

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento más importante para la vida. Es de una importancia vital para el ser humano, así como para el resto de seres vivos. Este líquido vital cada vez está afectado por factores climatológicos y geomorfológicos como ser el aumento de la población, la masiva urbanización, el vertido de nuevos patógenos y productos químicos procedentes de las industrias y el auge de especies invasoras son factores clave que contribuyen al deterioro de la calidad del agua en todo el mundo, a los cuales se está sumando ya el cambio climático.

En las últimas estrategias a nivel mundial, el agua es considerada una prioridad para satisfacer nuestras necesidades, garantice nuestra salud y supervivencia, tanto así que 114 países suscribieron en Dublín Irlanda en 1992, los siguientes 3 principios fundamentales:

1. El agua es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y medio ambiente.
2. El desarrollo y el manejo de los recursos hídricos, debe basarse en un enfoque participativo que incluye a los usuarios, los planificadores y quienes definan la política a todo nivel.
3. El agua tiene un valor económico en todos sus usos y debe reconocerse un bien económico.

No obstante, se debe garantizar la calidad del agua de riego, así como el manejo adecuado del mismo son esenciales para la producción exitosa de cultivos y así poder conseguir altos rendimientos.

Las últimas políticas para el mejor uso del agua en Bolivia, de acuerdo a la Resolución Ministerial No 367 del MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua), se prioriza que se deben evitar las pérdidas de agua, para el efecto se recomienda que los sistemas de conducción sean preferiblemente de tubería, como asimismo sea cambiada la tecnología del riego gravitacional con riegos presurizados.

El proyecto Múltiple San Jacinto, es el proyecto más importante para riego en el departamento, que fue construido en los años 1983 al 1986 por la Asociación San Jacinto que conformada por la Empresa Nacional de Electrificación (ENDE), el Ministerio de Asuntos Campesinos y Agricultura, la Corporación de Desarrollo de Tarija (CODETAR). El propósito de la obra es el uso múltiple: generación de energía eléctrica, riego y se ha convertido en atractivo turístico, donde se practican deportes acuáticos. Consta de una presa

de regulación tipo curvo de  $H^{\circ}A^{\circ}$  que tiene una capacidad de almacenamiento de  $50 \text{ Hm}^3$  que podría regar hasta 3000 ha, su principal sistema conducción es mediante canal, por lo cual es importante saber ¿Qué es un canal? y ¿Cuál es la importancia de los canales en nuestro medio?

Un canal abierto es una conducción abierta a la atmósfera en el que el líquido fluye sometido a la presión atmosférica y movido por la pendiente del propio canal.

Los canales son el principal medio físico para la conducción de las aguas desde una obra de toma hasta las áreas de riego. En algunas zonas, por razones climáticas, topográficas, de accesibilidad, de costos de operación y mantenimiento entre otras, se usan otros medios como las tuberías o túneles, etc. Sin embargo, por razones económicas, en prácticamente todos los proyectos se utiliza el canal como medio de conducción o de distribución de las aguas.

En la práctica, uno de los problemas más frecuentes que presentan los sistemas de riego de nuestro país son las grandes pérdidas que se producen en la conducción y distribución del agua, por lo tanto, es muy importante un buen diseño para ahorrar costos de construcción, operación, mantenimiento, y de pérdidas de agua. Este diseño queda condicionado por varios factores, pero muy especialmente por las características de permeabilidad de los terrenos que el canal recorre. Desde este punto de vista, se distinguen dos grandes grupos de canales, los revestidos y los que no requieren revestimiento.

El cálculo de la capacidad de transporte es el mismo para ambos casos, variando solamente un parámetro básico, definido como el coeficiente de rugosidad “n” de Manning.

### **1.1.ANTECEDENTES DEL PROYECTO MÚLTIPLE SAN JACINTO**

La presa San Jacinto, fue construida entre los años 1983 al 1986 por la Asociación San Jacinto que conformada por: la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE), el Ministerio de Asuntos Campesinos y Agricultura, la Corporación de Desarrollo de Tarija (CODETAR). El Proyecto Múltiple San Jacinto (PMSJ), pertenece a los sistemas grandes de riego a nivel departamental, al tener una superficie aproximada de 2.832 ha con alrededor de 1.049 familias (Antezana, 2010).

El proyecto cubre trece comunidades pertenecientes dentro de los Municipios de Uriondo (La Choza, Media Luna, Suchu Wayco, Chañarís - San Isidro) y Cercado (Morros Blancos - Temporal, San Jacinto, Santa Ana Cebollar, Santa Ana La Vieja, Santa Ana la Cabaña, Tablada Grande, El Portillo, La Pintada, Torrecillas).

El Proyecto cuenta con un embalse de una capacidad de 62 Hm<sup>3</sup> (volumen útil de 49 Hm<sup>3</sup>) y con un espejo de agua de aproximadamente 700 ha. El agua del embalse proviene de la Cuenca del río Tolomosa, que junto a la cuenca del río la Victoria son las principales fuentes de agua para la ciudad de Tarija. Además, existe una presa de doble curvatura con una altura de 44.50 m y coronamiento de aproximadamente de 100 m (PMSJ, 2006: 14).

El uso del agua almacenada en el embalse se destinada principalmente para la generación de energía eléctrica y dotación de agua para riego. En el caso de la generación eléctrica cuenta con una capacidad instalada entre 7.000 a 7.500 KW, con dos generadores y cuatro turbinas. Se ha dotado de energía eléctrica por más de 16 años con una producción de 20 GW/hora/año. El volumen utilizado se calcula alrededor de 13 Hm<sup>3</sup> de agosto a octubre y de 32 Hm<sup>3</sup> de diciembre a marzo (Gutiérrez y Saldías, 2011).

En el caso de la infraestructura de riego cuenta con una serie de canales (120.250 metros) que cubre el área de influencia. El agua es transportada desde el embalse hasta los puntos de dominio de los distintos sectores de riego, a través de una aducción principal compuesta por tuberías y canales revestidos, alternados por obras de control y regulación. Además, existen tomas principales que son válvulas para el caso de tomas que se encuentra directamente conectado a la aducción principal y válvulas o compuertas de fondos en el caso de derivar agua desde una cámara abierta. La conducción secundaria se caracteriza por contar con canales abiertos, combinados con tramos de tubería, sifones y acueductos (Gutiérrez y Saldías, 2011). Para proveer agua a algunas comunidades cuenta con seis estaciones de bombeo: 1 estación principal, 2 estaciones en Tablada, 2 estaciones en Santa Ana, 1 estación en El Portillo (ver Gráfico N° 1). El consumo de agua para riego es de 5 Hm<sup>3</sup> anualmente. El área de riego está dividida en sub - sistemas: Central, Morros Blancos - Portillo, San Jacinto, San Luis Temporal, Santa Ana y Tablada.



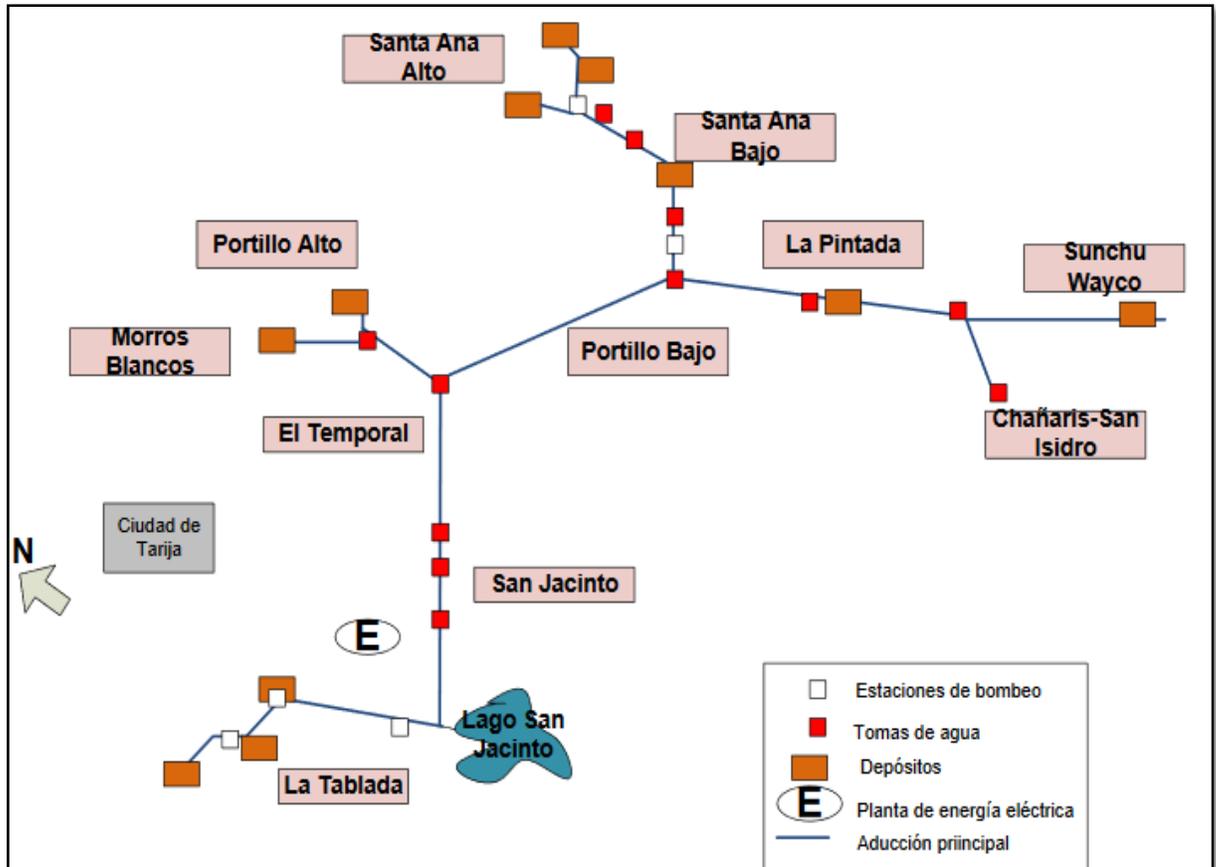
*Fotografía 1.1. Vista aguas debajo de la presa.*

Fuente: Inventario de presas en Bolivia.

*Tabla 1.1. Características generales de la presa*

Características generales			
Tipo de presa	Gravedad-Arco	Uso	Energía y Riego
Área de la cuenca	420 km <sup>2</sup>	Municipio	Cercado
Altura de la presa	46,50 m	Latitud	21°36'6"
Longitud coronamiento	100 m	Longitud	64°43'36"
Capacidad de embalse	50.000.000 m <sup>3</sup>	Cuenca de influencia	Río Tolomosa

Fuente: Inventario de presas en Bolivia.



**Gráfico N° 1.1. Infraestructura del sistema de riego del Proyecto Múltiple San Jacinto.**

Fuente: Modificado de Van Bemmelen (2007) en Gutiérrez y Saldías (2011).

### Distribución de Riego

El PMSJ cuenta con algunas áreas de trabajo, cada una posee su propia estructura interna. En el tema de riego, existe el área de “Gestión de Riego” el cual posee un cuerpo técnico liderado por el jefe de área y un técnico de riego. Mientras que el personal operativo está compuesto por cuatro distribuidores de riego, cinco bombeadores y un auscultador del lago. Cada uno cumple su función de acuerdo al área que le corresponde. De lunes a sábado, los distribuidores comienzan sus actividades a partir de las 4 y 30 am hasta las 2 pm. De agosto del 2011 no existía el turno de los sábados, pero como la demanda de agua es cada vez mayor, el Proyecto decidió aumentar un turno más. El distribuidor a través de turnos pre - establecidos y con la ayuda de listas de los regantes de acuerdo al canal, procede a entregar el agua correspondiente en base a volumen, esta cantidad es anotada en una boleta con el costo que el productor debe cancelar en el área de “Cobranzas” del

PMSJ. La unidad de distribución es “centímetros”. El distribuidor verifica la cantidad de agua disponible y calcula la cantidad de agua requerida por canal en base al número de usuarios y sus requerimientos de ese día (Fotografía 2). A pesar que los turnos son pre-establecidos, los usuarios pueden solicitar un turno adicional si lo requiere y si alguno de los regantes no se ha acercado a solicitar en ese día.



*Fotografía 1.2. Pedido de agua en los puntos de distribución (Comunidad Santa Ana La Vieja).*  
Fuente: Propia.

Tanto los distribuidores como los bombeadores reciben órdenes del jefe del área. En este momento mientras dura la etapa de transición de la gestión de riego, los agricultores tienen el derecho para usar una parte del flujo de agua sin pagar el volumen de agua que ocupan. El usuario tiene la obligación de conducir el agua pagada por su respectivo canal hasta el predio luego que el distribuidor reparta el volumen respectivo a cada usuario.

### **Operación y Mantenimiento**

Los bombeadores están a cargo de las estaciones de bombeo y están en continua comunicación con los distribuidores. Los distribuidores están a cargo de la apertura de las compuertas y recorrido de su zona; mientras que los bombeadores del manejo de las bombas en cada una de las estaciones.

El mantenimiento de la infraestructura de riego ha sido realizado por el Proyecto especialmente aducción principal y canales primarios y secundarios. Para esto el Proyecto cuenta dentro con un área de “Mantenimiento de obras civiles”. Son muy pocos los trabajos de mantenimiento que realizan los agricultores, esto va a

depender del nivel de organización de cada canal, el cual es liderado por su respectivo Juez de Agua.

## **1.2.IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El agua es un elemento fundamental para la vida, y de la misma manera para la agricultura y ganadería, y por ende afecta a la economía de una población, sin embargo, el uso irracional de este recurso, está contribuyendo a su escasez.

El problema con la escasez de agua, poco a poco se va convirtiendo en uno de los principales inconvenientes para el desarrollo de comunidades.

La mayoría de canales de riego se construyen en las zonas rurales de nuestro país, a pesar de haber tenido una buena asesoría técnica en la etapa de concepción, diseño y ejecución, la mayoría termina deteriorándose y resultando insuficientes o inoperativos.

Las pérdidas de agua en canales se deben principalmente, a la evaporación, fugas en las estructuras que intervienen en su operación y a la infiltración, así mismo estas definen la eficiencia de conducción de un canal, que se define como la relación que existe entre el caudal que llega al sistema de distribución y el caudal captado en la fuente de agua del sistema (río, embalse o reservorio). Usualmente se considera hasta el punto de entrega al sistema de distribución (canales secundarios e inclusive terciarios).

Esta eficiencia depende de varios factores: longitud de los canales, amplitud del área regable, características del canal, tipo del revestimiento, grado de mantenimiento y de la modalidad de operación del sistema. Pero también depende del tipo de operación del sistema de riego: continuo o intermitente. A pesar de que la eficiencia de conducción es el componente más susceptible a ser mejorado por ejemplo mediante revestimientos con hormigones, pero no siempre se logra superar el 90% en situación con proyecto; generalmente varía entre 75 a 90%. En condiciones sin mejoramiento (sistema rústico) las eficiencias suelen reportar valores entre 45 a 60%; obviamente es muy variable de un sistema de riego a otro y de un área geográfica a otra (Manual Técnico del ABRO 2.3).

A continuación, se presentan las características principales de los canales, los cuales serán objeto de estudio.

*Tabla 1.2. Características de los canales principales del Proyecto San Jacinto.*

<b>Canal</b>	<b>Ubicación (zona)</b>	<b>Revestimiento</b>	<b>Ancho de solera (b) (m)</b>	<b>Profundidad promedio (y) (m)</b>
<b>Santa Ana</b>	La Cabaña	H°C°	1,20	0,55
<b>Cámara N° 7 Suncho Wayco</b>	Cruce ruta al valle de la concepción	H°C°	0,80	0,32
<b>El Portillo</b>	El Portillo	H°C°	1,80	0,64

Fuente: Elaboración propia.

### **1.2.1. Planteamiento del Problema**

Se ha observado que los canales de riego Santa Ana, Cámara N° 7 Suncho Wayco, Portillo pertenecientes a la red principal de canales del P.M.S.J. presentan problemas respecto al uso del agua y al funcionamiento, por lo que se pretende con el presente estudio, determinar el porcentaje de agua que se pierde desde el inicio, hasta el final de cada tramo de canal, debido a la infiltración en las grietas u orificios de los revestimientos, los cuales tiene aproximadamente 20 años de existencia, tomando en cuenta la eficiencia de conducción, para que en base a los resultados obtenidos, los regantes, operadores y directivos del Proyecto San Jacinto, gestionen el mejoramiento de la infraestructura de los canales.

### **1.2.2. Formulación del Problema**

El problema del proyecto se formula en una pregunta de investigación:

- ¿De qué forma las pérdidas de agua debido a fugas en estructural de control, evaporación, infiltración, grietas y rebales; afectan a la eficiencia de conducción y al funcionamiento de los canales de riego Santa Ana, Cámara N° 7 Suncho Wayco, Portillo pertenecientes a la red principal de canales del P.M.S.J.?

### **1.2.3. Sistematización del Problema**

Lo temas específicos que se han planteado y observado se los plantea en sub preguntas:

- ¿Cuál ha sido el último trabajo de mantenimiento realizado en los canales principales del P.M.S.J.?

- ¿De qué manera afecta la falta de mantenimiento de los canales de riego principales del P.M.S.J. y qué relación tienen con la eficiencia de conducción?
- En caso que exista un exceso de pérdidas de agua en los canales mencionados, ¿qué medidas o alternativas se utilizarán para dar solución a este problema?
- ¿Cuáles han sido los resultados obtenidos de investigaciones realizadas sobre la eficiencia de conducción en otros estudios realizados a nivel nacional e internacional?

### **1.3.OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar la eficiencia de conducción de agua en canales revestidos de H<sup>o</sup>C<sup>o</sup>, aplicados a los canales Santa Ana, cámara N<sup>o</sup>7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar y evaluar el estado actual de los canales Santa Ana, cámara N<sup>o</sup>7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto.
- Determinar los caudales de entrada y de salida de cada canal de riego.
- Procesar y tabular la información obtenida en campo.
- Obtener valores representativos, con los cuales se podrá tener un estimativo del porcentaje total de pérdida de agua en los canales.
- Proponer estrategias para minimizar las pérdidas de agua en canales y así mejorar la eficiencia de los mismos.
- Elaborar curvas de calibración de caudales en las secciones de inicio de cada canal.

### **1.4.ALCANCE Y DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO**

La investigación tiene un alcance referencial para los profesionales que se dedican a trabajos correspondientes a determinar las pérdidas de agua en canales de riego por gravedad y en especial a los regantes y autoridades del Proyecto San Jacinto, a quienes les facilitará tomar una decisión frente al problema de pérdidas de agua producidas actualmente.

En el presente trabajo solo se determinarán la eficiencia de conducción, en los canales principales Santa Ana, cámara N°7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto.

El presente trabajo solo se limitará a obtener información de las siguientes variables: caudales de ingreso y de salida de cada tramo, el estado de agrietamiento del canal y pérdidas de agua en los canales de riego, para lo cual se necesitó realizar mediciones de: secciones del canal en el punto de ingreso y salida, tirantes mínimos, normales y máximos, velocidad media del flujo; mas no se consideró para el trabajo de investigación las siguientes variables: rugosidad del revestimiento del canal, aportes por lluvias, zonas probables a la evaporación; por razones de no contar con condiciones favorables para el desarrollo de estudio de estas variables.

## **1.5.JUSTIFICACIÓN**

### **1.5.1. Técnica**

La presente investigación se realiza con el propósito de proponer parámetros de evaluación en la eficiencia de conducción en los canales de riego Santa Ana, cámara N°7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto, de ahí en adelante tomar en cuenta las acciones a considerarse y realizarse en la infraestructura del canal de riego, para prever y mantener las condiciones óptimas para conducción de los caudales requeridos y así mismo disminuir las pérdidas de agua.

También se instalarán en lugares estratégicos, puntos de control, donde se podrán medir tirantes de agua, para la obtención de caudales, con ayuda de curvas de calibración, las cuales serán entregadas al personal a cargo de la operación y mantenimiento de los canales de riego.

### **1.5.2. Social**

Evitar las pérdidas de agua en canales puede ser justificado por diversas razones entre las cuales la fundamental es el ahorro de agua, así mismo el aumento de área regable, que puede llegar a incrementar los siguientes beneficios para los regantes de las comunidades que cuentan con el servicio, en especial cuando el agua disponible es escasa, o se ha llegado al máximo de aprovechamiento posible de una fuente de abastecimiento.

### 1.5.3. Institucional

El estudio realizado contribuirá a la institución San Jacinto, regantes y organismos encargados de administrar estos servicios, con información básica para la toma de decisiones en la mejora del requerimiento de la dotación de agua, implementación de nuevas políticas que direccionen hacia la sostenibilidad de este servicio.

### 1.5.4. Académica

La investigación servirá como referencia para los estudiantes y profesionales que se dedican a trabajos correspondientes a determinar las pérdidas de agua en canales de riego por gravedad, de igual manera servirá como información básica comparación para futuros estudios realizados en los canales del P.M.S.J.

Asimismo, los puntos de medición y las curvas de calibración servirán como punto de partida, para que futuros profesionales puedan realizar comparaciones de tirantes y de caudales.

## 1.6.MARCO DE REFERENCIA

### 1.6.1. Teórico

En la determinación de la eficiencia de conducción en canales abiertos se aplicarán los siguientes conceptos que se detallan a continuación:

#### **Clasificación de las conducciones libres**

Las conducciones libres pueden clasificarse en forma general canales naturales y artificiales.

Los **canales naturales** incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre, también son consideradas como canales abiertos naturales.

Los **canales artificiales** son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano: canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras, etc., así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos

determinados. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirá, por tanto, resultados bastantes similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño.

### **Canales con Revestimiento de Hormigón Ciclópeo.**

Los canales son las estructuras básicas para conducir el agua de riego desde una obra de toma hacia los puntos de entrega en los cultivos.

El canal de revestimiento de Hormigón ciclópeo es el canal en el cual se emplaza el concreto simple en la sección del canal antes perfilado, de acuerdo a la geometría. Este tipo de revestimiento puede instalarse usando encofrados normales (madera) o modernos (metálicos), además de materiales como cemento, agregados, asfalto, entre otros; con los cual se obtiene un canal estable y con mínimas pérdidas de agua durante toda su vida operativa.

En general es un revestimiento de mayor costo porque la construcción es relativamente compleja y de gran envergadura, debiendo utilizarse una alta cantidad de mano de obra. En su gran mayoría, el canal adopta una sección trapezoidal o cuadrada, por facilidad en la obra.

Los revestimientos en un canal se construyen de varios tipos de material. El llamado de superficie dura puede ser a base de concreto simple, reforzado o lanzado a alta presión, de concreto asfáltico, de mampostería (piedra, ladrillo, bloques prefabricados, etc.).

### **El revestimiento en Canales, ofrece los siguientes beneficios:**

- **Aumento de la Capacidad del canal:** La eliminación de la erosión permite que el agua circule en los canales revestidos a mayor velocidad que en los de tierra, obteniéndose, como resultado, mayor caudal para igual sección.
- **Imposibilidad de roturas:** Si el canal es revestido resulta muy difícil la producción de roturas, y aún en el caso en que ocurrieran agrietamientos, la resistencia a la erosión del material del revestimiento impide el ensanchamiento de la abertura con lo cual se evita la posibilidad de consecuencias graves. Además, que este tipo de eventos pueden ser reparables.
- **Prevención de la erosión:** El revestimiento de los canales permite adoptar velocidades de escurrimiento más elevadas y radios de curvas horizontales

menores, lo que se traduce en longitudes y secciones menores, así como taludes más empinados que en los canales sin revestir.

- **Eliminación de vegetación:** En los canales sin revestimientos, tanto los taludes como el fondo tienden a cubrirse de vegetación, especialmente pastos y hierbas, aunque también suelen en algunos casos desarrollarse en las bermas arbustos y hasta árboles. El revestimiento impide considerablemente el crecimiento de la vegetación anulando los inconvenientes enumerados.

**Los canales de riego por sus diferentes funciones adoptan las siguientes denominaciones:**

- **Canal de primer orden:** Llamado también canal madre o de derivación y se le traza siempre con pendiente mínima, normalmente es usado por un solo lado ya que por el otro lado da con terrenos altos.
- **Canal de segundo orden:** Llamados también laterales, son aquellos que salen del canal madre y el caudal que ingresa a ellos, es repartido hacia los sub - laterales, el área de riego que sirve un lateral se conoce como unidad de riego.
- **Canal de tercer orden:** Llamados también sub -laterales y nacen de los canales laterales, el caudal que ingresa a ellos es repartido hacia los cultivos, el área de riego que sirve un sub - lateral se conoce como unidad de rotación.

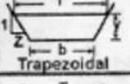
De lo anterior se deduce que varias unidades de rotación constituyen una unidad de riego, y varias unidades de riego constituyen un sistema de riego.

### **Elementos geométricos de una sección de canal**

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo de flujo.

Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección.

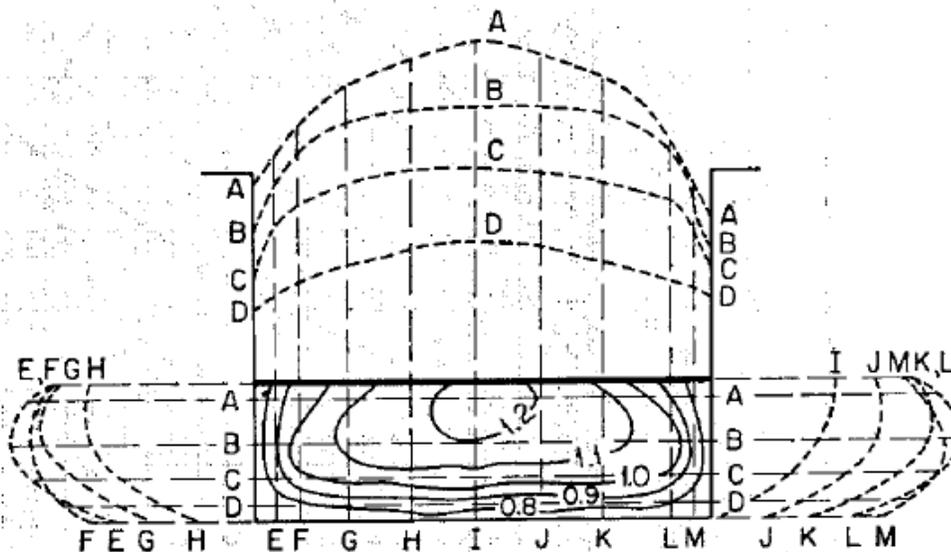
**Tabla 1.3. Relaciones geométricas de las secciones transversales más frecuentes.**

Sección	Área hidráulica A	Perímetro Mojado p	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 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	$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)D^2$	$\frac{1}{2}\theta D$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)D$	$\frac{(\text{sen}\frac{1}{2}\theta)D}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár

### Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad (Chow Ven Te. 2004).



**Gráfico N° 1.2. Distribución de velocidades en un canal rectangular.**

Fuente: Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow.

### **Eficiencia de conducción en canales**

La eficiencia de conducción se define como la relación que existe entre el caudal que llega al sistema de distribución y el caudal captado en la fuente de agua del sistema (río, embalse o reservorio). Usualmente se considera hasta el punto de entrega al sistema de distribución (canales secundarios e inclusive terciarios).

$$E_{f_c} = \frac{Q_s}{Q_I} * 100 \dots \dots \dots (1.1.)$$

Donde:

$E_{f_c}$  = Eficiencia de conducción, en %.

$Q_s$  = Caudal de salida del canal, en m<sup>3</sup>/s.

$Q_I$  = Caudal de ingreso del canal, en m<sup>3</sup>/s.

En los proyectos de riego nuevos, no se concibe solamente llevar el agua hasta nivel de bocatoma, sino que se está dando énfasis al sistema de distribución interna en la parcela, lo que redundará en un aumento en las eficiencias de riego.

En la medida que se conozcan las pérdidas de conducción, se mejorará la programación de los riegos y el control de la operación, pues permitirá atender los pedidos en el menor tiempo posible. Las pérdidas en un canal se pueden resumir en cuatro formas, a saber:

- **Pérdidas por Evaporación:** usualmente son de poca dimensión y no se toman en cuenta.
- **Pérdidas por Fugas:** se producen por el mal estado de las estructuras, desajustes en las compuertas, empaques viejos, etc. Si no se les da importancia, pueden ser de grandes dimensiones.
- **Pérdidas por Mal Manejo de la Operación:** se producen por descuidos del personal, que abren las compuertas más de lo debido, o bajan el tirante sin haber terminado el ciclo de riego, etcétera.
- **Pérdidas por Infiltración:** son las de más importancia; dependen del perímetro mojado, longitud del canal, coeficiente de infiltración y carga hidráulica. A este nivel, se reportan pérdidas que oscilan de 15 a 45% (Grassi C., 1988, 1).

La eficiencia de conducción de un canal se puede determinar si se aforan en el punto de entrada de caudal del canal y un punto de salida de ese canal; esa eficiencia solo se puede medir realizando muchos aforos.

### Método de medición de caudales

Existen varios métodos para el aforo de caudales, por ejemplo, cuando el agua se obtiene de diques, ríos, canales y acequias, pueden utilizarse vertederos, canaletas, orificios, molinetes, flotadores, colorantes y sales para aforarla.

Los métodos gravimétricos volumétricos de aforo directo, que consisten en tomar el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, se utilizan en la medición de pequeños gastos, como por ejemplo en el aforo de aspersores, goteros, micro aspersores y grifos caseros, en la calibración de sifones, y también durante pruebas de laboratorio con pequeñas bombas (Simón, A. 1994).

Por su parte las mediciones de escurrimiento pluvial y del flujo de aguas subterráneas, son difíciles de realizar con precisión, por lo que se usan métodos aproximativos que incluyen trazadores químicos y radioactivos.

Según Ven Te Chow (1994), *Los Métodos de Aforo*, en general, se pueden clasificar en tres grupos, mismos que se presentan a continuación:

- a) **Método de aforo directo:** Expresan el gasto como una función de volumen sobre tiempo ( $Q = V/t$ ). Entre ellos se tiene el aforo gravimétrico, volumétrico, químico, y los medidores de hélice, fabricados con el mismo principio. Otro método de aforo directo consiste en medir el descenso en el nivel del agua y el tiempo de vaciado de un depósito con dimensiones conocidas.
- b) **Método Área – velocidad:** Expresan el gasto como producto del área transversal de la corriente, multiplicada por su velocidad promedio ( $Q = A*v$ ). Normalmente el área perpendicular al flujo, se obtiene midiendo la geometría de la sección transversal y, la velocidad de caudal, se puede determinar con molinetes, flotadores, tubos Pívor, etc.
- c) **Método que emplea secciones contraídas y otros dispositivos:** Se caracterizan por expresar el gasto como una función exponencial de la forma:

$$Q = K * h^x \dots \dots \dots (1.2.)$$

Donde:

$Q$  = Caudal, en  $m^3/s$

$h$  = Es la carga hidráulica, en m.

$K$  = Coeficiente de descarga.

$x$  = Coeficiente que depende de las dimensiones del canal.

La variable de medición es la carga hidráulica y durante una calibración cuidadosamente deben determinarse  $K$  y  $x$ , previamente. Dentro de esta categoría se encuentran los vertederos, orificios, canales Parshall, medidores Venturi, compuertas comerciales, sifones y tubos cortos.

Los métodos basados en la velocidad y sección, son los más empleados; se requiere medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media de este flujo.

Los métodos más conocidos de aforos de velocidad y sección son: El método del Correntómetro, en el cual, 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 grande sean los caudales o más altas sean las velocidades, mayor debe ser el tamaño del equipo.

### 1.6.2. Conceptual.

Con base a la teoría presentada, se define y delimita conceptualmente los términos que pueden aparecer involucrados en las variables de investigación.

**Área mojada (A)**, es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.

**Canal:** Estructura hidráulica que conduce agua de riego desde la toma de captación hacia otro u otros canales o hacia el punto de entrega de una parcela del regante.

**Caudal:** Cantidad de agua que pasa por una sección transversal de un conducto en un determinado tiempo.

**Eficiencia de conducción:** Se define como la relación que existe entre el caudal que llega al sistema de distribución y el caudal captado en la fuente de agua del sistema

**Espejo de agua (T):** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

**Infraestructura de riego:** Red de canales laterales de todos los ordenes existentes, así como las obras de arte construidas a lo largo de ellos (Tomas, Aforadores de agua, sifones, alcantarillas, disipadores de energía, etc.).

**Isotaca:** Línea que une puntos de igual velocidad en un fluido, como el agua o el viento.

**Limnómetro:** El limnómetro o estación limnométrica es un instrumento que permite registrar y transmitir la medida de la altura de agua (en un punto determinado) de un río,

una cuenca. Generalmente las alturas se miden en metros o centímetros. La medida de la altura se puede convertir en estimación del caudal del río gracias a una curva de calibración.

**Molinete Hidráulico:** Un molinete es un dispositivo empleado para la medición del gasto del agua en canales o ríos. Específicamente sirve para conocer la velocidad de una corriente o flujo de agua.

**Perímetro mojado (P):** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

**Rugosidad superficial:** La rugosidad superficial se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo.

**Sedimento:** Conjunto de partículas sólidas que queda depositado en el fondo del canal el cual transporta agua.

**Tirante de agua (y):** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.

### 1.6.3. Espacial

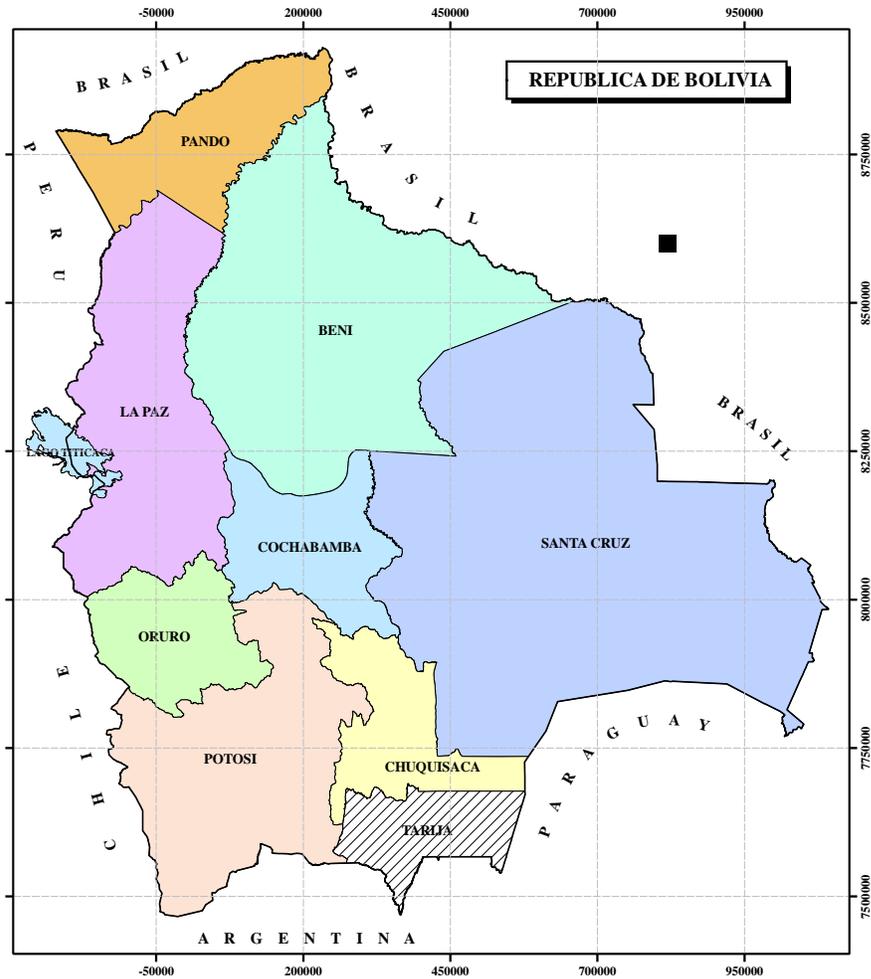
#### **Localización del área de estudio**

##### **Macro localización**

Definiendo la macro localización del proyecto, podemos decir que el proyecto está localizado en el departamento de Tarija ubicado al sur de Bolivia, limita al norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con la República Argentina, al este con la República del Paraguay y al oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí.

Geográficamente se encuentra entre los paralelos 20° 53'00" y 22° 52'30" de Latitud Sur y los meridianos 65°25'48" y 62° 15'34" de Longitud Oeste

Tiene una extensión territorial de 37.623 km<sup>2</sup> que representa el 3,42% del territorio nacional (Medrano Soriano Jaime, Cajías de la Vega Fernando. 1996).



*Gráfico N° 1.3. Plano de Ubicación Departamental.*

Fuente: Geografía e Historia de Bolivia.

### **Micro localización**

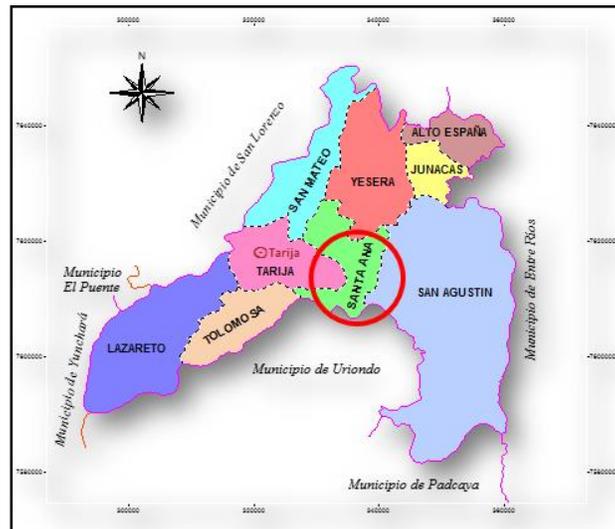
El proyecto se encuentra ubicado en la provincia Cercado al Sur Oeste del departamento de Tarija.

El Municipio de Cercado está ubicado en el Valle Central del Departamento de Tarija y es la única sección municipal de la provincia Cercado, limita al norte y oeste con la provincia Méndez, al este con la provincia O'Connor y al Sur con la las provincias Avilés y Arce.



**Gráfico N° 1.4. División Política del Departamento de Tarija.**

Fuente: Atlas Bolivia Cima



**Gráfico N° 1.5. Ubicación regional de la zona del proyecto**

Fuente: Atlas Bolivia Cima

### Descripción de los canales principales de riego del Proyecto Múltiple San Jacinto

- a) **Canal de riego de la zona Portillo:** Ubicado aproximadamente a 5 minutos en vehículo de la tranca “El Portillo” sobre la carretera a Bermejo. Cuenta con una obra de toma de H° A°, compuerta cilíndrica de regulación, canal con revestimiento de H° C°, que alimenta a los sectores de riego de la zona Portillo, con una longitud de 945 m.



**Gráfico N° 1.6. Ubicación del canal principal de la zona Portillo**

Fuente: Google Earth.

**P1: Punto donde inicia el canal principal**

Latitud: 21°34'41,87"S

Longitud: 64°40'5,19"O

Altura: 1861 m.s.n.m.

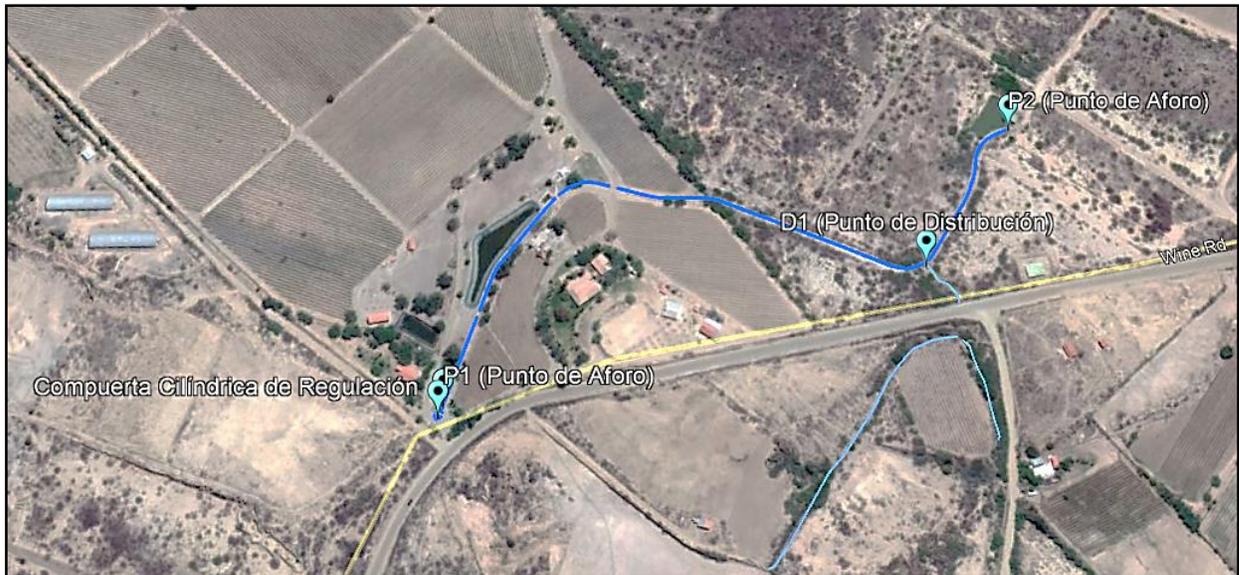
**P2: Punto donde finaliza el canal principal**

Latitud: 21°34'12,62"S

Longitud: 64°39'50,62"O

Altura: 1858 m.s.n.m.

- b) Canal de riego zona Santa Ana:** Ubicado aproximadamente a 20 minutos en vehículo del cruce de la carretera a Bermejo y el camino de piedra hacia las bodegas Singani Casa Real. Cuenta con una obra de toma de H° A°, compuerta cilíndrica de regulación, canal con revestimiento de H° C°, que alimenta a los sectores de riego de la zona Santa Ana, con una longitud de 596 m.



**Gráfico N° 1.7. Ubicación del canal principal Santa Ana.**

Fuente: Google Earth.

**P1: Punto donde inicia el canal principal**

Latitud: 21°35'7,00"S

Longitud: 64°36'46,63"O

Altura: 1866 m.s.n.m.

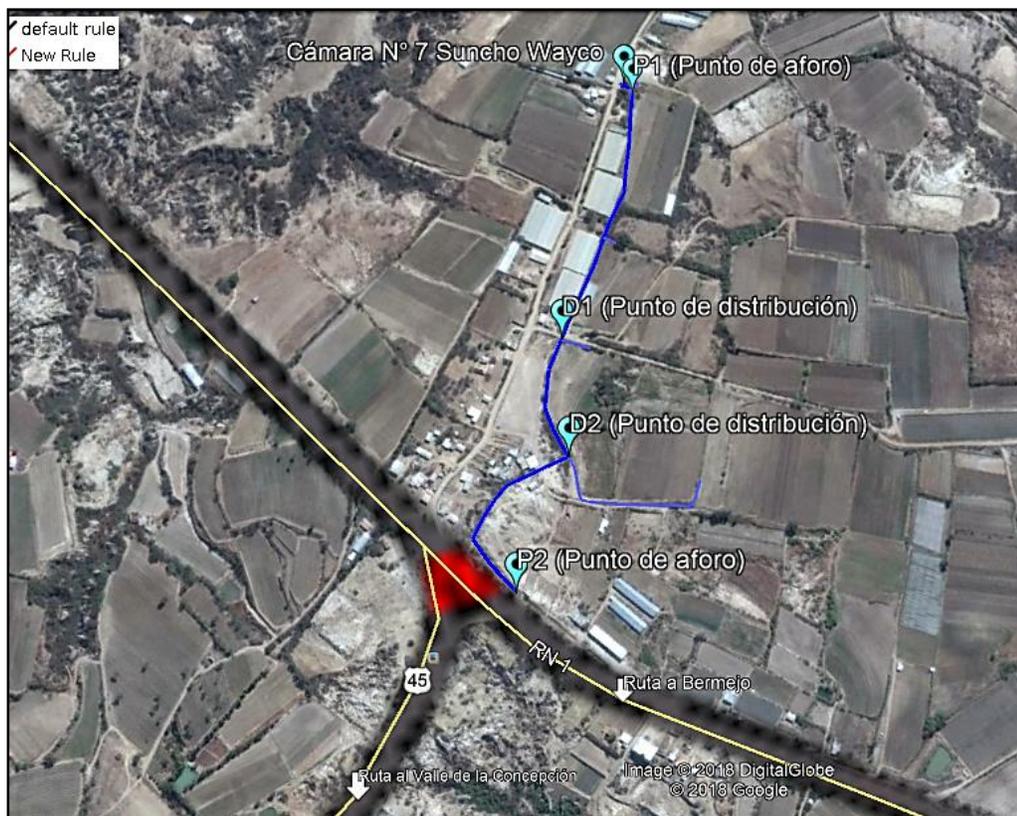
**P2: Punto donde finaliza el canal principal**

Latitud: 21°34'58,52"S

Longitud: 64°36'33,20"O

Altura: 1865 m.s.n.m.

- c) **Canal de riego Cámara N° 7 Suncho Wayco:** Ubicado aproximadamente a 5 minutos en vehículo del cruce de la carretera a Bermejo y la carretera hacia el Valle de la Concepción. Cuenta con una obra de toma de H° A°, con una cámara rompe presión, canal con revestimiento de H° C°, que alimenta a los sectores de riego de la zona de Suncha Wayco, con una longitud de 728 m.



**Gráfico N° 1.8. Ubicación del canal principal Suncho Wayco.**

Fuente: Google Earth.

**P1: Punto donde inicia el canal principal**

Latitud: 21°37'46.36"S

Longitud: 64°37'38.46"O

Altura: 1800 m.s.n.m.

**P2: Punto donde finaliza el canal principal**

Latitud: 21°38'4.02"S

Longitud: 64°37'49.38"O

Altura: 1798 m.s.n.m.

**Descripción física del área del proyecto**

**Clima:**

La ciudad de Tarija posee un clima templado, con temperaturas oscilan entre 0° las mínimas, 18° la media y 38° la máxima. La precipitación media anual es de 36.6 mm.

con periodos de lluvia de 1 hora, vientos predominantes del sur-este con una velocidad de 8.3 km/h.

### **Relieve Topográfico:**

El área del proyecto posee un relieve topográfico con zonas aplanadas y con leves depresiones con una pendiente de 3% aproximadamente.

### **Precipitación Pluvial:**

La precipitación pluvial es muy variable de un año a otro y se encuentra irregularmente distribuida en el curso del año. La precipitación promedio anual es de 600 mm. Las lluvias se inician en septiembre y se prolongan hasta marzo, siendo mayores en los meses de enero a marzo y muy escasas entre mayo y setiembre (Datos obtenidos del SENAMHI).

#### **1.6.4. Temporal**

La determinación de la eficiencia de conducción en los canales principales del P.M.S.J. se realizará antes de la época de estiaje, en los meses de marzo y abril de 2018.

### **1.7. HIPÓTESIS**

#### **1.7.1. Hipótesis de la investigación**

La eficiencia de conducción en los canales de riego Santa Ana, cámara n°7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto, es baja debido a las pérdidas de agua que se dan, por el estado de agrietamiento y fugas en las estructuras que interviene en la operación del canal.

#### **1.7.2. Variables**

##### **Variables Independientes**

- Tirantes de agua
- Ancho de la superficie libre del canal
- Velocidades de flujo en la sección del canal

##### **Variables Dependientes**

- Caudales de ingreso y de salida de cada canal
- Eficiencia de conducción
- Pérdidas de agua en el tramo de canal analizado

*Tabla 1.4. Definiciones conceptuales y operacionales de las variables*

VARIABLES INDEPENDIENTES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL		
		INDICADORES	UNIDADES	NOMENCLATURA
Tirantes de agua	Distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre del agua.	Profundidad de flujo, obtenido midiendo en campo con regla milimetrada.	(m)	(y)
Ancho de la superficie libre del canal	Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.	Ancho de la superficie libre del canal, medido con flexómetro.	(m)	(b)
Velocidad de flujo en la sección del canal	Distancia que recorre un flujo de agua, en un tiempo determinado.	La medición será de acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geolical Survey.	(m/s)	(v)
VARIABLES DEPENDIENTES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL		
		INDICADORES	UNIDADES	NOMENCLATURA
Caudales de ingreso y salida del canal	Volumen de agua que pasa por una sección de canal determinada, en una unidad de tiempo, de una corriente líquida.	Los caudales de ingreso y de salida, obtenidos por mediciones de velocidades en la sección, con el equipo MF pro (medidor de caudal magnético - inductivo).	(l/s)	$Q_i, Q_s$
Eficiencia de conducción en los canales de riego.	Relación que existe entre el caudal que llega al sistema de distribución y el caudal captado en la fuente de agua del sistema.	Eficiencia de conducción en canales de riego.	(%)	( $E_f$ )
Pérdidas de agua en el tramo de canal analizado	Cantidad de agua que se pierde, debido a la infiltración, fugas en las estructuras que intervienen en la operación de canales, evaporación, etc.	Valores obtenidos analizando el caudal que ingresa y sale del tramo de canal.	(%)	

Fuente: Elaboración propia.

### 1.7.3. Relación entre variables

Para determinar la eficiencia de conducción se utiliza la siguiente fórmula:

$$E f_c = \frac{Q_S}{Q_I} * 100 \dots \dots \dots (1.3.)$$

Donde:

$E f_c$  = Eficiencia de conducción, en %.

$Q_S$  = Caudal de salida del canal, en m<sup>3</sup>/s.

$Q_I$  = Caudal de ingreso del canal, en m<sup>3</sup>/s.

Para lo cual se necesita saber los caudales de ingreso y salida que pasa por la sección transversal seleccionada, por lo tanto, se utiliza las ecuaciones:

$$Q_n = v_n * A_n \dots \dots \dots (1.4.)$$

$$A = y * b \dots \dots \dots (1.5.)$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \dots \dots \dots + Q_n \dots (1.6.)$$

Donde:

$Q_T$  = Caudal total que pasa por la sección transversal, en l/s.

$v$  = Velocidad del flujo de agua medido con el equipo, en m/s.

$b$  = Ancho del espejo de agua, en m.

$y$  = Profundidad del agua o tirante, en m.

Las pérdidas de agua en el tramo de canal vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$Pérdidas = (Q_I - Q_S) * 100 \dots \dots \dots (1.6.)$$

El valor de las pérdidas de agua esta expresado en %.

**CAPÍTULO 2**  
**FLUJO EN CONDUCCIONES ABIERTAS Y SUS**  
**VARIABLES**

## FLUJO EN CONDUCCIONES ABIERTAS Y SUS VARIABLES

### 2.1.GENERALIDADES

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo, son similares en muchos aspectos, pero se diferencian en un aspecto importante. El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no lo tiene. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica.

A pesar de la similitud que existen entre estos dos tipos de flujo, es mucho más difícil resolver problemas de flujo en canales abiertos que en tuberías a presión.

Las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre, puede cambiar con el tiempo y con el espacio, y también por el hecho de que la profundidad de flujo, el caudal y las pendientes del fondo del canal y de la superficie libre son interdependientes. A menudo, es difícil obtener datos experimentales confiables en el caso de flujo en canales abiertos.

En general, el tratamiento del flujo en canales abiertos es más empírico que el correspondiente a flujo en tuberías. El método empírico es el mejor método disponible en el presente y, si se aplica de manera cuidadosa, puede producir resultados de valor práctico.

**2.1.1. Tipos de flujo.** El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio de la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

#### **Flujo permanente y no permanente**

Esta clasificación obedece a la utilización del tiempo como variable. El flujo es permanente si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal, en todo el tiempo los elementos del flujo permanecen constantes Matemáticamente se puede representar:

$$\frac{\delta y}{\delta t} = 0; \quad \frac{\delta v}{\delta t} = 0; \quad \frac{\delta A}{\delta t} = 0; \quad etc. \dots \dots \dots (2.1.)$$

Si los parámetros cambian con respecto al tiempo, el flujo se llama no permanente, es decir:

$$\frac{\delta y}{\delta t} \neq 0; \quad \frac{\delta v}{\delta t} \neq 0; \quad \frac{\delta A}{\delta t} \neq 0; \quad etc. \dots \dots \dots (2.2.)$$

### Flujo uniforme y variado

Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como variable. El flujo es uniforme si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al espacio, es decir, en cualquier sección del canal los elementos del flujo permanecen constantes. Matemáticamente se puede representar:

$$\frac{\delta y}{\delta E} = 0; \quad \frac{\delta v}{\delta E} = 0; \quad \frac{\delta A}{\delta E} = 0; \quad \text{etc.} \dots \dots \dots (2.3.)$$

Si los parámetros varían de una sección a otra, el flujo se llama no uniforme o variado, es decir:

$$\frac{\delta y}{\delta E} \neq 0; \quad \frac{\delta v}{\delta E} \neq 0; \quad \frac{\delta A}{\delta E} \neq 0; \quad \text{etc.} \dots \dots \dots (2.4.)$$

El flujo variado a su vez se puede clasificar en gradual y rápidamente variado.

El flujo gradualmente variado, es aquel en el cual los parámetros hidráulicos, cambian en forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso, producida por la intersección de una presa en el cauce principal, elevándose el nivel del agua por encima de la presa, con efecto hasta variar kilómetros aguas arriba de la estructura.

El flujo rápidamente variado, es aquel en el cual los parámetros varían instantáneamente en una distancia muy pequeña, como es el caso del resalto hidráulico.

### Flujo laminar o turbulento

El comportamiento del flujo en un canal, está gobernado principalmente por los efectos de las fuerzas viscosas y de la gravedad en relación con las fuerzas de inercia del flujo.

En relación con el efecto de la viscosidad, el flujo puede ser laminar, de transición o turbulento. En forma semejante al flujo en conductos forzados, la importancia de la fuerza viscosidad se mide a través del número de Reynolds ( $R_e$ ), que relaciona las fuerzas de inercia de velocidad con fuerzas viscosas, definidas en este caso como:

$$R_e = \frac{vR}{\nu} \dots \dots \dots (2.5.)$$

Donde:

$R_e$  = Número de Reynolds.

$R$  = Radio hidráulico de la sección transversal, en m.

$v$  = Velocidad media, en m/s.

$\nu$  = Viscosidad cinemática del agua, en  $m^2/s$ .

En los canales se han comprobado resultados semejantes a flujos en tuberías, por lo que respecta a ese criterio de clasificación. Para propósitos prácticos, en el caso de un canal, se tiene:

- Flujo laminar para  $R_e < 580$ , en este estado las fuerzas viscosas son relativamente más grandes que las fuerzas de inercia.
- Flujo de transición para  $580 \leq R_e \leq 750$ , estado mixto entre laminar y turbulento.
- Flujo turbulento para  $R_e > 750$ , en este estado las fuerzas viscosas son débiles comparadas con las fuerzas de inercia.

En la mayoría de los canales, el flujo laminar ocurre muy raramente, debido a las dimensiones relativamente grandes de los mismos y a la baja viscosidad cinemáticas del agua.

### **Flujo crítico, subcrítico y supercrítico**

En relación con el efecto de la gravedad, el flujo puede ser crítico, subcrítico y supercrítico; la fuerza de gravedad se mide a través del número de Froude ( $F$ ), que relaciona fuerzas de inercia, de velocidad, con fuerzas gravitatorias, definidas en este caso como:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \dots \dots \dots (2.6.)$$

Donde:

$v$  = Velocidad media de la sección, en m/s.

$g$  = Aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ .

$L$  = Longitud característica de la sección, en m.

En canales, la longitud característica viene dada por la magnitud de la profundidad media o tirante medio  $y_{med} = \frac{A}{T}$ , con lo cual se tiene:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{T}}} \dots \dots \dots (2.7.)$$

Donde:

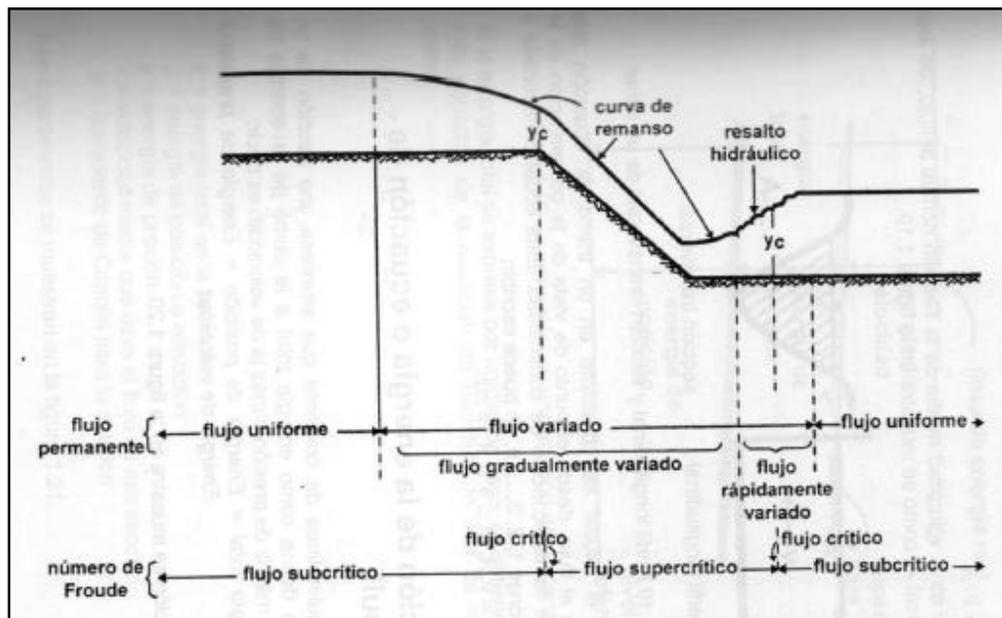
A= Área de la sección transversal del canal, en (m<sup>2</sup>).

T = Espejo de agua o ancho de la superficie libre del canal, en (m).

Entonces, por el número de Froude, el flujo puede ser:

- Flujo subcrítico si  $F < 1$ , en este estado las fuerzas de gravedad se hacen dominantes, por lo que el flujo tiene baja velocidad, siendo tranquilo y lento. En este tipo de flujo, toda singularidad, tiene influencia hacia aguas arriba.
- Flujo crítico si  $F = 1$ , en este estado, las fuerzas de inercia y gravedad están en equilibrio.
- Flujo supercrítico se  $F > 1$ , en este estado las fuerzas de inercia son más pronunciadas, por lo que el flujo tiene una gran velocidad, siendo rápido o torrentoso. En este tipo de flujo, toda singularidad, tiene influencia aguas abajo.

En el Gráfico N° 2.1., se muestra un resumen de los diferentes tipos de flujos que se presentan en canales abiertos.



**Gráfico N° 2.1. Tipos de flujos en canales abiertos.**

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár

### 2.1.2. Ecuación de continuidad

El caudal  $Q$ , o el volumen de líquido que circula por una sección transversal en la unidad de tiempo, está dado por:

$$Q = v * A \dots \dots \dots (2.8.)$$

Donde:

$Q$  = Caudal, en  $m^3/s$ .

$v$  = Velocidad media de flujo, en  $m/s$ .

$A$  = Área de la sección transversal, en  $m$ .

Cuando el caudal es constante en un tramo, la ecuación que gobierna el flujo, desde el punto de vista de la conservación de la masa, se llama ecuación de continuidad.

Esta ecuación aplicada a las secciones 1, 2, 3,..... n, se puede escribir:

$$v_1A_1 = v_2A_2 = \dots = v_nA_n = cte. \dots \dots \dots (2.9.)$$

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS CONDUCCIONES LIBRES

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen pueden clasificarse en **naturales y artificiales**.

Los **canales naturales** incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre, también son consideradas como canales abiertos naturales.

Los **canales artificiales** son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano: canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras, etc., así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos determinados. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirá, por tanto, resultados bastantes similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño.

**El canal artificial** por lo general es un canal largo con pendiente suave construido sobre el suelo, que puede ser o no revestido o revestido con piedras, concreto, cemento, madera o materiales bituminosos. **La canaleta** es un canal de madera, de metal, de concreto o de mampostería, a menudo soportado en o sobre la superficie del terreno para conducir el agua a través de una depresión. **La rápida** es un canal que tiene altas pendientes. **La caída** es similar a la rápida, pero el cambio en elevación se efectúa en una distancia corta. **La alcantarilla**, que fluye parcialmente llena, es un canal cubierto con una longitud comparativamente corta instalado para drenar el agua a través de terraplenes de carreteras o de vías férreas. **El túnel** con flujo a superficie libre es un canal cubierto comparativamente largo, utilizado para conducir el agua a través de una colina o cualquier obstrucción del terreno (Chow Ven Te. 2004).

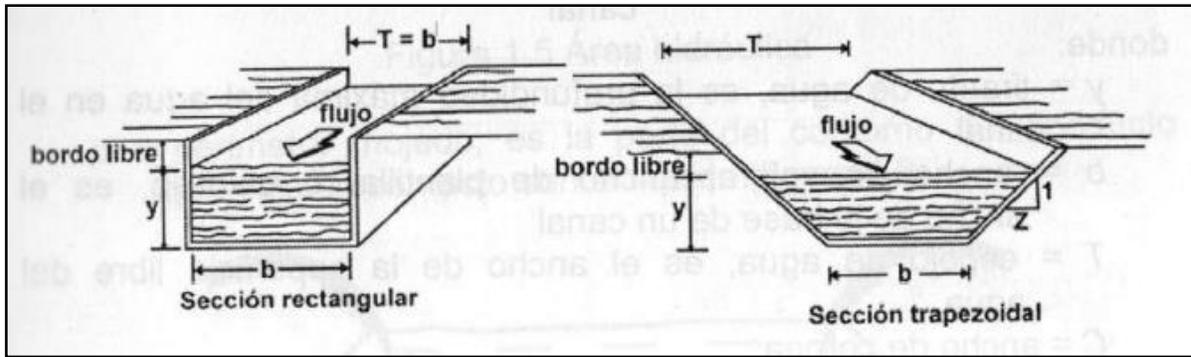
### **2.2.1. Canales con Revestimiento de Hormigón ciclópeo.**

Los canales son las estructuras básicas para conducir el agua de riego desde una obra de toma hacia los puntos de entrega en los cultivos.

El canal de revestimiento de hormigón ciclópeo es el canal en el cual se emplaza el concreto simple en la sección del canal antes perfilado, de acuerdo a la geometría. Este tipo de revestimiento puede instalarse usando encofrados normales (madera) o modernos (metálicos), además de materiales como cemento, agregados, asfalto, entre otros; con los cual se obtiene un canal estable y con mínimas pérdidas de agua durante toda su vida operativa.

En general es un revestimiento de mayor costo porque la construcción es relativamente compleja y de gran envergadura, debiendo utilizarse una alta cantidad de mano de obra. En su gran mayoría, el canal adopta una sección trapezoidal o cuadrada, por facilidad en la obra.

Los revestimientos en un canal se construyen de varios tipos de material. El llamado de superficie dura puede ser a base de concreto simple, reforzado o lanzado a alta presión, de concreto asfáltico, de mampostería (piedra, ladrillo, bloques prefabricados, etc.).



*Gráfico N° 2.2. Secciones transversales más frecuentes.*

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

**El revestimiento en Canales, ofrece los siguientes beneficios:**

- **Aumento de la Capacidad del canal:** La eliminación de la erosión permite que el agua circule en los canales revestidos a mayor velocidad que en los de tierra, obteniéndose, como resultado, mayor caudal para igual sección.
- **Imposibilidad de roturas:** Si el canal es revestido resulta muy difícil la producción de roturas, y aún en el caso en que ocurrieran agrietamientos, la resistencia a la erosión del material del revestimiento impide el ensanchamiento de la abertura con lo cual se evita la posibilidad de consecuencias graves. Además, que este tipo de eventos pueden ser reparables.
- **Prevención de la erosión:** El revestimiento de los canales permite adoptar velocidades de escurrimiento más elevadas y radios de curvas horizontales menores, lo que se traduce en longitudes y secciones menores, así como taludes más empinados que en los canales sin revestir.
- **Eliminación de vegetación:** En los canales sin revestimientos, tanto los taludes como el fondo tienden a cubrirse de vegetación, especialmente pastos y hierbas, aunque también suelen en algunos casos desarrollarse en las bermas arbustos y hasta árboles. El revestimiento impide considerablemente el crecimiento de la vegetación anulando los inconvenientes enumerados.

**Los canales de riego por sus diferentes funciones adoptan las siguientes denominaciones:**

- **Canal de primer orden:** Llamado también canal madre o de derivación y se le traza siempre con pendiente mínima, normalmente es usado por un solo lado ya que por el otro lado da con terrenos altos.
- **Canal de segundo orden:** Llamados también laterales, son aquellos que salen del canal madre y el caudal que ingresa a ellos, es repartido hacia los sub - laterales, el área de riego que sirve un lateral se conoce como unidad de riego.
- **Canal de tercer orden:** Llamados también sub -laterales y nacen de los canales laterales, el caudal que ingresa a ellos es repartido hacia los cultivos, el área de riego que sirve un sub - lateral se conoce como unidad de rotación.

De lo anterior se deduce que varias unidades de rotación constituyen una unidad de riego, y varias unidades de riego constituyen un sistema de riego.

## 2.3.PROPIEDADES DE LAS CONDUCCIONES LIBRES

### 2.3.1. Elementos geométricos de una sección de canal

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo de flujo.

Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección.

A continuación, se dan las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica.

- **Profundidad de flujo (y)**, es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.
- **Ancho superficial (T)**, es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área mojada (A)**, es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **Perímetro mojado (P)**, es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- **Radio hidráulico (R)**, es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado:

$$R = \frac{A}{P} \dots \dots \dots (2.10.)$$

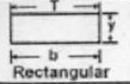
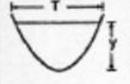
- **Profundidad hidráulica (D)**, es la relación entre el área mojada y el ancho de la superficie:

$$D = \frac{A}{T} \dots \dots \dots (2.11.)$$

- **Factor de sección para el cálculo de flujo crítico (Z)**, es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica:

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} \dots \dots \dots (2.12.)$$

**Tabla 2.1. Relaciones geométricas de las secciones transversales más frecuentes.**

Sección	Área hidráulica A	Perímetro Mojado p	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 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 <sup>2</sup>	$2y\sqrt{1 + Z^2}$	$\frac{Zy}{2\sqrt{1 + Z^2}}$	2Zy
 Circular	$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta) D^2$	$\frac{1}{2}\theta D$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right) D$	$\left(\text{sen}\frac{1}{2}\theta\right) D$ $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

### 2.3.2. Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad (Chow Ven Te. 2004). En el Gráfico N° 2.3. se ilustra el modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal. Los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones de canal con otras formas se ilustran en el gráfico N° 2.4.

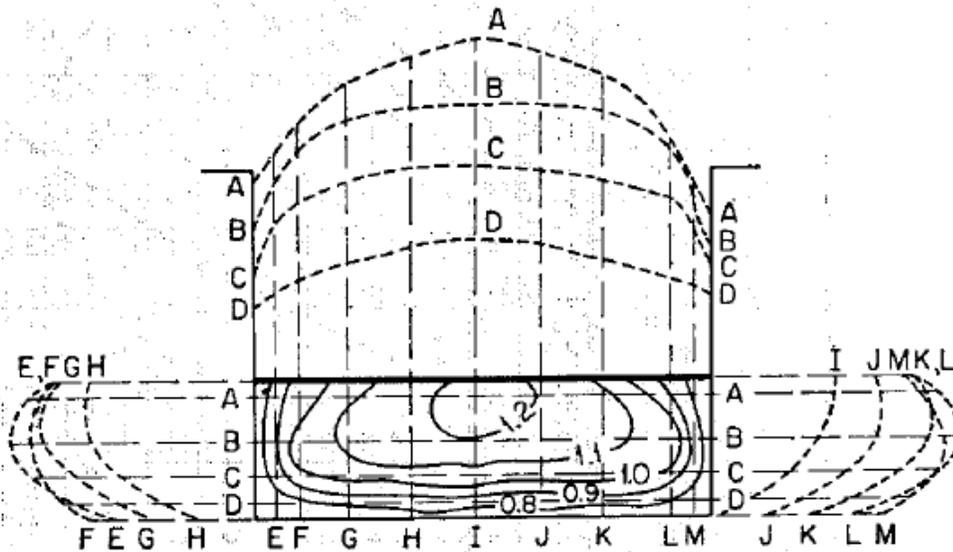


Gráfico N° 2.3. Distribución de velocidades en un canal rectangular.

Fuente: Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow.

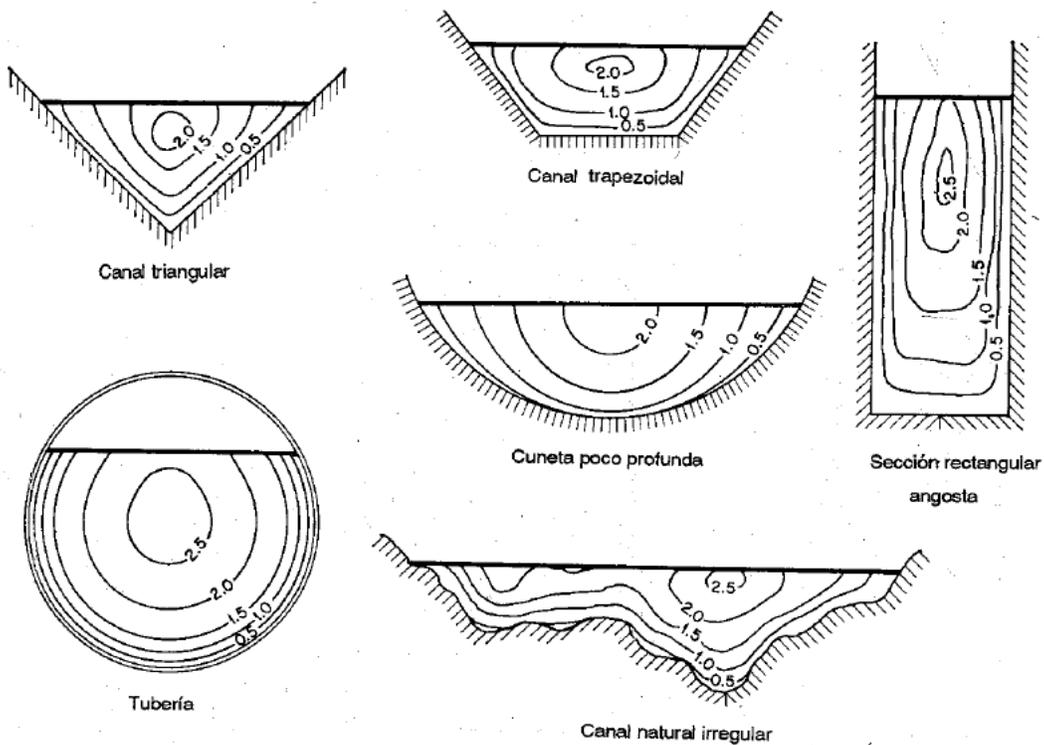


Gráfico N° 2.4. Distribución de velocidades en diferentes secciones de canal.

Fuente: Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow.

## 2.4. RÉGIMEN UNIFORME

El flujo es uniforme, si los parámetros hidráulicos (tirante, velocidad, área, etc.) no cambian con respecto al espacio, es decir, que las características; profundidad, área transversal, velocidad y caudal en cada sección del canal son constantes, por lo cual la pendiente de la línea de energía, la pendiente de la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del canal son numéricamente iguales y por lo tanto son paralelas.

Llamando:

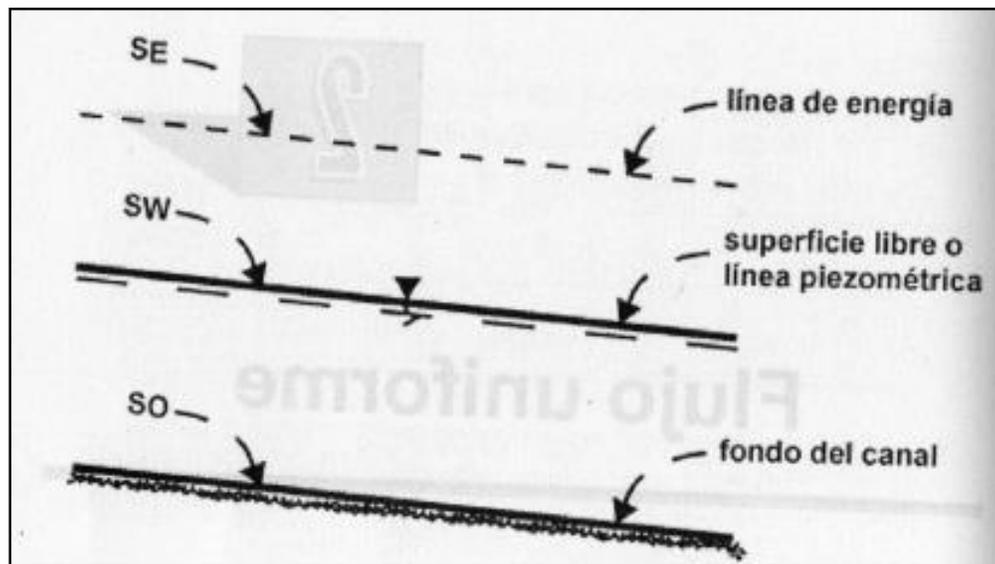
$S_E$  = Pendiente de la línea de energía

$S_W$  = Pendiente de la superficie libre de agua

$S_O$  = Pendiente del fondo del canal

Se tiene:

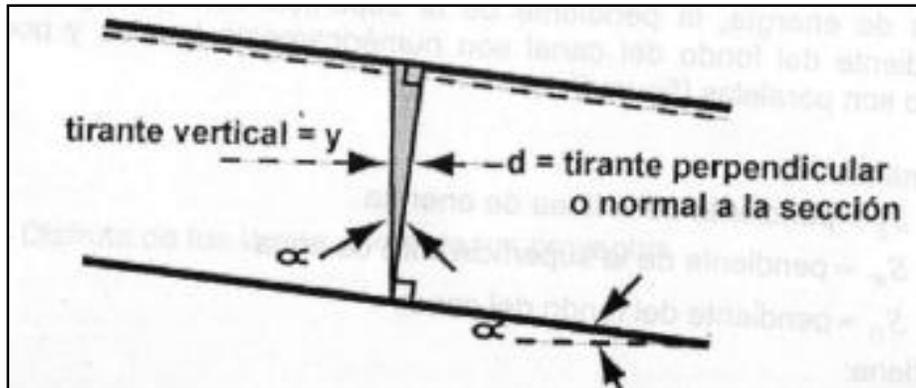
$$S_E = S_W = S_O = 0$$



**Gráfico N° 2.5. Pendientes: línea de energía, línea piezométrica y fondo del canal.**

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

Una de las condiciones para que se desarrolle un flujo uniforme en un canal, es que la pendiente sea pequeña, por lo que los tirantes normales se toman iguales a los verticales.



**Gráfico N° 2.6. Tirante vertical y normal (perpendicular a la sección)**

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

Del Gráfico N° 2.6., se tiene:

$$\cos \alpha = d/y \rightarrow y = d/\cos \alpha \dots \dots \dots (2.13.)$$

Si  $\alpha$  es pequeño, entonces,  $\cos \alpha \approx 1$ , luego:  $y = d$

El flujo uniforme, para cualquier propósito práctico, también es permanente ya que el flujo impermanente y uniforme no existe en la naturaleza.

Las condiciones ligadas al flujo uniforme y permanente se llaman normales. De ahí los términos tirantes normal ( $y_n$ ) velocidad normal, pendiente normal, etc.

Usualmente se considera que el flujo en canales y ríos es uniforme, sin embargo, la condición de uniformidad es poco frecuente y debe entenderse que únicamente, porque los cálculos para flujo uniforme son relativamente sencillos y porque estos aportan soluciones satisfactorias, se justifica esta simplificación.

#### **2.4.1. Fórmula de Chezy**

La fórmula se originó en 1768 cuando el ingeniero francés Antonie Chezy recibió el encargo de diseñar un canal para el suministro de agua de París.

Las experiencias realizadas por Chezy le permitieron establecer la primera fórmula del flujo uniforme, para el cálculo de la velocidad media en un conducto, la cual se expresa como:

$$v = C\sqrt{RS}$$

Donde:

$v$  = velocidad media en el canal, en m/s.

$C$  = Coeficiente de Chezy que depende de las características del escurrimiento y la naturaleza de las paredes.

$R$  = Radio hidráulico, en m.

$S$  = Pendiente de la línea de energía, para el flujo uniforme, es también la pendiente de la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del canal, en m/m.

### Deducción de la fórmula

Esta fórmula se obtiene del balance de fuerzas, que ocurren en un elemento fluido no sometido a acciones de aceleración.

Considerando un tramo de un canal de longitud  $L$  y cualquier sección como se ilustra en el Gráfico N° 2.7.

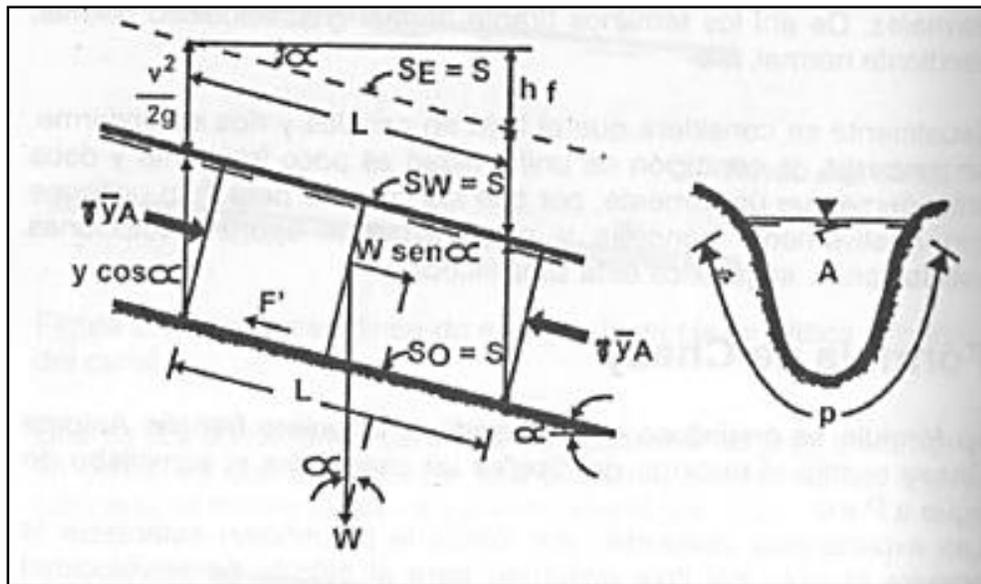


Gráfico N° 2.7. Definición esquemática de las variables para la derivación de la ecuación de Chezy

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

Del Gráfico N° 2.7., se tiene:

$$\text{sen } \alpha = \frac{h_f}{L}$$

Como en la práctica, la pendiente en los canales es pequeña ( $\alpha \ll 5^\circ$ ), entonces:

a)  $\text{sen } \alpha \approx \text{tg } \alpha = S = \frac{h_f}{L}$

Donde  $h_f$  es la disipación de energía en el tramo  $L$ .

b) También:

$$y \approx y \cos \alpha \text{ (tirante normal } \approx \text{ tirante vertical)}$$

Si el flujo es uniforme, el tirante y la velocidad media permanecen constantes, de ese modo, en las caras perpendiculares a la dirección del flujo, separadas entre si por la longitud  $L$ , actúan las fuerzas que completan la condición de equilibrio son: la componente del peso en la dirección del movimiento,  $F = W \sin \alpha$ , y la del rozamiento  $F'$ , entre el fluido y el contorno sólido. Esta última fuerza es directamente proporcional al área de contacto ( $pL$ ) y al cuadrado de la velocidad ( $v^2$ ), es decir,  $F' = fpLv^2$ , siendo  $f$  el coeficiente de fricción. Luego la ecuación de equilibrio será:

$$W \sin \alpha = fpLv^2 \dots \dots \dots (2.14.)$$

Donde:

$$W = \gamma V$$

$$V = AL \text{ (Volumen de control)}$$

Es decir:

$$W = \gamma AL \dots \dots \dots (2.15.)$$

Además:

$$\sin \alpha = S \dots \dots \dots (2.16.)$$

Sustituyendo (2.15.) y (2.16.) en (2.14.), resulta:

$$\gamma ALS = fpLv^2 \dots \dots \dots (2.17.)$$

Despejando  $v^2$ :

$$v^2 = \frac{\gamma}{f} * \frac{A}{p} * S$$

Pero:

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

Además, haciendo:

$\frac{\gamma}{f} = C'$  (constante que depende del fluido y las condiciones de rugosidad de las paredes del canal).

Resulta:

$$v^2 = C'RS$$

Extrayendo raíz cuadrada, se tiene:

$$v = \sqrt{C'} * \sqrt{RS}$$

Haciendo:

$$\sqrt{C'} = C$$

Se obtiene finalmente:

$$v = C\sqrt{RS}$$

La cual es la fórmula de Chezy.

## 2.5.FÓRMULA DE MANNING

Es la fórmula cuyo uso se halla más extendido a casi todas las partes del mundo. Proviene de considerar en la fórmula de Chezy un coeficiente C, de forma mónica, igual a:

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6} \dots \dots \dots (2.18.)$$

Luego, sustituyendo en la fórmula de Chezy, se tiene:

$$v = \frac{1}{n} * R^{1/6} * \sqrt{RS}$$

$$v = \frac{1}{n} * R^{1/6} * R^{1/2} * S^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} * R^{1/6+1/2} * S^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} * R^{4/6} * S^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \dots \dots \dots (2.19.)$$

Que es la fórmula de Manning, donde:

v = Velocidad, en m/s.

R = Radio hidráulico, en m.

S = Pendiente de la línea de energía, en m/m.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Como el uso de la fórmula de Manning está muy generalizada, se presenta esta fórmula en el sistema de unidades inglesas:

$$v = \frac{1.486}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \dots \dots \dots (2.20.)$$

Donde:

$v$  = Velocidad, en pies/s.

$R$  = Radio hidráulico, en pies.

$S$  = Pendiente de la línea de energía, en pies/pies.

$n$  = Coeficiente de rugosidad.

Combinando la fórmula de Manning y la ecuación de continuidad, la expresión para el cálculo del caudal que se obtiene es:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{2/3} * S^{1/2} \dots \dots \dots (2.21.)$$

Donde:

$Q$  = Caudal o gasto, en  $m^3/s$ .

$A$  = Área de la sección transversal, en  $m^2$ .

### 2.5.1. Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning.

No es raro que los ingenieros piensen que un canal tiene un valor único de  $n$  para todas las ocasiones. En realidad, el valor de  $n$  es muy variable y depende de un cierto número de factores. Para seleccionar el valor de  $n$  apropiado para diferentes condiciones de diseño, resulta muy útil tener conocimiento básico de estos factores.

- a) **Rugosidad superficial.** La rugosidad superficial se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. Por lo general éste se considera como el único factor para la selección de un coeficiente de rugosidad, pero en realidad es solo uno de varios factores principales.
- b) **Vegetación.** La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, densidad, la distribución y del tipo de vegetación, y es muy importante en el diseño de pequeños canales de drenaje.
- c) **Irregularidad del canal.** Las irregularidades del canal incluyen irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo del canal. En canales naturales, tales irregularidades por lo general son producidas por la presencia de barras de arena, ondas de arena, crestas y depresiones y fosos y montículos en el lecho del canal. Estas irregularidades

introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores.

- d) Alineamiento del canal.** Curvas suaves con radios grandes producirán valores de  $n$  relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas de meandros severos incrementarán el  $n$ . Con base en pruebas de laboratorio llevadas a cabo en canaletas, Scobey, sugirió que el valor  $n$  se incrementa en 0.001 por cada 20 grados de curvatura en 100 pies de canal. Aunque es dudoso que la curvatura llegue a aumentar el valor de  $n$  en más de 0.002 ó 0.003, su efecto no debería ignorarse, debido a que la curvatura puede inducir la acumulación de material flotante y, por consiguiente, incrementar indirectamente el valor de  $n$  (Frederick C. Scobey, diciembre de 1993).
- e) Sedimentación y socavación.** En general, la sedimentación puede cambiar un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto que la socavación puede hacer lo contrario e incrementar el  $n$ . Sin embargo, el efecto dominante de la sedimentación dependerá de la naturaleza del material depositado.
- f) Obstrucción.** La presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puente y estructuras similares tiende a incrementar el  $n$ . La magnitud de este aumento depende de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.
- g) Tamaño y forma del canal.** No existe evidencia definitiva acerca del tamaño y la forma del canal como factores importantes que afecten el valor de  $n$ . Un incremento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir el  $n$ .
- h) Nivel y Caudal.** En la mayor parte de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento en el nivel y en el caudal. Cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados. Sin embargo, el valor de  $n$  puede ser grande en niveles altos si las bancas están cubiertas por pastos o son rugosas.
- i) Cambio estacional.** Debido al crecimiento estacional de las plantas acuáticas, hierbas, malezas, sauces y árboles en el canal o bancas, el valor de  $n$  puede

aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva. Este cambio estacional puede producir cambios en otros factores.

- j) Material en suspensión y carga de lecho.** El material en suspensión y la carga de lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

## 2.6.EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN EN CANALES

La eficiencia de conducción se define como la relación que existe entre el caudal que llega al sistema de distribución y el caudal captado en la fuente de agua del sistema (río, embalse o reservorio). Usualmente se considera hasta el punto de entrega al sistema de distribución (canales secundarios e inclusive terciarios).

$$Ef_c = \frac{Q_s}{Q_I} * 100 \dots \dots \dots (2.22.)$$

Donde:

$Ef_c$  = Eficiencia de conducción, en %.

$Q_s$  = Caudal de salida del canal, en m<sup>3</sup>/s.

$Q_I$  = Caudal de ingreso del canal, en m<sup>3</sup>/s.

En los proyectos de riego nuevos, no se concibe solamente llevar el agua hasta nivel de bocatoma, sino que se está dando énfasis al sistema de distribución interna en la parcela, lo que redundará en un aumento en las eficiencias de riego.

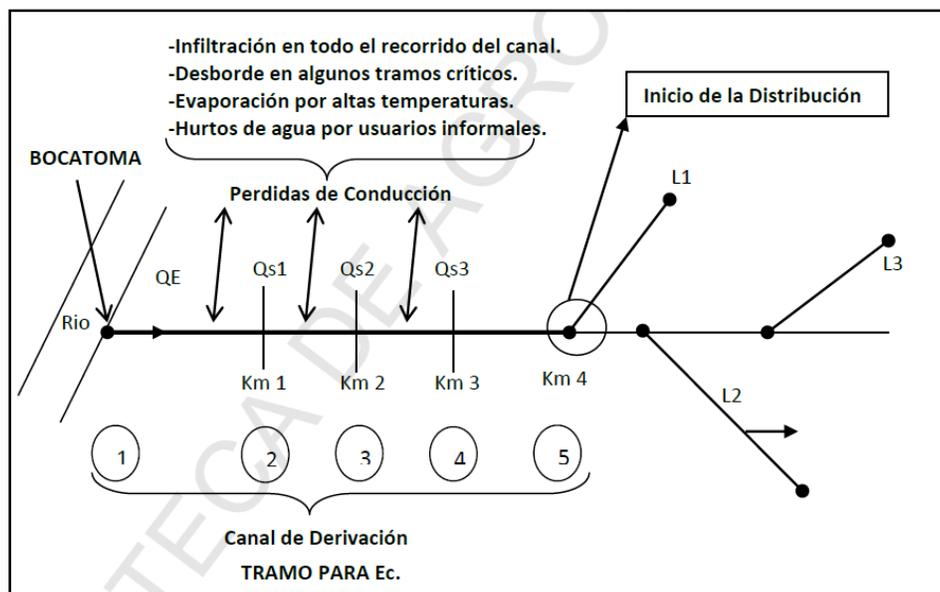
En la medida que se conozcan las pérdidas de conducción, se mejorará la programación de los riegos y el control de la operación, pues permitirá atender los pedidos en el menor tiempo posible. Las pérdidas en un canal se pueden resumir en cuatro formas, a saber:

- **Pérdidas por Evaporación:** usualmente son de poca dimensión y no se toman en cuenta.
- **Pérdidas por Fugas:** se producen por el mal estado de las estructuras, desajustes en las compuertas, empaques viejos, etc. Si no se les da importancia, pueden ser de grandes dimensiones.
- **Pérdidas por Mal Manejo de la Operación:** se producen por descuidos del personal, que abren las compuertas más de lo debido, o bajan el tirante sin haber terminado el ciclo de riego, etcétera.

- **Pérdidas por Infiltración:** son las de más importancia; dependen del perímetro mojado, longitud del canal, coeficiente de infiltración y carga hidráulica. A este nivel, se reportan pérdidas que oscilan de 15 a 45% (Grassi C., 1988, 1).

La eficiencia de conducción de un canal se puede determinar si se aforan en el punto de entrada de caudal del canal y un punto de salida de ese canal; esa eficiencia solo se puede medir realizando muchos aforos.

Así mismo la Eficiencia de Conducción ( $E_f$ ); permite evaluar el estado de Operación y Mantenimiento del canal principal o de derivación en el tramo desde la fuente de abastecimiento hasta que se empieza a distribuir el agua en los canales laterales  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ . (Ver Gráfico N° 2.8.).



*Gráfico N° 2.8. Representación de las pérdidas por conducción.*

Fuente: Manual de determinación de eficiencias de riego.

### 2.6.1. Agrietamiento en Estructuras de Hormigón

Al igual que otros materiales de construcción, se contrae y expande con los cambios de humedad y temperatura, y se deforma dependiendo de la carga y de las condiciones de apoyo. Pueden ocurrir grietas cuando no se han tomado las medidas necesarias en el diseño y la construcción para soportar dichos movimientos (Grant T. Halvorson, 1993).

### **2.6.2. Valores de Eficiencia de Conducción en Canales**

El primer concepto que se utilizó para estimar las pérdidas de agua de un sistema de riego fue el rendimiento de transporte y suministro. La mayor parte del agua procedía en aquel entonces de derivaciones de cursos de agua o de embalses, y las pérdidas de transporte eran con frecuencia excesivas (Israelsen y Hansen, Principios y Aplicaciones del Riego. 1985. 85).

La eficiencia de conducción depende de varios factores: longitud de los canales, amplitud del área regable, características del canal, tipo del revestimiento, grado de mantenimiento y de la modalidad de operación del sistema. Pero también depende del tipo de operación del sistema de riego: continuo o intermitente. A pesar de que la eficiencia de conducción es el componente más susceptible a ser mejorado por ejemplo mediante revestimientos con hormigones, pero no siempre se logra superar el 90% en situación con proyecto; generalmente varía entre 75 a 90%. En condiciones sin mejoramiento (sistema rústico) las eficiencias suelen reportar valores entre 45 a 60%; obviamente es muy variable de un sistema de riego a otro y de un área geográfica a otra.

### **2.7.MÉTODO DE MEDICIÓN DE CAUDALES**

Existen varios métodos para el aforo de caudales, por ejemplo, cuando el agua se obtiene de diques, ríos, canales y acequias, pueden utilizarse vertederos, canaletas, orificios, molinetes, flotadores, colorantes y sales para aforarla.

Los métodos gravimétricos volumétricos de aforo directo, que consisten en tomar el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, se utilizan en la medición de pequeños gastos, como por ejemplo en el aforo de aspersores, goteros, micro aspersores y grifos caseros, en la calibración de sifones, y también durante pruebas de laboratorio con pequeñas bombas (Simón, A. 1994).

Por su parte las mediciones de escurrimiento pluvial y del flujo de aguas subterráneas, son difíciles de realizar con precisión, por lo que se usan métodos aproximativos que incluyen trazadores químicos y radioactivos.

Según *Ven Te Chow* (1994), *Los Métodos de Aforo*, en general, se pueden clasificar en tres grupos, mismos que se presentan a continuación:

- d) Método de aforo directo:** Expresan el gasto como una función de volumen sobre tiempo ( $Q = V/t$ ). Entre ellos se tiene el aforo gravimétrico, volumétrico, químico, y los medidores de hélice, fabricados con el mismo principio. Otro método de aforo directo consiste en medir el descenso en el nivel del agua y el tiempo de vaciado de un depósito con dimensiones conocidas.
- e) Método Área – velocidad:** Expresan el gasto como producto del área transversal de la corriente, multiplicada por su velocidad promedio ( $Q = A*v$ ). Normalmente el área perpendicular al flujo, se obtiene midiendo la geometría de la sección transversal y, la velocidad de caudal, se puede determinar con molinetes, flotadores, tubos Pívorot, etc.
- f) Método que emplea secciones contraídas y otros dispositivos:** Se caracterizan por expresar el gasto como una función exponencial de la forma:

$$Q = K * h^x \dots \dots \dots (2.23.)$$

Donde:

$Q$  = Caudal, en  $m^3/s$

$h$  = Es la carga hidráulica, en m.

$K$  = Coeficiente de descarga.

$x$  = Coeficiente que depende de las dimensiones del canal.

La variable de medición es la carga hidráulica y durante una calibración cuidadosamente deben determinarse  $K$  y  $x$ , previamente. Dentro de esta categoría se encuentran los vertederos, orificios, canales Parshall, medidores Venturi, compuertas comerciales, sifones y tubos cortos.

Los métodos basados en la velocidad y sección, son los más empleados; se requiere medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media de este flujo.

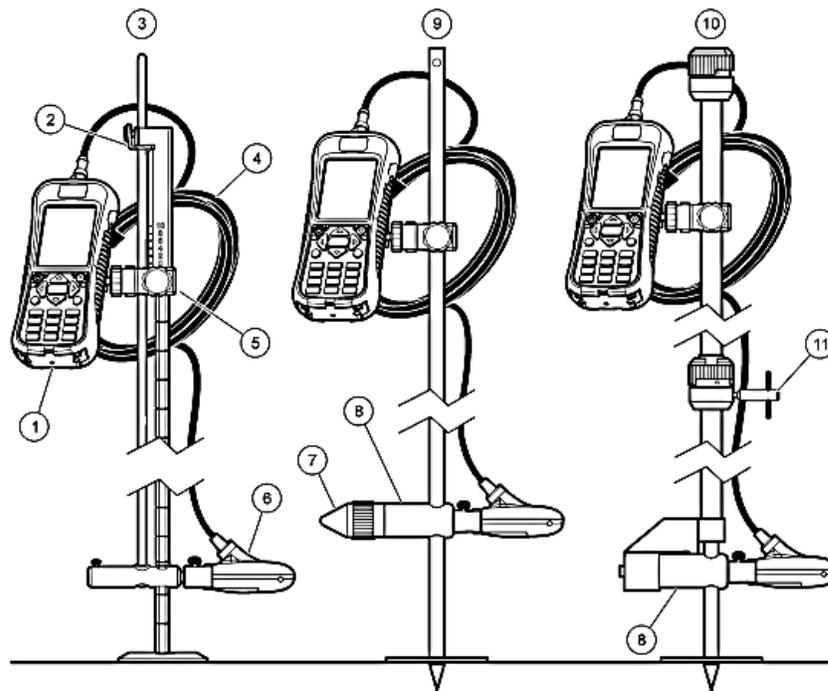
Los métodos más conocidos de aforos de velocidad y sección son: El método del Correntómetro, en el cual, la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado correntómetro, que mide la velocidad en un punto dado de la masa de agua. Existen varios tipos de correntómetros, siendo los más empleados los de hélice de los cuales hay de varios tamaños; cuando más grande sean los caudales o más altas sean las velocidades, mayor debe ser el tamaño del equipo.

### 2.7.1. OTT MF pro

El equipo utilizado fue el OTT MF pro es un medidor de caudal magnético-inductivo de fácil manejo y mantenimiento reducido para la medición rentable de caudales en cauces descubiertos.

El cálculo automático del caudal reduce notablemente el tiempo de permanencia en campo. El cabezal sensorial electromagnético está prácticamente exento de mantenimiento y es ideal para el uso tanto con velocidades de caudal reducidas, como con altas concentraciones de materia en suspensión.

La precisión del equipo es de  $\pm 2\%$  del valor medido  $\pm 0,015$  m/s (0 a 3 m/s) y  $\pm 4\%$  del valor medido  $\pm 0,015$  m/s (3 a 5 m/s).



1 Medidor portátil	7 Tornillo de bloqueo/liberación de altura del sensor (accesorio opcional)
2 Dispositivo de bloqueo/liberación de altura del sensor	8 Adaptador de la varilla de vadeo de 20 mm/HERES (accesorio opcional)
3 Varilla de vadeo de configuración superior (accesorio opcional)	9 Varilla de vadeo de 20 mm (accesorio opcional)
4 Cable del sensor	10 Varilla de vadeo HERES (accesorio opcional)
5 Montaje ajustable para el medidor portátil	11 Perilla de bloqueo/liberación de altura del sensor
6 Ensamblaje del sensor	

*Gráfico N° 2.9. Componentes del equipo.*

Fuente: Manual de instrucciones de funcionamiento OTT Mf pro, edición 6.

## Velocidad de medición

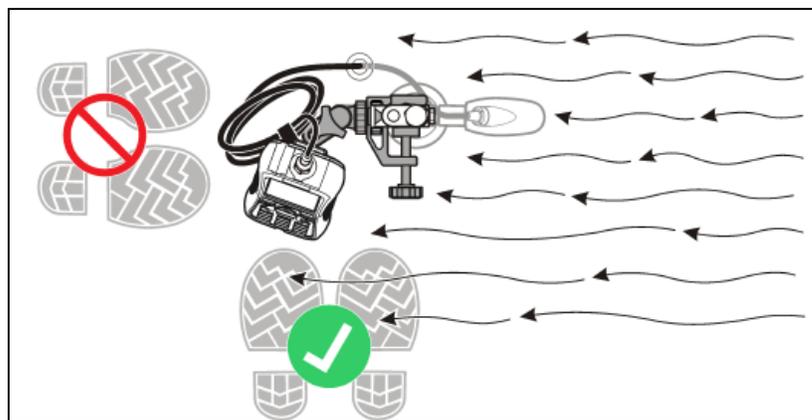
La calidad de la medición depende de la selección correcta de la sección transversal de una medida. Seleccione una sección de flujo con las siguientes características:

- Las direcciones de flujo en cada punto de medición a través del flujo son paralelas al banco y perpendiculares a la sección transversal.
- El cauce está estable y libre de rocas grandes, hierbas y obstrucciones que sobresalen como pilares que provocan turbulencias.

A menudo no es posible satisfacer completamente estas condiciones. Use el criterio para seleccionar la mejor sección posible y luego seleccione sección transversal.

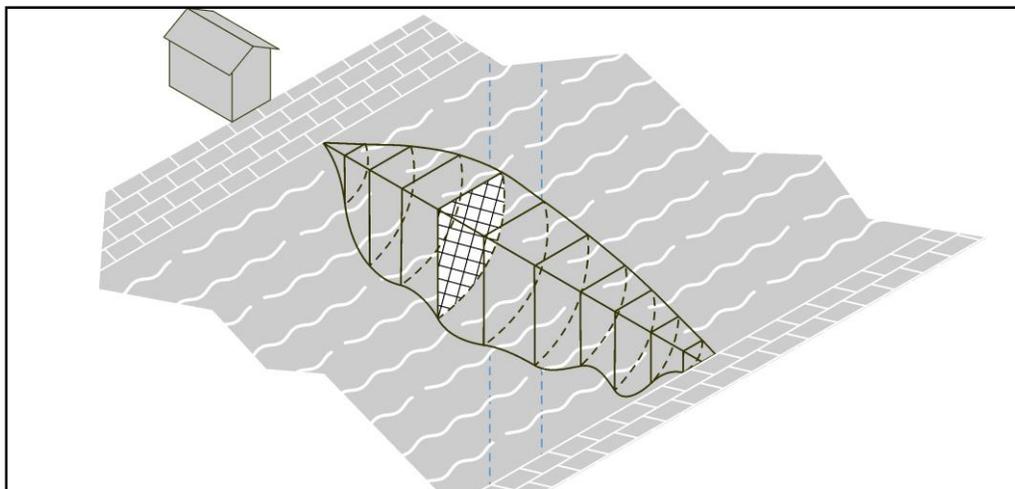
El procedimiento general para tomar mediciones de seguridad es en el río y en perfiles de flujo como se describen a continuación. Tome la primera medición en un perfil de flujo en la parte superior o inferior. Tome cada medición subsiguiente debajo de la última.

- En modo fijo, divida el canal en estaciones de igual ancho.
- Conduzca una medición de seguridad en cada estación. El medidor portátil muestra y almacena la información de profundidad y de velocidad medida.
- Cuando se completa el perfil de flujo, el medidor calcula automáticamente el flujo total.



*Gráfico N° 2.10. Posición del usuario.*

Fuente: Manual de instrucciones de funcionamiento OTT Mf pro, edición 6.



**Gráfico N° 2.11. Ejemplo de corte transversal típico**

Fuente: Manual de instrucciones de funcionamiento OTT Mf pro, edición 6.

La medición de la velocidad, de acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geological Survey, la sección transversal del canal se divide en franjas verticales por medio de un número determinado de verticales sucesivas, y las velocidades medias en verticales sucesivas, se determinan midiendo la velocidad a 0,6 de la profundidad de cada vertical, o tomando el promedio de las velocidades de 0,2 y 0,8 de la profundidad cuando se requieren profundidades más confiables.

**Tabla 2.2. Profundidades en las cuales se miden las velocidades con el molinete en función de la altura del tirante de agua.**

<b>Tirante de agua (cm)</b>	<b>Profundidad de lectura del Molinete</b>
< 15	$y/2$
$15 < y < 45$	$0,6 y$
> 45	$0,2 y - 0,8 y$ o $0,2y - 0,6 y - 0,8 y$

Fuente: Chow Ven Te, 1994. Hidrología Aplicada (1ra edición).

**CAPÍTULO 3**  
**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN**  
**DE LA EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN EN**  
**CANALES**

## METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN EN CANALES

### 3.1.TÉCNICAS UTILIZADAS

#### a) **Recopilación de la información**

La base de la presente investigación fue la recopilación de información, que consistió en la revisión de:

**Planos de ubicación**, se verificó la ubicación de los canales principales del P.M.S.J. en planos de AUTOCAD, cartas Geográficas del I.G.M. y Google Earth.

**Informes del plan de cultivo y riego**, que nos permitió conocer el área bajo riego declarada por los usuarios y el volumen de agua para la campaña agrícola.

**Memorias descriptivas de Proyectos**, con lo que se compararon algunas informaciones adicionales de los canales de riego, así como las características del sector de riego.

**Manuales del equipo OTT MF Pro**, el cual se utilizó para aprender a calibrar y manejar el equipo y así poder realizar las mediciones de una manera más eficiente.

**Manual de Operación y Mantenimiento**, donde se verificó las características de los canales de derivación del sistema de riego, así como el manejo y gestión de recursos dentro del ámbito de riego.

También se verificó las publicaciones referentes al tema, y elementos auxiliares como entrevistas, fotografías, croquis, entre otros.

#### b) **Procesamiento de la información**

En los planos de ubicación y fotografías aéreas se procedió a interpretar e identificar los canales de riego principales ya mencionados, así como las vías de accesos y comunicación, centros poblados, etc. En base a dicha información existente, se preparó un plano de cada canal de riego en donde se establecieron los tramos y puntos de aforo, coordenadas geográficas, y otros aspectos importantes del canal.

En cuanto a la información recopilada de los demás documentos se analizaron las fuentes, para luego completar el informe final de la investigación.

### **3.2.PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS AFOROS, UTILIZANDO EL MOLINETE**

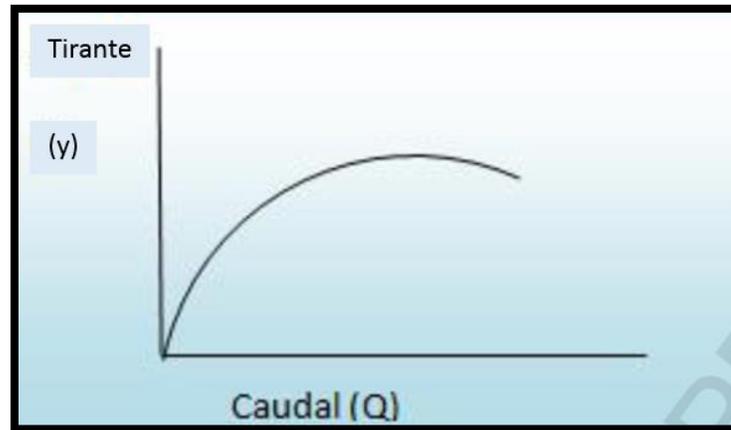
- El periodo en el cual se realiza el aforo, debe estar en concordancia con el periodo de uso del recurso hídrico.
- Se iniciará con la determinación y establecimiento de los puntos de aforo en cada canal.
- La sección de aforo debe estar libre de obstáculos, vegetación, irregularidades, etc., que puedan afectar la precisión de la medición.
- Los puntos de aforo están ubicados en el inicio y final de cada tramo del canal de riego (Portillo, Santa Ana y Suncho Wayco).
- Al momento de realizar el aforo, de existir compuertas prediales, estas deben ser cerradas para efectuar el aforo en el tramo respectivo.
- Las velocidades de flujo de agua en el canal deben ser medibles, descartándose secciones donde aparezcan zonas de aguas muertas, contracorriente, etc.
- El registro de aforos se debe realizar por cada canal un mínimo de 4 veces en diferentes días, tomando en cuenta la fecha, hora de inicio y fin del aforo.
- El equipo de medición de caudales debe estar completamente sumergido de forma de no incorporar distorsiones en la medida realizada.
- El sensor del equipo debe colocarse de forma perpendicular a la sección de aforo, paralelo al flujo de forma tal que mida la velocidad en ese punto.
- Se debe tomar 3 medidas o repeticiones del valor de la velocidad en cada punto de medida en la vertical respectiva. Independiente que, en las tres medidas realizadas, de valores muy parecidos, se considerará el promedio en dicho punto.
- Es recomendable comenzar tomando las medidas en una vertical desde el fondo del canal.
- La medición en cada punto, debe durar al menos 60 segundos, anotándose la velocidad obtenida.
- Para la calibración de la sección de aforo, se utilizará la tabla N° 3.1, mostrada a continuación.

*Tabla 3.1. Determinación del caudal en la sección transversal del canal.*

REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE							
CANAL:		CORRENTÓMETRO:			HORA:		
PROGRESIVA:		ALTURA DE LA MIRA:			LATITUD:		
FECHA:		ALTITUD:			LONGITUD:		
DATOS DE CAMPO				CÁLCULOS			
Nº	PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD (m/s)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	ANCHO DE LA SECCIÓN (m)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	CAUDAL (l/s)
1		0,8 y :					
		0,4 y :					
		0,2 y :					
2		0,8 y :					
		0,4 y :					
		0,2 y :					
3		0,8 y :					
		0,4 y :					
		0,2 y :					
4		0,8 y :					
		0,4 y :					
		0,2 y :					
5		0,8 y :					
		0,4 y :					
		0,2 y :					

Fuente: Elaboración propia.

- La curva de calibración se elaborará con los valores de los caudales a diferentes tirantes, como mínimo se debe realizar las mediciones en cuatro alturas diferentes, variando desde el tirante mínimo de demanda, hasta el tirante máximo del canal. A continuación, se muestra en el gráfico N° 3.1, la curva de calibración de la sección de aforo.



**Gráfico N° 3.1. Calibración de la sección de aforo ( $h$  vs  $Q$ )**

Fuente: Rodríguez Tandaypan, Eficiencia de conducción en canales de la comisión de usuarios Sausal.

- Una vez obtenida la curva de calibración en cada sección o punto de aforo del canal, se procede a medir los caudales con regla milimetrada, con cual se podrá obtener el valor del tirante de agua, y con ayuda de la curva de calibración determinar el caudal en dicha sección.

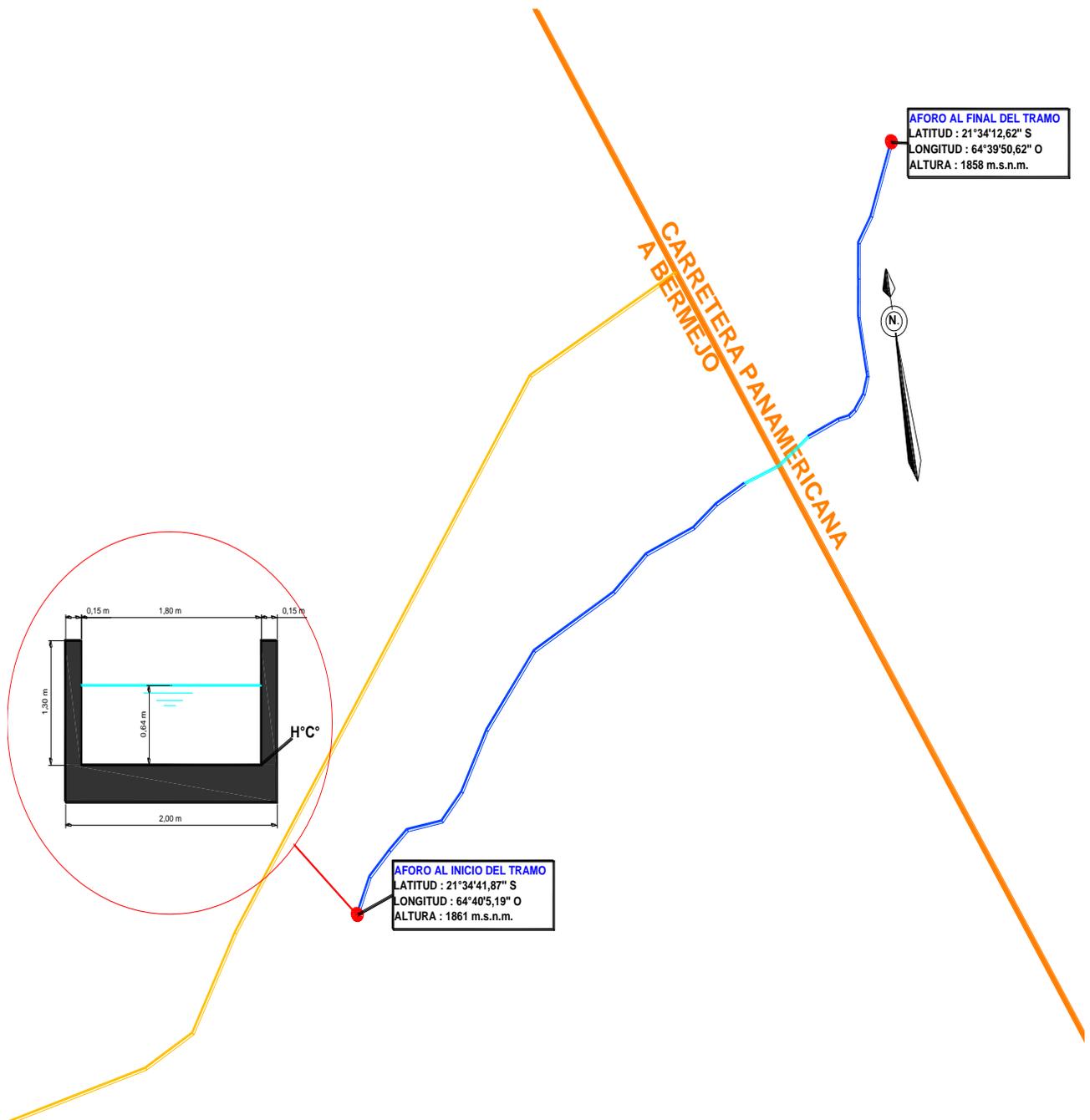
**Tabla 3.2. Hoja de registro de aforo con regla milimetrada.**

REGISTRO DE AFORO CON REGLA MILIMETRADA			
CANAL:		ALTITUD:	LATITUD:
PROGRESIVA:		FECHA:	LONGITUD:
N°	HORA DE MEDICIÓN	ALTURA DEL TIRANTE DE AGUA (m)	CAUDAL (l/s)
1			
2			
3			
4			
5			

Fuente: Elaboración propia.

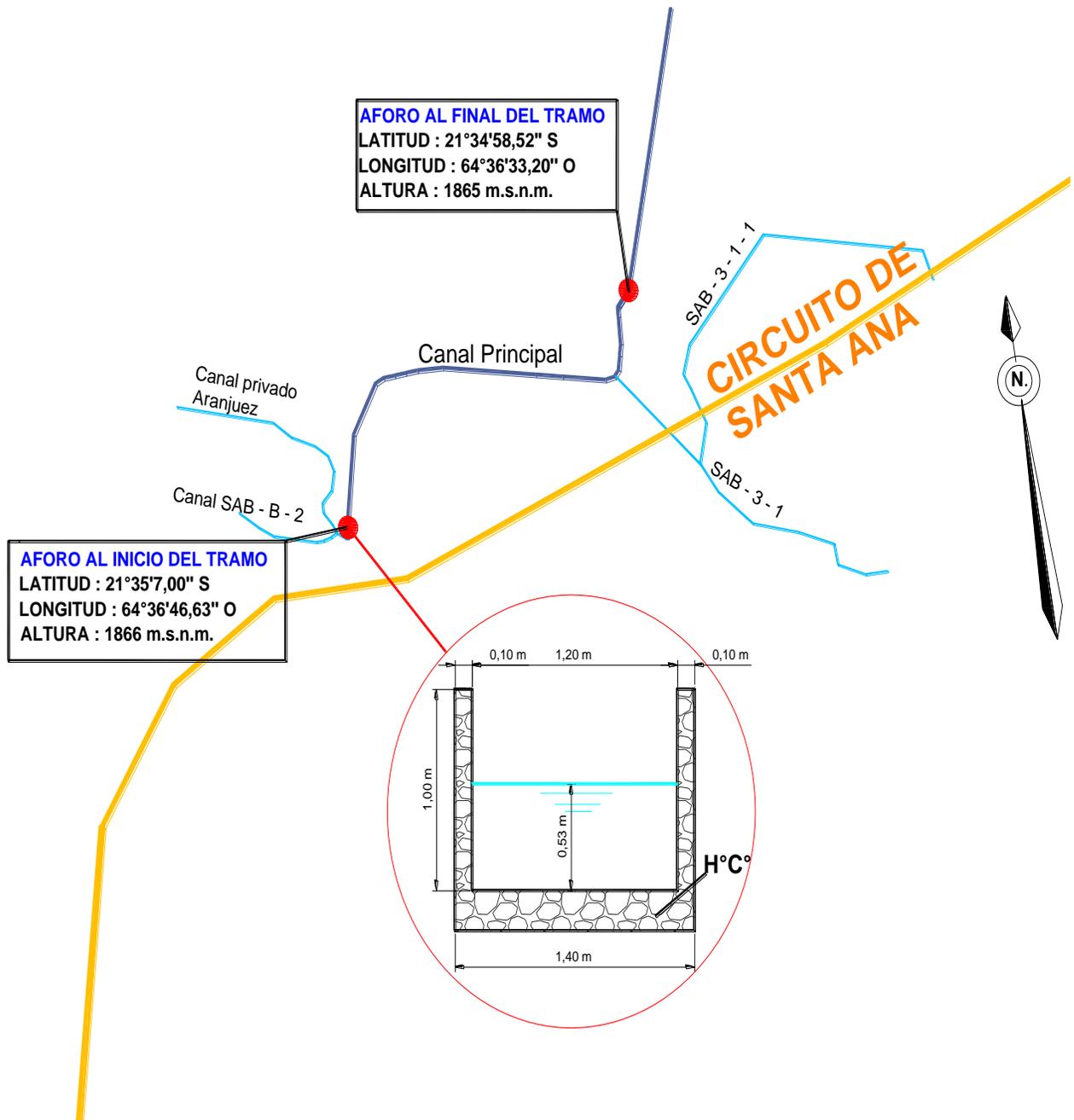
### 3.3. AFOROS DE ENTRADA Y SALIDA EN PUNTOS DE MEDICIÓN

Para determinar las pérdidas de agua que ocurren por evaporación, infiltración y por fugas en algunas estructuras de control y regulación, se midió los caudales de entrada y de salida en los canales de riego Santa Ana, cámara N°7 Suncho Wayco y zona Portillo del P.M.S.J.



**Gráfico N° 3.2. Red de conducción del sistema de canales de riego El Portillo.**

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico N° 3.3. Red de conducción del sistema de canales de riego Santa Ana.**

Fuente: Elaboración propia.

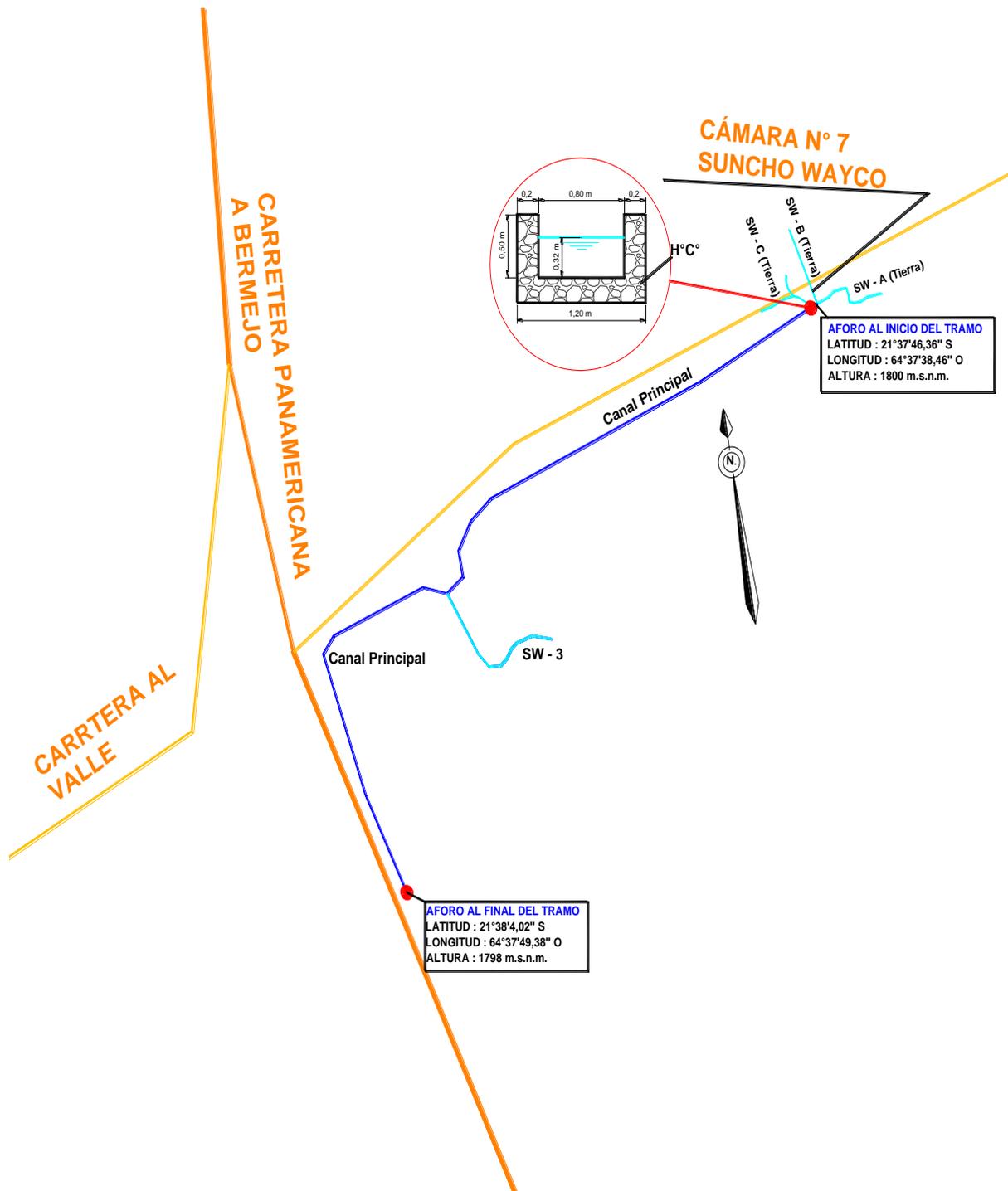


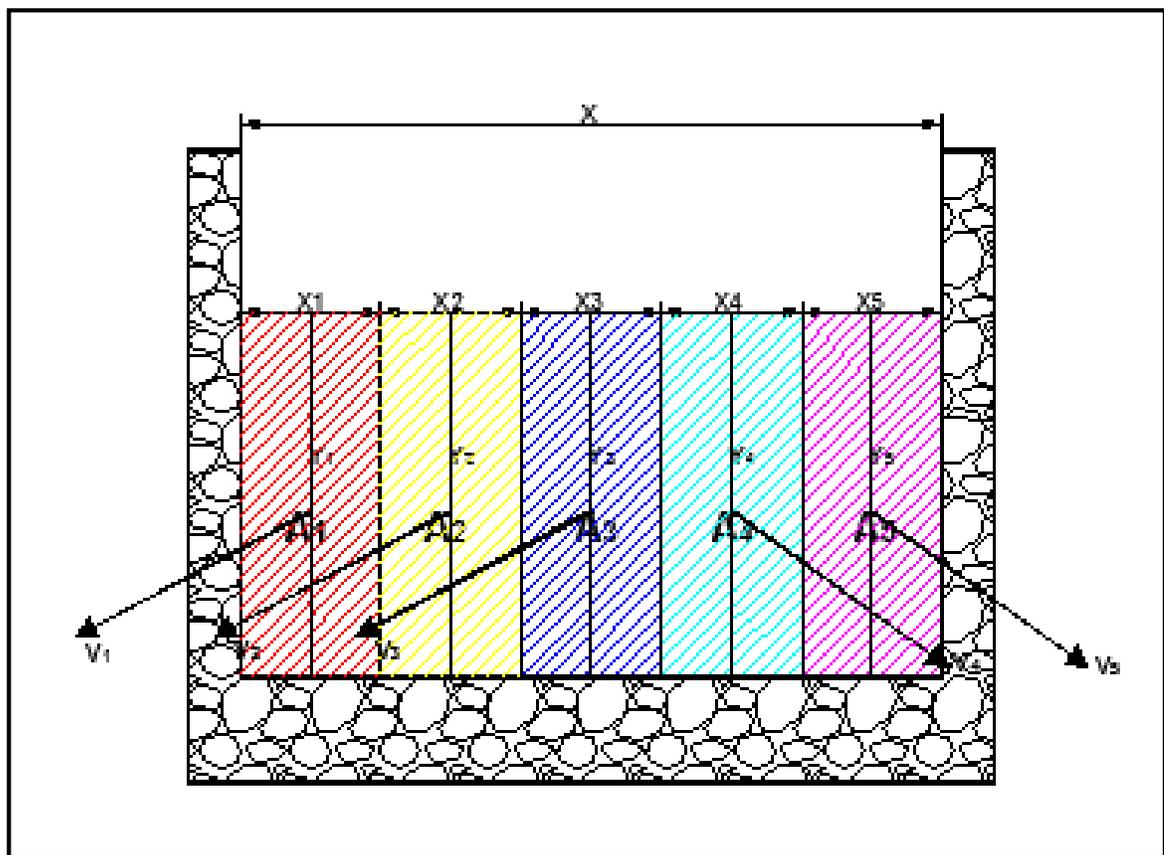
Gráfico N° 3.4. Red de conducción del sistema de canales de riego Suncho Wayco.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la red de conducción, se sectorizo las zonas de evaluación de acuerdo al área de la sección transversal, condiciones del canal, etc.

Una vez ubicados las zonas y los tramos a evaluar, en campo se definió claramente el inicio y final del tramo a evaluar, y de acuerdo a las condiciones se elabora la ficha de medición del Anexo A. (Puntos o Estaciones de Aforo).

La medición de los caudales de entrada y salida se realizó mediante el método de aforos área – velocidad, basado en la medición de la velocidad y el área en una sección transversal determinada. El método consiste en dividir la sección transversal del canal en varias franjas verticales, cada una de las cuales se mide el área y la velocidad media de flujo, cuyo producto da como resultado el caudal que pasa a través de cada franja. La suma de los caudales que pasa por cada sección de área representa el caudal requerido. Como se muestra en el Grafico N° 3.5.



*Gráfico N° 3.5. Sección transversal de un canal, en un punto de aforo.*

Fuente: Elaboración propia

Donde el área de cada sección es:

$$A_1 = X_1 * Y_1 = A_2 = A_3 = A_4 = \dots = A_n \dots \dots \dots (3.1.)$$

Además, para cada sección, con el uso del OTT MF pro, se midió la velocidad media en cada franja vertical. Entonces el caudal  $Q_i$ , que pasa por cada sección transversal es:

$$Q_1 = A_1 * V_1$$

$$Q_2 = A_2 * V_2$$

$$Q_3 = A_3 * V_3$$

$$Q_4 = A_4 * V_4$$

Luego el caudal total es igual a:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \dots \dots \dots (3.2.)$$

Donde:

$Q_T$  = Caudal total que pasa por la sección transversal, en l/s.

$v$  = Velocidad del flujo de agua, en m/s.

$X$  = Ancho del espejo de agua, en m.

$N$  = Número de segmentos en el que se divide el espejo de agua.

$Y_i$  = Profundidad del agua o tirante, en m.

#### a) Medida de la velocidad del flujo en los canales

Los correntómetros son instrumentos que miden la velocidad de la corriente del agua en ríos, arroyos, y canales.

Para los canales de riego del P.M.S.J., se utilizó el medidor magnético inductivo OTT MF pro, con un medidor electrónico que mide directamente la velocidad del flujo. Este equipo fue proporcionado por el área técnica del P.M.S.J.

Este equipo fue previamente probado para entender su funcionamiento y posteriormente se calibrado en laboratorio.

#### b) Metodología de aforos con Correntómetro

- Se realizó un esquema de la conducción y distribución de los canales principales de riego del P.M.S.J. a evaluar.
- En cada canal aforado se seleccionó una sección de aforo teniendo en cuenta lo siguiente: Que tenga pendiente constante y distribución uniforme de velocidades, evitando aquellas secciones en las cuales existan sectores de altas velocidades, aguas muertas, etc.

- Inmediatamente a la sección de aforo se le instaló una marca en la pared del canal, de tal forma que nos permitió apreciar la variación del nivel de agua (caudal), durante el aforo.
- Para medir el ancho del espejo de agua de la sección en la que se ejecutó el aforo, se instaló una guía de marcación, utilizando una cuerda con varias marcas.
- Con ayuda de cinta métrica se procedió a dividir el ancho del espejo de agua en varios segmentos, en los cuales se hicieron las mediciones de profundidad y velocidad. Por lo general el espaciamiento entre los puntos de medición (ancho de segmento), para todos los canales oscila entre 10% a 20% del ancho del canal. Las profundidades sugeridas en las cuales se mide las velocidades se indican en la Tabla N° 3.3.

**Tabla 3.3. Profundidades en las cuales se miden las velocidades con el correntómetro en función de la altura del tirante de agua.**

<b>Tirante de agua (cm)</b>	<b>Profundidad de lectura del Molinete</b>
< 15	$y/2$
$15 < y < 45$	$0,6 y$
> 45	$0,2 y - 0,8 y$ o $0,2 y - 0,6 y - 0,8 y$

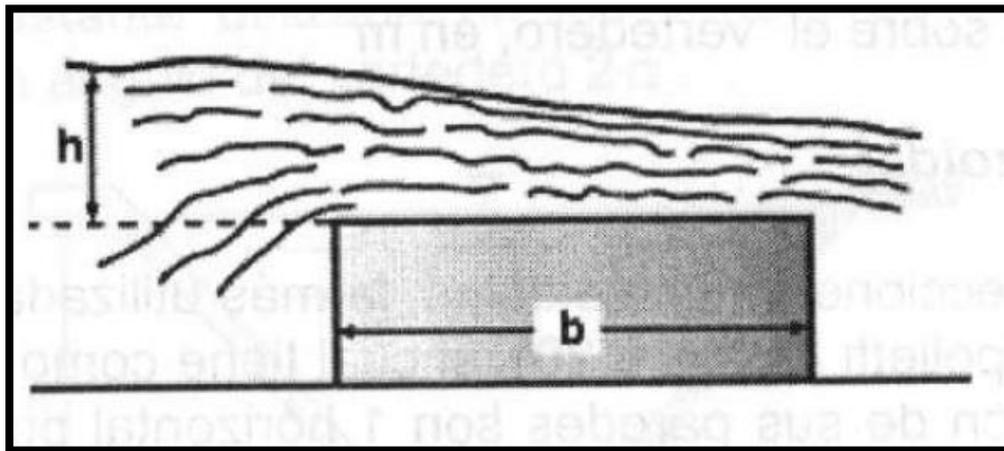
Fuente: Chow Ven Te, 1994. Hidrología Aplicada (1ra edición).

- La profundidad o tirante del agua se midió con la varilla de vadeo, colocándole en forma vertical y perpendicular al flujo en los extremos de cada uno de los segmentos en los que se dividió el ancho del espejo de agua.
- La velocidad media del flujo en cada vertical (tirante) se midió a 0,6 del tirante cuando la profundidad era menor a 45 cm, caso contrario se midió en dos puntos a 0,8, 0,4 y 0,2 del tirante medido desde la superficie hasta el fondo del canal cuando la profundidad es mayor a 45 cm, en las cuales se ubicó el equipo para realizar la medición.
- Se trató en cada momento que las mediciones sean continuas en cada punto de aforo, es decir realizarlas una vez abierta la compuerta esperando que se estabilice

el flujo de agua, además realizarlas con una frecuencia tal que permita tener en cuenta cualquier variación eventual del caudal durante la medición.

### 3.4.COMPARACIÓN DE CAUDALES DEL EQUIPO OTT MF PRO CON OTRO TIPO DE AFORADOR

Para realizar la comparación del equipo OTT Mf pro, se tomó como base los caudales obtenidos de un vertedero de cresta ancha, ubicado en el depósito la pintada, en el canal de H°C° LP 11-2, para él se utilizó la ecuación 3.3. para el cálculo de caudal.



*Gráfico N° 3.6. Vertedero de cresta ancha.*

Fuente: Hidráulica de canales de Máximo Villón Bejár.

Para un vertedero de cresta ancha, donde  $b/h \geq 10$ , la fórmula para el cálculo del caudal es:

$$Q = 1,45 L h^{3/2} \dots \dots \dots (3.3.)$$

Donde:

Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/s

L = Ancho de cresta, en m

h = Carga sobre el vertedero, en m

b = Ancho de la pared del vertedero

C = Coeficiente de descarga, igual a 1,45 para vertederos de cresta ancha

**Tabla 3.4. Cálculo del caudal con la ecuación del vertedero de cresta ancha.**

AFORO	Ancho de la cresta (L)	Carga sobre el vertedero (h)	Coefficiente (C)	Caudal (Q)	Caudal (Q)
	(m)	(m)	Adimensional	m <sup>3</sup> /s	l/s
Medición 1	1,75	0,07	1,45	0,04699	46,99

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N° 3.5. se presenta los registros de aforo con el equipo OTT Mf pro en el canal LP 11-2, en el cual se realizó mediciones en tres franjas, a 0,60 del tirante<sup>1</sup>.

**Tabla 3.5. Registro de aforos en la sección transversal del canal LP-11-2, depósito la pintada**

AFORO	Tirante (y)	Ancho de la sección (b)	Área	Velocidad media	Caudal (Q)
	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m/s)	l/s
Medición 1	0,13	0,85	0,1105	0,48	53,04
Medición 2	0,14	0,85	0,1190	0,50	59,50
Medición 3	0,14	0,85	0,1190	0,41	48,79
				Media	53,77

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.6. Comparación de resultados con los dos aforadores utilizados.**

Aforo	Caudal (Q)
	(l/s)
Ecuación del vertedero	46,99
OTT Mf Pro	53,77

Fuente: Elaboración propia.

<sup>1</sup> Para mayor seguridad en las mediciones de campo, se realizó la calibración del equipo en laboratorio de Hidráulica, como se muestra en el Anexo D.

### 3.5.CALIBRACIÓN DE LAS SECCIONES DE MEDICIÓN

Tanto el área de la sección como la velocidad del flujo varían con los cambios de altura en el nivel del agua. La característica de la sección seleccionada debe ser estable y de fácil acceso. Una vez conocida la relación entre nivel del agua y el caudal, estas se deben ajustar a una función matemática conocida; y con esta se generan datos de caudales conocidos para construir la regla limnimétrica. Se recomienda que estas reglas sean de lectura directa de caudales.

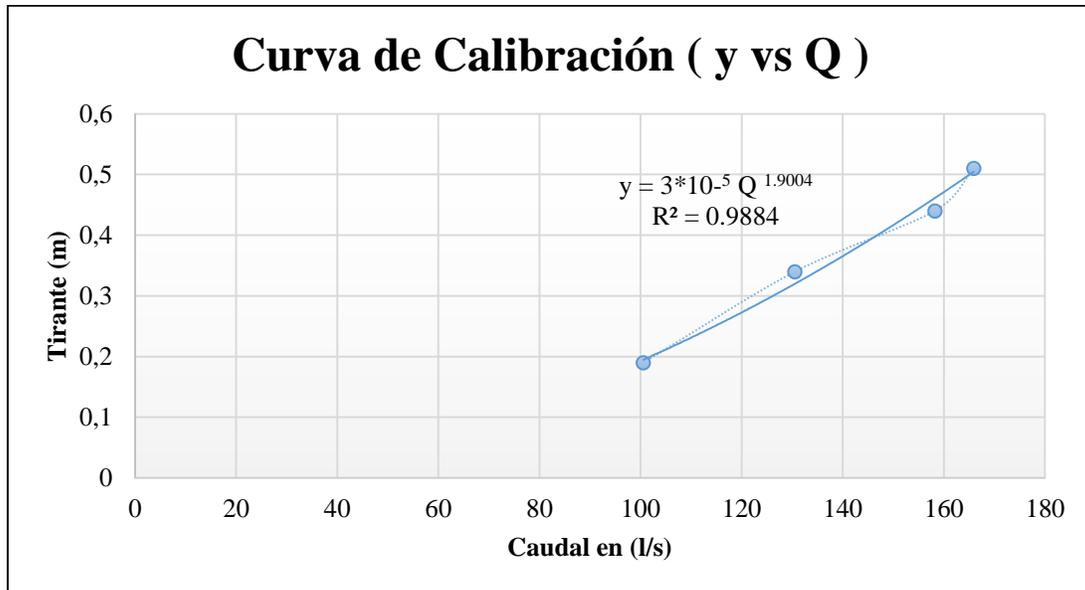
#### 3.5.1. Calibración de la estación de aforo Santa Ana

La sección donde se realizaron los aforos para la elaboración de las curvas de calibración en el canal principal de Santa Ana, se encuentra ubicada a 5 m de la obra de toma, en la cual se realizó cuatro mediciones a diferentes tirantes, las cuales demuestran la variabilidad del caudal a diferentes profundidades.

*Tabla 3.7. Determinación de caudales para la elaboración de la curva de calibración de la sección del canal Santa Ana.*

Aforo	Tirante (y)	Caudal
	(m)	(l/s)
Medición 1	0,19	100,53
Medición 2	0,34	130,56
Medición 3	0,44	158,22
Medición 4	0,51	165,92

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico N° 3.7. Curva de calibración en la sección de aforo del canal principal Santa Ana**

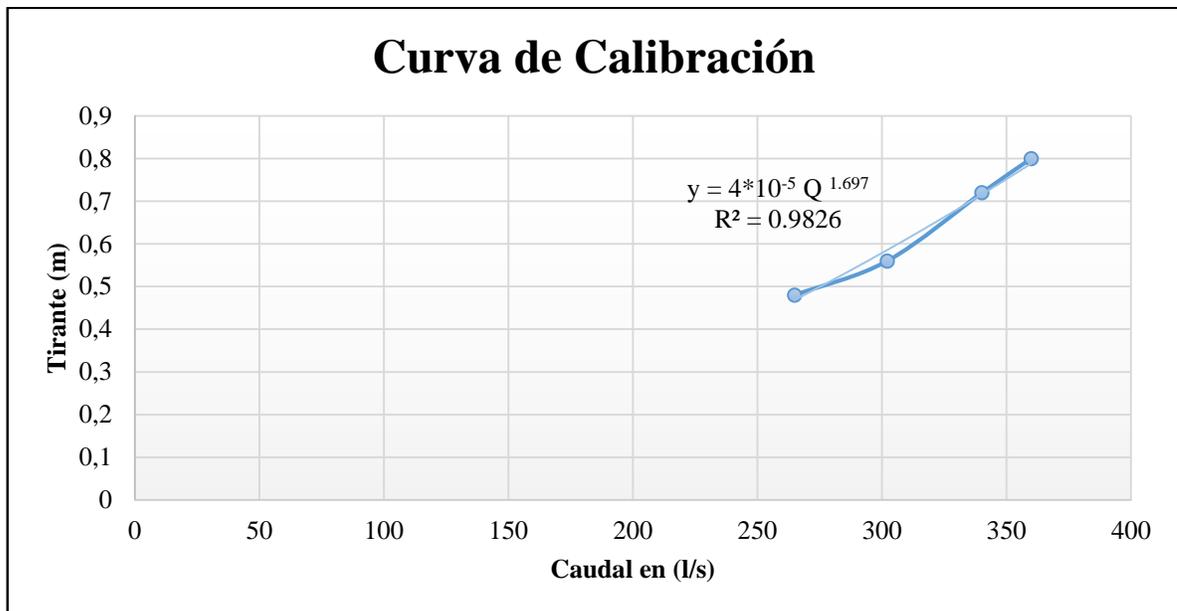
Fuente: Elaboración propia.

De igual manera se realizó la curva de calibración en la sección transversal del canal principal El Portillo, ubicado en la progresiva 0+010 de la obra de toma.

**Tabla 3.8. Determinación de caudales para la elaboración de la curva de calibración de la sección del canal El Portillo.**

Aforo	Tirante (y)	Caudal
	(m)	(l/s)
Medición 1	0,48	264,90
Medición 2	0,56	302,12
Medición 3	0,72	340,20
Medición 4	0,80	360,00

Fuente: Elaboración propia.



*Gráfico N° 3.8. Curva de calibración en la sección de aforo del canal principal El Portillo.*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6. CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES

#### 3.6.1. Determinación de caudales de ingreso ( $Q_I$ ) en los canales principales del P.M.S.J.

La determinación de los caudales de entrada se realizó en los canales de riego principales: El portillo, Suncho Wayco y Santa del proyecto múltiple San Jacinto cuyos resultados se muestran en las siguientes tablas.

*Tabla 3.9. Determinación de los caudales de ingreso en el canal principal El Portillo*

Aforo	Progresiva de la estación de aforo (m)	Tirante (m)	Caudal de Ingreso (l/s)
Medición 1	0+010	0,72	269,10
Medición 2	0+010	0,80	360,00
Medición 3	0+010	0,73	315,36

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.10. Determinación de los caudales de ingreso en el canal principal Suncho Wayco**

<b>Aforo</b>	<b>Progresiva de la estación de aforo (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Caudal de Ingreso (l/s)</b>
Medición 1	0+228	0,39	197,80
Medición 2	0+228	0,36	172,48
Medición 3	0+228	0,39	200,35

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.11. Determinación de caudales de ingreso en el canal principal Santa Ana**

<b>Aforo</b>	<b>Progresiva de la estación de aforo (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Caudal de Ingreso (l/s)</b>
Medición 1	0+015	0,19	100,53
Medición 2	0+015	0,51	165,92
Medición 3	0+015	0,34	130,56

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2. Determinación de caudales de salida ( $Q_s$ ) en los canales principales del P.M.S.J.

La medición de caudales de salida en los canales de riego, se realizó al final de cada tramo de canal principal, se verificó que durante la medición las compuertas prediales estén debidamente cerradas para evitar errores durante la medición. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 3.12. Determinación de caudales de salida en el canal principal El Portillo.**

<b>Aforo</b>	<b>Progresiva de la estación de aforo (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Caudal de Ingreso (l/s)</b>
Medición 1	0+940	0,25	231,07
Medición 2	0+940	0,32	297,22
Medición 3	0+940	0,24	266,76

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.13. Determinación de caudales de salida en el canal principal Suncho Wayco.**

<b>Aforo</b>	<b>Progresiva de la estación de aforo (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Caudal de Ingreso (l/s)</b>
Medición 1	0+720	0,39	176,27
Medición 2	0+720	0,34	135,38
Medición 3	0+720	0,40	182,03

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.14. Determinación de caudales de salida en el canal principal Santa Ana.**

<b>Aforo</b>	<b>Progresiva de la estación de aforo (m)</b>	<b>Tirante (m)</b>	<b>Caudal de Ingreso (l/s)</b>
Medición 1	0+585	0,13	79,95
Medición 2	0+585	0,34	143,84
Medición 3	0+585	0,15	111,90

Fuente: Elaboración propia.

### **3.7.DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN**

Para la evaluación de la eficiencia de conducción solo se consideró los tramos ya mencionados, desde el inicio donde se encuentra la fuente de abastecimiento hasta el punto donde termina el canal principal.

Para determinar la eficiencia de conducción, se empezó verificando y ubicando los puntos de evaluación, así como determinando las características hidráulicas de dicho canal, luego se midió los caudales de entrada y de salida de cada canal mediante aforos con el equipo OTT Mf Pro en el mes de abril del 2018, determinado así las pérdidas en la conducción de cada tramo y la eficiencia total en el canal.

La eficiencia de conducción se determinó mediante la fórmula:

$$E_c(\%) = \frac{Q_s}{Q_i} * 100 \dots \dots \dots (3.4.)$$

Donde:

$E_c$  = Eficiencia de conducción, en %

$Q_S$  = Caudal que sale del canal, en l/s.

$Q_I$  = Caudal que ingresa al canal desde la fuente de abastecimiento, en l/s.

Así mismo conociendo el  $Q_I$  y  $Q_S$  se calculó la cantidad de agua que se pierde a lo largo del canal, por infiltración, evaporación y fugas en estructuras que intervienen en su medición.

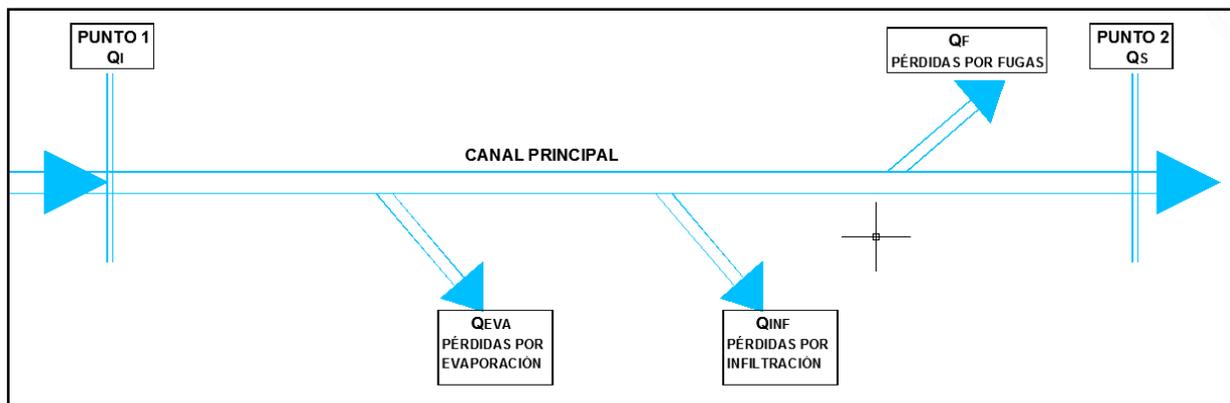
$$Q_p(\%) = (Q_I - Q_S) \dots \dots \dots (3.5.)$$

Donde:

$Q_P$  = Pérdidas de agua en el canal, en l/s.

$Q_S$  = Caudal que sale del canal, en l/s.

$Q_I$  = Caudal que ingresa al canal desde la fuente de abastecimiento, en l/s.



**Gráfico N° 3.9. Esquema hidráulico para determinar la Eficiencia de Conducción en los canales principales.**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.15. Determinación de la eficiencia de conducción del canal principal El Portillo.**

Aforos	Progresiva de la estación (m)		Caudal de Ingreso ( $Q_I$ )	Caudal de Salida ( $Q_S$ )	Pérdidas	Eficiencia de conducción
	Inicio	Final	l/s	l/s	l/s	%
Medición 1	0+010	0+940	269,10	231,07	38,03	85,87
Medición 2	0+010	0+940	360,00	297,22	62,78	82,56
Medición 3	0+010	0+940	315,36	266,76	48,6	84,59

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.16. Determinación de la eficiencia de conducción del canal principal Suncho Wayco.**

Aforos	Progresiva de la estación (m)		Caudal de Ingreso (Q <sub>I</sub> )	Caudal de Salida (Q <sub>S</sub> )	Pérdidas	Eficiencia de conducción
	Inicio	Final	l/s	l/s	l/s	%
Medición 1	0+228	0+720	197,80	176,27	21,53	89,11
Medición 2	0+228	0+720	172,48	135,38	37,10	78,49
Medición 3	0+228	0+720	200,35	182,03	18,32	90,86

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.17. Determinación de la eficiencia de conducción del canal principal Santa Ana.**

Aforos	Progresiva de la estación (m)		Caudal de Ingreso (Q <sub>I</sub> )	Caudal de Salida (Q <sub>S</sub> )	Pérdidas	Eficiencia de conducción
	Inicio	Final	l/s	l/s	l/s	%
Medición 1	0+015	0+585	100,53	79,95	20,58	79,53
Medición 2	0+015	0+585	165,92	143,84	22,08	86,69
Medición 3	0+015	0+585	130,56	111,90	18,66	85,71

Fuente: Elaboración propia.

El estudio realizado en los canales principales del P.M.S.J. como se muestra en las tablas anteriores comprende los canales principales de riego El Portillo, Suncho Wayco y Santa Ana, en los cuales se determinó la eficiencia de conducción, en la tabla N° 3.18. se muestra la eficiencia de conducción total de cada sistema.

**Tabla 3.18. Eficiencia de conducción total de cada sistema.**

Canales	Eficiencia de conducción ( $E_{fc}$ )
	%
<b>El Portillo</b>	84,34
<b>Suncho Wayco</b>	86,15
<b>Santa Ana</b>	83,98

Fuente: Elaboración propia.

### **3.8.DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA SECCIÓN DEL CANAL**

Para determinar la distribución de velocidades en la sección de canal, se seccionó dicha sección de canal en seis áreas iguales en las cuales se obtuvo los valores de velocidades en cinco franjas verticales a 0,2, 0,4 y 0,8 del tirante como se muestra en la tabla N° 3.19. Debido a la presencia de superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. Según la teoría la velocidad máxima media en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie a una distancia de 0,6 de la profundidad.

De la tabla N° 3.19. se obtiene que:

$$V_{media} = 0,24 \text{ m/s}$$

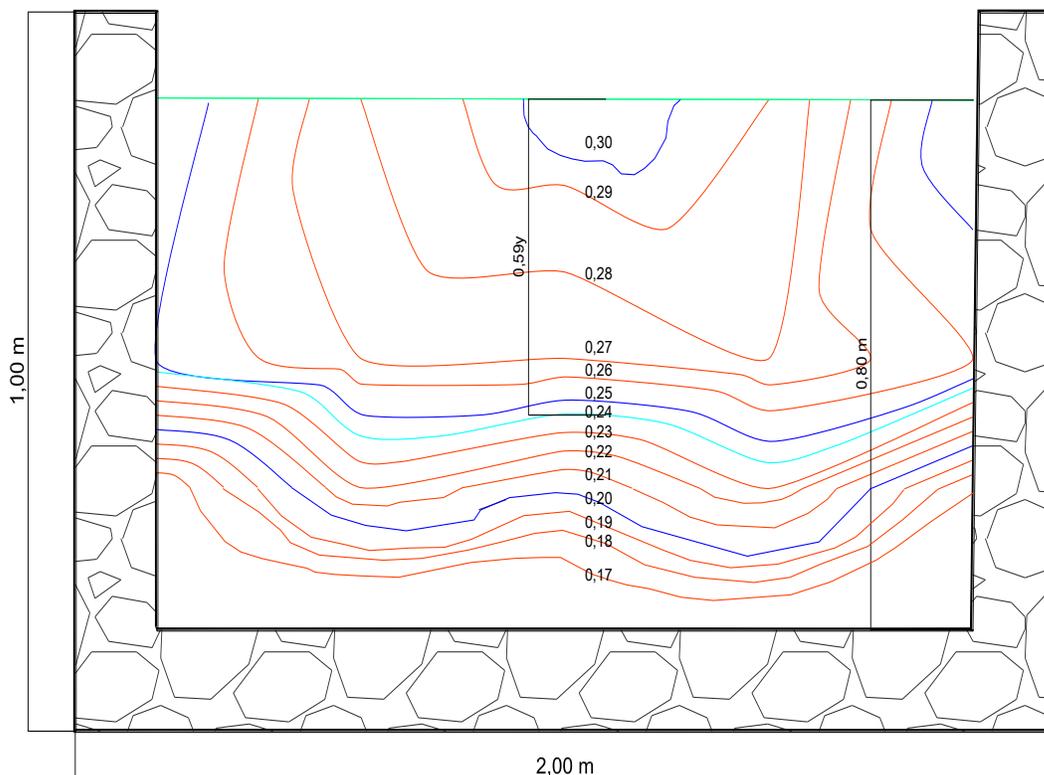
$$\text{Profundidad media} = 0,80 \text{ m}$$

$$\text{Ancho del canal} = 1,80 \text{ m}$$

*Tabla 3.19. Registro de aforos en una sección del canal principal El Portillo.*

REGISTRO DE AFORO CON CORRENTÓMETRO							
CANAL: El Portillo		CORRENTÓMETRO: OTT Mf Pro			HORA: 8:30 a 9:30		
PROGRESIVA: 0+010		ALTURA DE LA MIRA:			LATITUD: 21°34'41.87"S		
FECHA: 25/04/2018		ALTITUD: 1861			LONGITUD: 64°40'5.19"O		
DATOS DE CAMPO				CÁLCULOS			
Nº	PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD (m/s)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	ANCHO DE LA SECCIÓN (m)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	CAUDAL (l/s)
1	0,80	0,8 y : 0,24	0,80	0,23	1,80	1,44	331,20
		0,4 y : 0,26					
		0,2 y : 0,17					
2	0,80	0,8 y : 0,29	0,80	0,27	1,80	1,44	388,80
		0,4 y : 0,28					
		0,2 y : 0,23					
3	0,80	0,8 y : 0,30	0,80	0,26	1,80	1,44	374,40
		0,4 y : 0,27					
		0,2 y : 0,20					
4	0,80	0,8 y : 0,28	0,80	0,26	1,80	1,44	374,40
		0,4 y : 0,27					
		0,2 y : 0,22					
5	0,80	0,8 y : 0,24	0,80	0,23	1,80	1,44	331,20
		0,4 y : 0,25					
		0,2 y : 0,16					
							MEDIA: 360,00

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico N° 3.10. Distribución de velocidades en la sección del canal El Portillo.**

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico N° 3.10. se puede observar la distribución de velocidades en la sección de un canal rectangular, además se puede notar que la velocidad media es de 0,24 m/s, la cual se encuentra ubicada en la mitad del ancho del canal a una profundidad de 0,59 del tirante medida desde la superficie libre, con el cual se puede corroborar con la teoría que la velocidad media en una sección rectangular normal se encuentra a dicha distancia.

### 3.9. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

Al aplicar la ecuación de Manning, la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$ , ya que no existe un método exacto para la selección del valor de  $n$ .

Con el fin de dar una guía para la determinación correcta del coeficiente de rugosidad, se estudiaron cuatro enfoques generales; éstos son: 1) entender los factores que afectan el valor de  $n$  con el fin de adquirir el conocimiento básico del problema y disminuir el rango de incertidumbre, 2) consultar una tabla de valores comunes de  $n$  para canales de diferentes tipos, 3) examinar y familiarizarse con la apariencia de algunos canales

comunes cuyos coeficientes de rugosidad se conocen, y 4) determinar el valor de  $n$  mediante un procedimiento analítico basado en la distribución de velocidades teóricas en la sección transversal de un canal y en los datos de medición de velocidad o de rugosidad. A continuación, se presentan en la tabla N° 3.20. una lista de valores de  $n$  para canales de diferentes clases.

**Tabla 3.20. Valores del coeficiente de rugosidad  $n$ .**

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	<b>0.012</b>	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	<b>0.013</b>	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	<b>0.013</b>	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	<b>0.015</b>	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	.....	0.500

Fuente: Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow.

Según Vente Chow, en su libro Hidráulica de canales abiertos, nos recomienda adoptar valores de estudios realizados en varios tipos de canales, con diferentes revestimientos, como se muestra en la tabla N° 3.20., la cual indica que el valor mínimo del coeficiente  $n$  para canales revestidos con H° C° es de aproximadamente 0,014.

### 3.10. DIAGNÓSTICO DE LOS CANALES PRINCIPALES DEL P.M.S.J.

*Tabla 3.21. Evaluación del estado del canal de riego Suncho Wayco.*

Número	Progresiva	Tipo de Problema			Tamaño de la grieta (cm)	Observaciones	Gráfica
		Grieta	Rotura	Junta			
1	0+050	X	-	-	17	A 20 m del inicio del canal	
2	0+100	-	-	-	-	Tramo relativamente en buen estado, con muy pequeñas grietas que no se tomaron en cuenta.	
3	0+128,7	X	-	-	31	En este tramo una sola grieta significativa ubicada cerca de la junta.	
4	0+178,7	-	-	-	-	Tramo de canal en muy buenas condiciones	
5	0+228,7	X	-	-	22	Compuerta por donde filtra agua, ubicado a 2 m del inicio de este tramo	

6	0+278,7	-	-	x	-	Junta de dilatación en mal estado	
7	0+317,7	-	-	-	-	Tramo de canal donde falta revestimiento (ladrillo visto).	
8	0+362,7	-	-	x	-	Tramo de canal donde falta revestimiento (ladrillo visto).	
9	0+370,7	-	-	-	-	Tramo de canal en muy buenas condiciones	
10	0+379,7	-	-	-	-	Compuerta ubicada a 1 m de inicio de este tramo, donde existe la pérdida de agua debido a fuga.	
11	0+419,7	-	-	-	-	Paso de vehículos	

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla 3.22. Evaluación del estado del canal de riego El Portillo.*

Número	Progresiva	Tipo de Problema			Tamaño de la grieta (cm)	Observaciones	Gráfica
		Grieta	Rotura	Junta			
1	0+033	X	-	-	10	Inicio de canal	
2	0+047	X	-	-	13		
3	0+056	-	-	x	-	Puede que exista filtración por las juntas.	
4	0+070,4	-	-	x	-	Junta de dilatación en mal estado	
5	0+095,4	-	-	-	-	Tramo de canal en muy buenas condiciones	
6	0+127,4	-	-	-	-	Tramo de canal en muy buenas condiciones	

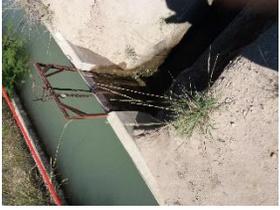
7	0+177,4	-	-	x	-		
8	0+227,4	-	-	-	-	Paso de vehículos	
9	0+277,4	-	X	-	-		
10	0+327,4	-	-	x	-	Existe mucha vegetación en este tramo	
11	0+377,4	-	-	x	-	En este tramo existe succión de agua del canal.	
12	0+427,4	-	-	-	-		

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla 3.23. Evaluación del estado del canal de riego Santa Ana.*

Número	Progresiva	Tipo de Problema			Tamaño de la grieta (cm)	Observaciones	Gráfica
		Grieta	Rotura	Junta			
1	0+050	-	-	X	-	Compuerta donde existe pérdidas de agua por fugas, ubicado a 1,2 m del inicio del tramo	
2	0+100	-	-	X	-	2 juntas de dilatación en mal estado y/o con grietas.	
3	0+115,30	-	-	X	-	Compuerta de distribución de agua de riego, ubicado a 3 m del inicio del tramo	
4	0+165,30	-	-	X	-	Puede que exista filtración por las juntas.	
5	0+180,80	-	-	X	-	Succión de agua mediante bomba	
6	0+196,9	-	-	X	-	Posible filtración por la junta.	

7	0+219,31	-	-	X	-	Posible filtración por la junta.	
8	0+239,30	X	-	X	-	Presenta pequeñas grietas que salen de las juntas	
9	0+271,30	-	X	X	42	Existe rotura en la parte superior del canal, ubicado justo en la junta de dilatación	
10	0+306,30	-	-	X	-	Falta limpieza en este tramo del canal, se encontró ramas que obstruyen el paso del agua	
11	0+334,30	-	X	X	-	Existe rotura en la parte superior del canal, ubicado justo en la junta de dilatación	
12	0+384,30	-	-	X	-	Presenta pequeñas grietas que salen de las juntas	
13	0+419,30	-	-	X	-	Presenta pequeñas grietas que salen de las juntas	
14	0+437,30	-	-	-	-	En este tramo existen 2 compuertas de distribución.	
15	0+487,30	-	-	X	-	Posible filtración por la junta.	

16	0+509,30	-	-	X	-	Tramo del canal donde la velocidad del flujo es muy pequeña	
17	0+528,30	-	-	X	-	Tramo del canal donde la velocidad del flujo es muy pequeña	
18	0+547,30	-	-	-	-	Compuerta ubicada a 7 m del inicio de este tramo	
19	0+596	-	-	-	-	Final del canal principal	

Fuente: Elaboración propia.

**CAPÍTULO 4**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA

#### 4.1.1. Análisis de los caudales de ingreso ( $Q_i$ ) en los canales principales del P.M.S.J.

Los caudales de ingreso al canal se midieron después de la obra de toma a una distancia de 0 a 10 metros, considerando que la sección donde se realicen las mediciones el flujo sea estable. En el caso del canal principal Suncho Wayco las mediciones se realizaron a una distancia de 228 metros de la cámara rompe presión N° 7 Suncho Wayco, debido a que hasta esta distancia el flujo de agua es turbulento, en donde no se puede realizar con precisión las mediciones de caudales debido a la variabilidad de tirantes.

Como se puede observar en las tablas N° 3.9, 3.10 y 3.11, los caudales de ingreso varían de 262 l/s a 360 l/s en el canal principal El Portillo, de 170 l/s a 200 l/s en el canal principal Suncho Wayco y de 100 l/s a 166 l/s en el canal principal Santa Ana.

#### 4.1.2. Análisis de los caudales de salida ( $Q_s$ ) en los canales principales del P.M.S.J.

Los caudales de salida fueron evaluados al final de cada canal, con los valores obtenido en conjunto con los caudales de ingreso nos permitieron determinar el porcentaje de eficiencia de conducción en cada uno de los canales ya mencionados.

Como se puede observar en las tablas N° 3.12, 3.13 y 3.14, los caudales de salida varían de 230 l/s a 300 l/s en el canal principal El Portillo, de 135 l/s a 182 l/s en el canal principal Suncho Wayco y de 79 l/s a 144 l/s en el canal principal Santa Ana.

### 4.2. ANÁLISIS DE LAS EFICIENCIAS DE CONDUCCIÓN ( $E_{fc}$ ) EN CADA CANAL DE DERIVACIÓN

Mediante la investigación realizada en los canales principales del P.M.S.J. nos permite saber el caudal que se capta de la fuente de abastecimiento y cuanto llega al final de cada canal donde se distribuye el agua para los usuarios y si esta es bien utilizada. Así mismo se puede determinar la cantidad de agua que se pierde en la conducción y si está representa una pérdida económica, lo que implicaría una reducción de aportes para mejorar la infraestructura de los canales de riego y así optimizar la utilización del recurso hídrico.

Como se puede observar en la tabla N° 3.15, la eficiencia de conducción en el canal principal de H°C° El Portillo comprendido desde las coordenadas (0+010) y (0+940), es de 84,34 % con pérdidas de agua de 15,66 % en todo el tramo de canal principal.

Así mismo se indica que en las coordenadas (0+228) y (0+720), del canal de H°C° Suncho Wayco presenta una eficiencia de conducción de 86,15% con pérdidas de agua de alrededor del 13,85%.

Por otra parte, en el canal principal de H°C° Santa Ana comprendido desde las coordenadas (0+015) y (0+585), la eficiencia de conducción es de 83,98%, con pérdidas de 16,02%.

La eficiencia de conducción promedio da como valor 84,82 %, de acuerdo al análisis realizado en los canales de principales del P.M.S.J., por lo cual se tiene alrededor de 15,18 % de pérdidas de agua.

La eficiencia depende de varios factores: longitud de los canales, amplitud del área regable, características del canal, tipo del revestimiento, grado de mantenimiento y de la modalidad de operación del sistema. Pero también depende del tipo de operación del sistema de riego: continuo o intermitente. A pesar de que la eficiencia de conducción es el componente más susceptible a ser mejorado por ejemplo mediante revestimientos con hormigones, pero no siempre se logra superar el 90% en situación con proyecto; generalmente varía entre 75 a 90%.

En resumen, los resultados obtenidos en la presente investigación, la cual se realizó en los canales principales del P.M.S.J. presenta cierta relación con los valores obtenidos en otros estudios.

#### **4.3. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA SECCIÓN DE CANAL**

Del estudio realizado en la sección de aforo, ubicado en la progresiva 0+010 del canal principal El Portillo, se pudo comprobar en el Gráfico N° 3.10. que la velocidad media es de 0,24 m/s y se encuentra ubicada en el medio de la sección transversal, a una profundidad de 0,59 del tirante, medida desde la superficie libre.

Este resultado obtenido se puede comprobar con la teoría la cual dice que la velocidad media en la sección trasversal de un canal rectangular normal, se encuentra ubicada a 0,6 del tirante, medida desde la superficie libre del agua.

#### 4.4.EVALUACIÓN DEL ESTADO DE AGRIETAMIENTO DEL CANAL

El registro de datos se lo ha realizado en los tramos de canales principales El Portillo, Suncho Wayco y Santa Ana, como se muestra en las tablas N° 3.21, 3.22 y 3.23, donde se hizo un recorrido de una longitud de 427 m en el canal El Portillo, 596 m en el canal Santa Ana y 720 m en el canal Suncho Wayco, en los cuales se identificó las principales fallas de la estructura de canal de H°C°.

Como se puede apreciar en las tablas N° 3.21, 3.22 y 3.23, los canales en estudio cuentan con fallas como son: grietas, roturas y juntas de dilatación en mal estado, observándose roturas importantes de hasta de 42 cm y grietas hasta de 31 cm de longitud y juntas que prácticamente no tienen material asfáltico.

Para esta parte del estudio se presenta una tabla resumen de las fallas, grietas y estado de las juntas, que se pudo encontrar en todos los tramos de canales recorridos.

**Tabla 4.1. Estado de Agrietamiento del canal Suncho Wayco**

Descripción	Cantidad
Grietas	4
Roturas	1
Juntas en mal estado	2

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.2. Estado de Agrietamiento del canal El portillo**

Descripción	Cantidad
Grietas	2
Roturas	2
Juntas en mal estado	5

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.3. Estado del agrietamiento del canal Santa Ana**

Descripción	Cantidad
Grietas	1
Roturas	2
Juntas en mal estado	13

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5. SELECCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

Para la selección del coeficiente de rugosidad  $n$ , se tomó en cuenta el tipo de revestimiento de los canales donde se realizaron los estudios, con el objetivo de identificar a que valores de la tabla N° 3.20. son los que más se aproximan, en este caso para canales con revestimiento de H° C°, el valor del coeficiente  $n$  es aproximadamente de 0,014, teniendo en cuenta que los valores de la tabla N° 3.20. son de estudios realizados en diferentes tipos de canales con diferentes revestimientos, y por eso puede haber una pequeña diferencia entre un resultado y otro.

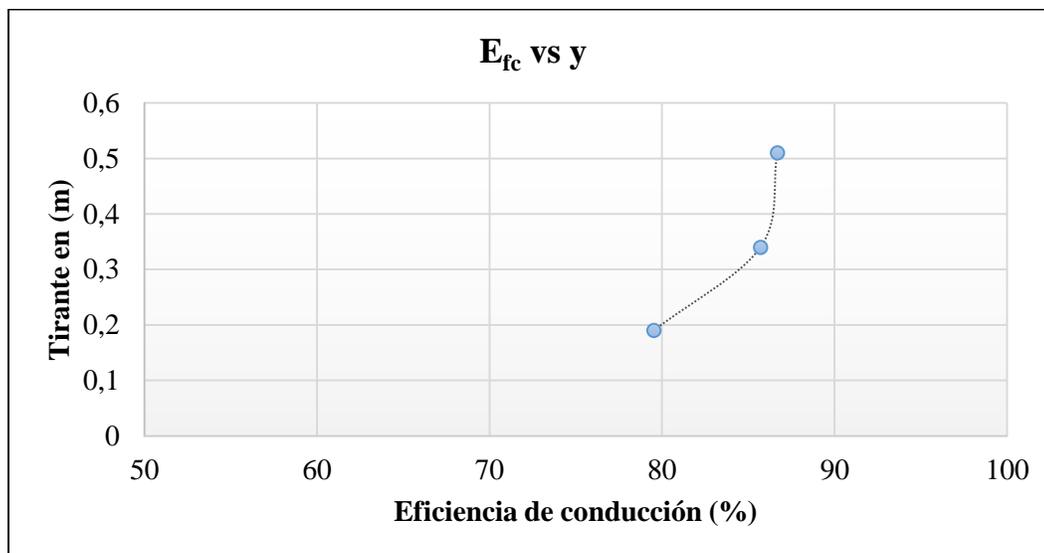
#### 4.6. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN

El análisis de la variabilidad de la eficiencia de conducción en función del tirante, se realizó en el canal principal Santa Ana en la sección de inicio de canal, ubicado en la progresiva 0+015.

*Tabla 4.4. Análisis de la eficiencia de conducción en función al tirante*

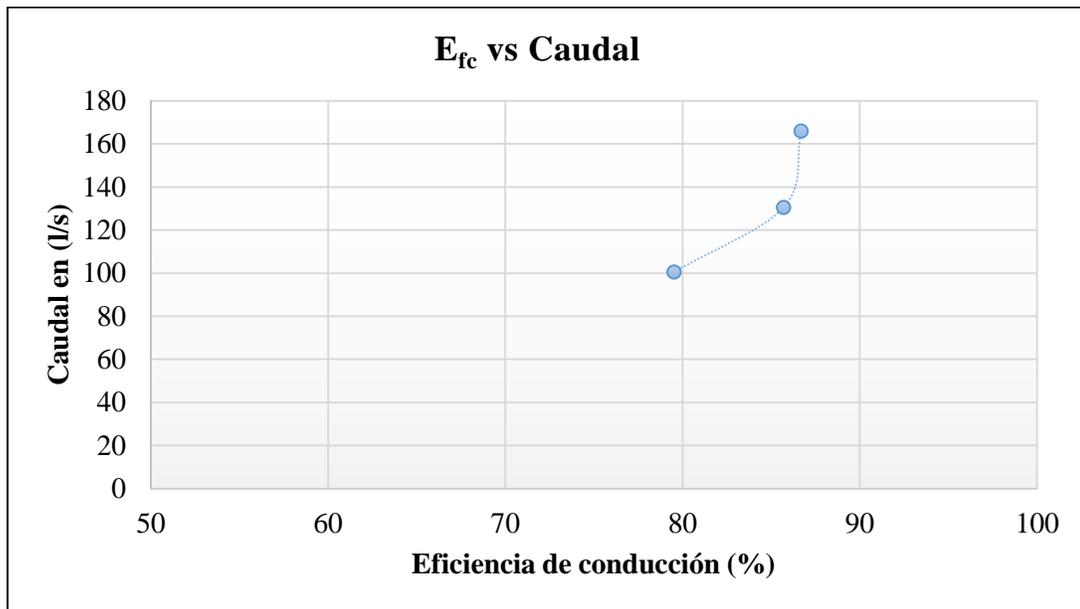
Aforo	Tirante (y)	Caudal Ingreso	Pérdidas	Eficiencia de conducción
	m	l/s	%	%
Medición 1	0,19	100,53	20,47	79,53
Medición 2	0,34	130,56	14,29	85,71
Medición 3	0,51	165,92	13,31	86,69

Fuente: Elaboración propia.



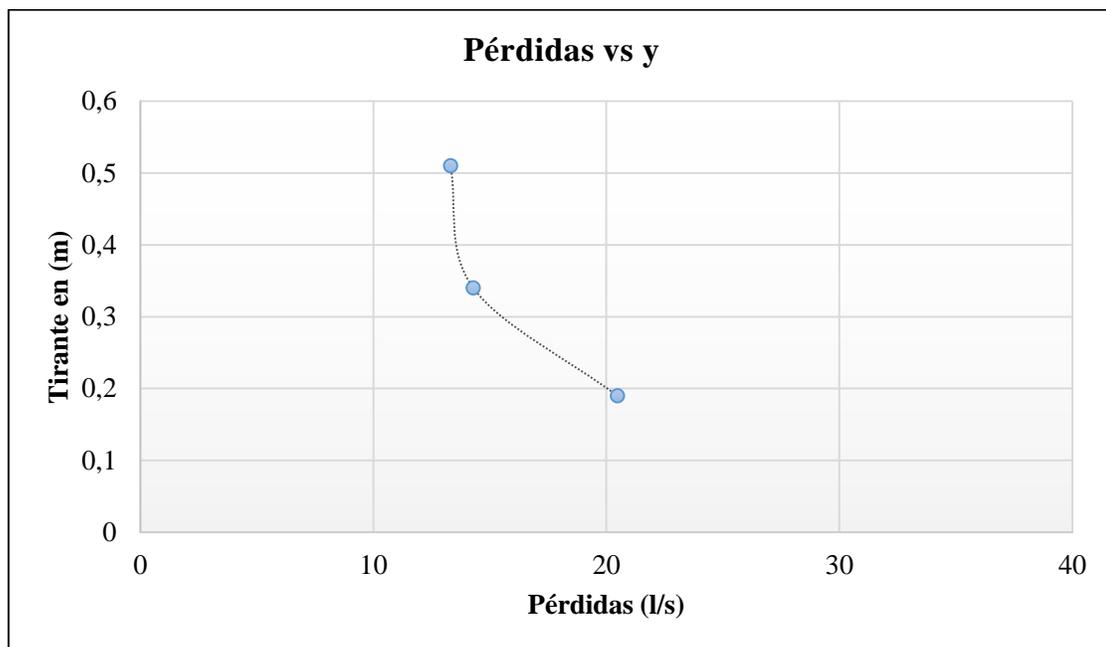
*Gráfico N° 4.1. Curva Eficiencia de conducción vs Tirante.*

Fuente: Elaboración propia.



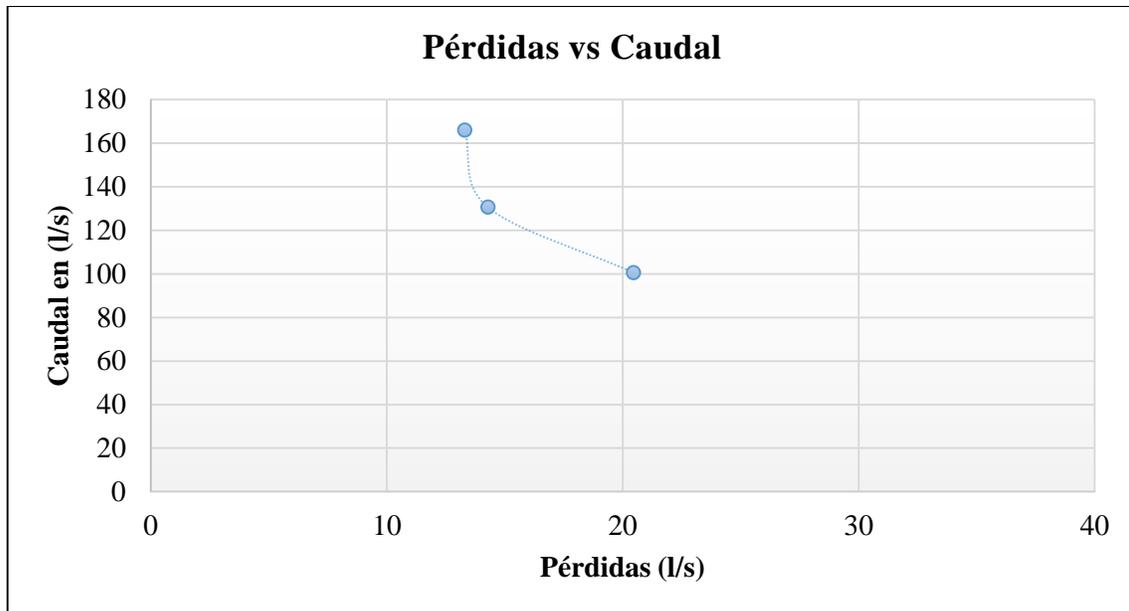
*Gráfico N° 4.2. Curva Eficiencia de conducción vs Caudal*

Fuente: Elaboración propia.



*Gráfico N° 4.3. Curva Pérdidas de agua vs Tirante*

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico N° 4.4. Curva Pérdidas de agua vs Caudal**

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.7. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, y con todas las tablas mostradas anteriormente; podemos decir que nuestra hipótesis planteada al inicio de este trabajo: *La eficiencia de conducción en los canales de riego Santa Ana, cámara n°7 Suncho Wayco y zona Portillo del Proyecto Múltiple San Jacinto, es baja debido a las pérdidas de agua que se dan, por el estado de agrietamiento y fugas en las estructuras que interviene en la operación del canal.* No es válida; ya que el valor obtenido de 84,82% de eficiencia de conducción en los canales de riego corresponde a una eficiencia de conducción alta para este tipo de canales revestidos de H<sup>o</sup>C<sup>o</sup>, tomando en cuenta también es estos canales ya tiene más de 20 años desde que fueron construidos.

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1.CONCLUSIONES

- La hipótesis planteada en el trabajo de investigación no es válida ya que el valor de 84,82% de eficiencia de conducción en canales de riego, corresponde a un valor alto para canales de H° C°.
- Los caudales de ingreso ( $Q_I$ ) para la evaluación de las eficiencias de conducción en los canales principales del P.M.S.J. fueron medidos después de las obras de toma respectivas de cada canal, determinando que el canal con mayor entrada de agua es el canal principal El Portillo con 360 l/s (ver tabla N° 3.9.). Siendo el mismo canal con mayor longitud, con 945 m. y el de menor longitud con 596 m. es el canal principal Santa Ana (ver tabla N° 3.11.).
- Los caudales de salida ( $Q_S$ ) fueron determinados en la sección transversal que se encuentra ubicada al final de cada canal, en los puntos que empieza la distribución del agua para riego.
- La eficiencia de conducción que presentaron los canales principales El Portillo, Santa Ana y Suncho Wayco, son de 84,34%, 83,98% y 86,15%, respectivamente. Siendo el promedio de las eficiencias de conducción de dichos canales de 84,82%, el cual se encuentra dentro de los rangos de eficiencia según el Manual Técnico del ABRO 2.3. el cual dice que la eficiencia de conducción para canales revestidos de hormigón varía entre 75 y 90% en situación con proyecto. Comparada también con la investigación realizada por el Ministerio de Agricultura y Riego de Perú (2015), en el distrito de Jequetepeque se estimó una eficiencia de conducción promedio de 92%. Así mismo según datos del Ex-INNERHRI (Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos), para el caso de canales con revestimiento, los estudios realizados por este instituto, señalan que la eficiencia de conducción promedio varía entre 80% a 90%.
- En los canales estudiados que están revestidos con H° C° los cuales presentan una eficiencia de conducción promedio de 84,82 %, sus pérdidas son debidas al agrietamiento, roturas, robo de agua y juntas de dilatación en mal estado las cuales representan el 15,18 %.

- El canal principal Santa Ana, comparado con los demás es el que presenta mayores pérdidas de 16,02 %. Por otra parte, el canal que presenta mayor eficiencia de conducción es el canal principal Suncho Wayco.
- Se evaluó el estado de agrietamiento actual de los canales estudiados, para lo cual se realizó un recorrido exhaustivo por cada uno de los canales, identificando grietas, roturas y juntas de dilatación en mal estado.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- En lo que se refiere a estructuras de control y medición, como es el caso de compuertas y medidores de caudal, se recomienda tenerlos en constante mantenimiento, más aún en las secciones de entrada y salida del caudal.
- Para hacer más eficiente la conducción y distribución del agua de riego y contribuir a la optimización en el uso de dicho recurso en los canales del P.M.S.J., se recomienda programar y ejecutar en forma oportuna la limpieza y el mantenimiento de la infraestructura de los canales, compuertas, tomas, medidores y calibración de estos últimos.
- Implementar estaciones de medición directa de caudales en puntos estratégicos de los canales, los cuales permitirán a los operadores y distribuidores de agua de riego medir directamente el caudal que pasa por la sección de canal, con ayuda de un Limnómetro el cual fue elaborado con ayuda de las curvas de calibración.
- Al contar con una estructura más eficiente, los tiempos o periodos de riego durarán menos.
- De acuerdo a la problemática identificada, se debe adoptar políticas para erradicar usuarios de agua informales que no estén suscritos y no cuenten con su carnet de regantes actualizado.
- Se debe sancionar a los usuarios que atentan contra la infraestructura hidráulica de riego.
- El mejoramiento de los canales de conducción a parte del revestimiento con H° C°, también se puede mejorar mediante la colocación de Geomembranas de Polietileno resultando más económicas.

- También se debe tomar en consideración el periodo en el cual se realizó el estudio, si las fechas de mediciones realizadas fueron antes o después del mantenimiento periódico de los canales, ya que esto influirá directamente en el valor de la eficiencia de conducción, la cual podría diferir en posteriores estudios.