

FLUJO DE AGUA SUPERFICIAL



Edición 2024

Rodrigo Mosquera y Federico Vilaseca

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

rmosquer@fing.edu.uy fvilaseca@fing.edu.uy

MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA SUPERFICIAL

Bibliografía:

- U.S.B.R. (2001), *Water Measurement Manual*.
(<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/>)
- Notas HHA, Capítulos 2.2 (*Energía Específica*) y 2.6 (*Flujo Rápidamente Variado*)
- Bodhaine (1968), *Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods*.
(https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a3/pdf/TWRI_3-A3.pdf)
- Bentancor et al. (2018), *Tecnologías de medición y transmisión de datos en sistemas de riego por gravedad*, INIA FPTA -292.
(<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11070/1/INIA-FPTA-66-292-Riego-Arroz-y-Pasturas.pdf>)

ESTRUCTURAS DE AFORO

Estos métodos de aforo se basan en la instalación de estructuras interpuestas en el flujo, para generar una sección de control.

¿Qué es una sección de control?

ESTRUCTURAS DE AFORO

Estos métodos de aforo se basan en la instalación de estructuras interpuestas en el flujo, para generar una sección de control.

¿Qué es una sección de control?

Es una sección en la que existe una condición que determina una relación única entre el caudal circulante y el tirante en la misma. Por lo tanto, si se conoce el tirante se puede calcular el caudal.

¿Cómo se genera?

ESTRUCTURAS DE AFORO

Estos métodos de aforo se basan en la instalación de estructuras interpuestas en el flujo, para generar una sección de control.

¿Qué es una sección de control?

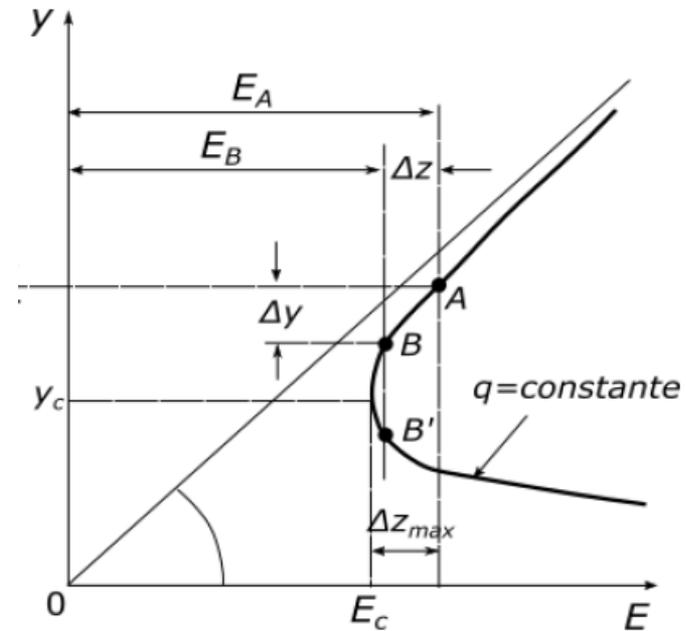
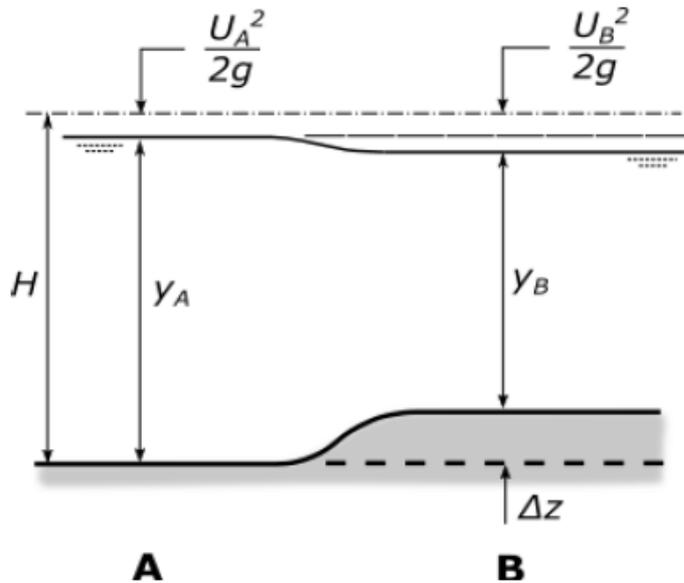
Es una sección en la que existe una condición que determina una relación única entre el caudal circulante y el tirante en la misma. Por lo tanto, si se conoce el tirante se puede calcular el caudal.

- ¿Cómo se genera? 
- Imponiendo un tirante crítico mediante contracción lateral o sobreelevación del fondo.
 - Imponiendo caída libre

ESTRUCTURAS DE AFORO

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

$$H_A = H_B \implies E_A = H_A = H_B = E_B + \Delta z_f \implies E_B = E_A - \Delta z_f$$

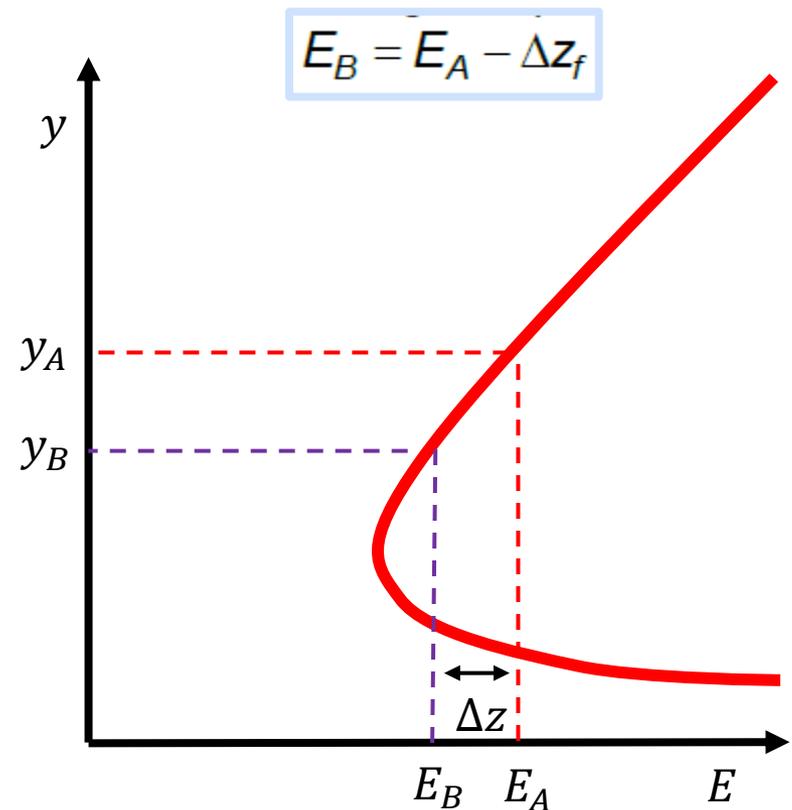
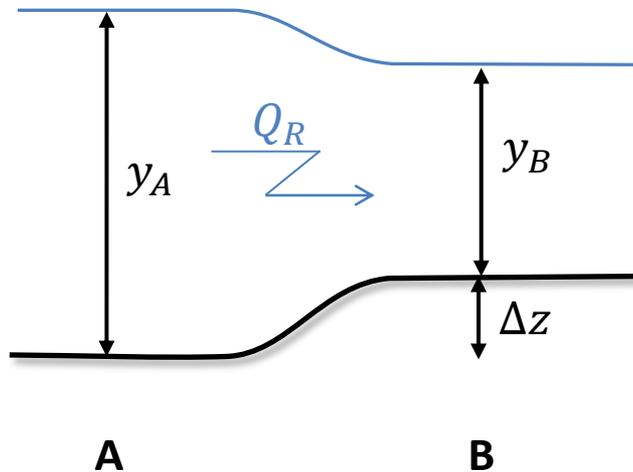


ESTRUCTURAS DE AFORO

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

Carga hidráulica: $H = z_f + y + \frac{U^2}{2g} = z_f + y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2}$

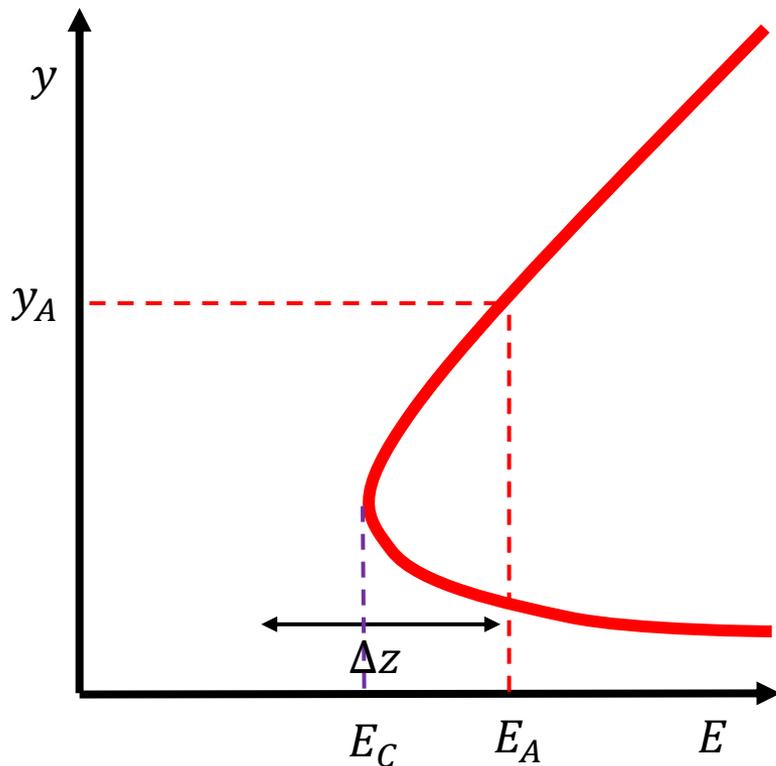
E. Específica: $E = y + \frac{U^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2}$



ESTRUCTURAS DE AFORO

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

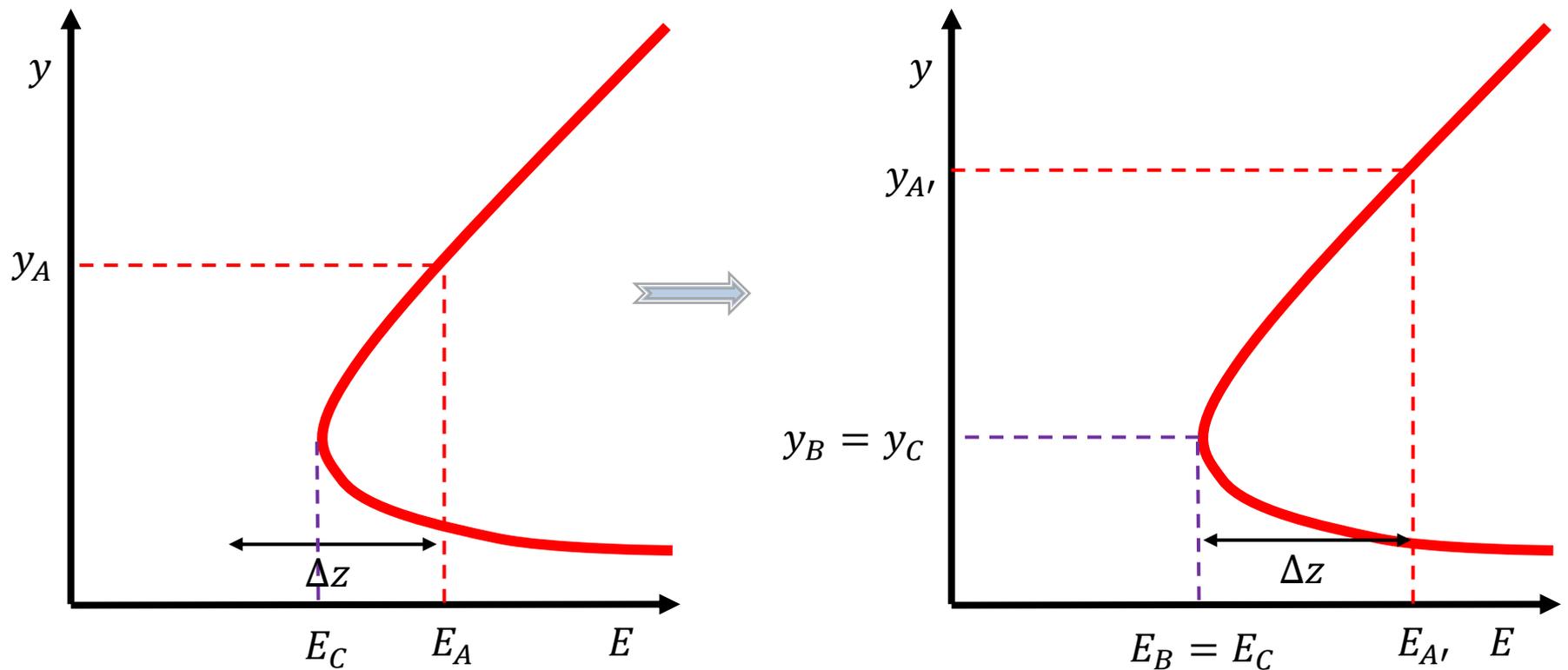
¿Qué pasa cuando imponemos un escalón tal que $\Delta z > E_A - E_C$?



ESTRUCTURAS DE AFORO

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

El flujo pasa sobre el escalón con tirante crítico. Se genera una sección de control.



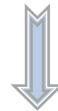
ESTRUCTURAS DE AFORO

Sección de control

Número de Froude igual a 1:
$$\text{Fr}^2 = \frac{U^2}{gy} = \frac{Q^2}{gyA^2} = 1$$

Sabiendo la geometría y midiendo y_c podemos calcular Q:

$$Q = \sqrt{gy}A \quad \Longrightarrow \quad Q = \sqrt{g}by_c^{3/2} \text{ (canal rectangular)}$$



Es el principio general detrás de la medición con estructuras.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

La sección de control se genera a través de un vertido por encima de una placa de arista aguda.

Se determina una relación entre el tirante en la zona de aproximación y el caudal vertido (Q vs. h), que depende de la geometría del vertedero. De esa forma se determina el caudal indirectamente a través de la medición de nivel.



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

El método de medición consiste en instalar una regla u otro tipo de medidor de nivel en una sección aguas arriba del vertedero y luego estimar el caudal a partir de dicha medida usando la relación Q vs. h .



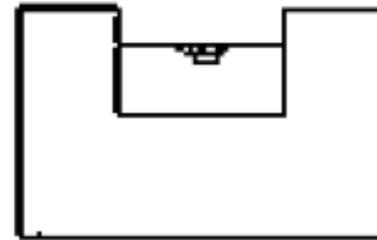
VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Existen dos tipos de geometrías tradicionales:

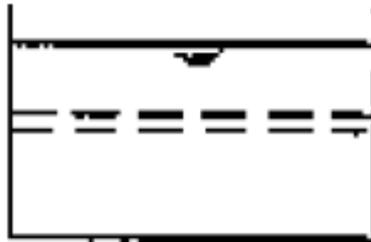
- Vertedero rectangular
- Vertedero triangular



Triangular



Rectangular contraído



Rectangular sin contraer

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

En todos los casos, se da una contracción del flujo sobre el vertedero que es justamente la que hace que se genere una sección de control.

No obstante, en función de las características de esta contracción los vertederos se pueden clasificar en **contraídos, parcialmente contraídos o no contraídos**.

La condición que se debe cumplir para que sean **contraídos** es que la distancia de los laterales del vertedero hasta los bordes de la sección transversal de aproximación sea al menos $2h_{max}$.

Cuando el ancho del vertido es igual al ancho del canal de aproximación entonces es **no contraído**.

El caso **parcialmente contraído** es cuando no se cumple ninguna de las dos condiciones anteriores.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

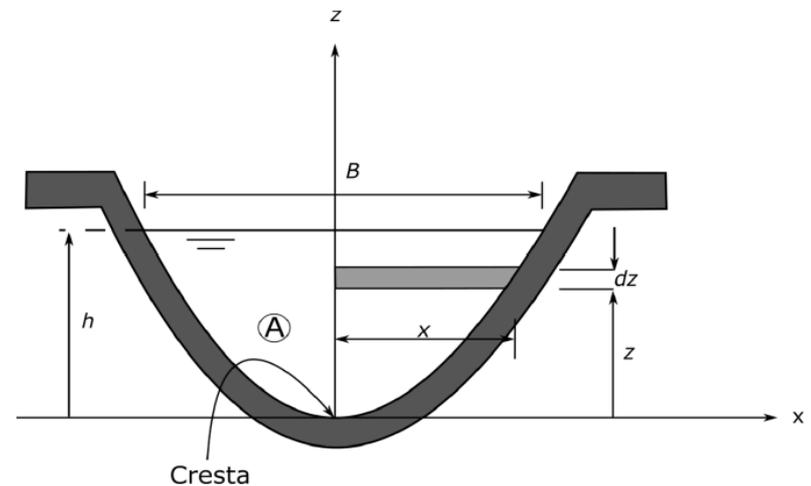
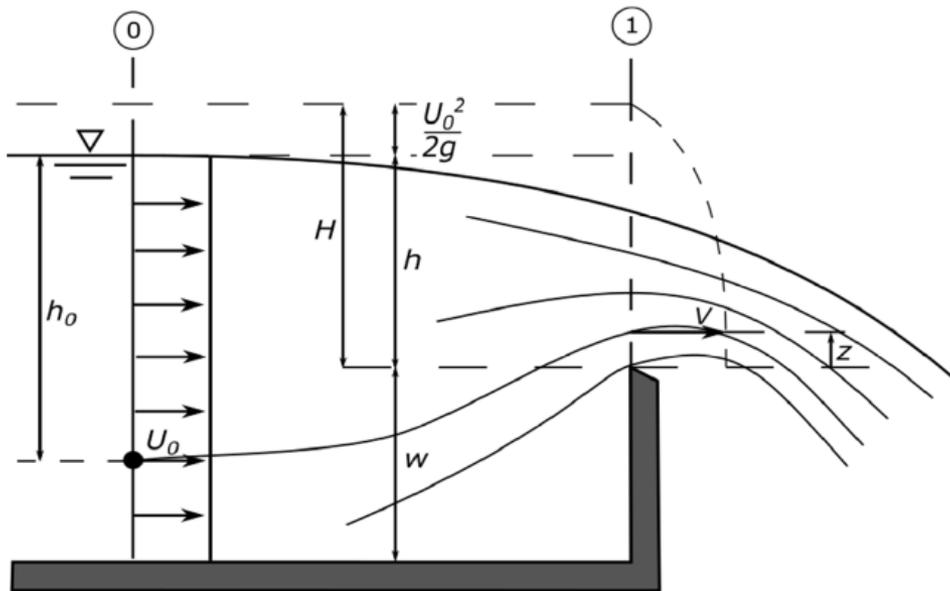
Esta clasificación condiciona el funcionamiento del vertido y las ecuaciones que lo describen. **Es particularmente relevante en el caso de vertederos rectangulares, ya que en los casos restantes se da casi siempre.**

La contracción lateral está dada por la relación entre la altura del pelo de agua sobre el vertedero y la distancia desde el vertedero a la pared lateral del canal de aproximación.

La contracción vertical depende de la relación entre la altura del pelo de agua sobre el vertedero y la altura del vertedero respecto al fondo del canal de aproximación.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

En el vertido se genera una condición de Flujo Rápidamente Variado (FRV), que limita la posibilidad de determinar la curva caudal-nivel de forma exclusivamente analítica. Es por esto que las formulaciones de diseño existentes fueron alcanzadas combinando desarrollos analíticos con experimentación.



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

De ese modo se puede obtener la siguiente expresión general:

$$Q = 2\sqrt{2g} \mu \int_0^h x \sqrt{h - z + \frac{U_0^2}{2g}} dz$$

Siendo:

- Q el caudal vertido
- h la altura del pelo de agua sobre la cresta en la zona de aproximación
- U_0 la velocidad en la zona de aproximación
- μ un coeficiente de gasto que corrige discrepancias entre hipótesis supuestas y realidad. Se determina experimentalmente a partir de Re y h/w

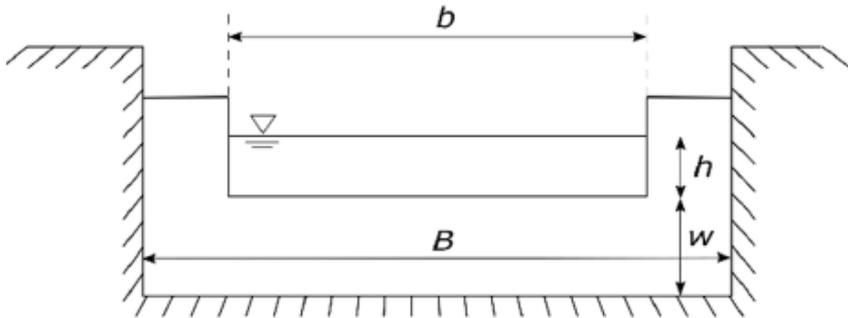
Hipótesis consideradas:

- Velocidad uniforme U_0 en zona no perturbada.
- Validez de la ecuación de Bernoulli (conservación de la energía, distribución hidrostática de presiones, flujo no se contrae)
- Nivel de agua sobre la cresta igual al de la zona de aproximación.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

En el caso de geometría rectangular dicha ecuación queda:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2} \Rightarrow \text{¿A qué ecuación se parece?}$$



Para la obtención de la ecuación se asume que la velocidad de aproximación U_0 es despreciable.

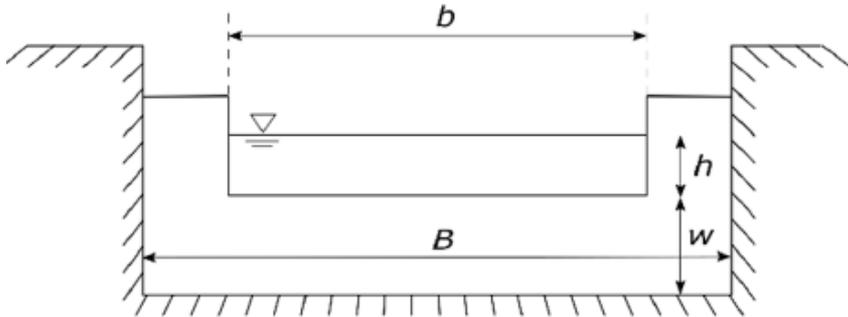
En este caso el coeficiente μ también contabiliza el efecto de una posible contracción lateral.

Su valor fue determinado experimentalmente por varios autores.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

En el caso de geometría rectangular dicha ecuación queda:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2} \quad \Rightarrow \quad Q = \sqrt{g} b y_c^{3/2}$$



Para la obtención de la ecuación se asume que la velocidad de aproximación U_0 es despreciable.

En este caso el coeficiente μ también contabiliza el efecto de una posible contracción lateral.

Su valor fue determinado experimentalmente por varios autores.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría rectangular:

| Autor | Fórmula | Límites de aplicación | Observaciones |
|---|---|---|---|
| Hegly (Ref. 30) (1921) | $\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{D} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$ | $0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$ | El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS. |
| Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Ref. 9) (Fórmula SIAS) | $\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3(b/B)^2}{1000h + 1.6} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^4 \right]$ | $0.025 \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ en el caso de contracciones laterales | Para vertederos sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $\frac{h}{w} \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que la de Hegly. |
| Hamilton-Smith | $\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$ | $0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq \frac{w}{2}$ $b \leq (B - 2h)$ $\frac{h}{b} \leq 0.5$ | Si $B(h+w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la Ec. (7.5) el valor de h por h' donde $h' = h + 1.4 \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)$ donde: $V_0 = \left[\frac{Q}{B(h+w)} \right]$ es la velocidad de llegada |
| Francis (Ref. 31) | $\mu = 0.623 \left[1 - 0.1n \frac{h}{b} \right] \left[\left(1 + \frac{V_0^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2gh} \right)^{5/2} \right]$ | $0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$ | $V_0 = \frac{Q}{B(h+w)}$ velocidad de llegada. $n = 2$ en vertederos con contracciones laterales $n = 0$ en vertederos sin contracciones laterales. |
| Rehbock (1929) (Ref. 9) | $\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{1/2}$ | $0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.30 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ | Vale sólo para vertederos sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez. |

Extraídas de notas de HHA, Capítulo 2.6.

A su vez pertenecen al libro Hidráulica General vol. 1 de Gilberto Sotelo Avila (1997).

Es muy importante tener claros y respetar los límites de aplicación de cada formulación

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría rectangular:

Formulación habitualmente utilizada para vertedero sin contracción lateral:

$$\mu = \begin{cases} 0.611 + 0.08 \frac{h}{w} & \text{si } \frac{h}{w} \leq 5 \\ 1.06 \left(1 + \frac{w}{h}\right)^{3/2} & \text{si } \frac{h}{w} \geq 20 \end{cases}$$

Extraídas de notas de HHA, Capítulo 2.6.

A su vez pertenecen al libro Hidráulica General vol. 1 de Gilberto Sotelo Avila (1997).

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría rectangular:

Método de Kindsvater & Carter (1959): el término $2/3\sqrt{2g} \mu$ se agrupa en un coeficiente de descarga C_e que se determina experimentalmente (unidades de longitud en ft).

$$Q = C_e b h^{3/2}$$

$$C_e = C_1(h/w) + C_2$$

| L/B | C_1 | C_2 |
|-------|---------|-------|
| 0.2 | -0.0087 | 3.152 |
| 0.4 | 0.0317 | 3.164 |
| 0.5 | 0.0612 | 3.173 |
| 0.6 | 0.0995 | 3.178 |
| 0.7 | 0.1602 | 3.182 |
| 0.8 | 0.2376 | 3.189 |
| 0.9 | 0.3447 | 3.205 |
| 1.0 | 0.4000 | 3.220 |

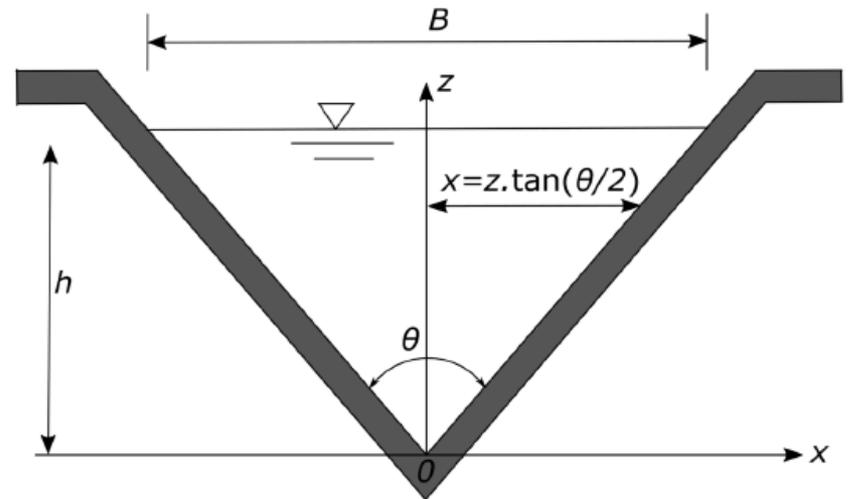
Límites de aplicación:

- $b \geq 15.2 \text{ cm (6 in)}$
- $w \geq 10.2 \text{ cm (4 in)}$
- $h/w < 2.4$
- Aplicable a vertederos contraídos y no contraídos

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

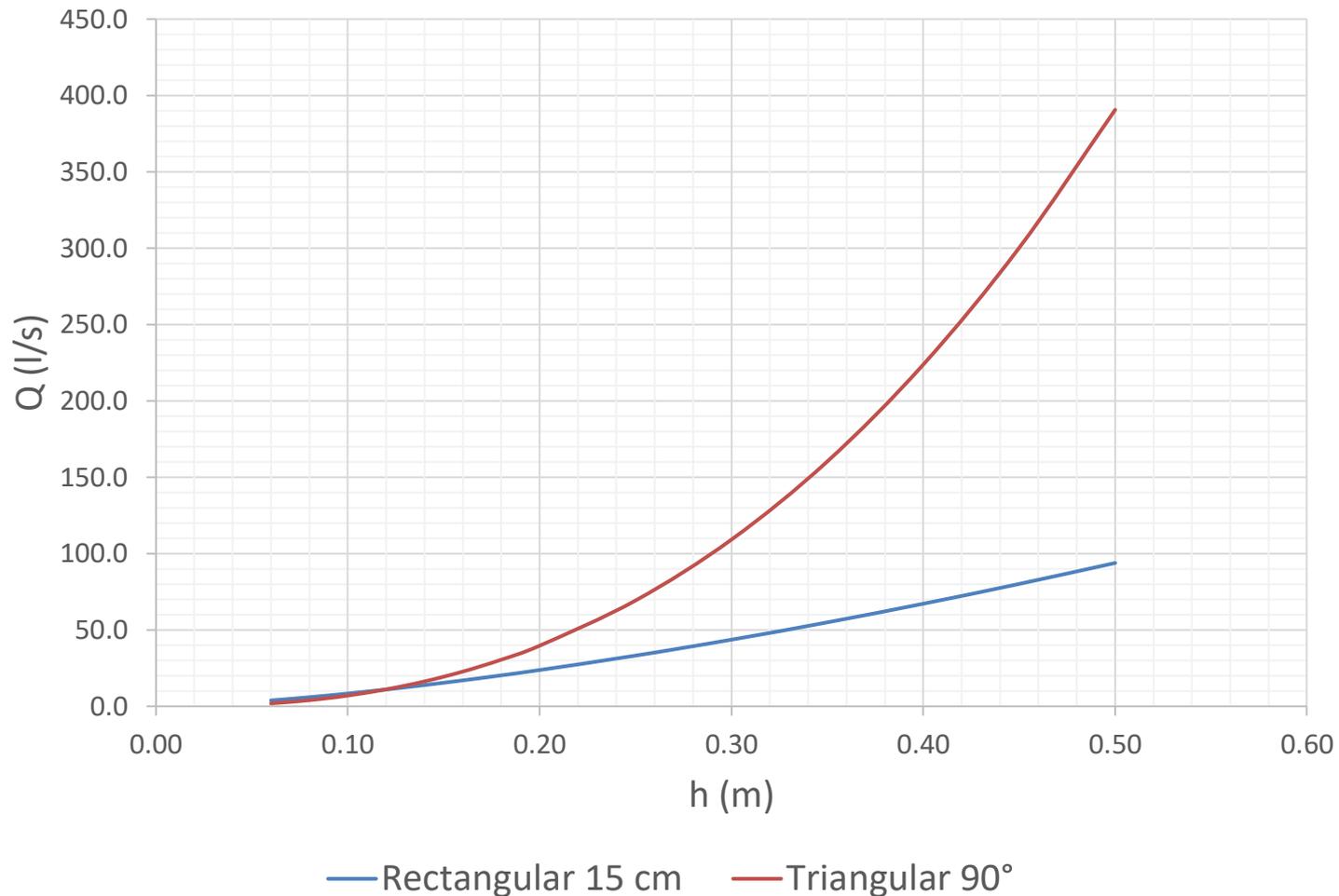
En el caso de geometría triangular dicha ecuación queda:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{5/2}$$



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Comparación triangular 90° vs rectangular 15 cm:

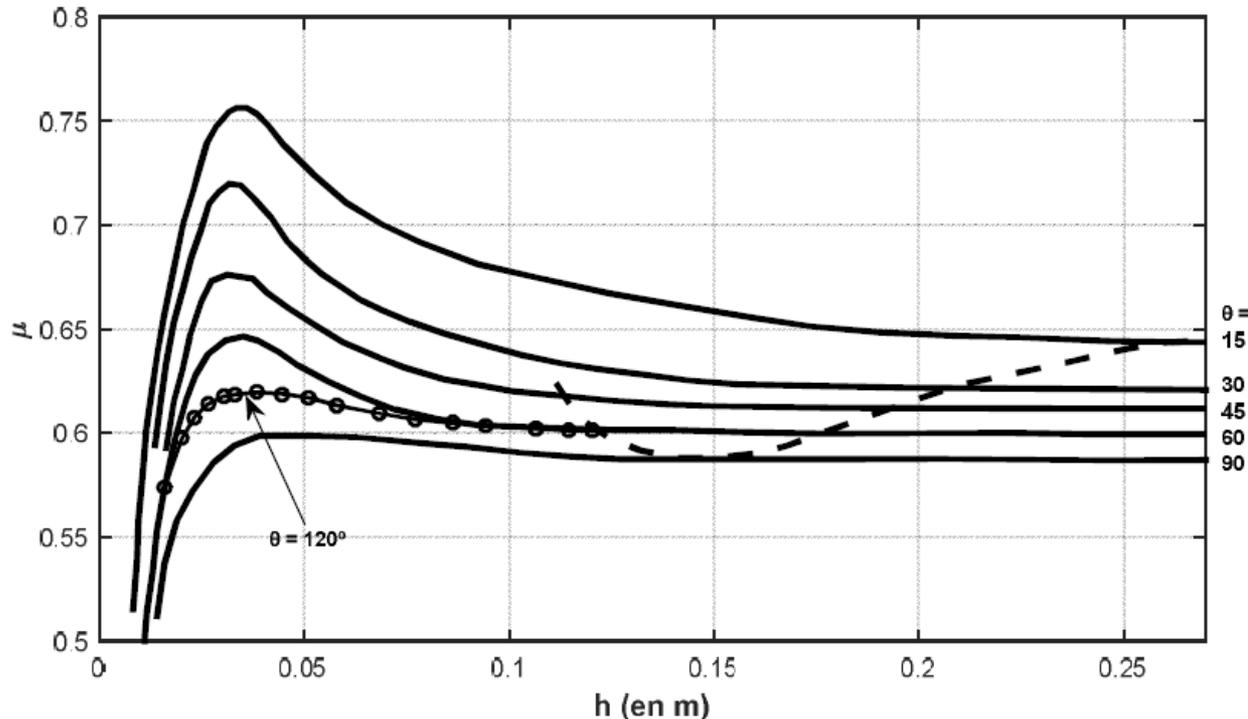


VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría triangular:

Método de la Universidad Católica de Chile:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) K \mu h^{5/2} \quad (\text{se introduce un factor de corrección } K)$$



Límites de aplicación:

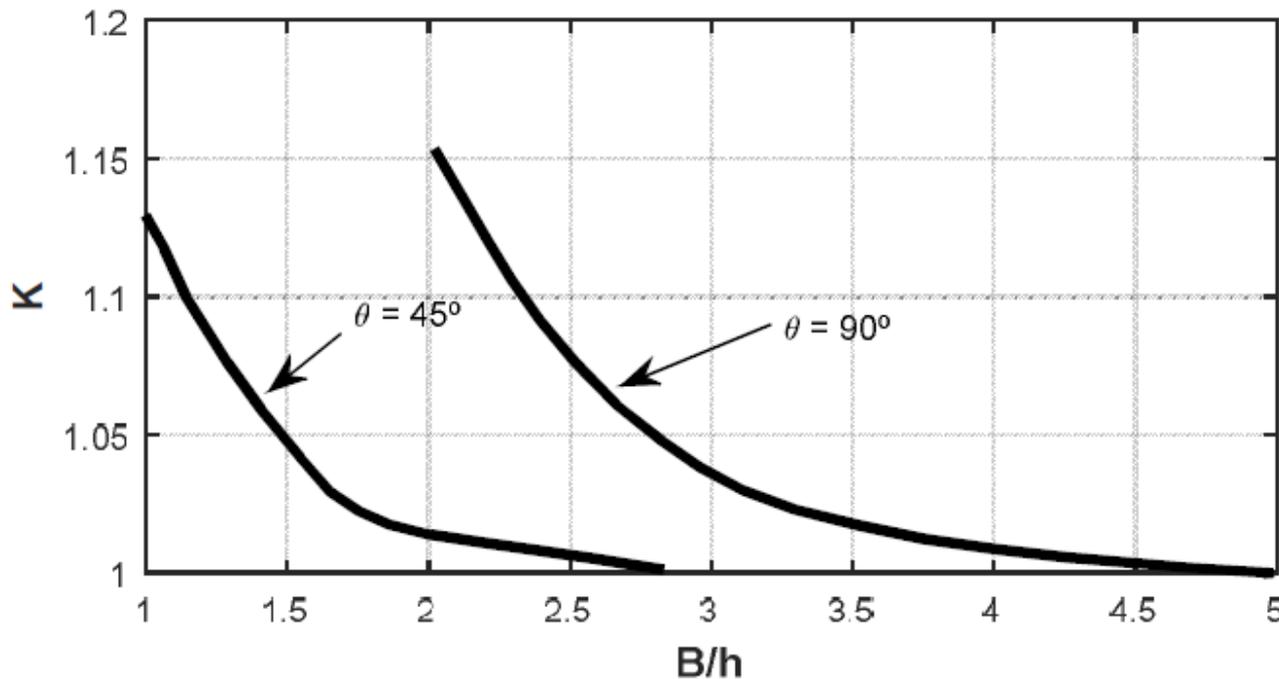
- $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría triangular:

Método de la Universidad Católica de Chile:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) K \mu h^{5/2} \quad (\text{se introduce un factor de corrección } K)$$



Límites de aplicación:

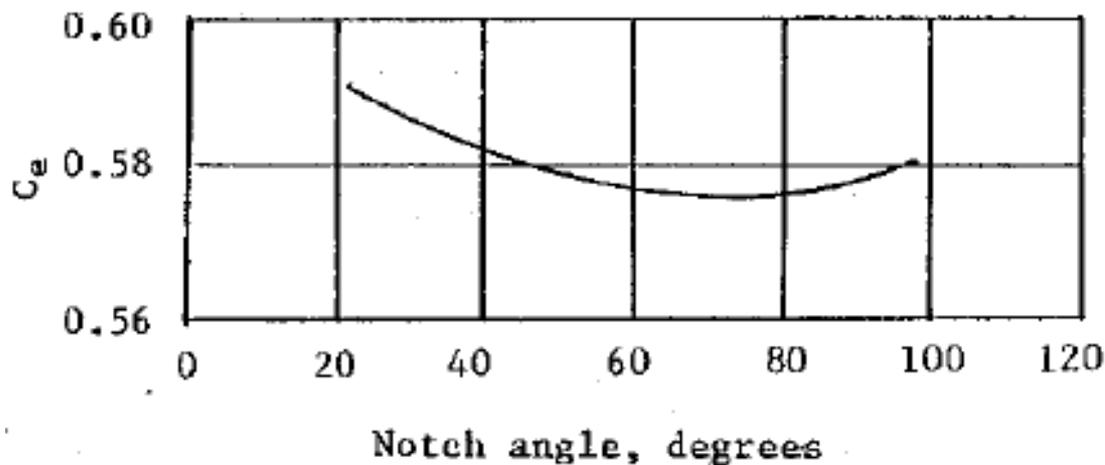
- $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Formulaciones para geometría triangular:

Método de Kindsvater & Shen: la ecuación se expresa en función de un coeficiente de descarga C_e que se determina experimentalmente (unidades de longitud en ft).

$$Q = 4.28 C_e \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) h^{5/2}$$



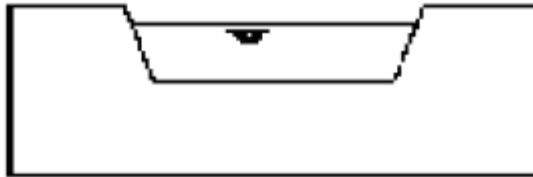
Límites de aplicación:

- $25^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$
- $h > 6.1 \text{ cm (0.2 ft)}$
- $h < 61 \text{ cm (2 ft)}$
- $h/B < 0.2$
- $B > 91.4 \text{ cm (3 ft)}$
- $w > 45.7 \text{ cm (1.5 ft)}$

Puede observarse que C_e varía muy poco, entre 0.57 y 0.59

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Otras geometrías: vertederos trapezoidales o Cipolletti (unidades en ft)



Cipolletti Contracted

$$Q = 3.367 L h_1^{3/2}$$



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Otras geometrías: vertederos de sección compuesta

Los más comúnmente hallados son una combinación de vertedero triangular y rectangular. Permiten medir un rango amplio de caudales, los bajos se miden con el triangular y los altos con la sección rectangular.

Presentan alta incertidumbre en la transición de una geometría a la otra.

Existen pocos experimentos para este tipo de geometría, por lo que de usarse, es recomendable hacer una calibración.



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Aspectos de diseño y construcción:

- El vertedero se debe instalar perpendicular a la dirección del flujo en la sección.
- Debe nivelarse correctamente.
- El espesor de la placa que lo conforma debe ser de entre 0.76 mm y 2.03 mm (entre 0.03 in y 0.08 in). Si la placa es más gruesa, se debe limar el borde hasta lograr el espesor requerido. Así se asegura el desprendimiento del chorro.
- Posibles problemas de erosión aguas abajo debido a la acción del chorro deben prevenirse mediante colocación de enrocado o un delantal de hormigón.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Aspectos de funcionamiento:

- Debe haber una altura mínima de 6.1 cm (0.2 ft) sobre la cresta en todo momento para que la medida sea válida (para asegurar el desprendimiento del chorro).
- La medición de nivel se debe realizar a una distancia de al menos 4 veces el tirante máximo esperado sobre el vertedero, hacia aguas arriba.
- El pelo de agua en la cara de aguas abajo debe estar al menos a 6.1 cm del borde de la cresta, de ese modo se asegura que el chorro esté aireado y se desprenda correctamente.
- Las medidas no son válidas si por alguna razón el chorro se pega a la placa en lugar de verter libremente.
- Las medidas dejan de ser válidas cuando el vertedero se ve ahogado o sobrepasado.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Aspectos de mantenimiento:

- Se deben evitar obstrucciones (como pueden ser ramas o basura) que alteren el correcto desprendimiento del chorro.
- Se deben remover periódicamente los sedimentos acumulados en la cara de aguas arriba del vertedero.
- Se debe realizar mantenimiento al canal aguas arriba para asegurar que el flujo sea uniforme en su llegada a la estructura.
- Se debe realizar mantenimiento al canal aguas abajo para evitar que se ahogue la descarga.
- Se deben realizar inspecciones periódicas para detectar posibles filtraciones u obstrucciones.

VERTEDEROS DE PARED DELGADA



VERTEDEROS DE PARED DELGADA



VERTEDEROS DE PARED DELGADA



VERTEDEROS DE PARED DELGADA



VERTEDEROS DE PARED DELGADA



VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Ejercicio: discutir en grupos

¿Cuáles son las ventajas y desventajas de usar este tipo de métodos para medición de caudal?

¿En qué casos resulta conveniente y en cuáles no?

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

Resumen de ventajas / desventajas:

- Remanso considerable
- Retención de sedimentos
- Alto costo inicial, pero bajo costo de mantenimiento
- Método preciso si funciona correctamente
- Rango de caudales acotado

¿En qué casos resulta conveniente y en cuáles no?:

- Conveniente en casos con rango de caudales acotado
- Mejor en canales artificiales que cauces naturales
- Sitios con buena accesibilidad para construcción/mantenimiento
- Ausencia de posibles afectaciones aguas arriba
- Zonas no afectadas por remansos

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

¿Procedimiento de diseño?

Ejercicio: discutir en grupos (cualitativamente) los pasos que llevarían adelante para el diseño de un vertedero de pared delgada para medición de caudales en un canal del riego.

Tener en cuenta:

- ¿Qué información o relevamientos de base se necesitan?
- ¿Qué es necesario observar en campo?
- ¿Qué tipo de vertedero usarían? ¿De qué depende?
- ¿Qué variables hay que definir para el diseño?
- ¿Qué cálculos o verificaciones harían?

VERTEDEROS DE PARED GRUESA

En este caso, la sección de control se genera a través de un vertido por encima de un muro o pared de espesor considerable. El funcionamiento es mediante caída libre, de otro modo se asemejaría a un canal de medición.



VERTEDEROS DE PARED GRUESA

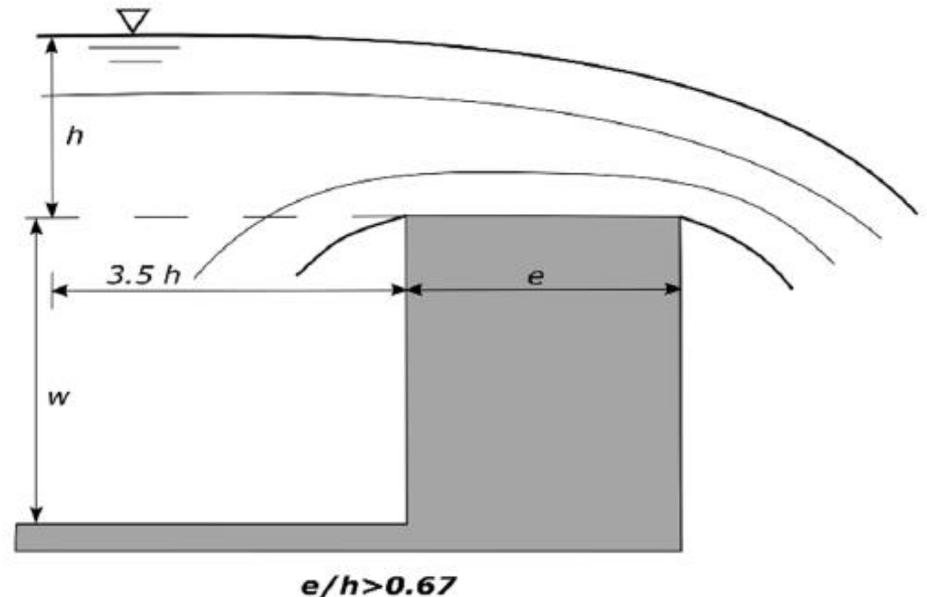
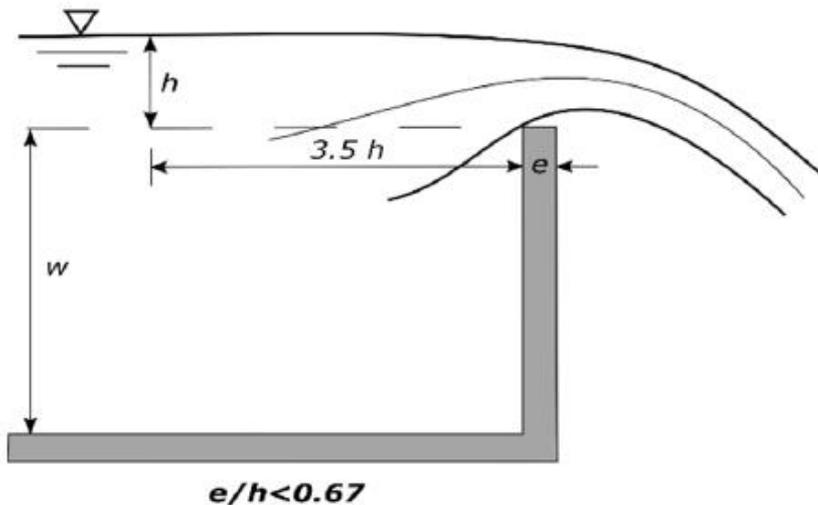
En este caso, la sección de control se genera a través de un vertido por encima de un muro o pared de espesor considerable. El funcionamiento es mediante caída libre, de otro modo se asemejaría a un canal de medición.



VERTEDEROS DE PARED GRUESA

Se clasifican en dos tipos:

- **De cresta delgada.** Cuando $e/h < 0.67$. El chorro se desprende de la pared y el funcionamiento se asume igual al de un vertedero de pared delgada. Se adoptan las mismas formulaciones.
- **De cresta ancha.** Cuando $e/h > 0.67$. El chorro se adhiere a la pared y el funcionamiento cambia.



VERTEDEROS DE PARED GRUESA

Vertederos de cresta ancha: una aproximación al problema es extender las formulaciones para el caso de pared delgada, agregando un coeficiente de descarga adicional.

Ejemplo para el caso rectangular sin contracción lateral:

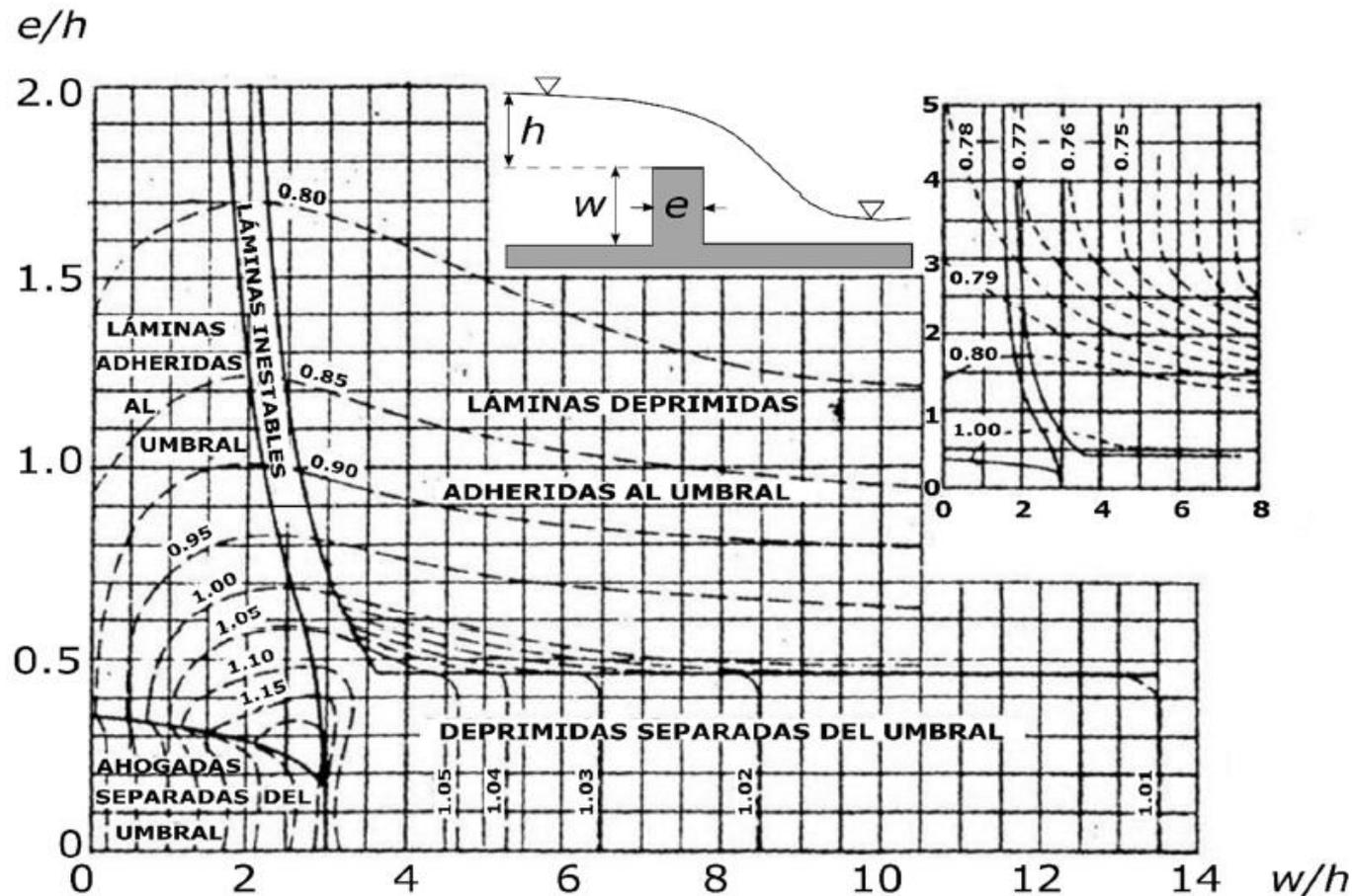
$$Q = \varepsilon_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2}$$

$$\varepsilon_1 = 0.7 + \frac{0.185}{e/h} \quad \text{si } e/h \leq 3$$

$$\varepsilon_1 = 0.75 + \frac{0.1}{e/h} \quad \text{si } 3 \leq e/h < 10$$

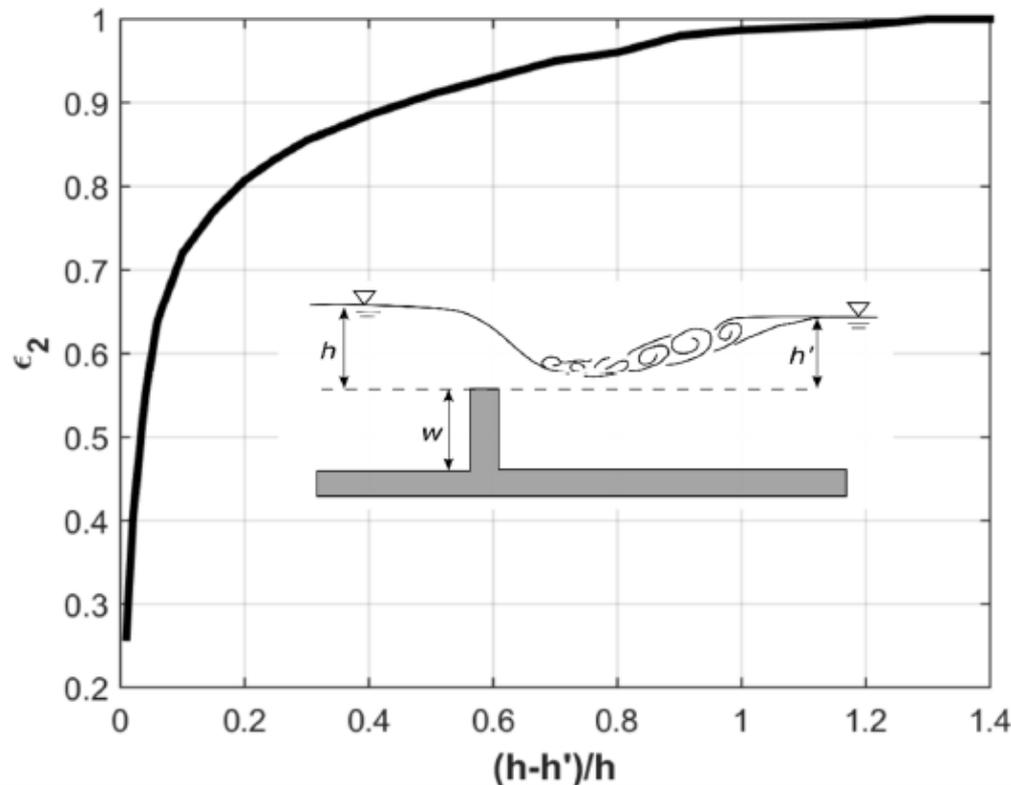
VERTEDEROS DE PARED GRUESA

También puede aproximarse a partir del siguiente ábaco teniendo en cuenta w/h



VERTEDEROS DE PARED GRUESA

Existen formulaciones que también permiten determinar el caudal en condiciones de descarga ahogada, introduciendo un nuevo coeficiente de descarga. Debe tenerse en cuenta que en este caso la determinación pierde precisión considerablemente.



$$Q = \epsilon_2 \epsilon_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2}$$

CANALES DE AFORO

Se utilizan contracciones laterales o sobreelevaciones del fondo localizadas para imponer un tirante crítico y así generar una sección de control. En este caso no se genera un vertido.

Su funcionamiento es análogo al de los vertederos. Se mide el nivel en la sección de aproximación y el mismo se asocia a una curva Q vs. h característica de la estructura.



CANALES DE AFORO



CANALES DE AFORO

Se clasifican en dos tipos:

- **De cresta larga.** La cresta es lo suficientemente larga como para que se generen líneas de flujo casi paralelas en la región de control, con lo cual son válidas las aproximaciones analíticas derivadas de la mecánica de los fluidos.
- **De cresta corta.** No son lo suficientemente largas y se produce FRV, por lo que su caracterización requiere de datos experimentales. Incluyen algunos tipos de canales preestablecidos de uso extendido como el canal Parshall.

CANALES DE AFORO

Comparación con vertederos:

- Generan un remanso entre 4 y 10 veces menor al de un vertedero para la determinación del mismo caudal.
- Generan menor acumulación de sedimento y no tienen problemas de obstrucción con elementos flotantes.
- Pueden ser más costosos dependiendo del diseño y el material utilizado.
- Miden un menor rango de caudales sin ahogarse. No obstante, en ocasiones es posible realizar estimaciones aunque estén ahogados.
- Existe flexibilidad para el diseño de su forma y dimensiones.
- Hay varios diseños que están predeterminados y ampliamente estudiados (como el canal Parshall)

CANALES DE AFORO

Canales de cresta larga:

Tienen la ventaja de poder ser diseñados de manera sencilla, otorgando estimaciones precisas.

Su diseño es flexible por lo que pueden adaptarse a cualquier geometría de canal o cauce, sin generar remansos importantes.

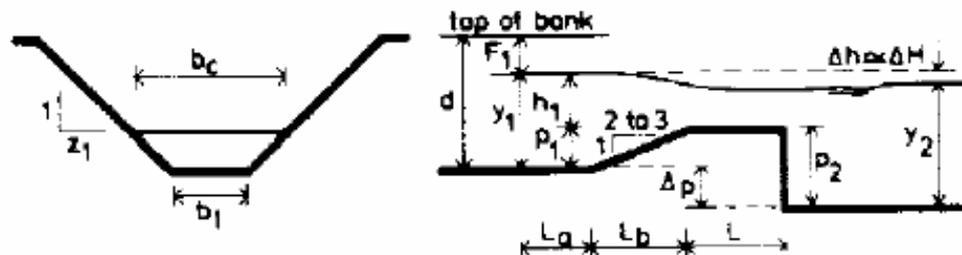
El diseño se puede realizar y verificar con métodos computacionales como el software [WinFlume \(USBR\)](#).

También existen algunos diseños preestablecidos. Por lo general consisten en una sobreelevación del fondo seguida de una caída abrupta.

CANALES DE AFORO

Canales de cresta larga:

| Canal Shape | | | Range of Canal Capacities | | Weir selection (table 8-3) | Weir Dimensions | | Minimum head loss, ΔH^a (ft) |
|---------------------|-----------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| Side slope Z_1 | Bottom width, b_1 (ft) | Maximum canal depth ^b , d (ft) | Q_{min}^c (ft ³ /s) | Q_{max} (ft ³ /s) | | Crest width, b_c (ft) | Sill height, p_1 (ft) | |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) |
| 1.0 | 1.0 | 2.5 | 1.9 | 8 ^d | A _e | 2.0 | 0.50 | 0.06 |
| | | | 4.2 | 16 ^d | B _e | 2.5 | 0.75 | 0.08 |
| | | | 4.8 | 19 | C _e | 3.0 | 1.00 | 0.10 |
| | | | 5.6 | 15 | D _e | 3.5 | 1.25 | 0.12 |
| | | | 6.2 | 11 | E _e | 4.0 | 1.50 | 0.13 |
| 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.6 | 27 ^d | D _e | 3.5 | 0.75 | 0.10 |
| | | | 6.2 | 40 | E _e | 4.0 | 1.00 | 0.12 |
| | | | 6.8 | 33 | F _e | 4.5 | 1.25 | 0.14 |
| | | | 7.4 | 27 | G _e | 5.0 | 1.50 | 0.15 |
| | | | 8.2 | 22 | H _e | 5.5 | 1.75 | 0.16 |
| 1.25 | 1.0 | 3.0 | 5.0 | 19 ^d | I _e | 3.0 | 0.8 | 0.08 |
| | | | 6.4 | 35 | J _e | 4.0 | 1.2 | 0.11 |
| | | | 7.6 | 26 | K _e | 5.0 | 1.6 | 0.14 |



CANALES DE AFORO

Canales de cresta corta:



CANALES DE AFORO

Canales de cresta corta:



CANALES DE AFORO

Canales de cresta corta:

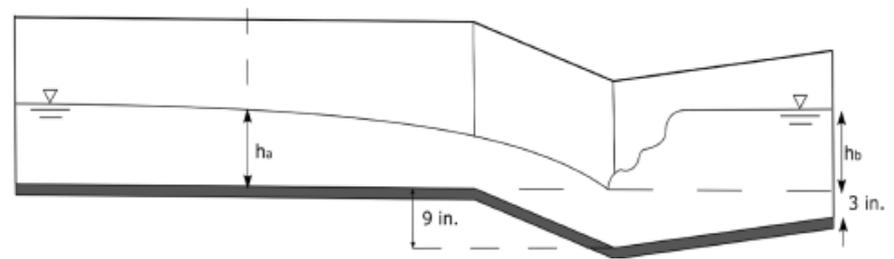
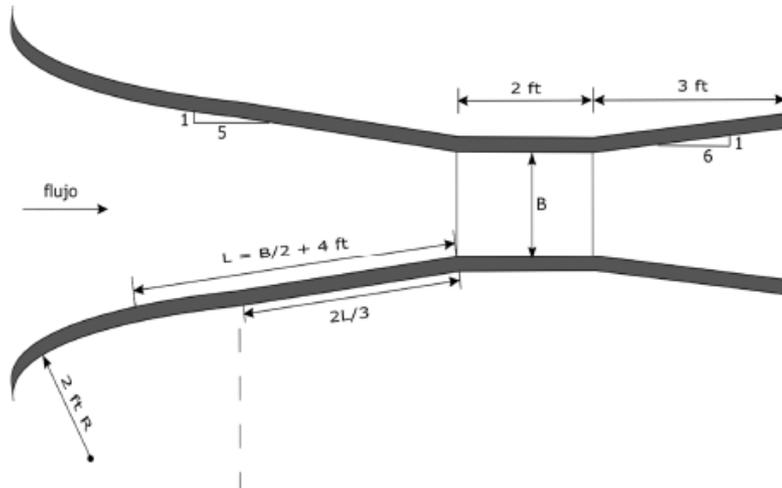


CANALES DE AFORO

Canales Parshall:

Su uso es extendido en aplicaciones industriales o en canales artificiales (por ejemplo para riego). El conocimiento que se tiene de su uso lo convierte en un método confiable.

La sección de control se consigue mediante una contracción y un ascenso en el fondo, seguido de un descenso abrupto. Su forma particular evita que se produzca un remanso significativo.



CANALES DE AFORO

Canales Parshall:

Sus dimensiones están estandarizadas y existen ecuaciones obtenidas experimentalmente que determinan el caudal en función del tirante en la sección de aproximación.

| B (en pies) | Q (en pies ³ /s) |
|---------------|--------------------------------|
| 3" | $Q = 0.992h_a^{1.547}$ |
| 6" | $Q = 2.06h_a^{1.58}$ |
| 9" | $Q = 3.07h_a^{1.53}$ |
| 12" a 8' | $Q = 4Bh_a^{1.522}B^{0.026}$ |
| 10' a 50' | $Q = [3.6875B + 2.5]h_a^{1.6}$ |

Ecuaciones de funcionamiento en
función de dimensiones

| B (en pies) | h_b / h_a |
|---------------|-------------|
| 3", 6" y 9" | < 0.6 |
| 1' a 8' | < 0.7 |
| 10' a 50' | < 0.8 |

Condiciones de descarga libre

CANALES DE AFORO

Canales Parshall:

También existen formulaciones que caracterizan el flujo en situación de descarga ahogada, aunque su uso no se recomienda ya que se pierde precisión.

$$DQ = \frac{h_a^2 W}{10} [3.364 + 20.19S^2 \ln S]^2$$

Para canales de ancho entre 8ft y 50ft.

$$DQ = M(0.000132 h_a^{2.123} e^{9.284S})$$

Para canales de ancho entre 1ft y 8ft.

| Size of Flume, W (feet) | Multiplying Factor, M |
|------------------------------|-------------------------|
| 1 | 1.0 |
| 1.5 | 1.4 |
| 2 | 1.8 |
| 3 | 2.4 |
| 4 | 3.1 |
| 5 | 3.7 |
| 6 | 4.3 |
| 7 | 4.9 |
| 8 | 5.4 |

Siendo:

- DQ la reducción de caudal respecto a la condición no sumergida (ft^3/s)
- h_a el tirante de aproximación
- W el ancho de fondo
- $S = h_b/h_a$ el coeficiente de sumergencia

ALCANTARILLAS

Los desarrollos de Bodhaine (1968) que se utilizan para el diseño de alcantarillas, fueron originalmente desarrolladas como método de aforo de caudales de crecida en pequeñas cuencas rurales.



Techniques of Water-Resources Investigations
of the United States Geological Survey



Chapter A3

**MEASUREMENT OF PEAK DISCHARGE |
AT CULVERTS BY INDIRECT METHODS**

By G. L. Bodhaine

ALCANTARILLAS

Mediante una combinación de ensayos de laboratorio y desarrollos teóricos, el autor caracterizó 6 tipos de flujo a través de alcantarillas y determinó formulaciones para estimación del caudal en función de los tirantes aguas arriba y debajo de las mismas. Sus ensayos incluyeron una variedad de geometrías y materiales de construcción.

| TYPE | EXAMPLE | TYPE | EXAMPLE |
|---|--|---|---|
| 1 CRITICAL DEPTH AT INLET $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/h_c < 1.0$ $S_0 > S_c$ | $Q = CA_c \sqrt{2g(h_1 - z + a_1 \frac{V_1^2}{2g} - d_c - h_{f_{1,2}})}$ | 4 SUBMERGED OUTLET $\frac{h_1 - z}{D} > 1.0$ $h_4/D > 1.0$ | $Q = CA_0 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_4)}{1 + \frac{29C^2 n^2 L}{R_0^{4/3}}}}$ |
| 2 CRITICAL DEPTH AT OUTLET $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/h_c < 1.0$ $S_0 < S_c$ | $Q = CA_c \sqrt{2g(h_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} - d_c - h_{f_{1,2}} - h_{f_{2,3}})}$ | 5 RAPID FLOW AT INLET $\frac{h_1 - z}{D} \geq 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$ | $Q = CA_0 \sqrt{2g(h_1 - z)}$ |
| 3 TRANQUIL FLOW THROUGHOUT $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$ $h_4/h_c > 1.0$ | $Q = CA_3 \sqrt{2g(h_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} - h_3 - h_{f_{1,2}} - h_{f_{2,3}})}$ | 6 FULL FLOW FREE OUTFALL $\frac{h_1 - z}{D} \geq 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$ | $Q = CA_0 \sqrt{2g(h_1 - h_3 - h_{f_{2,3}})}$ |

ALCANTARILLAS

Estas formulaciones permiten la estimación de caudales pico a partir de las marcas dejadas por la crecida en las paredes de las alcantarillas.

Flujo tipo 1 y 2:

$$Q = C_{D1} A \left[\frac{2g(h_1 - h_4)}{1 + \frac{2gC_{D1}^2 n^2 L}{R_h^{4/3}}} \right]^{1/2}$$

Flujo tipo 3:

$$Q = C_{D3} A [2g(h_1 - z)]^{1/2}$$

Flujo tipo 4:

$$Q = C_{D4} A_c \sqrt{2g \left(h_1 - z + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_c - \frac{Q^2 L_{1-2}}{K_1 K_c} \right)}$$

Flujo tipo 5:

$$Q = C_{D5} A_c \sqrt{2g \left(h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_c - \frac{Q^2 L_{1-2}}{K_1 K_2} - \frac{Q^2 L_{2-3}}{K_2 K_c} \right)}$$

Flujo tipo 6:

$$Q = C_{D6} A_3 \sqrt{2g \left(h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_3 - \frac{Q^2 L_{1-2}}{K_1 K_2} - \frac{Q^2 L_{2-3}}{K_2 K_3} \right)}$$

REPASO: CURVAS DE AFORO

Curva de aforo:

REPASO: CURVAS DE AFORO

Curva de aforo:

Curvas que se usan para estimar el caudal a partir del nivel, en secciones que no son de control. **En esos casos no hay una relación única entre ambas variables.** Útiles para medición de caudales en ríos medianos y grandes con secciones estables.

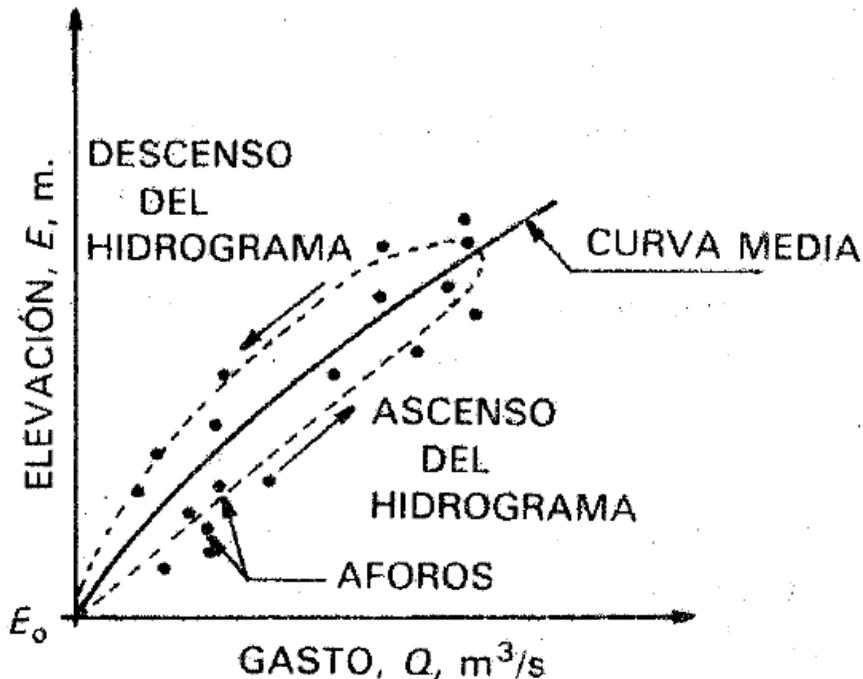
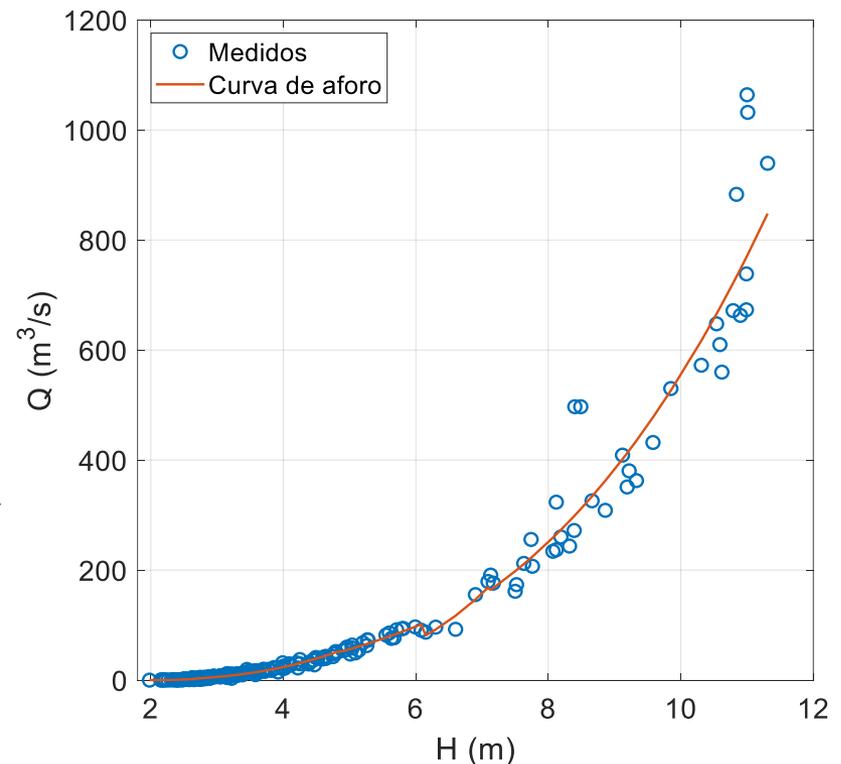


Figura extraída de Aparicio (1989).



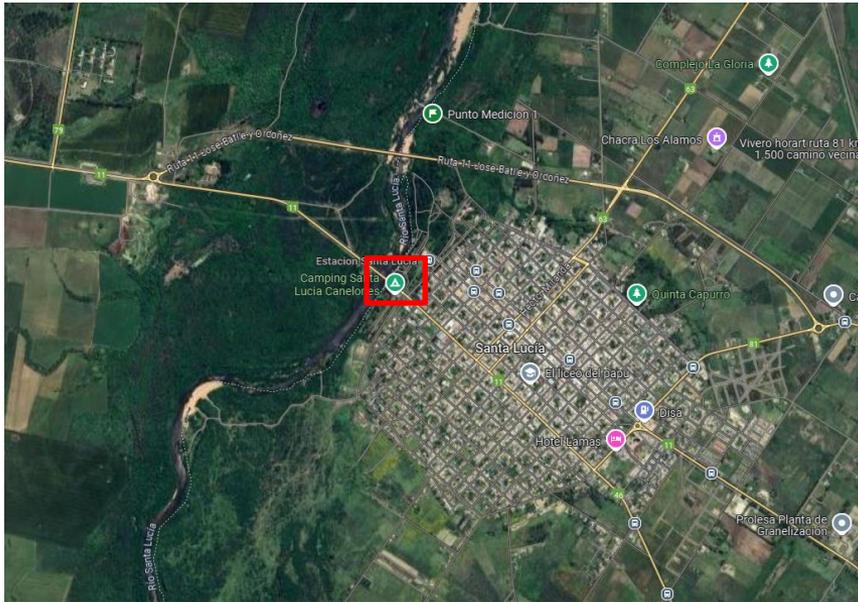
REPASO: CURVAS DE AFORO

Uso e interpretación de la curva de aforo:

- ¿A qué valor corresponde un dato de caudal tomado de una curva de aforo?
- ¿De dónde provienen los datos de caudal de la web de DINAGUA?

SALIDA DE CAMPO

Río Santa Lucía – Ruta 11 (vieja):



SALIDA DE CAMPO

Río Santa Lucía – Ruta 11 (vieja):

