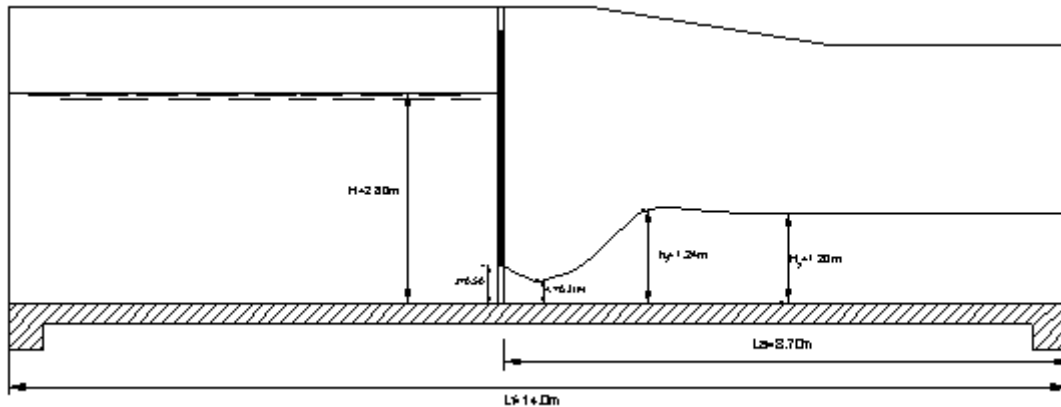
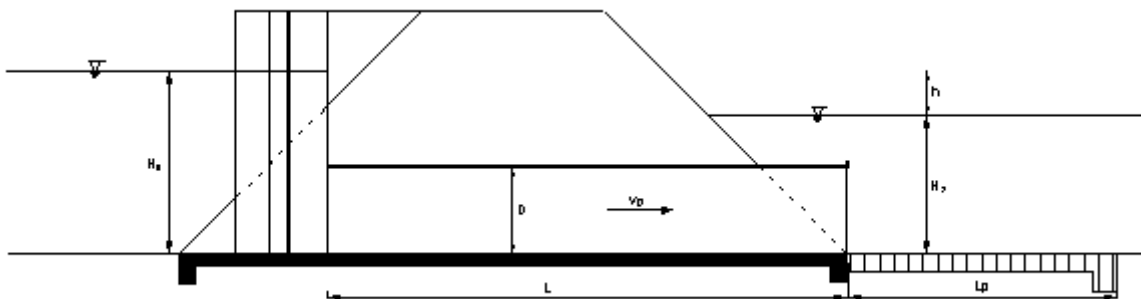


Figura 16. Dimensiones y características del flujo bajo una compuerta en condiciones de flujo libre

#### 4.3.7.2 Toma Mediante Tubería Sumergida

Para este caso específico de flujo a través de un orificio de grandes dimensiones se tiene que el caudal dependerá del área de la sección transversal del tubo; la cabeza hidráulica definida como la diferencia de altura entre la superficie del agua, aguas arriba y aguas abajo del tubo y de un coeficiente de descarga que a su vez depende del factor de fricción de la tubería, la longitud y el diámetro de la misma

La longitud del solado o losa de protección para el nivel del piso aguas debajo de la descarga del tubo se calcula en función de la velocidad del flujo de agua en la tubería y de la velocidad de erosión cuyo valor depende del tipo de suelo sobre el cual se encuentra la tubería.



#### 1) DESARENADORES

.Son tanques grandes cuyo objeto es sedimentar las arenas, barros y limos que traiga el agua captada por la bocatoma y evitar así que estos materiales ocasionen la obstrucción o daño por abrasión a la tubería de conducción. Además, la sedimentación contribuye a clarificar primariamente el agua captada pues la presencia de cierto nivel de sólidos suspendidos puede afectar de manera seria las branquias de algunas especies.

Siempre que sea necesario debe instalarse un desarenador en el primer tramo de la aducción, lo más cerca posible a la captación del agua. Preferiblemente debe existir un desarenador con dos módulos que operen de forma independiente, cada uno de ellos dimensionado para el Caudal de Diseño del Sistema de Producción Acuícola (Qdis) ante la posibilidad de que uno de los dos quede fuera de servicio.



Si el sistema acuícola estará dirigido a la producción de especies rústicas, capaces de soportar altos niveles de turbiedad y sólidos sedimentables en el agua (tales como la carpa) o si se sabe que no existe riesgo de obstrucción o daño por abrasión a la tubería de conducción, puede prescindirse del desarenador.

### 5.1 Ubicación

Para la selección del sitio donde se ubicará el desarenador deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- El área de la localización debe ser suficientemente grande para permitir la ampliación de las unidades en caso de que estas se hayan contemplado en el diseño.
- El sitio escogido debe proporcionar suficiente seguridad a la estructura y no debe presentar riesgo de inundaciones en los periodos de invierno.
- La ubicación del desarenador debe garantizar que el sistema de limpieza pueda hacerse por gravedad y que la longitud de desagüe de la tubería no sea excesiva.
- Los desarenadores deben ubicarse lo más cerca posible del sitio de la captación.
- El fondo de la estructura debe estar preferiblemente por encima del nivel freático. En caso contrario deben tomarse las medidas estructurales correspondientes considerando flotación y subpresión.
- Se proyectarán los dispositivos de entrada y salida de tal forma que aseguren una buena distribución de flujo y se reduzcan al mínimo las posibilidades de corto circuito.

### 5.2 Capacidad Hidráulica

Cada desarenador debe tener una capacidad hidráulica igual al Caudal de Diseño del sistema de producción Acuícola ( $Q_{dis}$ ), en el cual se incluyen las necesidades por concepto de recambio, pérdidas evaporación y filtración entradas por precipitación y las posibles necesidades de la planta de tratamiento.

### 5.3 Consideraciones para el Diseño

En el caso que se tengan desarenadores con procesos manuales para la remoción de arena, el depósito de arena debe ser capaz de acumular un mínimo equivalente al 10% del volumen total del desarenador. El desarenador debe tener un ancho mínimo que permita el acceso y el libre movimiento de los operadores y del equipo auxiliar de limpieza.

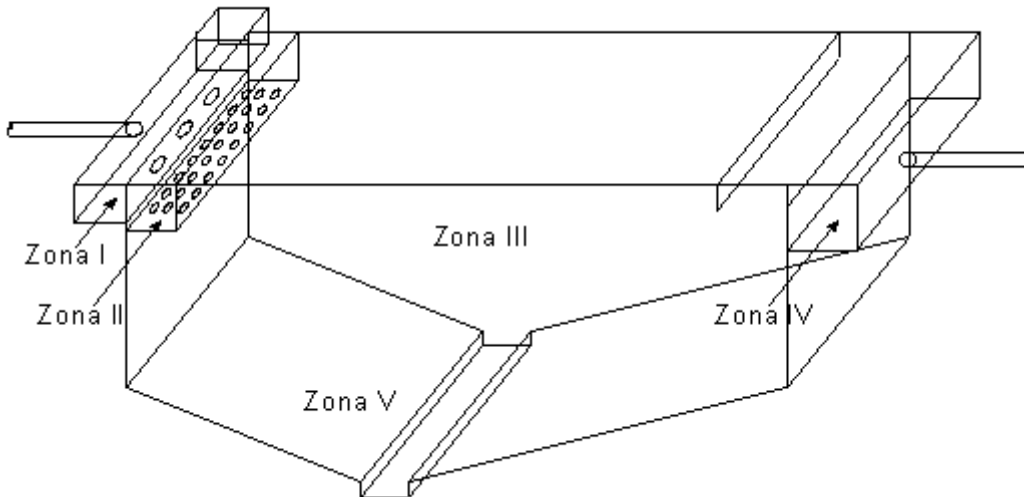


Figura 18. Esquema general de un desarenador convencional con Indicación de sus zonas.

El desarenador estará conformado por las siguientes zonas (Figura 5.1):

- Zona I : Cámara de quietamiento. En donde la velocidad adquirida por el agua entre la bocatoma y el desarenador se reduce en virtud del aumento de sección en dicha cámara. Esta cámara está provista de un vertedero para rebosar el exceso de agua que proviene de la bocatoma y estará conectada a la tubería de lavado del desarenador.
- Zona II : Zona de entrada. Estará provista de un dispositivo de entrada (pantalla, canal con perforaciones, entre otros) para distribuir de manera uniforme el flujo. La velocidad de paso por los orificios de entrada no deberá exceder los 0.3 m/s.
- Zona III : Zona de sedimentación. Destinada a la remoción de partículas de arena, barro, limo y demás elementos que puedan sedimentarse en función del diseño del sistema.
- Zona IV : Zona de salida. Provista de una cortina para impedir el paso de hojas y otros elementos flotantes y de un vertedero a lo largo del muro que asegura una distribución uniforme del flujo, el funcionamiento del mismo puede ser por caída libre o sumergido. El vertedero en mención descarga sobre un canal ubicado fuera del tanque. Cuando el caudal es grande se tiene como alternativa duplicar la longitud del mismo con el objeto de no aumentar la lámina de agua sobre él colocando el canal dentro del tanque.
- Zona V: Zona de lodos. Destinada al depósito de sedimentos y constará de un canal recolector de lodos con una pendiente mínima del 5%. Por el fondo de esta zona arranca una tubería de lavado a la cual entran los lodos mediante una válvula de compuerta lateral (o de fondo si se trata de tolvas) provista de vástago, columna de maniobra y rueda de manejo. Esta tubería se conecta a la tubería de rebose para desagüe y lavado. La tubería de lavado se colocará a 1/3 de la longitud total a partir de la entrada, la pendiente de la placa estará comprendida entre el 5 y 8 %.

#### 5.4 Teoría de la Sedimentación

La teoría de la sedimentación fue desarrollada por Hazen y Stokes. Su modelo de sedimentación de partículas se resume en la siguiente ecuación, que es la ecuación general de la sedimentación de partículas esféricas en un fluido en reposo.

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * g * (S - 1) * d}{3 * C_D}}$$

Donde:

$V_s$  : Velocidad de sedimentación, en cm/s

$g$  : Aceleración de la gravedad =  $981 \text{ cm/s}^2$

$S$  : Gravedad específica de la partícula a remover, adimensional Usualmente se toma un valor de  $S = 2.65$  para arenas (Según recomiendan las Normas RAS 2000 Título B.1.4.6.3)

$d$  : Diámetro de partícula a remover, en cm

$CD$  : Coeficiente de arrastre de Newton

De la ecuación anterior puede concluirse que un sedimentador debe diseñarse para un determinado tamaño de partícula y para la temperatura mínima esperada del agua.

La magnitud del coeficiente de arrastre de Newton no es constante y varía en función del número de Reynolds. Flujo laminar ( $Re < 1$ ); Régimen de transición o Régimen turbulento número de Reynolds entre ( $10^3$  a  $10^4$ )

Cuadro 5.2 Criterios simplificados para depósitos de arena en agua

Diámetro de partícula (mm)	Régimen
<0.085	Laminar
0.085 – 1.00	Transición
> 1.00	Turbulento

Es importante aclarar que cuando se habla de las regímenes de flujo laminar, transición y turbulento, se refieren no al régimen de la masa de agua sino al régimen de flujo en el entorno de la partícula.

La clasificación de los materiales según el tamaño de sus partículas se muestra en el cuadro 5.3 Tomada de: LOPEZ CUALLA (1995).

Cuadro 5.3 Clasificación de materiales en suspensión según el tamaño

Material	Diámetro (mm)
Gravilla gruesa	2.00 o más
Gravilla fina	2.00 – 1.00
Arena gruesa	1.00 – 0.50
Arena media	0.50 – 0.25
Arena fina	0.25 – 0.10
Arena muy fina	0.10 – 0.05
Limo Grueso y medio	0.05 – 0.01
Limo fino	0.010 – 0.005
Ardilla Gruesa y media	0.005 – 0.001
Ardilla fina	0.0010 – 0.0001
Ardilla coloidal	menor de 0.0001

## 5.5 Estudio de los Desarenadores

Para su estudio se suponen las siguientes hipótesis:

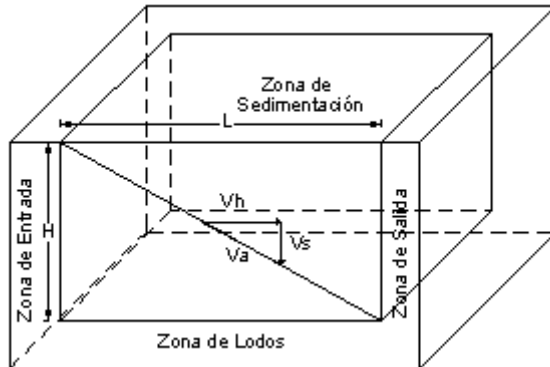
- Dentro de la zona de sedimentación el asentamiento de las partículas se verifica exactamente como si el líquido estuviera quieto en un recipiente de igual profundidad.
- El flujo es permanente (uniforme) o sea que lleva una velocidad determinada en sentido horizontal.

- La concentración de partículas en la zona de sedimentación es uniforme en toda la sección transversal normal al flujo. Cualquier partícula que entra a la zona de lodos se considera removida.

El diseño de los desarenadores se efectúa con base en el tamaño de las partículas que se quiere remover. Se diseñará para las de menor tamaño pues las mayores se retendrán conjuntamente con éstas. La partícula está sometida a dos movimientos:

- Uno de traslación horizontal con velocidad uniforme  $V_h$ ;  $V_h$  = velocidad horizontal.
- Uno de traslación vertical con velocidad uniforme  $V_s$  correspondiente a la velocidad de sedimentación de la partícula de diámetro  $d_i$ .

La suma de estas dos velocidades da una velocidad resultante llamada velocidad de arrastre



“ $V_a$ ”. Situando una partícula de diámetro  $d_i$  en la posición más desfavorable; o sea, colocada en la superficie del depósito a una altura  $H$  del fondo y dado que los vectores de velocidad se suponen constantes, la trayectoria de la partícula será lineal.

Figura 19. Trayectoria de las partículas sedimentadas

Para el dimensionamiento del desarenador se interrelacionan los siguientes valores: velocidad horizontal, velocidad de sedimentación, longitud del sedimentador, ancho del sedimentador, área superficial, área transversal

En condiciones teóricas ideales ( $V_h$ ,  $V_s$  constantes y uniformes), el período de retención es igual al tiempo que demora la partícula en tocar el fondo del depósito. En la práctica las condiciones ideales no se cumplen, ya que en un tanque cualquiera circula el agua a una cierta velocidad horizontal cuando existe un gasto a través de él. La acción del viento perturba la superficie del agua, la temperatura varía con la profundidad del líquido y se establecen corrientes verticales. Además, los aditamentos de entrada y salida no pueden producir un desplazamiento ciento por ciento uniforme. Debido a que no se cumplen las suposiciones iniciales del desarrollo de la teoría se adopta entonces un factor de seguridad en función del porcentaje de remoción de partículas y la eficiencia de las pantallas deflectoras

## 5.6 Parámetros de Diseño.

Los parámetros de diseño para los desarenadores convencionales se basan fundamentalmente en las directrices establecidas por las normas RAS y son básicamente los siguientes:

- Influencia de los procesos de tratamiento posterior al desarenador, que definen valores máximos de velocidad horizontal, máximo diámetro de partículas a remover y eficiencia del desarenador
- Período de Retención = 20 minutos
- Velocidad Horizontal y de Arrastre, la primera debe ser menor que la de arrastre pues generará resuspensión de las partículas, se recomienda  $V_h/V_s < 20$

- Profundidad y Volumen de Almacenamiento:  $0.75\text{m} < H < 1.50\text{m}$ ; La profundidad máxima para efectos de almacenamiento de lodos podrá ser hasta del 100% de la profundidad efectiva

Otras recomendaciones generales para tener en cuenta en el diseño de desarenadores son:

- Velocidad de paso por los orificios en la canaleta de entrada  $< 0,3 \text{ m/s}$ .
- Ancho mínimo de los desarenadores será de  $0,6 \text{ m}$  para efectos de facilitar su limpieza.
- Relación Longitud/Ancho  $3 < 6 <$
- A la entrada instalar un baffle o tabique a fin de hacer uniforme el flujo del agua en el desarenador y cuya altura será como máximo  $0.5$  veces la profundidad efectiva.

### Ejemplo Diseño de un desarenador convencional

Se desarrolla el proceso de diseño hidráulico de un desarenador convencional con el fin de mejorar la calidad del agua para la producción de especies hidrobiológicas mediante la remoción de sólidos sedimentables. El diseño es el complemento al ejemplo previamente desarrollado para la captación tipo dique-toma.

Los datos de inicio son: Caudal de diseño del desarenador, diámetro, velocidad media del flujo y cotas en la tubería de aducción, cotas en la cajilla de derivación y en la zona de entrada al desarenador, caudal captado en condiciones máximas, diámetro de las partículas a remover, presencia o ausencia de tratamiento posterior, tipos de deflectores, concentración de las arenas en la fuente de agua, temperatura media del agua.

Se determina la viscosidad cinemática del agua, la velocidad de sedimentación de las partículas y a partir de ella se chequea el número de Reynolds, se adopta un valor de profundidad efectiva según las normas RAS, se consideran los parámetros de diseño recomendados por las RAS y se realizan los chequeos de área superficial, y las relaciones entre las dimensiones largo, ancho y profundidad del desarenador, se chequea la relación entre la velocidad horizontal y la velocidad de sedimentación.

Se diseña la cámara de rebose y aquietamiento teniendo presente el valor del caudal de excesos a evacuar bajo condiciones máximas mediante un vertedero lateral rectangular de pared delgada, que llevará hacia el desagüe los excesos de agua captados por las variaciones de nivel sobre el muro estabilizador de la bocatoma. Igualmente se diseña el desagüe en la caja de evacuación de excesos

Se diseña el paso del agua entre la cámara de rebose y aquietamiento y la estructura de entrada del desarenador mediante orificios sumergidos con una velocidad cercana a los  $0.30 \text{ m/s}$

Para lograr una buena repartición del flujo se adopta como estructura de entrada una canaleta con orificios circulares (deflectores) ubicados en el fondo de la misma (Cuando los caudales son muy elevados, es factible disponer de orificios tanto en el fondo como en la pared frontal de la canaleta). El número y tamaño de los orificios se calcula para obtener una velocidad de entrada no mayor de  $0,30 \text{ m/s}$ , incluyendo en el análisis un coeficiente de reducción por contracción de la vena líquida de  $0,61$ . Finalmente se garantiza una distribución homogénea y uniforme de los mismos sobre el área del fondo.

Se determinan las pérdidas de carga por el paso a través de los orificios y con las cotas antes obtenidas se dimensiona la zona de desarenado. Se dimensiona la estructura de retención de sólidos flotantes y se diseña la canaleta de salida. Para calcular la altura del sistema de extracción de lodos se utilizan los datos relativos a la concentración de sedimentos o se asume como referente lo estipulado por norma de hasta un 100% de la altura efectiva.

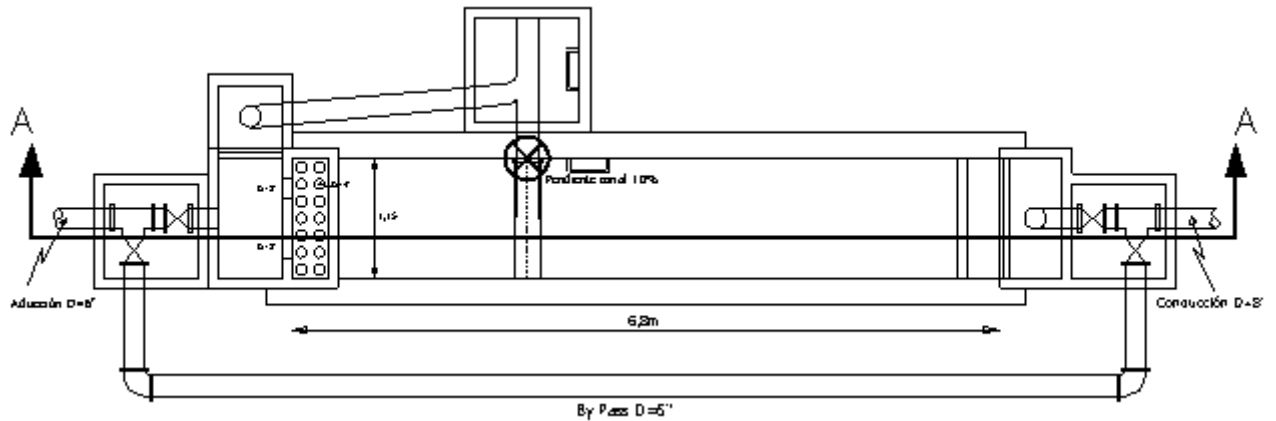


Figura 20. Desarenador Convencional, Vista Superior

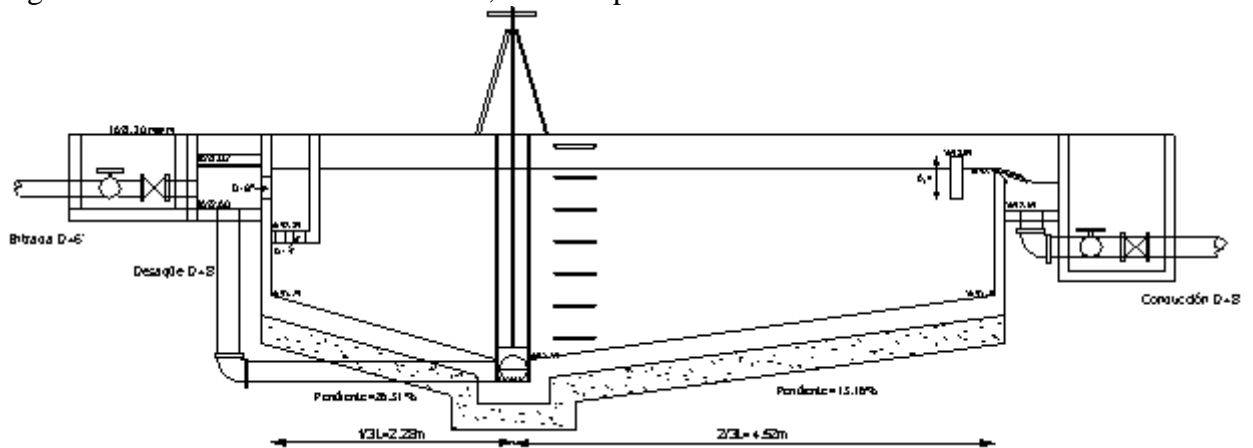


Figura 21. Desarenador Convencional, Corte A-A

### 5.10 Desarenadores de Plaquetas Inclınadas

Para el estudio de este tipo de desarenadores se aplican los conceptos básicos de la teoría de la sedimentación en plaquetas inclinadas. En una misma suspensión de fluido con partículas sedimentables según se tenga una Velocidad de Sedimentación Crítica mayor o menor quedarán removidas mayor o menor número de partículas. Entre mayor sea la velocidad crítica seleccionada por el proyectista (o carga superficial) mayor número de partículas más finas que la crítica escapan. Si se coloca una placa C-C a una altura  $h$  menor que  $H$  se podrán recoger más partículas con velocidades  $V_{si}$  menor que  $V_{sc}$ .

Según Hazen: "Como la acción del tanque sedimentador depende de su área y no de su profundidad, una subdivisión horizontal produciría una superficie doble para recibir sedimentos en lugar que una sencilla y duplicaría la cantidad de trabajo; tres de ellas la triplicaría y así sucesivamente".

El problema para la aplicación de esta teoría radica en la posible acumulación y limpieza de lodos en las placas, lo cual se soluciona dando un ángulo de inclinación a las bandejas o placas para que las partículas resbalen hacia el fondo.

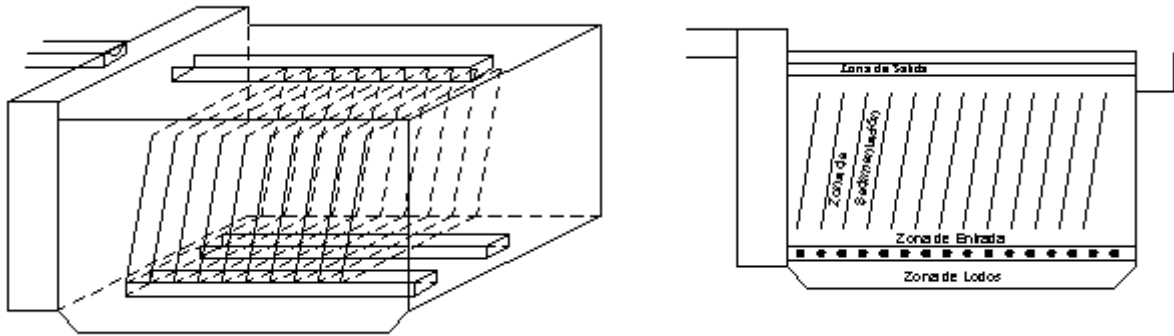


Figura 22. Esquema general de un desarenador con placas inclinadas

### 5.10.1 Descripción del sistema

Consiste esencialmente en una serie de tubos o láminas planas paralelas colocadas en un tanque apropiado con un ángulo de inclinación de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar; esto permite cargas superficiales ( $Q/As$  mín) mayores que las usadas en desarenadores convencionales (entre 4 y 10 veces), permitiendo reducir considerablemente el área del tanque.

### 5.10.2 Fórmulas básicas

Según la teoría de Yao, cuando una partícula asciende con una velocidad media ( $V_0$ ), arrastrada por el flujo entre dos placas planas paralelas que forman un ángulo  $F$  con la horizontal, la velocidad resultante que determina la trayectoria de la partícula puede descomponerse en sus dos componentes  $V_x$  y  $V_y$  (Figura 5.16). Conceptos tomados de: ARBOLEDA VALENCIA, Jorge (2000).

En el caso general, la fórmula para desarenadores de placas inclinadas es:

$$V_{sc} = \frac{Sc * V_0}{\text{Sen } \phi + L * \text{Cos } \phi}$$

Donde:

$V_{sc}$  : Velocidad de caída de la partícula suspendida

$Sc$  : Factor de sedimentación según el dispositivo o elemento inclinado

Para placas planas :  $Sc = 1$

Para tubos de sección circular :  $Sc = 1.33$

Para tubos de sección cuadrada :  $Sc = 1,375$ .

$V_0$  : Velocidad promedio de flujo a través de la placa; se obtiene dividiendo el flujo ( $Q$ ) que entra al decantador por su área horizontal  $A_h$  que hay que proyectar perpendicularmente a las placas

$F$  : Ángulo de inclinación de las placas o tubos

$L$  : Longitud de la placa

Los parámetros de diseño recomendados para el diseño de desarenadores de placas inclinadas son:

- La velocidad de paso del agua a través de las placas " $V_0$ " es igual a la velocidad de flujo promedio a través de las mismas.

$$0.14 \text{ cm/s} < V_0 < 0.34 \text{ cm/s}$$

$$121 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día} < V_0 < 294 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$$

- La carga superficial en el desarenador deberá estar entre el siguiente rango de datos:

$$120 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día} < CS < 185 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$$

- El ángulo óptimo de las placas en el desarenador para efectos de limpieza es de 60°
- La longitud relativa óptima “L” es:

$$L' = \frac{L}{e} \quad L'_{\text{ópt}} = 24$$

$$e = 5 \text{ cm}$$

- El flujo del agua entre las placas debe cumplir con las condiciones de flujo laminar, preferiblemente con:

$$Re < 250$$

- La carga superficial equivalente resultante ( $V_{sc}$ ) deberá estar entre:

$$14 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día} < V_{sc} < 22 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$$

### Ejemplo 5.6 Diseño de un desarenador de placas inclinadas

Se diseña un desarenador de placas inclinadas para mejorar la calidad del agua destinada a la producción de salmónidos mediante la remoción de sólidos sedimentables.

Los datos de inicio son: Caudal de diseño del desarenador, diámetro, velocidad media del flujo y cotas en la tubería de aducción, cotas en la cajilla de derivación y en la zona de entrada al desarenador, caudal captado en condiciones máximas, diámetro de las partículas a remover, dimensión de placas, temperatura media del agua.

Se determina la viscosidad cinemática del agua, la velocidad de sedimentación de las partículas y a partir de ella se chequea el número de Reynolds, longitud relativa y velocidad de caída de partículas suspendidas, se consideran los parámetros de diseño recomendados por las RAS, se diseña la zona de placas: largo, ancho, profundidad y número de placas. Se diseña la zona debajo de las placas buscando que la velocidad de transporte del agua bajo las placas no sea mayor que la velocidad de arrastre de las partículas, para evitar que éstas sean resuspendidas o incrementen la turbiedad de entrada al desarenador. Se diseña una canaleta de entrada de sección transversal rectangular decreciente con orificios laterales de diámetros constantes y se adopta una altura de 0.75 metros que disipará turbulencias causadas por la salida del agua por los orificios.

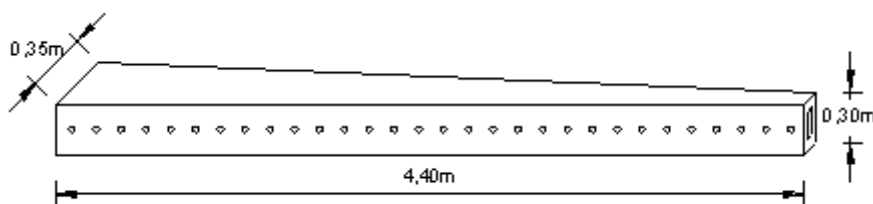


Figura 23. Detalle del canal de entrada y sus orificios

Para el diseño de la cámara de rebose y aquietamiento se procede de manera similar al diseño de desarenadores convencionales, se calcula su respectivo desagüe. Para el paso del agua entre la cámara de rebose y aquietamiento y la zona de aforo se recurre a orificios sumergidos con una velocidad de 0.20 m/s.

Una vez calculada la pérdida de carga por el flujo del agua a través de los orificios se diseña la zona de aforo que dispondrá de un vertedero triangular por medio del cual se espera controlar el caudal que ingresa al sistema como parte del monitoreo regular del mismo.

La zona de salida se diseña mediante dos canaletas de sección rectangular ubicadas en el mismo sentido de las placas provistas de vertederos que entregan el agua en el canal.



Debido a la dificultad de nivelación de un vertedero en la canaleta, se diseñan orificios rectangulares y se asume una altura del agua en los orificios de 3 centímetros.

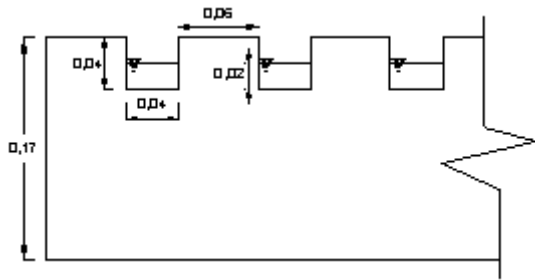


Figura 24. Detalle de la canaleta y los vertederos

Un canal de sección rectangular recoge el agua proveniente de las dos canaletas de la zona de salida y de él se transporta el agua hacia la red ramificada o resto del tratamiento saliendo por medio de una tubería de fondo ubicada en su parte media.

El volumen de lodos es aproximadamente el 15% del volumen total del tanque. Se procede a determinar el volumen útil del desarenador:

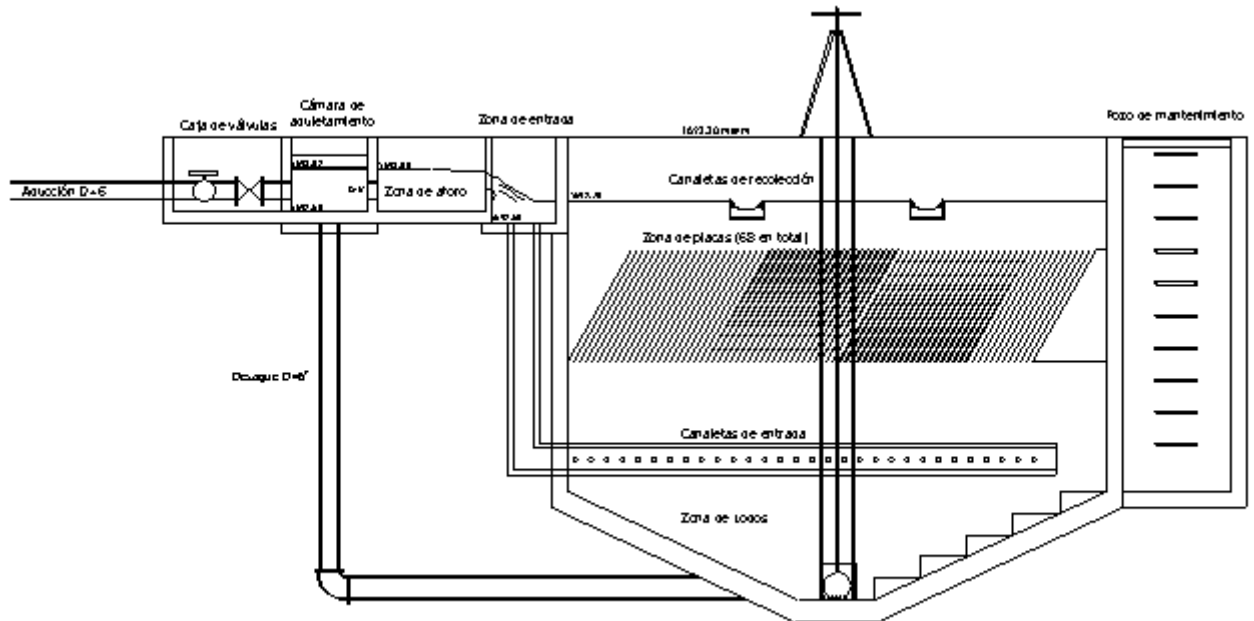


Figura 25. Corte lateral del desarenador de placas

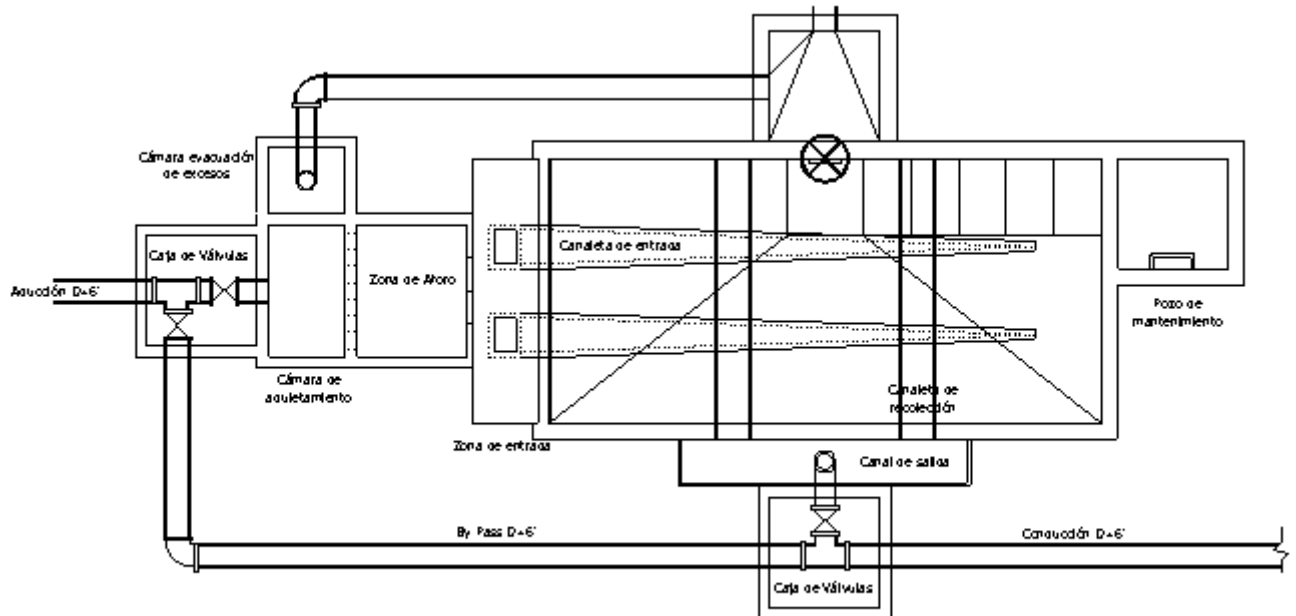


Figura 26. Vista en planta del desarenador de placas

## 2) CONDUCCIÓN DEL AGUA

Las líneas de conducción de agua son los conductos destinados a transportar por gravedad o por bombeo las aguas crudas desde los sitios de captación hasta el desarenador o hasta el reservorio, los tanques de almacenamiento, la red de distribución o directamente a un estanque.

La conducción del agua puede ser:

- Por Esguerrimiento Libre, que a su vez puede ser mediante
  - Canales abiertos
  - Conductos cerrados sometidos a la presión atmosférica
  - Conductos cerrados a presión, cuyo funcionamiento puede ser mediante
    - Sistemas por gravedad
    - Sistemas mediante bombeo
    - Sistemas mixtos, con tramos a flujo libre y tramos trabajando a presión

El establecimiento del tipo de transporte del agua dependerá del tipo de terreno y de un estudio económico de las alternativas.

### 6.1 Sistemas por Esguerrimiento Libre

En estos sistemas el agua tiene una superficie libre sobre la cual actúa la presión atmosférica. Para conducciones el sistema hidráulico podrá proyectarse como conducto cerrado o canal abierto.

#### 6.1.1 Ecuación de Manning

Debe justificarse el método de cálculo para la sección transversal de los canales. Se recomienda fundamentalmente el uso de la ecuación de Manning.

$$A * R_H^{2/3} = \frac{n * Q}{S^{1/2}}$$

$$V = \frac{1}{n} * R_H^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

$R_H$  : Radio hidráulico (m)

$S$  : Pendiente (m/m), que corresponde a la línea piezométrica

$V$  : Velocidad media (m/s)

$n$  : Coeficiente de rugosidad que depende del material del conducto (adimensional)

Para determinar si el flujo que experimenta el conducto es subcrítico, crítico o supercrítico, se recurre al número de Froude que se calcula así (MOTT, Robert L (1996)):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * Y_m}}$$

Donde:

$V$  : Velocidad media del flujo a través de la sección en estudio

$g$  : Aceleración gravitacional = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$Y_m$  : Profundidad media del agua en una sección de área "A" y ancho superficial "B";

donde:

$$Y_m = \frac{A}{B}$$

Es preciso recordar que si los canales se construyen sin revestimiento sobre materiales permeables, la capacidad del mismo deberá aumentarse para suplir las pérdidas por infiltración.

### 6.1.2 Velocidades y Pendientes Mínima y Máxima

La velocidad mínima permisible estará determinada por el menor valor que evite la sedimentación de las partículas pequeñas suspendidas como arenas, barro, limos. La velocidad máxima dependerá del riesgo de erosión que el fondo y paredes del canal puedan sufrir, la cual está relacionada con el esfuerzo cortante crítico de arrastre.

### 6.1.3 Taludes Laterales

La inclinación de los taludes de la sección transversal de un canal sin revestimiento, abierto en terreno natural, no puede ser superior al ángulo del talud natural del terreno y debe ser más suave en terraplenes que en cortes. Se recomienda algunos límites establecidos por las normas RAS.

### 6.1.4 Borde Libre

Se refiere a la distancia entre el nivel de las aguas cuando el canal transporta el caudal de diseño y la parte superior del canal o corona. Su función es evitar el desbordamiento ya sea por oleaje debido al viento, saltos hidráulicos, sobreelevaciones en curvas, ya sea por acumulación de sedimentos en el canal o la no operación del sistema de canales de manera ocasional.

### 6.1.5 Características Geométricas e Hidráulicas de Secciones Transversales

Se listan las características geométricas de las secciones transversales más comunes por su utilidad para efectos de diseño o chequeo, resaltando que para conductos circulares a flujo libre la condición de velocidad máxima se presenta para cuando el tirante al interior del tubo equivale al 81% del diámetro nominal interno y la condición de máximo caudal no se presenta para conducto lleno sino cuando el tirante equivale al 95% del diámetro nominal interno.

Se ejemplifica el análisis de un canal rectangular para la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*), y de un canal trapezoidal para cultivo de tilapia plateada (*Oreochromis niloticus*). Partiendo de un caudal de diseño, material del fondo y paredes, la longitud a cubrir y la diferencia de nivel disponible. Se procede a su dimensionamiento mediante aproximaciones sucesivas, la determinación del borde libre recomendable y la verificación de la velocidad para garantizar que se encuentra bajo los niveles admisibles y se calcula el número de Froude para verificar el tipo de flujo experimentado y su estabilidad.

Se desarrolla paso a paso el mecanismo de chequeo de un conducto circular a flujo libre partiendo de un material de conducto específico y una pendiente definida. Se determina el mayor caudal que puede fluir a través de la sección, se calculan los parámetros geométricos: perímetro mojado, radio hidráulico, y el tirante o altura del fluido en el tubo.

Se ejemplifica el proceso de diseño (determinación del diámetro comercial más económico) para un conducto circular a flujo libre; se parte de los datos de material del conducto disponible, el caudal a transportar y la pendiente, se calcula los parámetros geométricos que regirán al conducto para las condiciones dadas.

## 6.2 Conductos a Presión

En este tipo de sistema el agua ocupa todo el interior del conducto estando sometida a una presión superior a la atmosférica.

### 6.2.1 Cálculo Hidráulico

En todos los casos debe efectuarse el estudio hidráulico del flujo a través de la tubería con el fin de determinar si ellas trabajan a presión o como canales (a superficie libre), lo cual dependerá de las características topográficas de la zona y del diámetro del conducto.

### 6.2.2 Ecuación Universal para conductos a presión

El cálculo de la pérdida de cabezas debido a la fricción en una tubería o conducto cilíndrico largo, con un interior de diámetro continuo, debe hallarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach como se expresa en la ecuación 6.7

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

Para la aplicación de la ecuación universal para conductos a presión deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

#### 1. Número de Reynolds

En primer lugar se aborda la influencia relativa de la viscosidad, la que puede evaluarse mediante el número de Reynolds, que identifica cualquier condición de escurrimiento de fluidos, ya que en cierta forma cuantifica la relación existente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad que actúan sobre las partículas en movimiento.

La expresión que define el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{V * d}{\nu}$$

Donde:

V : Velocidad media de flujo en la tubería (m/s)

d : Diámetro del conducto (m)

$\nu$  : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

## 2. Formas de escurrimiento

Para la determinación de los valores de f es necesario considerar las distintas modalidades del movimiento de un fluido por un conducto, escurrimiento que puede ser laminar, turbulento o de transición.

### Escurrimiento laminar

Para  $Re < 2320$  el coeficiente de rozamiento es independiente de la rugosidad y vale:

$$f = \frac{64}{Re}$$

### Escurrimiento turbulento

El régimen turbulento presenta tres posibilidades:

*Hidráulicamente liso.* El núcleo de la corriente es turbulento pero hay una capa laminar, cuyo espesor es inversamente proporcional al número de Reynolds y que recubre todas las irregularidades de la pared. El valor de f solo depende en este caso de Re y su expresión, que prescinde de la rugosidad "k", es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 * \log \frac{Re * \sqrt{f}}{2.51}$$

Hidráulicamente rugoso. También llamado de turbulencia plena y que está caracterizado por que las irregularidades del material emergen de la capa laminar. El coeficiente de fricción f está en función de k/d:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 * \log \frac{3.71 * d}{k}$$

### Escurrimiento de transición

Es un régimen en el que la resistencia es mixta y para el cual f es a la vez función de Re y de k/d. Colebrook y White han propuesto como expresión de las curvas obtenidas experimentalmente la fórmula siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} + \frac{k}{3.71 * d} \right)$$

Esta igualdad llamada fórmula de Prandtl - Colebrook resulta válida tanto para la zona de transición como para las zonas hidráulicamente lisas y rugosas. Su representación gráfica se da en el "Diagrama Universal". La hidrodinámica ha posibilitado la confección de los gráficos de Moody y Rouse.

Usos del diagrama de Rouse

El libro ejemplifica el uso del diagrama de Rouse para diversos propósitos así:

- Determinación o cálculo de la pérdida de carga
- Cálculo del caudal que circula por una tubería (problema de verificación)
- Determinación del diámetro necesario para ciertas condiciones dadas (problema de diseño)

### 6.2.3 Ecuación de Hazen - Williams

La expresión a utilizar es:

$$V = 0.3547 * C * d^{0.63} * j^{0.54}$$

V : Velocidad media (m/s)

C : Coeficiente de rugosidad de Hazen, en función del material de la tubería

d : Diámetro del conducto (m)

j : Pérdida de carga unitaria (m/m)

$$hf = \frac{10.643 * Q^{1.85} * L}{C^{1.85} * d^{4.87}}$$

Se cita los valores más comunes de coeficientes C de Hazen en función del material del conducto. Y se citan los límites establecidos claramente por los investigadores originales para el uso de la expresión:

- El fluido debe ser agua a temperatura normal
- El diámetro debe ser superior o igual a 2 pulgadas.
- La velocidad en las tuberías se debe limitar a máximo 3 m/s.

### 6.2.4 Ecuación para el cálculo de las pérdidas locales

Para el cálculo de las pérdidas locales o menores producidas en curvas, tees, válvulas y otros accesorios debe utilizarse la ecuación:

$$hl = K * \frac{V^2}{2 * g}$$

Se presentan algunos coeficientes de pérdidas menores para accesorios típicos de conductos a presión y se relacionan las recomendaciones formuladas por las normas RAS para diámetros mínimos en tuberías a presión o a flujo libre y los valores de velocidades mínima (0.6 m/s) y máxima (6.0 m/s) recomendables. Se detallan aspectos importantes dentro de la estipulación de pendientes mínimas para tuberías a presión y los requisitos en cuanto a profundidad de instalación de las mismas.

### 6.2.5 Líneas de carga. Funcionamiento de las tuberías.

Se detallan los aspectos relevantes a considerar respecto a las líneas de carga y piezométrica para estimar la eficiencia en el funcionamiento de las tuberías con base en su posición respecto a la línea de carga.

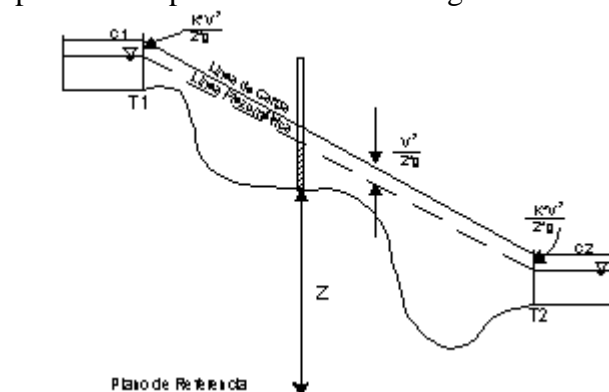


Figura 27. Líneas de carga y piezométrica en conductos a presión

Se resalta las propiedades, ventajas y desventajas de los diversos tipos de tuberías, particularizando en aspectos como la resistencia contra la corrosión y la agresividad del suelo, tipo de uniones y necesidad de anclaje, resistencia a los esfuerzos mecánicos producidos por las cargas, tanto internas como externas, presiones de trabajo máximas y mínimas, economía condiciones de transporte e instalación, resistencia contra la incrustación y la vida útil.

#### 6.2.6 Accesorios y estructuras complementarias para conductos a presión

Se desarrolla la temática pertinente a algunos accesorios de importancia en el diseño y puesta en funcionamiento de tuberías a presión, tales como:

- Válvulas de corte al inicio y/o final de las tuberías
- Válvulas de ventosa
- Válvulas de purga
- Válvulas de protección contra golpe de ariete
- Válvulas de cheque
- Cámaras de quiebre de presiones
- Viaductos
- Anclajes

Anclajes. En el libro se desarrolla el cálculo pertinente para determinar la fuerza de empuje ejercida sobre un codo de 90° de 8", si la presión en el sistema es de 75 lb/pg<sup>2</sup>, considerando que el anclaje se realizará sobre un suelo arenoso se determina el área de contacto necesaria para contrarrestar tal efecto.

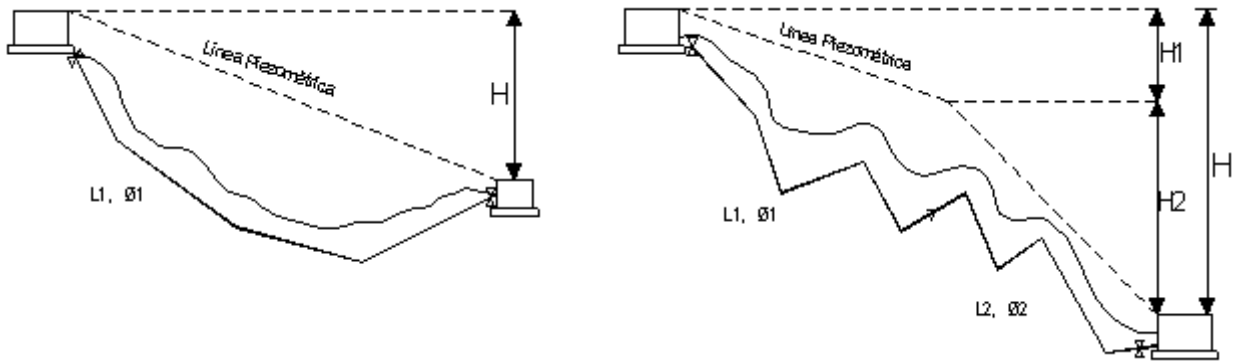
Golpe de ariete. Se produce cuando el flujo es detenido rápidamente, por ejemplo al cerrar una válvula o por el paso cuando deja de funcionar una bomba (válvula cheque) en una conducción. Al diseñar una tubería se debe tener en cuenta que la presión a que trabaja (si se utilizan válvulas en conducción) no sea mayor que la admisible de la misma; por tanto es necesario tener en cuenta la sobrepresión producida por el golpe de ariete. Se detalla los mecanismos de cálculo de la fase o período de una tubería que consiste en el tiempo que la onda de sobrepresión va y vuelve de una extremidad a otra de la tubería.

#### 6.3 Criterios para el Diseño

Para el diseño de una línea de conducción por gravedad deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

##### **Carga disponible o diferencia de elevación.**

Los diseños se pueden considerar para diámetros uniformes o diámetros variables, teniendo en cuenta la carga disponible y las pérdidas de carga tanto por fricción como por accesorios puede ser preciso realizar combinaciones de diámetros, así se logra aprovechar la energía con una combinación de diámetros (F1 y F2) cuya suma de pérdidas de carga sea menor o igual a la pérdida de carga disponible, lográndose de esta manera el diseño más económico.



**Figura 28. Conducción con diámetro uniforme y con diámetros variables**

### 6.3.1 Clases de tuberías y su presión de servicio

Las clases de tubería a seleccionar estarán definidas por las máximas presiones que ocurran en la línea de conducción del agua. En el caso de existir en la conducción válvulas que se cierran rápidamente deberá tenerse en cuenta la diferencia de niveles estáticos más la sobrepresión que produce el golpe de ariete. Cuando en la conducción no existan válvulas ni impedimento alguno, las máximas presiones estarán representadas por la diferencia entre la línea piezométrica y el centro de la tubería.

Se desarrollan ejercicios en los que se determinan los valores de la sobrepresión máxima en tramos de tubería y el valor de presión total de diseño y se diseñan conducciones de agua por el método analítico para:

#### **Determinación o cálculo de la pérdida de carga**

$$h_f = \frac{10.643 * Q^{1.85} * L}{C^{1.85} * D^{4.87}}$$

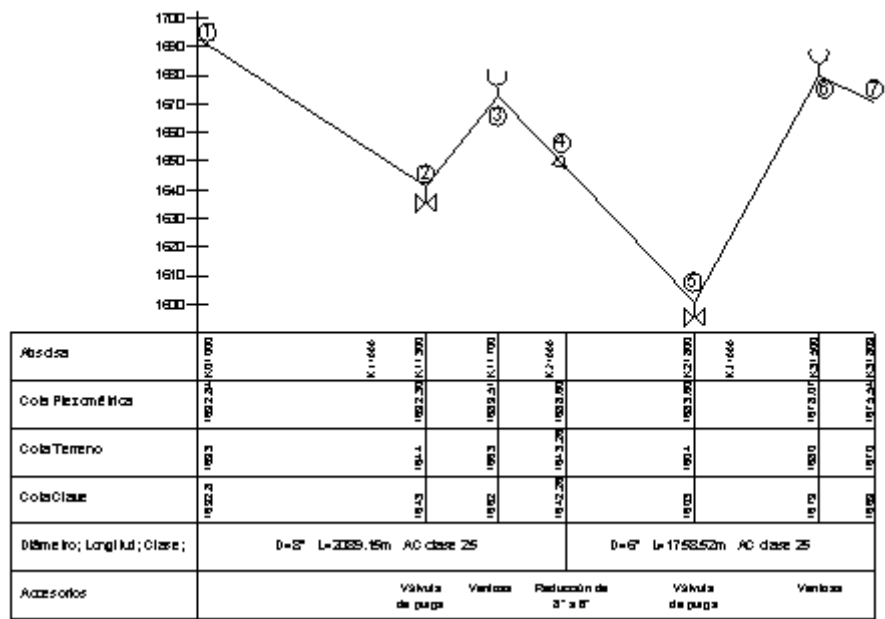
#### **Cálculo del caudal que circula por una tubería (problema de verificación)**

$$Q = \left( \frac{C^{1.85} * D^{4.87} * h_f}{10.643 * L} \right)^{1/1.85}$$

#### **Determinación del diámetro necesario para ciertas condiciones dadas (problema de diseño)**

$$D = \left( \frac{10.643 * Q^{1.85} * L}{C^{1.85} * h_f} \right)^{1/4.87}$$





**Figura 29. Perfil diseño de un sistema a presión CONCLUSIONES - ALCANCES**

En Colombia, país de altísima riqueza hídrica y un muy elevado potencial de producción de especies ícticas la calidad y cantidad adecuada del agua son elementos determinantes en el éxito de la producción de especies hidrobiológicas.

La necesidad de disponer de un material de consulta y que funcione como guía para el correcto diseño de la infraestructura hidráulica básica Los requerimientos de estos aspectos varían de manera muy amplia según la especie a producir, el tipo de acuicultura y el tipo de cultivo

- La estimación del caudal, aspecto de vital importancia para el adecuado dimensionamiento hidráulico del proyecto. Para ello describe los criterios biológicos y productivos según el tipo de acuicultura y las prácticas de cultivo así como las necesidades específicas de recambio para especies tales como tilapia roja (*Oreochromis spp.*); trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y cachama blanca (*Piaractus brachipomus*). También se realiza una descripción de los criterios hidrológicos para la determinación del caudal de diseño en función de las pérdidas de agua por evaporación (por medición directa; mediante datos de tanques evaporímetros y a partir de un gran número de parámetros hidroclimatológicos por el método de Penman); las pérdidas de agua por infiltración y las entradas por precipitación. Igualmente se involucra un criterio relativo a la operación del sistema: el tiempo de llenado de los estanques o unidades de cultivo.
- El diseño hidráulico de la captación o bocatoma, elemento que se constituye en el corazón del proyecto acuícola por ser el garante de la cantidad de agua necesaria para la producción de las especies hidrobiológicas de cultivo. En este capítulo se presenta una descripción de los tipos de captaciones superficiales más comúnmente utilizadas y se desarrolla de manera especial lo relativo a las captaciones tipo dique-toma y las captaciones laterales tanto parcial como totalmente sumergidas.
- El diseño de desarenadores, como unidades cruciales para mejoramiento de la calidad del agua “cruda”. Se presenta los fundamentos básicos de la teoría de la

sedimentación, la capacidad hidráulica, las consideraciones y parámetros de diseño de los desarenadores y se profundiza en el diseño específico de desarenadores convencionales y desarenadores de placas inclinadas (o de alta tasa).

- La conducción del agua. Mediante la descripción de los métodos más comunes de diseño y chequeo de sistemas de conducción a flujo libre (expresión de Manning), las características geométricas e hidráulicas de diversos tipos de canales, materiales, velocidades y pendientes máximas y mínimas y borde libre; y el diseño de sistemas de tuberías a presión por medio de las expresiones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach, los materiales en tuberías y las velocidades máximas y mínimas recomendadas, los criterios de diseño accesorios y consideraciones especiales para el diseño de conducciones como la sobrepresión debida al golpe de ariete.

Merece resaltar que cada capítulo del libro argumenta los aspectos teóricos con mucha suficiencia y describe de forma clara los pasos y parámetros requeridos para el diseño. Como respaldo a ello desarrolla ejemplos de cálculo paso a paso que ilustran al lector de manera detallada los procedimientos a seguir en el diseño de los sistemas de captación, desarenado y transporte del agua para acuicultura continental de aguas frías, medias y cálidas, especialmente en las etapas de levante y ceiba.

El presente texto será el soporte fundamental para ofrecer la asignatura “Diseño y Construcción de Instalaciones Acuícolas I” de sexto semestre del actual Plan de Estudios del Programa Ingeniería en Producción Acuícola, programa único en su género y líder en el país con pertinencia social y pertenencia académica.

## NUEVOS RETOS

Niveles de turbiedad o tamaño de partículas que afectan significativamente la salud de cada especie bien sea por actuar sobre las branquias

Investigaciones sobre la eficiencia de los sistemas de sedimentación o remoción de sólidos en flujo a presión

Continuar con el desarrollo de otros mecanismos de represamiento, almacenamiento y captación de agua alternativos a las estructuras de concreto tales como los muros mixtos con bambú o guadúa con relleno de material cohesivo, el uso de tecnologías como los “bolsacretos” desarrollados específicamente por algunas casa comerciales

Investigar en la ecohidráulica

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APARICIO, M. F. 1992. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México. Editorial Limusa, 350 p.

BLANCO CACHAFEIRO, M. Carmen. 1995. La trucha – Cría industrial. Ediciones Mundi – Prensa. España. 503 p.

CORCHO ROMERO, Freddy Hernán – DUQUE SERNA, José Ignacio. 1993. Acueductos, Teoría y Diseño. Universidad de Medellín, Centro General de Investigaciones. 591 p.

FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2004. Roma: FAO, 2004.

Food And Agriculture Organisation - FAO. Inland Aquaculture Engineering. Lectures presented at the Aquaculture Development and Coordination Programme. Roma: FAO, 1984

- GIJZEN, Huub, GALVIS, Gerardo. The World Water Vision. In: Conferencia Internacional AGUA 2000. Cinara 2003, p 13 – 24.
- GRANT, William et al. 2001. Ecología y manejo de recursos naturales: Análisis de sistemas y simulación. Editorial Agroamérica. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (IICA). Costa Rica. 340 p.
- INDERENA - Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Estación Piscícola de Repelón. MINISTERIO DE AGRICULTURA. 1992. La Cachama – Ensayos sobre nutrición y cultivo. Acuagranja Limitada. 56 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESCA Y ACUICULTURA: INPA. 2001. Fundamentos de Acuicultura Continental. Fundamentos No. 1 Segunda Edición. República de Colombia. 423 p.
- KÖVÁRI, J. Considerations in the selection of sites for Aquaculture. en: Inland Aquaculture Engineering. Lectures presented at the Aquaculture Development and Coordination Programme. Roma: FAO, 1984, p iii.
- LINSLEY, Ray K. – KOHLER, Max A. – PAULUS, Joseph L. 1977. Hidrología Para Ingenieros. Segunda Edición. Editorial Mc Graw Hill Interamericana. 386 p.
- LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. 1995. Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 388 p.
- MATERÓN MUÑOZ, Hernán. 1991. Obras Hidráulicas Rurales. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica de Fluidos y Ciencias Térmicas. Cuarta edición.
- MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. RESOLUCIÓN 1096 DEL 17 DE NOVIEMBRE DE 2.000 - Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. República de Colombia.
- MONSALVE SÁENZ, Germán. 1999. Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Segunda edición. Santafé de Bogotá, Colombia. 383 p.
- MOTT, Robert L. 1996. Mecánica de Fluidos Aplicada. Cuarta Edición. Editorial Pearson Educación. 582 p. OJEDA, Adolfo León. 1992. Hidráulica, conductos con flujo a presión. Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica. Popayán, Colombia. 136 p.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Colección FAO: Capacitación. 1981. Métodos sencillos para la acuicultura – Agua para la piscicultura de agua dulce. Italia. 111 p.
- PILLAY, T. V. R. en: Inland Aquaculture Engineering. Lectures presented at the Aquaculture Development and Coordination Programme. Roma: FAO, 1984, p iii.
- RAMOS HENAO, Alonso. 1988. Piscicultura rural: Tilapia – Cachama. Universidad de Caldas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Centro de Investigación Piscícola. Manizales, Colombia.
- SILVA, G. M. 1985. Hidrología Básica. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 139 p.
- SIPAÚBA-TAVARES, Lúcia Helena. Qualidade da Água em Aqüicultura. en: Revista electrónica Memorias I Seminario Internacional de Producción Acuícola. Universidad de Nariño – Colombia. 2004
- TIMMONS M. B. et al. Sistemas de Recirculación para la acuicultura. Fundación Chile. 2002. 747 p.
- TRATADO DE COOPERACIÓN AMAZÓNICA – SECRETARIA PRO TEMPORE. Piscicultura Amazónica con Especies Nativas. Lima Perú. En: [www.fao.org/ag/aGL/agll/rla128/IIAP/iap1/TEXT0.htm](http://www.fao.org/ag/aGL/agll/rla128/IIAP/iap1/TEXT0.htm)
- WEATHON, Frederick W. 1993. Acuicultura, Diseño y Construcción de Sistemas. A. G. T. Editor S. A. México. 704 p.

