

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE
HUAMANGA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD EN UN CANAL ABIERTO
MEDIANTE LAS ECUACIONES DE FACTOR DE FRICCIÓN
DE DARCY - WEISBACH, CHEZY Y MANNING –
AYACUCHO – 2016**

**TESIS PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGRÍCOLA**

**PRESENTADO POR:
MARCELINO, CRUZ FERNÁNDEZ**

**AYACUCHO - PERÚ
2016**

DEDICATORIA

A Dios: Con todo mi amor y cariño, ya que me dió la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa y porque él da la sabiduría, de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.

A mis padres: Genaro Cruz Quispe y Claudia Fernández Gonzales, porque ellos han estado en todo momento y por creer en mí, gracias.

A mi esposa e hijo: Rocio y Christopher que son el amor de mi vida y a la vez mi fuente de energía inagotable para el logro de mis objetivos.

A mis hermanos: Lucia, Alipio, Leandro y Gregorio, gracias por su apoyo en todo momento y que mi triunfo les sirva, de satisfacción para seguir adelante.

A mis familiares: tíos, primos, sobrinos y suegro(a), aunque no mencione el nombre de cada uno de ustedes, gracias por su ayuda y apoyo incondicional en todo momento.

A mis amigos: Igual los quisiera mencionar a todos, pero ustedes saben que les agradezco su amistad y compañía.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por darme la oportunidad de ser un profesional que contribuya al engrandecimiento de nuestra región y la nación.

La Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarlos conocimientos necesarios en mi formación profesional y así mismo para aplicarlos en la realización de este trabajo, también mi reconocimiento especial hacia su personal docente, en especial a mi asesor Ing. Leónidas Arias Baltazar.

Sin olvidar, a todas aquellas personas que de una u otra forma han compartido mi vida durante el transcurso de estos últimos años, mi más sincero agradecimiento a su comprensión, estímulo y ayuda, ya que a todos son parte de mi vida.

INDICE

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE	iii
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCION	1
I. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. DEFINICIONES DE TERMINOS	4
1.3. FUNDAMENTO TEÓRICO	5
1.3.1. Tipos de Canales	5
1.3.2. Elementos Geométricos de la sección de un canal	6
1.3.3. Características geométricas de los canales abiertos	7
1.3.4. Tipos de flujo en canales	10
1.3.5. Flujo en canales abiertos	11
1.3.6. Flujo uniforme	11
1.3.7. Fuerzas que intervienen en un canal abierto	12
1.3.8. Capa límite y rugosidad superficial	12
1.3.9. Concepto de distribución de velocidades	14
1.3.10. Medición de la Velocidad	16
1.3.11. Cálculo de errores: Error Absoluto, Error Relativo	20
1.3.12. Pérdidas de energía debido a fricción	20
1.3.13. Factor de fricción en canales rugosos	22
1.3.14. Ecuación de Darcy – Weisbach	26
1.3.15. Ecuación de Chezy	27
1.3.16. Ecuación de Manning.	28
II. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	31

2.1.1. Ubicación Política.....	31
2.1.2. Ubicación Geográfica	33
2.2. MATERIALES Y EQUIPOS	34
2.2.1. Materiales	34
2.2.2. Equipos.....	34
2.3. MÉTODOS.....	35
2.3.1. Fase de campo.....	35
2.3.2. Fase de Gabinete.....	37
III. RESULTADOS.....	40
3.1. Medición de la velocidad superficial, media y la pendiente.....	40
3.2. Cálculo de la variación de la velocidad en el canal abierto.....	49
3.3. Cálculo del error relativo de la velocidad	51
IV. DISCUSIÓN	53
V. CONCLUSIONES.....	57
VI. RECOMENDACIÓN.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXO	63

INDICE DE TABLAS

Tabla	1.1.	Elementos geométricos del perfil transversal de un canal...	09
Tabla	1.2.	Factor de corrección de la velocidad (K)	18
Tabla	1.3.	Coeficientes α , a, c	24
Tabla	1.4.	Rugosidad equivalente en las paredes de un canal abierto...	25
Tabla	1.5.	Valores del coeficiente “n” en la ecuación de Manning	30
Tabla	3.1.	Resultados de aforamiento método del flotador.....	41
Tabla	3.2.	Resultados de aforamiento con el método del correntómetro	43
Tabla	3.3.	Resultados de medición de la sección del canal.....	45
Tabla	3.4.	Resultados de la nivelación geométrica del canal abierto...	47
Tabla	3.5.	Resultados de la velocidad superficial y media.....	48
Tabla	3.6.	Resultado de resistencia al flujo en canales.....	49
Tabla	3.7.	Resultados de la evaluación de la velocidad del canal abierto.....	50
Tabla	3.8.	Resultados de evaluación del error relativo de la velocidad.	51

INDICE DE FIGURAS

Figura	1.1.	Canal de sección trapecial.....	06
Figura	1.2.	Elementos geométricos del perfil longitudinal de un canal.....	07
Figura	1.3.	Elementos geométricos de la sección transversal de un canal.....	08
Figura	1.4.	Perfil longitudinal de una canal con flujo uniforme.....	11
Figura	1.5.	Formación de la capa limite.....	13
Figura	1.6.	Distribución bidimensional de velocidades.....	15
Figura	1.7.	Distribución bidimensional de velocidades.....	16
Figura	1.8.	Trayectoria de los flotadores en una distancia recorrida	17
Figura	1.9.	Correntómetro.....	19
Figura	1.10.	Rugosidad de pared de conducto.....	22
Figura	1.11.	Perfil longitudinal de una canal con flujo uniforme.....	27
Figura	2.1.	Ubicación nacional, regional y distrital.....	32
Figura	2.2.	Ubicación del proyecto en imagen satelital I.....	32
Figura	2.3.	Ubicación del proyecto en imagen satelital II.....	33
Figura	2.4.	Nivelación geométrica.....	37
Figura	3.1.	Medición de la distancia y aforamiento por el método flotador.....	40
Figura	3.2.	Medición de la velocidad con el método correntómetro ...	42
Figura	3.3.	Medición de la sección del canal abierto	44
Figura	3.4.	Nivelación topográfico del canal abierto	46
Figura	3.5.	Variación de velocidades del canal abierto	51
Figura	3.6.	Variación del error relativo de la velocidad	52
Figura	4.1	Comparación de velocidades en un canal abierto	54
Figura	4.2	Comparación de error relativo en un canal abierto	55

RESUMEN

En la investigación se estableció una comparación de las variación de la velocidad del agua de un canal abierto, considerando las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, con la finalidad de analizar y plasmar las velocidad superficial, media y el error relativo de la velocidad, mediante la evaluación de la variación de la velocidad y poder tener elementos de juicio claro sobre las velocidades en un canal abierto. La presente investigación es de nivel correlativo, tipifica como demostrar las variaciones de la velocidad del flujo del canal abierto, que se ve afectado por fuerzas contrarias a su movimiento, una de éstas es la fuerza de fricción ocasionada por el roce entre el fluido con la superficie del objeto que transporta dicho flujo, que dependen principalmente del tipo de material del canal abierto; el área de estudio de esta investigación son las localidades Carmen Alto (Yanama y Quicapata), Jesús Nazareno (Viña Chiquita y Muyurina), en el cual se hace énfasis la determinación de la evaluación de la velocidad del agua en una canal abierto artificial de concreto y tierra de diferentes secciones, obteniendo de esta manera el error relativo de la velocidades $E_{m\%}=12.88$, $E_{c\%}=20.28$, $E_{f\%}=5.39$, por tanto podemos manifestar la importancia de la utilidad del factor de fricción de Darcy-Weisbach por lo que es dimensionalmente homogénea, por lo cual brinda menor error relativo a diferencia de las ecuaciones de velocidad de Manning y Chezy que son expresiones significativos con inconvenientes de tener un origen totalmente empírico y de no poseer homogeneidad dimensional, por tal motivo la efectividad de resultados que se muestran.

INTRODUCCION

La infraestructura de un país es la base de su desarrollo, particularmente las obras hidráulicas permiten la dotación de agua para la agricultura y por ende la actividad económica, cultural, etc. En este contexto, los canales son una parte sustancial, ya que constituyen la línea de conducción del agua. A pesar de la importancia que pueda tener un canal, en el mundo, se siguen registrando fallas, por ende es necesario replantear la ingeniería aplicada al diseño de estas estructuras, por lo que es importante en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga implementar trabajos de tesis en la evaluación de la velocidad para que permitan una mejor profundización en esta rama.

Para el diseño y dimensionamiento del canal a superficie libre se han utilizado por muchos años ecuaciones de flujo uniforme. Estas ecuaciones de velocidades son generalmente de fácil implementación e intentan relacionar la velocidad de flujo con otras variables geométricas e hidráulicas. Dentro de esas variables, es frecuente encontrar una que tiene en cuenta el llamado coeficiente de resistencia. Las ecuaciones que son comúnmente usadas involucran coeficientes como el de Manning (n), el de Chézy (C) y el factor de fricción (f). Para calcular estas velocidades es necesario medir la distancia recorrida, tiempo, la pendiente, la altura de la lámina de agua, base y la temperatura, para así llegar a la determinación de las velocidades anteriormente nombrados. (Riveros, 2004)

El trabajo de tesis investiga la diferencia que hay entre los datos de velocidad de un canal abierto determinados utilizando el factor de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning. Considerando que la velocidad en un canal abierto es un tema amplio que comprende el análisis de datos teóricos y experimentales, los cuales cambian de acuerdo a las condiciones y características específicas del canal a estudiar. El flujo en canales abiertos, se ve afectado por fuerzas contrarias a su movimiento, una de éstas es la fuerza de fricción ocasionada por el roce entre el fluido con la superficie del objeto que transporta dicho flujo. Dicha fuerza se representa con un factor de fricción, en esta ocasión el desarrollado por

Darcy – Weisbach y el de Manning, que dependen principalmente del tipo de material del canal abierto que contiene el fluido y la velocidad propia del flujo. (Bustos & Montoya, 2015)

En la presente investigación tuvo como objetivo, evaluar la variación de la velocidad del agua de un canal abierto considerando las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, para obtener la velocidad media, real y el error relativo de la velocidad en diferentes secciones y materiales, basándose en los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la velocidad superficial, velocidad media y pendiente de un canal abierto para diferentes secciones, empleando los materiales más usados en la construcción.
- Determinar la variación de la velocidad del agua considerando las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning en un canal abierto, empleando los materiales comúnmente usados en la construcción y diferentes secciones.
- Calcular el error relativo de velocidad del agua considerando las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, en un canal abierto, con respecto a la velocidad media.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. ANTECEDENTES

Todos los trabajos internacionales, nacionales y regionales son frecuentes, que en el caso de canales, tanto naturales, como artificiales, existan variación de valores de velocidad con las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning y de acuerdo al coeficiente de rugosidad a lo largo del perímetro de la sección transversa y de acuerdo al tipo de estructura del canal:

(Bustos & Montoya, 2015) Indican que la diferencia que hay entre los datos de velocidad de un canal abierto determinados utilizando el factor de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning, considerando que la velocidad en un canal abierto es un tema amplio que comprende el análisis de datos teóricos y experimentales, los cuales cambian de acuerdo a las condiciones y características específicas del canal a estudiar.

Muchos investigadores como (Keulegan, 1938; Zegzhda, 1938; Rouse, 1946; Thijsse, 1949; Sayre y Albertson, 1961; Reinius, y Graf, por mencionar sólo algunos) han destinado sus esfuerzos a desarrollar expresiones para el factor de fricción adimensional, f , que aparece en la fórmula de Darcy-Weisbach, aplicable a flujo en canales.

(French, 1985) Menciona que la fórmula de Manning es quizá la más ampliamente utilizada para estimar la resistencia al flujo en canales. Uno de los principales inconvenientes que exhibe dicha expresión es que no es dimensionalmente homogénea. En efecto, es común que la ecuación de Manning, para evaluar la resistencia al flujo en escurrimiento uniforme en canales abiertos.

(Srupczewski & Szymkiewicz, 1986) Manifiesta que la resistencia al flujo resulta de gran importancia en hidráulica de canales abiertos. En términos prácticos, es un proceso físico complejo que está representado por un coeficiente de resistencia, como se muestra en formula de Chézy. Aun cuando la formula ha sido validada en las aplicaciones prácticas en las últimas décadas, su validez no ha sido cuestionada. En efecto, la limitación básica de la formula se debe a que ella es dimensionalmente no homogénea y no tiene en cuenta las propiedades de flujo

1.2. DEFINICIONES DE TERMINOS

- **Velocidad.** Es el vector cuyo valor es igual al espacio recorrido por una partícula fluida en la unidad de tiempo ($V = e/t$). (Cadavid, 2006)
- **Canal abierto.** Es una estructura hidráulica, en las que presenta una superficie líquida sobre la que actúa la presión atmosférica. El canal es toda conducción abierta o cerrada, que exhibe un funcionamiento de flujo a superficie libre. (Cadavid, 2006)
- **Coefficiente de rugosidad.** Medida numérica de la resistencia a la fricción de un fluido en un conducto. (Sotelo, 2002)
- **Flujo uniforme.** Las características y parámetros hidráulicos del flujo permanecen constantes a lo largo del canal. (Sotelo, 2002)
- **Flujo permanente.** Las características y parámetros hidráulicos del flujo permanecen constantes en el tiempo. (Sotelo, 2002)
- **Hidráulica.** Ciencia aplicada que estudia el movimiento del agua especialmente en tuberías, canales, estructuras y el suelo.
- **Número de Reynolds.** Número adimensional que representa el efecto de la viscosidad en relación con la inercia del flujo. (Urrutia, 1992)
- **Pérdida de energía.** Es la energía consumida tras vencer las resistencias al flujo causadas por la fricción entre partículas de fluido y la fricción entre las paredes del canal y el fluido. (Sotelo, 2002)
- **Régimen.** Modelo general de variación alrededor de una condición media. (Sotelo, 2002)

- **Régimen de flujo turbulento.** Las fuerzas viscosas son débiles en comparación a las fuerzas inerciales, en el flujo turbulento el fluido se mueve en trayectorias irregulares. (Sotelo, 2002)
- **Sección transversal.** Diagrama a través de un cauce que ilustra las bancas, el lecho y la superficie de agua. (Sotelo, 2002)
- **Fórmula de Chezy.** Rige para el flujo permanente y uniforme, turbulento, en tuberías y canales. (Chereque, 2004)
- **Fórmula de Manning.** Es una fórmula empírica que rige para el flujo permanente y uniforme, turbulento, en tuberías y canales. (Chereque, 2004)
- **Factor de fricción (f).** Es un número adimensional consistente con cualquier sistema de unidades. (Saldarriaga, 2007)

1.3. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.3.1. Tipos de Canales

a. Canales Naturales

Se denomina canal natural a las depresiones naturales en la corteza terrestre, que en algunos tienen poca profundidad y otros son más profundos, según se encuentren en la montaña o en la planicie. Tienen sección transversal irregular y variable. Su lecho está constituido de partículas sólidas en movimiento (limo, arenas, piedras, etc), por lo que se le denomina lecho móvil. Su estudio corresponde a la hidráulica fluvial. Algunos canales permiten la navegación, generalmente sin necesidad de dragado. Pueden ser: los ríos, riachuelos o arroyos, etc. (Cadavid, 2006)

b. Canales artificiales

Los canales artificiales son aquellos en la que interviene en su construcción la acción creadora del hombre. Tiene sección transversal regular y su alineamiento es recto razón por la cual se denominan prismáticos.

La fuerza que se opone al flujo del agua es la fuerza de rozamiento, la cual es función de la resistencia que presenta el perímetro mojado que depende a su vez de la naturaleza y tipo de material que constituye el fondo y las paredes del canal.

Los canales pueden ser sin revestimiento y revestidos, como los canales construidos en tierra, en roca y revestidos con un material que ofrece menos fricción al desplazamiento del fluido y al mismo tiempo impide las pérdidas de filtración y protección contra la erosión y mayor eficiencia de conducción y tiene un período de funcionamiento de larga vida útil. Como canales sin revestimiento (canales de tierra), se tienen las acequias de distribución que riegan las tierras de cultivo a nivel de parcelas. (Cadavid, 2006)

1.3.2. Elementos Geométricos de la sección de un canal

Los elementos Geométricos de un canal de sección trapezoidal se indican se indican en la siguiente figura:

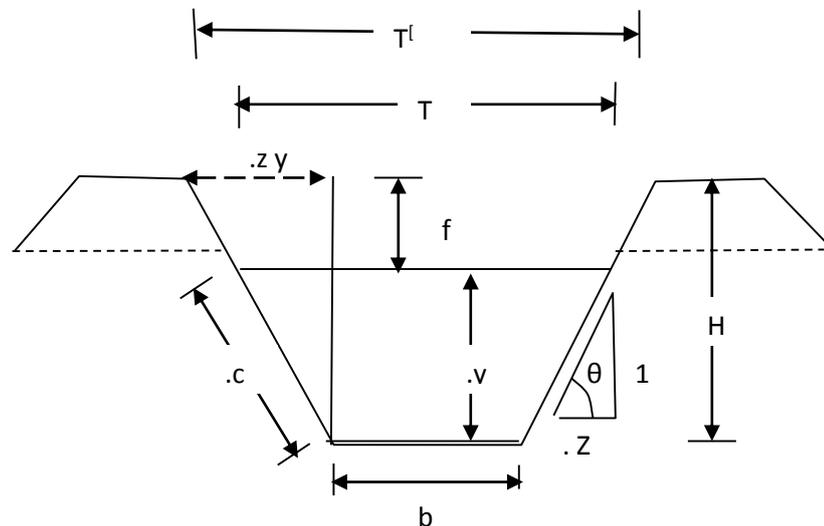


Figura 1.1: Canal de sección trapezoidal

Donde:

y: Denominado tirante de agua. Es la profundidad máxima del agua en el canal. La medida adimensional es (L).

b: Ancho de la plantilla o ancho de la solera o base del canal. La ecuación dimensional es (L).

T=B: Espejo de agua o base superior del canal; conocido como ancho de la superficie libre del agua. La ecuación dimensional es (L).

H: Altura del canal después de añadido el espacio libre.

H-y = BI : Borde libre. Es la altura vertical entre el punto más alto de la pared del canal, con respecto al nivel del agua. Funciona cuando por alguna razón existe una alteración en el nivel del agua al elevarse por la crecida.

z : Es la relación existente de la proyección horizontal sobre la vertical. Se le ha denominado talud hidráulico.

e: Angulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal.

c: Lados sumergidos del canal

T': Anchura máxima del canal

1.3.3. Características geométricas de los canales abiertos

Las características geométricas de los canales abiertos deben ser analizadas de dos formas en la misma dirección del flujo o sentido longitudinal y en forma ortogonal al flujo o sentido transversal.

a. Sentido longitudinal

En canales artificiales o naturales se poseen las mismas consideraciones para el análisis geométrico en el sentido longitudinal. Los componentes geométricos son la longitud del canal, la pendiente y la altura de lámina de agua, estos se observan en la figura 1.2.

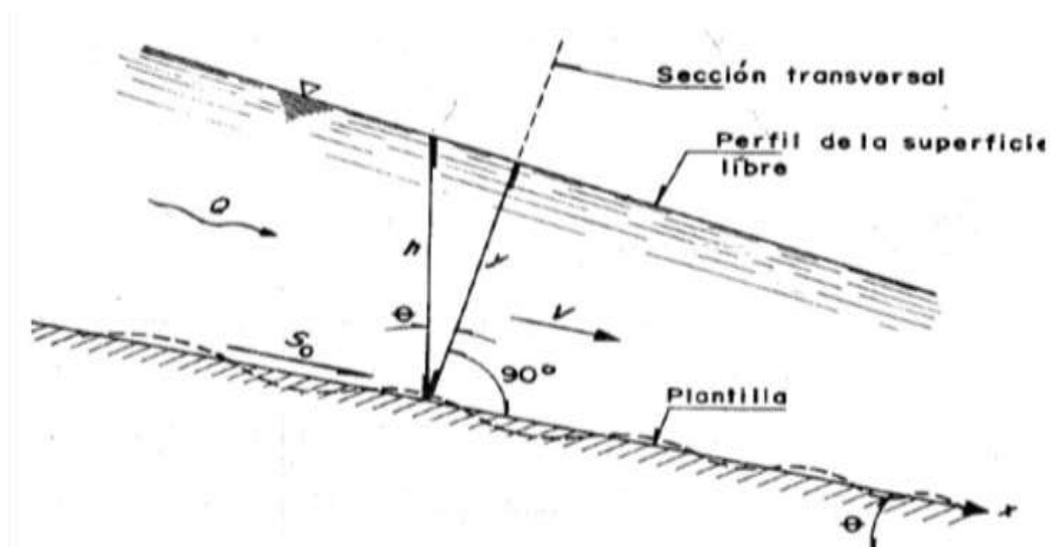


Figura 1.2: Elementos geométricos del perfil longitudinal de un canal (Sotelo, 2002)

La longitud del canal se denota como “L”, y este puede ser la longitud total o la longitud de un tramo a analizar.

La pendiente se representa como “S”, y es la relación entre el desnivel dos puntos de la superficie del canal y la longitud del canal.

La altura de lámina de agua se simboliza como “y”, y es la distancia ortogonal entre un punto de la superficie del canal, generalmente el más bajo, y la superficie libre del fluido.

Estos valores harán parte de las variables iniciales que se deben introducir por el usuario en la aplicación a desarrollar con el fin de calcular la velocidad (Sotelo, 2002).

b. Sentido transversal

Aunque las secciones transversales de canales naturales y artificiales difieren en gran medida, esto debido a que los primeros son irregulares y se mueven constantemente de sitio en cambio los segundos poseen formas regulares y por lo general comunes, como rectángulos, circunferencias, triángulos, trapecios o formas compuestas por la fusión de algunos de estos, como también las secciones transversales de los canales artificiales son estáticas y solo se modifican mediante la intervención humana.

Aun así se utiliza un mismo sistema de análisis para el componente geométricos del sentido transversal, siendo estos componentes el tirante, el área húmeda, el perímetro húmedo, el radio hidráulico, talud, la altura de lámina de agua, el ancho de canal y la altura libre, estos se observan en la figura 1.3.

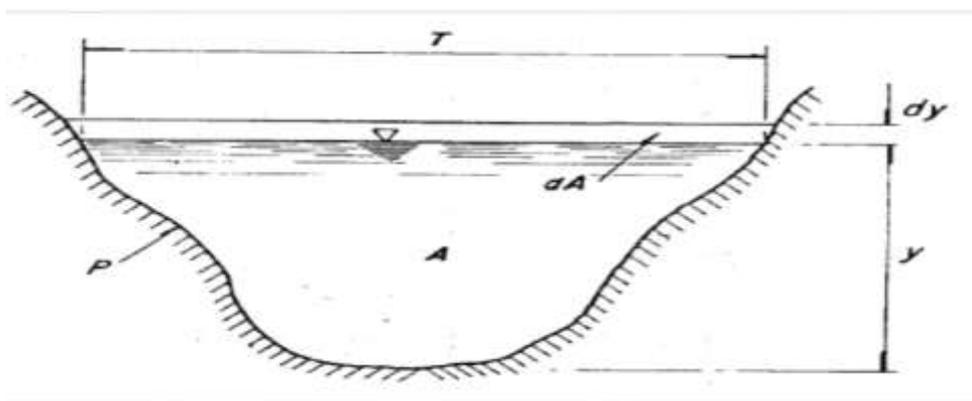


Figura 1.3: Elementos geométricos de la sección transversal de un canal (Sotelo, 2002)

El ancho de superficie libre representado como T, es la longitud horizontal de la superficie libre del fluido en el sentido transversal.

El área húmeda representada como A, es el área del fluido en el sentido transversal. El perímetro húmedo representado como P, es la longitud del perímetro de la superficie del canal que está en contacto con el fluido en el sentido transversal.

El radio hidráulico representado como R, es la relación entre el área húmeda y el perímetro húmedo, como se ve en la ecuación 1.1 también el diámetro hidráulico representado como D, es cuatro veces el radio hidráulico, como se ve en la ecuación 1.2.

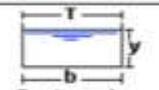
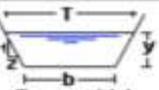
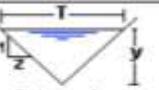
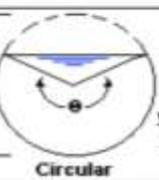
$$Rh = \frac{A}{P} \quad (1.1)$$

$$D = 4 * Rh \quad (1.2)$$

El talud se representa como la relación Z: 1 y designa la inclinación de las paredes de la sección del canal donde Z es la altura de la pared a una distancia de una unidad.

El ancho del canal se representa como “b”, y es el ancho de la sección transversal del canal.

Tabla 1.1: Elementos geométricos del perfil transversal de un canal

Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$\frac{2}{3} Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Villón, 2007

1.3.4. Tipos de flujo en canales

El flujo en un canal se clasifica por diferentes criterios, entre los cuales se destacan el tiempo y espacio, régimen de flujo y la gravedad.

a. Tiempo y espacio

El flujo se clasifica con respecto al tiempo como:

- Flujo Permanente: la profundidad “y” no varía con respecto al tiempo en una determinada sección del canal. ($ay/at=0$)
- Flujo No-Permanente: la profundidad “y” varía con respecto al tiempo en una determinada sección del canal. ($ay/at\neq 0$)

El flujo se clasifica con respecto al espacio como:

- Flujo Uniforme: la profundidad “y” permanece constante a lo largo de un tramo L de canal. ($ay/aL=0$)
- Flujo No-Uniforme: la profundidad “y” varía a lo largo de un tramo L de canal. ($ay/aL\neq 0$)

b. Régimen de flujo

El número de Reynolds es un valor exclusivo utilizado para caracterizar el flujo que se genera en tuberías, para poder aplicarlo a un flujo en canal abierto es necesario realizar algunas adecuaciones. Para ello es necesario considerar, en lugar del diámetro de la tubería, el radio hidráulico de la sección en la cual fluye el gasto:

$$Re = \frac{V * Rh}{\nu} \quad (1.3)$$

- V: Velocidad del fluido en m
- Rh: Radio Hidráulico en m
- ν : viscosidad cinemática del fluido en m^2/s
- Re: Número de Reynolds

Dónde:

- Laminar $Re < 500$
- Transición $500 \leq Re \leq 2000$
- Turbulento $Re \geq 2000$

1.3.5. Flujo en canales abiertos

Un canal abierto es un conducto artificial o natural destinado para transportar fluidos, generalmente agua, que posee una superficie libre, es decir, que no está en contacto directo con la superficie del canal.

Los canales naturales son formaciones que se han creado a través del tiempo por el movimiento del agua sobre el terreno natural creando secciones transversales irregulares con formas y dimensiones que varían con el tiempo. Entre ellos podemos encontrar los ríos, arroyos, entre otros. “Los canales artificiales tienen, por lo general, secciones geométricas de forma y dimensiones constantes en tramos más o menos largos”. (Sotelo, 2002) Siendo estos construidos por el hombre con diferentes aplicaciones como lo son los sistemas de riego, conducción de aguas servidas, conducción de aguas lluvias, drenajes, sistemas para generar energía, conducciones, entre otros.

1.3.6. Flujo uniforme

El flujo uniforme es aquel cuyas propiedades y características hidráulicas no cambian con respecto al espacio y el tiempo, además en este la línea de energía, a superficie libre de agua y el fondo del canal son paralelos.

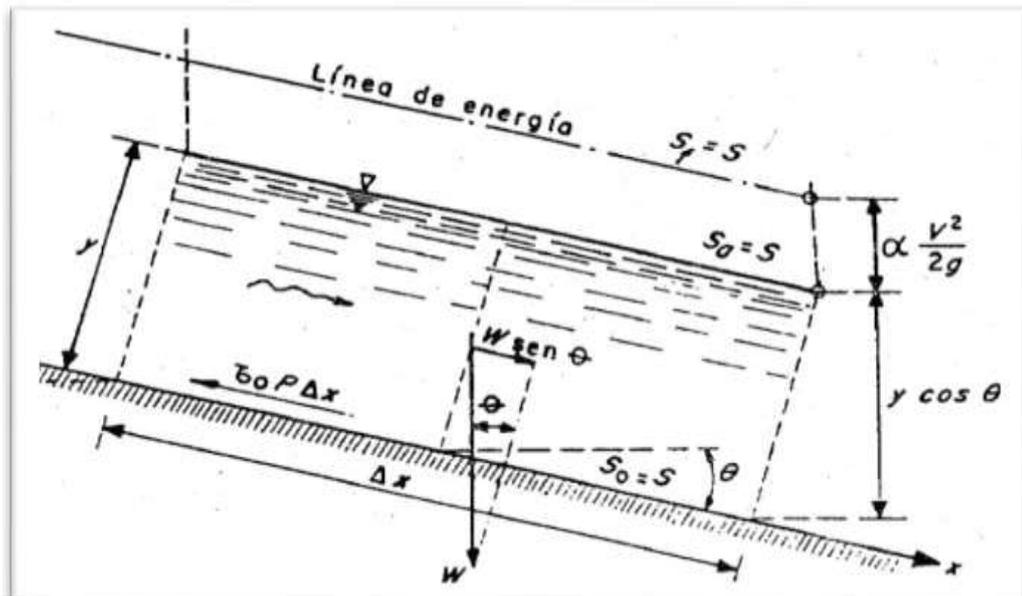


Figura 1.4: perfil longitudinal de un canal con flujo uniforme (Sotelo, 2002)

Este tipo de flujo pocas veces se da en canales naturales debido a que no son prismáticos y por ende las secciones del canal son diferentes en

distintos puntos longitudinales, lo que hace que el flujo en corrientes naturales casi nunca alcanza una condición de uniformidad.

El flujo uniforme puede ser turbulento o laminar, dependiendo de la dimensión del canal, de la velocidad del flujo y de factores secundarios como el viento. Hay que tener en cuenta que para que un flujo sea uniforme “es necesario que exista un balance dinámico entre el componente de la fuerza de peso en la dirección del flujo y la de la fricción”. (Sotelo, 2002)

1.3.7. Fuerzas que intervienen en un canal abierto

A diferencia de lo que sucede en un sistema a presión, que sucede cuando un fluido llena el área de la sección que lo contiene, en un canal abierto la principal razón de la existencia de flujo es a causa de la fuerza de gravedad y por ende el fluido llena parcialmente el área de la sección que lo contiene generando una superficie libre, motivo por el cual interviene en el análisis la presión atmosférica, que era descartada en el estudio de sistemas a presión.

“La superficie libre se considera como la intercara entre dos fluidos: el superior, que es aire estacionario o en movimiento, y el inferior, que usualmente es agua en movimiento. Las fuerzas de gravedad y de tensión superficial resisten cualquier fuerza tendiente a distorsionar la intercara”. (Sotelo, 2002)

Las fuerzas que intervienen en el flujo de un canal abierto son:

- La fuerza de gravedad
- La fuerza de rozamiento o fricción entre el fluido y la superficie del canal
- La fuerza por la viscosidad del fluido
- La fuerza de tensión superficial
- Las fuerzas ocasionadas por el arrastre de sedimentos

Cabe anotar que no es posible realizar un análisis real de todas estas fuerzas, sino que más bien el análisis de estas se realiza por medio de la generalización y simplificación de ellas.

1.3.8. Capa límite y rugosidad superficial

Hay que partir del principio que establece que la velocidad de las partículas en contacto con alguna superficie de un canal es cero. “Esto significa que

el perfil de distribución de la velocidad de cualquier flujo sobre dicha frontera es el resultado de que la fuerza de fricción, generada sobre la frontera, ejerce su influencia hacia el interior del flujo”. (Sotelo, 2002)

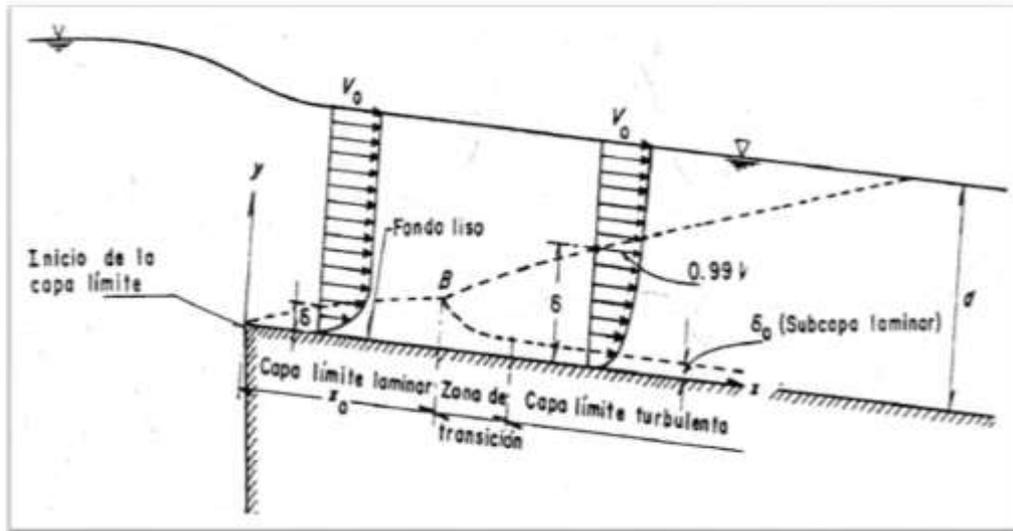


Figura 1.5: formación de la capa limite (Sotelo, 2002)

La capa límite de un fluido se define como el sector o la zona donde el movimiento es perturbado por el contacto de una superficie solida con las partículas del fluido.

En la figura 1.5 se identifica un flujo sobre una superficie lisa y plana, el cual tiene una velocidad uniforme fuera de la capa límite.

El ancho “ δ ” de esta capa límite depende de V_0 , ρ , μ y X que representa la distancia desde el extremo inicial de la capa límite, ver figura 1.5.

Ahora bien la capa limite se puede dividir en tres sectores capa limite laminar, zona de transición y capa limite turbulenta.

En la capa limite laminar él espesor se determina de acuerdo a la solución de Blasius, la cual se expresa como:

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{NR}} \quad (1.4)$$

Donde:

$$NR = \frac{\rho V_0 x}{\mu} = \frac{V_0 x}{\nu}$$

Es el número de Reynolds basado en la distancia longitudinal X y $\nu = \mu/\rho$ A medida que la capa limite laminar aumenta su espesor se torna inestable y

se convierte en una capa límite turbulenta, en la cual se toman las mismas consideraciones para el cálculo del espesor “ δ ”.

$$\delta = \frac{0.37x}{NR^{0.2}} \quad (1.5)$$

Es común ver que distintas capas límites turbulentas crezcan dentro de otras lo que hace que se intersecten con la superficie libre, quedando así el tirante como el espesor de la capa límite turbulenta.

Los canales pueden tener superficies rugosas o lisas, siendo la primera de estas la más usual. Ahora bien si la rugosidad de una determinada superficie es totalmente cubierta por la subcapa laminar, la superficie se comportará como hidráulicamente lisa, lo contrario pasa cuando la rugosidad se proyecta más allá de la subcapa laminar, en este caso la superficie se comporta como hidráulicamente rugosa afectando al flujo fuera de la subcapa.

“Utilizando superficies planas y tubos, Schlichting, en 1968, determinó los criterios para clasificar el comportamiento hidráulico de la frontera rugosa de la siguiente manera”. (Sotelo, 2002)

➤ Hidráulicamente lisa cuando:

$$0 < \frac{VK_s}{\nu} \leq 5$$

• Hidráulicamente de transición cuando:

$$5 < \frac{VK_s}{\nu} \leq 70$$

• Hidráulicamente rugosa cuando:

$$\frac{VK_s}{\nu} > 70$$

Dónde:

- V: velocidad de fricción
- Ks: rugosidad absoluta

1.3.9. Concepto de distribución de velocidades

En canales y en cauces naturales, el flujo del agua es evidentemente tridimensional para cada punto de la corriente es decir, el vector velocidad tiene componentes en las tres direcciones (X, Y, Z). Para hacer un análisis

de la variación de velocidades en una sección cualquiera, deberemos tomar muy en cuenta la forma de la sección transversal, pues la naturaleza y características geométricas del contorno definen básicamente la curva de distribución de velocidades. (Rocha, 2007)

En términos de análisis, consideramos el caso más simple en el que se supone un ancho infinito y que solo se tiene influencia por el fondo del cauce, por lo que el flujo es analizado de la siguiente manera. En cada punto de la sección transversal hay una velocidad particular (V_h). La velocidad es máxima en la superficie, en el fondo la velocidad es mínima y tiene una distribución como se muestra en la figura 1.6.

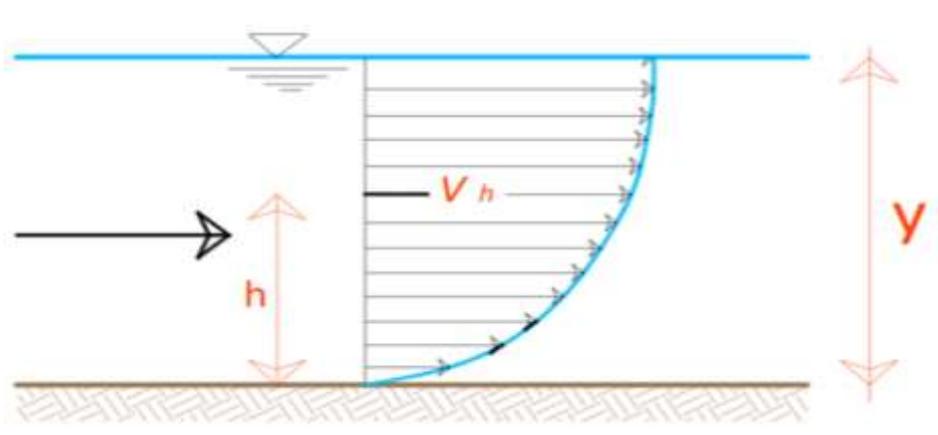


Figura N° 1.6: Distribución bidimensional de velocidades (Rocha, 2007)

Sin embargo, si tomamos en cuenta otros factores que inciden en la distribución de velocidades, como lo es la fricción que existe entre el agua y el aire- ya que generalmente el aire es un fluido estacionario y que está en contacto con el agua en movimiento, la geometría o configuración del fondo y taludes de la sección transversal, la rugosidad superficial; el gasto, la acción de corrientes que contribuyen de manera lateral con gasto al cauce principal o bien obstáculos interpuestos en la corriente afectan la distribución típica de velocidades de la sección transversal de un río natural, teniéndose una distribución más compleja, la más simple puede ser similar a la de la figura 1.7; donde la distribución de velocidades es representada por medio de las isotacas que indican velocidad de igual magnitud. (Sotelo, 1993)

Estas curvas son obtenidas a partir de datos medidos en campo en la sección transversal de interés. La recolección de datos es por medio de molinetes o velocímetros electrónicos en puntos específicos; hacemos una interpolación entre puntos tal como se hace para obtener las curvas de nivel en topografía.

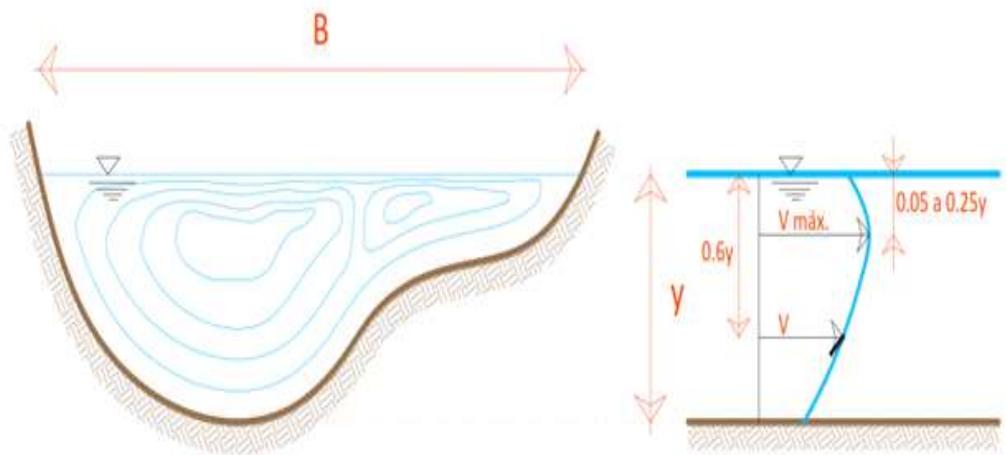


Figura N° 1.7: Distribución bidimensional de velocidades (Sotelo, 1993)

1.3.10. Medición de la Velocidad

a. Método Flotador

Este método se utiliza cuando no se dispone de equipos de medición; para medir la velocidad del agua, se usa un flotador con el que se mide la velocidad superficial del agua; pudiendo utilizarse como flotador, un pequeño pedazo de madera, corcho, una pequeña botella lastrada.

El método del flotador se utiliza en los canales y acequias y da solo una medida aproximada de los caudales. Su uso es limitado debido a que los valores que se obtienen son los estimados de caudal siendo necesario el uso de otros métodos cuando se requiere una mayor precisión. (Mendieta, 2014) En este método, de igual manera, se utilizan los valores promedio de las variables determinadas.

1. Selección del tramo recto:

- Se escoge el tramo recto "A" y "B", este lugar debe ser el adecuado, puede coincidir con la sección transversal en donde el agua fluya

naturalmente, en lo posible que no existan piedras obstáculos.
(Chamorro, 2011)

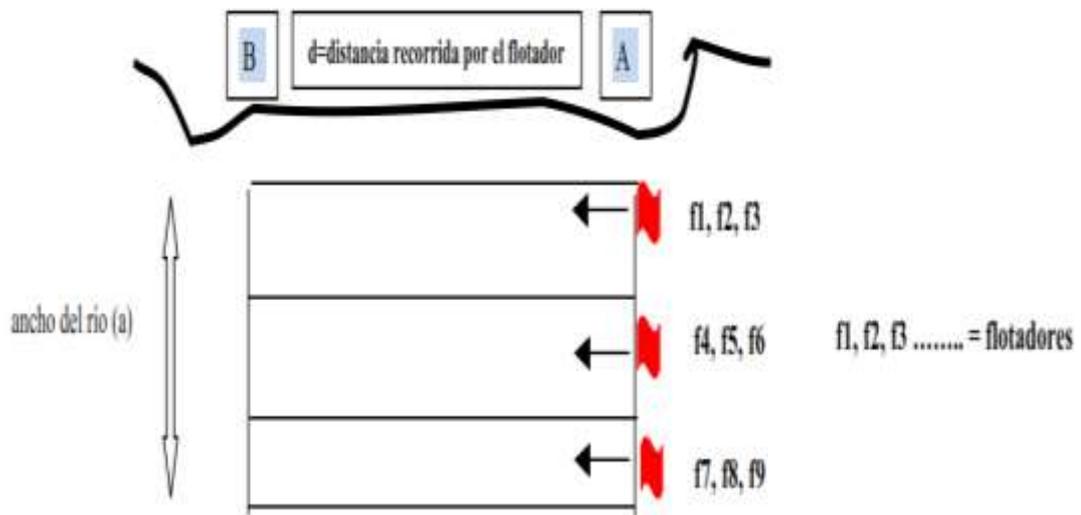


Figura 1.8: Trayectoria de los flotadores en una distancia recorrida (Chamorro, 2011)

2. Obtención del tiempo promedio en segundos : t_p (s)

- Para el cálculo del tiempo que demoran los flotadores de llegar de A hasta B, se requiere del cronómetro, calculadora y tabla de registro.
- Se deben lanzar como mínimo 3 flotadores hacia la margen derecha, 3 en el centro y 3 en la margen izquierda de la sección del río. El número de flotadores que se utilice para el aforo se realice en un tiempo tal que no se produzcan variaciones superiores a 1 cm entre el nivel de agua al inicio y al final del aforo.
- Se lanzará cada uno de los flotadores (f), antes de pasar por el punto A con la finalidad de que cada flotador alcance una velocidad constante y se establezca su trayectoria.
- El tiempo promedio es igual, a la suma del tiempo que se demora cada flotador, y se divide entre el número de los flotadores, en este caso entre 9.
- Es importante medir los tiempos con la mayor exactitud posible.
- Cuando se observe vientos fuertes no realizar el aforo para que los flotadores no desvíen su trayectoria.

3. Cálculo de la velocidad Superficial: V (m/s)

$$V = d / t \quad (1.6)$$

V: velocidad (m/s)

d: distancia recorrida del flotador desde A hasta B (m)

tp: es el tiempo promedio que recorre los flotadores desde A hasta B (s)

4. Cálculo de la velocidad media en la vertical: (Vm)

Este valor es la velocidad corregida del flujo de agua en cada sección y es igual a la velocidad del flotador o superficial (Vs) multiplicada por un coeficiente que existe entre la velocidad media de la sección y la superficial, para los diferentes tipos de canales y cauces. (Chamorro, 2011)

$$V = K \times (d/t) \quad (1.7)$$

K : Factor de corrección

V : Velocidad (m / s)

d : Espacio recorrido por el flotador (m)

t : Tiempo de recorrido del espacio «e» por el flotador (s)

Tabla 1.2: Factor de corrección de la velocidad (K)

Tipo de Canal o Río	Factor K
Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.80
Canal de tierra, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.70
Río o riachuelo, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.50
Río o canales de tierra, profundidades menores a 15 cm	0.25-0.50

Fuente: Mendieta, 2014

b. Método del correntómetro

En este método la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado correntómetro que mide la velocidad en un punto dado de la masa de agua. Existen varios tipos de correntómetros, siendo los más empleados los de hélice de los cuales hay de varios tamaños; cuando más grandes sean los caudales o más altas sean las velocidades, mayor debe ser el

tamaño del aparato. Cada correntómetro debe tener un certificado de calibración en el que figura la fórmula para calcular la velocidad sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo (Mendieta, 2014).

El método del correntómetro o del molinete hidráulico, está constituido por una rueda con aspas que gira al ser sumergido en una corriente de agua, pueden ser de dos formas:

- Molinete de cazoletas
- Molinete de hélices

Para medir la velocidad de una corriente lo recomendable es instalar el molinete debajo del espejo de agua a 0.6m del tirante medido desde la superficie.

El principio radica en el número de revoluciones por unidad de tiempo, en algunos casos el instrumento viene con una ecuación en función de la velocidad:

$$V = (2.2048 \cdot R + 0.0178) \cdot 0.3048 \quad (1.8)$$

Donde R (Rev/seg) es el número de revoluciones sobre segundos, los más actuales nos indican directamente la velocidad.



Figura 1.9: Correntómetro (Mendieta, 2014)

1.3.11. Cálculo de errores: Error Absoluto, Error Relativo

Bien sea una medida directa (la que da el aparato) o indirecta (utilizando una fórmula) existe un tratamiento de los errores de medida. Podemos distinguir dos tipos de errores que se utilizan en los cálculos:

- Error absoluto (Ea.): Es la diferencia entre el valor de la medida y el valor tomado como exacto (valor verdadero o valor probable). Puede ser positivo o negativo, según si la medida es superior al valor real o inferior a él, (la resta sale positiva o negativa). Tiene unidades, las mismas que las de la medida. Si llamamos x a la medición y V al valor verdadero o valor probable, el error absoluto será:

$$Ea = x - v \quad (1.9)$$

- Error relativo (Er): Es el cociente (la división) entre el error absoluto y el valor verdadero o probable. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento (%) de error o error porcentual. Al igual que el error absoluto puede ser positivo o negativo (según lo sea el error absoluto) porque puede ser por exceso o por defecto, no tiene unidades. El error relativo, definido por el cociente entre el error absoluto y el valor real, está dado por la fórmula:

$$Er = Ea/V \quad (1.10)$$

- El error porcentual se obtiene al multiplicar por 100 el error relativo; es decir: Error porcentual = $Er \times 100\%$. (Arriaga & Peralta, 2008)

1.3.12. Pérdidas de energía debido a fricción

En canales el concepto de pérdida de energía es similar al utilizado en el cálculo de conductos a presión, lo que significa que en una canal también se presentan pérdidas por fricción y locales. (Sotelo, 2002)

A medida que fluye un fluido por un conducto o algún otro dispositivo, se presentan algunas pérdidas de energía debido a la fricción interna del fluido, estas traen como resultado una disminución en la presión presente entre dos puntos determinados del sistema de flujo. Estas pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares o accidentales y

localizados, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección o la presencia de un accesorio.

a. Pérdidas de fricción en flujo laminar

En el flujo laminar las partículas del fluido solo se mezclan a escala molecular, de modo que, durante el movimiento, dichas partículas se desplazan según trayectorias paralelas bajo la acción de la viscosidad, creando una tensión de corte entre las capas del fluido, el cual parece desplazarse en forma de varias capas, una sobre otra.

En flujo laminar, los esfuerzos cortantes se pueden calcular de forma analítica en función de la distribución de velocidad en cada sección y las pérdidas de carga lineales se pueden obtener con la llamada ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$h_l = \frac{32\mu Lv}{\gamma D^2} \quad (1.11)$$

Dónde:

- h_l : Es la pérdida de energía debido a fricción
- μ : Es la viscosidad dinámica del fluido
- L : Es la longitud del conducto
- γ : Es el peso específico del fluido
- D : Es el diámetro del conducto
- v : Es la velocidad promedio

Esta ecuación ha sido verificada experimentalmente muchas veces, se puede observar que la pérdida de energía es independiente a la condición de la superficie del conducto, esta es válida solamente para este tipo de flujos ($NR < 2000$). Igualando la ecuación de Darcy-Weisbach con la ecuación de Hagen-Poiseuille, se tiene que:

$$f = \frac{64}{NR} \quad (1.12)$$

b. Pérdidas de fricción en flujo turbulento

En el flujo turbulento las partículas del fluido se mezclan a escala molar, de modo que durante el movimiento se produce un intercambio de cantidad de movimiento entre partículas adyacentes, ocasionando una rápida y

continua agitación y mezcla en el fluido. En este flujo aunque es posible resolver analíticamente las ecuaciones, experimentalmente se puede comprobar que la dependencia entre los esfuerzos cortantes y la velocidad son aproximadamente cuadráticas.

En las pruebas experimentales realizadas, se denota que el factor de fricción (f) depende del número de Reynolds (NR) y la rugosidad relativa del conducto.

Para la obtención de este valor se tiene en consideración la rugosidad absoluta de los materiales a analizar, donde esta es el conjunto de irregularidades geométricas presentes en el interior de una tubería, como se muestra en la figura 1.10.

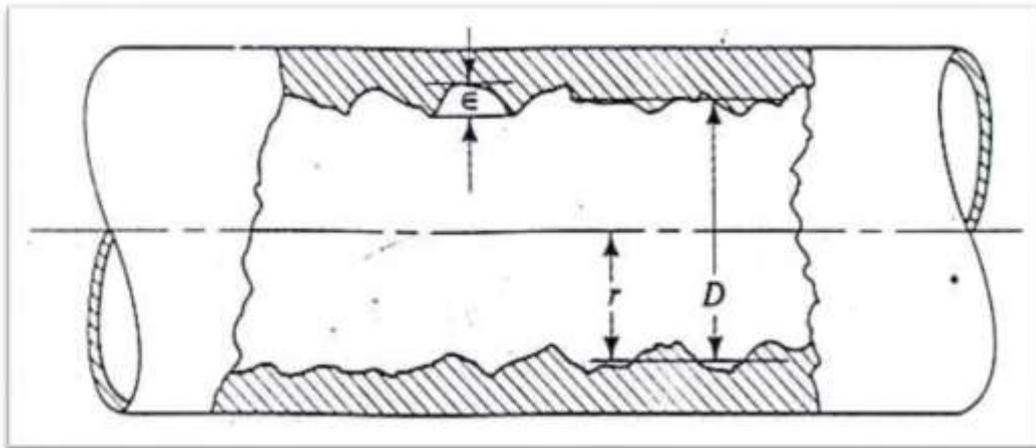


Figura 1.10: Rugosidad de pared de conducto (Mott, 2006)

Dónde:

- D : Es el diámetro
- E : Es la altura promedio de irregularidades o rugosidad absoluta
- r : Es la rugosidad relativa (D/E)

1.3.13. Factor de fricción en canales rugosos

En un canal rugoso con flujo uniforme se desarrollan tres tipos de comportamiento hidráulico, según el tipo, la magnitud de la rugosidad K_s en el fondo y paredes del canal y el espesor de la capa límite δ_0 .

a) Pared hidráulicamente lisa: la pared tiene un comportamiento similar al de pared lisa

$$K_s < \delta_0$$

b) Pared hidráulicamente rugosa: la rugosidad se extiende fuera de la capa límite y controlan el comportamiento del flujo

$$K_s < \delta_0$$

c) Pared hidráulicamente de transición:

$$5 < \frac{V_0 K_s}{\nu} \leq 70$$

Dónde:

- V: Velocidad de fricción
- Ks: Rugosidad absoluta

Con el fin de determinar el factor de fricción se utiliza la ecuación de Colebrook-white para tubos en la zona de transición, introduciendo una serie de cambios que permitan aplicar dicha fórmula en canales:

Dónde:

El factor de fricción que está dado por la Formula de Colebrook-White (Chereque, 2004)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\alpha \log \left(\frac{a}{Re\sqrt{f}} + \frac{K_s}{R} \right) \quad (1.13)$$

- f: Factor de fricción
- α : Coeficiente
- a: Coeficiente, varía de acuerdo con el comportamiento de la pared y forma de la sección del canal
- C: Coeficiente, varía de acuerdo con el comportamiento de la pared y forma de la sección del canal
- Ks: Rugosidad relativa
- R: Radio hidráulico
- Re: Número de Reynold's

Los coeficientes α , a, c se determinan a partir de la forma de la sección del canal y por el comportamiento de la pared, como se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Coeficientes α , a, c

Comportamiento de la pared y forma de la sección	α	a	c	Autor
Hidráulicamente lisa, rugosa y de transición:				
a) Rectangular muy ancha	2.035	0.713	13.44	Prandtl, von Karman y Nikuradse (1926, 1933); adaptación de los teóricos en tubos circulares.
	2.00	0.6275	14.84	Colebrook y White (1937); adaptación de los experimentales en tubos circulares.
	2.035	0.853	11.02	Reinius (1961); y otros.
	2.035	0.850	12.40	Reinius (1961); experimental (referencia 2).
	2.00	0.758	12.20	Thijse (1949); experimental.
	2.035	0.852	11.04	Fuentes y Carrasquel (1978); (referencia 3).
b) Trapecial	2.035	0.771	12.27	Keulegan, Bazin; experimental.
c) Circular.	2.035	0.698	13.05	Colebrook y White, con la base en la ecuación 1.38y el eficiente de Keulegan.
d) Canales en general.	2.00	0.625	12.00	ASCE (1963) (referencia 4).
2. Hidráulicamente rugosa:				
a) Rectangular muy ancha.	2.035		11.02	Prandtl, von Karman y Nikuradse (1926, 1933); adaptación de los teóricos en tubos circulares.
	2.00		14.84	Nikuradse y Colebrook y White (1937); adaptación de los experimentales en tubos circulares.
	2.035		11.10	Keulegan (1938); teórico (referencia 5).
	2.00		12.64	Keulegan, Bazin; experimental
	2.00		14.80	Bretting (1948), Ackers (1958); experimental.
	2.00		11.02	Reinius (1961); teórico (referencia 2).
	2.00		12.40	Reinius (1961); experimental (referencia 2).
bly = 4	2.00		12.94	Reinius (1961); teórico (referencia 2).
biy = 2	2.00		13.40	Reinius (1961); teórico (referencia 2).
b) Trapecial.	2.00		12.64	Keulegan, Bazin; experimental.
	2.03		12.27	Keulegan, Bazin; experimental.
c) Circular	2.00		13.50	Keulegan, Bazin; experimental.
d) Canales en general	2.00		12.20	Keulegan; teórico.
	2.00		12.00	ASCE (1963) (referencia 4).

Fuente: Sotelo, 2002

Para la determinación de la rugosidad equivalente se tienen en cuenta aspectos de las paredes del canal, tales como el grado de rugosidad y el tipo de superficie, esto con el fin de definir el K en la tabla 1.4, la cual representa valores estimados experimentalmente de la rugosidad equivalente.

Tabla 1.4: Rugosidad equivalente en las paredes de un canal

MATERIAL	K (m)
Tubos muy lisos sin costura (vidrio, cobre, acero nuevo con superficie pintada, plástico, etc.)	$1,5 \times 10^{-6}$
Fierro forjado	$4,5 \times 10^{-5}$
Acero rolado, nuevo	5×10^{-5}
Acero laminado, nuevo	$4 \times 10^{-5} - 10^{-4}$
Fierro fundido, nuevo	$2,5 \times 10^{-4}$
Fierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$
Fierro fundido, asfaltado	$1,2 \times 10^{-4}$
Fierro fundido, oxidado	$1 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^{-3}$
Acero remachado	$0,9 \times 10^{-4} - 0,9 \times 10^{-3}$
Cemento enlucido	4×10^{-4}
Asbesto cemento, nuevo	$2,5 \times 10^{-5}$
Concreto centrifugado, nuevo	$1,6 \times 10^{-4}$
Concreto muy bien terminado, a mano	10^{-5}
Concreto liso	$2,5 \times 10^{-5}$
Concreto bien acabado, usado	$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$
Concreto sin acabado especial	$10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$
Concreto rugoso	10^{-2}
Duelas de madera	$1,8 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$
Piedra asentada y bien lisa	5×10^{-4}
Revestimiento de piedra	2×10^{-3}
Grava	10^{-2}
Piedra pequeña	2×10^{-2}
Piedra grande	5×10^{-2}
Roca	0.1
Tierra (lisa)	3×10^{-3}
Fondo con transporte de arena	$10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$
Acequia con vegetación	0.1

Fuente: Rocha, 2007

1.3.14. Ecuación de Darcy – Weisbach

Muy pocos problemas que se presentan en tuberías pueden ser resueltos por métodos matemáticos convencionales; algunos de estos necesitan métodos de solución basados en coeficientes hallados experimentalmente. Algunas fórmulas empíricas se presentan como posibles soluciones a diferentes problemas de flujo de fluidos por tuberías, pero en su mayoría son limitadas y pueden aplicarse sólo en algunos casos en donde las condiciones son similares a los experimentos de los cuales derivan las fórmulas.

“Una componente de la pérdida de energía se debe a la fricción en el fluido en movimiento. La fricción es proporcional a la cabeza de velocidad de flujo y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente de flujo, para el caso de flujo en conductos y tubos”. (Mott, 1996)

Con lo anterior se expresa de manera matemática la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_f = f * \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.14)$$

Dónde:

- h_f : Es la pérdida de energía debido a fricción
- L : Es la longitud de la corriente de flujo
- D : Es el diámetro del conducto
- v : Es la velocidad de flujo promedio
- f : Es el factor de fricción

La pérdida de energía por fricción en el flujo permanente y uniforme en tuberías y canales se determina con la fórmula de Darcy-Weisbach; que escrita en términos del radio hidráulico. (Chereque, 2004)

$$H_f = f * \frac{L V^2}{4R 2g} \quad (1.15)$$

$$V^2 = \frac{8g H_f}{f} * \frac{R}{L} \quad (1.16)$$

$$v = \sqrt{\frac{8g}{f}} * \sqrt{R * S} \quad (1.17)$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} , \quad v = C * \sqrt{R * S} \quad (1.18)$$

1.3.15. Ecuación de Chezy

Todas las formulas usadas en la actualidad para el diseño hidráulico de los canales de han originado de la formula fundamental propuesta en 1,769 por el ingeniero francés Antoine Chezy, la cual se originó al recibir una trabajo de diseñar un canal para suministrar agua a la ciudad de Paris, cuya derivación se explica a continuación. (Sotelo, 2002)

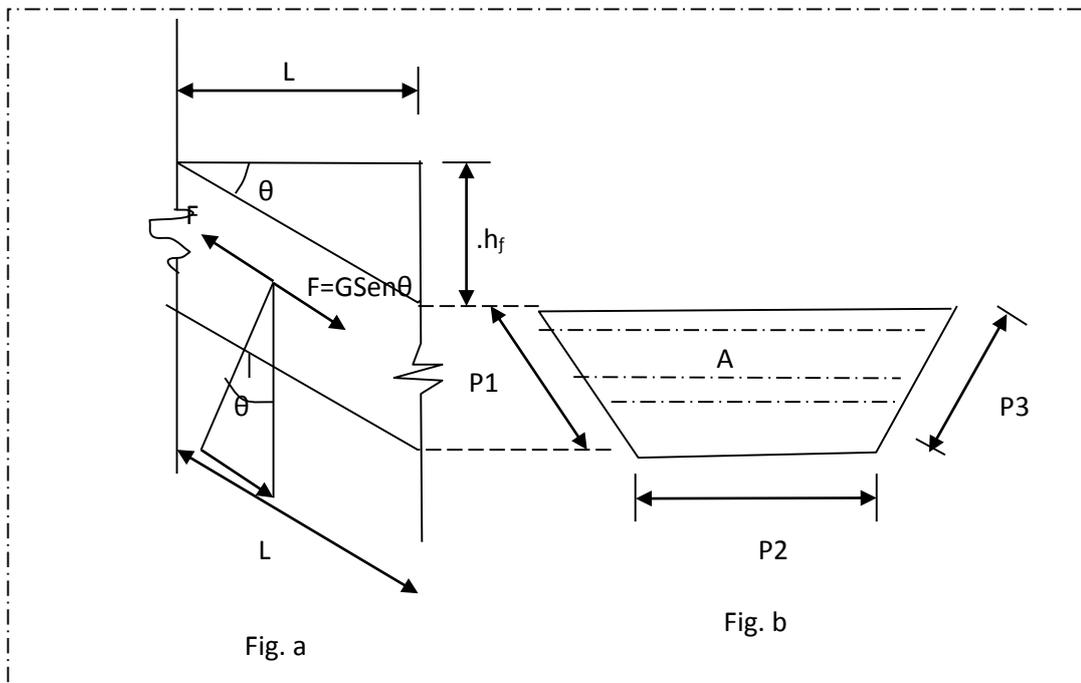


Figura 1.11: perfil longitudinal de una canal con flujo uniforme (Sotelo, 2002)

Esta fórmula se obtiene del balance de fuerzas que ocurren en un elemento fluido, no sometido a acciones de aceleración, o sea para flujo permanente y uniforme.

La figura (a) Representa la sección longitudinal de una canal con la pendiente fuertemente exagerada y la figura (b), la sección transversal del mismo canal. La fuerza que produce el flujo de agua es F que es la componente de la fuerza de la gravedad (G) paralela al lecho o fondo del

canal. Si A es el área del canal L la longitud de la sección considerada, hf la caída de la longitud L y γ el peso específico del fluido.

$$V^2 = C * R * S$$

$$V = \sqrt{C} * \sqrt{R * S} \quad ; \text{ Donde haciendo: } \sqrt{C} = C$$

C = Constante que depende del fluido, del tamaño y profundidad del canal, carácter de la pendiente y naturaleza de la superficie del conducto.

Finalmente:

$$V = C\sqrt{R * S} \quad (1.19)$$

Cuando se halló posteriormente que el coeficiente de Chezy, no era constante para todos los tipos de superficies; Canguillet y Kutter, mediante una larga serie de experimentos dedujeron el siguiente valor general para C.

$$C = \frac{\frac{1.000}{n} + 23.0 + \frac{0.0015}{S}}{1 + \left(23.0 + \frac{0.0015}{S}\right) * \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (1.20)$$

Donde:

R=radio hidráulico, en m

S=pendiente del canal

n=coeficiente de rugosidad o aspereza de las paredes y fondo del canal

1.3.16. Ecuación de Manning.

La ecuación de Manning es de carácter netamente empírico, es la más utilizada en el mundo y evalúa el coeficiente de manning de la siguiente manera:

$$C = \frac{Rh^{1/6}}{n} \quad (1.21)$$

Reemplazando en la ecuación de Chezy se obtiene que la velocidad sea:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (1.22)$$

Dónde:

- V: Velocidad
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning

- S: pendiente de la línea de energía
- R: Radio hidráulico

En este caso “n” se toma como un nuevo valor de fricción, llamado coeficiente de Manning, que depende de la rugosidad de las paredes del canal y que además es independiente del número de Reynolds.

“El coeficiente de rugosidad mide la resistencia de flujo y dada la variedad de factores que afectan su cálculo hacen que este sea complejo por la imprecisión que se tiene en cuantificar el grado de incidencia de los diferentes factores”. (Urrutia, 1992)

Factores que afectan el valor de rugosidad “n” de Manning:

- La rugosidad “n”, varía con la profundidad de flujo. Se ha comprobado que, con el aumento de la profundidad o tirante disminuye el valor del coeficiente “n”, sin embargo, cuando el nivel de agua alcanza las orillas de un cauce natural y estas presentan material grueso, el coeficiente de rugosidad “n” aumenta apreciablemente.
- La rugosidad depende del material del lecho o del canal. En efecto, para materiales finos “n” es bajo y para materiales gruesos “n” es alto.
- La rugosidad “n” depende de las irregularidades del canal, de los cambios de forma geométrica y de los cambios de las dimensiones de este.
- La rugosidad varía con los cambios en el alineamiento del canal. Evidentemente la pendiente longitudinal afecta el valor de “n”.
- La presencia de obstáculos en el cauce modifica el valor de “n”, es decir la rugosidad aumenta con el número y distribución de los obstáculos.
- Los procesos de erosión y sedimentación activos producen cambios en “n”.
- Las variaciones del caudal y por tanto del tirante o profundidad de flujo producen cambios en “n”, en la mayoría de canales “n” disminuye al aumentar el tirante y el caudal.
- El tipo, densidad y distribución en la vegetación produce aumento en el valor de n.

Tabla 1.5: valores del coeficiente “n” en la ecuación de Manning

SUPERFICIE	n
Superficie metálica, lisa, sin pintar	0,012
Superficie metálica, lisa, pintada	0,013
Superficie metálica, corrugada	0,025
Cemento liso	0,011
Mortero de cemento	0,013
Madera cepillada	0,012
Madera sin cepillar	0,013
Tablones sin cepillar	0,014
Concreto liso	0,013
Concreto bien acabado, usado	0,014
Concreto frotachado	0,015
Concreto sin terminar	0,017
Gunita (sección bien terminada)	0,019
Gunita (sección ondulada)	0,022
Superficie asfáltica lisa	0,013
Superficie asfáltica rugosa	0,016
Tierra, limpia, sección nueva	0,018
Tierra, limpia, sección antigua	0,022
Tierra gravosa	0,025
Tierra, con poca vegetación	0,027
Tierra, con vegetación	0,035
Tierra, con piedras	0,035
Tierra, con pedrones	0,040
Para secciones circulares (trabajando como canal)	
Metal, liso	0,010
Acero soldado	0,012
Acero ribeteado	0,016
Fierro fundido	0,013 – 0,014
Cemento	0,011 – 0,013
Vidrio	0,010

Fuente: Rocha, 2007

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo de tesis se ha definido los objetivos, el área a seleccionar y el período de tiempo a trabajar, recogiendo la información tanto a nivel regional, nacional e internacional así como documentación gráfica (planos, fotografías e imágenes de satélite) y el trabajo de campo topográfico.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

2.1.1. Ubicación Política

Políticamente la cuenca pertenece al departamento de Ayacucho, abarca las provincias de Huamanga, los distritos: Carmen Alto y Jesús Nazareno.

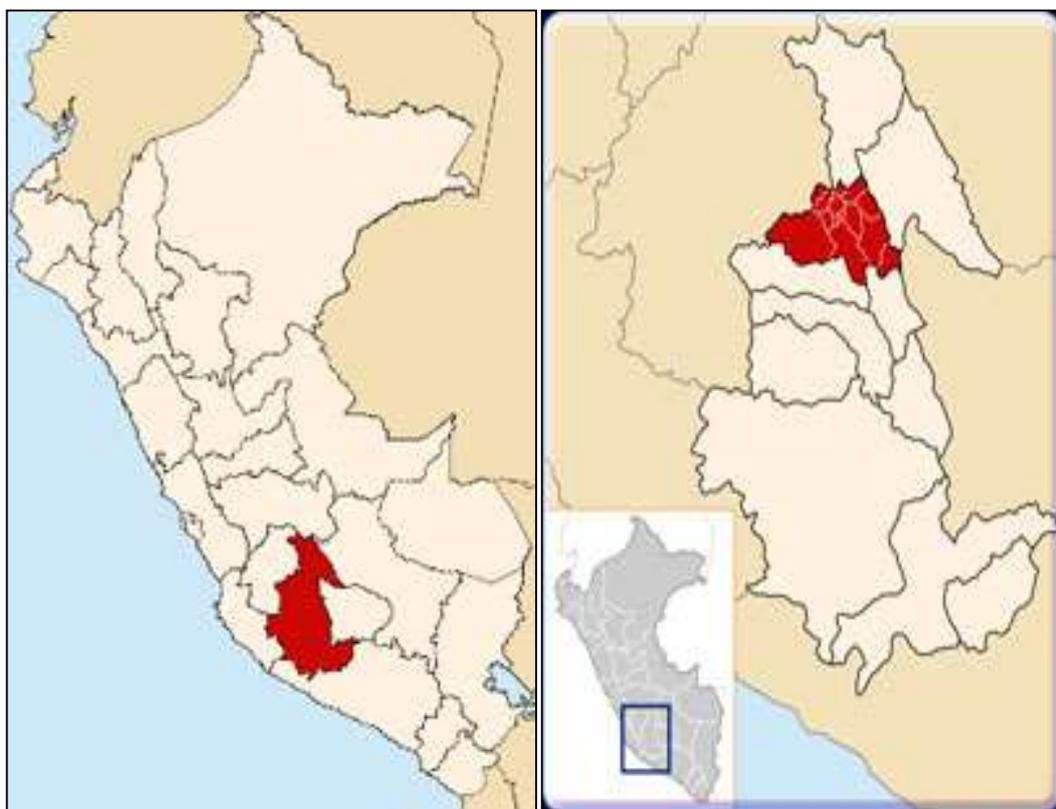




Figura 2.1: Ubicación nacional, regional y distrital (INEI, 2007)

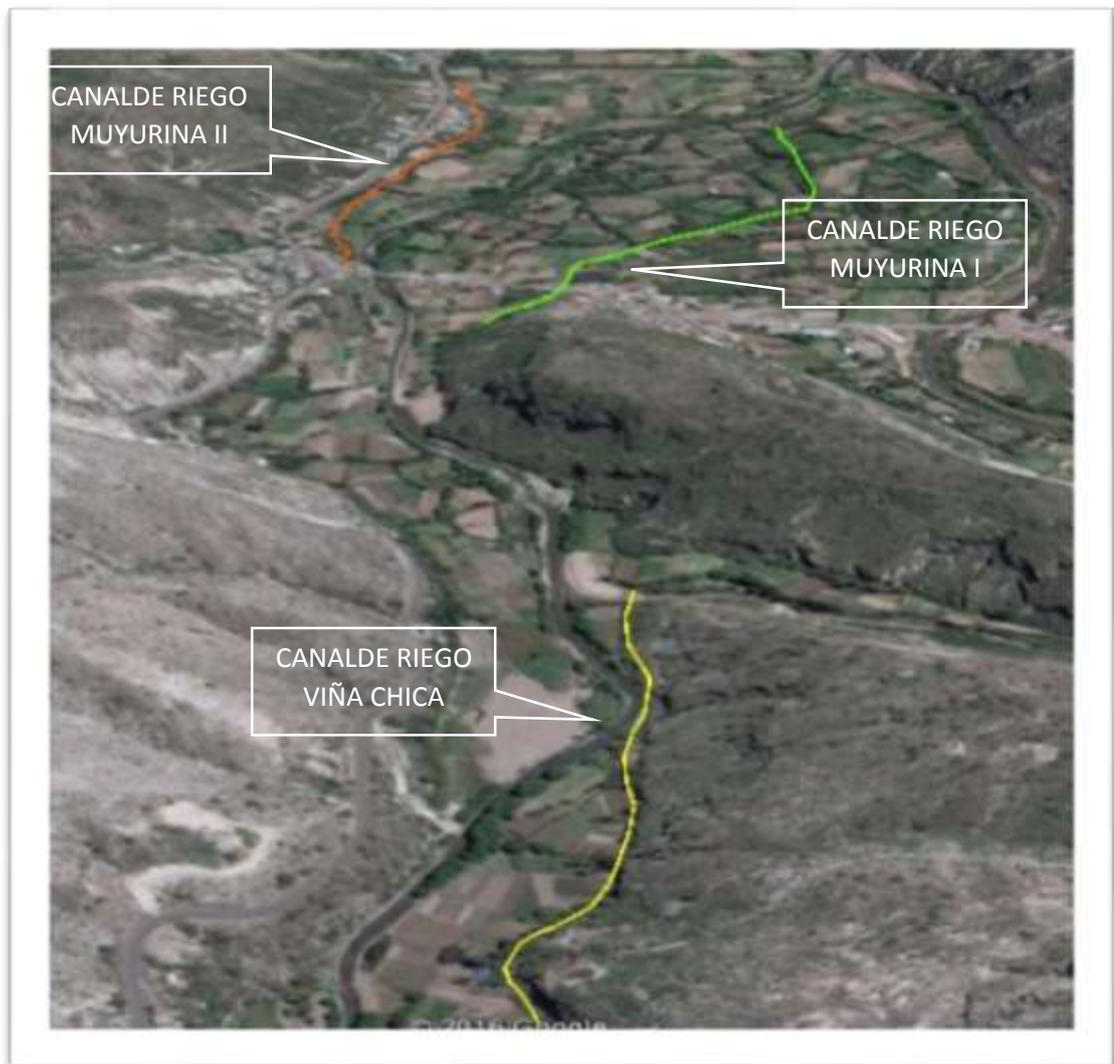


Figura 2.2: Ubicación del proyecto en imagen satelital I



Figura 2.3: Ubicación del proyecto en imagen satelital II

2.1.2. Ubicación Geográfica

El ámbito del proyecto está determinado por las localidades Carmen Alto (Yanama y Quicapata Canal del Proyecto Rio Cachi), Jesús Nazareno (Viña Chiquita y Muyurina), estos lugares cuentan con canal de riego, donde se realizó la medición de la velocidad del agua en canales abiertos de usos para la agricultura con riego por gravedad, canales de secciones variadas de estructura de concreto simple y de tierra. Sus coordenadas geográficas están comprendidas entre los paralelos 16°30' y 16°40' latitud sur y el meridiano 72°30' y 72°45' longitud oeste.

Su clima se caracteriza al clima de la sierra, su temperatura oscila entre los 4°C a 19°C. En esta parte del proyecto se ha observado dos estaciones; la época de lluvias y la época de secano, la primera desde el mes de octubre a abril, el secano entre mayo y setiembre.

La fuente de agua de donde se capta es el rio Pongora, gracias a ello se riega todo el valle de Muyurina.

La Provincia de Huamanga, se encuentra limitada por:

Nor Oeste : Departamento de Huancavelica
Norte : Provincia de Huanta
Nor este : Provincia de la Mar
Este : Departamento de Apurímac
Sur : Provincias de Cangallo y Vilcas Huamán

Coordenadas UTM : 8544996 N
: 583907 E
: 2756 m.s.n.m.

2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

2.2.1. Materiales

- Registros de datos (libreta de campo, etc.)
- Impresora
- Google Earth
- Investigaciones científicos
- Flotadores
- Varilla para medir las profundidades
- Estacas
- Cordel

2.2.2. Equipos

- Nivel de Ingeniero
- Mira
- Cronómetro
- Computadora
- Impresora
- Wincha de 50 ml
- Flexómetro
- GPS garmin navegador
- Cámara fotográfica
- Calculadora

- Correntómetro

2.3. MÉTODOS

2.3.1. Fase de campo

Se consideraran el método directo a través de la observación de la siguiente manera:

a. Diagnostico situación de la zona del proyecto

Se realizó el diagnóstico en los 7 lugares de medición de prueba de velocidad, las cuales tienen las características adecuadas para la realización del proyecto que justifican el planteamiento del problema, que están ubicadas en el Distrito de Carmen Alto que abarca dos sectores, el canal de Quicapata construido con un material de concreto, sección trapezoidal, principalmente para uso en riego, que es un ramal del Proyecto Cachi y el otro ubicado en el sector de AA.HH.Yanama, que es un canal de tierra la cual se utiliza para riego en la agricultura, que es una derivación del canal del Proyecto Cachi; de la misma manera el proyecto abarca el Distrito de Jesús Nazareno los sectores de Viña Chica que es un canal de riego construido de material de concreto y los dos últimos canales de riego se ubican en el sector del valle de muyurina que riegan la margen derecha y el otro a la margen izquierda, el canal del margen derecho es de tierra de sección rectangular el otro es de concreto de sección rectangular.

b. Medición de la velocidad

b.1. Método flotador

- Se escogió el tramo recto de "A" y "B", en lugares de medición de prueba de velocidad, este lugar es adecuado que coincide con la sección transversal del canal, en donde el agua fluya naturalmente, sin piedras y obstáculos.
- Se lanzaron como mínimo 3 flotadores hacia la margen derecha, 3 en el centro y 3 en la margen izquierda de la sección del canal.
- Para la obtención del tiempo que demoró los flotadores de llegar de A hasta B, se controló con el cronómetro y se utilizaron tablas de registro para el registro de datos del tiempo, que se adjunta en el anexo.

- Se lanzaron cada uno de los flotadores (f) de botella de plástico descartables, antes de pasar por el punto A con la finalidad de que cada flotador alcance una velocidad constante y se establezca su trayectoria.
- El tiempo promedio que se calculó es igual, a la suma del tiempo que se demora cada flotador, y se divide entre el número de los flotadores, en este caso entre 9.
- Se realizó la medición de los tiempos con la mayor exactitud posible.
- Al momento de realizar el aforo cuando había presencia de vientos fuertes no realizar el aforo para que los flotadores no desvíen su trayectoria.

b.2. Método del correntómetro

- Se realizó la medición por medio del instrumento “correntómetro” se midió la velocidad instantáneamente en los diferentes lugares determinados en estudio.
- El correntómetro se sumergió aproximadamente el 60% de la profundidad del canal de la superficie del agua o 40% de la base.
- Longitudinalmente, las medidas se realizaron tanto en el inicio, en el centro como en el final del tramo del canal en estudio. Y transversalmente, las medidas se realizarán en el punto medio de las partes en que se ha dividido el espejo de agua del canal.
- El cálculo de la velocidad se realizaron con la ecuación 1.8, que se manifiesta anteriormente.

c. Medición de la sección y la pendiente del canal.

- Se realizó la medición de la sección y los componentes del canal abierto de riego teniendo en cuenta los elementos naturales y artificiales encontrados en el campo necesario para el proyecto.
- Se realizó la determinación de la pendiente con el método de nivelación geométrica simple, para lo cual se toman dos puntos A y B cuyo desnivel se quiere determinar, se estaciono el nivel entre A y B, de tal forma que la distancia existente a ambos puntos sea la visible. En A y B se sitúan miras verticales, sobre las que se efectúan las visuales horizontales con

el nivel, registrando las lecturas V_a , V_b . A la mira situada en A se le denomina Vista atrás y a la mira situada en B Vista adelante. El punto de estación no está materializado por ningún tipo de señal, pero los puntos sobre los que se sitúan las miras.

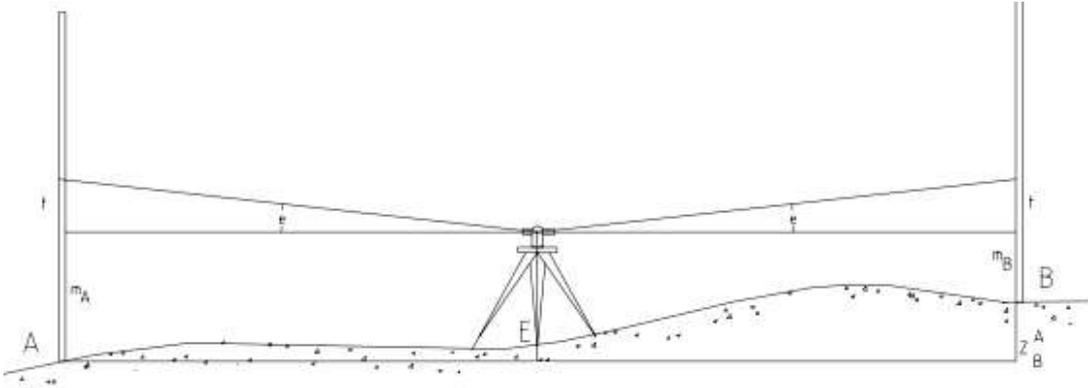


Figura 2.4: Nivelación geométrica (KASSER, 2001)

$$S = \frac{V_a - V_p}{\text{dist.} A-B} \quad (2.1)$$

S : pendiente (m/m)

V_a : vista atrás(m)

V_b : vista adelante(m)

A-B: distancia inclinada del terreno (m)

2.3.2. Fase de Gabinete

a. Cálculo de la velocidad Superficial y media

- Se realizó el cálculo de la velocidad superficial con los datos de campo, mediante la ecuación 1.6.
- Se realizó el cálculo de la velocidad media o corregida del flujo de agua, que es igual a la velocidad del flotador o superficial (V_s) multiplicada por un factor de corrección, para los diferentes tipos de canales abiertos de acuerdo a la tabla N° 1.2, con el ecuación 1.7.

b. Calculo de la variación de la velocidad en el canal abierto

Se realizó el cálculo de las variaciones de la velocidad basándose en las evaluaciones efectuadas en la fase anterior se procedió a calcular las

velocidades afectadas por la rugosidad de materiales comúnmente utilizados en un canal abierto de acuerdo con los datos obtenidos de campo.

- Perímetro Hidráulico, con las siguientes ecuaciones:

$$P = b + 2y \quad (2.2)$$

$$P = b + 2y * \sqrt{1 + z^2} \quad (2.3)$$

- Área Hidráulica, con las siguientes ecuaciones:

$$A = b * y \quad (2.4)$$

$$A = (b + 2y)y \quad (2.5)$$

- Radio Hidráulico, con las siguientes ecuaciones:

Ecuación (1.1)

- Velocidad por Manning, con las siguientes ecuaciones y tabla:

Ecuación (1.22)

Tabla (1.5)

- Velocidad por Chezy, con las siguientes ecuaciones y tabla:

Ecuación (1.19)

Ecuación (1.20)

Tabla (1.5)

- Velocidad por Darcy-Weisbach, con las siguientes ecuaciones y los tablas:

Ecuación (1.17)

Ecuación (1.18)

Ecuación (1.13)

Ecuación (1.3)

Tabla (1.3)

Tabla (1.4)

c. Cálculo del error relativo de la velocidad

Se realizó el cálculo del error relativo de la velocidad de las ecuaciones del factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning para el canal abierto.

- Error Relativo por Manning.

$$E_{rm} = \frac{V - V_{m*}}{V} * 100\% \quad (2.6)$$

- Error Relativo por Chezy.

$$E_{rc} = \frac{V - V_{m*}}{V} * 100\% \quad (2.7)$$

- Error Relativo por Darcy-Weisbach.

$$E_{rf} = \frac{V - V_{m*}}{V} * 100\% \quad (2.8)$$

III. RESULTADOS

Se logró realizar las pruebas de medición de velocidades en los 7 lugares determinados, con los métodos de flotador y el correntómetro satisfactoriamente, con estos valores se determinó la variación de velocidad y se estableció el error relativo de la velocidad.

3.1. Medición de la velocidad superficial, media y la pendiente

- Se logró buscar un tramo uniforme donde el agua fluya sin excesiva turbulencias y que no haya piedras grandes o troncos que impidan el libre flujo del agua, este tramo es de una longitud de 10 metros.
- En el tramo seleccionado se logró ubicar dos puntos A (de inicio) y B (de llegada) y medir la distancia; una persona se ubicó en el punto A con el flotador y la otra en el punto B con el reloj, y se medirá el tiempo que recorre el flotador desde el punto A hasta el punto B.

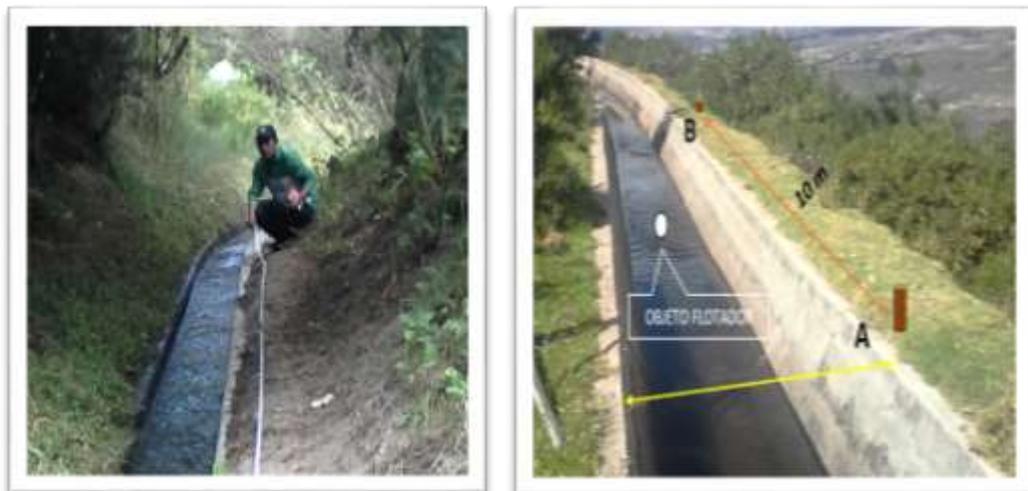


Figura 3.1: Medición de la distancia y aforamiento por el método fltador

Tabla 3.1: Resultados de aforamiento método del flotador

TRABAJO DE CAMPO													
FECHA	HORA		DATOS OBTENIDOS										
			TIEMPO(S)										Lugar
Día/mes/año	inicial	final	Margen derecha			centro			Margen izquierda			Tiempo promedio	
			f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	t _p	
09/04/16	9:00:00	12:00:00	9.00	8.38	8.40	7.90	8.00	8.70	7.90	8.00	8.7	8.40	Quicapata
09/04/16	13:00:00	16:00:00	8.40	8.20	7.89	7.90	8.10	7.80	7.90	8.10	7.80	8.05	Muyurina I
10/04/16	9:00:00	12:00:00	8.00	8.40	8.10	9.00	7.00	7.70	9.00	7.00	7.70	8.03	Muyurina II
10/04/16	13:00:00	16:00:00	5.80	5.92	6.00	5.50	6.42	6.50	5.80	5.92	6.00	6.02	Viña Chica
11/04/16	8:00:00	10:00:00	10.60	11.00	9.94	10.40	10.00	11.30	10.60	11.00	9.94	10.54	Yanama
11/04/16	10:00:00	12:00:00	9.40	8.70	9.90	9.60	9.80	8.90	9.40	8.70	9.90	9.38	Muyurina T I
11/04/16	13:00:00	16:00:00	8.25	8.20	7.36	8.15	8.40	7.98	8.25	8.20	7.36	8.06	Muyurina T II

- Se logró realizar la medición de la velocidad con el método del correntómetro obteniéndose los resultados, que se muestra en la Tabla 3.2.



Figura 3.2: Medición de la velocidad con el método correntometro

Tabla 3.2: Resultados de aforamiento con el método del correntómetro

RESULTADO DE MEDICION DE LA VELOCIDAD CON CORRENTOMETRO								
Lugar	N° Rev.	N° Rev.	N° Rev.	N° Rev. Prom	N seg.	R(Rev/seg)	VELOC.(m/s)	Observación
Quicapata	50	54	51	52	40	1.292	0.873	Vm al 40%
Muyurina-I	58	60	58	59	40	1.467	0.991	Vm al 40%
Muyurina-II	58	61	57	59	40	1.467	0.991	Vm al 40%
Viña Chica	76	80	77	78	40	1.942	1.310	Vm al 40%
Yanama-I	45	45	44	45	40	1.117	0.756	Vm al 40%
Muyurina T-I	44	45	42	44	40	1.092	0.739	Vm al 40%
Muyurina T-II	49	52	52	51	40	1.275	0.862	Vm al 40%

- Se logró medir las secciones del canal abierto y de la misma manera se realizó la caracterización in situ del tipo de superficie del canal, que se muestra en la Tabla 3.3.



Figura 3.3: Medicion de la seccion del canal abierto

Tabla 3.3: Resultados de medición de la sección del canal

Fecha	DATOS OBTENIDOS				Tipo de sección	Tipo superficie	Estado	Lugar
	b	y	z	T				
09/04/16	0.40	0.20	0.50	0.65	Triangular	Concreto antiguo con sedimentos	Antigua	Quicapata
09/04/16	0.40	0.30	0.00	0.40	Rectangular	Concreto frotachado	Antigua	Muyurina I
10/04/16	0.60	0.44	0.00	0.60	Rectangular	Concreto frotachado	nuevo	Muyurina II
10/04/16	0.50	0.16	0.00	0.50	Rectangular	Concreto frotachado	nuevo	Viña Chica
11/04/16	0.80	0.35	0.00	0.80	Rectangular	Tierra, limpia, sección antigua	Antigua	Yanama
11/04/16	0.60	0.30	0.00	0.60	Rectangular	Tierra gravoso, con vegetación	Antigua	Muyurina T I
11/04/16	0.70	0.25	0.00	0.70	Rectangular	Tierra gravosa	Antigua	Muyurina T II

- Se logró realizar la nivelación geométrica en el tramo determinado de la prueba de evaluación de la velocidad y de misma manera caracterizar el canal abierto, que se muestra en la Tabla 3.4.



Figura 3.4: Nivelacion topográfico del canal abierto

Tabla 3.4: Resultados de la nivelación geométrica del canal abierto

NIVELACION GEOMETRICA							
Lugar	Puntos	V. Atrás m	V. Adelante m	Desnivel m	Pendiente (S°/oo)	Fecha	Observaciones
Quicapata	A	2.387		0.017	1.7	09/04/16	Terreno accesible y libre
	B		2.370				
Muyurina I	A	1.944		0.027	2.7	09/04/16	Terreno accesible con vegetación
	B		1.917				
Muyurina II	A	2.663		0.018	1.8	10/04/16	Terreno accesible con vegetación
	B		2.645				
Viña Chica	A	1.763		0.073	7.3	10/04/16	Terreno accesible con vegetación
	B		1.690				
Yanama	A	2.066		0.016	1.6	11/04/16	Terreno accesible y libre
	B		2.050				
Muyurina T I	A	1.448		0.069	6.9	11/04/16	Terreno accesible y libre
	B		1.379				
Muyurina T II	A	1.687		0.048	4.8	11/04/16	Terreno accesible y libre
	B		1.639				

- Se logró realizar el cálculo de la velocidad superficial con los datos de campo, velocidad media o corregida del flujo de agua, que es igual a la velocidad del flotador o superficial (V_s) multiplicada por un factor de corrección, para los diferentes tipos de canales abiertos de acuerdo a la tabla 1.2, que se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resultados de la velocidad superficial y media

RESULTADO DE VELOCIDAD SUPERFICIAL Y MEDIA				
Lugar	V_s(m/s)	K	V_m(m/s)	Tipo de canal
Quicapata	1.190	0.80	0.953	Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm
Muyurina-I	1.240	0.80	0.994	Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm
Muyurina-II	1.245	0.80	0.996	Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm
Viña Chica	1.330	0.80	1.328	Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm
Yanama-I	0.949	0.70	0.759	Canal de tierra, profundidad del agua mayor a 15 cm
Muyurina T-I	1.066	0.70	0.746	Canal de tierra, profundidad del agua mayor a 15 cm
Muyurina T-II	1.241	0.70	0.869	Canal de tierra, profundidad del agua mayor a 15 cm

3.2. Cálculo de la variación de la velocidad en el canal abierto

- Se logró realizar el cálculo de resistencia al flujo que son afectadas por la rugosidad de la superficie de los canales del factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, que se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Resultado de resistencia al flujo en canales

RESULTADO DE RESISTENCIA AL FLUJO EN CANALES				
Lugar	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD			FACTOR DE FRICCIÓN DARCY-WEISBACH
	CHEZY		MANNING	
	n	C	n	f
Quicapata	0.017	42	0.017	0.030
Muyurina-I	0.015	45	0.015	0.029
Muyurina-II	0.015	47	0.015	0.025
Viña Chica	0.015	41	0.015	0.036
Yanama-I	0.019	37	0.019	0.048
Muyurina T-I	0.035	17	0.035	0.167
Muyurina T-II	0.025	25	0.025	0.085

Cálculo del factor de fricción (f):

$$x = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad \text{---} \quad g(x) = -a \log \left(\frac{a}{Re} X + \frac{Ks}{c} \right)$$

$$x = g(x)$$

$$f = 0.030443$$

$$x = 5.731341363$$

$$g(x) = 5.71312341 \quad x - g(x) = 0 \quad \text{---} \quad 0.0001$$

- Se logró realizar el cálculo de las variaciones de la velocidad basándose en las evaluaciones efectuadas en la fase anterior se procedió a determinar las velocidades afectadas por la rugosidad de la superficie del canal con las ecuaciones de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, que se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Resultados de la evaluación de la velocidad del canal abierto

RESULTADO DE LA EVALUCION DE LA VELOCIDAD											
LUGAR	D(m)	T_p(s)	S(m/m)	A(m²)	P(m)	Rh(m)	V(m/s) M. Flot.	V(m/s) M. Corr.	V_m(m/s)	V_c(m/s)	V_f(m/s)
Quicapata	10.00	8.40	0.0017	0.154	0.84	0.184	0.953	0.873	0.785	0.752	0.907
Muyurina-I	10.00	8.05	0.0027	0.120	1.00	0.120	0.994	0.991	0.843	0.804	0.942
Muyurina-II	10.00	8.03	0.0018	0.180	1.20	0.150	0.996	0.991	0.798	0.773	0.937
Viña Chica	10.00	6.02	0.0073	0.080	0.82	0.098	1.328	1.310	1.170	1.090	1.266
Yanama-I	10.00	10.54	0.0016	0.280	1.50	0.187	0.759	0.756	0.688	0.644	0.704
Muyurina T-I	10.00	9.38	0.0069	0.180	1.20	0.187	0.746	0.739	0.670	0.538	0.703
Muyurina T-II	10.00	8.06	0.0048	0.175	1.20	0.146	0.869	0.862	0.768	0.663	0.811

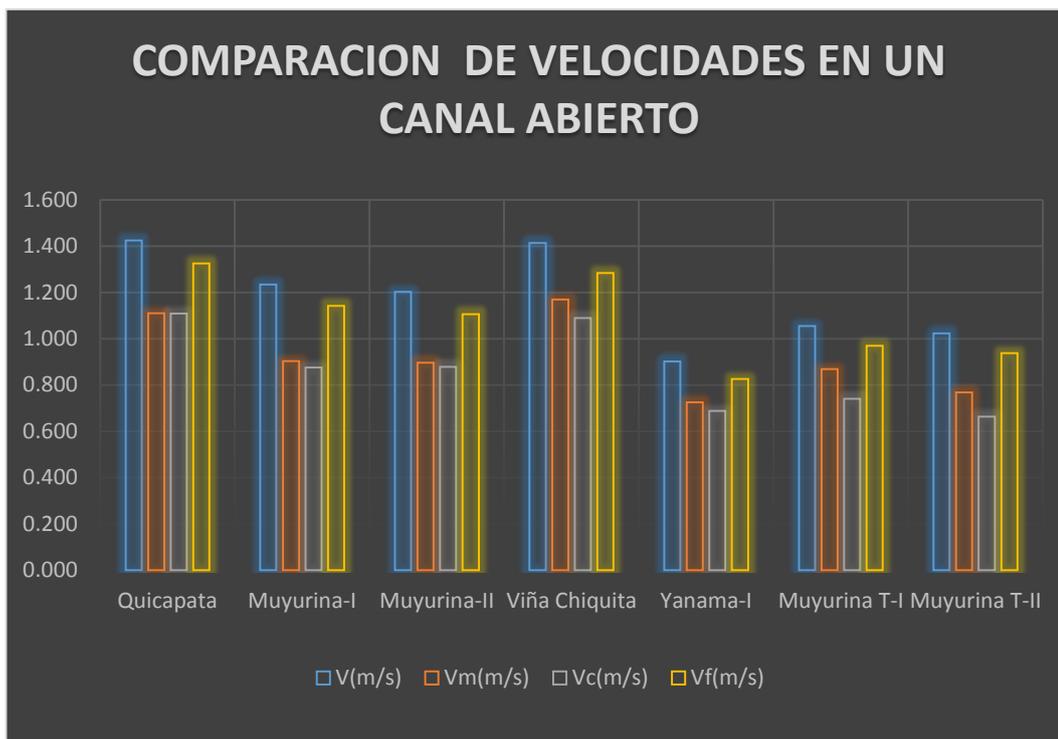


Figura 3.5: Variación de Velocidades del canal abierto

3.3. Cálculo del error relativo de la velocidad

- Se logró realizar el cálculo del error relativo de la velocidad de las ecuaciones del factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning para el canal abierto, que se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resultados de evaluación del error relativo de la velocidad

RESULTADOS DEL ERROR RELATIVO DE LA VELOCIDAD						
Lugar	ERROR RELATIVO DE LA VELOCIDAD POR METODO FLOTADOR			ERROR RELATIVO DE LA VELOCIDAD POR METODO CORRENTOMETRO		
	Erm(%)	Erc(%)	Erf(%)	Erm(%)	Erc(%)	Erf(%)
Quicapata	17.57	21.06	4.77	10.09	13.89	3.87
Muyurina-I	15.21	19.13	5.26	14.96	18.89	4.97
Muyurina-II	19.82	22.37	5.86	19.43	21.99	5.40
Viña Chica	11.93	17.95	4.67	10.73	16.83	3.37
Yanama-I	9.41	15.09	7.22	9.03	14.73	6.83
Muyurina T-I	10.19	27.92	5.74	9.34	27.24	4.85
Muyurina T-II	11.63	23.69	6.69	10.95	23.11	5.98

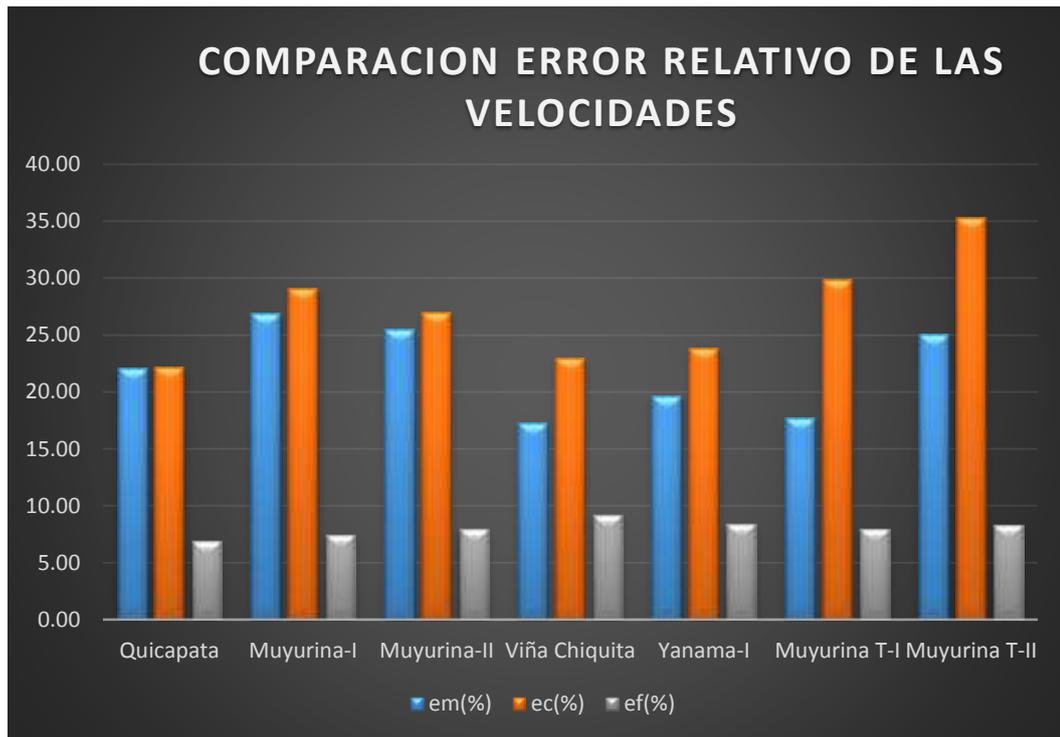


Figura 3.6: Variación del error relativo de la velocidad

IV. DISCUSIÓN

Se realizaron 7 repeticiones o pruebas para tener resultados más exactos de la evaluación de velocidad, estas medidas se realizaron en un flujo uniforme, porque en estas condiciones se desarrollan la ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Manning y Chezy, donde el régimen de flujo es turbulento, como resulta en todas las pruebas de $Re > 2000$.

Los resultados del tiempo promedio por el método del flotador, se realizaron con 9 repeticiones para tener mayor precisión de la medida del recorrido del objeto flotador, en una longitud de 10 m, obteniéndose una variación del tiempo promedio desde 6.02 a 10.54 segundos, con este valor se calculó la velocidad superficial y luego la velocidad media multiplicando con un factor de la tabla 1.2, para canales revestidos de concreto y canales de tierra (profundidad del agua mayor a 15 cm).

Los resultados del aforamiento por el método del correntómetro, nos muestra el número de revoluciones según la velocidad del flujo en el canal abierto, en nuestro caso medida para un tiempo de 40 segundos para todas las pruebas al 40% de profundidad de base de canal abierto, con el cual obteniéndose la velocidad media en forma directa con variación entre 0.739 al 1.310 m/s como se muestra en la Tabla 3.2.

Las pendientes de los canales abiertos se obtuvieron por el método de nivelación geométrica simple, estos resultados varían desde 1.60 ‰ hasta 7.30 ‰.

Los resultados de la medición de las secciones del canal abierto se muestra en la Tabla 3.3, donde se encontró de dos tipos de canales de tierra y de concreto de forma rectangular y trapezoidal, lo cual han permitido el cálculo

del área mojado, perímetro y el radio hidráulico de los canales abiertos para de esta manera determinar la velocidad.

En la obtención de las velocidades mediante las ecuaciones de Chezy y Manning se calcularon utilizando el coeficiente “n” de la tabla 1.5, para diferentes tipos de materiales más usadas en la construcción, estas características que han sido determinadas in situ; de la misma manera la velocidad determinada por el factor de fricción de Darcy-Weisbach se calculó con la ecuación de Colebrook, para lo cual se utilizaron datos de coeficientes de la tabla 1.3, la rugosidad absoluta de la tabla 1.4, número Reynolds, la viscosidad cinética para una temperatura de 15° C.

Al realizar la evaluación de velocidad obtenidas con los métodos del flotador y correntómetro que son relativamente similares, realizando la comparación de la velocidad con las ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, donde podemos notar que la velocidad mediante la ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach está más próximo a la velocidad real o media por los métodos indicados anteriormente, en ocasiones esta estuvo por encima del valor real, mientras que la velocidad mediante las ecuaciones de Chezy y Manning están más alejadas, esto quiere decir que los resultados con la velocidad de ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach son más confiables para las 7 pruebas.



Figura 4.1: Comparacion de Velocidades en un canal abierto

Realizando la comparación de resultados del error relativo de la velocidad, podemos indicar que mediante la velocidad de ecuación Manning y Chezy tienen mayor error relativo a comparación con la velocidad de factor de fricción de Darcy-Weisbach es de menor error relativo, como se muestra en la figura 4.2, de la misma manera podemos manifestar que siempre es menor en todas las 7 pruebas realizadas como se demuestra en la tabla 3.8 y la figura 3.7, por el cual podemos manifestar lo siguiente, que estos resultados nos quiere decir que al calcular la velocidad se comete menos error con la ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach en el diseño del canal abierto.



Figura 4.2: Comparacion de error relativo en un canal abierto

Con el presente trabajo de tesis podemos mencionar de los resultados de la tabla 3.8, que la ecuación de Darcy-Weisbach adquiere mucha importancia por aproximar a los resultados de la velocidad real obtenida en campo con las pruebas pertinentes, por lo tanto podemos validar lo indicado por (Bustos & Montoya, 2015) en un trabajo monográfico de una prueba en laboratorio que manifiesta lo siguiente, que el error relativo de la velocidad calculada con el factor de fricción de Darcy-Weisbach siempre es menor al error relativo de la velocidad calculada con el coeficiente de Manning.

Según los resultados obtenidos de la evaluación de velocidad como lo manifestado anteriormente que la fórmula de Manning y Chezy tienen mayor error relativo que el ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach, con este podemos validar lo mencionado por (French, 1985),

que para la utilización de la fórmula de Manning, uno de los principales inconvenientes que exhibe dicha expresión es que no es dimensionalmente homogénea; mientras que (Srupczewski & Szymkiewicz, 1986) manifiesta que la fórmula de Chezy tiene limitaciones que se debe a que ella es dimensionalmente no homogénea y no tiene en cuenta las propiedades de flujo.

V. CONCLUSIONES

1. La medición de la velocidad se logró con los métodos del flotador y correntómetro, con ambos se obtienen resultados relativamente similares, por lo que se concluye que el método de los flotadores constituye una buena alternativa, la dificultad es que necesitamos que la zona donde vamos a medir sea recta para poder calcular el recorrido de los flotadores de manera más exacta, así también la mayor cantidad de flotadores para tener una mayor proporción de datos; de la misma manera con el método del correntómetro se logró mediciones instantáneas y más reales, pero hay otras razones para no usar el correntómetro, son cuando existe una excesiva velocidad del agua, presencia de muchos cuerpos extraños, cuando pelagra el operador, o corre riesgo de daño el correntómetro.
2. En la evaluación de la velocidad se concluye que la velocidad calculada con la ecuación del factor de fricción de Darcy-Weisbach ($V_f = 1.08 \text{ m/s}$), constantemente estuvo más próximo al valor de la velocidad media ($V = 1.18 \text{ m/s}$) obtenida por los métodos indicados anteriormente, en cambio la velocidad de la ecuación de Manning ($V_m = 0.92 \text{ m/s}$) y Chezy ($V_c = 0.86 \text{ m/s}$) siempre estuvieron por debajo; en donde se utilizaron como datos principales la rugosidad del superficie de los materiales más empleado en la construcción del canal abierto, que se opone al flujo turbulento uniforme que transcurren, el radio hidráulico de la sección transversal del canal y la pendiente longitudinal del canal, de acuerdo a ello podemos indicar que el valor de la velocidad que resulta de la ecuación de factor de fricción de Darcy-Weisbach es más eficiente para

el cálculo de la velocidad media por lo que utiliza datos más reales del canal abierto.

3. En la evaluación del error relativo de la velocidad calculada con el ecuación de velocidad del factor de fricción de Darcy-Weisbach, siempre fue menor al error relativo de la velocidad calculada con la ecuación de velocidad de Manning y Chezy obtenidas para el método flotador $E_{rm}\%=13.68$, $E_{rc}\%=21.03$, $E_{rf}\%=5.74$ y para el método del correntómetro $E_{rm}\%=12.08$, $E_{rc}\%=19.53$, $E_{rf}\%=5.04$; por lo cual podemos manifestar que esto se debe a que, la ecuación de Manning y Chezy son la expresión más comúnmente utilizada para estimar la resistencia al flujo en canales, pero tiene los significativos inconvenientes de tener un origen totalmente empírico y de no poseer homogeneidad dimensional. En contraste con esta situación, la fórmula de Darcy-Weisbach es dimensionalmente homogénea y es posible desarrollar expresiones con base teórica para el factor de fricción f que aparece en ella.

VI. RECOMENDACIÓN

1. Se recomienda que en un proyecto de canal abierto, se requiere de un conjunto de evaluaciones y un análisis de las características de la velocidad para el diseño del canal, ya que sin ello el ingeniero corre el riesgo de que falle la construcción, al no tener bien claro los resultados obtenidos, por lo cual se debe realizar las evaluaciones adecuadas de la velocidad.
2. Se recomienda que al realizar la medición de la velocidad mediante los métodos del flotador y el correntómetro se debe tener en cuenta la precisión para la medición de la velocidad, ya que el método del flotador nos puede dar un buen resultado, pero tiene más probabilidad de error, por lo que muchos datos dependen de las facultades del operador, pudiendo así obtener un resultado no tan exacto y es necesario muchas repeticiones para poder tener un nivel de confiabilidad aceptable y para homogenizar éstos; mientras que el método del correntómetro es más exacto e instantáneo con pocos inconvenientes.
3. Se recomienda la utilización del factor de fricción de Darcy-Weisbach para el cálculo de la velocidad, ya que los resultados obtenidos son más próximos a la velocidad real y hay investigaciones que han destinado sus esfuerzos a desarrollar expresiones para el factor de fricción adimensional, f , que aparece en la fórmula de Darcy-Weisbach, aplicable a flujo en canales, porque es dimensionalmente homogénea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldama, Álvaro. & Ocon, A. (2002) Resistencia al flujo en canales y límites de aplicabilidad de la fórmula de Manning. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XVII, num.1, pp. 107-115.
- Arriaga, E. & Peralta, V. (2008) Error absoluto error relativo. Conceptos Básicos Cálculo de Errores Ajuste de una Recta. Sede Maipú, Santiago de Chile. 23 pp.
- Bustos, P. & Montoya, J. (2015) Desarrollo de software para la comparación de la velocidad de un canal abierto utilizando el factor de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning. Monografía para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá Colombia. 65pp.
- Chamorro, G. (2011) “Estimación del caudal por el método de flotadores”. En: guía de hidrometría. Lima nº 01. Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú. Páginas 17.
- Cadavid, J. (2006) Hidráulica de Canales. Medellín Colombia. Universidad EAFIT.
- Chereque, W. (2004). Mecánica de Fluidos II. Lima Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú
- French, R. (1988) Hidráulica de Canales Abiertos. México. Mcgraw-Hill Mexico.724 pp.
- Graf, W.H., Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, Nueva York, 1971.
- Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos aplicada. México. Sexta edición. Prentice - Hall Hispanoamérica S.A.
- Marín, C. et al. (2012) Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable para uso didáctico e investigación. Universidad de el Salvador, Facultad Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Mendieta, J. (2014) Medición de caudal, en acequia dentro del establo ecológico la Ponderosa en Villa el Salvador. Mecánica de Fluidos II. Universidad Peruana de Integración Global. Lima Peru.37 pp.

- Keulegan, G.H. (1938) "Laws of Turbulent Flow in Open Channels", J. National Bureau of Standards, vol. 21, pp. 707-741.
- Kasser, M. (2001) Nuevas técnicas para la determinación de altitudes. Topografía y Cartografía, Volumen XVIII, número 106, Septiembre-October 2001, pp.37-40.
- Orellana, J., Ramírez, C., Chang, P. (2012) Límites de la fórmula de chézy en hidráulica de canales abiertos, su relación entre la geometría y las propiedades de flujo. XXV Congreso latinoamericano de hidráulica San José, Costa Rica.
- Osío, M. et al. Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" de Manning en los grandes ríos de Venezuela. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- Rodríguez, P. (2008) Hidráulica II. Oaxaca México. Instituto Estatal Ecológico.
- Rocha, A. (2007) Hidráulica de Canales y Tuberías. Universidad Nacional de Ingeniería. Primera edición. Lima Perú. Enero 2007. 538. pp.
- Reinius, E. (1961) "Steady Uniform Flow in Open Channels", Bulletin, vol. Div. Hidráulica, Instituto Real de Tecnología, Estocolmo, Suecia.
- Riveros, D. (2004). Desarrollo de una metodología para la determinación de coeficientes de resistencia hidráulica asociados a tramos de alcantarillados existentes. Pontificia Universidad Javeriana. Florida, Estados Unidos.
- Rouse, H. (1946) Elementary Mechanics of Fluids, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Saldarriaga, J. (2007). Abastecimiento de agua, Redes, Riegos. Hidráulica de tuberías. Universidad de los Andes. Bogotá Colombia. Alfaomega.690.pp
- Sotelo, A. G. (2002). Hidráulica de canales. México. Primera edición, UNAM.
- Srupczewski, W. & Szymkiewicz, R. (1986) "Analysis of paradoxes arising from the Chezy formula with constant roughness: I. Depth-

discharge curve”, Hydrological Sciences Journal, Vol.41, No 5, pp. 659-673.

- Sayre, W.W. y Albertson, M.L. (1961) "Roughness Spacing in Rigid Open Channels", Journal Hydraulic Division, ASCE, vol.87, pp. 121-150.
- Tapia, G. (2012) Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico. secretaría de comunicaciones y transportes. instituto mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 356 Sanfandila.
- Thijssse, J.T.(1949), Formulae for the Friction Head Loss Along Conduit Walls Under Turbulent Flow, Proceedings, III I Congreso de la IAHR, Grenoble, Francia, vol. III, núm.4 ,pp.1-11.
- Ven Te Chow, P. D. (2004). Hidráulica de canales abiertos. California. Mc GRAW-HILL.
- Villón, M. (2007) Hidráulica de Canales. Lima Perú. Universidad EAFIT.
- Urrutia, N. (1992). Hidráulica de canales. Colombia. segunda edición. Univalle.
- Zegzhda, A.P. (1938) Teoriia podobiaei metodika rascheta gidrotekhnicheskikh modelei, Gosstroizdat, 1938.

ANEXO

A. PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 01: Medida del seccion del canal del canal abierto



Figura 02: Medida del seccion del canal del canal abierto



Figura 03: Nivelación topográfica del canal abierto



Figura 04: Medida de distancia para eforamiento del canal abierto



Figura 05: Ubicación del canal abierto para realizar la prueba



Figura 06: Instalación del equipo correntometro

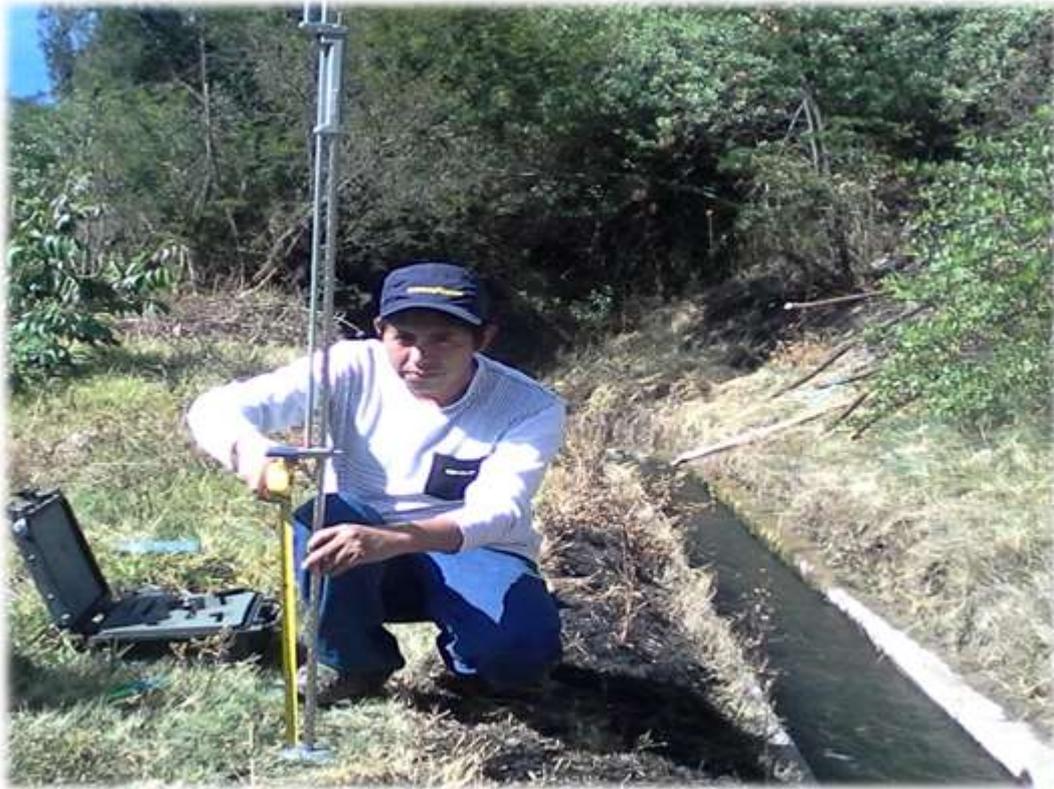


Figura 07: Instalacion del equipo correntometro



Figura 08: Medicion de la velocidad con el equipo de correntometro



Figura 09: Medicion de la velocidad con el equipo de correntometro



Figura 10: Medicion de la velocidad con el equipo de correntometro