

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS GEOLOGIA Y CIVIL
INSTITUTO DE INVESTIGACION E INNOVACIÓN

PROGRAMA: INGENIERIA CIVIL
AREA: HIDRAULICA Y RECURSOS ENERGETICOS



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS Y MODELAMIENTO
BIDIMENSIONAL CON IBER EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE.**

RESPONSABLE : ING. JAIME LEONARDO BENDEZU PRADO

COLABORADORES: - EST. KEVIN J. PEREZ MENESES
- EST. KEVIN K. MEZA RICHARTE

AYACUCHO – PERU

I. GENERALIDADES:

1.1.- Título del Proyecto:

“EVALUACIÓN DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS Y MODELAMIENTO BIDIENSIONAL CON IBER EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE”

1.2.- Responsable:

Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado

Colaboradores:

Est. Kevin J. Perez Meneses

ses

Est. Kevin K. Meza Richarte

1.3 Resumen del Proyecto

Las anomalías en flujo de agua en un canal debido a la variación de pendientes, tirantes, régimen de flujo y caudal generar variabilidad en los fenómenos hidráulicos.

Particularmente este trabajo tiene como objetivo evaluar los fenómenos hidráulicos y análisis bidimensional con el software IBER, para lo cual se utilizará un canal de pendiente variable con sus respectivas compuertas y vernier, para diferentes pendientes, tirantes, régimen de flujo y caudales se medirán con correntómetro las velocidades del flujo de agua en diferentes direcciones y verificar los fenómenos hidráulicos para modelar el flujo bidimensional con el software IBER.

Para verificar los fenómenos hidráulicos se debe medir velocidades y tirantes en forma bidimensional y comparar con el modelamiento realizado con el software IBER, así comparar valores para finalmente tener las conclusiones y recomendaciones.

1.4 Tipo de investigación

Es un tipo de investigación Aplicada, con un nivel de investigación analítica.

1.5.- Cronograma de actividades

ACTIVIDADES	Diciembre de 2018	I trimestre	II trimestre	III trimestre	IV trimestre
Presentación y aprobación del proyecto.	X				
Recopilación de información bibliográfica y calibración de canal de pendiente variable para diferentes caudales y pendientes.		X			
Ensayos con canal de pendiente variables y registro de datos para diferentes fenómenos hidráulicos como: flujo uniforme, rápidamente variado y gradualmente variado.			X		
Modelamiento hidráulico bidimensional con el IBER y comparación de valores con los medidos.				X	
Evaluación de los resultados y elaboración del informe final.					X

1.6.- Recursos disponibles

- Recursos Humanos:
Responsable de la investigación.
Personal de apoyo (estudiantes de Ingeniería Civil)
- Recursos Económicos Propios.
- * Laboratorios de Hidráulica de la EFPIC de la UNSCH.

1.7.- Presupuesto

CLASIFICACION GASTOS	DE	TRIMESTRES DEL AÑO				TOTAL
		I	II	III	IV	
01 BIENES						
01.01	Materiales de	50	50	50	50	200
01.02	Materiales de	30	40	40	60	170
01.03	Materiales fotográficos	40	40	40	40	160
01.04	Composición, Impresión y anillado	-----	-----	200	200	400
02 SERVICIOS						
02.01	Movilidad Local	50	50	50	50	200
02.02	Dos ayudantes de investigación (03 meses)	300	300	300	300	1200
TOTAL:		470	480	680	700	2,330

Costo total del proyecto de investigación S/. 2,330.00

1.8.- Financiamiento:

Auspiciado por el Instituto de Investigación de la UNSCH, y el financiamiento propio, a la fecha no se ha previsto el recurso financiamiento externo, salvo en adelante se concrete otra fuente.

II. PLAN DE INVESTIGACION:

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.1 Descripción del contexto.

En un canal se desconoce el efecto hidráulico bidimensional que debe ser evaluado para ser considerado en diseño de diferentes estructuras hidráulicas construidas en un canal y propiamente dichos efectos en el canal.

Los canales pueden presentar diferentes fenómenos hidráulicos ante la variación de pendientes, variación de caudales, construcción de estructuras hidráulicas en el canal y variaciones de régimen de flujo. Ante el desconocimiento de la respuesta de esta estructura hidráulica a diferente régimen de flujo y fenómenos hidráulicos, es necesario la evaluación de los fenómenos hidráulicos en el canal para diferentes pendientes, diferentes caudales y régimen de flujo y el análisis bidimensional mediante modelamiento utilizando el software IBER y la toma de decisiones. Para llevar a cabo esto, se necesita disponer de información de antecedentes, canal de pendiente variable equipos necesarios para medida de velocidades y el software IBER.

2.1.2 Definición y formulación del problema

2.1.2.1 Definición nominal

A lo largo de todos los canales mayormente existen variación de pendientes, tirantes, variación de caudales y variación de régimen de flujo, sin embargo en los diferentes estudios no se analizan los fenómenos hidráulicos y los efectos en los canales, estas estructuras soportan las variaciones mencionadas.

El principal problema desde el punto de vista de la hidráulica es que las estructuras existentes soportan la corriente del agua con los fenómenos hidráulicos que tienen una variabilidad y se desconocen el comportamiento bidimensional del agua.

2.1.2.2 Definición operativa

Problema General

¿En qué medida la variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable?

Problemas Específicos

- 1.- ¿Cómo, influiría la variación de pendiente del canal en la variación de fenómenos hidráulicos?
- 2.- ¿Cómo influye la variación de la tirantes en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos?
- 3.- ¿Cómo influiría la variación de régimen de flujo en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos?
- 4.- ¿Cómo influiría la variación de caudal en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos?

2.1.3 Delimitación del problema

El estudio se realizará en un canal rectangular de pendiente variable, en una longitud de canal de 7m con un ancho de 25cm. que funciona con una bomba de impulsión de 10HP de potencia y el equipo se ubica en los ambientes del laboratorio de hidráulica, la pendiente del canal varía desde -2% hasta 10% y el caudal varia de 5lt/s hasta 25lt/s.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo general

Evaluar los fenómenos hidráulicos y análisis bidimensional con el software IBER.

2.2.2 Objetivos específicos

- 1.- Evaluar en qué medida la variación de pendiente del canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.
- 2.- Evaluar en qué medida la variación de la tirantes en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

3.- Evaluar en qué medida la variación de régimen de flujo en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

4.- Evaluar en qué medida la variación de caudal en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos

2.3 MARCO TEORICO

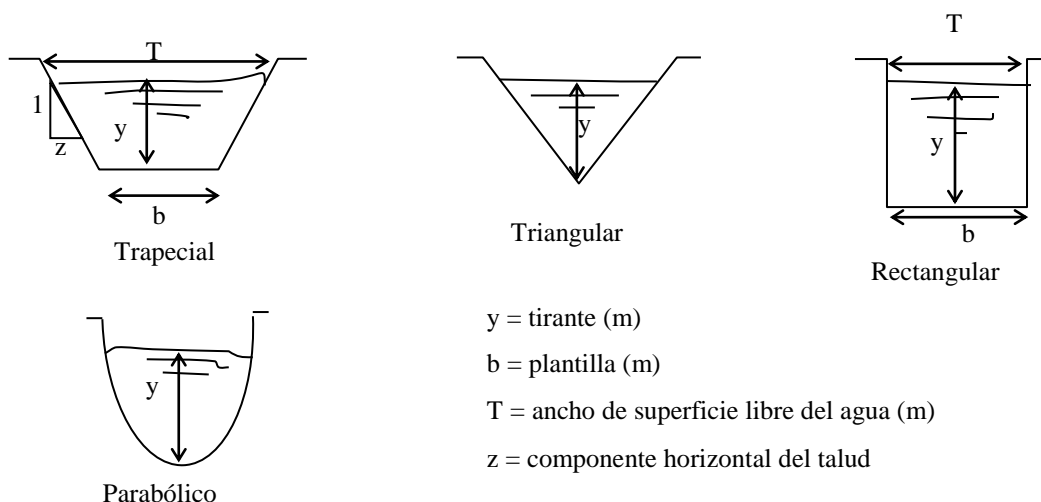
2.3.1 FLUJO DE AGUA EN CANALES

El análisis del flujo de agua en canales es sumamente importante para el diseño de los mismos. El diseño de un canal consiste en la selección de la forma y dimensionamiento de la sección transversal de manera que cumpla con todos los requisitos de funcionamiento hidráulico.

Algunas de las consideraciones importantes que se deben considerar son:

- El canal se divide en tramos con flujo uniforme para su diseño.
- La velocidad del agua en el canal debe ser suficientemente alta para evitar la sedimentación de partículas en suspensión o en el fondo.
- La velocidad del agua en el canal debe ser lo suficientemente baja para evitar la erosión de las paredes y el fondo del canal.
- Las dimensiones iniciales del diseño deben ajustarse en algunos casos, para hacerlas más convenientes en la práctica, por lo que primero se determinan las dimensiones siguiendo las leyes de FLUJO UNIFORME y luego se definen las dimensiones definitivas.
- Las dimensiones finales del diseño deben evitar tener profundidades del flujo próximas a la profundidad o tirante crítico, por lo que se debe analizar el FLUJO CRÍTICO.

Un canal es un conducto a través del cual circula el agua, éste puede ser cerrado o abierto, artificial o natural. La característica principal de un canal es que el agua se mueve con FLUJO LIBRE, es decir, por acción exclusiva de la gravedad y el líquido se encuentra parcialmente envuelto por un contorno sólido. Las secciones transversales más comunes en canales son: trapecial, triangular, rectangular y parabólico.



2.3.2 Tipos de Flujo

Los tipos de flujo de los líquidos. Recordando que el flujo se puede clasificar tomando como referencia los parámetros de tiempo y espacio; con el tiempo como referencia el flujo puede ser permanente y variado (no permanente); y con el espacio, el flujo puede ser uniforme y variado (no uniforme).

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad \text{Flujo permanente; velocidad (v), tirante (y) y caudal (Q) constantes.}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial y}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \quad \text{Flujo variado; velocidad (v), tirante (y) y caudal (Q) variable en el tiempo.}$$

$$\frac{\partial v}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial y}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial L} = 0 \quad \text{Flujo uniforme; velocidad (v), tirante (y) y caudal (Q) constantes.}$$

$$\frac{\partial v}{\partial L} \neq 0 \quad \frac{\partial y}{\partial L} \neq 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial L} \neq 0 \quad \text{Flujo variado; velocidad (v), tirante (y) y caudal (Q) variable en el espacio.}$$

L es la longitud del canal.

Para el estudio de la hidráulica de canales abiertos se consideran tramos de canal largos y de sección constante por lo que se analiza únicamente el flujo uniforme considerando además que es permanente. Asimismo se revisará el análisis del régimen de flujo de acuerdo con su velocidad, y como caso particular el flujo crítico.

El flujo uniforme en canales se presenta cuando las fuerzas de fricción generadas entre el fluido y la superficie sólida del canal se equilibran con la componente del peso del agua en la dirección de flujo, manteniendo la velocidad constante. Las fuerzas de fricción generan una resistencia al flujo (fuerzas de resistencia), las cuales son contrarrestadas por las fuerzas que la gravedad ejerce sobre el peso del cuerpo (fuerzas gravitacionales), en el flujo uniforme debe existir un equilibrio entre las fuerzas de resistencia (fricción) y las fuerzas gravitacionales (peso del cuerpo).

Algunas características del flujo uniforme son:

- a) La profundidad de la lámina de agua es constante a lo largo del canal y las líneas correspondientes al fondo del canal, superficie libre del agua y línea de energía son paralelas y sus pendientes iguales ($s_o = s_w = s_f = s$)
- b) Las pérdidas de carga por fricción para un tramo dado son iguales al decremento en la cota del fondo del canal.

$$hf = \text{cota inicial} - \text{cota final}$$

$$\text{Entonces } s_f = \frac{hf}{L} = \frac{\text{cota inicial} - \text{cota final}}{L}$$

donde L es la longitud, cuando se utiliza el valor de la pendiente del fondo del canal (s_o) en forma fraccional, se está considerando el desnivel existente en 100 metros de longitud del tramo.

- c) El gradiente de energía o pendiente de fricción (s_f) es igual al gradiente piezométrico y a la pendiente del fondo del canal.
- d) Para pendientes pequeñas del fondo del canal $s_0 < 10\%$ o si el ángulo de inclinación del fondo de un nivel de referencia respecto a la horizontal (θ) es mayor que 10° , se considera que la altura piezométrica (d) es igual a la profundidad del agua medida verticalmente (tirante, y).

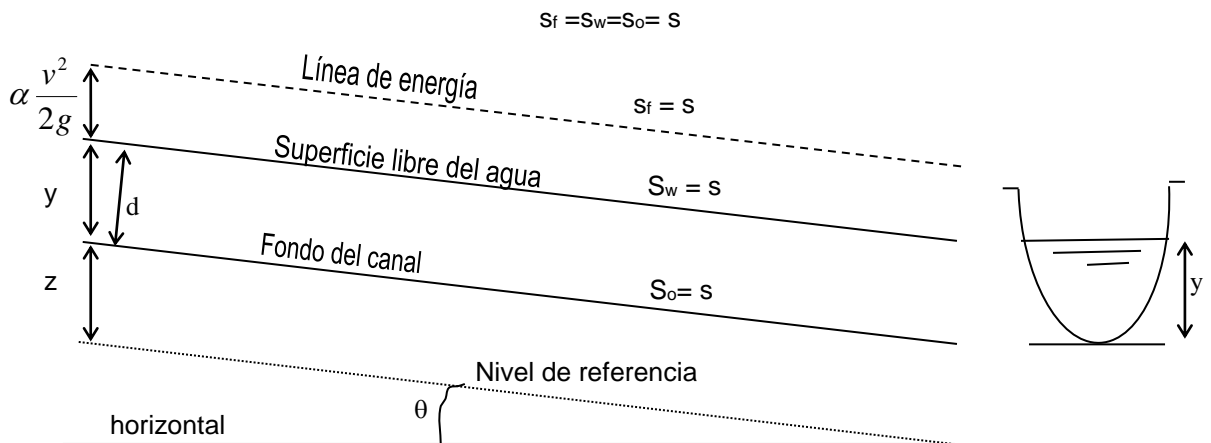
Si $s_0 > 10\%$ o $\theta > 10^\circ$ la carga de presión de la ecuación de Bernoulli es:

$$\frac{p}{\gamma} = d * \cos \theta$$

donde d es el tirante medido en dirección perpendicular a la plantilla del canal o bien, siendo $d = y \cos \theta$:

$$\frac{p}{\gamma} = y * \cos^2 \theta$$

donde "y" es la profundidad del agua medida verticalmente (tirante).



En el flujo uniforme es posible identificar algunas características hidráulicas como son el tirante normal (y_n), la velocidad normal (v_n), la pendiente normal (s_n), el área hidráulica óptima y la profundidad hidráulica (D).

- a) Tirante normal (y_n): Es la profundidad que se obtiene al aplicar la ecuación de Manning en la solución de canales; de manera similar se obtiene la velocidad normal (v_n).
- b) Pendiente normal (s_n): Conocidos el caudal Q , la rugosidad n y la profundidad o tirante normal y_n , se obtiene la pendiente normal con base en la ecuación de Manning.
- c) Área hidráulica óptima: Es el área hidráulica con el menor perímetro mojado que conduce el caudal máximo.
- d) Profundidad hidráulica (D): Es la relación entre el área hidráulica una sección y el ancho de la superficie libre del agua (espejo de agua en la sección). Equivale a la profundidad que tendría el agua si la sección fuera rectangular y conservara tanto el área como el ancho en la superficie.

2.3.3. FUNCION OBJETIVO PARA CALCULAR EL TIRANTE NORMAL (y_n)

Para el cálculo de las características hidráulicas de un canal con flujo uniforme se utiliza la ecuación de Manning. Se parte de la ecuación vista en la Unidad V de estos apuntes:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Donde;

V es la velocidad normal (v_n) del flujo uniforme (m/s)

n es el coeficiente de rugosidad (depende de las características de las paredes del canal)

R_h es el radio hidráulico de la sección del canal (m)

S es la pendiente del fondo del canal, que corresponde a las pérdidas por fricción distribuidas a lo largo del tramo del canal considerado (m/m).

Si la ecuación (6.1.1) se multiplica en ambos lados por el área, se obtiene la ecuación de Manning expresada en función del caudal Q.

$$vA = \frac{1}{n} AR_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

De la ecuación de continuidad:

$$Q = Av \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{1}{n} AR_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

La ecuación de Manning expresada en función del caudal Q está integrada por dos clases de elementos, unos hidráulicos (Q, n y s) y otros que dependen de la sección del canal (área y radio hidráulico); si se separan estos dos elementos, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}} = AR_h^{\frac{2}{3}} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4) el término del lado izquierdo es el factor de flujo uniforme que depende de elementos hidráulicos, mientras que del lado derecho, se tiene el factor de sección para flujo uniforme (depende de la geometría de la sección del canal). El tirante normal (y_n) se obtiene mediante un método iterativo o "de prueba y error". El método iterativo consiste en:

- 1) Proponer un valor para el tirante normal (y_n)
- 2) Calcular el área hidráulica (A) con el tirante propuesto (y_n) y el radio hidráulico (R_h). La ecuación para calcular el área hidráulica (A) y el radio hidráulico (R_h) depende de la geometría del canal, en el anexo al final de este apunte se muestran diferentes secciones de canal y las ecuaciones correspondientes para calcular sus características hidráulicas.
- 3) De la ecuación (2.4) se calcula el valor de la relación hidráulica $Qn/R_h^{1/2}$.
- 4) De la ecuación (2.4) se calcula el valor del factor de sección del canal $AR_h^{2/3}$.

- 5) El valor calculado en el punto 3 debe ser igual al valor calculado en el punto 4; si no es así, se comienza nuevamente con el punto 1, proponiendo un nuevo valor para y_n . Así sucesivamente hasta que la igualdad de la ecuación (2.4) se cumpla.

El proceso iterativo puede ser largo debido a la falta de experiencia del alumno para proponer el primer valor. En la práctica el proceso es sumamente rápido gracias a la ayuda de los procesadores matemáticos con que cuentan las computadoras actuales.

Como apoyo al estudiante se ha desarrollado una hoja de cálculo en Excel, donde lo único que tiene que hacer el alumno es proponer un valor para y_n , la hoja de cálculo hace las operaciones necesarias y arroja todos los parámetros hidráulicos necesarios, el alumno únicamente tiene que observar en la casilla correspondiente para verificar que la condición de la ecuación (2.4) se cumpla, si no se cumple, se debe teclear un nuevo valor para y_n , esto facilita el cálculo del tirante crítico y el tirante normal para el diseño de canales.

2.3.4 Régimen de Flujo

El régimen de flujo en un tramo de canal se clasifica en función del Número de Froude (NF), el cual es una relación adimensional entre fuerzas de inercia y fuerzas de gravedad, dada por la velocidad normal y la velocidad crítica del flujo. De acuerdo con el Número de Froude, el flujo puede supercrítico, crítico y subcrítico.

El Número de Froude se calcula con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (2.5)$$

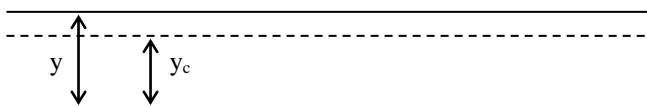
Donde g es la aceleración de la gravedad; v es la velocidad del flujo y D es la relación entre el área hidráulica de una sección de canal (A) y el ancho de la superficie del agua (T).

Flujo Subcrítico

En este régimen de flujo se observan las siguientes características:

a) la velocidad normal (v_n) es menor que la velocidad crítica (v_c). La velocidad normal está dada por la ecuación de Manning.

b) El tirante normal (y) es mayor que el tirante crítico (y_c).



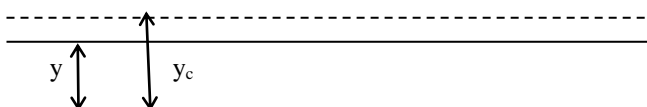
c) El Número de Froude es menor que 1
 $F < 1$

Flujo Supercrítico

En este régimen de flujo se observan las siguientes características:

a) la velocidad normal (v_n) es mayor que la velocidad crítica (v_c).

b) El tirante normal (y) es menor que el tirante crítico (y_c).



c) El Número de Froude es mayor que 1
 $F > 1$

Flujo Crítico

El régimen de flujo crítico puede definirse como el estado en el cual la energía específica E, es mínima para un caudal dado q.

De acuerdo con la ecuación de la energía de Bernoulli para canales y considerando $z=0$, la energía específica en un canal está dada por:

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

Si la pendiente del canal es pequeña $\alpha=1$ por lo tanto la ecuación anterior queda como sigue:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad (2.7)$$

Expresando esta ecuación en función del caudal Q, se multiplica por el área A

$$E = y + \frac{v^2 A^2}{2gA^2} \quad E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.8)$$

Considerando que para el régimen crítico la energía específica E es casi constante, es decir no cambia con respecto al tirante en la sección del canal, entonces se debe cumplir la condición de que:

$$\frac{dE}{dy} = 0 \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.8 en la ecuación 2.9 entonces la expresión queda como sigue:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left[y + \frac{Q^2}{2gA^2} \right] \quad (2.10)$$

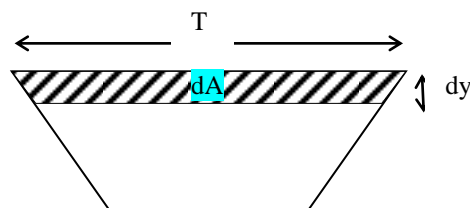
Resolviendo la derivada de la ecuación 2.10 y considerando que Q es una variable función del área hidráulica (A) y el área hidráulica (A) es función del tirante (y) entonces la expresión queda:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2 dA}{gA^3 dy} = 0 \quad (2.11)$$

Considerando que para un diferencial de área determinado:

$$dA = T * dy \quad (2.12)$$

Donde T es el ancho del espejo del agua (superficie libre del agua) y “dy” es el diferencial de tirante, según se observa en el siguiente esquema:



Sustituyendo la relación 2.12 en 2.11 y eliminando términos

$$1 - \frac{Q^2 T dy}{gA^3 dy} = 0$$

$$1 - \frac{Q^2 T}{g A^3} = 0 \quad (2.13)$$

Reacomodando términos de la ecuación 2.13 se obtiene la ECUACIÓN GENERAL PARA FLUJO CRÍTICO.

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} = 1 \quad (2.14)$$

Donde:

A es el área hidráulica correspondiente a la profundidad o tirante crítico (m^2)
T es el ancho de la superficie del agua (espejo del agua) correspondiente al tirante crítico (m)
Q es el caudal (m^3/s)
g es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

FUNCION OBJETIVO PARA CALCULAR EL TIRANTE CRÍTICO (y_c)

De la ecuación 6.2.9, separando los elementos hidráulicos (Q y g) de los elementos que dependen de la sección del canal (A y T) se obtiene la función objetivo que debe cumplirse al momento de calcular el tirante crítico (y_c), dicha función objetivo es la siguiente:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad (2.15)$$

Si para eliminar el exponente (2) del caudal Q obtenemos la raíz cuadrada de toda la función:

$$\frac{\sqrt{Q^2}}{\sqrt{g}} = \frac{\sqrt{A^3}}{\sqrt{T}}$$

Expresando los radicales en forma de exponentes, la ecuación anterior queda:

$$\frac{Q}{g^{\frac{1}{2}}} = \frac{A^{\frac{3}{2}}}{T^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

Tirante Crítico (y_c)

Es el tirante para el cual la energía propia del escurrimiento $\left[E = y + \frac{v^2}{2g} \right]$ es la mínima energía posible con la que puede escurrir un determinado caudal Q.

El tirante crítico (y_c) se obtiene mediante un método iterativo o “de prueba y error”. El método iterativo consiste en:

- 1) Proponer un valor para el tirante crítico (y_c)
- 2) Calcular el área hidráulica (A) con el tirante propuesto (y_c) y ancho de la superficie del agua (T). La ecuación para calcular el área hidráulica (A) y el ancho de la superficie del agua (T) depende de la geometría del canal, en el anexo al final de este apunte se muestran diferentes secciones de canal y las ecuaciones correspondientes para calcular sus características hidráulicas.
- 3) De la ecuación (2.16) se calcula el valor de la relación hidráulica $Q/g^{1/2}$.
- 4) De la ecuación (2.16) se calcula el valor del factor de sección del canal $A^{3/2} / T^{1/2}$.
- 5) El valor calculado en el punto 3 debe ser igual al valor calculado en el punto 4; si no es así, se comienza nuevamente con el punto 1, proponiendo un nuevo valor para y_c . Así sucesivamente hasta que la igualdad de la ecuación (2.16) se cumpla.

El proceso iterativo puede ser largo debido a la falta de experiencia del alumno para proponer el primer valor. En la práctica el proceso es sumamente rápido gracias a la ayuda de los procesadores matemáticos con que cuentan las computadoras actuales.

Como apoyo al estudiante se ha desarrollado una hoja de cálculo en Excel, donde lo único que tiene que hacer el alumno es proponer un valor para y_c , la hoja de cálculo hace las operaciones necesarias y arroja todos los parámetros hidráulicos necesarios, el alumno únicamente tiene que observar en la casilla correspondiente para verificar que la condición de la ecuación (2.16) se cumpla, si no se cumple, se debe teclear un nuevo valor para y_c , esto facilita el cálculo del tirante crítico y el tirante normal para el diseño de canales.

Velocidad Crítica (v_c)

Para calcular la velocidad crítica se puede utilizar la ecuación 2.15 expresando el caudal Q en función de la velocidad (v) y el área (A):

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad \text{Si } Q = Av \quad \text{entonces} \quad \frac{(Av)^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad \frac{A^2 v^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad (2.17)$$

Despejando la velocidad de la ecuación 2.17, eliminando términos y acomodando;

$$v^2 = \frac{A^3 g}{TA^2} \quad v^2 = \frac{Ag}{T} \quad \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{Ag}{T}} \quad v = \sqrt{\frac{Ag}{T}} \quad (2.18)$$

$$\text{Si } D = \frac{A}{T} \quad (2.19)$$

Entonces se sustituye la ecuación 2.19 en la función 2.18, y considerando que la velocidad es la velocidad crítica, la ecuación queda como sigue:

$$v_c = \sqrt{Dg} \quad (2.20)$$

Otra forma de calcular la velocidad crítica (v_c) es utilizando directamente la ecuación de caudal:

$$Q = Av$$

$$v_c = \frac{Q}{A_c} \quad (2.21)$$

Donde el A_c es el área hidráulica calculada con el tirante crítico (y_c) y V_c es la velocidad crítica para flujo crítico.

Número de Froude (F)

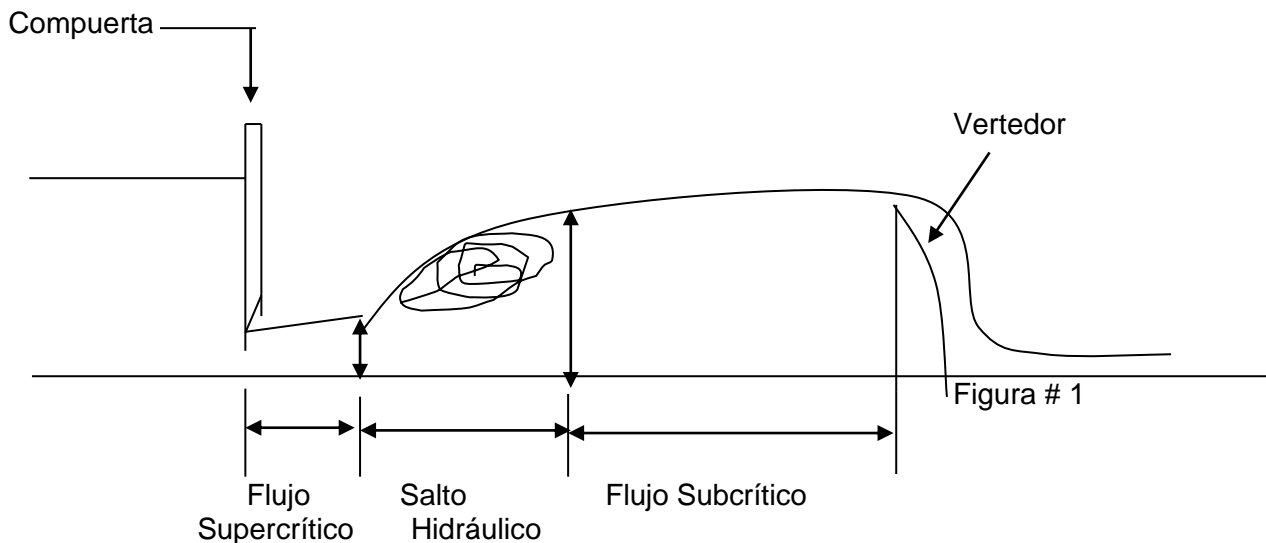
Recuerde que para que el flujo sea crítico se debe cumplir que el índice conocido como Número de Froude sea 1 ($F = 1$).

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad; v es la velocidad del flujo y D es la relación entre el área hidráulica de una sección de canal (A) y el ancho de la superficie del agua (T) y se calcula con la ecuación (2.19).

2.3.5 DETERMINACION DEL SALTO HIDRAULICO

El salto Hidráulico es un fenómeno local que consiste en la súbita elevación de la superficie del agua produciendo la transición de un flujo supercrítico a uno subcrítico. La ocurrencia de un salto hidráulico está determinada por las condiciones del flujo aguas arriba y aguas abajo del salto. En la figura # 1, la compuerta determina un flujo supercrítico, mientras que el vertedor obliga la existencia de un flujo subcrítico aguas abajo, la transición se logra a través del salto hidráulico.



Otra forma de producir el Salto Hidráulico es utilizando obstáculos que frenen el flujo supercrítico obligándolo a pasar a subcrítico. Por ejemplo, los señalados en la figura # 2.

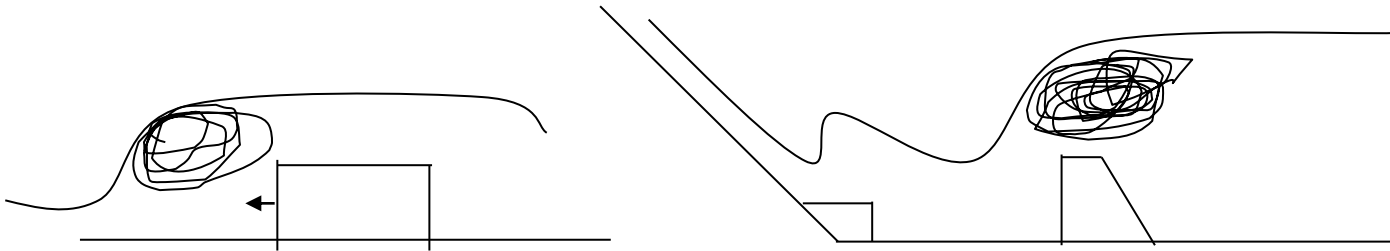


Figura # 2

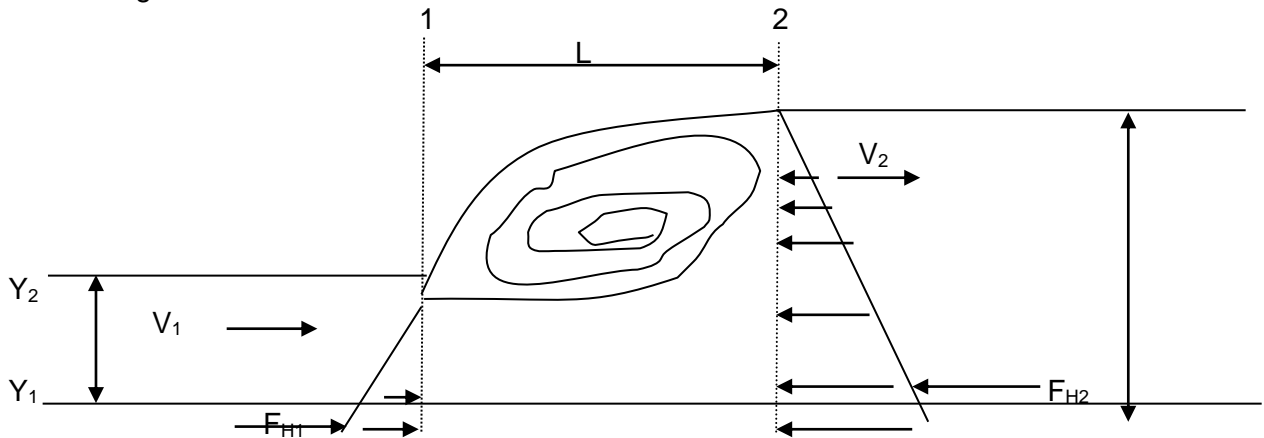
El Salto Hidráulico producido por obstáculos recibe el nombre de **SALTO HIDRÁULICO FORZADO**, mientras que el producido solamente por las condiciones del canal se denomina **SALTO HIDRÁULICO SIMPLE**. En ambos casos, la existencia de corrientes secundarias en las crestas del salto, que en los casos más violentos produce mezcla de aire en la corriente, produce pérdidas de energía cuyo cálculo resulta muy complicado. En consecuencia, la ecuación de la Energía resulta impráctica para el análisis, teniendo que recurrir al uso de la ecuación de Impulso y Cantidad de Movimiento.

2.3.5.1. IMPORTANCIA DEL SALTO HIDRAULICO

En el campo de flujo de canales abiertos, el salto hidráulico suele tener muchas aplicaciones entre las que se incluyen:

1. La disipación de energía en flujos sobre diques, vertederos y otras estructuras hidráulicas.
2. El mantenimiento de altos niveles de agua en canales que se utilizan para propósitos de distribución.
3. Incremento del gasto descargado por una compuerta deslizante, al rechazar el retroceso del agua contra la compuerta, esto aumenta la carga efectiva y con ello la descarga.
4. La reducción de la elevada presión bajo las estructuras, mediante la elevación del tirante del agua sobre la guarnición de defensa de la estructura.
5. Mezcla de sustancias químicas usadas para tratamiento de agua.
6. Remoción de bolsas de aire con flujo de canales abiertos en canales circulares.

Consideremos un tramo horizontal de un canal de sección transversal cualquiera donde se produce el salto hidráulico y el volumen de control limitado por las secciones 1 y 2 (antes y después del salto), por el piso del canal y por la superficie libre del agua.



Consideramos que se satisfacen las siguientes condiciones para aplicar la Ecuación de Cantidad de Movimiento:

1. Canal horizontal y de sección constante.
2. Se desprecia resistencia de fricción originada en la pared del canal debido a la poca longitud del tramo del salto.
3. Dentro del tramo no hay obstáculos que ocasionen una fuerza de empuje dinámico.

$$F_{H1} = P * A \quad , \text{ por tanto } F_{H2} = \gamma \bar{y}_1 A_1$$

$$F_{H2} = P * A \quad , \text{ por tanto } F_{H2} = \gamma \bar{y}_2 A_2$$

La ecuación de Impulso y Cantidad de Movimiento entre las secciones 1 y 2 viene a ser:

$$\sum F = \Delta(\rho QV)$$

$$F_{H1} - F_{H2} = \frac{\gamma}{g} Q(V_2 - V_1)$$

$$F_{H1} - F_{H2} = \frac{\gamma}{g} Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)$$

$$F_{H1} - F_{H2} = \frac{\gamma Q^2}{A_2 g} - \frac{\gamma Q^2}{A_1 g}$$

$$F_{H1} + \frac{\gamma Q^2}{A_1 g} = F_{H2} + \frac{\gamma Q^2}{A_2 g}$$

$$\gamma \bar{y}_1 A_1 + \frac{\gamma Q^2}{A_1 g} = \gamma \bar{y}_2 A_2 + \frac{\gamma Q^2}{A_2 g}$$

Dividiendo por γ tendremos

$$\bar{y}_1 A_1 + \frac{Q^2}{A_1 g} = \bar{y}_2 A_2 + \frac{Q^2}{A_2 g} \quad \text{con } Y_1 < Y_2$$

Entonces, la fuerza específica o Función Impulso (Momentum) se define como:

$$M = \bar{y}_i A_i + \frac{Q^2}{A_i g}$$

Donde el primer término representa el empuje hidrostático por unidad de peso y también el momento estático del área respecto de la superficie libre. El segundo término representa la cantidad de movimiento del flujo que atraviesa la sección del canal en la unidad de tiempo y por unidad de peso del agua.

Utilizando el hecho de que, para canal rectangular, $\bar{y} = \frac{y}{2}$ y la definición de caudal unitario $q = \frac{Q}{b}$, la fuerza específica para canal rectangular puede ser escrita como:

$$M = \frac{q^2 b}{gy} + \frac{y^2 b}{2}$$

Y se define la fuerza específica por unidad de ancho M' como:

$$M' = \frac{M}{b} = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2}$$

Para un Salto Hidráulico Forzado, la fuerza ejercida por el obstáculo P_f se determina por:

$$\frac{P_f}{\gamma b} = M_1' - M_2'$$

2.3.5.2 LONGITUD DEL SALTO

La longitud del salto ha recibido gran atención de los investigadores, pero hasta ahora no se ha desarrollado un procedimiento satisfactorio para su cálculo. Se acepta comúnmente que la longitud "L" del salto se defina como la distancia medida entre la sección de inicio y la sección inmediatamente aguas abajo en que termina la zona turbulenta.

Un salto hidráulico se formará en el canal si el número Froude F_1 del flujo, la profundidad del flujo y_1 aguas arriba, y una profundidad aguas abajo y_2 satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right)$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

$$V = \frac{Q}{by}$$

La longitud del salto se puede determinar por las siguientes expresiones:

1. Para Canales Rectangulares

$$\frac{L}{y_1} = 9.75(F_1 - 1)^{1.01}$$

$$L = 2.5(1.9y_2 - y_1) \quad (\text{Pavlovski})$$

$$L = 10.3y_1(\sqrt{F_1} - 1)^{0.81} \quad (\text{Chertonsov})$$

$$L = \frac{8(10 + \sqrt{F_1})}{F_1} * \Delta E \quad (\text{Aivazion})$$

2. Para Canales Trapezoidales

$$L = 5y_2 \left[1 + 4 \sqrt{\frac{b_2 - b_1}{b_2}} \right] \quad (\text{Chevtousov}) \quad b_2 \text{ y } b_1 \text{ anchos de plantilla}$$

$$L = 10.3y_1(\sqrt{F_1} - 1)^{0.81} \left[1 + (1.76) \frac{m(y_2 - y_1)}{P_1} \right] \quad (\text{Meierov})$$

2.3.5.3 PERDIDA DE ENERGIA

a).- Para el salto hidráulico simple:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

b).- Para el salto hidráulico forzado:

$$\Delta E = (y_1 - y_2) + \frac{q^2}{2g} \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right)$$

2.3.6 PERFILES DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

2.3.6.1 ECUACION DINAMICA DEL FLUJO GRADUALMENTE

Consideramos el perfil del flujo gradualmente variado en la longitud elemental dx de un canal abierto, la altura total sobre el plano de referencia en la sección 1 aguas arriba es:

$$H = z + y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación \# 1}$$

Donde:

H: es la altura total en ft.

z: es la distancia vertical del fondo del canal sobre el datum en ft.

y: es la profundidad de la sección del flujo en ft.

θ : es el ángulo de la pendiente del fondo.

α : es el coeficiente de energía.

V: es la velocidad media del flujo a través de la sección en ft/seg.

Se supone que θ y α son constante a lo largo del tramo del canal en consideración, y por ello la ecuación # 1 se puede escribir así:

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuaciones \# 2 y 3}$$

$$H = z + E$$

Tomando el fondo del canal como el eje x y diferenciado la ecuación (3) con respecto a la longitud x del perfil de la superficie del agua, el cual se mide a lo largo del eje x, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dE}{dx} \quad \text{Ecuación \# 4}$$

De la figura se observa que: $S_f = -\frac{dH}{dx}$, $S_0 = -\frac{dz}{dx}$, y además se puede demostrar que $\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx}(1 - F^2)$ de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E &= y + \frac{V^2}{2g} \\ \frac{dE}{dy} &= 1 + \frac{1}{2g} \frac{d(V^2)}{dy} \\ \frac{dE}{dy} &= 1 + \frac{1}{2g} \frac{d(Q^2)}{d(A^2)} \\ \frac{dE}{dy} &= 1 + \frac{Q^2}{2g} \frac{d}{dy}(A^{-2}) \\ \frac{dE}{dy} &= 1 + \frac{Q^2}{2g} \frac{(-2)}{A^3} \left(\frac{dA}{dy} \right) \\ \frac{dE}{dy} &= 1 - \frac{Q^2}{gA^2} \frac{T}{A} \\ \frac{dE}{dy} &= 1 - \frac{V^2}{g} \frac{1}{D} = 1 - \frac{V^2}{gD} \\ \frac{dE}{dy} &= 1 - F^2 \end{aligned}$$

Introduciendo el diferencial dx

$$\frac{dE}{dx} = (1 - F^2) \frac{dy}{dx}$$

Con estos resultados la ecuación # 4 se convierte en:

$$\begin{aligned} -S_f &= -S_0 + \frac{dy}{dx}(1 - F^2) \\ \text{Ecuación \# 5} \quad \frac{dy}{dx} &= \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \end{aligned}$$

Esta ecuación se llama la **ECUACIÓN DINÁMICA DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO**, y representa la variación de la profundidad de flujo con la distancia X a lo largo del fondo del canal.

La curva que forma la superficie del agua en un flujo gradualmente variado, que sirve como transición de un estado dado de flujo al flujo uniforme o viceversa, se llama **Perfil de Flujo**. La forma que toman los perfiles de flujo dependerá de la pendiente del fondo S_0 y de la pendiente de la rasante de energía S_f en el tramo del canal bajo análisis, y puede ser bosquejada si se conocen las profundidades críticas (y_c), normal (y_0) en el canal, y la zona en que se encuentra la profundidad de flujo real (y) en el tramo estudiado. Para el análisis se emplea la ecuación # 5, obtenida anteriormente.

En el flujo uniforme se cumple la fórmula de Manning (despejando S_0):

$$S_0 = \frac{n^2 V_0^2}{R_0^3} = \frac{n^2 Q^2}{A_0^2 R_0^3} \quad \text{Ecuación \# 6}$$

Donde V_0 , R_0 y A_0 son parámetros del flujo uniforme.

La pendiente de la rasante de energía, o gradiente de energía (S_f), puede ser obtenida de la fórmula de Manning, si se acepta su validez en el flujo gradualmente variado:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^3} = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^3} \quad \text{Ecuación \# 7}$$

Donde V , A y R son parámetros correspondientes a la profundidad real (y) en el tramo en estudio (todas son variables).

Como el Q es constante, y tanto el área como el radio hidráulico aumentan con “ y ”, de la comparación entre las fórmulas 6 y 7, resulta que:

$$\text{Para } y > y_0 \Rightarrow S_0 > S_f$$

$$\text{Para } y < y_0 \Rightarrow S_0 < S_f$$

La pendiente del fondo del canal S_0 para canales cuyo lecho desciende en la dirección del flujo, es positiva y puede clasificarse como subcrítica ($S_0 < S_c$), crítica ($S_0 = S_c$) o supercrítica ($S_0 > S_c$). Si el canal es horizontal, entonces la pendiente del fondo es nula ($S_0 = 0$), si el lecho del canal asciende en la dirección del flujo, se trata de una pendiente adversa ($S_0 < 0$).

Para las pendientes positivas es posible determinar una profundidad normal (y_0) y una profundidad crítica (y_c); mientras que para las pendientes horizontal y adversa, el valor de (y_0) no existe. En el primer caso se han determinado las siguientes relaciones, para flujo uniforme:

Pendiente Subcrítica	$S_0 < S_c$	$Y_0 > Y_c$	$F_0 < 1$
Pendiente Crítica	$S_0 = S_c$	$Y_0 = Y_c$	$F_0 = 1$
Pendiente Supercrítica	$S_0 > S_c$	$Y_0 < Y_c$	$F_0 > 1$

Estas relaciones pueden ser utilizadas cuando se determinen los valores de $(S_0 - S_f)$ y de $(1 - F^2)$, para determinar el signo de $\frac{dy}{dx}$ en la ecuación # 5, siempre que se conozca el entorno de valores de la profundidad de flujo (y). Por ejemplo, si la pendiente es supercrítica ($S_0 > S_c$, $y_0 < y_c$), y si $y_0 < y < y_c$, podemos concluir:

$$Y > Y_0 \Rightarrow S_0 > S_f \Rightarrow S_0 - S_f > 0$$

$$Y < Y_c \Rightarrow F > 1 \Rightarrow 1 - F^2 < 0$$

Resultado: $\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} < 0$ Este resultado se muestra en la siguiente

figura, nótese que la superficie del agua descende desde la profundidad crítica, acercándose a la profundidad normal (que es la tendencia general de los flujos en canales abiertos).

LPC: Línea de Profundidad Crítica
LPN: Línea de Profundidad Normal

$$S_0 > S_c, \quad Y_0 < Y < Y_c$$

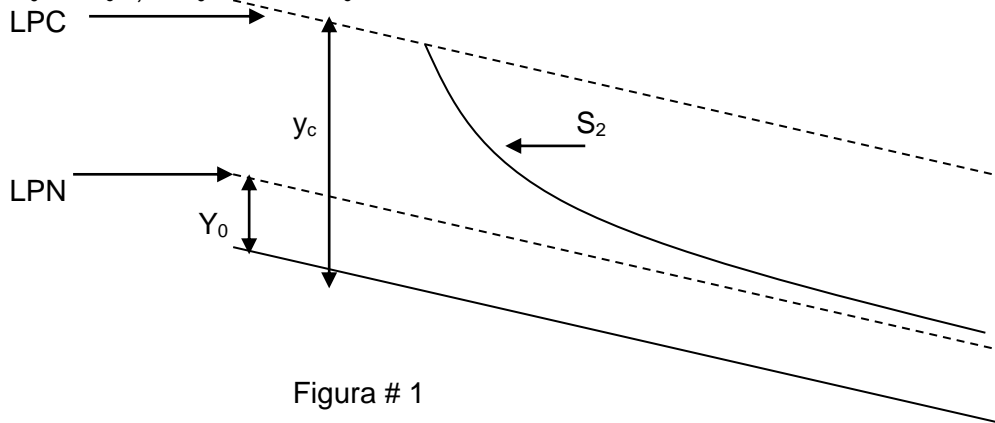


Figura # 1

Un análisis exhaustivo de los perfiles de flujo requiere analizar el valor de la derivada $\frac{dy}{dx}$, para cada tipo de pendiente y para todos los valores relativos de (y) respecto a (y_0) y a (y_c). La tabla # 1 presentada a continuación muestra los resultados de ese análisis.

Obsérvese que al dibujar las líneas de profundidad crítica y profundidad normal, como se hizo en la figura # 1, el espacio encima del canal queda dividido en tres zonas:

- Zona 1. El espacio encima de la línea superior.
- Zona 2. El espacio entre las dos líneas
- Zona 3. El espacio debajo de la línea inferior.

Esta nomenclatura sirve para designar los perfiles resultantes, los cuales se muestran en la tabla, designándoles por una letra que corresponde al tipo de pendiente, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- M: Pendiente suave o subcrítica
- C: Pendiente crítica
- S: Pendiente fuerte o supercrítica

H : Pendiente horizontal
 A : Pendiente Adversa

Cada letra va seguida de un número que corresponde a la zona donde ocurre el perfil. Por ejemplo, si se trata de una pendiente fuerte (S) y la curva ocurre entre las LPN y LPC (zona 2), como se muestra en la figura # 1, el perfil se llama S₂.

Tabla # 1: Clasificación de los Perfiles de Flujo

Pendiente del Lecho	Designación			Relación Y, Y _n , Y _c			dy/dx	Tipo de Flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3		
Horizontal S ₀ = 0	-			Y > Y _n > Y _c			-	No hay
		H2		Y _n > Y > Y _c			<0	Subcrítico
			H3	Y _n > Y _c > Y			>0	Supercrítico
Suave 0 < S ₀ < S _c	M1			Y > Y _n > Y _c			>0	Subcrítico
		M2		Y _n > Y > Y _c			<0	Subcrítico
			M3	Y _n > Y _c > Y			>0	Supercrítico
Crítica S ₀ = S _c > 0	C1			Y > Y _c = Y _n			>0	Subcrítico
		C2		Y _c = Y = Y _n			0	Uniforme Crítico
			C3	Y _c = Y _n > Y			>0	Supercrítico
Fuerte S ₀ > S _c > 0	S1			Y > Y _c > Y _n			>0	Subcrítico
		S2		Y _c > Y > Y _n			<0	Supercrítico
			S3	Y _c > Y _n > Y			>0	Supercrítico
Adversa S ₀ < 0	-			Y > (Y _n) [*] > Y _c			-	No hay
		A2		(Y _n) [*] > Y > Y _c			<0	Subcrítico
			A3	(Y _n) [*] > Y _c > Y			>0	Supercrítico

Nota: (Y_n)^{*} en realidad no existe

2.3.7 MODELADO SOFTWARE DE CANALES HIDRÁULICOS

2.3.7.1 MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL

Ecuaciones de aguas someras 2D

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)$$

Fricción de fondo

Fórmula de Manning

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 |U| U_x}{h^{4/3}}$$

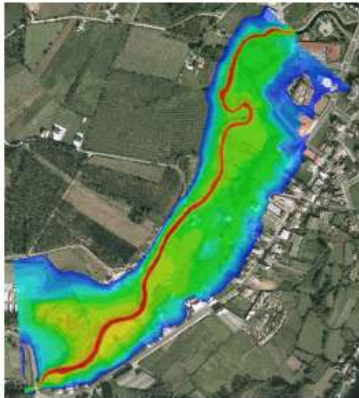
$$\tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 |U| U_y}{h^{4/3}}$$



Condiciones de contorno en contornos de pared

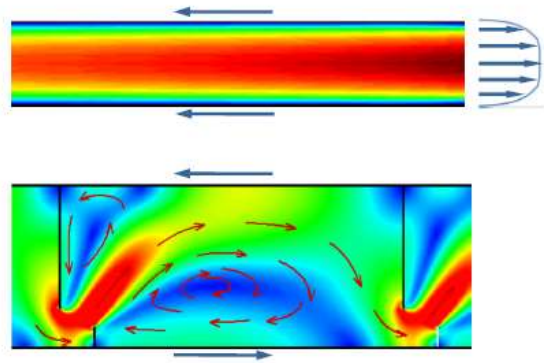
Sin rozamiento

Ríos, zonas costeras



Rozamiento

Canales, estructuras hidráulicas



Distribución de presión hidrostática

Velocidad uniforme en profundidad $\forall h, U_x, U_y$

La obtención de un modelo que recoja todas las características geométricas, hidráulicas y dinámicas de un canal es un requisito imprescindible para que un proyecto como el que se aborda tenga éxito. No es una materia sencilla de estudiar, ya que es un problema que involucra diversas cuestiones donde juega un papel predominante la física de fluidos y donde las condiciones de contorno juegan un papel fundamental. Los diversos paquetes software especializados en la gestión de canales de riego han sido desarrollados principalmente en empresas con una clara vocación investigadora, en organismos públicos de investigación, como pueden ser las universidades o en entornos militares. Las soluciones ofrecidas son diversas, pero existe un trasfondo común que es el modelado de las ecuaciones de Saint Venant, de las que se ofrece una reseña en este apartado. También se hará una

reseña de algunos de los paquetes software existentes en el mercado relacionados con el mundo de los canales hidráulicos y se verá en profundidad el software que se ha empleado en este proyecto, que es el software SIC (Systeme d'Irrigation de Canaux), desarrollado en Francia [14][15].

Las ecuaciones de Saint-Venant

Para el modelado de la dinámica de los canales de irrigación se suelen emplear sistemas de primer orden con un retraso [8]. Estas dinámicas se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones de Saint-Venant [8][9][11]. Se pueden ver como simplificaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes [10] para modelos donde el agua es un elemento fundamental. Estas ecuaciones en la mayor parte de los casos solo pueden resolverse mediante métodos numéricos, ofreciendo soluciones analíticas sólo casos muy concretos. Se trata de ecuaciones no lineales en derivadas parciales que, por facilidad, se linealizan en torno a un punto de trabajo. Estas linealizaciones son básicas si se quiere llegar a una solución para el problema del control del canal. Existen dos ecuaciones distintas de Saint-Venant: la ecuación de continuidad y la ecuación de momento.

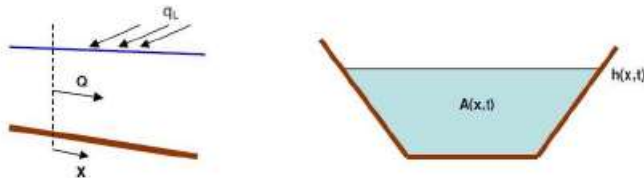


figura 1. Esquemático de canal de riego

La ecuación de continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa: en un determinado volumen infinitesimal de control se cumple que la diferencia entre la variación del flujo de agua que entra en ese volumen de manera lateral y del flujo de agua que lo atraviesa en la dirección de la corriente equivale a la variación temporal del Área transversal que queda cubierta por el agua. Puede verse la ecuación en (1).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

En esta ecuación, el primer término se refiere a la variación longitudinal del flujo de agua que atraviesa el volumen de control, el segundo se refiere a la variación con el tiempo del área transversal que cubre el agua. El otro miembro de la ecuación es la variación del flujo de agua que entra de manera lateral en el volumen de control.

La ecuación del momento, que puede verse en (2) es la representación matemática de la conservación de la cantidad de movimiento longitudinal:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (2)$$

En esta ecuación, Q es el flujo de agua en el volumen de control, A es la superficie lateral de dicho volumen de control, x es la coordenada longitudinal, g es la fuerza de la gravedad, Z es la profundidad del agua, mientras Sf y So son las pendientes de fricción y del fondo del canal respectivamente.

Estas ecuaciones se formulan bajo los siguientes supuestos [10]:

- La distribución de la presión es hidrostática.
 - La velocidad se distribuye uniformemente en cualquier sección del canal.
 - La pendiente media del fondo del canal es pequeña.
 - El flujo de agua es homogéneo.

Por otra parte, la pendiente de fricción del canal debe ser modelada. Existen dos posibles alternativas para ello: por un lado la ecuación de Manning-Strickler, reflejada en (3) y por otra parte la ecuación (4).

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{R_f^{4/3} A^2} \quad (3)$$

$$S_f = \frac{gQ|Q|}{C^2 R_f A} \quad (4)$$

En estas ecuaciones, n es el coeficiente de Manning, medido en $(\text{s})^{1/3}$, C es el coeficiente de fricción de Chézy, medido en $(\text{s})^{1/2}$, R_f es el radio hidráulico medido en metros en A sobre el perímetro que queda ocupado por el agua. El coeficiente de Manning se deduce habitualmente del material del canal.

Para concluir esta pequeña aproximación a las ecuaciones de Saint Venant (que tienen una ingente cantidad de teoría asociada) es necesario establecer las ecuaciones iniciales y de contorno bajo las que son aplicadas. Las condiciones iniciales vienen expresadas en la ecuación (5) y las de contorno se recogen en la (6).

$$Z(x, 0) = Z_0(x), \quad Q(x, 0) = Q_0(x) \quad (5)$$

$$Z(0, t) = Z_i(t), \quad Q(0, t) = Q_i(t), \quad Z(X_f, t) = Z_f(t), \quad Q(X_f, t) = Q_f(t) \quad (6)$$

Como se puede ver, las condiciones iniciales están relacionadas con el caudal y la profundidad del agua a lo largo del canal en el instante cero. Por su parte, las condiciones de contorno están relacionadas con la evolución temporal del caudal y la profundidad del canal al principio y al final del mismo, siendo X_f la coordenada longitudinal del punto final del canal.

2.3.7.2 Paquetes software para el trabajo con canales hidráulicos

En este apartado se relaciona una serie de paquetes software empleados en la gestión y control de canales hidráulicos. De la mayoría se hará una reseña breve pero en el caso de dos de ellos se proporcionará mayor información: el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) [16] y el SIC. En el primer caso, la razón es su gran influencia mundial y el ser el software elegido en una gran mayoría de casos; en el segundo caso, por ser el elegido para este proyecto. Se realizará un detallado análisis de cada módulo del programa SIC y de su importancia en la realización de este proyecto. Existen dos motivos principales para escoger SIC: uno es que es un software muy específico para lo que se pretende hacer, mientras HEC-RAS es un software más de propósito general (simula no sólo canales hidráulicos, sino otras estructuras como ríos o presas), recayendo en el usuario el trabajo de saberlo adaptarlo a sus necesidades particulares. El otro motivo es que SIC ofrece una pequeña interfaz con Matlab a la que se le puede sacar mucho partido mientras HEC-RAS es más cerrado en ese sentido. Además SIC es un software más ligero y que ocupa menos espacio en un ordenador.

Algunos de los paquetes software existente en el mercado son los siguientes:

MIKE 11: Es un software danés desarrollado en el DHI (Danish Hydraulic Institute) [17]. Proporciona métodos computacionales para el análisis de flujos tanto estacionarios como transitorios en canales. Es muy útil para el diseño de planes de actuación en inundaciones. Se puede aplicar en escenarios diversos como canales abruptos o estuarios estrechos. En este software se recogen estructuras complejas como presas, que pueden ser simuladas. Ha llegado a ser un estándar en países como Australia, Nueva Zelanda, Bangladesh y varios países europeos. Tiene la desventaja de no ser un software libre y de que es necesaria la colaboración del DHI para su configuración.

OBEK: Desarrollado en Delft Hydraulic (Holanda) [18]. Abarca aspectos tales como prevención de inundaciones, sistemas de drenaje, morfología de ríos, control de aguas subterráneas, inundaciones en alcantarillas, control de calidad del agua o de excesos de sal en la misma. Puede simular en 1D o 2D.

DAMBRK (Dam Break Forecasting Model) [19]: Software desarrollado por BOSS International, es un software pensado para el modelado hidrodinámico de situaciones de inundación, especialmente pensado para estimar las consecuencias de la rotura de una presa, y analizar la manera de encaminar el agua hacia aliviaderos que deben haber sido previamente dimensionados.

FLDWAV: es una mejora de DAMBRK, anteriormente mencionado, que ofrece nuevas herramientas para la simulación de estructuras.

HEC-RAS es un software de gestión de sistemas hidráulicos de propósito general, desarrollado por el ejército de Estados Unidos que puede ser usado de manera interactiva en entornos multiusuario y multitarea. El software consta de una interfaz gráfica de usuario, de componentes separados de análisis hidráulico, de capacidad de almacenamiento de datos, generación de gráficos con los resultados y herramientas de reporting para mostrar dichos resultados de manera óptima. HEC-RAS realiza análisis de régimen permanente, de régimen transitorio, de transporte de sedimentos y de calidad del agua. Estos cuatro tipos de análisis, usan una representación geométrica de los datos común y también es común la rutina de cálculo geométrico e hidráulico que emplea. HEC-RAS es compatible con los sistemas GIS

(Geographical Information System).

Además, se ha desarrollado una potente base de datos llamada HEC-DSS (HEC Data Storage System) para el almacenamiento y recuperación de manera eficiente de datos científico estructurados de manera secuencial como, por ejemplo, series de datos temporales, curvas o datos en forma de texto. Se pueden programar interfaces con HEC-DSS en lenguajes de programación como C++, Visual Basic y Java. De esta manera, gracias a HEC-DSS se puede cargar e importar datos con diferentes formatos, exportarlos, crear gráficas a partir de ellos y manipularlos matemáticamente. HEC-DSS es compatible con Windows, Apple y con varias versiones de Linux y no es necesario pagar licencia para su uso.

Al software empleado en este proyecto, el software francés SIC, se le dedica el siguiente apartado.

2.4 HIPOTESIS

2.4.1.- HIPOTESIS GENERAL:

Hipótesis sustantiva (Hs)

La variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable

Hipótesis Nula (Ho)

La variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo no influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable.

2.4.2.-HIPOTESIS ESPECIFICO.-

Hs1: La variación de pendiente del canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Ho1: La variación de pendiente del canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Hs2: La variación de la tirantes en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Ho2: La variación de la tirantes en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Hs3: La variación de régimen de flujo en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Ho3: La variación de régimen de flujo en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Hs4: La variación de caudal en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

Ho4: La variación de caudal en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos.

2.5.- VARIABLES E INDICADORES

2.5.1.- VARIABLE INDEPENDIENTE:

- Pendiente.
- Tirante.
- Régimen de flujo.
- Caudal.

INDICADORES:

- Variación de sentido de flujo.
- Variación de velocidad (m/s).
- Variación de profundidad.(m)

2.5.2.- VARIABLE DEPENDIENTE:

- Fenómeno hidráulico.

INDICADORES:

- Cambio de velocidades.
- Oleajes.

2.6.- DISEÑO METODOLOGICO:

1. TIPO DE INVESTIGACION
 - Aplicada
2. NIVEL DE INVESTIGACION
 - Analítico
3. METODO
 - Descriptivo
 - Deductivo e Inductivo
 - Análisis y Síntesis
 - Comparativo
 - Interpretación
4. DISEÑO
 - Longitudinal.
5. UNIVERSO
 - Canal de pendiente variable.
6. MUESTRA
 - Caudal desde 5l/s hasta 25l/s.
- 7.-TAMAÑO DE LA MUESTRA
 - Siete metros de longitud y 0.25m de ancho de canal
- 8.- SELECCIÓN DE LA MUESTRA
 - No probabilístico de tipo Intencional por conveniencia.
9. TECNICAS RECOLECCION
 - Observacional
10. INSTRUMENTOS
 - Equipos y otros
 - Herramientas manuales
 - Etc.

2.7.- REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Montejo H. A., Análisis de perfil de flujo gradualmente variado en canales. Universidad Veracruzana, Chapingo. México, 2000.
- Espir Nureña J., Evaluación de fenómenos hidráulicos en el canal Chanquin del sistema de riego del valle de Virú primer tramo, Universidad Antenor Orrego, Trujillo, Perú, 2015.
- Jimenez Teran J., “Manual de apuntes de la experiencia educativa de tuberías y canales”, Mexico.
- Palomino Bendezú J.; “ Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto: construcción del canal principal de fortaleza, Distrito de Congas, Provincia de Ocos, Región de Anscach, Lima. 2003.
- Zamora Garcia S., Estudio Teórico-Experimental de algunos tipos de resalto hidráulico y curva de remanso, Colombia, 2004.
- Álvarez Romero A., “Modelado y Control de un Canal Hidráulico”, España, 2012.
- Universidad Nacional de Ingeniería, “Determinación del Salto Hidráulico”, Nicaragua, 1967
- Universidad Nacional de Ingeniería, “Perfiles de Flujo por el Método del Paso Directo”, Nicaragua, 1967

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: "EVALUACIÓN DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS Y MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL CON IBER EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE"

PROBLEMAS	OBJETIVOS	MARCO TEORICO	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGIA
<p>PRINCIPAL ¿ En qué medida la variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable?</p> <p>SECUNDARIOS 1.- ¿ Cómo, influiría la variación de pendiente del canal en la variación de fenómenos hidráulicos? 2.- ¿ Cómo influye la variación de la tirantes en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos? 3.- ¿Cómo influiría la variación de régimen de flujo en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos? 4.- ¿Cómo influiría la variación de caudal en un canal en la variación de fenómenos hidráulicos?</p>	<p>GENERAL Evaluar los fenómenos hidráulicos y análisis bidimensional con el software IBER.</p> <p>ESPECIFICOS 1.- Evaluar en qué medida la variación de pendiente del canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. 2.- Evaluar en qué medida la variación de la tirantes en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. 3.- Evaluar en qué medida la variación de régimen de flujo en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. 4.- Evaluar en qué medida la variación de caudal en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos.</p>	<p>BASES TEORICAS DE EROSION</p> <p>CONCEPTOS DE CANAL Son conductos abiertos destinados para transportar líquidos generalmente agua, La descripción del comportamiento hidráulico de los canales es una parte fundamental de la hidráulica y su diseño pertenece al campo de la ingeniería hidráulica.</p> <p>TIPOS DE FLUJO - Flujo uniforme. - Flujo no uniforme. *Flujo rápidamente variado. *Flujo gradualmente variado</p> <p>- Flujo permanente. - Flujo permanente. - Flujo No permanente.</p> <p>REGIMEN DE FLUJO - Flujo Sub Crítico: $Fr < 1$ - Flujo Super Crítico: $Fr > 1$ - Flujo Crítico: $Fr = 1$</p> <p>FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VARIACIÓN DE FENOMENOS HIDRÁULICOS - Variación de pendiente. - Variación de tirante. - Variación de régimen de flujo. - Variación de caudal.</p>	<p>GENERAL Hipótesis sustantiva (Hs) La variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable.</p> <p>Hipótesis Nula (Ho) La variación de pendiente, caudal, tirante y régimen de flujo no influye en los fenómenos hidráulicos de un canal de pendiente variable.</p> <p>ESPECÍFICOS Hs1: La variación de pendiente del canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Ho1: La variación de pendiente del canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Hs2: La variación de la tirantes en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Ho2: La variación de la tirantes en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Hs3: La variación de régimen de flujo en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Ho3: La variación de régimen de flujo en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Hs4: La variación de caudal en un canal influye en la variación de fenómenos hidráulicos. Ho4: La variación de caudal en un canal no influye en la variación de fenómenos hidráulicos.</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE: - Pendiente. - Tirante. - Régimen de flujo. - Caudal.</p> <p>INDICADORES: - Variación de sentido de flujo. - Variación de velocidad (m/s). - Variación de profundidad (m).</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE: Fenómeno hidráulico.</p> <p>INDICADORES: - Cambio de velocidades. - Oleajes.</p>	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN. - Aplicada</p> <p>METODO - Descriptivo. - Deductivo e inductivo. - Análisis y Síntesis. - Comparativo. - Interpretación.</p> <p>DISEÑO - Longitudinal</p> <p>MUESTRA Caudal desde 5l/s hasta 25l/s</p> <p>TAMAÑO DE MUESTRA 07 mt. de longitud de canal y 0.25m de ancho.</p> <p>TECNICAS - Observacional</p> <p>INSTRUMENTOS - Equipos y otros. - Herramientas manuales. - etc.</p>