

Nota técnica

Estudio experimental de aforadores de cresta ancha

José Octavio Cardoso Torres
Arnulfo Martínez Martínez
Juventino Vázquez Loera

Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, CNA

Leslie Skertchly Molina

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

El aforador de cresta ancha descrito en un artículo anterior de esta publicación es muy adecuado para la medición del agua de riego. Ofrece las ventajas de una fácil construcción, aplicable a diferentes formas de sección transversal y materiales del canal. Como complemento de lo expuesto en el referido artículo, aquí se presentan los resultados de un estudio experimental que permite corroborar las calibraciones allí consignadas, además del comportamiento de las estructuras cuando el agua contiene materiales en suspensión.

Antecedentes

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), inició en 1985 un programa de medición del agua de riego; para ello, fue necesario revisar el estado del arte de las técnicas y los aparatos de medición. En esto se consideraron las técnicas de práctica simple y los aparatos de medición con características sencillas de instalación, construcción y operación.

Entre las estructuras de medición que cumplen con esas características destaca un tipo de aforador de garganta ancha, cuyo diseño se debe al United States Water Conservation Laboratory del United States Bureau of Reclamation. Este medidor de flujo consiste en una elevación de la plantilla del canal que se logra muy fácilmente y para cuya construcción sólo requiere del cálculo de dos dimensiones. Su operación es muy sencilla, porque su ley carga-gasto es única, es decir, para un aforador de dimensiones dadas, a una carga de funcionamiento corresponde un solo gasto, siempre que el aforador no esté ahogado. Tomando en cuenta las ventajas que ofrece y la pertinencia de usarlo en la medición del agua en las zonas de riego del país, se consideró conveniente estudiar experimentalmente su funcionamiento hidráulico. Para ello, el IMTA

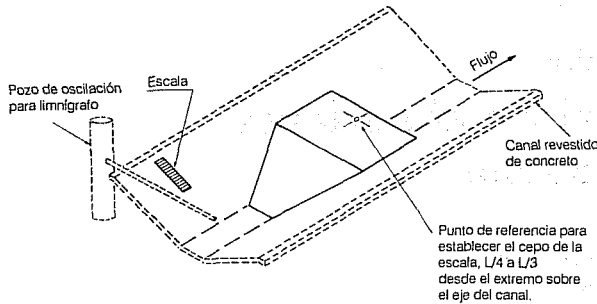
solicitó a la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la Comisión Nacional del Agua, la realización del trabajo.

Descripción

El aforador de cresta ancha consiste en un estrechamiento de la sección transversal del canal mediante la elevación de su plantilla hasta una altura p , en un tramo de longitud L ; de esta manera, se forma un prisma trapecial adherido al canal con rampas de acceso y salida para suavizar el obstáculo (véase ilustración 1). El estrechamiento de la sección transversal modifica el régimen del flujo, de subcrítico a supercrítico y después nuevamente a subcrítico. La sección de control, el tirante crítico, se forma sobre la cresta ancha del aforador. En estas condiciones, la relación tirante-gasto es independiente de la rugosidad del canal; lo mismo ocurre en el caso de la relación carga hidráulica-gasto, si se instala la escala o limnómetro a una distancia L_a de la rampa (véase ilustración 1), es decir:

$$L_a = Y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1)$$

1. Geometría del aforador de cresta ancha



En el cuadro 1 se presenta la información geométrico- hidráulica para tres tipos de aforadores, con anchos de plantilla de 1 pie (0.3048m) y un gasto de operación máximo de 500 l/s. Los parámetros p y L (altura y longitud de la cresta) son función del gasto de diseño y de la carga hidráulica.

1. Carga hidráulica-gasto para los aforadores FA1M, FA2M y FA3M

Gasto l/s	forma de Canal A $h_1 = 30.5 \text{ z} = 1:1$		
	FA1M $h = 76.2$ $L = 61.0$ $p_1 = 22.9$	FA2M $h = 91.4$ $L = 45.7$ $p_1 = 30.5$	FA3M $h = 106.6$ $L = 30.5$ $p_1 = 38.1$
10	3.89	3.50	3.17
15	5.06	4.53	4.11
20	6.06	5.42	4.93
25	6.93	6.24	5.68
30	7.75	6.99	6.38
35	8.52	7.70	7.03
40	9.25	8.36	7.64
45	9.94	8.99	8.23
50	10.59	9.59	8.79
60	11.81	10.73	9.85
70	12.94	11.78	10.83
80	14.00	12.77	11.76
90	15.00	13.70	12.65
100	15.90	14.60	13.50
125	18.10	16.70	15.40
150	20.10	18.60	17.20
175	21.90	20.30	18.90
200	23.60	21.90	20.40
225	25.20	23.40	21.90
250	26.70	24.90	23.30
275	28.10	26.20	24.60
300	29.40	27.50	25.80
325	30.70	28.80	27.00
350	32.00	30.00	28.20
375	33.20	31.20	29.30
400	34.30	32.30	30.40
450	36.50	34.40	32.50
500	38.60	36.40	34.40

Valores en cm.
Las cargas hidráulicas corresponden a un ahogamiento de 85%.

Objetivo del estudio

El objetivo del estudio es efectuar el análisis experimental del comportamiento hidráulico del aforador de cresta ancha tipo FA2M (véase cuadro 1) para diferentes gastos de operación, así como determinar cualitativamente el efecto hidráulico de la estructura respecto a la retención de sedimentos.

Diseño del modelo hidráulico

La mayoría de los problemas se puede resolver mediante una combinación de técnicas analíticas y modelos físicos. En el caso del vertedor de cresta ancha, las técnicas analíticas ya se expusieron en un artículo precedente¹, por lo que ahora conviene describir el empleo de un modelo físico que permita constatar lo que la técnica analítica predice.

En la construcción de un modelo físico se requiere cumplir con dos condiciones para el modelo y el prototipo: (a) similitud geométrica y (b) similitud dinámica. La primera se satisface al establecer el cociente entre una dimensión conocida del modelo y la correspondiente al prototipo, que es la escala del modelo. El resto de las dimensiones se debe ajustar a dicha escala. La segunda condición se cumple al escalar las ecuaciones o leyes que gobiernan el fenómeno que se estudia. Esto se consigue escalando las fuerzas que intervienen en él, como por ejemplo, los números característicos. En el fenómeno que aquí se modela, de acuerdo con la teoría, existen dos números adimensionales característicos:

$$\Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2)$$

$$\mathfrak{S} = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

que expresan la magnitud relativa de las fuerzas inerciales respecto a las viscosas ($\Re$) y a las gravitacionales ($\mathfrak{S}$).

Designando con los subíndices p , m y e , respectivamente, a las variables que corresponden al prototipo, al modelo y a la escala, las condiciones de similitud se pueden expresar como:

$$\Re = \frac{U_p L_p}{\nu_p} = \frac{U_m L_m}{\nu_m}; \frac{U_e L_e}{\nu_e} = 1 \quad (4)$$

$$\mathfrak{S} = \frac{U_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{U_m}{\sqrt{g_m L_m}}; \frac{U_e}{\sqrt{g_e L_e}} = \frac{U_m}{\sqrt{g_m L_m}} = 1 \quad (5)$$

donde U y L son la velocidad y una dimensión característica, respectivamente, g es la aceleración debida a la gravedad y ν , la viscosidad cinemática. Estas relaciones establecen lo que se conoce como leyes de similitud cinemática o de Reynolds y dinámica o de Froude. De la última condición se obtiene

$$U_e = \sqrt{g_e L_e} \quad (6)$$

que se sustituye en la primera condición:

$$\frac{\sqrt{g_e L_e} L_e}{\nu_e} \quad (7)$$

considerando que $\frac{g_m}{g_p} = g_e = 1$;

$$L_e = \nu_e^{2/3} \quad (8)$$

Esto último significa que las velocidades que se midan son una función de la escala geométrica $\sqrt{L_e}$ y que para lograr una equivalencia total entre el modelo y el prototipo se requiere que la viscosidad del fluido que se emplee en el modelo sea diferente a

la del prototipo. Esto es difícil, ya que la viscosidad cinemática de los fluidos comúnmente usados es muy reducida, lo cual se revierte en la necesidad de que el modelo sea de la misma escala que el prototipo. Esto anula toda utilidad de los modelos a escala.

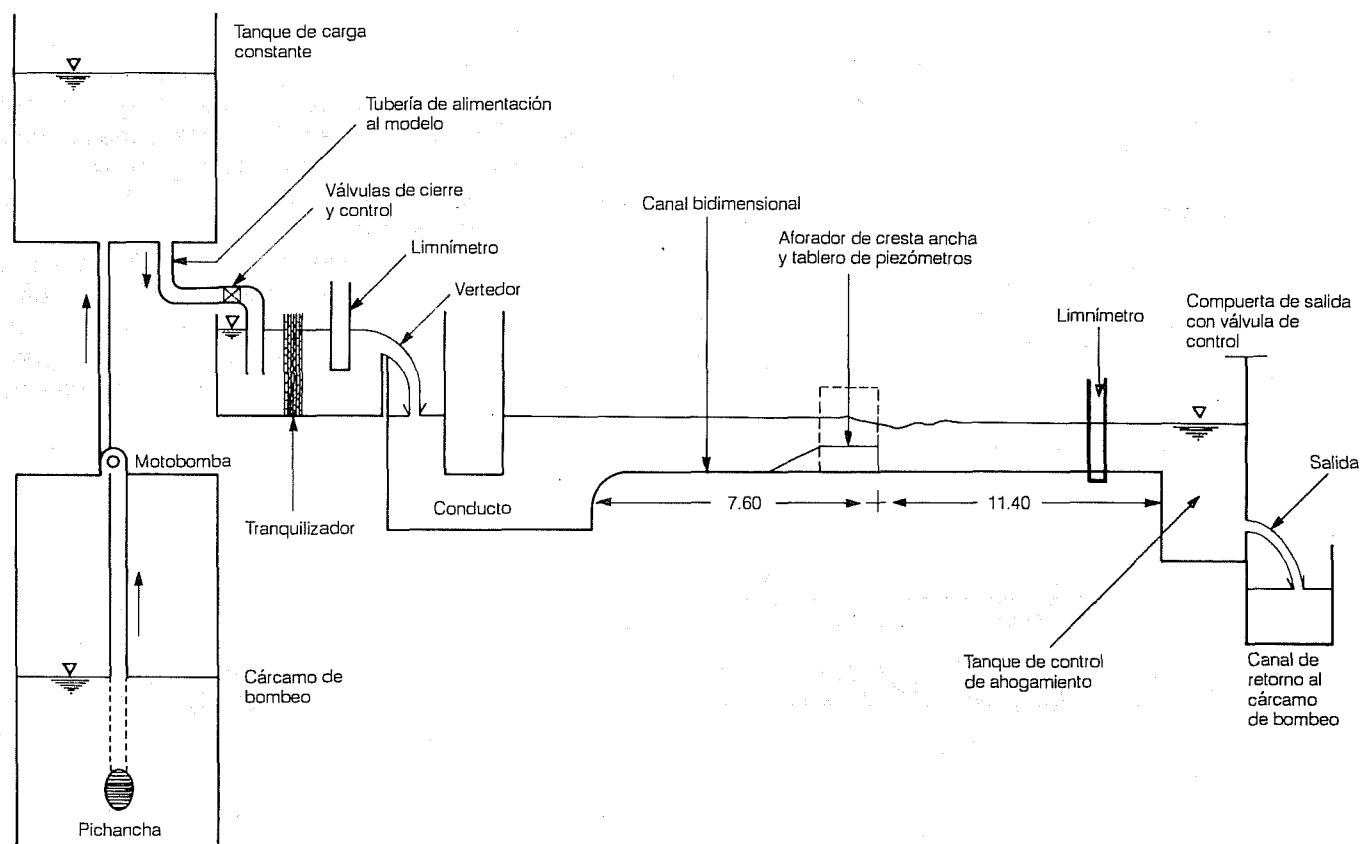
Sin embargo, intuitivamente se puede pensar que los efectos viscosos son mucho menos importantes que los gravitacionales. Entonces sólo es necesario cumplir con la similitud de Froude. En cuanto a la similitud de Reynolds, conviene estar dentro de un rango de validez, es decir, que si el flujo en el prototipo es turbulento, debe serlo también en el modelo, etcétera. Así, tomando como condición la similitud dinámica, esto es, escalar el número de Froude, las escalas se pueden expresar como sigue:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m}; \quad A_e = L_e L_e \quad (9)$$

$$U_e = \sqrt{L_e} \quad (10)$$

$$Q_e = L_e L_e \sqrt{L_e} = L_e^{5/2} \quad (11)$$

2. Geometría del canal de flujo bidimensional



Acotaciones en metros

$$\begin{aligned}
 n_e &= \frac{1}{U_e} R_e^{2/3} S_e^{1/2} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{L_e}} (l_e)^{2/3} \left(\frac{L_e}{L_e} \right)^{1/2} \\
 &= \frac{l_e^{2/3}}{L_e^{2/3}} = L_e^{1/6}
 \end{aligned} \quad (12)$$

Descripción del modelo

El modelo hidráulico del aforador se construyó en el canal de flujo bidimensional del Laboratorio de Modelos Hidráulicos de Ingeniería Experimental; su longitud es de 18.90 m por un 1.00 m de ancho (véase ilustración 2). Para el efecto, se presentó un canal trapecial de 0.25 m de ancho, 0.375 m de altura, taludes 1: 1 y pendiente horizontal. En el caso particular del aforador FA2M, su escala geométrica es la siguiente:

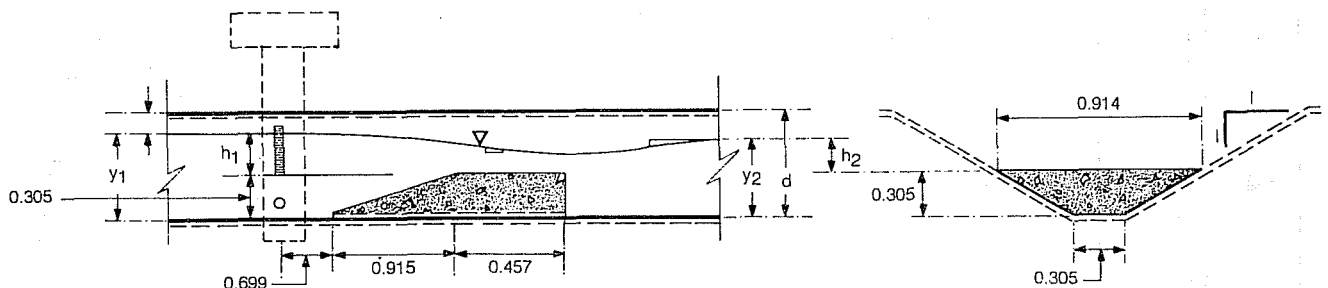
$$L_e = \frac{0.305}{0.25} = 1.22 \quad (13)$$

De acuerdo con la ley de similitud de Froude, las escalas restantes serían las que se indican a continuación:

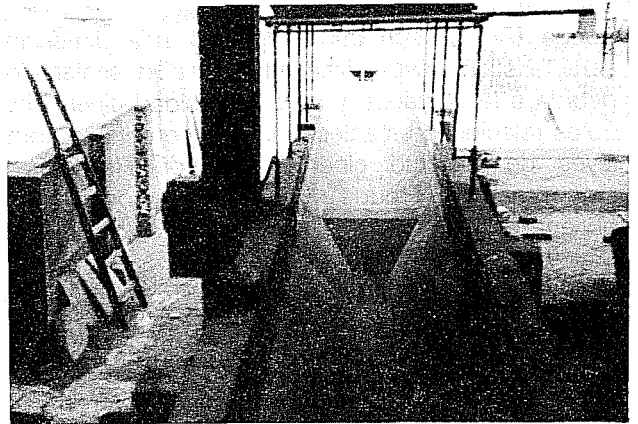
Escala	Valor
Longitudes	$L = 1.220$
Velocidades	$V = L^{1/2} = 1.105$
Gastos	$Q = L^{5/2} = 1.644$
Rugosidades	$n = L^{1/6} = 1.034$

En la ilustración 3 se representa la geometría del aforador, en prototipo y en modelo y de la 4 a la 9, se muestran los detalles del canal bidimensional y el aforador. El perfil hidráulico se obtiene de los

3. Geometría de aforador de cresta ancha tipo FA2M



Prototipo



4. Canal de flujo bidimensional del Laboratorio de Modelos Hidráulicos de Ingeniería Experimental. (Vista hacia aguas abajo)

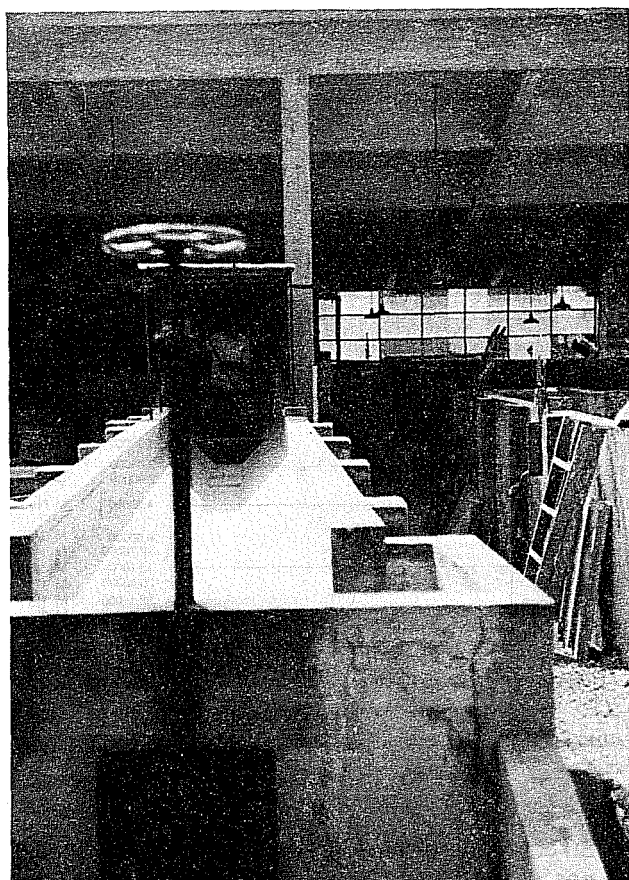
piezómetros instalados en el aforador del modelo (véase ilustración 7).

Ensayes realizados

Con base en las recomendaciones de diseño (véase cuadro 1), se estableció un ahogamiento límite de 0.85, es decir:

$$\frac{h_2}{h_1} = 0.85 \quad (14)$$

donde h_1 y h_2 son las cargas hidráulicas referidas a la cresta, aguas arriba y aguas abajo, en ese orden. El estudio se amplió posteriormente para la característica de descarga libre y otros grados de ahogamiento (0.75, 0.65, 0.55 y 0.40). Para el rango de operación de 10 a 100 l/s, se obtuvieron las condiciones teóricas de frontera que se representarían en el modelo hidráulico como Y_1 y Y_2 (véase ilustración 3). La condición de frontera hidráulica de aguas abajo (Y_2) sí pudo representarse, con lo cual se cumplió la primera



5. Canal de flujo bidimensional del Laboratorio de Modelos Hidráulicos de Ingeniería Experimental. (Vista hacia aguas arriba)



6. Modelo hidráulico del aforador de cresta ancha. (Vista hacia aguas abajo)

condición de operación, pero no la de aguas arriba, (Y_1) para obtener el grado de ahogamiento recomendado; después se logró determinar la relación de ahogamiento, al variar los tirantes teóricos Y_1 y Y_2 , con lo que se cubrió la segunda condición.

Para estimar cualitativamente el efecto hidráulico de la estructura en cuanto a la retención de sedimentos, se utilizaron como trazadores arena de mina (véase ilustración 8) y arena volcánica (véase ilustración 9), a fin de simular el arrastre de fondo y se colocaron en tres sitios diferentes, aguas arriba del aforador (véanse ilustraciones 10 y 11).

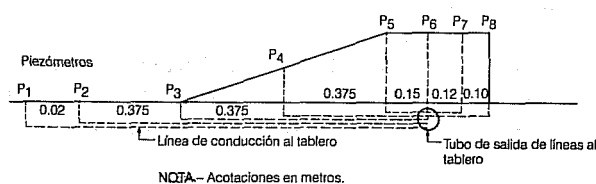
• Comportamiento hidráulico del aforador

Las variaciones teórica y experimental de carga hidráulica-gasto del aforador se aprecian en la ilustración 12, y el detalle, en los cuadros 2 al 6; las columnas 1 a 4 y 5 a 8 corresponden al análisis teórico del prototipo y del modelo, respectivamente; las columnas 9 a 12 y 13 a 16, a los resultados obtenidos del estudio experimental y del prototipo, en ese orden, y la 17 al grado de ahogamiento real.

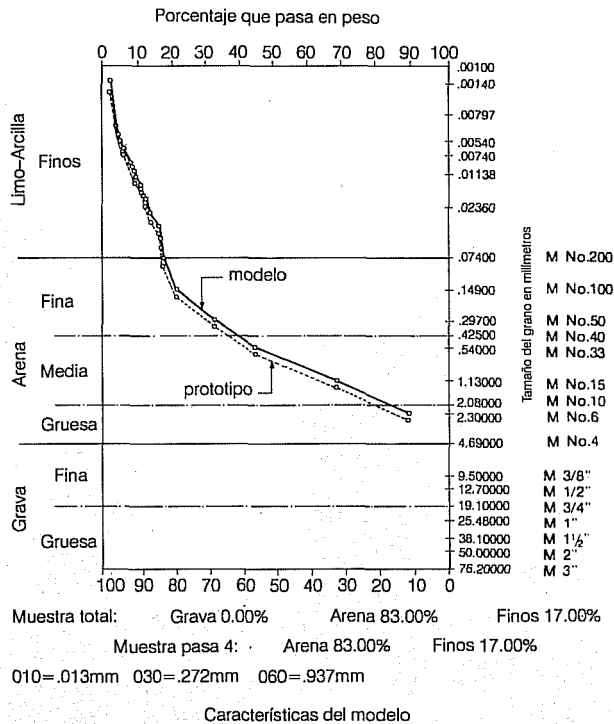
En los cuadros 7 al 11 se muestran las lecturas piezométricas derivadas del modelo hidráulico, que sirvieron de base para obtener la información anterior. En las columnas 1 a 4, se presentan los resultados del análisis teórico; de la 5 a la 14, los de operación; en las 15 y 16, las condiciones de frontera hidráulica y en la 17, el grado de ahogamiento del aforador; todos estos datos son para cada gasto de operación.

Conforme a los resultados obtenidos del modelo hidráulico, las variaciones teórica y experimental entre la carga hidráulica-gasto del aforador son semejantes; la diferencia entre ambos quizá se deba a un efecto de escala o a cierta falta de precisión en las mediciones.

7. Posición de los piezómetros en el modelo hidráulico de aforador tipo FA2M



8. Granulometría de la arena de mina



- Efecto hidráulico de la estructura en cuanto a retención de sedimentos

En los estudios realizados del modelo hidráulico, se consideraron los siguientes factores:

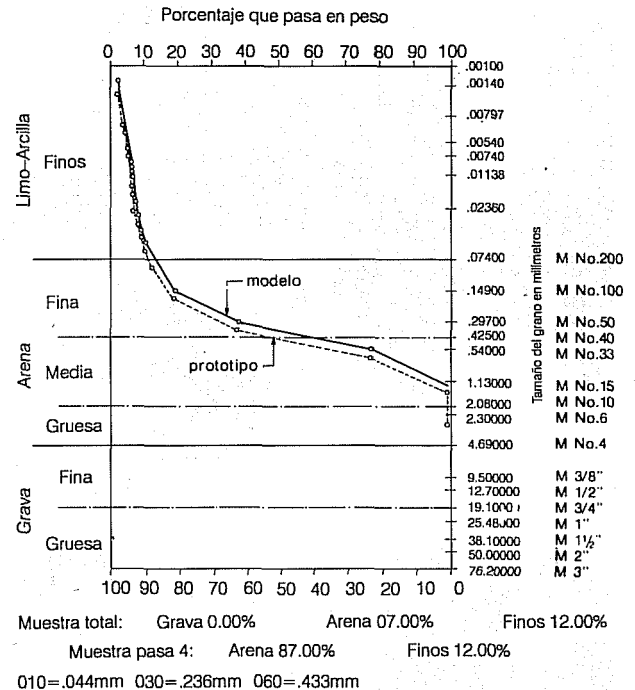
- Tamaños de materiales: arena de mina y volcánica.
- Gastos de operación de 10, 50 y 100 l/s.
- Ahogamientos de 0%, 40% y 80%.
- Tiempo de operación de 33.15 min.

Los efectos hidráulicos observados en esta fase se consignan en el cuadro 12, así como en las ilustraciones correspondientes a cada ensaye realizado. De acuerdo con los tamaños del material utilizado, se concluye que la estructura no retiene el material producto de la erosión, excepto el que se produce en las zonas donde la velocidad del flujo es mínima, es decir, en las orillas del canal donde comienza el talud y al inicio de la parte horizontal del aforador.

Conclusiones

En los estudios efectuados en laboratorio respecto al aforador de cresta ancha tipo FA2M, para un rango de operación de 10 a 100 l/s, se obtuvieron los siguientes resultados:

9. Granulometría de la arena volcánica



- Su comportamiento hidráulico es similar al obtenido por el US Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona (véase ilustración 12), para un ahogamiento de 85%. Quizá la diferencia radique en algún efecto de escala o en cierta falta de precisión en las mediciones.
- Adicionalmente, se obtuvo la relación entre la

12. Funcionamiento hidráulico fluvial del aforador de cresta ancha FA2M, al utilizar como trazador arena volcánica y arena de mina

Ensayo Q(l/s) Ahogamiento % Observaciones

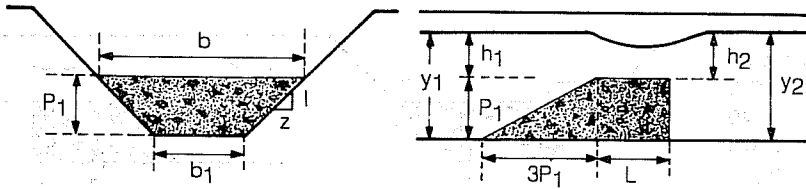
(Arena volcánica, ilustración 9)

1	10	0	No se produce arrastre de material
2	10	40	
3	10	85	
4	50	0	Arrastre y retención mínima de material
5	50	40	No se produce arrastre de material
6	50	85	
7	100	0	Erosión, arrastre y no retención de material
8	100	40	
9	100	85	

(Arena volcánica, ilustración 8)

10	10	0	No se produce arrastre de material
11	10	40	
12	10	85	
13	50	0	
14	50	40	
15	50	85	
16	100	0	
17	100	40	
18	100	85	

Parámetro	Prototipo	Modelo
b_1 (m)	0.305	0.250
b (m)	0.914	0.749
L (m)	0.457	0.375
P_1 (m)	0.305	0.250



Escalas
 $Le = 1.220$
 $Qe = 1.644$

2. Características geométrico-hidráulicas del aforador tipo FA2M, operando con 0.010, 0.015 y 0.020 m³/s, para diversos grados de ahogamiento

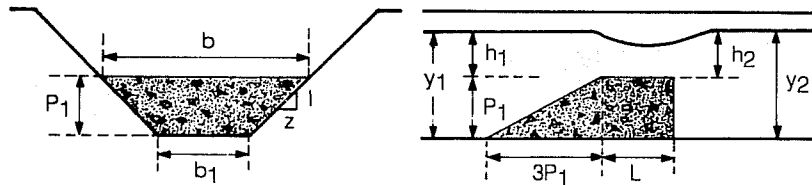
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Teóricos				Modelo				Modelo				Prototipo				Ahoga- miento real
Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	
0.010				0.0061				0.0061	0.0353	0.2853		0.010	0.0431	0.3481		Libre
0.010				0.0061				0.0061	0.0360	0.2860	0.2644	0.010	0.0439	0.3489	0.3226	40
0.010				0.0061				0.0061	0.0360	0.2860	0.2698	0.010	0.0439	0.3489	0.3292	55
0.010				0.0061				0.0061	0.0363	0.2863	0.2734	0.010	0.0443	0.3493	0.3335	65
0.010				0.0061				0.0061	0.0368	0.2868	0.2777	0.010	0.0449	0.3499	0.3368	75
0.010	0.0350	0.340	0.3348	0.0061	0.0287	0.2787	0.2744	0.0061	0.0403	0.2903	0.2840	0.010	0.0492	0.3542	0.3465	85
0.150				0.0091				0.0091	0.0428	0.2928		0.015	0.0522	0.3572		Libre
0.150				0.0091				0.0091	0.0428	0.2928	0.2672	0.015	0.0522	0.3572	0.3260	40
0.150				0.0091				0.0091	0.0433	0.2933	0.2739	0.015	0.0528	0.3578	0.3342	55
0.150				0.0091				0.0091	0.0433	0.2933	0.2783	0.015	0.0528	0.3578	0.3395	65
0.150				0.0091				0.0091	0.0433	0.2933	0.2826	0.015	0.0528	0.3578	0.3448	75
0.150	0.0453	0.350	0.3434	0.0091	0.0371	0.2871	0.2815	0.0091	0.0458	0.2958	0.2887	0.015	0.0559	0.3609	0.3522	85
0.200				0.0122				0.0122	0.0508	0.3008		0.020	0.0620	0.3670		Libre
0.200				0.0122				0.0122	0.0508	0.3008	0.2702	0.020	0.0620	0.3670	0.3296	40
0.200				0.0122				0.0122	0.0508	0.3008	0.2778	0.020	0.0620	0.3670	0.3389	55
0.200				0.0122				0.0122	0.0508	0.3008	0.2828	0.020	0.0620	0.3670	0.3450	65
0.200				0.0122				0.0122	0.0510	0.3010	0.2883	0.020	0.0622	0.3672	0.3517	75
0.200	0.0542	0.359	0.3510	0.0122	0.0444	0.2944	0.2877	0.0122	0.0535	0.3035	0.2955	0.020	0.0653	0.3605	0.3703	85

3. Características geométrico-hidráulicas del aforador tipo FA2M, operando con 0.025, 0.030 y 0.035 m³/s, para diversos grados de ahogamiento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Teóricos				Modelo				Modelo				Prototipo				Ahoga- miento real
Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	
0.025				0.0152				0.0152	0.0565	0.3065		0.025	0.0689	0.3739		Libre
0.025				0.0152				0.0152	0.0565	0.3065	0.2726	0.025	0.0689	0.3739	0.3326	40
0.025				0.0152				0.0152	0.0565	0.3065	0.2811	0.025	0.0689	0.3739	0.3429	55
0.025				0.0152				0.0152	0.0565	0.3065	0.2867	0.025	0.0689	0.3739	0.3498	65
0.025				0.0152				0.0152	0.0565	0.3065	0.2924	0.025	0.0689	0.3739	0.3567	75
0.025	0.624	0.367	0.3579	0.0152	0.0511	0.3011	0.2934	0.0152	0.0587	0.3087	0.2997	0.025	0.0716	0.3766	0.3656	85
0.030				0.0182				0.0182	0.0622	0.3122		0.030	0.0759	0.3809		Libre
0.030				0.0182				0.0182	0.0622	0.3122	0.2748	0.030	0.0759	0.3809	0.3353	40
0.030				0.0182				0.0182	0.0623	0.3123	0.2841	0.030	0.0760	0.3810	0.3466	55
0.030				0.0182				0.0182	0.0623	0.3123	0.2903	0.030	0.0760	0.3810	0.3542	65
0.030				0.0182				0.0182	0.0623	0.3123	0.2965	0.030	0.0760	0.3810	0.3617	75
0.030	0.699	0.375	0.3644	0.0182	0.0573	0.3073	0.2987	0.0182	0.0643	0.3143	0.3044	0.030	0.0784	0.3834	0.3714	85
0.035				0.0213				0.0213	0.0675	0.3175		0.035	0.0824	0.3874		Libre
0.035				0.0213				0.0213	0.0675	0.3175	0.2768	0.035	0.0824	0.3874	0.3377	40
0.035				0.0213				0.0213	0.0677	0.3177	0.2871	0.035	0.0826	0.3876	0.3503	55
0.035				0.0213				0.0213	0.0677	0.3177	0.2939	0.035	0.0826	0.3876	0.3586	65
0.035				0.0213				0.0213	0.0677	0.3177	0.3006	0.035	0.0826	0.3876	0.3667	75
0.035	0.0770	0.382	0.3704	0.0213	0.0631	0.3131	0.3036	0.0213	0.0695	0.3195	0.3087	0.035	0.0848	0.3898	0.3766	85

Estudio experimental de aforadores de cresta ancha

Parámetro	Prototipo	Modelo
b_1 (m)	0.305	0.250
b (m)	0.914	0.749
L (m)	0.457	0.375
P_1 (m)	0.305	0.250



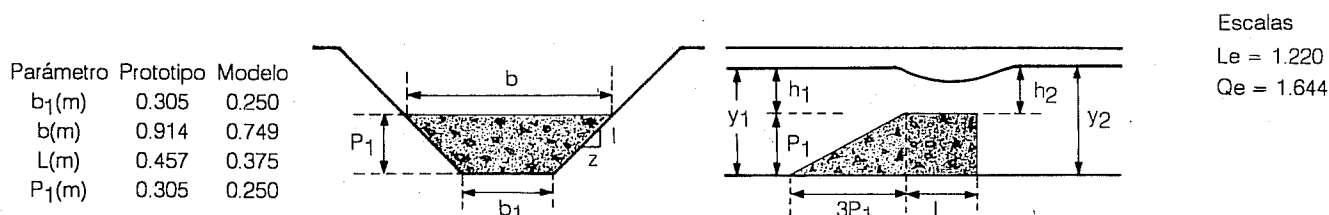
Escalas
 $Le = 1.220$
 $Qe = 1.644$

4. Características geométrico-hidráulicas del aforador tipo FA2M, operando con 0.040, 0.045 y 0.050 m³/s, para diversos grados de ahogamiento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Prototipo			Teóricos			Modelo			Modelo			Experimentales			Prototipo		Ahoga- miento real
Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m		
0.040				0.0243				0.0243	0.0740	0.3240		0.040	0.0903	0.3953		Libre	
0.040				0.0243				0.0243	0.0750	0.3250	0.2796	0.040	0.0915	0.3965	0.3411	40	
0.040				0.0243				0.0243	0.0750	0.3250	0.2913	0.040	0.0915	0.3965	0.3554	55	
0.040				0.0243				0.0243	0.0750	0.3250	0.2988	0.040	0.0915	0.3965	0.3645	65	
0.040				0.0243				0.0243	0.0752	0.3252	0.3063	0.040	0.0917	0.3967	0.3737	75	
0.040	0.0836	0.389	0.3760	0.0243	0.0685	0.3185	0.3082	0.0243	0.0770	0.3270	0.3150	0.040	0.0939	0.3989	0.3843	85	
0.045				0.0274				0.0274	0.0777	0.3277		0.045	0.0948	0.3998		Libre	
0.045				0.0274				0.0274	0.0782	0.3282	0.2810	0.045	0.0954	0.4004	0.3428	40	
0.045				0.0274				0.0274	0.0782	0.3282	0.2929	0.045	0.0954	0.4004	0.3573	55	
0.045				0.0274				0.0274	0.0782	0.3282	0.3007	0.045	0.0954	0.4004	0.3669	65	
0.045				0.0274				0.0274	0.0782	0.3282	0.3085	0.045	0.0954	0.4004	0.3764	75	
0.045	0.0899	0.395	0.3814	0.0274	0.0737	0.3237	0.3126	0.0274	0.0807	0.3307	0.3184	0.045	0.0985	0.4035	0.3884	85	
0.050				0.0304				0.0304	0.0818	0.3318		0.050	0.0998	0.4048		Libre	
0.050				0.0304				0.0304	0.0818	0.3318	0.2826	0.050	0.0998	0.4048	0.3448	40	
0.050				0.0304				0.0304	0.0818	0.3318	0.2948	0.050	0.0998	0.4048	0.3597	55	
0.050				0.0304				0.0304	0.0818	0.3318	0.3030	0.050	0.0998	0.4048	0.3697	65	
0.050				0.0304				0.0304	0.0818	0.3318	0.3111	0.050	0.0998	0.4048	0.3795	75	
0.050	0.0959	0.401	0.3865	0.0304	0.0786	0.3286	0.3168	0.0304	0.0827	0.3327	0.3201	0.050	0.1009	0.4059	0.3905	85	

5. Características geométrico-hidráulicas del aforador tipo FA2M, operando con 0.060, 0.070 y 0.080 m³/s, para diversos grados de ahogamiento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Prototipo			Teóricos		Modelo			Modelo			Experimentales			Prototipo		Ahoga- miento real
Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	
0.060				0.0365				0.0365	0.0900	0.3400		0.060	0.1098	0.4148		Libre
0.060				0.0365				0.0365	0.0900	0.3400	0.2860	0.060	0.1098	0.4148	0.3489	40
0.060				0.0365				0.0365	0.0900	0.3400	0.2995	0.060	0.1098	0.4148	0.3654	55
0.060				0.0365				0.0365	0.0900	0.3400	0.3085	0.060	0.1098	0.4148	0.3764	65
0.060				0.0365				0.0365	0.0900	0.3400	0.3175	0.060	0.1098	0.4148	0.3874	75
0.060	0.1073	0.412	0.3963	0.0365	0.0880	0.3380	0.3248	0.0365	0.0910	0.3410	0.3274	0.060	0.1110	0.4160	0.3994	85
0.070				0.0426				0.0426	0.1005	0.3505		0.070	0.1226	0.4276		Libre
0.070				0.0426				0.0426	0.1008	0.3508	0.2928	0.070	0.1230	0.4280	0.3572	40
0.070				0.0426				0.0426	0.1008	0.3508	0.3056	0.070	0.1230	0.4280	0.3728	55
0.070				0.0426				0.0426	0.1008	0.3508	0.3157	0.070	0.1230	0.4280	0.3852	65
0.070				0.0426				0.0426	0.1008	0.3508	0.3258	0.070	0.1230	0.4280	0.3975	75
0.070	0.1178	0.423	0.4052	0.0426	0.0966	0.3466	0.3321	0.0426	0.1028	0.3528	0.3371	0.070	0.1254	0.4304	0.4113	85
0.080				0.0487				0.0487	0.1093	0.3593		0.080	0.1333	0.4383		Libre
0.080				0.0487				0.0487	0.1098	0.3598	0.2937	0.080	0.1340	0.4390	0.3583	40
0.080				0.0487				0.0487	0.1098	0.3598	0.3104	0.080	0.1340	0.4390	0.3787	55
0.080				0.0487				0.0487	0.1098	0.3598	0.3214	0.080	0.1340	0.4390	0.3921	65
0.080				0.0487				0.0487	0.1100	0.3600	0.3324	0.080	0.1342	0.4392	0.4055	75
0.080	0.1277	0.433	0.4136	0.0487	0.1047	0.3547	0.3390	0.0487	0.1110	0.3610	0.3442	0.080	0.1354	0.4404	0.4199	85



6. Características geométrico-hidráulicas del aforador tipo FA2M, operado con 0.090 y 0.100 m³/s, para diversos grados de ahogamiento

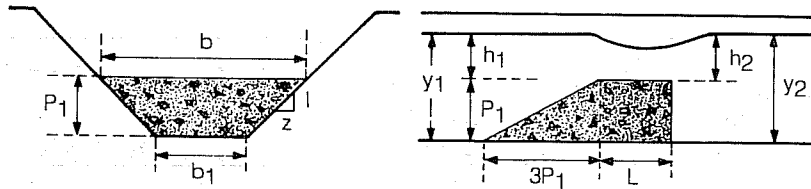
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Teóricos				Modelo				Modelo				Experimentales				Ahoga- miento real
Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	Q m³/s	h ₁ m	Y ₁ m	Y ₂ m	
0.090				0.0547				0.0547	0.1127	0.3627		0.090	0.1375	0.4425		Libre
0.090				0.0547				0.0547	0.1127	0.3627	0.2951	0.090	0.1375	0.4425	0.3600	40
0.090				0.0547				0.0547	0.1127	0.3627	0.3120	0.090	0.1375	0.4425	0.3806	55
0.090				0.0547				0.0547	0.1127	0.3627	0.3233	0.090	0.1375	0.4425	0.3944	65
0.090				0.0547				0.0547	0.1127	0.3627	0.3346	0.090	0.1375	0.4425	0.4082	75
0.090	0.1370	0.442	0.4215	0.0547	0.1123	0.3623	0.3455	0.0547	0.1132	0.3632	0.3461	0.090	0.1381	0.4431	0.4222	85
0.100				0.0608				0.0608	0.1193	0.3693		0.100	0.1455	0.4505		Libre
0.100				0.0608				0.0608	0.1193	0.3693	0.2977	0.100	0.1455	0.4505	0.3632	40
0.100				0.0608				0.0608	0.1193	0.3693	0.31565	0.100	0.1455	0.4505	0.3850	55
0.100				0.0608				0.0608	0.1193	0.3693	0.3275	0.100	0.1455	0.4505	0.3996	65
0.100				0.0608				0.0608	0.1193	0.3693	0.3395	0.100	0.1455	0.4505	0.4142	75
0.100	0.1460	0.451	0.4291	0.0608	0.1197	0.3697	0.3517	0.0608	0.1203	0.3693	0.3523	0.100	0.1468	0.4518	0.4298	85

7. Perfil hidráulico en modelo del aforador tipo FA2M, al operarlo con 6.10, 9.10 y 12.20 l/s para diversos grados de ahogamiento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Análisis teórico				Estudio experimental												Ahoga- miento real	
Gaslo l/s	h _{1T} cm	Y _{1T} cm	Y _{2T} cm	Piezómetros *													
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y ₁ cm	Y ₂ cm		
6.10				28.60	28.55	28.50	28.50	27.80	27.40	27.35	26.35			28.53		Libre	
6.10				28.60	28.60	28.60	28.55	27.80	27.50	27.45	27.00	26.60	26.60	28.60	26.44	40	
6.10				28.60	28.60	28.60	28.60	27.80	27.50	27.50	27.35	27.15	27.20	28.60	26.98	55	
6.10				28.60	28.65	28.65	28.65	27.90	27.65	27.65	27.60	27.60	27.60	28.63	27.34	65	
6.10				28.65	28.70	28.70	28.75	28.10	28.00	28.00	28.00	28.00	28.10	28.68	27.77	75	
6.10	2.87	27.87	27.44	29.00	29.10	29.00	29.00	28.70	28.60	28.60	28.60	28.65	28.65	29.03	28.40	85	
6.10				29.35	29.20	29.30	29.30	28.35	27.70	27.80	26.70			29.28		Libre	
9.10				29.35	29.20	29.30	29.30	28.40	27.70	27.85	27.30	26.60	26.65	29.28	26.72	40	
9.10				29.40	29.25	29.35	29.35	28.35	27.70	27.90	27.60	27.50	27.50	29.33	27.39	55	
9.10				29.40	29.25	29.35	29.35	28.40	27.75	27.90	27.90	28.00	28.05	29.33	27.83	65	
9.10				29.40	29.25	29.35	29.35	28.40	28.15	28.45	28.25	28.40	28.45	29.33	28.26	75	
9.10	3.71	28.71	28.15	29.65	29.50	29.60	29.55	29.00	29.00	29.05	29.05	29.15	29.10	29.58	28.87	85	
12.20				30.05	30.05	30.15	30.05	28.85	28.15	28.30	26.80			30.08		Libre	
12.20				30.05	30.05	30.15	30.05	28.90	28.20	28.30	27.60	26.80	27.00	30.08	27.02	40	
12.20				30.05	30.05	30.15	30.05	28.90	28.20	28.30	28.00	27.70	27.80	30.08	27.78	55	
12.20				30.05	30.05	30.15	30.05	28.90	28.20	28.40	28.30	28.20	28.45	30.08	28.28	65	
12.20				30.05	30.10	30.15	30.10	28.95	28.95	29.05	28.85	28.90	29.95	30.10	28.83	75	
12.20	4.44	29.44	28.77	30.40	30.30	30.35	30.35	29.55	29.65	29.70	29.60	29.75	29.80	30.35	29.95	85	

* Para su ubicación ver ilustración 7

Parámetro	Prototipo	Modelo
$b_1(m)$	0.305	0.250
$b(m)$	0.914	0.749
$L(m)$	0.457	0.375
$P_1(m)$	0.305	0.250



Escalas
 $Le = 1.220$
 $Qe = 1.644$

8. Perfil hidráulico en modelo del aforador tipo FA2M, al operarlo con 15.20, 18.20 y 21.30 l/s para diversos grados de ahogamiento

1 Gaslo l/s	Análisis teórico			Estudio experimental												17 Ahoga- miento real
	2 h_{1T} cm	3 Y_{1T} cm	4 Y_{2T} cm	Piezómetros *										15 Y_1 cm	16 Y_2 cm	
15.20				5 1	6 2	7 3	8 4	9 5	10 6	11 7	12 8	13 9	14 10			Libre
15.20				30.65	30.60	30.70	30.60	29.20	28.45	28.40	26.60			30.65		Libre
15.20				30.65	30.60	30.70	30.60	29.20	28.45	28.50	27.70	26.80	26.90	30.65	27.26	40
15.20				30.65	30.60	30.70	30.60	29.20	28.45	28.50	28.15	27.70	28.05	30.65	28.11	55
15.20				30.65	30.60	30.70	30.65	29.25	28.50	28.60	28.55	28.40	28.65	30.65	28.67	65
15.20				30.65	30.60	30.70	30.65	29.25	28.70	29.20	29.25	29.25	29.40	30.65	29.24	75
15.20	5.11	30.11	29.34	30.90	30.80	30.90	30.80	29.75	29.95	30.00	30.00	30.00	30.10	30.87	29.97	85
18.20				31.20	31.20	31.25	31.20	29.60	28.90	28.80	26.60			31.22		Libre
18.20				31.20	31.20	31.25	31.20	29.60	28.90	28.90	28.00	27.00	27.75	31.22	27.48	40
18.20				31.20	31.20	31.30	31.20	29.60	28.90	29.00	28.40	26.00	28.30	31.23	28.41	55
18.20				31.20	31.20	31.30	31.25	29.65	29.00	29.05	28.75	28.70	28.90	31.23	29.03	65
18.20				31.20	31.20	31.30	31.25	29.65	29.00	29.30	29.50	29.50	29.80	31.23	29.65	75
18.20	5.73	30.73	29.87	31.40	31.40	31.50	31.40	30.10	30.30	30.35	30.25	30.30	30.50	31.43	30.44	85
21.30				31.70	31.70	31.85	31.70	29.95	29.30	29.15	26.45			31.75		Libre
21.30				31.70	31.70	31.85	31.75	29.90	29.30	29.20	28.10	27.00	27.40	31.75	27.68	40
21.30				31.70	31.70	31.90	31.75	29.95	29.30	29.20	28.55	28.05	28.40	31.77	28.71	55
21.30				31.70	31.70	31.90	31.75	29.95	29.30	29.30	29.00	29.00	28.40	31.77	29.39	65
21.30				31.75	31.75	31.90	31.75	29.95	29.30	29.50	29.55	29.50	29.80	31.77	30.06	75
21.30	6.31	31.31	30.36	31.90	31.90	32.05	32.00	30.40	30.75	30.80	30.70	30.70	30.90	31.95	30.87	85

* Para su ubicación ver ilustración 7

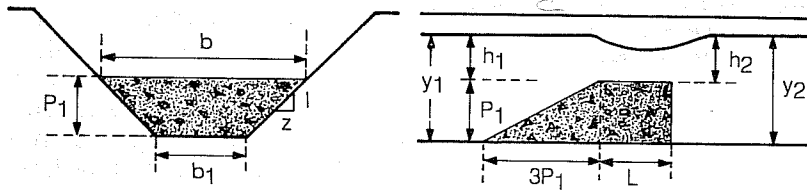
9. Perfil hidráulico en modelo del aforador tipo FA2M, al operarlo con 24.30, 27.40 y 30.40 l/s; para diversos grados de ahogamiento

1 Gaslo l/s	Análisis teórico			Estudio experimental												17 Ahoga- miento real
	2 h_{1T} cm	3 Y_{1T} cm	4 Y_{2T} cm	Piezómetros *										15 Y_1 cm	16 Y_2 cm	
24.30				5 1	6 2	7 3	8 4	9 5	10 6	11 7	12 8	13 9	14 10			Libre
24.30				32.40	32.40	32.40	32.40	30.40	29.70	29.40	26.10			32.40		Libre
24.30				32.50	32.50	32.50	32.40	30.40	29.70	29.55	28.25	27.00	27.80	32.50	27.96	40
24.30				32.50	32.50	32.50	32.40	30.45	29.85	29.60	28.90	28.50	28.80	32.50	29.13	55
24.30				32.50	32.50	32.50	32.45	30.40	29.75	29.65	29.50	29.35	29.80	32.50	29.88	65
24.30				32.50	32.50	32.55	32.45	30.40	29.80	30.00	30.40	30.10	30.60	32.52	30.63	75
24.30	6.85	31.85	30.82	32.70	32.65	32.75	32.65	31.10	31.40	31.50	31.45	31.35	31.65	32.70	31.50	85
27.40				32.75	32.70	32.85	32.75	30.65	30.00	29.70	26.10			32.77		Libre
27.40				32.80	32.75	32.90	32.75	30.70	30.00	29.80	28.30	26.90	27.90	32.82	28.10	40
27.40				32.80	32.75	32.90	32.75	30.65	30.00	29.85	29.00	28.50	28.80	32.82	29.29	55
27.40				32.80	32.75	32.90	32.75	30.70	30.00	29.85	29.20	28.90	29.20	32.82	30.07	65
27.40				32.80	32.75	32.90	32.75	30.70	30.00	30.10	30.40	30.40	30.80	32.82	30.85	75
27.40	7.37	32.37	31.26	33.10	33.00	33.10	33.00	31.25	31.60	31.55	31.70	31.55	31.90	33.07	31.84	85
30.40				33.20	33.15	33.20	33.10	30.80	30.15	29.80				33.18		Libre
30.40				33.20	33.15	33.20	33.10	30.80	30.15	29.80	28.15			33.18	28.26	40
30.40				33.20	33.15	33.20	33.10	30.80	30.15	29.90	28.80	28.40	28.90	33.18	29.48	55
30.40				33.20	33.15	33.20	33.10	30.75	30.15	30.00	29.55	29.45	30.10	33.18	30.30	65
30.40				33.20	33.15	33.20	33.10	30.80	30.20	30.20	30.40	30.40	31.00	33.18	31.11	75
30.40	7.86	32.86	31.68	33.30	33.20	33.30	33.20	31.10	31.45	31.70	31.60	31.50	31.90	33.27	32.01	85

* Para su ubicación ver ilustración 7

Estudio experimental de aforadores de cresta ancha

Parámetro	Prototipo	Modelo
b_1 (m)	0.305	0.250
b (m)	0.914	0.749
L (m)	0.457	0.375
P_1 (m)	0.305	0.250



Escalas
 $Le = 1.220$
 $Qe = 1.644$

10. Perfil hidráulico en modelo del aforador tipo FA2M, al operarlo con 36.50, 42.60 y 48.70 l/s para diversos grados de ahogamiento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gasto l/s	Análisis teórico			Estudio experimental												Ahoga- miento real
	h _{1T}	Y _{1T}	Y _{2T}	Piezómetros *												
	cm	cm	cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y ₁ cm	Y ₂ cm	
36.50				34.00	33.90	34.10	33.90	31.35	30.80	30.10				34.00		Libre
36.50				34.00	33.90	34.10	33.95	31.35	30.85	30.30	28.40			34.00	28.60	40
36.50				34.00	33.90	34.10	33.95	31.35	30.85	30.40	29.30	28.70	29.20	34.00	29.95	55
36.50				34.00	33.90	34.10	33.95	31.35	30.90	30.50	30.00	29.60	30.20	34.00	30.85	65
36.50				34.00	33.90	34.10	33.95	31.35	30.90	30.75	30.80	30.80	31.20	34.00	31.75	75
36.50	8.80	33.80	32.48	34.10	34.05	34.15	34.05	31.80	32.20	32.40	32.30	32.20	32.70	34.10	32.74	85
42.60				35.10	34.95	35.10	34.95	32.00	31.60	30.70	26.00			35.05		Libre
42.60				35.10	35.00	35.15	34.95	32.05	31.70	30.95	28.90			35.08	29.28	40
42.60				35.10	35.00	35.15	34.95	32.00	31.70	31.10	30.00			35.08	30.56	55
42.60				35.10	35.00	35.15	34.95	32.05	31.75	31.25	30.70			35.08	31.57	65
42.60				35.10	35.00	35.15	34.95	32.10	31.80	31.60	31.75			35.08	32.58	75
42.60	9.66	34.66	33.21	35.30	35.20	35.35	35.20	32.70	33.30	33.50	33.40			35.28	33.71	85
48.70				35.95	35.85	36.00	35.75	32.50	32.30	31.20				35.93		Libre
48.70				36.00	35.90	36.05	35.80	32.60	32.40	31.50	29.00			35.98	29.37	40
48.70				36.00	35.90	36.05	35.80	32.60	32.40	31.70	29.90			35.98	31.04	55
48.70				36.00	35.90	36.05	35.85	32.65	32.50	31.80	30.70			35.98	32.14	65
48.70				36.00	35.90	36.10	35.85	32.65	32.50	32.10	32.20			36.00	33.24	75
48.70	10.47	35.47	33.90	36.10	36.00	36.20	35.90	33.05	33.50	34.00	34.00			36.10	34.42	85

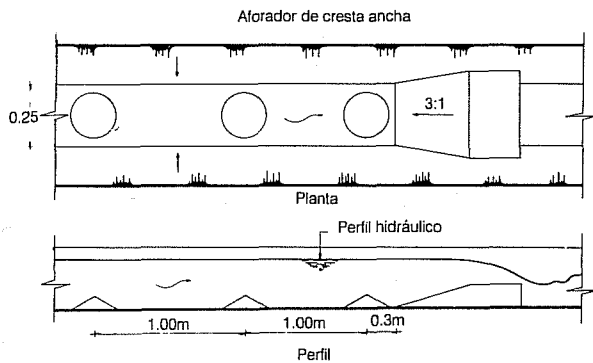
* Para su ubicación ver ilustración 7

11. Perfil hidráulico en modelo del aforador tipo FA2M, al operarlo con 54.70 y 60.80 l/s para diversos grados de ahogamiento

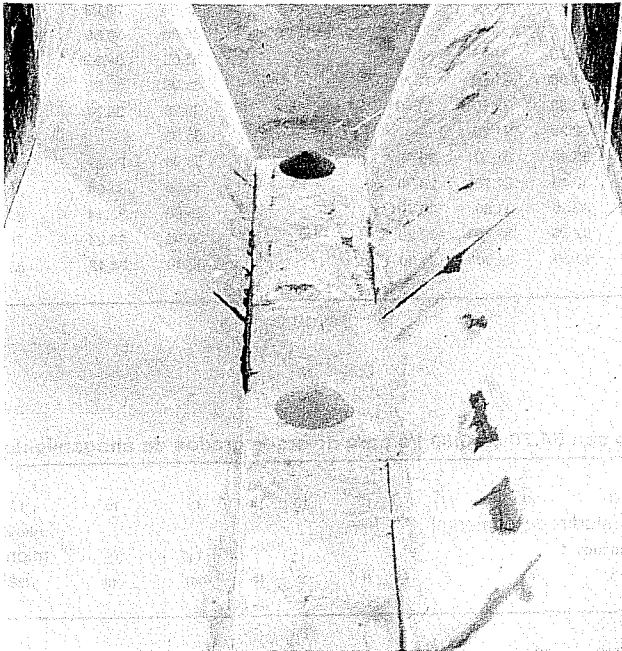
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gasto l/s	Análisis teórico			Estudio experimental										Ahoga- miento real		
	h _{1T} cm	Y _{1T} cm	Y _{2T} cm	Piezómetros *												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Y ₁ cm	Y ₂ cm
54.70				36.25	36.25	36.30	36.05	32.85	32.55	31.30				36.27		Libre
54.70				36.25	36.25	36.30	36.05	32.85	32.65	31.55	29.00			36.27	29.51	40
54.70				36.25	36.25	36.30	36.05	32.85	32.70	31.70	29.80			36.27	31.20	55
54.70				36.25	36.25	36.30	36.05	32.85	32.70	31.85	30.70			36.27	32.33	65
54.70				36.25	36.25	36.30	36.05	32.90	32.75	32.20	32.10			36.27	33.46	75
54.70	11.23	36.23	34.55	36.30	36.30	36.35	36.10	33.05	33.15	33.50	33.90			36.32	34.61	85
60.80				36.95	36.90	36.95	36.65	33.15	33.10	33.55				36.93		Libre
60.80				36.95	36.90	36.95	36.65	33.20	33.15	31.95	29.00			36.93	29.77	40
60.80				36.95	36.90	36.95	36.65	33.25	33.20	32.10	30.00			36.93	31.56	55
60.80				36.95	36.90	36.95	36.70	33.25	33.20	32.30	31.00			36.93	32.75	65
60.80				36.95	36.90	36.95	36.70	33.30	33.25	32.65	32.60			36.93	33.95	75
60.80	11.97	36.97	35.17	37.00	37.00	37.10	36.75	33.50	33.80	34.10	34.40			37.03	35.23	85

* Para su ubicación ver ilustración 7

10. Posición de los trazadores de arena, para determinar cualitativamente el efecto hidráulico de la estructura, en cuanto a retención de sedimentos



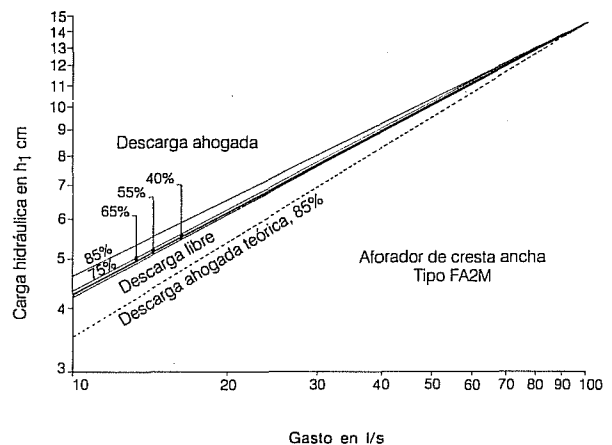
carga hidráulica y el gasto de operación para otros grados de ahogamiento 0%, con descarga libre, de 40, 55, 65 y 75% (véase ilustración 12). Se observó que la variación del gasto para ahogamientos para descarga libre y 75% no es muy significativa.



11. Disposición de los trazadores para estudiar el efecto hidráulico de la estructura en cuanto a retención de sedimentos

- La estructura tiene capacidad suficiente para arrastrar el material ensayado en el laboratorio: arena de mina y volcánica. El modelo construido sólo retuvo una mínima parte del material: aquel que se depositó en las zonas donde la velocidad del flujo es prácticamente nula, como las aristas que forman la plantilla con el talud del canal, y en la parte inicial de la porción horizontal de la cresta del aforador. Dichos depósitos de sedimentos no afectan significativamente el funcionamiento de la estructura aforadora.

12. Relación entre la carga hidráulica y el gasto de operación



Bibliografía

- Bos, M. G., Replogle, J. A., Clemmens, A. J. *Flow measuring flumes for open channel systems*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.
- Replogle, J. A., Bos, M. G. "Flow measurement flumes: applications to irrigation water management", *Advances in Irrigation*, vol. 1. núm. 1, pp. 147-217.
- Replogle, J. A. "Flumes and broad-crested weirs—mathematical modeling and laboratory ratings", *Flow measurement of fluids*, H. H. Dijkstra y E. A. Spencer, eds., pp. 321-328, North-Holland Pub., Amsterdam, 1978.

¹ Skertchly Molina Leslie, "Medición de flujo con vertedores de cresta ancha", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 1, núm. 4, p. 54, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México D. F., 1987.