

Conservación de Suelos y Aguas

Manual de modelos matemáticos para el cálculo de movimiento de tierras y variables hidráulicas en canales triangulares, circulares, trapezoidales, rectangulares y parabólicos por construir perpendiculares a las pendientes

Escuela Ingeniería Agrícola

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Autor:

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal.

2025

Esta obra está bajo licencia [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



[CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Dedicatoria y agradecimiento:

**A Dios sobre todas las cosas que es el dador de
vida y de toda buena dádiva.**

A mi amada esposa Kattia Lorena Moreno Valencia.

A mis amados hijos Jafet y Kemuel Chavarría Moreno.

**A todos aquellos que, en algún momento, en alguna
medida o en alguna ocasión me han apoyado, ayudado y
aconsejado.**

Índice General

Índice de figuras	9
Introducción	11
Capítulo 1: Acequia de ladera triangular	12
Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte en canales con taludes laterales iguales y un lado vertical contra el terreno, donde el talud opuesto varía según la pendiente natural ($z_1 = z_2 \neq z_3, z_4 = 0$)	12
Caso 2: Se presentan ecuaciones para calcular volúmenes de corte en canales con taludes laterales asimétricos y un lado vertical contra el terreno, donde el talud opuesto varía según la pendiente natural ($z_1 \neq z_2 \neq z_3, z_4 = 0$)	14
Caso 3: Se proporcionan ecuaciones para el cálculo de volúmenes de corte en canales de sección triangular con tres taludes iguales, donde el talud del lado opuesto se determina por la pendiente del terreno ($z_1 = z_2 = z_4 \neq z_3$)	16
Caso 4: Se presentan ecuaciones para calcular los volúmenes de corte en canales donde los dos taludes del canal son iguales, pero el talud de la pared del terreno y el talud opuesto varían debido a condiciones independientes ($z_1 = z_2 \neq z_3 \neq z_4$)	19
Caso 5: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte con el talud de la pared del terreno donde se construye es igual al talud de la sección hidráulica (	

$z_1 = z_4$), pero el talud debido a la pendiente del terreno y los taludes de las paredes del canal conductor son diferentes ($z_1 = z_4 \neq z_2 \neq z_3$)	22
Caso 6: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte donde se presentan todos los taludes diferentes (terreno, canal y pendiente del terreno) $z_1 \neq z_2 \neq z_3 \neq z_4$	25
Caso 6.1: Cálculo de los parámetros hidráulicos de las acequias triangulares donde los taludes de la sección transversal de la sección hidráulica son iguales en el canal de conducción, $z = z_1 = z_2$	27
Caso 6.2: Cálculo de los parámetros hidráulicos de las acequias de ladera triangulares donde los taludes de la sección transversal de la sección hidráulica son diferentes en el canal de conducción, $z \neq z_1 \neq z_2$	29
Capítulo 2: Acequia de ladera semicircular	31
Caso semicircular 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte con el talud de la pared del terreno donde se construye es igual a cero ($z_4 = 0$).....	31
Caso semicircular 2: Ecuaciones para el cálculo de volúmenes de corte en canales donde el talud de la pared del terreno tiene un valor distinto de cero ($z_4 \neq 0$).....	34
Capítulo 3: Secciones de máxima eficiencia hidráulica para canales trapezoidales y rectangulares.....	37
Caso 1: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo trapezoidal con un único talud.....	37

Caso 2: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo rectangular (no tiene talud o $z=0$).....	39
Caso 3: Estimación del área hidráulica “A”, el perímetro mojado “P” y el radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo trapezoidal con talud único diferente de cero ($z \neq 0$).....	41
Caso 4: Estimación del área hidráulica “A”, el perímetro mojado “P” y el radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo rectangular sin talud ($z \neq 0$).....	42
Caso 5: En una condición de máxima eficiencia hidráulica para talud variable, se busca para cualquiera de las secciones trapezoidales variables, cual es el talud más eficiente, para lo cual; el tirante se considera constante.	43
Caso 6: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo trapezoidal con dos taludes “ $z_1 \neq z_2$ ”	44
Caso 7: Estimación del radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo trapezoidal con dos taludes diferente de cero ($z_1 \neq z_2 \neq 0$)	46
Caso 8: Estimación de la secciones de mínima infiltración para canales trapezoidales con taludes iguales y con diferentes taludes	47
Capítulo 4: Acequia de ladera rectangular	48
Canal rectangular para la sección de máxima eficiencia hidráulica	48

Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos en el canal conductor en la acequia de ladera con forma rectangular sin talud en el terreno fuera del área conductora de agua.	49
Caso 2: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos en el canal conductor en la acequia de ladera con forma rectangular con talud en el terreno fuera del área conductora de agua.	52
Capítulo 5: Acequia de ladera trapezoidal.....	54
Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes iguales en el canal conductor y el talud en la pared del terreno, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z = z_1 = z_2 = z_4 \neq z_3$)	54
Caso 2: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes diferentes en el canal conductor y el talud en la pared del terreno igual al talud de la pared del del terreno del canal conductor, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z_1 = z_4 \neq z_2 \neq z_3$)	58
Caso 3: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes diferentes en el canal conductor y el talud en la pared del terreno igual al talud de la pared del del terreno del canal conductor, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z_1 \neq z_4 \neq z_2 \neq z_3$)	62
Caso 4: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes iguales en el canal conductor y tanto el talud en	

la pared del terreno diferente como el talud debido a la pendiente ($z_1 = z_2 \neq z_4 \neq z_3$).....	66
Capítulo 6: Acequias de ladera Parabólicas.....	69
Caso 1: Ecuaciones fundamentales generales	69
Caso 2: Ecuaciones fundamentales para calcular los volúmenes de corte de la sección conductora de agua en un canal parabólico juntamente con su perímetro mojado, el área y el radio hidráulico para la sección transportadora del agua...	71
Caso 3: Ecuaciones fundamentales para la estimación de la relación matemática entre espejo de agua “T” y el tirante “y” en un canal parabólico y definir una variable en términos de la otra	76
1- Definición de la familia de parábolas a utilizar en los canales parabólicos.	76
2- Relación de los valores de “y” con los valores de “T” donde el espejo de agua es dos veces el valor de “x” ($T = 2 \cdot x$).....	76
Caso 4: Ecuaciones fundamentales de parámetros hidráulicos para tres canales parabólicos con diferente “a”	78
Caso 5: Desarrollo de las ecuaciones fundamentales de las área de corte y volúmenes de tierras totales de las secciones parabólicas.....	79
Caso 6: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte del área de corte 2 “Ac2” en un canal conductor parabólico con talud en la pared del terreno donde se construye, donde el talud debido a la pendiente del terreno natural es diferente de cero ($z_3 \neq 0$) (Figura 10).....	92

Bibliografía	94
--------------------	----

Índice de figuras

Figura 1: Acequia de ladera triangular.....	12
Figura 2: acequia de ladera triangular	14
Figura 3: Acequia de ladera triangular.....	16
Figura 4: acequia de ladera triangular	19
Figura 5: acequia de ladera triangular	22
Figura 6: acequia de ladera triangular	25
Figura 7: Parámetros hidráulicos para las acequias de ladera triangular ($Z = Z_1 = Z_2$)	27
Figura 8: Parámetros hidráulicos para las acequias de ladera triangular donde ($z \neq z_1 \neq z_2$).....	29
Figura 9: Acequia de ladera semicircular	31
Figura 10: Acequia de ladera semicircular	34
Figura 11: Sección transversal de un canal trapezoidal donde se tiene un talud único " $z = z_1$ "	37
Figura 12: Sección rectangular de un canal donde no se presenta un talud ($z=0$)	39
Figura 13: Sección transversal de un canal trapezoidal donde se tienen diferentes taludes " $z_1 \neq z_2$ "	44
Figura 14: Parámetros hidráulicos para las acequias de rectangular	49
Figura 15: Área de corte 2 " Ac_2 " para las acequias de rectangular	50

Figura 16: Volúmenes de corte para las acequias de ladera de forma rectangular	52
Figura 17: acequia de ladera trapezoidal	54
Figura 18: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal	56
Figura 19: Acequia de ladera trapezoidal	58
Figura 20: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal	60
Figura 21: Acequia de ladera trapezoidal	62
Figura 22: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal	64
Figura 23: Acequia de ladera trapezoidal	66
Figura 24: Acequia de ladera con sección parabólica según sin talud en la pared del terreno donde se construye	71
Figura 25: Acequia de ladera con sección parabólica según con talud en la pared del terreno donde se construye	72
Figura 26: Acequia de ladera con sección parabólica	73
Figura 27: Acequia de ladera parabólica para el caso 1.....	79
Figura 28: Acequia de ladera parabólica para el caso 2.....	92

Introducción

Diseño de ingeniería en el área de conservación de los suelos y aguas es fundamental para establecer en un lenguaje sencillo matemático las técnicas de cálculos de dimensionamiento de la infraestructura según sus necesidades y, además, es la muestra de cómo se obtiene una expresión matemática para hacer dichos cálculos. Al presentar los procedimientos para alcanzar las expresiones, cada usuario podrá determinar si la aplicación se ajusta a sus necesidades o requiere consideraciones adicionales.

Las expresiones matemáticas encontradas se refieren a las formas más usuales para la evacuación de excesos de agua en zonas lluviosas con conservación de suelos y pendientes altas, como acequias de ladera y canales de desviación, para secciones triangulares, rectangulares, trapezoidales, semicirculares y parabólicas.

Es fundamental conocer las dimensiones de dicha infraestructura en el movimiento de tierras según sus necesidades para poder hacer proyecciones presupuestarias, proyectar fechas de realización contando con dichas proyecciones para los movimientos de flujos de caja, necesidades de equipos, herramientas y mano de obra, buscar financiamiento entre otros.

Esta obra ofrece soluciones prácticas y ágiles para el diseño hidráulico y el cálculo de movimiento de tierras aplicados a la conservación de suelos y aguas en los canales mencionados, considerando sus posibles variantes.

Capítulo 1: Acequia de ladera triangular

Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte en canales con taludes laterales iguales y un lado vertical contra el terreno, donde el talud opuesto varía según la pendiente natural ($z_1 = z_2 \neq z_3, z_4 = 0$)

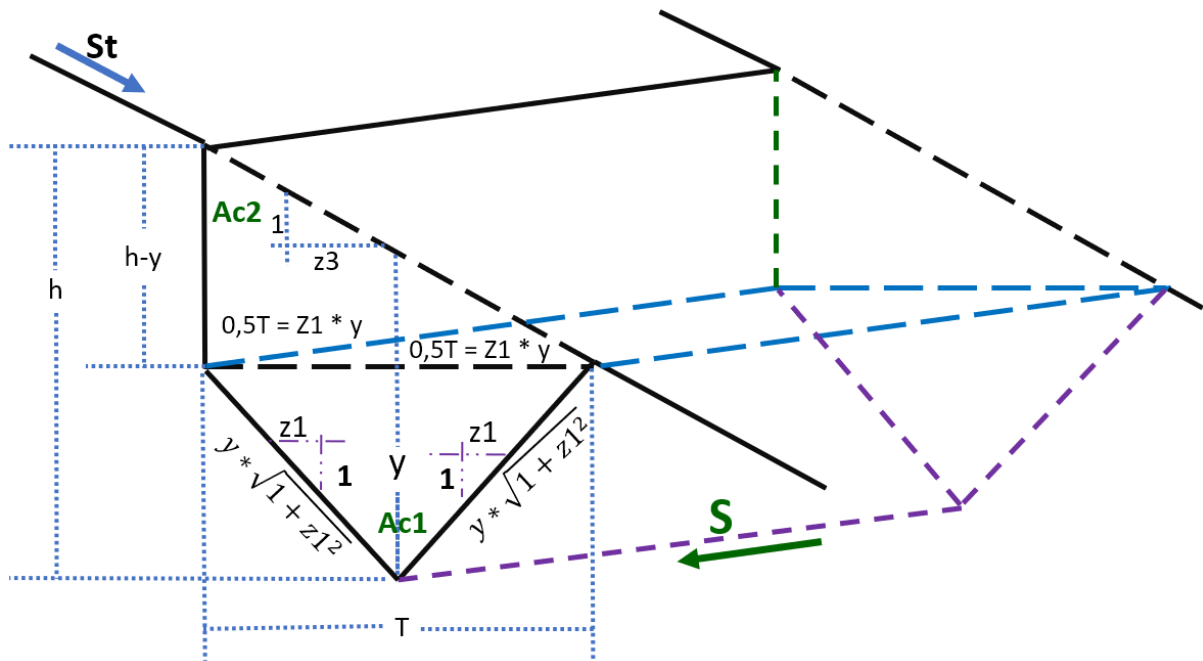


Figura 1: Acequia de ladera triangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

z_4 = talud en la pared de construcción (adimensional)

z = talud (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

Ac_1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

Ac_2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

h = valor a determinar (m)

W = valor a determinar (m)

B = ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

Set = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Cálculo de los volúmenes de corte:

Cálculo del área de corte 1 (Ac_1) que corresponde al área hidráulica del canal

:

$$Ac_1 = z_1 * y^2 \quad (m^2)$$

Cálculo del área de corte Ac_2 :

$$Ac_2(m^2) = \frac{z_1^2 * y^2 * S_t}{50}$$

Cálculo el área de corte total:

$$Ac_T(m^2) = z_1 y^2 \left(1 + \frac{z_1 S_T}{50} \right)$$

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal:

$$V_c \left(\frac{m^3}{m} \right) = z_1 y^2 \left(1 + \frac{z_1 S_T}{50} \right)$$

donde

y: tirante del canal (m)

St: pendiente del terreno (%)

z: talud del canal (sin unidades)

Se puede observar que el volumen de corte por cada metro lineal del canal en su cálculo solamente depende del talud del canal triangular, la pendiente del terreno y del tirante del canal.

Caso 2: Se presentan ecuaciones para calcular volúmenes de corte en canales con taludes laterales asimétricos y un lado vertical contra el terreno, donde el talud opuesto varía según la pendiente natural ($z1 \neq z2 \neq z3$, $z4 = 0$)

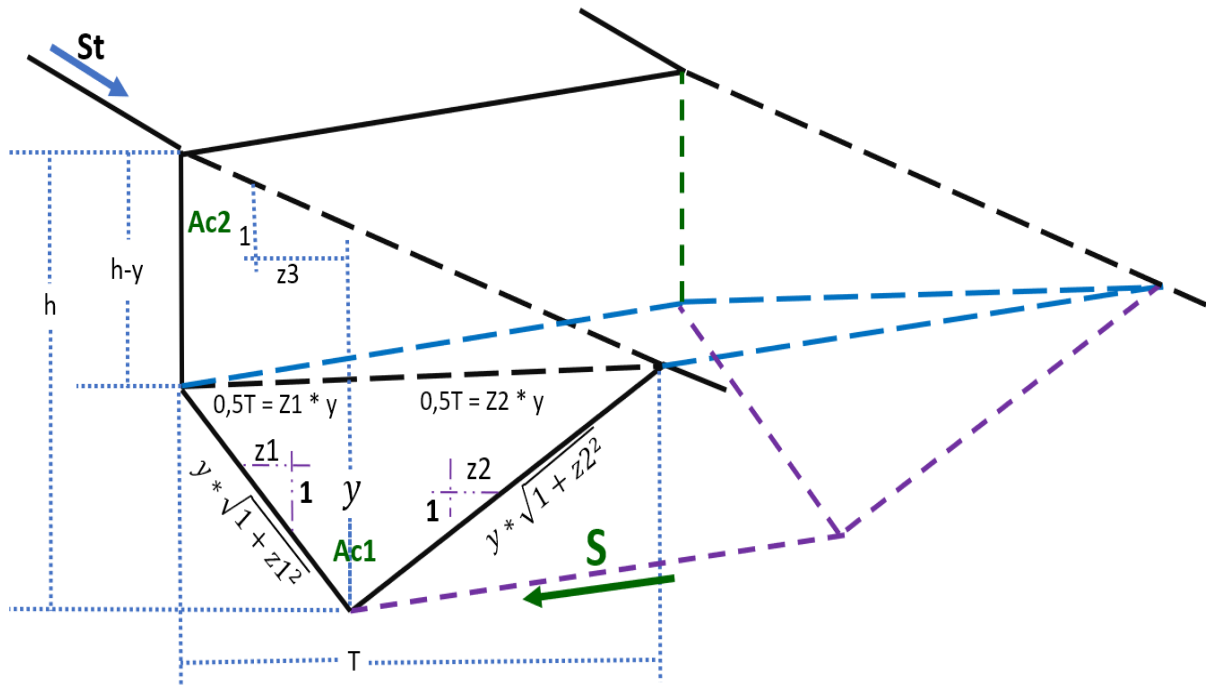


Figura 2: acequia de ladera triangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conducto (adimensional)

$z2$ = talud del canal conducto (adimensional)

$z4$ = talud en la pared de construcción (adimensional)

z = talud (adimensional)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

h = valor a determinar (m)

W = valor a determinar (m)

B = ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

Set = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Cálculo de volúmenes de corte

Cálculo del área de corte 1 (Ac1) donde corresponde al área hidráulica del canal triangular.

:

$$Ac_1(m^2) = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2)$$

Cálculo del área de corte Ac2:

$$Ac_2(m^2) = \frac{0,5 * y^2 * (z_1 + z_2)^2 * S_t}{100}$$

Calculando el área de corte total:

$$Ac_T(m^2) = 0,5y^2(z_1 + z_2) \left(1 + \frac{(z_1 + z_2)S_t}{100} \right)$$

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal triangular:

$$V_c \left(\frac{m^3}{m} \right) = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2) \left(1 + \frac{(z_1 + z_2) * S_t}{100} \right)$$

donde

y: tirante en el canal triangular (m)

St: pendiente del terreno (%)

z1 y z2: taludes del canal triangular (sin unidades)

Caso 3: Se proporcionan ecuaciones para el cálculo de volúmenes de corte en canales de sección triangular con tres taludes iguales, donde el talud del lado opuesto se determina por la pendiente del terreno ($z1 = z2 = z4 \neq z3$)

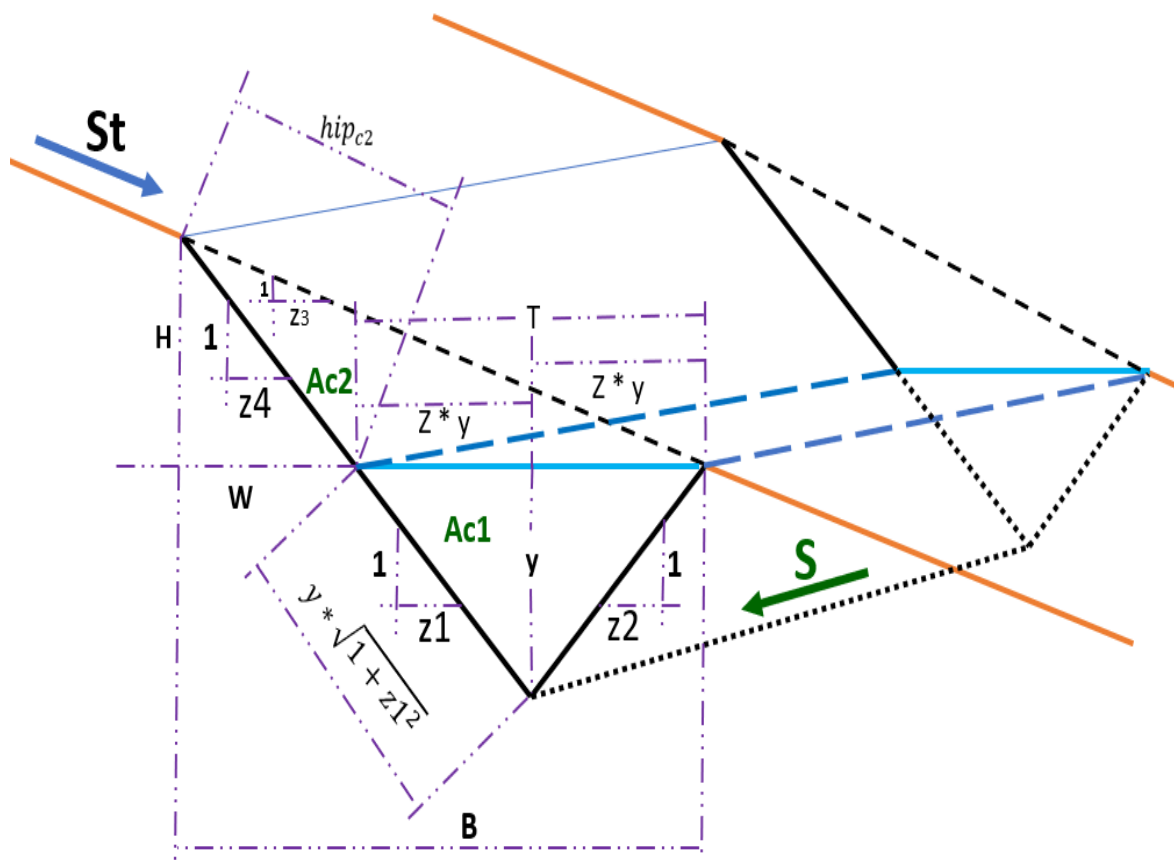


Figura 3: Acequia de ladera triangular

A partir de la imagen, se identifican los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conducto (adimensional).

$z2$ = talud del canal conducto (adimensional).

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional).

z = talud (adimensional).

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente (adimensional).

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m).

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior).

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior).

H = Valor a determinar (m).

W = Valor a determinar (m).

B = Ancho transversal total del corte (m).

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular.

St = pendiente del terreno (%).

S = pendiente del canal (m/m).

Cálculo de volúmenes de corte

Cálculo de área corte 1 (Ac1) correspondiente al área hidráulica:

$$Ac1 = z * y^2$$

Cálculo de área corte 2 (Ac2):

$$Ac2 = \frac{2z^2 * y^2 * St}{100 - z * St}$$

Cálculo del área de corte total

$$A_{cT}(m^2) = z * y^2 \left(1 + \frac{2 * z * St}{100 - z * St} \right)$$

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal triangular:

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = z * y^2 \left(1 + \frac{2 * z * St}{100 - z * St} \right)$$

Donde:

y: tirante en el canal triangular (m)

St: pendiente del terreno (%)

Z1 y Z2: taludes del canal triangular (sin unidades)

Se observa que en el producto del talud por la pendiente no debe ser igual o mayor a cien, ya que el volumen de corte se indetermina o resulta negativo. Por lo tanto, se debe cumplir la siguiente regla:

$$z * St \leq 100$$

Caso 4: Se presentan ecuaciones para calcular los volúmenes de corte en canales donde los dos taludes del canal son iguales, pero el talud de la pared del terreno y el talud opuesto varían debido a condiciones independientes ($z1 = z2 \neq z3 \neq z4$)

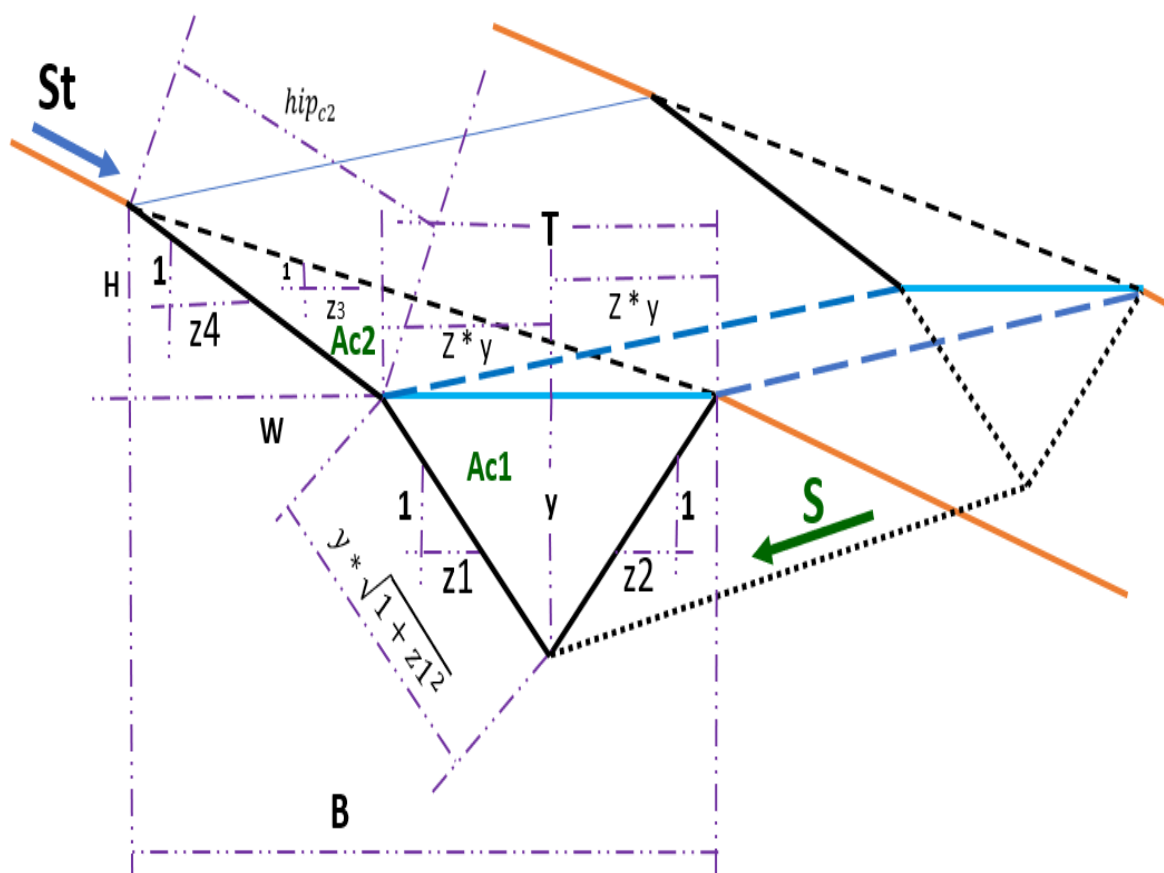


Figura 4: acequia de ladera triangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conducto (adimensional)

$z2$ = talud del canal conducto (adimensional)

$z4$ = talud en la pared de construcción (adimensional)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Para calcular los volúmenes de corte en esta sección, se deben considerar las siguientes consideraciones:

- 1- El canal conductor de agua o la zona hidráulica de la acequia de ladera son los mismos al anterior.

$$A_{hidráulica} = Ac1 = z * y^2$$

- 2- Como el talud de la pared de construcción z4 en este caso es diferente a los taludes z1 y z2 del área hidráulica del canal, entonces se produce un cambio en las áreas de la sección transversal del área de corte 2 (Ac2).

$$Ac2 = \frac{2 * z1^2 * y^2 * St}{(100 - z4 * St)}$$

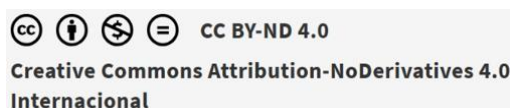
Cálculo el área de corte total:

$$A_{cT}(m^2) = z1 * y^2 \left(1 + \frac{2 * z1 * St}{100 - z4 * St} \right)$$

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal triangular:

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m-l}) = z1 * y^2 \left(1 + \frac{2 * z1 * St}{100 - z4 * St} \right)$$

Donde:



CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

y: tirante en el canal triangular (m)

St: pendiente del terreno (%)

Z₁ = Z₂: taludes del canal triangular (sin unidades)

Z₄: talud en la pared del terreno

Se puede observar que en esta Ecuación la multiplicación del talud por la pendiente no puede ser igual o mayor a cien porque el valor del volumen de corte se vuelve de signo negativo lo cual nos indica que se debe de cumplir la siguiente regla:

$$z_4 * St \leq 100$$

Caso 5: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte con el talud de la pared del terreno donde se construye es igual al talud de la sección hidráulica ($z1 = z4$), pero el talud debido a la pendiente del terreno y los taludes de las paredes del canal conductor son diferentes ($z1 = z4 \neq z2 \neq z3$)

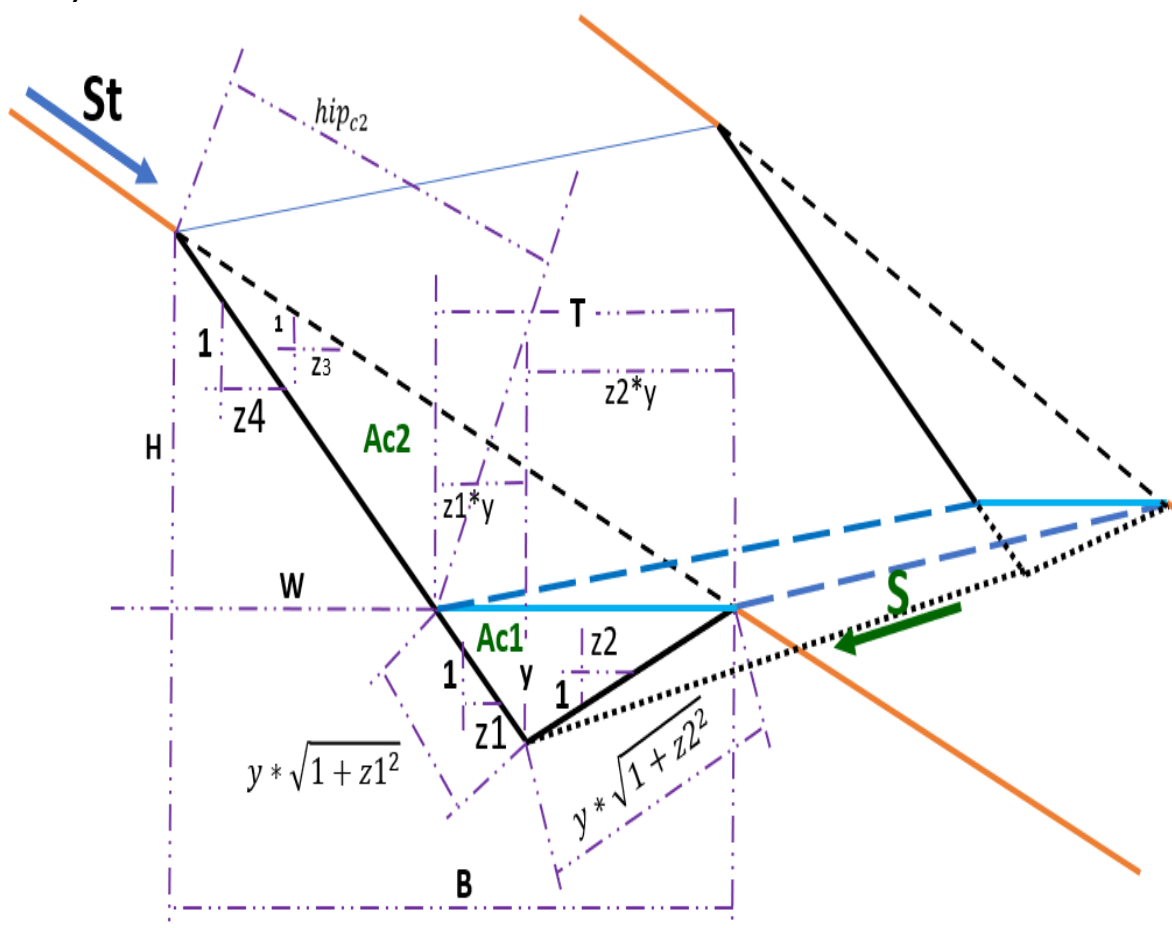


Figura 5: acequia de ladera triangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

- $z1$ = talud del canal conducto (adimensional)
- $z2$ = talud del canal conducto (adimensional)
- $z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional)
- $z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)
- y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m).

Ac1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior).

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior).

H = Valor a determinar (m).

W = Valor a determinar (m).

B = Ancho transversal total del corte (m.)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular.

St = pendiente del terreno (%).

S = pendiente del canal (m/m).

Para calcular los volúmenes de corte 1 (Ac1) en esta sección se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

- 1- El canal conductor de agua o la zona hidráulica de la acequia de ladera son:

$$Ac_1(m^2) = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2)$$

- 2- En el área de corte 2 también se cumple:

$$AC_2 = \frac{0,5 * S_t * y^2 * (Z_1 + Z_2)^2}{100 - Z_4 * S_t}$$

Cálculo del área de corte total

$$AC_t = 0,5 * y^2 * (Z_1 + Z_2) * \left(1 + \frac{S_t * (Z_1 + Z_2)}{100 - Z_1 * S_t}\right)$$

Donde:

A_{cT} = área de corte total en m²

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal triangular:

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = 0,5 * y^2 * (Z_1 + Z_2) * \left(1 + \frac{S_t * (Z_1 + Z_2)}{100 - Z_1 * S_t}\right)$$

Pero también puede ser de la siguiente manera debido a que $z_1 = z_4$:

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = 0,5 * y^2 * (Z_1 + Z_2) * \left(1 + \frac{S_t * (Z_1 + Z_2)}{100 - Z_4 * S_t} \right)$$

Se puede observar que en esta ecuación la multiplicación del talud por la pendiente no puede ser igual o mayor a cien porque el valor del volumen de corte se vuelve de signo negativo lo cual nos indica que se debe de cumplir la siguiente regla:

$$z_1 = z_4 \text{ y } z_1 * S_t \leq 100 \text{ o } z_4 * S_t \leq 100$$

Caso 6: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte donde se presentan todos los taludes diferentes (terreno, canal y pendiente del terreno) $z1 \neq z2 \neq z3 \neq z4$

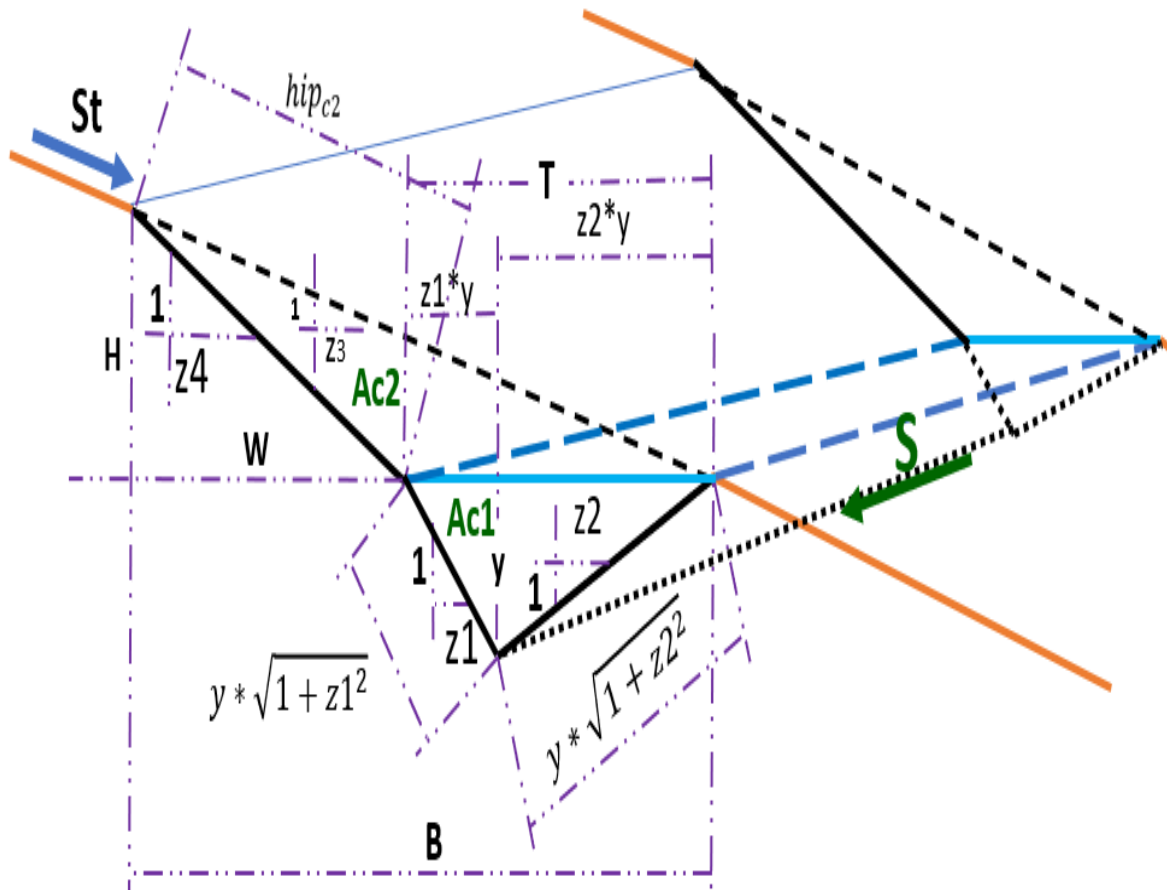


Figura 6: acequia de ladera triangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conducto (adimensional).

$z2$ = talud del canal conducto (adimensional).

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional).

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m).

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior).

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior).

H = Valor a determinar (m).

W = Valor a determinar (m).

B = Ancho transversal total del corte (m).

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular.

St = pendiente del terreno (%).

S = pendiente del canal (m/m).

Para calcular los volúmenes de corte 1 (Ac1) en esta sección se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

1- El canal conductor de agua o la zona hidráulica de la acequia de ladera son:

$$Ac_1(m^2) = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2)$$

Cálculo el área de corte 2 (Ac2):

$$Ac_2 = \frac{0,5 * St * y^2 * (z_1 + z_2)^2}{(100 - z_4 * St)}$$

Cálculo el área de corte total

$$Act = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2) * \left(1 + \frac{St * (z_1 + z_2)}{(100 - z_4 * St)}\right)$$

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal

$$V_{CT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = 0,5 * y^2 * (Z_1 + Z_2) * \left(1 + \frac{S_t * (Z_1 + Z_2)}{100 - Z_4 * S_t}\right)$$

Caso 6.1: Cálculo de los parámetros hidráulicos de las acequias triangulares donde los taludes de la sección transversal de la sección hidráulica son iguales en el canal de conducción, $z = z_1 = z_2$

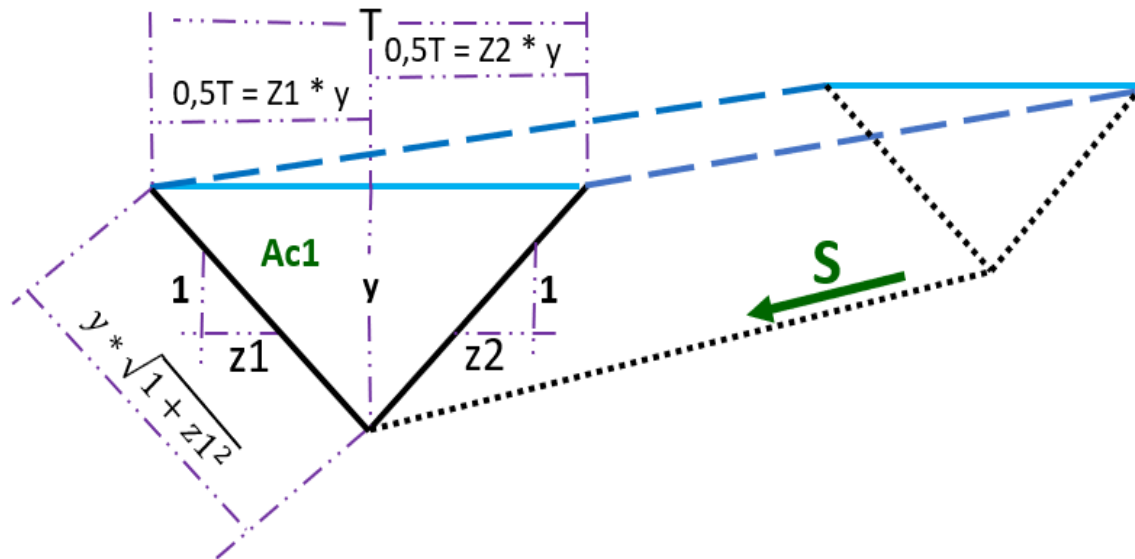


Figura 7: Parámetros hidráulicos para las acequias de ladera triangular ($Z = Z_1 = Z_2$)

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

Ac_1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

S = pendiente del canal (m/m)

Se cumple que el área hidráulica es:

$$Ac_1 \text{ (m}^2\text{)} = z_1 * y^2$$

Cálculo del perímetro mojado de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$P = 2y \sqrt{z^2 + 1}$$

Cálculo del radio hidráulico de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$R = \frac{zy}{2\sqrt{z^2 + 1}}$$

Cálculo del tirante conociendo el caudal, el talud, la pendiente del canal y el coeficiente de rugosidad de la acequia de ladera triangular con taludes iguales ($z_1 = z_2$) en la sección hidráulica es:

$$y = \left(\frac{Q * n * (2\sqrt{1 + z^2})^{\frac{2}{3}}}{z^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Caso 6.2: Cálculo de los parámetros hidráulicos de las acequias de ladera triangular donde los taludes de la sección transversal de la sección hidráulica son diferentes en el canal de conducción, $z \neq z_1 \neq z_2$

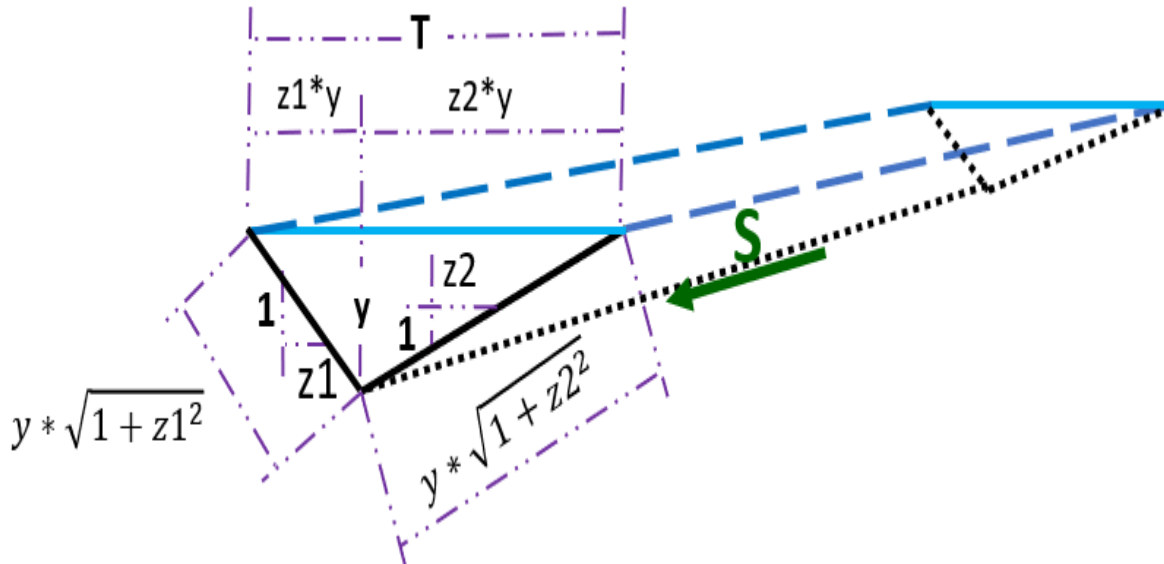


Figura 8: Parámetros hidráulicos para las acequias de ladera triangular donde ($z \neq z_1 \neq z_2$)

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

S = pendiente del canal (m/m)

Se cumple que para el cálculo del área hidráulica de la acequia de ladera triangular

$$A_{c1}(m^2) = 0,5 * y^2 * (z_1 + z_2)$$

Cálculo de espejo de agua de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$T = y(Z_1 + Z_2)$$

Cálculo del perímetro mojado de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$Pm = y * \left(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right)$$

Cálculo del radio hidráulico de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad:

$$R = \frac{0,5 * y * (z_1 + z_2)}{\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2}}$$

Cálculo del tirante conociendo el caudal, el talud, la pendiente del canal y el coeficiente de rugosidad de la acequia de ladera triangular con taludes diferentes ($z_1 \neq z_2$) en la sección hidráulica

$$y = \frac{(Q * n)^{\frac{3}{8}} * \left[\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right]^{\frac{1}{4}}}{S^{\frac{3}{16}} * [0,5 * (z_1 + z_2)]^{\frac{5}{8}}}$$

Capítulo 2: Acequia de ladera semicircular

Caso semicircular 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte con el talud de la pared del terreno donde se construye es igual a cero ($z_4 = 0$)

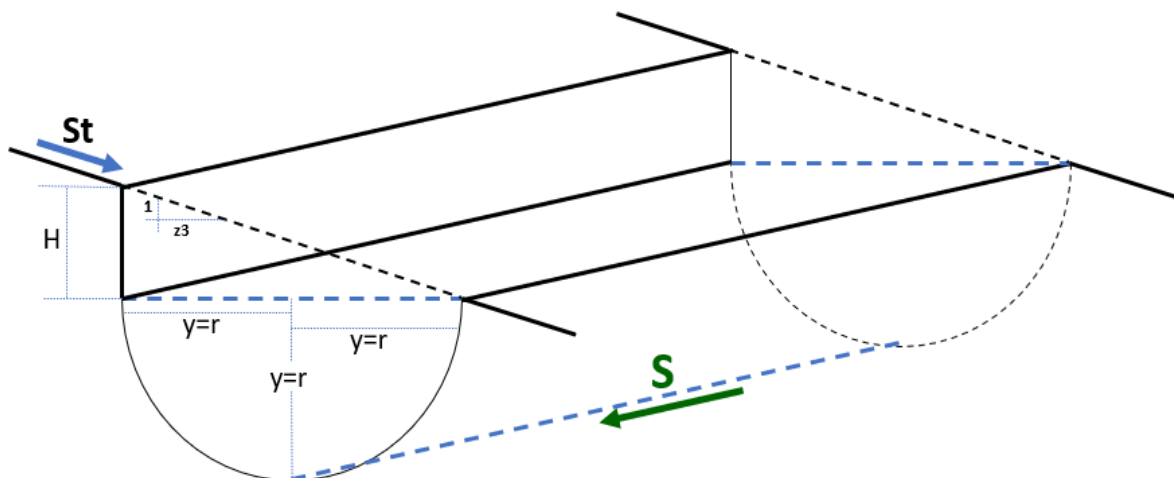


Figura 9: Acequia de ladera semicircular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional).
 $y = r$ = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera circular (m) que corresponde al radio del semi círculo.
 H = valor a determinar (m).
 St = pendiente del terreno (%).
 S = pendiente del canal (m/m).

Cálculo de las áreas de corte

Cálculo del área de corte 1 “Ac1” que es igual al área hidráulica”:

$$A_{hid} = A_{c1} = 0,5 * \pi * r^2$$

Debido a que $r = y$

$$A_{hid} = A_{c1} = 0,5 * \pi * y^2$$

Cálculo el área de corte 2 (A_{c2})

$$A_{c2} = \frac{r^2 * S_t}{50}$$

Debido a que $r = y$

$$A_{c2} = \frac{y^2 * S_t}{50}$$

Cálculo el área de corte total

$$A_{ct} = \frac{r^2(25\pi + S_t)}{50}$$

Debido a que $r = y$

$$A_{ct} = \frac{y^2(25\pi + S_t)}{50}$$

Donde:

A_{ct} = área de corte total m^2

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal semi circular:

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = \frac{y^2(25\pi + S_t)}{50}$$

Debido a que $r = y$

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = \frac{r^2(25\pi + S_t)}{50}$$

Donde:

y : tirante en el canal triangular (m)

S_t : pendiente del terreno (%)

Cálculo de las otras variables hidráulicas para el cálculo del tirante “y”

Cálculo del perímetro mojado “Pm”

$$Pm = \pi * r$$

Debido a que $r = y$

$$Pm = \pi * y$$

Cálculo del radio hidráulico de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$R_{hid} = 0,5 * r$$

Debido a que $r = y$

$$R_{hid} = 0,5 * y$$

Cálculo del tirante con base en el caudal, pendiente del canal y el coeficiente de rugosidad

$$r = \left[\frac{Q * n}{\frac{1}{S^2} * 0,5^{\frac{5}{3}} * \pi} \right]^{\frac{3}{8}}$$

Debido a que $r = y$

$$y = \left[\frac{Q * n}{\frac{1}{S^2} * 0,5^{\frac{5}{3}} * \pi} \right]^{\frac{3}{8}}$$

Caso semicircular 2: Ecuaciones para el cálculo de volúmenes de corte en canales donde el talud de la pared del terreno tiene un valor distinto de cero ($z_4 \neq 0$)

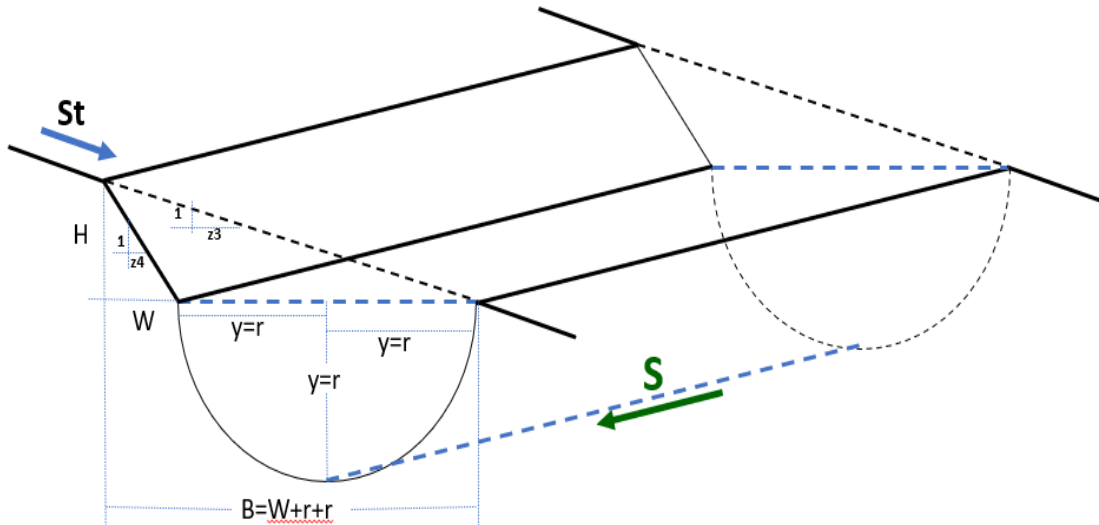


Figura 10: Acequia de ladera semicircular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

z_4 = talud en la pared de construcción (adimensional)

$y = r$ = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera circular (m)

H = valor a determinar (m)

W = valor a determinar (m)

B = ancho transversal total del corte (m)

St = pendiente del terreno (%).

S = pendiente del canal (m/m).

$y = r$ = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera circular (m) que corresponde al radio del semi círculo.

H = Valor a determinar (m).

St = pendiente del terreno (%).

Consideraciones:

Nota importante: El tirante " $y = r$ ", el perímetro mojado, el radio hidráulica y el área hidráulica que es la misma que el área de corte 1 "Ac1" de este caso 2 es igual al área hidráulica del caso 1. Por esto, el Ac2 está expresado en el caso 1 anterior de los canales semicirculares.

CC BY-ND 4.0
Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0
Internacional

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

Por lo anterior podemos ver que se cumple:

$$A_{hid} = A_{c1} = 0,5 * \pi * r^2$$

$$Pm = \pi * r$$

$$R_{hid} = 0,5 * r$$

$$r = \left[\frac{Q * n}{\frac{1}{S^2} * 0,5^{\frac{5}{3}} * \pi} \right]^{\frac{3}{8}}$$

Debido a que $r = y$

$$A_{hid} = A_{c1} = 0,5 * \pi * y^2$$

$$Pm = \pi * y$$

$$R_{hid} = 0,5 * y$$

$$y = \left[\frac{Q * n}{\frac{1}{S^2} * 0,5^{\frac{5}{3}} * \pi} \right]^{\frac{3}{8}}$$

Calculando el área de corte 2 “Ac2”:

$$A_{c2} = \frac{2 * S_t * r^2}{100 - z4 * S_t}$$

Debido a que $r = y$

$$A_{c2} = \frac{2 * S_t * y^2}{100 - z4 * S_t}$$

Obteniendo el área de corte total

$$A_{ct} = 0,5\pi * r^2 + \frac{2 * S_t * r^2}{100 - z4 * S_t}$$

Debido a que $r = y$

$$A_{ct} = 0,5\pi * y^2 + \frac{2 * S_t * y^2}{100 - z4 * S_t}$$

Donde:

Act = área de corte total m².

Cálculo del volumen de corte por cada metro lineal del canal triangular:

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = 0,5\pi * r^2 + \frac{2 * S_t * r^2}{100 - z4 * S_t}$$

Debido a que $r = y$

$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = 0,5\pi * y^2 + \frac{2 * S_t * y^2}{100 - z4 * S_t}$$

Donde:

y: tirante en el canal triangular (m).

St: pendiente del terreno (%).

z4 = talud (adimensional).

Capítulo 3: Secciones de máxima eficiencia hidráulica para canales trapezoidales y rectangulares

Caso 1: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo trapezoidal con un único talud

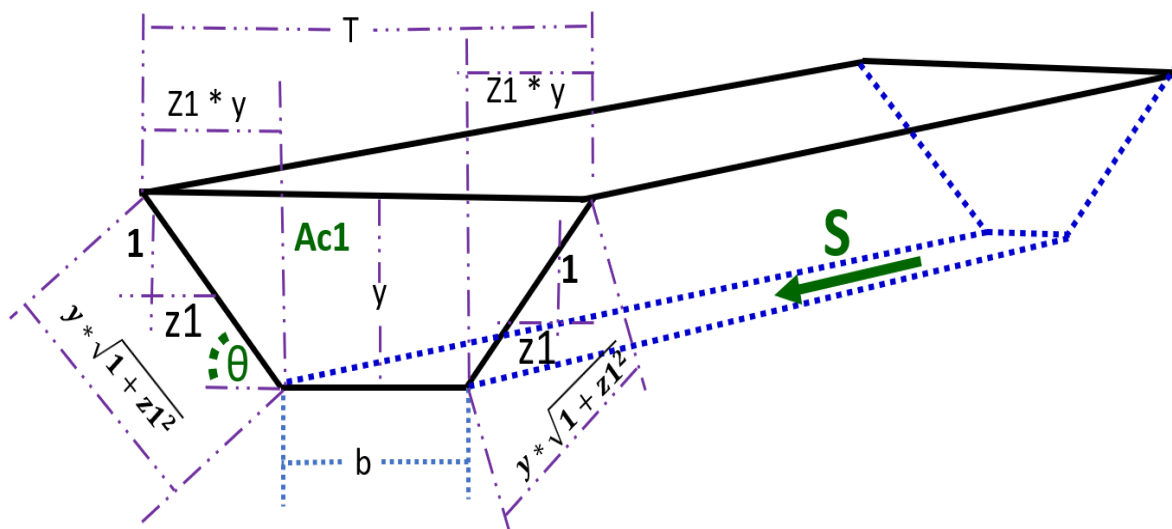


Figura 11: Sección transversal de un canal trapezoidal donde se tiene un talud único “ $z = z1$ ”

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conducto (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m^2)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera trapezoidal

S = pendiente del canal (m/m)

Considerando un único talud $z = z1 = z2$ tenemos:

$$\frac{b}{y} = 2 * (\sqrt{1 + z^2} - z)$$

$$b = 2 * y * (\sqrt{1 + z^2} - z)$$

$$y = \frac{b}{2 * (\sqrt{1 + z^2} - z)}$$

Donde las ecuaciones son la representación matemática de la máxima eficiencia hidráulica en un canal de sección trapezoidal con un único talud donde se encuentra la relación entre la base “b” y el tirante “y” que son variables por descubrir y cuya relación depende directamente del talud único del canal.

Caso 2: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo rectangular (no tiene talud o $z=0$)

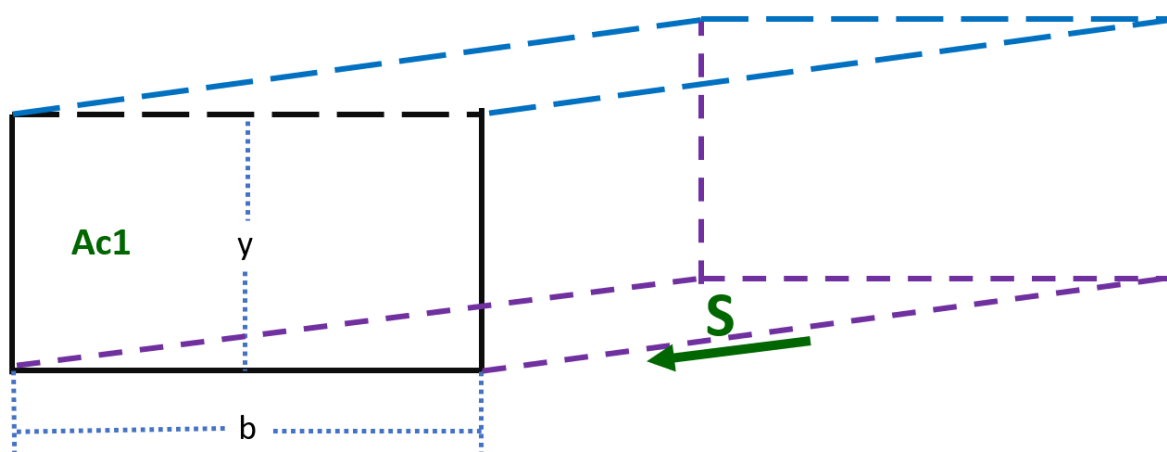


Figura 12: Sección rectangular de un canal donde no se presenta un talud ($z=0$)

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

$b = T$ = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m) que es igual ancho del espejo de agua (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m^2)

S = pendiente del canal (m/m)

Estableciendo con $Z = 0$

$$\frac{b}{y} = 2$$

$$b = 2 * y$$

$$y = \frac{b}{2}$$

Donde las ecuaciones son la representación matemática de la máxima eficiencia hidráulica en un canal de sección rectangular donde se encuentra la relación entre

la base “b” y el tirante “y” que son variables por descubrir y cuya relación depende directamente de la constante con valor de “2”.

Caso 3: Estimación del área hidráulica “A”, el perímetro mojado “P” y el radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo trapezoidal con talud único diferente de cero ($z \neq 0$)

Área hidráulica “A” de una sección de máxima eficiencia hidráulica en un canal de sección trapezoidal con un único talud se tiene que:

$$A = y^2 * (2\sqrt{1 + z^2} - z)$$

Perímetro mojado de una sección de máxima eficiencia hidráulica en un canal de sección trapezoidal con un único talud se tiene que:

$$P = 2y * (2\sqrt{1 + z^2} - z)$$

Radio hidráulico “R”

$$R = \frac{y}{2}$$

Caso 4: Estimación del área hidráulica “A”, el perímetro mojado “P” y el radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo rectangular sin talud ($z \neq 0$)

Para el área hidráulica “A” se tiene:

$$A = 2 * y^2$$

Para el perímetro mojado “P” se tiene:

$$P = 4 * y$$

Para el radio hidráulico “R” se tiene:

$$R = \frac{y}{2}$$

Caso 5: En una condición de máxima eficiencia hidráulica para talud variable, se busca para cualquiera de las secciones trapezoidales variables, cual es el talud más eficiente, para lo cual; el tirante se considera constante.

$$z = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

Caso 6: Sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal para una sección transversal del tipo trapezoidal con dos taludes “ $z_1 \neq z_2$ ”

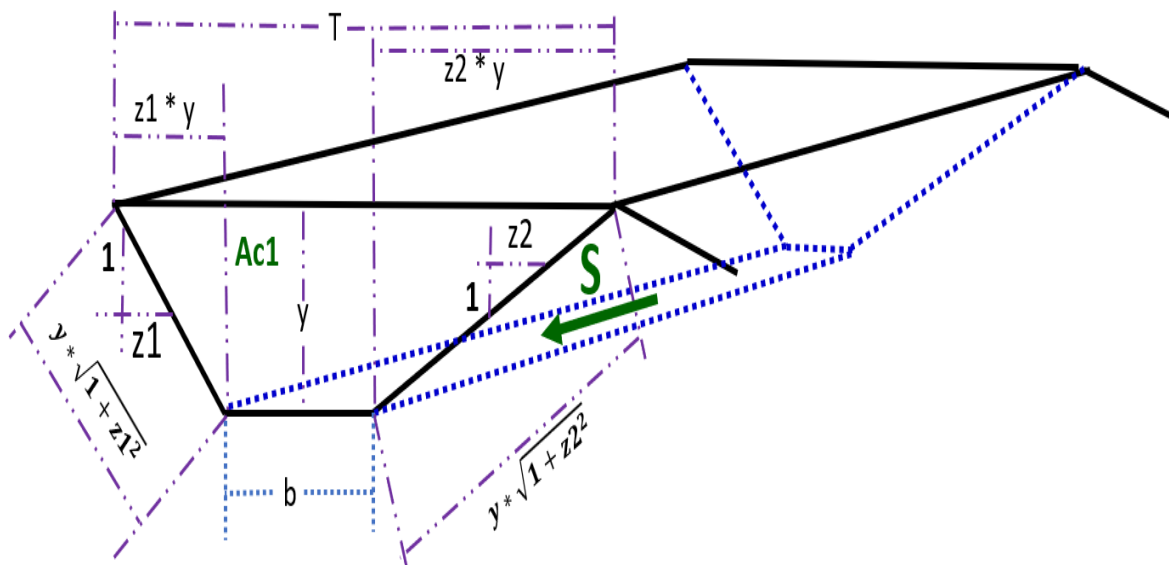


Figura 13: Sección transversal de un canal trapezoidal donde se tienen diferentes taludes “ $z_1 \neq z_2$ ”

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera trapezoidal (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

Ac_1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m^2)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

S = pendiente del canal (m/m)

Máxima eficiencia hidráulica en un canal de sección trapezoidal con dos taludes diferentes

$$b = y * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

$$\frac{b}{y} = \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

$$y = \frac{b}{\left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)}$$

Caso 7: Estimación del radio hidráulico “R” para una sección de máxima eficiencia hidráulica de un canal con una sección transversal del tipo trapezoidal con dos taludes diferente de cero ($z_1 \neq z_2 \neq 0$)

El área hidráulica transversal:

$$A = 0,5 * z_1 * y^2 + 0,5 * z_2 * y^2 + b * y$$

El perímetro mojado total:

$$P = b + y\sqrt{1 + z_1^2} + y\sqrt{1 + z_2^2}$$

$$P = b + y * (\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})$$

$$R = \frac{y}{2}$$

Caso 8: Estimación de la secciones de mínima infiltración para canales trapezoidales con taludes iguales y con diferentes taludes

- a) Sección de la mínima infiltración en secciones trapezoidales de canales con taludes iguales con $z_1 = z_2 = z$

$$b = 4y \left(\sqrt{1 + z^2} - z \right)$$

$$\frac{b}{y} = 4 \left(\sqrt{1 + z^2} - z \right)$$

$$y = \frac{b}{4 * \left(\sqrt{1 + z^2} - z \right)}$$

- b) Sección de la mínima infiltración en secciones trapezoidales de canales con taludes diferentes $z_1 \neq z_2$:

$$b = 2y * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

$$\frac{b}{y} = 2 * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

$$y = \frac{b}{2 * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)}$$

Capítulo 4: Acequia de ladera rectangular

Canal rectangular para la sección de máxima eficiencia hidráulica

$$\frac{b}{y} = 2$$

$$b = 2 * y$$

$$y = \frac{b}{2}$$

Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos en el canal conductor en la acequia de ladera con forma rectangular sin talud en el terreno fuera del área conductora de agua.

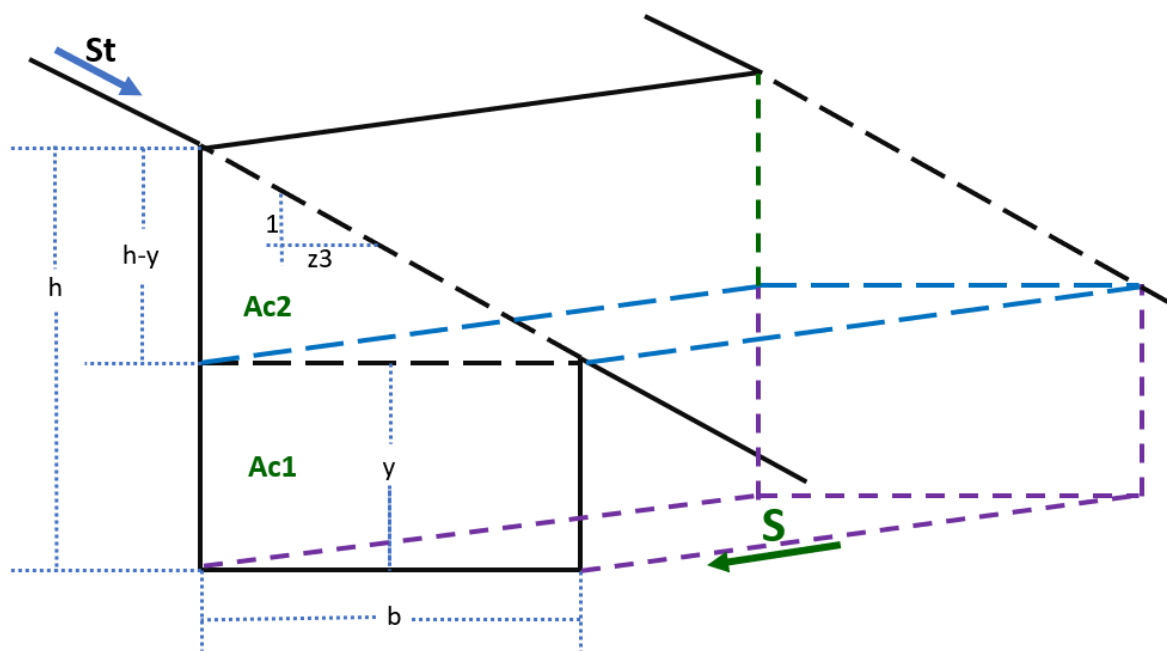


Figura 14: Parámetros hidráulicos para las acequias de rectangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

h = valor por calcular (m)

$h-y$ = valor por calcular (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

$T = b$ = ancho de solera o ancho de la base del canal que es el mismo que ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Área hidráulica:

$$A_{c1} = 2 * y^2$$

Perímetro mojado:

$$P = 4 * y$$

El radio hidráulico

$$R = \frac{y}{2}$$

Cálculo del tirante “y”

$$y = \left(\frac{Q * n}{\frac{1}{2^{\frac{3}{8}}} * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Calculando el área de corte 2 “Ac2”

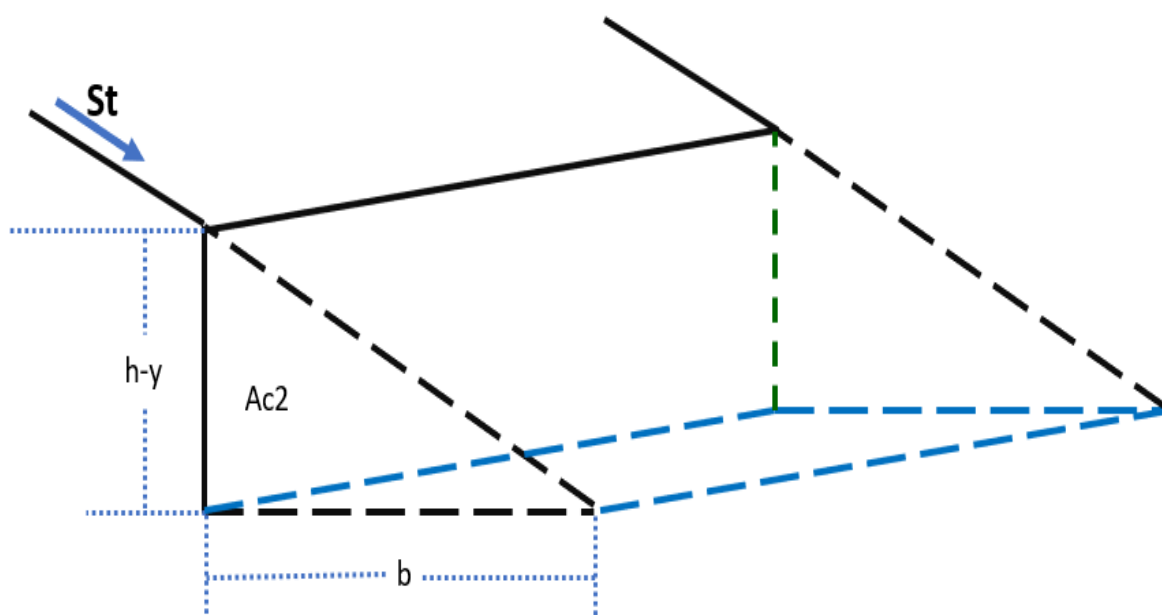


Figura 15: Área de corte 2 “Ac2” para las acequias de rectangular

$$Ac2 = \frac{y^2 * S_t}{50}$$

Área total de corte

$$A_{ct} = y^2 \left(2 + \frac{S_t}{50} \right)$$

Donde

Act = área de corte total m²

Cálculo del volumen de corte total

$$V_{ct} \left(\frac{m^3}{m} \right) = y^2 \left(2 + \frac{S_t}{50} \right)$$

Caso 2: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos en el canal conductor en la acequia de ladera con forma rectangular con talud en el terreno fuera del área conductora de agua.

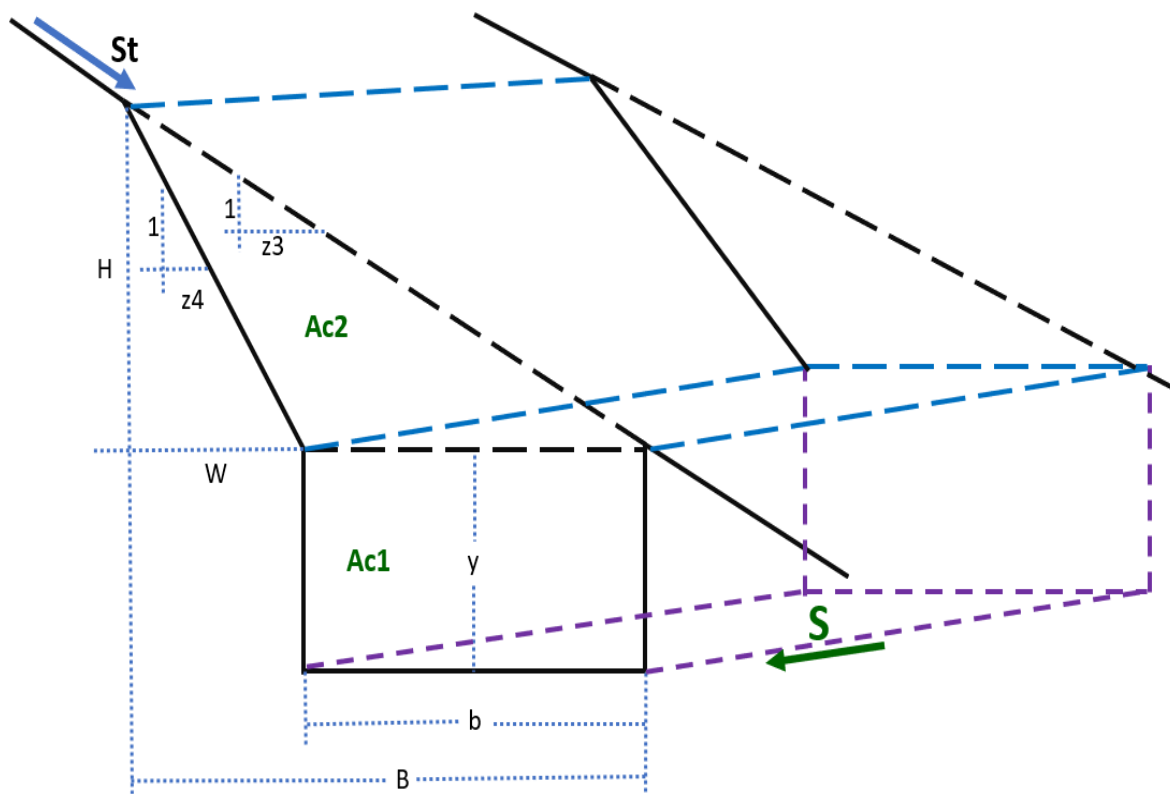


Figura 16: Volúmenes de corte para las acequias de ladera de forma rectangular

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

$T = b$ = ancho de solera o ancho de la base del canal que es el mismo que ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Se tienen las siguientes consideraciones para este caso 2 rectangular:

1- El área de corte 1 “Ac1”

$$A_{c1} = 2 * y^2$$

2- Área de corte 2 “Ac2”

$$Ac2 = \frac{2 * St * y^2}{(100 - St * z4)}$$

Área de corte total

$$A_{ct} = 2y^2 * \left(1 + \frac{St}{(100 - St * z4)}\right)$$

Donde

A_{ct} = área de corte total (m²)

Volumen de corte total por cada metro lineal del canal

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = 2y^2 * \left(1 + \frac{St}{(100 - St * z4)}\right)$$

Capítulo 5: Acequia de ladera trapezoidal

Se trabaja con la máxima eficiencia hidráulica.

Caso 1: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes iguales en el canal conductor y el talud en la pared del terreno, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z = z_1 = z_2 = z_4 \neq z_3$)

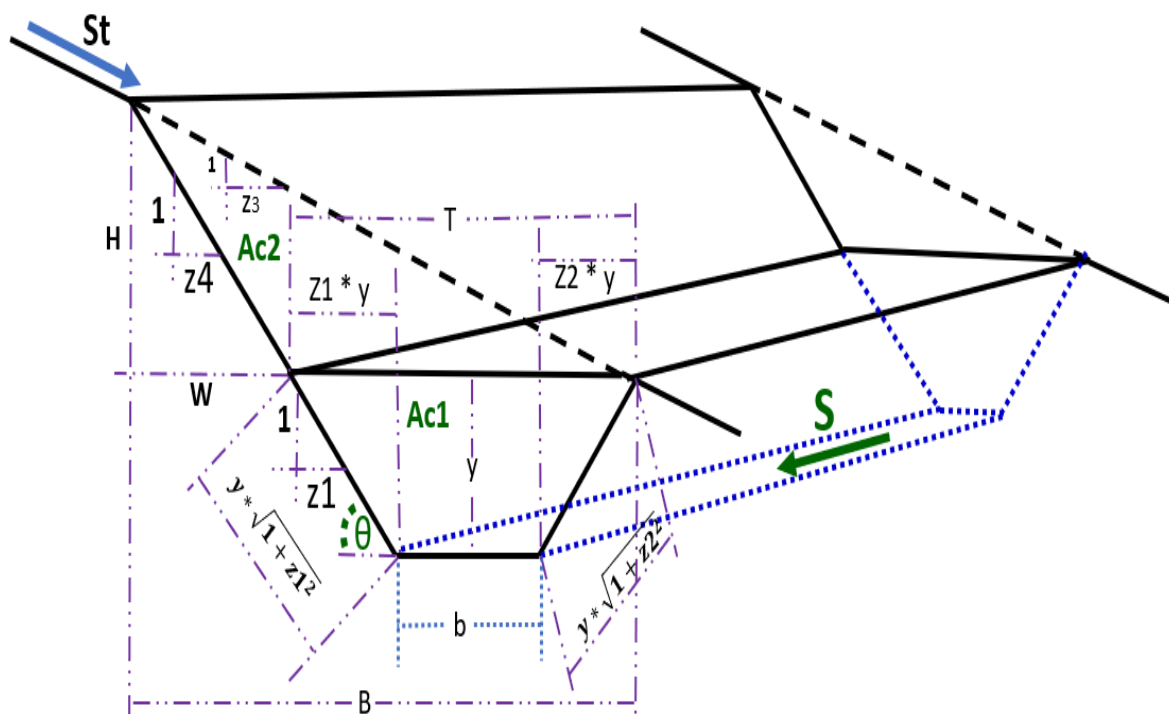


Figura 17: acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conductor (adimensional)

z_2 = talud del canal conductor (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

z_4 = talud en la pared de construcción (adimensional)

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera trapezoidal (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

Ac1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = valor a determinar (m)

W = valor a determinar (m)

B = ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Área hidráulica que es la misma que el área de corte 1 “Ac1”

$$Ac1 = (2\sqrt{1 + z^2} - z) * y^2$$

Calcular el perímetro mojado:

$$P = 2y(2\sqrt{1 + z^2} - z)$$

Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{y}{2}$$

Cálculo del tirante hidráulico

$$y = \left(\frac{Q * n * 2^{\frac{2}{3}}}{(2\sqrt{1 + z^2} - z) * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Calculando el área de corte 2 “Ac2”

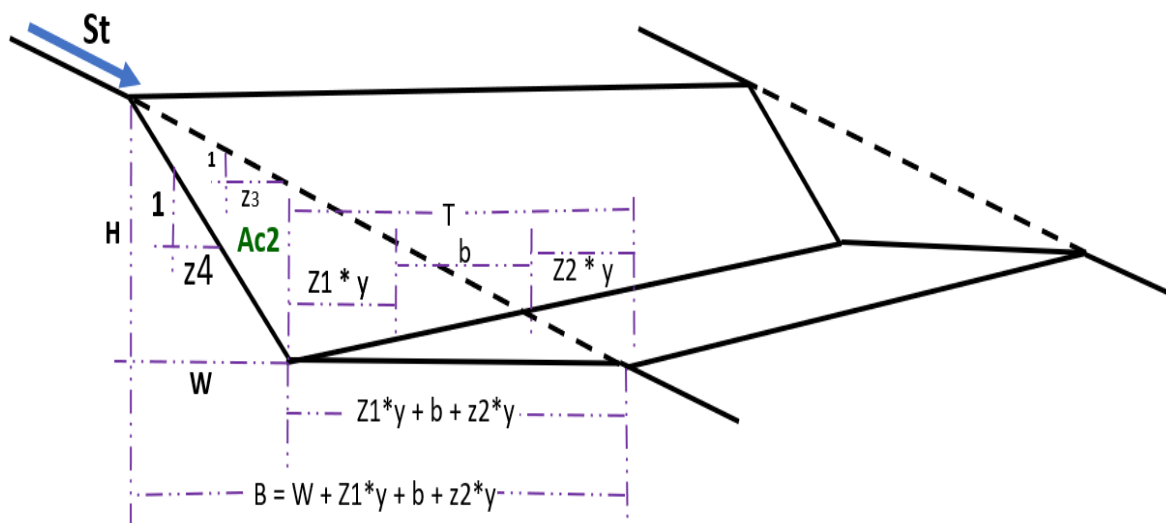


Figura 18: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

z_4 = Talud en la pared de construcción (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

Ac_2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

$$A_{c2} = \frac{0,5 * S_t (b + 2zy)^2}{100 - S_t * z}$$

Cálculo el área de corte total

$$A_{ct} = y^2 * \left[\left(2 * \sqrt{1 + z^2} - z \right) + \frac{2 * S_t * (1 + z^2)}{100 - S_t * z} \right]$$

Donde

Act = área de corte total m²

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = y^2 * \left[\left(2 * \sqrt{1 + z^2} - z \right) + \frac{2 * S_t * (1 + z^2)}{100 - S_t * z} \right]$$

Las ecuaciones cuantifican el volumen de corte por cada metro de construcción de un canal con sección transversal.

Caso 2: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes diferentes en el canal conductor y el talud en la pared del terreno igual al talud de la pared del terreno del canal conductor, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z_1 = z_4 \neq z_2 \neq z_3$)

Consideraciones:

- 1- El área de corte 1 en este caso 2 es diferente al Ac_1 del caso 1
- 2- Todas las variables hidráulicas del canal conductor de la acequia de ladera en este caso 2 son diferentes respecto al del caso 1

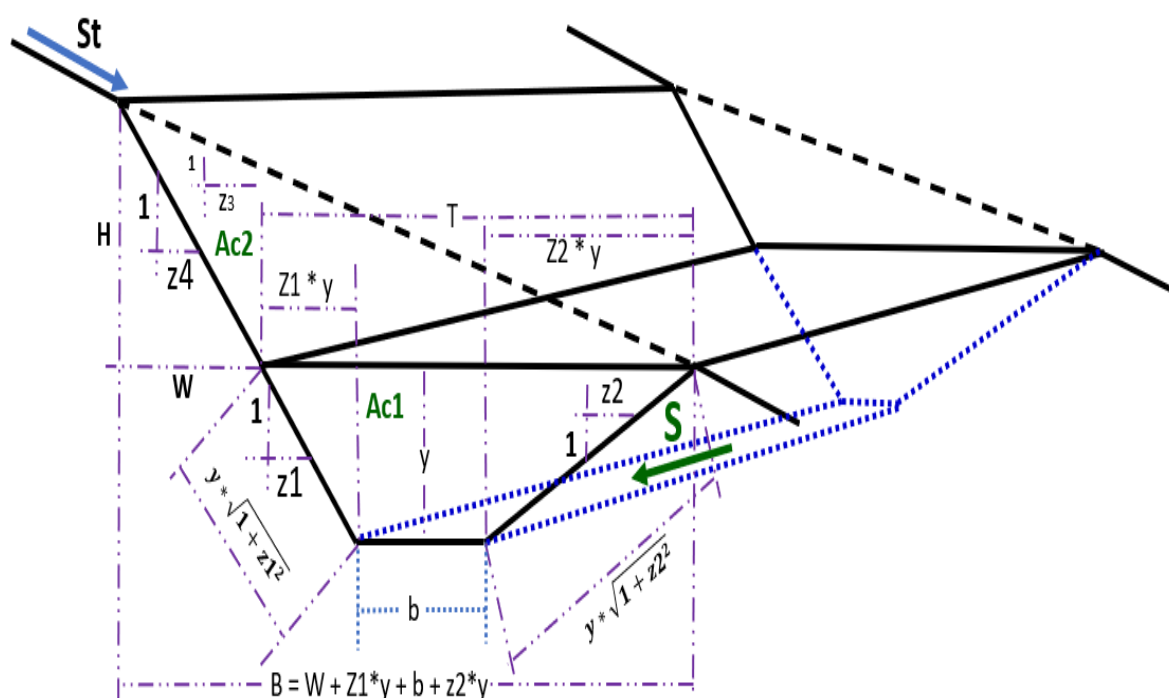


Figura 19: Acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

- z_1 = talud del canal conductor (adimensional)
- z_2 = talud del canal conductor (adimensional)
- z_4 = Talud en la pared de construcción (adimensional)
- z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)
- y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)
- b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

Ac1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Cálculo del área de corte 1 (Ac1) que es la misma del área hidráulica

$$Ac1 = 0,5z_1 y^2 + yb + 0,5z_2 y^2$$

Para la máxima eficiencia hidráulica

$$\frac{b}{y} = \sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2$$

$$y = \frac{b}{\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2}$$

$$b = y * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

Cálculo del tirante “y”

$$y = \left(\frac{Q * n * 2^{\frac{2}{3}}}{\left(\sqrt{1 + z_1^2} - 0,5z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - 0,5z_2 \right) * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

CC BY-ND 4.0
Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0
Internacional

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

Calculando el área de corte 2 “Ac2”

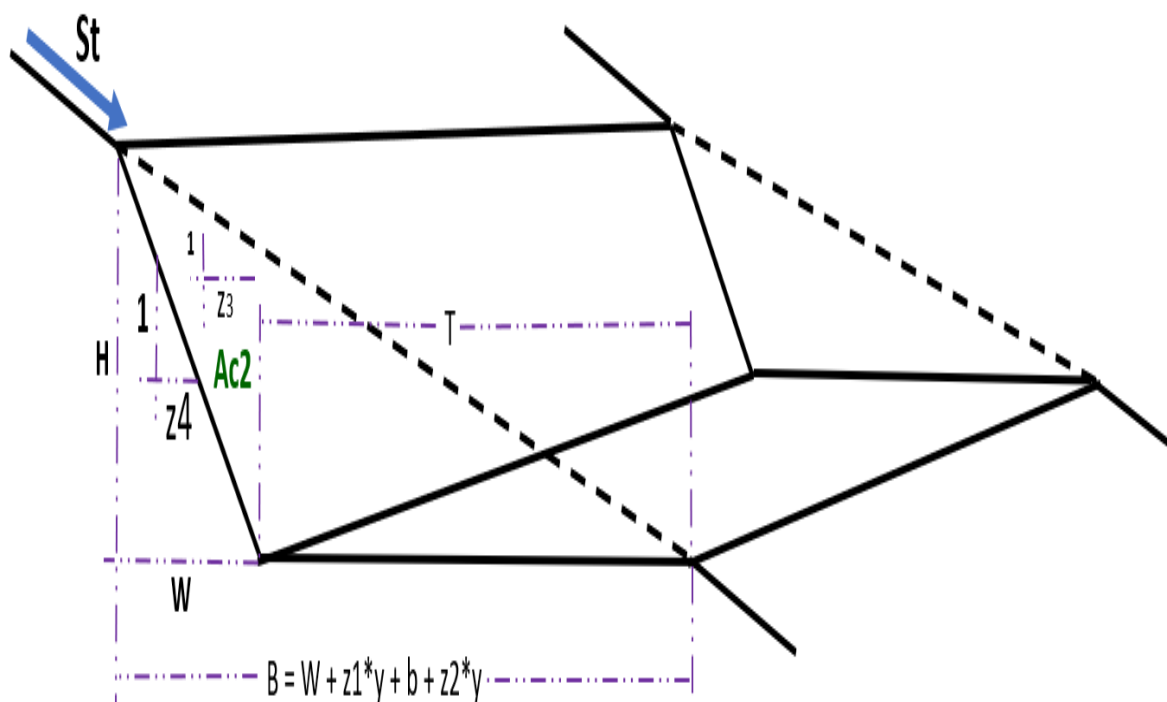


Figura 20: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

z_4 = Talud en la pared de construcción (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

Ac_2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

$$A_{c2} = \frac{0,5 * S_t * (z_1 y + b + z_2 y)^2}{100 - S_t z_1}$$

CC BY-ND 4.0
Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0
Internacional

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

Calculando al área de corte total:

$$A_{ct} = 0,5z_1 y^2 + yb + 0,5z_2 y^2 + \frac{0,5 * S_t(z_1 y + b + z_2 y)^2}{100 - S_t z_1}$$

Donde

Act = área de corte total m²

Volumen de corte total por cada metro lineal

$$V_{ct}(\frac{m^3}{m}) = 0,5z_1 y^2 + yb + 0,5z_2 y^2 + \frac{0,5 * S_t(z_1 y + b + z_2 y)^2}{100 - S_t z_1}$$

Caso 3: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes diferentes en el canal conductor y el talud en la pared del terreno igual al talud de la pared del del terreno del canal conductor, pero el talud debido a la pendiente es diferente ($z1 \neq z4 \neq z2 \neq z3$)

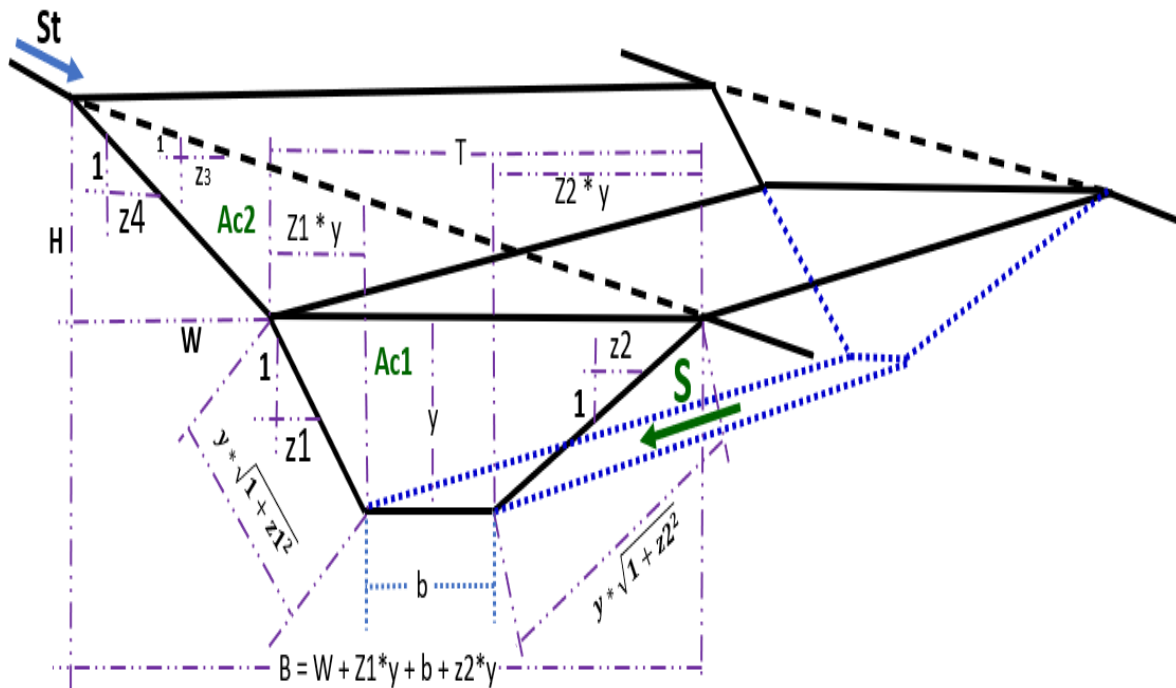


Figura 21: Acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conductor (adimensional)

$z2$ = talud del canal conductor (adimensional)

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Consideraciones que se cumplen en estas secciones transversales de canales:

- 1- El área de corte 1 “Ac1” en el caso 2 es igual al de este caso 3 por lo cual se cumple que:

$$Ac1 = 0,5 * z_1 * y^2 + y * b + 0,5 * z_2 * y^2$$

- 2- Todas las variables hidráulicas del canal conductor de la acequia de ladera para lo cual se cumple que:

$$b = y * \left(\sqrt{1 + z_1^2} - z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - z_2 \right)$$

$$y = \left(\frac{Q * n * 2^{\frac{2}{3}}}{\left(\sqrt{1 + z_1^2} - 0,5z_1 + \sqrt{1 + z_2^2} - 0,5z_2 \right) * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

- 3- El área de corte 2 “Ac2”:

Calculando el área de corte 2 “Ac2”

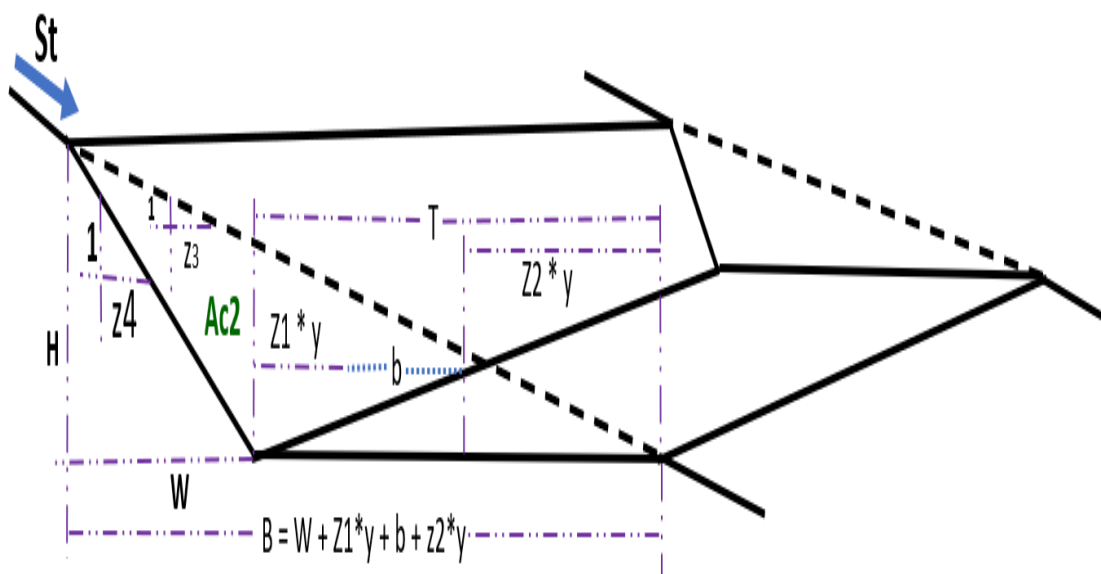


Figura 22: Área de corte 2 “Ac2” para una acequia de ladera trapezoidal

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

z_1 = talud del canal conducto (adimensional)

z_2 = talud del canal conducto (adimensional)

z_4 = Talud en la pared de construcción (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

Ac_2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

$$A_{c2} = \frac{0,5 * St(z_1 y + b + z_2 y)^2}{(100 - z_4 St)}$$

Calculando el área de corte total:

$$A_{ct} = 0,5z_1y^2 + yb + 0,5z_2y^2 + \frac{0,5 * St(z_1y + b + z_2y)^2}{(100 - z_4S_t)}$$

Donde:

Act = área de corte total m²

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal

$$V_{ct}(\frac{m^3}{m}) = 0,5z_1y^2 + yb + 0,5z_2y^2 + \frac{0,5 * St(z_1y + b + z_2y)^2}{(100 - z_4S_t)}$$

Caso 4: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte y los parámetros hidráulicos con los dos taludes iguales en el canal conductor y tanto el talud en la pared del terreno diferente como el talud debido a la pendiente ($z1 = z2 \neq z4 \neq z3$)

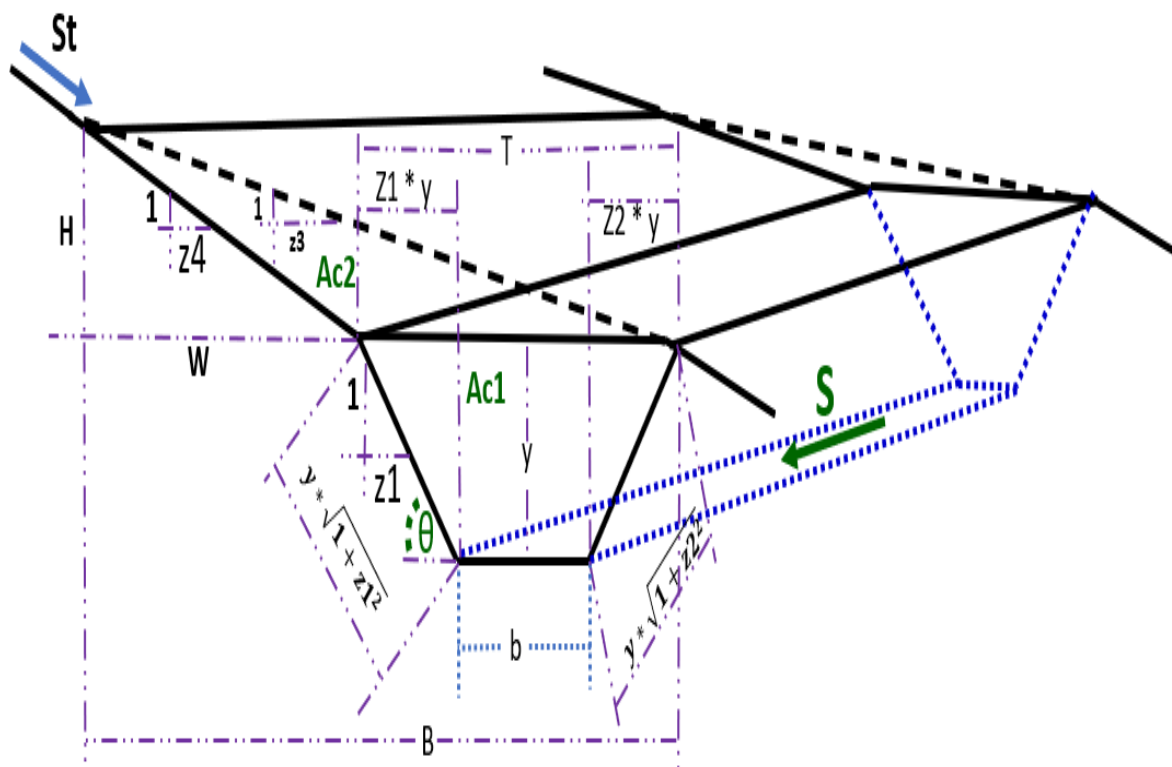


Figura 23: Acequia de ladera trapezoidal

Según se observa en la imagen, tenemos los siguientes parámetros:

$z1$ = talud del canal conductor (adimensional)

$z2$ = talud del canal conductor (adimensional)

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

b = ancho de la base del canal llamado ancho de solera (m)

$Ac1$ = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

$Ac2$ = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

Área hidráulica que es la misma que el Área de corte 1 “Ac1” donde $z_1 = z_2$

$$Ac1 = (2\sqrt{1+z^2} - z) * y^2$$

Perímetro mojado:

$$P = 2y(2\sqrt{1+z^2} - z)$$

Radio hidráulico:

$$R = \frac{y}{2}$$

$$y = \left(\frac{Q * n * 2^{\frac{2}{3}}}{(2\sqrt{1+z^2} - z) * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Calculando el área de corte 2

Para el área de corte 2 “Ac2” se cumple que el $z_1 = z_2$

$$A_{c2} = \frac{0,5 * St(2 * z_1 * y + b)^2}{(100 - z_4 * S_t)}$$

$$A_{c2} = \frac{0,5 * St(2 * z_1 * y + 2y(\sqrt{1+z_1^2} - z_1))^2}{(100 - z_4 * S_t)}$$

Área de corte total

$$A_{ct} = (b + z1 * y) * y + \frac{0,5 * St(2 * z1 * y + b)^2}{(100 - z4 * St)}$$

O también

$$A_{ct} = \left(2\sqrt{1 + z1^2} - z1\right) * y^2 + \frac{0,5 * St(2 * z1 * y + 2y(\sqrt{1 + z1^2} - z1))^2}{(100 - z4 * St)}$$

Donde

Act = área de corte total m²

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal

$$V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = (b + z1 * y) * y + \frac{0,5 * St * (2 * z1 * y + b)^2}{(100 - z4 * St)}$$

$$V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = \left(2\sqrt{1 + z1^2} - z1\right) * y^2 + \frac{0,5 * St(2 * z1 * y + 2y(\sqrt{1 + z1^2} - z1))^2}{(100 - z4 * St)}$$

$$V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = y^2 * \left(2\sqrt{1 + z1^2} - z1 + \frac{2 * St(1 + z1^2)}{100 - z4 * St}\right)$$

Capítulo 6: Acequias de ladera Parabólicas

Caso 1: Ecuaciones fundamentales generales

Ecuaciones generales utilizadas en los libros Fundamentos de Conservación de suelos y aguas tomos I y II para calcular los volúmenes de corte y los caudales totales en y para la construcción de los canales

Para calcular el área total de corte se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ac_T = Ac_1 + Ac_2$$

Donde

Ac1 = área de corte 1 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo inferior)

Ac2 = área de corte 2 correspondiente a la sección de área hidráulica de la acequia de ladera (m) (triángulo superior)

Act = área de corte total (m²)

Para calcular este volumen de corte total $V_{cT}(\frac{m^3}{m})$ se utiliza solamente la distancia de 1,0 metro lineal (m-l) del canal a construir o en construcción

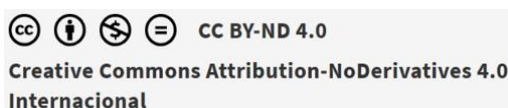
$$V_{cT}(\frac{m^3}{m}) = Ac_T(m^2) * 1,0 \frac{m - lineal}{m - lineal}$$

Ecuaciones para calcular las variables hidráulicas de los canales

Cálculo del radio hidráulico de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad

$$R = \frac{A}{P}$$

Donde:



CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

A = área hidráulica de la sección transversal conductora de agua (m²)

P = perímetro mojado de la sección transversal conductora de agua (m)

Según Manning (French, 2017) el caudal está definido por

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

donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera o canal

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad (adimensional)

Caso 2: Ecuaciones fundamentales para calcular los volúmenes de corte de la sección conductora de agua en un canal parabólico juntamente con su perímetro mojado, el área y el radio hidráulico para la sección transportadora del agua

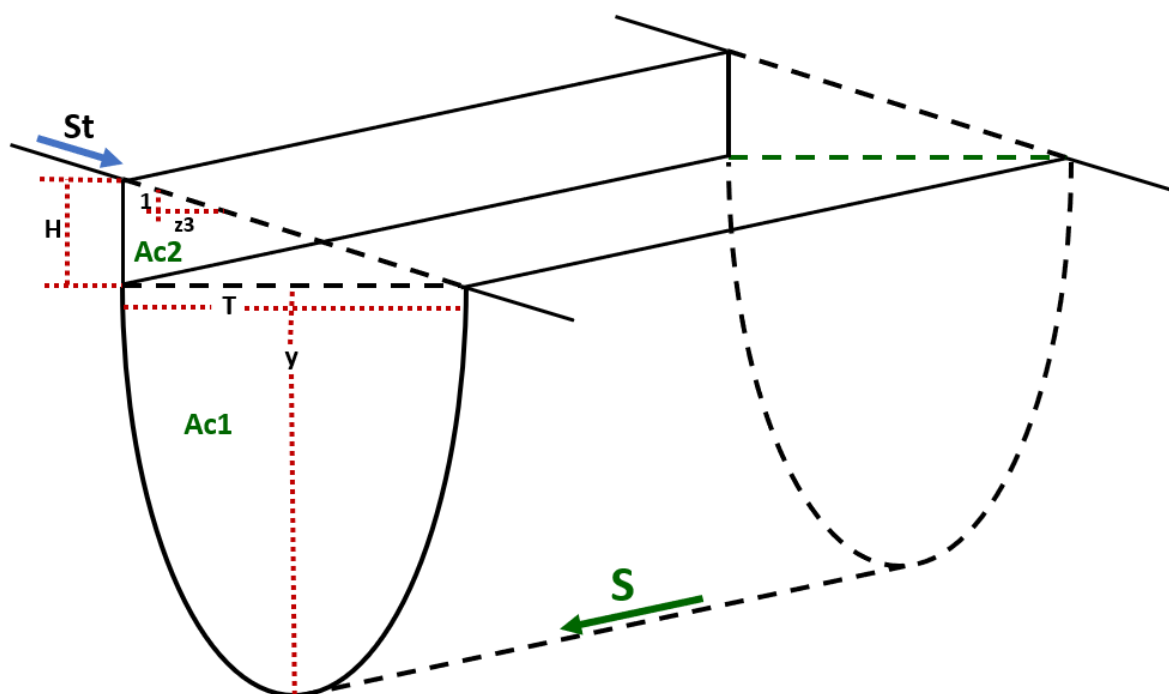


Figura 24: Acequia de ladera con sección parabólica según sin talud en la pared del terreno donde se construye

Donde:

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera parabólica (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular (m)

H = altura del triángulo de corte (m)

S = pendiente del canal (m/m)

St = pendiente del terreno natural (%)

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente (adimensional)

$Ac1$ = área de movimiento de suelo correspondiente a la sección hidráulica conductora (m^2)

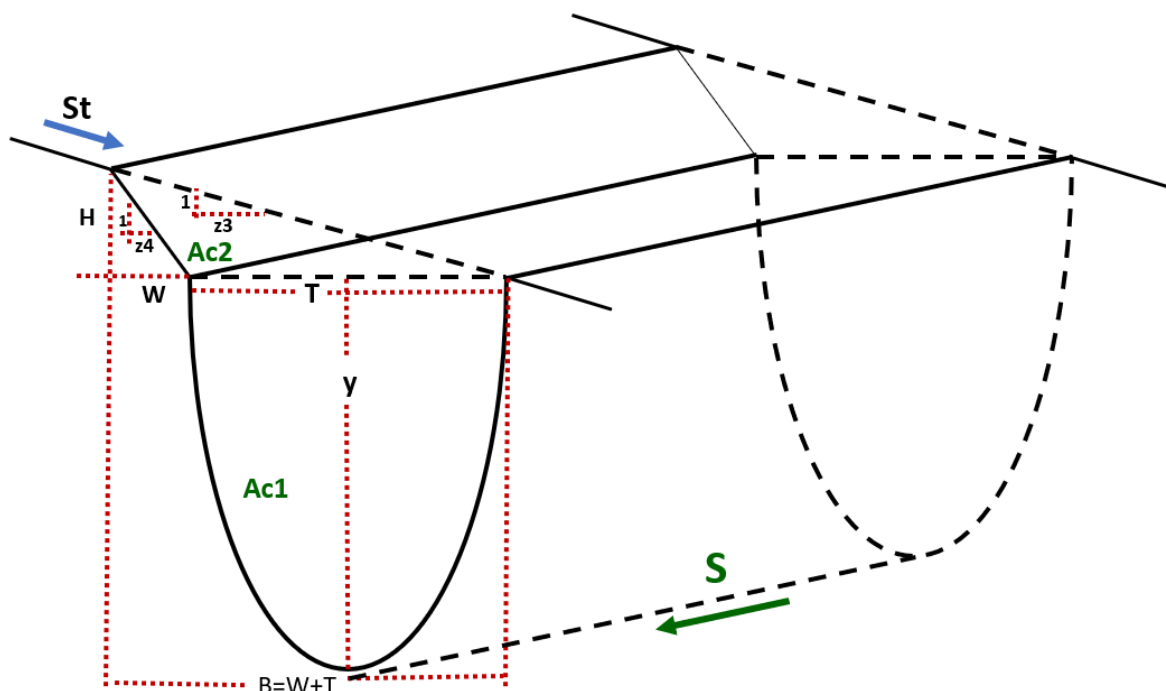


Figura 25: Acequia de ladera con sección parabólica según con talud en la pared del terreno donde se construye

Donde:

y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera parabólica (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular (m)

H = altura del triángulo de corte (m)

W = distancia horizontal correspondiente a la inclinación debido al z_4 (m)

S = pendiente del canal (m/m)

St = pendiente del terreno natural (%)

z_4 = talud en la pared de construcción (adimensional)

z_3 = talud natural que se forma debido a la pendiente (adimensional)

Ac_1 = área de movimiento de suelo correspondiente a la sección hidráulica conductora (m^2)

Cálculo del área hidráulica o área de corte 1 “Ac1”

Para calcular el área de corte 1 se debe de calcular el área de la sección transversal de la conducción hidráulica ya que son lo mismo y para ésto haremos uso de los

elementos geométricos de sección de canal parabólico que se encuentran en los libros de (Gallardo Armijos, 2018) y de (Te Chow, 2004)

Tomado de:

Ven Te Chow, HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS

Área hidráulica que es el área de corte 1 $Ac1$ se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$$

Para calcular el perímetro mojado se tienen 2 condiciones:

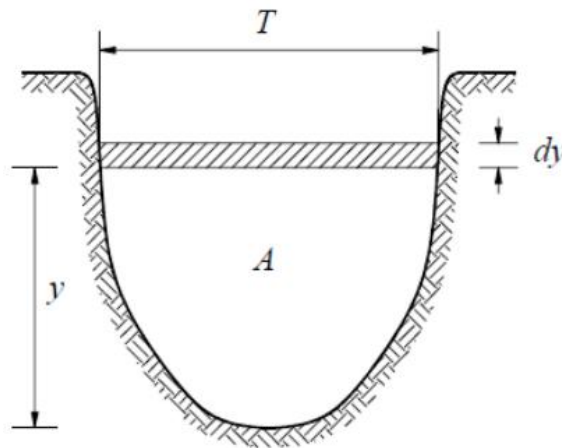


Figura 26: Acequia de ladera con sección parabólica

Donde:

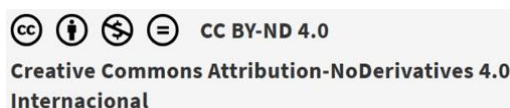
y = tirante de agua o mayor profundidad de agua en el canal de la acequia de ladera (m)

T = espejo de agua (m)

Podemos observar que el cálculo del área de corte de la sección conductora de agua depende de dos variables que son el **espejo de agua “T” y del tirante “y” o la altura de agua en el canal** y no solamente depende de una variable.

Para calcular el perímetro mojado se nos presentan dos condiciones que son las siguientes:

Condición 1 para estimar el perímetro mojado:



CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarría@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

Condición 1 para estimar el perímetro mojado y el radio hidráulico para el caso $0 < G \leq 1$:

$$G = \frac{4y}{T}$$

El perímetro mojado se calcula con la siguiente expresión matemática:

$$P = T + \frac{8y^2}{3T}$$

$$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{T + \frac{8y^2}{3T}}$$

Condición 2 para estimar el perímetro mojado y el radio hidráulico para el caso $G > 1$:

$$G = \frac{4y}{T}$$

$$Pm = \frac{T}{2} \left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G} \ln \left(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

$$Pm = \frac{T}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{4y}{T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} \ln \left(\frac{4y}{T} + \left(1 + \left(\frac{4y}{T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

$$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{\frac{T}{2} \left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G} \ln \left(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}$$

$$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{\frac{T}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{4y}{T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} \ln \left(\frac{4y}{T} + \left(1 + \left(\frac{4y}{T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}$$

Caso 3: Ecuaciones fundamentales para la estimación de la relación matemática entre espejo de agua “T” y el tirante “y” en un canal parabólico y definir una variable en términos de la otra

1- Definición de la familia de parábolas a utilizar en los canales parabólicos.

Para hacer el análisis de los canales parabólicos se utilizará la siguiente expresión matemática (ya que existen infinitudes de formas de ecuaciones parabólicas):

$$f(x) = y = a * x^2$$

$$fx = y = ax^2$$

siempre con:

$$a > 0$$

Donde

a: es el coeficiente de la función parabólica (adimensional)

x: variable independiente

f(x) = y = variable dependiente

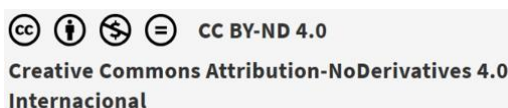
2- Relación de los valores de “y” con los valores de “T” donde el espejo de agua es dos veces el valor de “x” (T = 2*x)

Como vimos, para un valor de “a = 0,5” tendríamos la siguiente función parabólica

$$f(x) = y = 0,5 * x^2$$

Para esta función parabólica y para las otras funciones parabólicas, muestran como varía el espejo de agua “T” (T = 2 * x) en función del tirante “y”.

Se relaciona para cada valor de “a”, los valores del espejo de agua “T” y los valores del tirante “y” y se encuentra las siguientes ecuaciones:



CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela Ingeniería Agrícola

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

chavarriavae@gmail.com

$$T = f * \sqrt{y} \quad o \quad T = f * y^{\frac{1}{2}}$$

Esta expresión matemática “f” es el coeficiente resultante de la relación que se define entre el tirante “y” y el espejo de agua “T”. Se presentan muchos valores de “f” conforme varía el valor de “a”.

$$f = \frac{2}{\sqrt{a}} \quad o \quad f = \frac{2}{\frac{1}{a^2}} \quad o \quad f = \frac{2\sqrt{a}}{a}$$

Se logra definir el tirante “y” en términos del espejo de agua “T” para cualquier coeficiente “a” de la función parabólica establecida de los parámetros hidráulicos. Estas ecuaciones utilizando el valor del coeficiente “a” y deja una dependencia de una sola variable “y”.

$$T = \frac{2}{\sqrt{a}} * \sqrt{y} \quad o \quad T = \frac{2\sqrt{a}}{a} * \sqrt{y}$$

Caso 4: Ecuaciones fundamentales de parámetros hidráulicos para tres canales parabólicos con diferente “a”

Forma de la ecuación parabólica: $f(x) = y = a * x^2$

Como ejemplo tenemos que para un factor de “**a = 0,5**” tenemos que la ecuación queda de la siguiente forma:

Ecuación o ejemplo 1: $f(x) = y = 0,5 * x^2$

Como ejemplo tenemos que para un factor de “**a = 1,0**” tenemos que la ecuación queda de la siguiente forma:

Ecuación o ejemplo 2: $f(x) = y = 1,0 * x^2$ o $f(x) = y = x^2$

Como ejemplo tenemos que para un factor de “**a = 2,0**” tenemos que la ecuación queda de la siguiente forma:

Ecuación o ejemplo 3: $f(x) = y = 2 * x^2$

Caso 5: Desarrollo de las ecuaciones fundamentales de las área de corte y volúmenes de tierras totales de las secciones parabólicas

Ejemplo 1: Tomaremos el caso de un canal parabólico en una acequia de ladera con una función matemática

$$y = x^2 \quad \text{donde se observa que } a = 1$$

$$T = 2\sqrt{y}$$

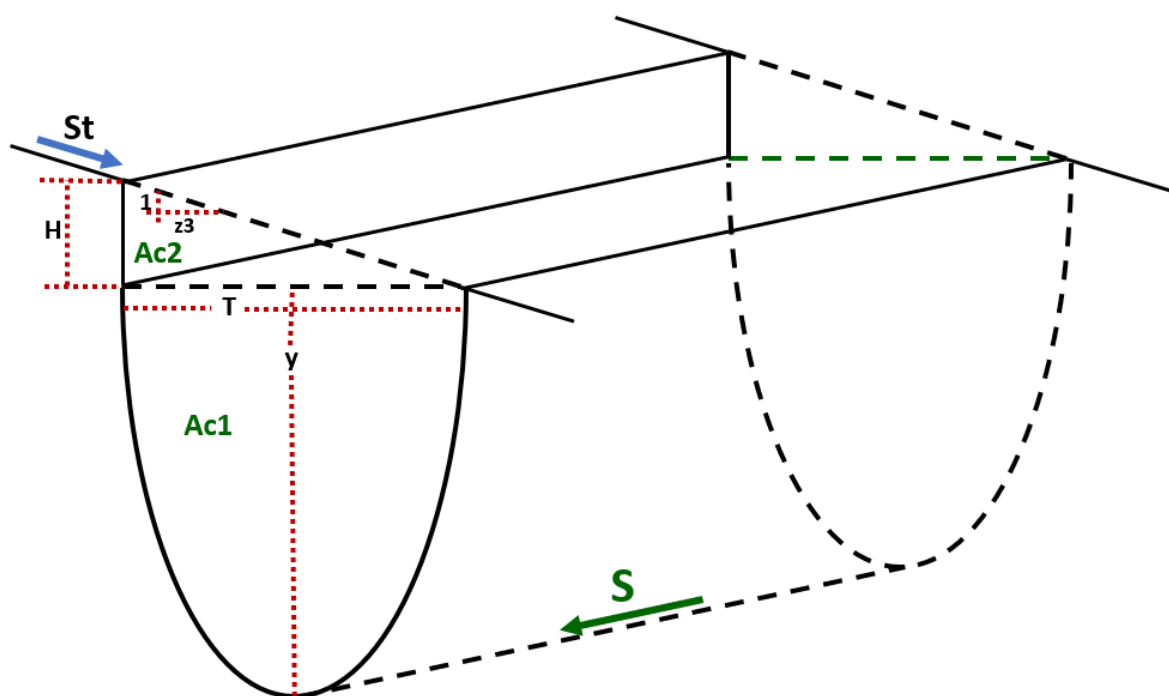


Figura 27: Acequia de ladera parabólica para el caso 1

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z3$ = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

$$A_{c1} = \frac{2T * y}{3}$$

$$A_{c1} = \frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$A_{c2} = \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{y * S_t}{50}$$

Calculando el área de corte total

$$A_{cT} = A_{c1} + A_{c2}$$

$$A_{ct} = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{ct} = T \left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$A_{ct} = \frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{y * S_t}{50}$$

Act = área de corte total (m²)

Calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = T \left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{y * S_t}{50}$$

Variables hidráulicas

Cálculo del perímetro mojado, el radio hidráulico y el tirante del canal “y” para el caso **$0 < G \leq 1$** :

$$Pm = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}$$

$$Pm = \frac{2y^{\frac{1}{2}} * (3 + 2y)}{3}$$

$$R = \frac{2 * y}{(3 + 2y)}$$

$$y^{\frac{13}{4}} * \left(\frac{2^{\frac{8}{3}} * S_t^{\frac{1}{2}}}{3 * Q * n} \right) - 2 * y - 3 = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)
 S: pendiente del canal (m/m)
 n: coeficiente de rugosidad
 y: tirante hidráulico

Cálculo del perímetro mojado, el radio hidráulico y el tirante del canal “y” para el caso **G > 1**:

$$Pm = \frac{T}{2} \left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G} \ln \left(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

$$Pm = y^{\frac{1}{2}}(1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \ln \left(2y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$R = \frac{\frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3}}{y^{\frac{1}{2}}(1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \ln \left(2y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} \right)}$$

$$R = \frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3y^{\frac{1}{2}}(1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 1,5 \ln \left(2y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} \right)}$$

$$\frac{\left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{5}{3}} * y^{\frac{5}{2}}}{\left[y^{\frac{1}{2}}(1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \ln \left[2y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} \right] \right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad
y: tirante hidráulico

Ejemplo 2: Tomaremos el caso de un canal parabólico en una acequia de ladera con una función matemática

$$y = 0,5 * x^2 = \frac{x^2}{2} \quad \text{donde se observa que } a = 0,5 = \frac{1}{2}$$

Cálculo de “T”:

$$T = 2\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}}$$

El cálculo del área hidráulica:

$$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{2}}{3} * y^{\frac{3}{2}}$$

Cálculo del área de corte 2 “Ac2”:

$$Ac2 = \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{y * S_t}{25}$$

Calculando el área de corte total (Act)

$$AcT = Ac1 + Ac2$$

$$Act = \frac{2Ty}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{ct} = T \left(\frac{2 * y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$A_{ct} = \frac{4\sqrt{2} * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{y * S_t}{25}$$

Act = área de corte total m²

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal se multiplica por 1,0 m de distancia

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{2Ty}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = T \left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{4\sqrt{2} * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{y * S_t}{25}$$

Variables hidráulicas

Cálculo del perímetro mojado, el radio hidráulico y el tirante del canal “y” para el caso **0 < G ≤ 1**:

$$Pm = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}$$

$$Pm = 2\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)$$

$$R = \frac{2 * y}{3 * (1 + 2y)}$$

$$\left(\frac{2^{\frac{19}{6}} * S^{\frac{1}{2}}}{Q * n * (3)^{\frac{3}{5}}} \right)^{\frac{3}{2}} * y^{\frac{13}{4}} - 2 * y - 1 = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad

y: tirante hidráulico

Cálculo del perímetro mojado, el radio hidráulico y el tirante del canal “y” para el caso **G > 1**:

$$Pm = \sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} + Ln \left(\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$R = \frac{4\sqrt{2} * y^{\frac{3}{2}}}{3 * \left[\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} + Ln \left(\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}$$

$$\frac{(4\sqrt{2})^{\frac{5}{3}} * y^{\frac{5}{2}}}{3^{\frac{5}{3}} * \left[\sqrt{2}y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} + \ln \left(\sqrt{2}y^{\frac{1}{2}} + (1 + 2y)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad

y: tirante hidráulico

EJEMPLO 3: Tomaremos el caso de un canal parabólico en una acequia de ladera con una función matemática

$$y = 2 * x^2 \quad \text{donde se observa que } a = 2$$

$$T = \sqrt{2y} = \sqrt{2} * \sqrt{y} = 2^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}}$$

El cálculo del área hidráulica

$$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$$

$$Ac1 = \frac{2^{\frac{3}{2}}}{3} * y^{\frac{3}{2}}$$

Cálculo del área de corte 2 “Ac2”:

$$A_{c2} = \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{y * S_t}{100}$$

Calculando el área de corte total

$$A_{cT} = A_{c1} + A_{c2}$$

$$A_{ct} = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{ct} = T \left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$A_{ct} = \frac{2^{\frac{3}{2}}}{3} * y^{\frac{3}{2}} + \frac{y * S_t}{100}$$

Act = área de corte total m²

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal se multiplica por 1,0 m de distancia

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = T \left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200} \right)$$

$$V_{cT} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{2^{\frac{3}{2}}}{3} * y^{\frac{3}{2}} + \frac{y * S_t}{100}$$

Cálculo del perímetro mojado, el radio y el tirante hidráulico del canal para en caso

0 < G ≤ 1:

$$P = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}$$

$$P = \frac{\frac{1}{2^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{3}{2}} * (3 + 4y)}{3}$$

$$R = \frac{2 * y}{(3 + 4y)}$$

$$y^{\frac{13}{4}} - 4 * \left(\frac{3 * Q * n}{2^{\frac{13}{6}} * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} * y - 3 * \left(\frac{3 * Q * n}{2^{\frac{13}{6}} * S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad

y: tirante hidráulico

Cálculo del perímetro mojado, el radio y el tirante hidráulico del canal para en caso

G > 1:

$$Pm = \frac{T}{2} \left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G} \ln \left(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

$$Pm = 0,5\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}}(1 + 8y)^{\frac{1}{2}} + 0,25 * \ln \left(2\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 8y)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$R = \frac{2\sqrt{2} * y^{\frac{3}{2}}}{1,5\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}}(1 + 8y)^{\frac{1}{2}} + 0,75 * \ln \left(2\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 8y)^{\frac{1}{2}} \right)}$$

$$\frac{\left(\frac{2 * 2^{\frac{1}{2}}}{3}\right)^{\frac{5}{3}} \left(y^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left[1,5\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}}(1 + 8y)^{\frac{1}{2}} + 0,75 * \ln\left(2\sqrt{2} * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 8y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$$

$$\frac{0,9065106 * y^{\frac{5}{2}}}{\left[2,12132 * y^{\frac{1}{2}}(1 + 8y)^{\frac{1}{2}} + 0,75 * \ln\left(2,828427 * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 8y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$$

Donde:

Q: caudal (m³/s) máximo en la acequia de ladera

A: área (m²)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad

Caso 6: Ecuaciones para calcular los volúmenes de corte del área de corte 2 “Ac2” en un canal conductor parabólico con talud en la pared del terreno donde se construye, donde el talud debido a la pendiente del terreno natural es diferente de cero ($z3 \neq 0$) (Figura 10)

Tanto el área de corte 1 llamada área de corte de la sección hidráulica como los parámetros hidráulicos del canal conductor en la acequia de ladera del caso parabólico 1 es la misma que para este caso parabólico 2. No obstante, el área de corte 2 si varía y se debe de calcular. Por lo anterior, solamente se procederá a estimar el área de corte 2 (Ac2).

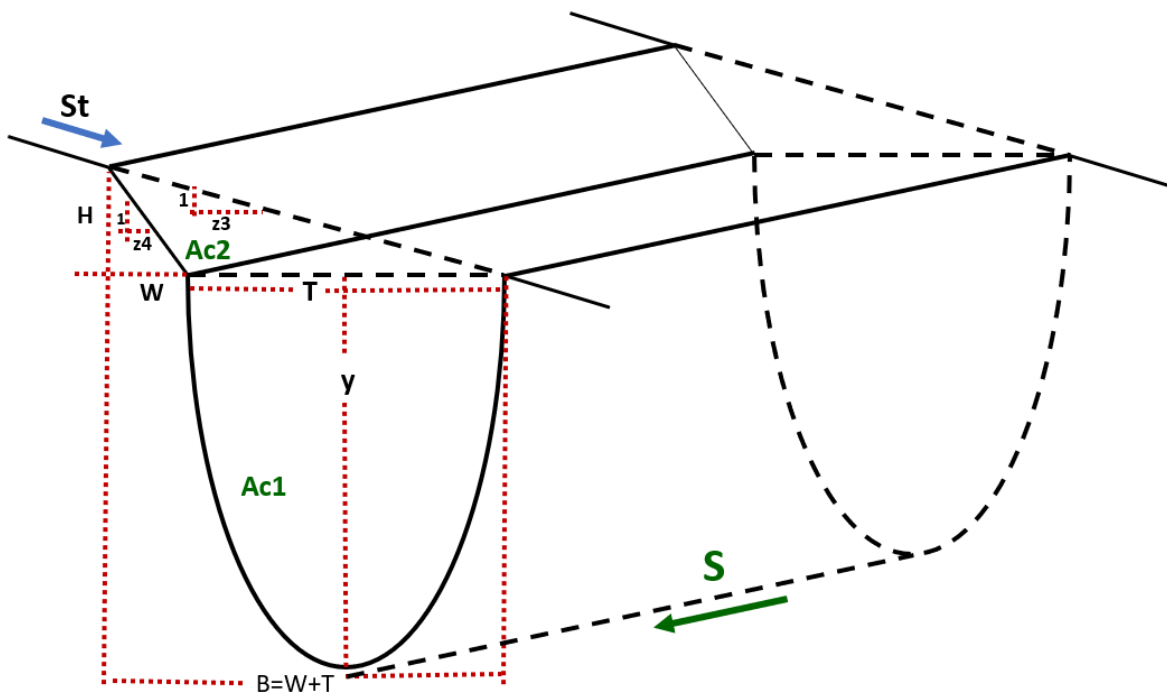


Figura 28: Acequia de ladera parabólica para el caso 2

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:

$z4$ = Talud en la pared de construcción (adimensional)

$z3$ = Talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)

y = Tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)

H = Valor a determinar (m)

W = Valor a determinar (m)

B = Ancho transversal total del corte (m)

T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular

St = pendiente del terreno (%)

S = pendiente del canal (m/m)

$$A_{c2} = 0,5 * T * \frac{T * S_t}{100 - z4 * S_t}$$

$$A_{c2} = \frac{0,5 * T^2 * S_t}{100 - z4 * S_t}$$

Cálculo del área total

$$A_{ct} = A_{c1} + A_{c2}$$

Donde para encontrar el área total del corte, el área del corte 2 se calcula según la ecuación encontrada y se le suma el área de corte 1 “Ac1” y esta última, depende de la función escogida y del valor de “a” = área de corte total m²

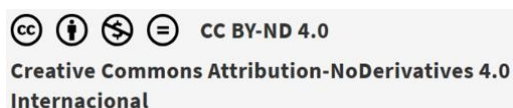
Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal se multiplica por 1,0 m de distancia

$$V_{c2} \left(\frac{m^3}{m} \right) = \frac{0,5 * T^2 * S_t}{100 - z4 * S_t}$$

$$V_{ct} \left(\frac{m^3}{m} \right) = Ac1 + \frac{0,5 * T^2 * S_t}{100 - z4 * S_t}$$

Bibliografía

- French, R. (2017). Hidráulica de canales abiertos. 735. México. Recuperado el 2022, de http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/richard_french_hidraulica_canales_abiertos_-_hidrocliv_compressed_compressed-comprimido.pdf
- Gallardo Armijos, P. (2018). Diseño de canales abiertos. 82. Recuperado el 2022, de <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2018/09/DISE%C3%91O-CANALES-ABIERTOS.pdf>
- Te Chow, V. (2004). Hidráulica de canales abiertos. 668. Recuperado el 2022, de <https://www.udocz.com/apuntes/10448/ven-te-chow---hidraulica-de-canales-abiertos>



CC BY-NC-ND 4.0