



COMISION NACIONAL
DEL AGUA



Diseño de aforadores de garganta larga

Poliopro Martínez Austria
Jorge Castillo González

Diseño de aforadores de garganta larga

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS

COMISION NACIONAL DEL AGUA

Diseño de aforadores de garganta larga

IMTA 
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos

SUBDIRECCION GENERAL DE
INFRAESTRUCTURA HIDROAGRICOLA
Gerencia de Distritos de Riego

Poliopro Martínez Austria
Jorge Castillo González

Diseño y Producción
Subcoordinación Editorial, IMTA

Título
Diseño de aforadores de garganta larga

Colección Proyectos IMTA

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1992
Primera edición
Reservados todos los derechos
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos
Tel. 19 39 57 19 40 00 ext. 122
Fax (73) 19 39 46
Hecho en México
Made in Mexico

RESUMEN EJECUTIVO

La medición del agua de riego en los sistemas de distribución y en parcelas es indispensable por varias razones: permite controlar adecuadamente la red de canales, hace posible brindar a los usuarios el agua requerida por los cultivos en la cantidad necesaria, sin déficit ni exceso, y se requiere para poner en práctica cualquier programa de uso eficiente del agua.

Existen diversos tipos de estructuras que pueden usarse para el aforo: vertedores de pared delgada, aforadores Parshall y compuertas, entre otras. Un tipo de aforadores que han resultado muy útiles en sistemas de riego son los de garganta larga. Se trata de estructuras de sencilla geometría, de amplio campo de aplicación, de buen funcionamiento hidráulico, que provocan pocas pérdidas de energía y que pueden ser calibradas con gran precisión analíticamente. Se les puede adicionar con facilidad un totalizador electrónico de volumen.

El cálculo de curvas de calibración de aforadores de garganta larga puede resultar, sin embargo, difícil y tardado si no se cuenta con herramienta computacional de apoyo. El diseño, de tipo iterativo como es usual, sería aún más complicado sin esta ayuda. Para subsanar la dificultad, se elaboró el presente "Manual de diseño de aforadores de garganta larga".

Incluye un programa de diseño, altamente interactivo, que permite no sólo el cálculo de curvas de calibración, sino también definir el efecto del aforador hacia aguas arriba en el canal y los límites de tirantes para su buen funcionamiento, entre otras ventajas.

El programa ha sido cuidadosamente validado con estructuras de aforo construidas en laboratorio y en campo. No obstante, sólo pretende ser una ayuda para los diseñadores de estructuras de aforo, pero de ninguna manera puede sustituir su experiencia y criterio como ingenieros. Así, los resultados deben ponderarse e interpretarse, antes de que se les acepte como definitivos.

En el manual se hace énfasis en los fundamentos del funcionamiento hidráulico de los aforadores de garganta larga; se muestran criterios y recomendaciones de diseño, reglas de operación del programa y ejemplos de aplicación. Con ello, se obtiene un panorama integral para proceder al empleo, en la práctica, de tales aforadores.

INDICE

1 ANTECEDENTES	1
1.1 <i>Medición del agua de riego</i>	1
1.2 <i>El aforador de garganta larga</i>	2
2 DESCRIPCION	5
2.1 <i>Geometría</i>	5
2.2 <i>Operación hidráulica</i>	9
3 FUNCIONAMIENTO	13
3.1 <i>Rango de operación</i>	13
3.2 <i>Calibración analítica</i>	19
3.3 <i>Medición del tirante</i>	22
3.3.1 <i>Escalas limnimétricas</i>	23
3.3.2 <i>Limnígrafos</i>	24
3.3.3 <i>Totalizador volumétrico</i>	24
4 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO CON AUXILIO DEL PROGRAMA	25
4.1 <i>Descripción del programa</i>	25
4.2 <i>Recomendaciones</i>	30
4.3 <i>Ejemplo</i>	32
BIBLIOGRAFIA	41

INDICE DE LAMINAS

1	Geometría transversal de los aforadores	5
2.a.	Aforador con garganta trapezoidal	6
2.b.	Aforador con garganta rectangular	6
3	Foto 1	7
4	Foto 2	8
5	Representación del perfil hidráulico	11
6	Coefficiente de pérdida de energía	16
7	Alternativas de terminación en la rampa de salida	17
8	Ubicación del punto de medición del tirante	18
9	Pantalla de captura del programa de diseño	25
10	Croquis del aforador	28
11	Curva de calibración	29
12	Pantalla de captura del ejemplo (1)	33
13	Pantalla de captura del ejemplo (2)	34
14	Tabla de calibración del ejemplo (1)	34
15	Representación del remanso en ejemplo (1)	36
16	Tabla de calibración del ejemplo (2)	36
17	Pantalla de captura del ejemplo (3)	37
18	Representación del remanso en ejemplo (2)	38
19	Curva de calibración del ejemplo	39

1 ANTECEDENTES

1.1 *Medición del agua de riego*

Para alcanzar un buen manejo del agua (Bos; Replogle y Clemmens, 1986) es necesario medir con exactitud el gasto en las derivaciones de cada canal, así como en las tomas granja, de modo que el agua disponible pueda suministrarse a donde se solicita en la medida que se requiere, evitando su distribución incorrecta y su desperdicio.

En la mayoría de las zonas de riego se mide el agua en los sitios más importantes de las redes de distribución, pero se carece de estructuras aforadoras en la entrega a las parcelas y en los volúmenes de drenaje. Ello provoca también una falta de información respecto a los volúmenes totales aprovechados en las zonas de riego, lo cual dificulta la administración y el uso eficiente.

La medición es una actividad de gran importancia para administrar con eficiencia un distrito de riego, que influye decisivamente en el buen manejo del recurso hidráulico. Sin embargo, existen un gran número de problemas que han hecho el aforo costoso, de dudosa precisión y difícil de aplicar en el campo.

Algunos de los problemas más comunes para medir el caudal están en la dificultad de colocar o construir estructuras medidoras confiables, de fácil manejo y calibración sencilla. En otros casos existe la necesidad de acondicionar el canal donde serán colocadas, con los consecuentes costos adicionales.

Hay aforadores que pueden calibrarse analíticamente, lo que requiere, no obstante, de una cantidad considerable de cálculos, ya que se usan métodos numéricos que suponen dificultad y numerosas iteraciones en cada alternativa de gasto a calcular.

La realización de los cálculos necesarios puede ser sistematizada y automatizada por medio de un programa de computadora diseñado para tal fin. Este es el objeto del presente trabajo, en el cual se pretende presentar un programa que auxilia al diseñador de estructuras aforadoras de garganta larga. El programa es fácil de usar y requiere un mínimo de entrenamiento.

El aforador de garganta larga, diseñado previamente con el programa, se complementa con un dispositivo totalizador electrónico que mide el caudal instantáneo y, a su vez, integra la curva gasto *versus* tiempo para totalizar el volumen, utilizando para ello la curva de calibración calculada.

Los métodos por los que se mide el caudal de los canales de riego se pueden dividir en dos. Los de sección-velocidad, en los que el gasto se obtiene midiendo la velocidad con diversos dispositivos (flotadores, tubos venturi, etc.) y en los que se usa la ecuación de

continuidad, dado que en la sección de aforo es conocida el área hidráulica. Y aquellos en los que el gasto se relaciona con una variable del flujo, la cual se mide en forma directa. Comúnmente se trata del tirante en una sección o una diferencia de tirantes.

Los métodos de sección-velocidad presentan la desventaja de que su aplicación requiere con frecuencia realizar muchas medidas, por lo que son costosos y complicados. También necesitan de secciones especiales. Ello ocasiona que se utilicen para calibración.

Los de medición directa generalmente son más sencillos y de menor costo. Entre éstos se cuentan: vertedores, orificios, compuertas (que son un tipo de orificio) y aforadores Parshall.

Desde finales de los años sesenta y principios de los setenta se han desarrollado aforadores que basan su funcionamiento hidráulico en la presencia de una sección crítica y que han demostrado ser sencillos en su manejo y de baja pérdida de carga. Dichas estructuras se pueden agrupar en tres tipos principales: de garganta larga, de garganta corta o sin garganta (o de garganta suprimida). Un caso particular de los aforadores de garganta larga son los vertedores de cresta ancha, dado que funcionan igual hidráulicamente.

Los aforadores de garganta corta o suprimida, por su funcionamiento hidráulico, generalmente tienen la necesidad de ajustarse a rangos de gasto y características geométricas predeterminadas y calibradas en laboratorio, o bien han de calibrarse *in situ*. Un ejemplo muy conocido es el caso de los aforadores Parshall.

Los de garganta larga tienen la ventaja de que se pueden calibrar en forma analítica, sin necesidad de la costosa y difícil calibración en campo o laboratorio.

1.2 El aforador de garganta larga

Cuenta con la ventaja de la factibilidad de su calibración analítica, por lo que no requiere de calibración en laboratorio o *in situ*, lo cual brinda también la posibilidad de hacer correcciones posteriores a la construcción de la estructura, lo que es útil en caso de sufrir alguna modificación al ser instalado.

Bos, Replogle y Clemmens (1986) mencionan las siguientes ventajas de los aforadores de garganta larga respecto a otros y en particular a los aforadores sin garganta o de garganta corta:

- Si el régimen crítico se presenta en la garganta, es posible calcular una tabla de calibración con un error no mayor de 2% para cualquier combinación de garganta y canal de llegada prismático.

- La sección de la garganta puede diseñarse de tal manera que permita medir con exactitud el rango completo de caudales esperados.
- La pérdida de energía es mínima y le corresponde una relación única entre la carga hidráulica aguas arriba, medida respecto a la base de la garganta, y el gasto.
- La pérdida de energía puede estimarse con gran exactitud sobre cualquier canal.
- Se tienen pocos problemas con materiales flotantes, debido a que la transición de entrada es gradual y convergente.
- Se ha observado en campo que tales aforadores pueden diseñarse para que los sedimentos transportados pasen por un canal de régimen subcrítico.
- Resulta posible calcular una tabla de calibración una vez construida la estructura, para ajustar las dimensiones reales de la obra; y, de ser necesario, se puede variar la forma de la garganta.
- En condiciones hidráulicas y del entorno similares estos aforadores resultan, en la mayoría de los casos, los más baratos en construcción para aforos exactos.

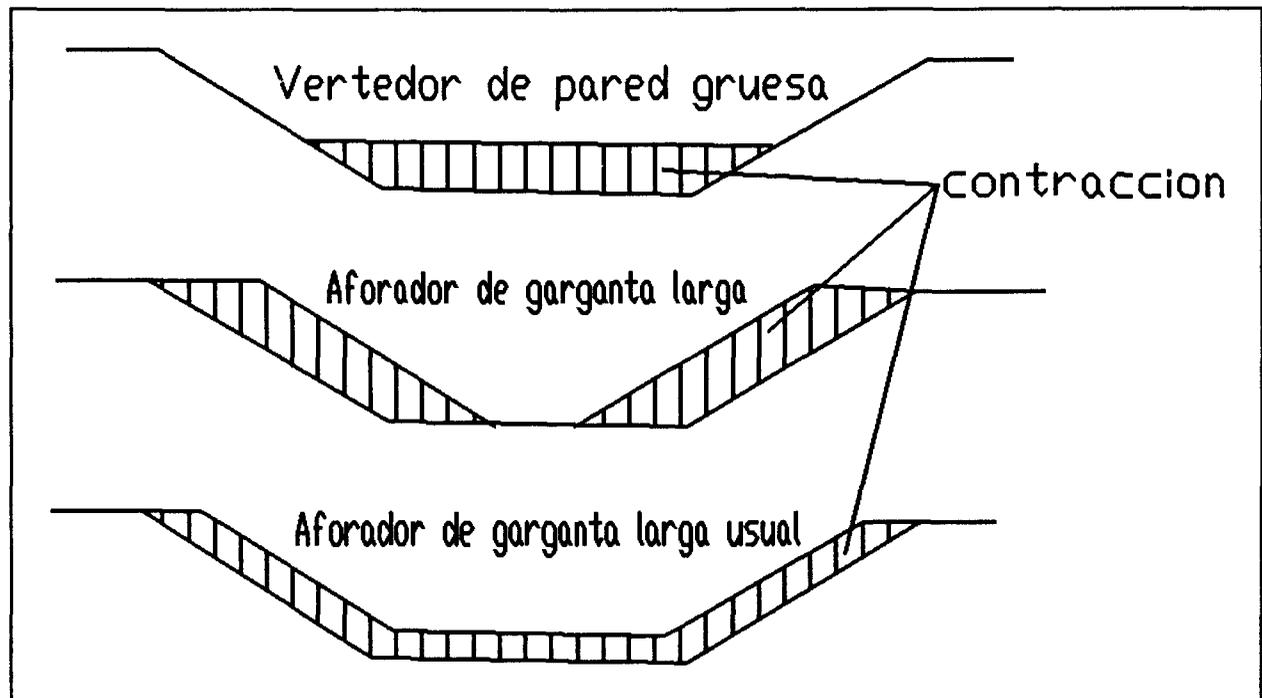
2 DESCRIPCION

2.1 Geometría

El aforador de garganta larga es básicamente una contracción construida dentro de un canal, donde se dan las condiciones hidráulicas para que se presente el flujo crítico en la garganta. La contracción puede ser en el fondo del canal, en las paredes o taludes, o en ambos, como se muestra en la lámina 1. Los vertedores de pared gruesa son un caso particular de aforador de garganta larga, en los que se tiene contracción sólo en el fondo del canal.

Otra condición para que el aforador sea de garganta larga es que ésta tenga una longitud mínima, para evitar curvaturas fuertes en el perfil hidráulico del flujo y en las líneas de corriente.

Lámina 1 Geometría transversal de los aforadores



Para que las líneas de flujo sean prácticamente paralelas en la garganta, el aforador no debe tener contracciones bruscas. Así, el efecto de la curvatura en las líneas de corriente y en las pérdidas de carga será insignificante, y será posible calcular el flujo a través del aforador sin tomar en cuenta los efectos de estas curvaturas y sin incurrir en errores

significativos. Se obtendrá de esta manera un modelo matemático sencillo lo bastante preciso para la elaboración de curvas de tirante *versus* gasto.

Hay varios tipos de aforadores de garganta larga. Tomando en cuenta su geometría se pueden dividir en trapezoidales, rectangulares, triangulares y las combinaciones de los anteriores en el canal de aproximación y la garganta.

Lámina 2.a Aforador con garganta trapezoidal

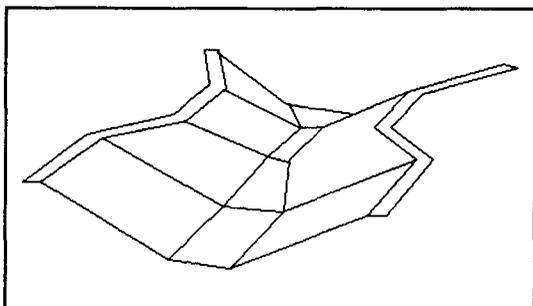
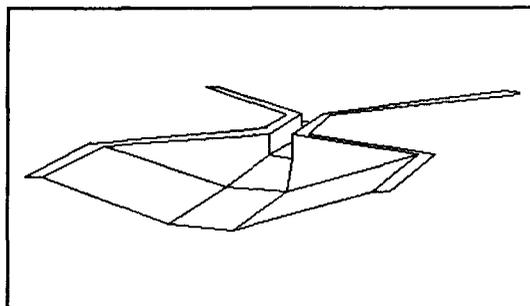


Lámina 2.b Aforador con garganta rectangular



En la lámina 2.a se observa un canal de aproximación trapezoidal con la garganta también trapezoidal; en la lámina 2.b se ve un canal de aproximación trapezoidal con la garganta rectangular. Ambos casos son muy comunes, ya que la mayoría de los canales de riego son precisamente trapezoidales, mientras que la sección rectangular facilita el diseño y construcción de estructuras aforadoras en el laboratorio o taller para después colocarlas en el campo.

Es importante que el aforador cuente con una transición del canal de aproximación a la garganta; de otro modo podrían provocarse fuertes pérdidas de carga, además de curvaturas en las líneas de corriente del flujo que impiden el análisis y, por ende, dificultan el diseño.

La transición de salida también desempeña un papel importante en el funcionamiento de las estructuras, por lo que es conveniente hacer un diseño cuidadoso de las mismas. Es en la salida donde se presentan las mayores pérdidas de carga; aquí el flujo pasa de un estado crítico a uno subcrítico. De una transición de salida adecuada depende que la pérdida de energía sea mínima.

En las fotos uno y dos puede verse un aforador de garganta larga instalado en el Jiutepec, Morelos.

Lámina 3



Foto 1. Aspecto general de la estructura aforadora y totalizador volumétrico.

Lámina 4



Foto 2. Vista del totalizador volumétrico y "display" de la lectura de medidores.

2.2 Operación hidráulica

El funcionamiento de los aforadores de garganta larga se basa en la presencia de flujo crítico en la desembocadura de la garganta. En este caso se cumple la siguiente ecuación:

$$Q = \sqrt{\frac{gA^3}{\alpha T}} \quad (1)$$

donde: Q = Gasto que pasa por el aforador.
 g = Aceleración de la gravedad.
 A = Area hidráulica de la sección de la garganta.
 α = Coeficiente de corrección por distribución de velocidad.
 T = Ancho de la superficie libre del agua.

La ecuación establece el estado que se presenta en el flujo crítico en la desembocadura de la garganta del aforador. El flujo debe ser acelerado en la transición de entrada y desacelerado en la de salida, para lo cual se requiere contar con ciertas condiciones geométricas que garanticen que se presente el flujo crítico y además eviten que éste se "ahogue" a la salida de la garganta.

Al tener en la garganta el flujo crítico y al tomar en cuenta la longitud de un aforador de "garganta larga", se puede suponer que las líneas de corriente son prácticamente paralelas. Entonces el perfil del flujo aguas arriba puede ser calculado con fórmulas de hidráulica, sin requerir más datos que la geometría del aforador, rugosidad y caudal. De esta forma se puede establecer una relación funcional del gasto con un tirante dado en alguna sección del aforador, por lo que precisamente bastará medirlo para calcular el gasto en campo.

Conocer el comportamiento aguas arriba del perfil hidráulico es condición necesaria para utilizar los aforadores, debido a que el tirante no se puede medir en la garganta por la inestabilidad del flujo en esta zona, lo cual podría permitir calcular el gasto directamente. En la práctica, la medición del tirante se debe hacer aguas arriba de la garganta, en el canal de aproximación, donde el flujo se encuentra estabilizado. Aunque es conveniente determinar la carga total por intervenir en forma más directa, es impráctico y difícil medir la carga total en vez del tirante, porque implicaría hacer también mediciones de velocidad.

Con el objeto de que el aforador funcione correctamente, es decir, para que tenga una relación única entre el tirante a la entrada y el caudal correspondiente, se debe presentar un tirante crítico en la sección de control. Ello se cumple siempre que la carga total de

energía a la salida sea menor que el tirante crítico en la garganta (referenciado todo a la base de la garganta). Cuando así sucede, la pérdida de carga disponible es mayor que la diferencia entre la de aguas arriba y el tirante crítico; entonces no es necesario transformar energía cinética en la sección de control ($V_c^2/2g$) en energía potencial aguas abajo de la transición de salida. En este caso no se necesita una transición de salida gradual; es más, si la pérdida de carga disponible es relativamente fuerte, puede ser necesaria la colocación de un dissipador de energía.

Cuando la pérdida de energía disponible es menor que la diferencia entre la carga aguas arriba del aforador y el tirante crítico en la sección de control, es necesaria la colocación de una transición de salida gradual para convertir energía cinética en la sección de control en energía potencial en el canal aguas abajo de la estructura. La cantidad de energía potencial que puede ser recuperada depende, principalmente, del grado de expansión de la transición y de la relación de áreas en la sección de control y la sección inmediatamente aguas abajo del aforador. Sin embargo, el nivel del agua a la salida no puede llegar a ser demasiado alto, porque podría impedir que se diesen en la sección de la garganta condiciones de flujo crítico.

El valor límite del tirante (aguas abajo) y su correspondiente carga total de energía deben ser calculados con el fin de establecer cuándo la pérdida de carga disponible no es suficiente para mantener un flujo modular. En este caso la transición de salida gradual sirve para disminuir la pérdida de carga en la conversión de energía cinética a potencial. Con esto se logra un requerimiento menor de pérdida de energía.

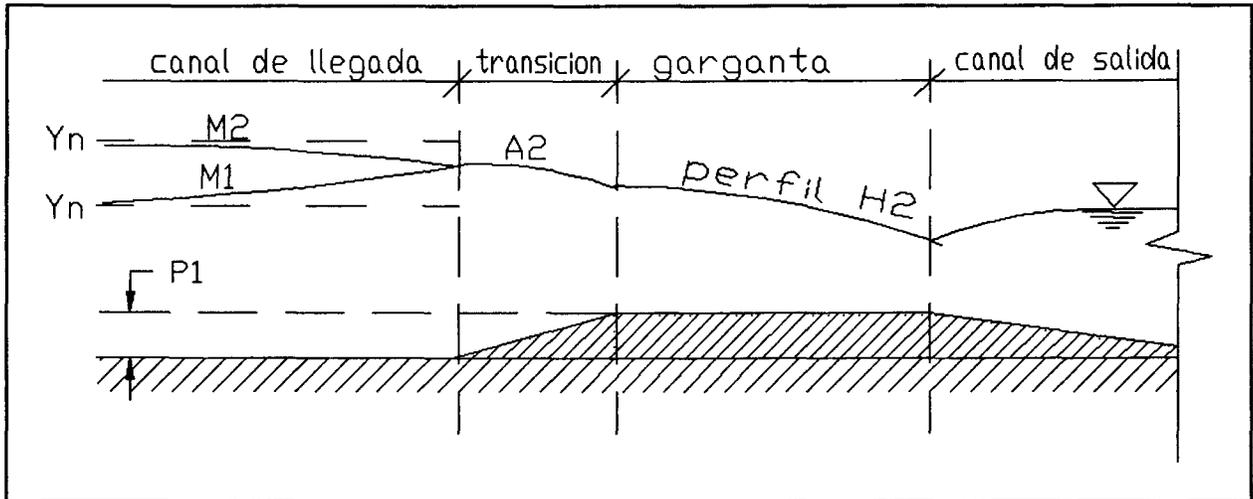
En la parte final de la garganta se presenta el tirante crítico; a partir de aquí, aguas arriba, como el piso del aforador en la garganta es horizontal, en la transición de entrada la pendiente resulta negativa y, en el canal de aproximación, menor a la crítica, esto es, se tiene un flujo subcrítico, se presenta un flujo gradualmente variado, con perfiles H2 en la garganta, A2 o H2 en la transición de entrada; si la transición tiene pendiente negativa es A2, o, si la transición no tiene pendiente se presentará una curva H2. En el caso de la garganta y la transición de entrada siempre se presentan curvas del tipo de la zona dos (M2, H2) debido a que el tirante normal es prácticamente infinito, por lo que, si el tirante presente es mayor que el crítico siempre estará en la zona dos.

En el tramo de canal de llegada considerado, cuando éste tiene una pendiente suave, o sea, cuando funciona a flujo subcrítico, se presentará una curva M1 si el tirante a la entrada de la transición es mayor que el normal y, en caso de que sea menor, se tendrá un perfil M2.

Ante el hecho de que el canal de llegada funcione a flujo supercrítico se presentará siempre un perfil de tipo S1 y un salto hidráulico previo que transforma el flujo de supercrítico a subcrítico. Los perfiles de la zona dos presentan todos la característica de tener dy/dx siempre negativo, tomando "equis" creciente en la dirección del flujo.

Ello implica que en dirección aguas arriba el tirante crece constantemente (ver en la lámina 3).

Lámina 5 Representación del perfil hidráulico



3 FUNCIONAMIENTO

3.1 Rango de operación

Al diseñar un aforador de garganta larga no se debe olvidar que se trata de un aforador de sección crítica, por lo que es indispensable que ésta se presente en la garganta; de lo contrario no funcionará en forma correcta y no será más que una obstrucción en el canal, que puede provocar un remanso, algo de turbulencia o algún otro efecto. La formación de la sección crítica en la garganta requiere de una pérdida de carga mínima, que, de no estar disponible, impedirá la formación de la sección crítica. Esto significa que después de la sección crítica es necesario que se cuente con energía disponible para regresar el flujo a un estado subcrítico, para lo que se debe tener como máximo un nivel en el canal de salida. El nivel corresponde a la energía en la sección crítica menos la pérdida de carga necesaria para el retorno al régimen subcrítico.

Se llama "límite modular" a la relación entre la energía total después de pasar el aforador y la energía total antes de que pase.

El límite modular debe ser calculado para cada conjunto de gasto-tirante y, asimismo, se debe revisar si el tirante en el canal de salida no sobrepasa el valor marcado por el límite modular.

El tirante en el canal de salida, para todo el rango de gastos considerados, no debe rebasar el máximo marcado por el límite modular, ya sea éste el tirante normal o algún otro provocado por un remanso, que de existir ha de tomarse en cuenta.

Para que se salvaguarde el valor marcado por el límite modular, en muchos casos es necesario elevar la garganta del aforador, de tal manera que se provoque un remanso que aumente la energía total antes de entrar al aforador y lograr así, por lo menos, la pérdida de carga que marca este límite. En tal caso es recomendable revisar que el canal tenga la capacidad de conducir el gasto máximo sin desbordarse.

El diseño de la estructura aforadora implica minimizar la pérdida de carga; para esto lo recomendable es mantener los tirantes que marca como máximo el límite modular lo más cerca posible de los tirantes que se dan en forma real en el canal de salida, sin permitir que estos últimos sean mayores que aquéllos. Así se logra una pérdida de carga mínima y el buen funcionamiento del aforador.

Cuando el nivel referenciado a la garganta en la salida del aforador no es mayor que el tirante crítico que se presenta en ella, no es necesario transformar energía cinética en energía potencial para elevar al nivel deseado, por lo que se puede prescindir de una transición de salida.

En el caso de que se tenga suficiente energía disponible para que se pierda por el paso del aforador, por ejemplo una caída inmediatamente después, el nivel de los tirantes dados por el límite modular probablemente estará muy por encima de los correspondientes al canal de salida, lo que implicará que la condición impuesta por el límite modular esté más que asegurada; entonces, por el contrario, puede ser necesaria la colocación de alguna estructura disipadora de energía que amortigüe la caída hidráulica. En este caso es razonable inferir que no es necesario elevar la garganta para mantener un flujo modular al grado de que produzca un remanso; tal vez, la garganta pueda ponerse incluso al nivel de la plantilla, lo que daría como resultado una curva de desagüe. En dichas condiciones, donde el flujo modular está prácticamente asegurado, se puede variar la altura del resalto (garganta) para ser colocada en la más conveniente.

La calibración analítica se hace bajo la suposición principal de que las líneas de corriente son paralelas, lo que implica que la ecuación de la energía de Bernoulli es aplicable y la curvatura en las líneas de corriente no implica errores significativos si no se toma en cuenta, por lo que es posible afirmar que la energía total en un punto dado es igual a la energía total en otro punto posterior menos la pérdida de energía por fricción.

La garganta del aforador se considera larga porque requiere una longitud mínima para mantener las líneas de corriente en forma prácticamente paralela, por lo que se debe respetar esta condición. También ha de considerarse una longitud máxima, pues una estructura demasiado larga puede no ser práctica y provocar inestabilidades, ya que el flujo en la garganta es muy cercano al crítico. En la práctica se ha encontrado que un aforador de garganta larga funciona correctamente si se mantiene la relación de energía entre la sección de medición referenciada a la garganta y el largo de la misma, entre 0.1 y 1.0. Tomando en cuenta esto es conveniente revisar que, para todo el rango de gastos considerados, la longitud esté dentro de los límites anteriores.

Es recomendable que el rango de 0.1 a 1.0 de la relación anterior se reduzca al rango de 0.1 a 0.7 o, si es posible, al rango de 0.1 a 0.5, ya que en la práctica se ha encontrado que la precisión de los resultados baja un poco en el rango de 0.5 a 1.0 en ciertos casos, por lo que es preferible siempre excluir dicho rango.

La garganta del aforador puede o no puede tener una contracción lateral. En el caso de que no la tenga, se trataría de un vertedor de cresta ancha, el cual por tener un funcionamiento hidráulico idéntico al aforador de garganta larga, se considera como un caso particular. El efecto de la contracción lateral es el de incrementar los tirantes presentes en la garganta, y con esto, también la pérdida de carga. Considerando lo dicho, lo más recomendable para lograr una pérdida de carga mínima es no construirle ninguna contracción lateral al aforador. En este caso lo que se obtiene son vertedores de cresta ancha.

El efecto de elevación del tirante al colocar una contracción lateral es de utilidad cuando se desea incrementar la precisión de las mediciones. La contracción lateral produce la

elevación de los tirantes para cada gasto que pasa y ocasiona que la relación $\Delta h/\Delta Q$ ($Q =$ gasto, $h =$ tirante) se incremente. Por ejemplo, un cambio de diez lps puede significar un cm en un aforador sin contracción lateral y tres cm en uno con contracción lateral. El efecto anterior provoca una mayor precisión en el cálculo del gasto al hacer las lecturas de una escala o un limnógrafo.

Si durante el diseño se considera necesario colocar una contracción lateral que aumente la precisión del aforador, hay que tomar en cuenta que ésta también elevará la pérdida de carga y, por la elevación de los tirantes, provocará un remanso mayor. Así, es necesario equilibrar el tamaño de la contracción con la pérdida de carga que se está dispuesto a admitir y con el remanso máximo que pueda producir en el canal sin afectarlo.

La máxima pérdida de energía sucede en la transición de salida del aforador donde el flujo crítico regresa a su estado subcrítico. La magnitud de la pérdida de energía depende en gran medida de la forma de la transición de salida, de la brusquedad del cambio de secciones y, por lo tanto, de las velocidades. Cuanto más suave sea el cambio, menor será la energía perdida. Según Bos, Replogle y Clemmens (1986) existe un vínculo (de tipo empírico) entre las cargas de velocidad y la relación de expansión de la transición de salida que determina la pérdida de carga mínima requerida para mantener un flujo modular. La relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_c - H_2 - H_f = \frac{\xi (V_c - V_2)^2}{2g} \quad (2)$$

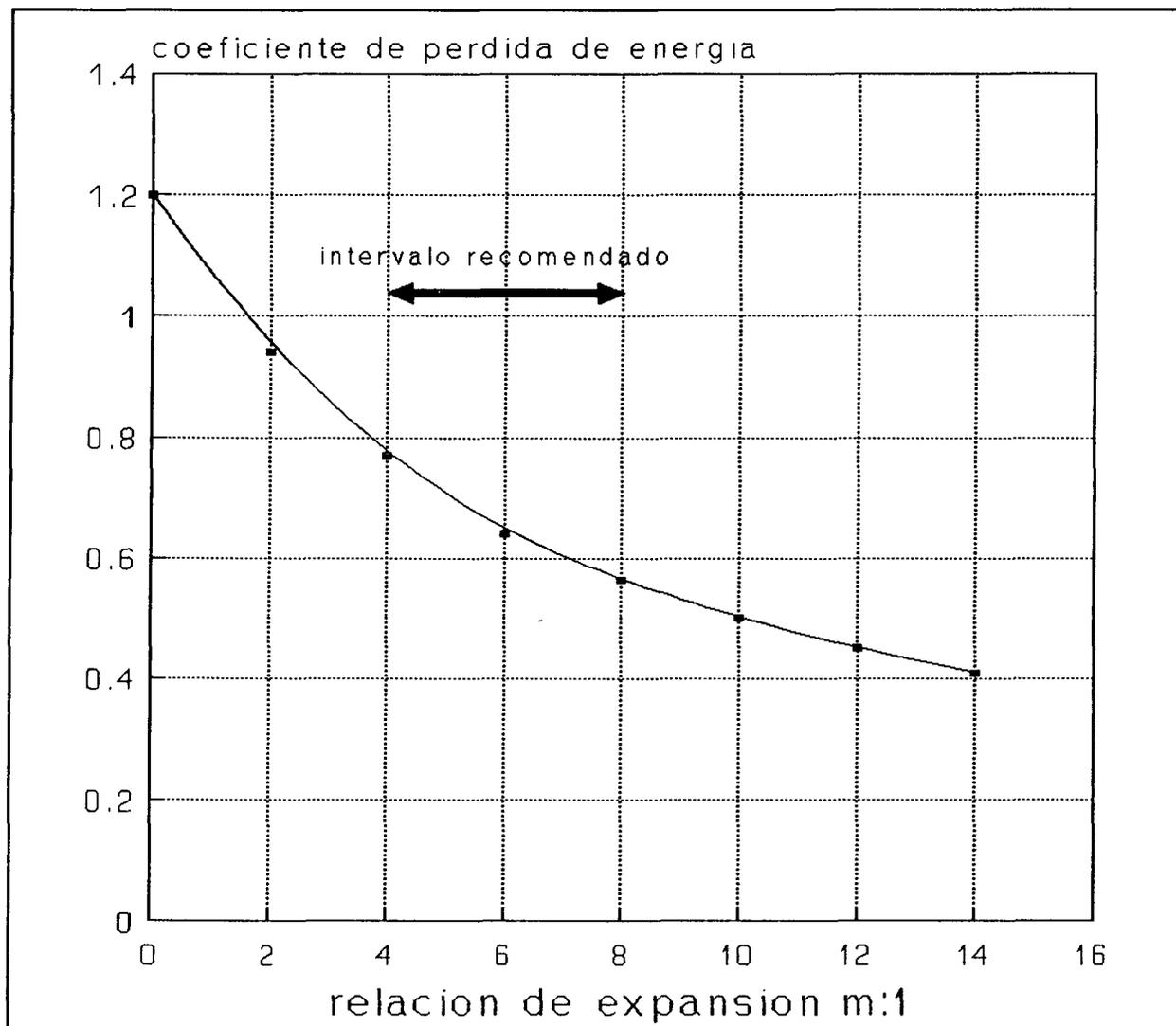
donde:

- H_c = Energía en la sección crítica.
- H_2 = Energía a la salida del aforador.
- H_f = Pérdidas de energía por fricción.
- V_c = Velocidad en la sección crítica.
- V_2 = Velocidad a la salida del aforador.
- ξ = Coeficiente de pérdida de energía.

Como se observa, la pérdida de energía de la garganta en el canal de salida es proporcional a la diferencia de velocidades en las respectivas secciones al cuadrado. En esta ecuación se tiene como coeficiente de proporcionalidad a " ξ ", que es el coeficiente de pérdida de energía. Depende de la relación de la pendiente del fondo, de la contracción o las paredes y varía según se muestra en la lámina 4.

Como se puede ver, mientras más suave es la expansión, el coeficiente de pérdida de energía disminuye y, hasta donde la gráfica alcanza, su menor valor resulta de 0.4 con una relación de expansión "m" de 14:1. El máximo valor de " ξ " es de 1.2 cuando "m" vale cero. Esto ocurre cuando no se tiene ninguna transición de salida, es decir, que el

Lámina 6



cambio de sección es brusco e inmediato.

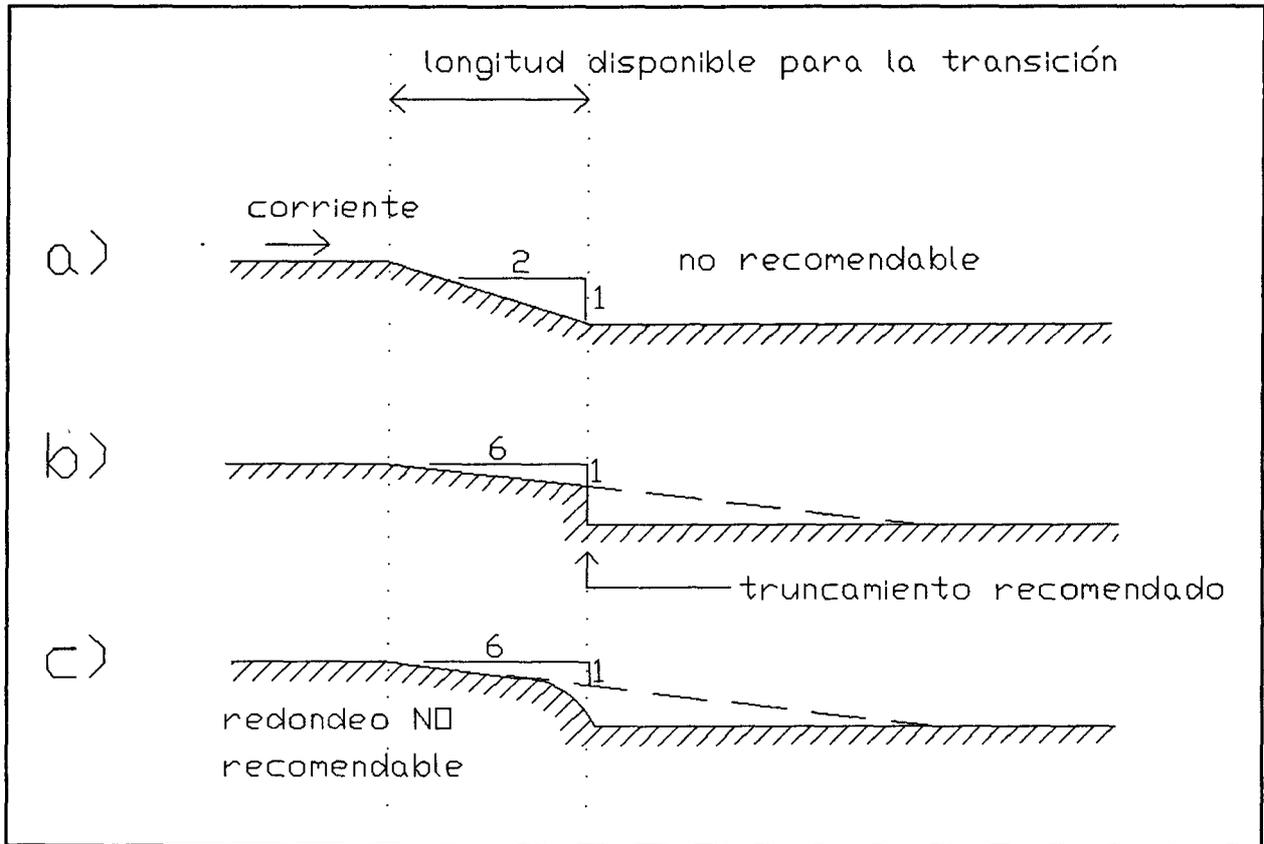
Los valores recomendados (Bos, Replogle y Clemmens, 1986) para la relación de expansión "m" son de 4:1 a 8:1. No se recomiendan relaciones menores.

En el caso de que la longitud disponible para la transición de salida no sea suficiente, se recomienda truncarla a la mitad. No se aconseja redondear el corte, ya que se desviaría el flujo y provocaría erosión y mayor pérdida de carga.

Lo anterior se ilustra en la lámina 4. En el caso "a" se tiene una situación en la cual se usa una rampa de salida con una relación de 2:1. En su lugar se podría construir una con relación de 6:1 y truncarla a la longitud deseada. Se ha encontrado que tales truncamientos, cuando son a la mitad, tienen un efecto insignificante en el límite modular. Redondear el corte no es recomendable, como se ha dicho antes, lo que se muestra en

la lámina 5.

Lámina 7 Alternativas de terminación en la rampa de salida



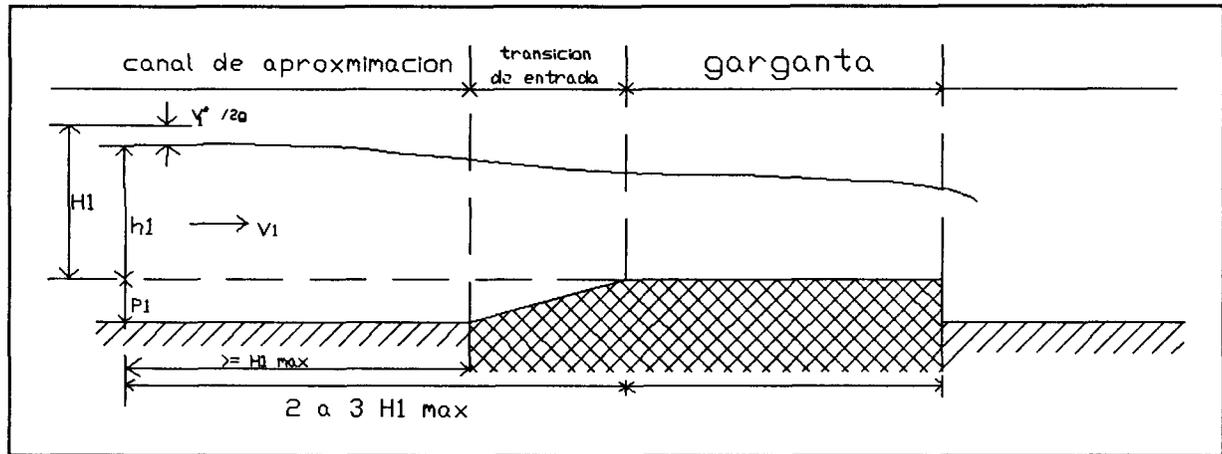
La rampa de entrada (si es que existe escalón) y la transición de entrada, que debe ser de forma gradual, tienen como objeto asegurar líneas de flujo relativamente paralelas, lo que permite la calibración analítica del aforador. Una relación o pendiente de entrada recomendada es de 2:1 a 3:1.

La rampa de salida y su respectiva transición no son indispensables para el buen funcionamiento de la estructura, si es que hay suficiente carga disponible, y puede perderse por el paso a través del aforador.

La función de la rampa y transición de salida es reducir la pérdida de carga y así asegurar que el aforador no se ahogue cuando la energía disponible no sea suficiente.

La distancia al punto de medición, tomada desde el inicio de la transición hacia aguas arriba, debe ser de por lo menos la carga máxima total de energía en dicho punto.

Lámina 8 Ubicación del punto de medición del tirante



(considerando la carga con gasto máximo) en relación con la base de la garganta.

Se recomienda que sea de dos a tres veces la carga, tomada desde la sección de medición hasta el final de la transición de entrada, donde comienza la garganta, como se ve en la lámina 6.

Debido a que en la zona de medición se tienen velocidades de flujo bajas, la carga total de energía es muy semejante al tirante, por lo que se puede tomar éste como referencia, en vez de la energía total.

El diseño más sencillo de un aforador de garganta larga es el que tiene únicamente contracción en el fondo y no lateral. En tal caso se tendrá un vertedor de cresta ancha. Este diseño, que es el de construcción más sencilla, provoca la pérdida de carga más baja debido a que se presentan los tirantes o cargas menores con relación a la garganta del aforador.

Sin embargo, si se considera que para el rango completo de gastos a medir la escala correspondiente tiene una longitud determinada, igual a la variación de los tirantes en el canal en la sección de medición, ello define una cierta distancia sobre la escala correspondiente a cada litro por segundo escurrido. Si esta distancia no fuera suficiente para lograr la precisión deseada, es posible aumentarla, adicionando al aforador contracción lateral.

La contracción lateral hará que el rango de variación de tirantes respecto al gasto se incremente. Ello aumentará también la pérdida de carga y muy probablemente se tenga que acompañar con la reducción en la altura del escalón para no rebasar el libre bordo del canal con el nuevo remanso.

Las dimensiones de la contracción lateral deben calcularse por ensayo y error. Deben tomarse en cuenta la precisión deseada, las pérdidas de carga, los tirantes máximos

permitidos en el canal y los necesarios aguas abajo del aforador para asegurar flujo modular.

3.2 Calibración analítica

Se han desarrollado fundamentalmente dos métodos para obtener la función gasto-tirante medido: el de "los coeficientes" y el de "integración numérica".

En el primero, el gasto está en función de la carga de energía en la garganta; se considera igual la energía en la garganta y en la sección de medición. Se plantea la ecuación de Bernoulli y se despeja el gasto en función del tirante medido, aplicándose después coeficientes de corrección para la pérdida de carga, velocidad de llegada al canal y forma de la garganta.

En el segundo, se calcula el perfil del flujo en tramos pequeños, desde el punto de la desembocadura de la garganta, donde se presenta el tirante crítico, hasta la sección de medición del tirante. En este caso se resuelve la ecuación de la energía con el término de pérdidas incluido.

En los dos métodos se hace uso de las ecuaciones de capa límite para calcular las pérdidas por fricción, debido a que los tramos considerados son muy cortos y requieren una gran aproximación en el cálculo. No sería suficiente el uso de alguna de las ecuaciones empíricas de fricción, como la de Manning o la de Chezy.

El método de integración numérica se basa en el uso del conocimiento de las condiciones hidráulicas. Se sabe que se presenta un flujo gradualmente variado; la técnica de solución es ir "barriando" el perfil, mientras se calculan los tirantes a cada pequeño incremento de x a partir de la sección crítica hasta llegar a aquella en donde se desea conocer el tirante, que será el punto de medición.

Se trata de un método por pasos, en el que cada uno, con incremento ΔX , determina el tirante correspondiente por procedimientos iterativos, hasta llegar a la distancia final en la sección deseada, que es donde se colocará el limnómetro o la regla de medición.

Considérese la ecuación de la energía o de Bernoulli simplificada para canales abiertos:

$$Y_1 + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = Y_2 + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + \Delta Z + H_f \quad (3)$$

donde: Y_1, Y_2 = Tirantes en las secciones respectivas.
 U_1, U_2 = Velocidad media en las secciones respectivas.
 g = Aceleración de la gravedad.
 ΔZ = Cambio en el nivel de las secciones.
 H_f = Pérdida de energía entre secciones.
 α_1, α_2 = Coeficientes correctivos por el uso de la velocidad media.

La ecuación anterior se aplica en la situación particular del aforador. La primera sección es una situada a distancia ΔX de la crítica, que es la segunda.

$$Y_1 + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = Y_c + \alpha_c \frac{U_c^2}{2g} + \Delta Z + H_f \quad (4)$$

donde: Y_c = Tirante crítico.
 U_c = Velocidad crítica.
 ΔZ = Tamaño del escalón.
 α_c = Coeficiente de distribución de velocidad en la sección crítica.

La condición de flujo crítico que se presenta en la garganta permite establecer una relación gasto-tirante definida por la siguiente ecuación:

$$Q = \sqrt{\frac{g A_c^3}{T_c \alpha_c}} \quad (5)$$

donde: Q = Gasto.
 A_c = Area crítica.
 T_c = Ancho de la superficie en la sección crítica.

Para hacer un "barrido" del perfil se comienza desde la garganta, donde, por la ecuación cinco, se conoce la condición de frontera, que es el tirante crítico. Utilizando la ecuación cuatro se puede calcular el tirante en la sección contigua a la garganta, separada una distancia ΔX de ella. Al generalizar el procedimiento, mediante el uso de

la ecuación tres, se pueden seguir calculando los tirantes en subsecuentes secciones hasta llegar a la deseada, donde se quiere establecer la relación tirante-gasto. En el procedimiento anterior, se requiere de métodos iterativos, pues el tirante no está en forma explícita.

Puesto que se conoce la geometría del aforador, resta como incógnita la pérdida de carga H_f en cada ΔX . Para su cálculo se puede usar una ecuación semiempírica como la de Chezy o la de Manning; pero, debido a las distancias tan cortas que son usadas, es necesario utilizar procedimientos más precisos, por lo cual se empleará la teoría de la capa límite.

De la teoría de la capa límite (Schlichting,1960), la pendiente de fricción se puede expresar como:

$$S_f = C_f R^{-1} \frac{U^2}{2g} \quad (6)$$

donde: S_f = Pendiente de fricción.
 R = Radio hidráulico del escurrimiento.
 C_f = Coeficiente de fricción.
 U = Velocidad media del flujo en la sección considerada.

Si se toma en cuenta que:

$$S_f = \frac{H_f}{L} \quad (7)$$

L = Longitud considerada (ΔX).

La pérdida de carga puede expresarse como:

$$H_f = C_f R^{-1} L \frac{U^2}{2g} \quad (8)$$

En esta ecuación el único término que aún no se ha dicho cómo evaluar es C_f , el cual es una función de la rugosidad del canal y del número de Reynolds. Para capa límite laminar puede usarse la siguiente expresión derivada por Blasius, y que, según

Schlichting (1960), da resultados exactos para $Rx < 10,000$:

$$C_f = \frac{1.328}{R_x^{1/2}} \quad (9)$$

donde:

$Rx =$ Número de Reynolds.

$Rx = UX/\gamma$.

$\gamma =$ Viscosidad cinemática del agua (1.0034×10^{-6} m²/s a 20°C).

$X =$ Longitud característica, usualmente medida desde el origen de la capa límite, en la dirección de escurrimiento. En este caso puede usarse la longitud de la garganta.

Para el caso de capa límite turbulenta, ya sea lisa, de transición o rugosa se puede utilizar la expresión:

$$\frac{0.544}{\sqrt{C_f}} - 5.67\sqrt{C_f} + 0.638 + \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{R_x C_f} + \frac{1}{4.84 \frac{x}{k} \sqrt{C_f}}\right) = 0 \quad (10)$$

donde k es la rugosidad de las paredes.

Esta ecuación fue obtenida para placas planas, por lo que su uso es aproximado (Harrison, 1967), aunque de excelentes resultados. La solución para C_f se realiza por un método iterativo, pues no es una ecuación explícita.

3.3 Medición del tirante

Para medir un caudal con exactitud es necesario conocer la carga en su totalidad, aguas arriba del medidor, referida al nivel de la garganta. La importancia de hacerlo es tal que, con frecuencia, el éxito o el fracaso de una obra de esta naturaleza depende enteramente del buen funcionamiento de la escala o limnógrafo que se utilice. El nivel de referencia se toma en la base del canal de llegada, en la sección de medición.

Si no se encuentra bien definido, es preferible referirse mejor a la garganta del aforador, la cual debe estar perfectamente horizontal. En tal caso se debe descontar de la tabla la altura del escalón. El limnómetro o escala para la medida del tirante deberá colocarse a suficiente distancia, aguas arriba de la obra, para que caiga fuera de la zona de descenso de la superficie del agua, si bien lo bastante cerca de dicha obra como para

que entre este punto y la obra la pérdida de energía sea mínima.

Ello supone que deberá situarse a una distancia del borde anterior de la garganta de entre dos y tres veces el valor de $H_{1\max}$, o como mínimo, a una distancia igual a $H_{1\max}$ del comienzo de la contracción, tomándose la mayor de las dos distancias, según puede observarse en la lámina 6.

El nivel del agua en la estación de aforo puede medirse con una escala graduada, vertical o inclinada, sobre el talud del canal aguas arriba. En general, para medidas esporádicas, basta con una sonda de punzón o un limnómetro, pero cuando se requiere de mediciones continuas es conveniente disponer de un limnógrafo.

Para utilizar la estructura como un totalizador volumétrico puede servir un limnógrafo, aunque esto implica una gran cantidad de trabajo, pues hay que medir el área de cada registro (al integrar el área bajo la curva del limnógrafo se puede totalizar el gasto).

Lo más conveniente es la instalación de un totalizador electrónico de gasto, el cual resuelve el problema, además de llevar un registro del gasto. También posibilita un control automático computarizado. Existen varios tipos de totalizadores electrónicos, la mayoría de ellos de importación, aunque el que propone el IMTA es de un costo relativamente bajo y ha demostrado buen funcionamiento.

3.3.1 Escalas limnimétricas

Cuando no se necesita información continua del caudal, o en aquellos en los que las fluctuaciones de nivel se producen gradualmente, pueden obtenerse datos suficientes efectuando lecturas periódicas sobre una escala graduada, la cual deberá estar situada de tal manera que sea posible leer el nivel del agua desde la propia banqueta del canal y que el observador pueda limpiar con facilidad su superficie. Una forma típica y conveniente de una escala limnimétrica es aquella en que se pintan los estadales topográficos, la cual facilita su lectura. Para canales de tierra el limnómetro puede montarse verticalmente sobre un soporte que se coloca en el mismo cauce. El soporte debe ser de tal forma que no interfiera en el curso del agua que pasa a través del aforador y que tampoco retenga cuerpos flotantes.

En los canales revestidos, los limnómetros pueden montarse directamente sobre las paredes o el talud. Cuando son trapezoidales, la longitud inclinada de la escala es mayor que la correspondiente vertical del agua, lo que debe ser tomado en cuenta al colocar la escala.

Dentro de los sistemas de riego es conveniente marcar las escalas limnimétricas, además de la profundidad, con escalas en litros/segundo, metros cúbicos/segundo, metros cúbicos/hora o la unidad de medida que se considere más conveniente. Así, una vez que

se ha montado y comprobado la escala, se evita la posibilidad de utilizar tablas de caudales equivocadas.

3.3.2 Limnógrafos

Los limnógrafos, registradores automáticos del nivel del agua, son instrumentos que trazan gráficos, graban en cinta magnética o sobre una banda de papel con tinta, en forma continua, o con perforaciones sobre el papel el nivel del agua en función del tiempo. El empleo de dichos instrumentos tiene las siguientes ventajas sobre las escalas limnimétricas ordinarias: 1. En los canales que oscilan durante el día, su registro permanente proporciona el medio más adecuado para determinar el caudal medio diario y el volumen total. 2. En el gráfico completo quedan grabados los niveles máximo y mínimo del agua, en función del tiempo, lo que proporciona datos sobre el tiempo de reacción del sistema de canales a los cambios de caudal aguas arriba. 3. Pueden efectuarse observaciones en puntos lejanos, en donde no se dispone de observadores, o en lugares a los que éstos no pueden llegar en determinadas condiciones meteorológicas.

Los fabricantes de instrumentos meteorológicos construyen una amplia variedad de registradores limnigráficos, como son los de burbujeo y los de flotador, los cuales se pueden adquirir en el país, siendo en su mayoría de importación.

3.3.3 Totalizador volumétrico

A menudo, uno de los objetivos de la medida de un caudal es obtener información sobre el volumen total de agua que pasa por un canal en un periodo dado. El cálculo de dicho volumen, a partir del hidrograma registrado, es una tarea que lleva tiempo y que por ello se demora con frecuencia. Para evitar este trabajo se pueden utilizar contadores totalizadores que existen en el comercio (importación). Pueden ser mecánicos o electrónicos. Los de tipo mecánico deben ser convenientemente puestos a cero, por la dificultad de compensar los errores debidos a causas físicas. Los electrónicos constan de un registrador (ya sea de flotador, burbujeo o de cámara flexible) y un microprocesador que transforma la altura del agua en gasto instantáneo mediante una ecuación o una tabla de calibración y, finalmente, integran la curva gasto-tiempo para obtener el volumen totalizado. El IMTA promovió la fabricación de un totalizador electrónico y el resultado es un totalizador de bajo costo que funciona con la tabla de calibración grabada por medio de láser.

4 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO CON AUXILIO DEL PROGRAMA

4.1 Descripción del programa

Se elaboró un programa para microcomputadora al utilizar diversos algoritmos numéricos. El programa resuelve las ecuaciones antes descritas para el rango de diseño del aforador y obtiene curvas de calibración. Posee varias otras opciones, todas ellas encaminadas a facilitar el diseño de las estructuras de aforo.

El menú que se muestra en la lámina 7 se vale de las teclas de función (F1 hasta F10), solas o combinadas con las teclas de mayúsculas (*shift* o cambio) o control (ctrl) para accionar las diferentes opciones. Aquí mismo se muestra la pantalla de captura de información, donde se introducen los datos de la geometría del aforador y los canales de llegada y salida (comúnmente los canales de entrada y salida son iguales); así como los datos hidráulicos de los mismos. Los datos pueden modificarse con sencillez y rápidamente, ya que puede moverse a través de ellos con las teclas de navegación.

Lámina 9 Pantalla de captura del programa de diseño

PROGRAMA DE DISEÑO DE AFORADORES DE GARGANTA LARGA					
Gama de caudales a medir			NECESIDADES HIDRAULICAS		
Nivel del agua					
Q mínimo =	0.0100	Y normal =*	0.3842		
Q máximo =	0.1200	Rugosidad (Manning)=	0.01500		
Q intervalo=	0.0050	Pendiente del canal =	0.00010		
GEOMETRIA DEL CANAL			GEOMETRIA DEL AFORADOR		
B1 =	1.00	B2 =	1.00	BC =	1.25
Z1 =	0.50	Z2 =	0.50	ZC =	0.50
P disp =	0.00	AL =	0.50	BL =	0.75
		DL =	1.50	TL =	0.20
		EM =*	6.00	P1 =	0.25
		EN =*	3.00	P2 =*	0.25
				Rugosidad=	0.00020000
* DATOS NO PROPORCIONADOS POR EL USUARIO					
F1=	Calcular Y normal	F2=	Dar recomendación		
F3=	Ver Tabla de calibración	F4=	Ver croquis del aforador		
F5=	Realizar cálculos	F6=	Cargar datos		
F7=	Imprimir resultados	F8=	Salvar datos		
F9=	Ver gráfica de calibración	Shift+F10=	TERMINAR		
Shift+F1 =	Ayuda	Shift+F2 =	Ver remanso	Ctrl+Home =	Iniciar todo

En la parte inferior de la pantalla se presenta el menú de opciones, las cuales son las siguientes:

F1 = Calcular Y normal. Con esta opción se calcula el tirante máximo que se pueda

presentar aguas arriba del aforador, considerándolo como el normal del canal de llegada. Tal dato se usa en la opción de recomendación, pero no al realizar los cálculos de curva de calibración. Si no se va a usar la opción de recomendación no es necesario hacerlo. Tampoco es necesario su uso si es que el dato de tirante máximo aguas arriba se va a introducir en forma manual. El cálculo del tirante se realiza con los datos geométricos del canal de llegada, la pendiente del canal y la rugosidad de Manning que vienen inmediatamente abajo. El tirante que se calcula como máximo es el normal para el gasto máximo que ocurriría.

Si se pide esta opción (se oprime la tecla F1) y falta alguno de los datos, el programa lo indicará inmediatamente y no se realizará ningún cálculo.

En esta misma parte del menú se puede calcular y tener una representación gráfica del remanso provocado por la presencia del aforador en el canal. Para realizar la operación es necesaria la curva de calibración con el fin de partir de dichos datos al calcular la curva de remanso. El objetivo es que se conozca el efecto de la estructura en el canal para auxiliar en el diseño.

F2 = Dar recomendación. Propone dimensiones del escalón, de la plantilla y la longitud de la garganta y de la distancia al sitio de medida. El criterio para proponer las dimensiones es buscar el escalón lo más alto posible por el que pueda pasar el gasto máximo, sin rebasar el tirante máximo del canal de llegada, que se da como un dato o se calcula por medio de la opción anterior. El resultado es un vertedor de cresta ancha (caso particular del vertedor de garganta larga) que es el que menor pérdida de carga ocasiona, pues ésta es proporcional a los tirantes medidos a partir del escalón.

Cualquier contracción lateral en la garganta elevará los tirantes, aumentando así la precisión en las medidas, pero incrementando a la vez las pérdidas de carga. Si se desea tener una contracción en la garganta para incrementar la precisión de las medidas, ésta debe ser propuesta posteriormente y así se volverán a realizar los cálculos sin usar la opción, ya que ello eliminaría la contracción propuesta.

La longitud de la garganta se propone de manera que tenga un magnitud suficiente para que la relación de carga total (referenciada a la plantilla de la garganta) con la longitud de ésta se encuentre entre 0.1 y 1.0.

Si fuera necesario cambiar la longitud de la garganta, lo que se busca es que con el gasto máximo no sobrepase el límite de 1.0 para la relación de carga a longitud de la garganta.

Es recomendable que el rango de 0.1 a 1.0 de la relación de la carga de energía en la sección de medición a la longitud de la garganta, se reduzca al rango de 0.1 a 0.7 o, si es posible, al de 0.1 a 0.5, ya que en la práctica se ha encontrado que la precisión de los resultados baja un poco en el rango de 0.5 a 1.0 en ciertos casos, por lo que es

preferible siempre excluirlo.

La relación de la carga a la longitud de la garganta se presenta durante el cálculo de la tabla de calibración (es parte de ella). Se puede ver con la opción "F3" al finalizar los cálculos con el fin de verificar si los valores están dentro de los límites permisibles y si se comportan de tal manera que el gasto máximo corresponda más o menos al límite que estamos dispuestos a admitir, ya sea 1.0, 0.7 o 0.5.

F3 = Ver tabla de calibración. Con este subprograma se visualizan en una tabla los datos de calibración, es decir la relación gasto-tirante, en los intervalos especificados en el cálculo. En dicha tabla se incluyen también los valores del número de Froude, la relación carga/longitud de garganta, que es útil para diseño, la pérdida de carga, el límite modular y los tirantes máximos en el canal de salida que permiten el desarrollo de flujo crítico en la garganta.

Esta tabla, que se imprime en los resultados, auxilia durante el diseño, pues aquí se encuentran los datos básicos del aforador para el rango de gastos elegido, como son la pérdida de carga, tirantes admisibles a la salida y tirantes en el canal de llegada, y la relación carga/longitud de garganta.

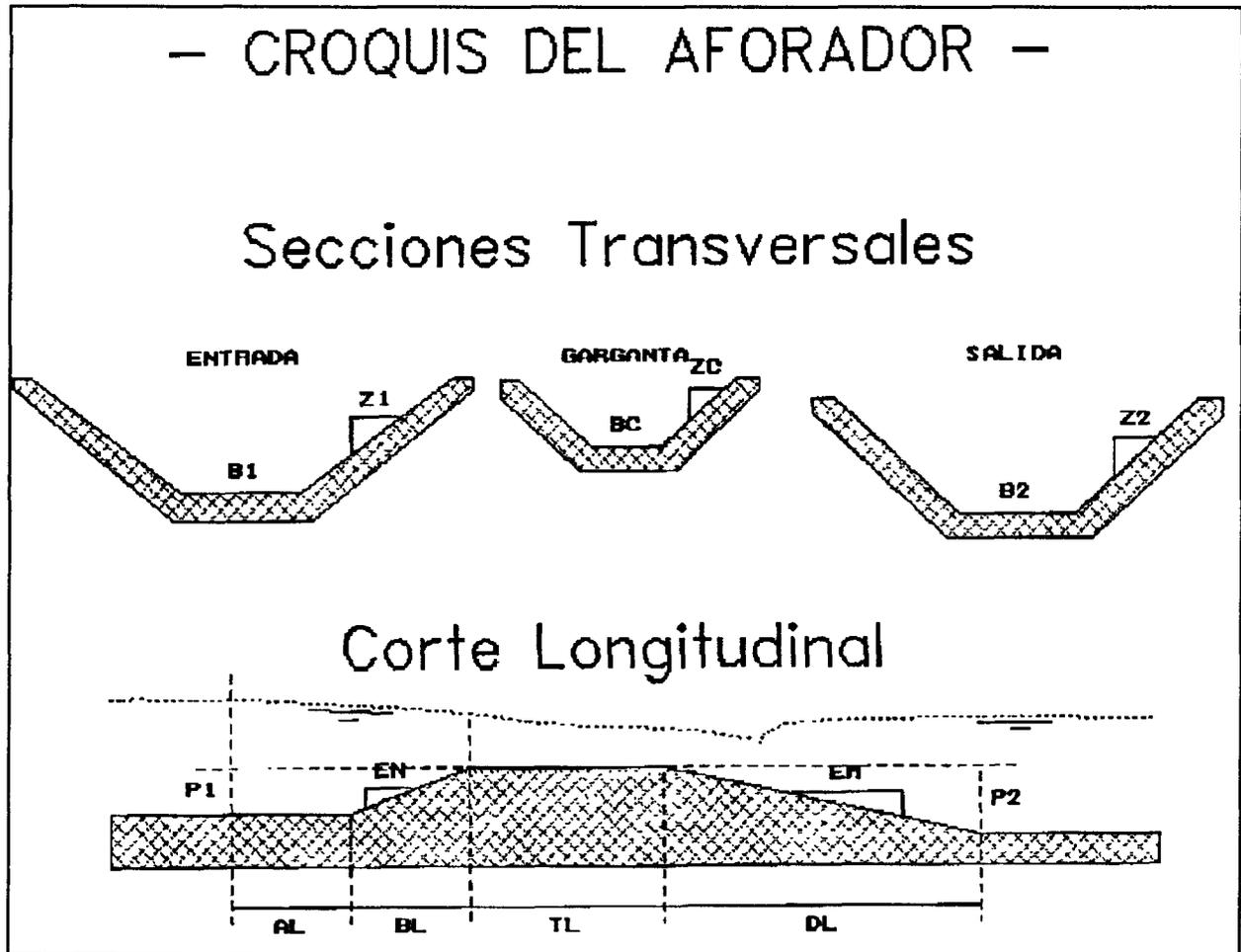
F4 = Ver croquis del aforador. Aquí se obtiene en pantalla un croquis del aforador, con la nomenclatura utilizada en el programa.

F5 = Realizar cálculos. En este subprograma, una vez propuesta una geometría, se ejecutan los cálculos de la curva de calibración del aforador. Se obtienen además el número de Froude en el canal, la relación carga en la sección de medición respecto a la parte superior del escalón entre longitud de la garganta, el límite modular, la profundidad máxima del canal de salida (para tener flujo crítico en la garganta) y la pérdida de carga, así como una regresión de tipo exponencial ($Q=aY^b$) a la relación tirantes *versus* gastos.

El tiempo que tarda la computadora en realizar la tarea es variable, dependiendo fundamentalmente del número de intervalos o puntos seleccionados para la calibración y del tipo de microcomputadora que se esté usando. Si se requiere interrumpir el proceso, se oprime la tecla de "ESC"; la tabla de calibración quedará con el número de puntos que se hayan calculado hasta ese momento.

F6 = Cargar datos. Aunque son pocos y fáciles de introducir al programa en forma manual, es conveniente almacenarlos en un archivo en disco, con la opción F8, y cargarlos en cualquier momento mediante la F6.

Al almacenar los datos en disco es posible dar la ruta de almacenamiento completa junto con el nombre del archivo. Si no se da ninguna entonces se almacena por defecto en la ruta y unidad.



Los nombres de los archivos pueden llevar extensión o no llevarla. En el caso de que se omitiera, el programa agregaría automáticamente la extensión "DAT". Si se desea que el archivo no posea ninguna extensión, se debe escribir su nombre anotando el punto que separa éste de la extensión, omitiéndola.

Al tratar de grabar, el programa revisa si existe algún otro archivo con el mismo nombre, y de ser el caso, se pide confirmación antes de proceder. Si se ejecuta esta opción por error, se puede introducir el nombre del archivo en blanco, es decir, simplemente oprimiendo "ENTER" sin poner nada más.

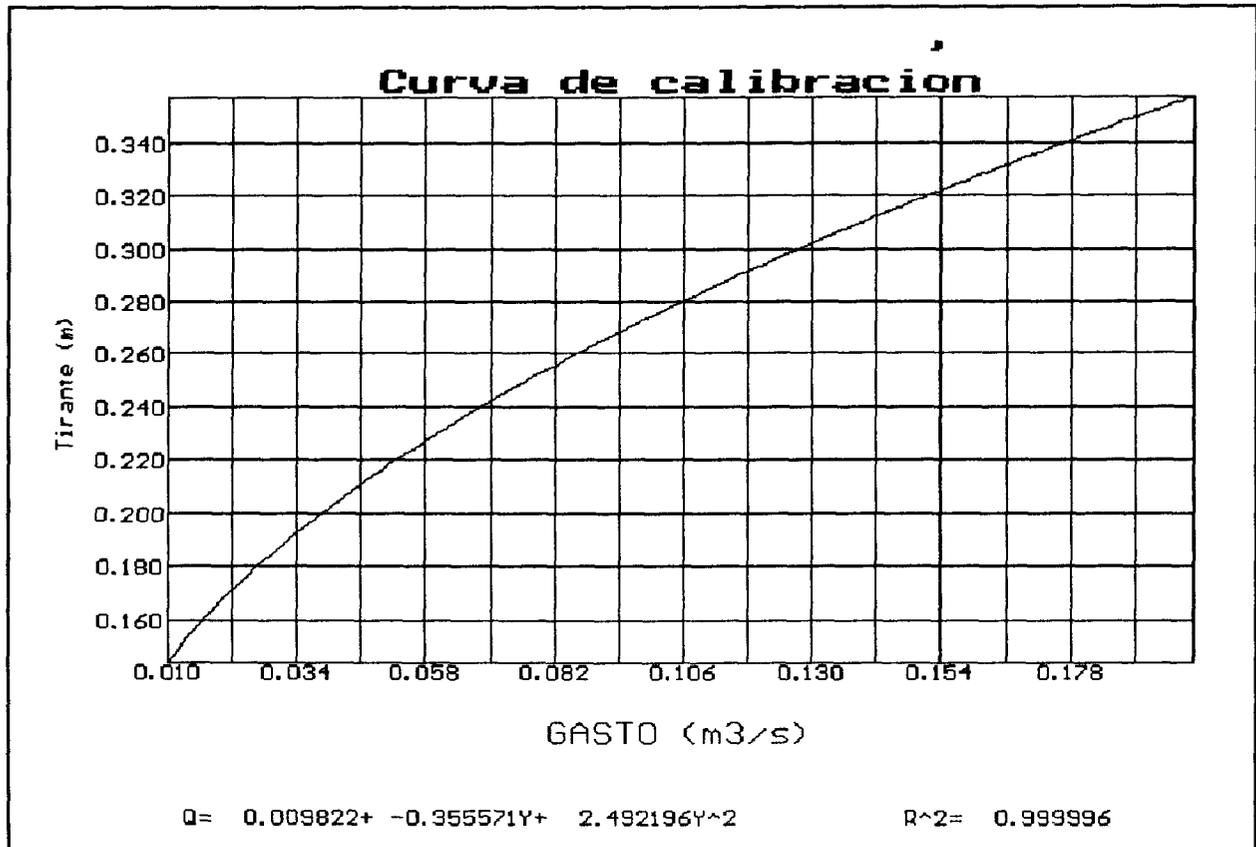
F7 = Imprimir resultados. Permite tener una copia de la tabla de calibración y de su gráfica en papel. En la tabla se incluyen los datos de los valores de la regresión realizada durante los cálculos.

F8 = Salvar datos. Almacena los datos en pantalla en un archivo de disco, incluyendo los resultados de los cálculos si se han realizado. El manejo de los nombres de archivo es idéntico al de la opción F6. Al introducir el nombre de un archivo inexistente se manda

un mensaje y se vuelve a pedir el nombre del archivo; ello se puede deber a que el archivo se encuentre en otro directorio o unidad diferente a la especificada o, si no se especificó ninguna, al directorio y/o unidad actuales.

F9 = Ver gráfica de calibración. Con esta opción se observa en pantalla la gráfica de calibración resultante de los cálculos, o sea la de los datos tabulares de gasto contra tirante (desde el fondo del canal); también se presenta aquí la ecuación de calibración producto de la regresión exponencial linealizada. Un ejemplo lo tenemos en la lámina 9.

Lámina 11



Shift+F10 = Terminar. Termina entonces el programa y regresa al sistema operativo.

Al finalizar con esta opción, que sería la forma normal, se graba en disco en la unidad y directorios actuales (desde donde se hizo funcionar el programa) un archivo de nombre "RESPALDO.DAT" en el que se guardan los datos que se tienen en el momento de salir. El archivo es leído por el programa cuando vuelve a ser corrido, si es que no se ha borrado o el programa no es corrido desde otro sitio distinto, ya que no se le encontraría.

Este almacenamiento de información final se hace con el objeto de poder seguir trabajando con los mismos datos después de alguna pausa que obligue a detener la ejecución del programa. El archivo "RESPALDO.DAT" se puede cargar con la opción F6.

Shift+F1 = Ayuda. Presenta un archivo con explicaciones de uso del programa, en el cual es posible moverse por medio de las teclas de navegación para hacerlo línea por línea, las teclas de avance y retroceso de página para hacerlo por pantallas (25 líneas) y las de inicio y fin para viajar a los extremos.

Shift + F2. Ver remanso. Se grafica en pantalla el remanso producido por el aforador aguas arriba en el canal, en la longitud que el usuario desee, hasta 10,000 metros.

Ctrl + Home. Borra todos los datos del programa, poniéndolos en blanco.

4.2 Recomendaciones

El procedimiento de uso normal del programa consiste en proporcionar los datos de la geometría del canal de llegada y de salida, los de las dimensiones del aforador y los hidráulicos de gastos y rugosidad para posteriormente realizar los cálculos, la tabla y la gráfica de calibración.

Los datos del aforador se pueden cambiar las veces que se quiera y volver a realizar los cálculos hasta lograr un diseño satisfactorio.

Se puede pedir una recomendación de las dimensiones del aforador, para lo cual es indispensable el dato del tirante máximo, ya que se busca no rebasar éste, dada una altura de escalón máxima. Es importante señalar que la recomendación no considera contracción en las paredes, dado que ello implicaría reducir el escalón.

Como se acaba de decir, el diseño del aforador es un procedimiento iterativo: se cambian las dimensiones propuestas hasta que se cumplan todas las condiciones para su buen funcionamiento. Hay que tomar en cuenta los siguientes hechos:

- Evitar que el aforador se ahogue. Es necesario revisar que el tirante máximo a la salida del aforador no sea nunca rebasado por el real en el canal de salida para todo el rango de gastos considerados. Tomando en cuenta esto, es imprescindible conocer el funcionamiento hidráulico del canal, esto es, la relación que existe entre el tirante y el gasto en el canal de salida para el rango de gastos por medir.
- Es necesario también revisar que el remanso provocado por el aforador para el gasto máximo no desborde el canal y se respete el bordo libre.

- La relación entre la carga total de energía en la sección de medición y la longitud de la garganta debe estar dentro del rango de 0.1 a 1.0. Lógicamente, el valor más bajo se da para el gasto mínimo y el mayor para el máximo. Si es posible, el límite superior de 1.0 se reduce a 0.5, pues así se asegura un mejor funcionamiento de la estructura. De hecho en la práctica, aunque funciona en forma satisfactoria de 0.5 a 1.0, la precisión en este rango disminuye un poco (Bos, Replogle, Clemmens, 1986).

Dicha condición de mantener la relación de carga a la longitud de la garganta dentro de cierto rango asegura la ocurrencia de líneas de flujo paralelas, lo que hace válido el procedimiento de calibración utilizado.

- La rampa de entrada (si es que existe escalón) y su transición, que debe ser en forma gradual, tienen como objeto el asegurar líneas de flujo relativamente paralelas, lo que permite la calibración analítica del aforador. Una relación o pendiente de entrada recomendada es la 2:1 a 3:1.

- La rampa de salida y la respectiva transición no son indispensables para el buen funcionamiento de la estructura si es que hay suficiente carga disponible, que podría perderse por el paso a través del aforador. La función de la rampa y transición de salida consiste en reducir la pérdida de carga y así asegurar que el aforador no se ahogue cuando la energía disponible no sea suficiente.

- La distancia hasta la sección de medición, tomada desde el inicio del aforador hacia aguas arriba, deber ser de por lo menos la carga máxima total de energía en ella (carga con Q máximo), si bien se recomienda que sea de dos a tres veces ésta.

Debido a que en la sección de medición se tienen velocidades del flujo bajas, la carga total de energía ahí es muy semejante al tirante, por lo que se puede tomar éste como referencia en vez de la energía total, dando, por seguridad, unos pocos centímetros de más.

- El diseño más sencillo de un aforador de garganta larga es el que tiene únicamente contracción en el fondo y no lateral; en tal caso se tendrá un vertedor de cresta ancha. El diseño, que es también el de construcción más sencilla, provoca la pérdida de carga más baja debido a que se presentan los tirantes o cargas menores en relación a la garganta del aforador; la pérdida de carga está en función directa a la de las cargas menores.

Por otra parte, para el rango completo de gastos por medir, la escala correspondiente tiene una longitud fija igual a la variación de los tirantes en el canal en la sección de medición, lo que establece una cierta distancia sobre la escala por cada litro por segundo. Si dicha dimensión no fuera suficiente para lograr la precisión deseada, sería necesario aumentarla mediante una contracción lateral.

La contracción lateral provocará que la variación de tirantes respecto al gasto se incremente. En consecuencia aumentará la pérdida de carga, lo que muy probablemente obligará a reducir la altura del escalón para no rebasar el libre bordo del canal con el nuevo remanso. Las dimensiones de la contracción lateral deben calcularse, entonces, por ensayo y error, tomando en cuenta la precisión deseada, las pérdidas de carga provocadas, los tirantes máximos permitidos en el canal y los permisibles aguas abajo del aforador para asegurar flujo modular.

4.3 Ejemplo

Para hacer más claro el uso del programa y el procedimiento de diseño se presenta el siguiente ejemplo:

Supongamos que se desea instalar un aforador de garganta larga en un canal con la siguiente geometría:

Plantilla	=	1.70 m
Talud	=	1.5:1
Pendiente	=	0.0001
n (Manning)	=	0.014
Gasto max.	=	5.0 m ³ /s
Libre bordo	=	0.30 m
Y normal	=	1.70 m

El primer paso consiste en introducir al programa los datos necesarios. (Lámina 10.)

Como se ve, se introdujeron los datos anteriores a la plantilla de captura del programa. Puesto que en este caso el canal aguas arriba es el mismo que el canal aguas abajo, tenemos: $B_1=B_2$ y $Z_1=Z_2$, como no existe caída, entonces $\Delta P_{disp} = 0.00$.

El gasto máximo es el de diseño del canal; y el mínimo puede considerarse como el 10% del máximo, aunque normalmente el gasto mínimo que transporta un canal rara vez es menor a una tercera parte del canal de diseño.

La rugosidad del aforador se da en metros (rugosidad absoluta). No es la misma que la de Manning, y resulta indispensable para realizar los cálculos. La rugosidad se escogió de 0.0020 metros, que es la máxima para concreto alisado. Esto se consultó con la ayuda del programa.

El tirante normal se obtiene con la tecla de función "F1". Es de 1.7175 m; pero, según datos del proyecto, mide 1.70 m. La diferencia probablemente se debe al redondeo.

```

PROGRAMA DE DISEÑO DE AFORADORES DE GARGANTA LARGA

NECESIDADES HIDRAULICAS
Gama de caudales a medir          Nivel del agua

Q mínimo = 0.5000                Y normal =* 1.7175
Q máximo = 5.0000                Rugosidad (Manning)= 0.01400
Q intervalo= 0.5000              Pendiente del canal = 0.00010

GEOMETRIA DEL CANAL              GEOMETRIA DEL AFORADOR
B1 = 1.70  B2 = 1.70            BC =          ZC =
Z1 = 1.50  Z2 = 1.50            AL =          BL =          TL =
P disp = 0.00                    DL =          P1 =          P2 =*
EM =*                             EN =*          Rugosidad= 0.00200000

* DATOS NO PROPORCIONADOS POR EL USUARIO
F1= Calcular Y normal            F2= Dar recomendación
F3= Ver tabla de calibración     F4= Ver croquis del aforador
F5= Realizar cálculos            F6= Cargar datos
F7= Imprimir resultados          F8= Salvar datos
F9= Ver gráfica de calibración   Shift+F10= TERMINAR

Shift+F1 = Ayuda                 Shift+F2 = Ver remanso          Ctrl+Home = Iniciar todo

```

Una vez teniendo capturados los datos anteriores, se puede pedir una recomendación al programa con la tecla de función "F2". No hay que olvidar que esta opción fuerza al uso de escalón sin contracciones laterales. (El resultado lo tenemos en la lámina 11.)

Los función "F2" da, como propone, una altura de escalón y las dimensiones de AL, BL, TL, y DL.

Después se realizan los cálculos de la calibración con la tecla de función "F5". (La tabla de calibración resultante es la de la lamina 12.)

En la tabla de calibración puede verse que la profundidad máxima en el canal de salida para un gasto de 5.0 m³/s es de 1.9095 m. Si se considera que el canal funciona con su tirante normal, es decir, que no hay ningún represamiento o algún obstáculo que eleve el nivel de operación normal, entonces el tirante en el canal de salida será de 1.7175 m (tirante normal, para un gasto de 5.0 m³/s), que es menor al máximo que permite un funcionamiento correcto del aforador (1.9095 m), por lo que el aforador funcionará bien (sin ahogarse).

Lo que puede revisarse enseguida de comprobar que el aforador no se ahogue, es si las dimensiones propuestas de AL, BL, TL, y DL cumplen con los requerimientos de diseño:

Lámina 13 Pantalla de captura del ejemplo (2)

PROGRAMA DE DISEÑO DE AFORADORES DE GARGANTA LARGA

NECESIDADES HIDRAULICAS

Gama de caudales a medir Nivel del agua

Q mínimo = 0.5000 Y normal =* 1.7175
 Q máximo = 5.0000 Rugosidad (Manning)= 0.01400
 Q intervalo= 0.5000 Pendiente del canal = 0.00010

GEOMETRIA DEL CANAL B1 = 1.70 B2 = 1.70 Z1 = 1.50 Z2 = 1.50 P disp = 0.00	GEOMETRIA DEL AFORADOR BC = 5.90 ZC = 1.50 AL = 0.60 BL = 3.50 TL = 1.10 DL = 8.40 P1 = 1.40 P2 =* 1.40 EM =* 6.00 EN =* 2.50 Rugosidad= 0.00200000
---	---

* DATOS NO PROPORCIONADOS POR EL USUARIO

F1= Calcular Y normal	F2= Dar recomendación
F3= Ver tabla de calibración	F4= Ver croquis del aforador
F5= Realizar cálculos	F6= Cargar datos
F7= Imprimir resultados	F8= Salvar datos
F9= Ver gráfica de calibración	Shift+F10= TERMINAR

Shift+F1 = Ayuda Shift+F2 = Ver remanso Ctrl+Home = Iniciar todo

Lámina 14 Tabla de calibración del ejemplo (1)

Página 1 de 1

CAUDAL	TIRANTE DE MEDICION	FROUDE	H1/TL	MAX PROF. CANAL DE SALIDA	PERDIDA DE CARGA	AHOGA-MIENTO Maximo
M3/S	M			M	M	
0.5000	1.5363	0.02631	0.124	1.5058	0.0305	98.0130
1.0000	1.6124	0.04776	0.193	1.5718	0.0405	97.4849
1.5000	1.6746	0.06638	0.250	1.6273	0.0472	97.1764
2.0000	1.7290	0.08296	0.299	1.6767	0.0521	96.9743
2.5000	1.7781	0.09795	0.344	1.7218	0.0559	96.8343
3.0000	1.8233	0.11168	0.385	1.7637	0.0591	96.7342
3.5000	1.8654	0.12435	0.423	1.8031	0.0616	96.6613
4.0000	1.9049	0.13613	0.459	1.8403	0.0638	96.6078
4.5000	1.9423	0.14714	0.493	1.8757	0.0657	96.5685
5.0000	1.9779	0.15747	0.525	1.9095	0.0673	96.5400

- TL (longitud de la garganta). Para verificar si es correcta se utiliza la columna de carga total entre longitud de garganta (H1/TL), la cual debe encontrarse entre 0.1 para el gasto mínimo y 1.0 para el gasto máximo; es recomendable bajar el límite de 1.0 a 0.5. En este caso, para el gasto de operación máximo (5.0 m³/s) la

relación H1/TL es de 0.525, por lo que se considera correcta la longitud de TL, la cual es de 1.10 m.

- DL (longitud horizontal de la rampa de salida). Se recomienda que la pendiente de la rampa de salida (EM) sea de entre 4:1 y 8:1. Si es de 6:1, la longitud de la rampa es correcta. DL = 8.40 m.

- BL (longitud horizontal de la rampa de entrada). En forma similar a la rampa de salida, se recomienda que su pendiente (EN) esté entre 2:1 a 3:1. Si es de 2.5:1, la longitud BL se considera aceptable. BL = 3.50 m.

- AL (distancia del punto de medición al inicio de la transición de entrada). En este caso se tienen dos normas, y se debe tomar la que dé la distancia mayor. La primera es que sea una vez H1 (carga total en el punto de medición, incluyendo carga de velocidad). H1 lo podemos calcular multiplicando la relación H1/TL por TL. Para el gasto máximo H1/TL = 0.525 y TL = 1.10 m, entonces H1 = 0.5775 m. AL = puede ser de 0.60 m (redondeando a los 5 cm) según esta regla. Una segunda regla dice que la distancia del punto de medición al final de la transición de entrada debe ser de por lo menos 2 a 3 veces H1; según esto, $AL > o = 3H1 - BL = -1.7675$ m. El ultimo resultado es negativo, por lo que tomamos el resultado de la primera regla, 0.60 m, que es lo que propone el programa, entonces, AL = 0.60 m.

Habiendo revisado que se tengan las proporciones correctas del aforador y que éste no se ahogue, es conveniente revisar el efecto del mismo aguas arriba (el remanso). Utilizando "Mayúsculas+F2" vemos el remanso provocado para el gasto máximo hasta una distancia de 10,000 m. (Esto se aprecia en la lámina 13.)

Como se puede ver en la gráfica, el tirante se eleva de 1.71 m hasta 1.9779 e invade casi en su totalidad el libre bordo, ya que la profundidad completa del canal es de 2.0 m y esto se prolonga en una forma considerable hacia aguas arriba, por lo que es conveniente reforzar el tramo de canal o bajar el tamaño del escalón.

Si el tamaño del escalón es disminuido de 1.40 m a 1.30 m, para seguir proponiendo un escalón solamente (sin contracciones laterales) se apretará la "S" cuando el programa pregunta si se desea que se calculen las variable AL, BL, TL, DL, EM y EN. Después de esto se realizarán los cálculos ("F5") y se revisará nuevamente si las proporciones de la estructura son aceptables. (La tabla resultante de los cálculos y la pantalla de captura se muestran en las láminas 14 y 15, respectivamente.)

- TL (longitud de la garganta). H1/TL es de 0.495 (para 5.0 m³/s), por lo que se considera correcta la longitud de TL, la cual es de 1.20 m.

- DL (longitud horizontal de la rampa de salida). EM = 6:1, por lo cual la longitud de la rampa es correcta. DL = 7.80 m.

Lámina 15 Representación del remanso en ejemplo (1)

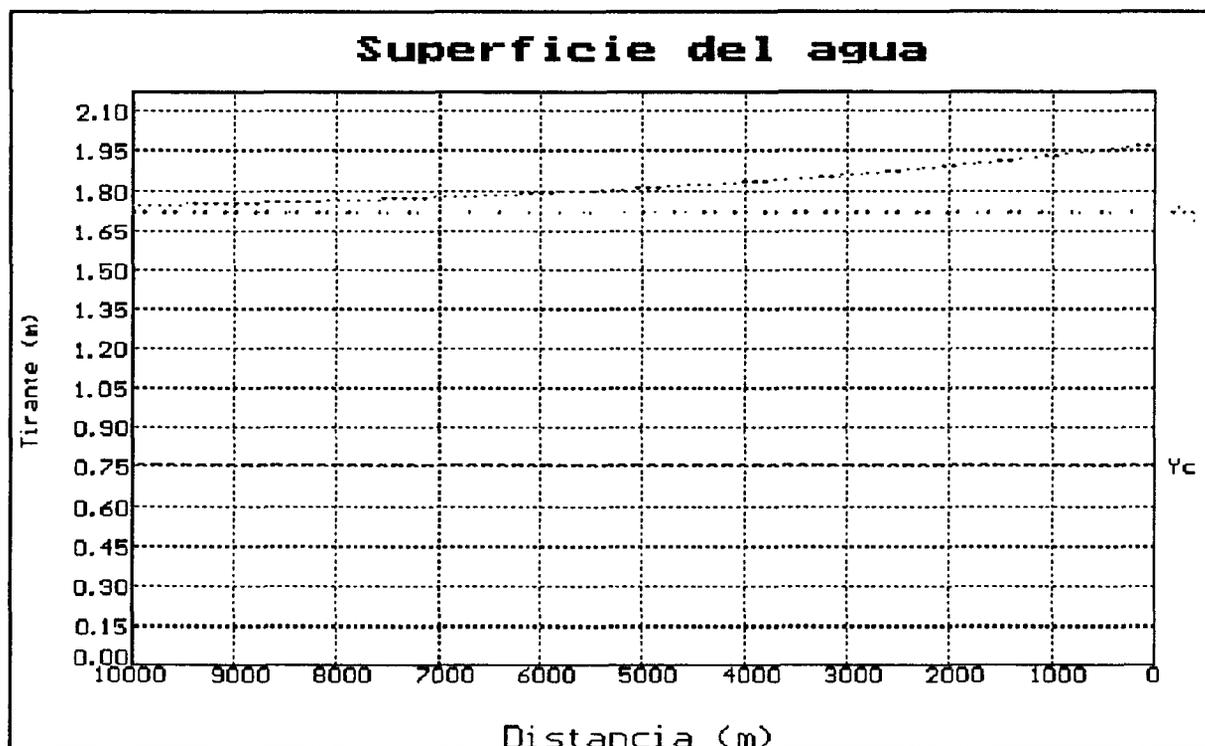


Lámina 16 Tabla de calibración del ejemplo (2)

Página 1 de 1

CAUDAL M ³ /S	TIRANTE DE MEDICION M	FROUDE	H1/TL	MAX PROF. CANAL DE SALIDA M	PERDIDA DE CARGA M	AHOGA- MIENTO Máximo
0.5000	1.4411	0.02988	0.118	1.4103	0.0307	97.8674
1.0000	1.5194	0.05379	0.183	1.4788	0.0405	97.3271
1.5000	1.5834	0.07430	0.236	1.5363	0.0470	97.0230
2.0000	1.6392	0.09240	0.283	1.5873	0.0517	96.8304
2.5000	1.6895	0.10866	0.325	1.6338	0.0553	96.7015
3.0000	1.7358	0.12346	0.363	1.6770	0.0582	96.6127
3.5000	1.7787	0.13704	0.399	1.7174	0.0606	96.5507
4.0000	1.8191	0.14961	0.433	1.7556	0.0625	96.5074
4.5000	1.8573	0.16131	0.464	1.7918	0.0642	96.4776
5.0000	1.8936	0.17226	0.495	1.8265	0.0657	96.4578

- BL (longitud horizontal de la rampa de entrada). EN es de 2.5:1, la longitud BL se considera aceptable. BL = 3.25 m.

- AL (distancia del punto de medición al inicio de la transición de entrada). H1 (carga total en el punto de medición, incluyendo carga de velocidad). Es igual a

PROGRAMA DE DISEÑO DE AFORADORES DE GARGANTA LARGA			
Gama de caudales a medir		NECESIDADES HIDRAULICAS	
		Nivel del agua	
Q mínimo =	0.5000	Y normal =*	1.7175
Q máximo =	5.0000	Rugosidad (Manning)=	0.01400
Q intervalo=	0.5000	Pendiente del canal =	0.00010
GEOMETRIA DEL CANAL		GEOMETRIA DEL AFORADOR	
B1 =	1.70	B2 =	1.70
Z1 =	1.50	Z2 =	1.50
P disp =	0.00	BC =	5.60
		ZC =	1.50
		AL =	0.65
		BL =	3.25
		TL =	1.20
		DL =	7.80
		P1 =	1.30
		P2 =*	1.30
		EM =*	6.00
		EN =*	2.50
		Rugosidad=	0.00200000
* DATOS NO PROPORCIONADOS POR EL USUARIO			
F1=	Calcular Y normal	F2=	Dar recomendación
F3=	Ver Tabla de calibración	F4=	Ver croquis del aforador
F5=	Realizar cálculos	F6=	Cargar datos
F7=	Imprimir resultados	F8=	Salvar datos
F9=	Ver gráfica de calibración	Shift+F10=	TERMINAR
Shift+F1 =	Ayuda	Shift+F2 =	Ver remanso
		Ctrl+Home =	Iniciar todo

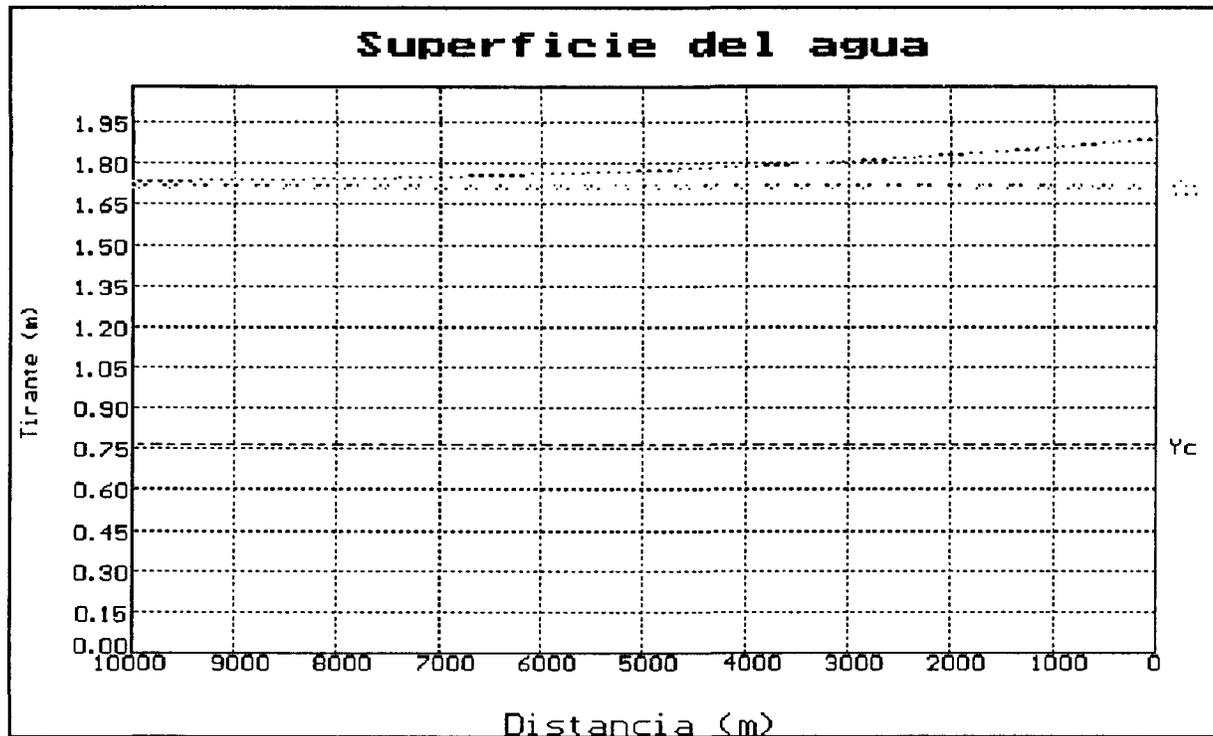
H1/TL por TL. Si para el gasto máximo $H1/TL = 0.495$ y $TL = 1.20$ m, entonces, $H1 = 0.594$ m. $AL = 0.60$ m (redondeando a los 5 cm).
 $AL > 0 = 3H1 - BL = -1.468$ m. Por lo que tomamos el resultado de la primera regla, 0.60 m. Si el programa propuso $AL = 0.65$ m, se puede dejar así, ya que prácticamente no hay diferencia y no vale la pena realizar los cálculos otra vez. $AL = 0.65$.

Revisadas las proporciones correctas del aforador y que éste no se ahogue, se revisa entonces el remanso provocado. Según se ve, éste baja aproximadamente 10 cm, dándonos un ligero margen para libre bordo, aunque ello implica reducir el margen de seguridad para el ahogamiento. (Lámina 16.)

Finalmente, podemos dejar el aforador con las siguientes dimensiones:

BC	=	5.60 M
ZC	=	1.5:1
AL	=	0.65 M
BL	=	3.25 M
TL	=	1.20 M
DL	=	7.80 M
P1	=	1.30 M
P2	=	1.30 M

Lámina 18 Representación del remanso en ejemplo (2)



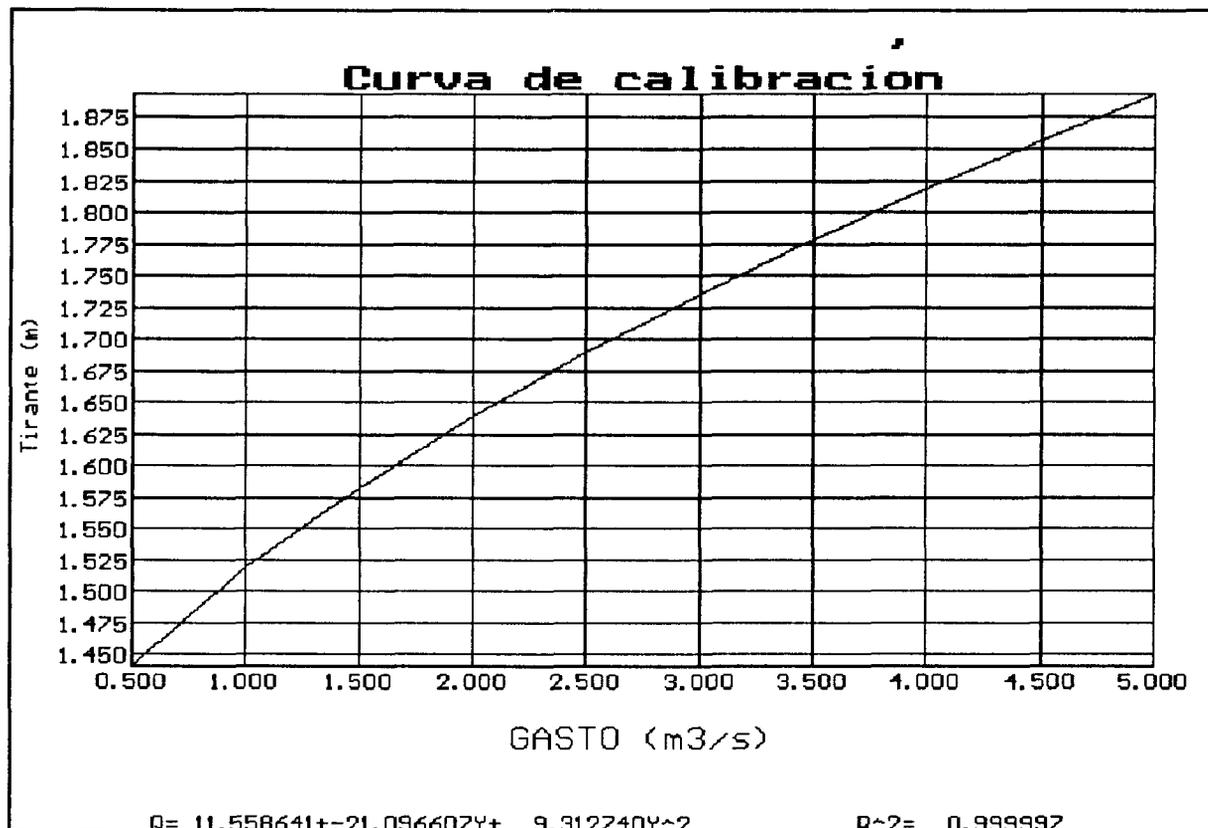
(La tabla de calibración final del aforador se observa en la lámina 14.)

(La gráfica de calibración se presenta en la lámina 17.)

En este caso no se revisó la sensibilidad de la estructura. En algunos otros es necesario incrementar la precisión de las mediciones. Ello puede lograrse incrementando la sensibilidad al colocar contracciones laterales. La sensibilidad la podemos definir como $\Delta H/\Delta Q$. Como se puede observar en la gráfica de calibración, la sensibilidad cambia con el gasto, y es menor cuando el gasto es máximo; entonces, se puede tomar como referencia la sensibilidad a gasto máximo, ya que cualquier otra es mayor.

Cuando se coloquen contracciones laterales, se debe considerar que elevan el nivel aguas arriba del aforador, por lo que también se incrementa la pérdida de carga necesaria para mantener un flujo modular. Es recomendable colocar las contracciones laterales cuando se tenga suficiente carga que perder, como es el caso de una caída.

Lámina 19 Curva de calibración del ejemplo



BIBLIOGRAFIA

Ackers, P., White; W. R., Perkins; J. A., Harrison, *Weirs and Flumes for Flow Measurement*, New York, John Wiley & Sons, 1980.

Cardoso Torres, José Octavio; Martínez Martínez, Arnulfo; Vázquez Loera, Juventino, "Estudio experimental de aforadores de cresta ancha", revista *Ingeniería Hidráulica en México*, IMTA, CNA, Cuernavaca, Morelos, septiembre-diciembre de 1989.

Harrison, J.M., "Boundary layer displacement thickness on flat plates", *Journal of hydraulics division*, ASCE, E.U.A., julio, 1967.

Marinus G. Bos; John A. Replogle; Albert J. Clemmens, *Aforadores de caudal para canales abiertos*, The Netherlands, Wageningen, ILRI Publication 38, 1986.

Martínez Austria, Polioptro, *Aforadores de garganta larga*, México, D.F., (Investigación realizada en la DEPFI - UNAM para la CPNH, informe interno), 1981.

Schlichting, H., *Boundary layer theory*, New York, McGraw Hill Book Co., 1960.

Skertchly Molina, Leslie, *Manual de diseño de estructuras de aforo*, Cuernavaca, Morelos, IMTA, CNA, 1988.

Sotelo, A. G., *Manual para el aforo de corrientes*, México D.F., UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios Superiores, 1970.

Diseño de aforadores de garganta larga, se terminó de imprimir en el mes de enero de 1992 en el Taller de Luz y Línea S.A. de C.V., ubicado en la calle de Madero 526, Col. Lomas de Miraval, Cuernavaca, Mor. La Edición consta de 500 ejemplares y su cuidado estuvo a cargo de la Subcoordinación Editorial del IMTA.