

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE ORIFICIO TIPO RANURA PARA
SISTEMA DE DRENAJE EN FILTROS RÁPIDOS-ANÁLISIS
EXPERIMENTAL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN HIDRÁULICA**

EDUARDO SEBASTIÁN PINOS PRIETO
eduardo.pinos@epn.edu.ec

DIRECTOR: M.Sc. ING. MARCELO MUÑOZ RODRÍGUEZ
marcelo.munoz@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: Ph.D. ING. KHALED HAMAD MOHAMED
khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, 2019

DECLARACIÓN

Yo, Eduardo Sebastián Pinos Prieto, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Eduardo Sebastián Pinos Prieto

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Eduardo Sebastián Pinos Prieto bajo mi supervisión.

M.Sc. Ing. Isaías Muñoz Rodríguez

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ph.D. Ing. Khaled Mohamed Ahmed
Hamad Mohamed

CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradecido a mi Dios, Jehová, por haber puesto a las personas adecuadas en el momento preciso para poder guiarme desde el día en que nací hasta el día de hoy.

A mi madre, Julia, y mi padre, Luis Alberto, quisiera agradecer en primer lugar por ser las personas que me han dado todo su apoyo, comprensión y sobre todo su amor incondicional. Por haber estado conmigo durante mi vida universitaria siendo el pilar en el que pude arrimarme cuando pensaba que el mundo se derrumbaba y solo nosotros tres sabemos todo lo que esto significa. Gracias por todo.

A mis hermanos, Alex y Gabriela, por ser ejemplos de perseverancia y aguante. A mis sobrinos, Cristel y Luis Eduardo, por las sonrisas que llenan el corazón cuando parece que todo es malo. A mi cuñada, Shirley, y mi cuñado, Byron.

A mi director de tesis, Ing. Marcelo Muñoz, y mi codirector, Ing. Khaled Mohamed, por su guía y paciencia en cada etapa de este proyecto de titulación. Gracias.

Finalmente, a todos mis amigos del colegio y universidad. Gracias por haber hecho más llevadera esta etapa que estoy culminando. No puedo escribir sus nombres por tema de espacio, pero ustedes saben quiénes son y lo mucho que los aprecio.

Eduardo Sebastián Pinos Prieto

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación está dedicado:

A mis padres que han apoyado cada decisión que he tomado para mi vida.

A mis sobrinos, al intentar ser un ejemplo para ustedes.

Y a la persona más importante en mi vida, a mi hijo, Alejandro Sebastián. Espero algún día puedas leer esto y sepas que tu papá te ama con el alma y que, al pensar en ti, retomo fuerzas para seguir adelante. “Yo por ti me levanto, aunque no lata el corazón”

Eduardo Sebastián Pinos Prieto

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
SIMBOLOGÍA	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
PRESENTACIÓN	XIV
CAPÍTULO 1	1
4= INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 GUÍA DEL DOCUMENTO	5
CAPÍTULO 2	6
2= MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1 MARCO TEÓRICO	6
2.1.1 FILTROS RÁPIDOS	6
2.1.2 COMPONENTES DE UN FILTRO RÁPIDO	10
2.1.3 MEDIOS FILTRANTES	18
2.1.4 TIPOS DE DRENAJES EN FILTROS RÁPIDOS	21
2.2 ESTADO DEL ARTE	27

CAPÍTULO 3	29
3 METODOLOGÍA	29
3.1 CAUDALES EXPERIMENTALES	29
3.2 AFORO DE CAUDALES	32
3.3 MEDICIONES DE PRESIÓN	46
3.4 COEFICIENTES DE DESCARGA.....	48
3.5 PLAN DE PRUEBAS.....	50
3.5.1 ETAPA I: ACTIVIDADES PRELIMINARES	50
3.5.2 ETAPA II: TRABAJO DE LABORATORIO.....	51
3.5.3 ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
CAPÍTULO IV	53
4 RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
4.1 INTRODUCCIÓN	53
4.2 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CARGA.....	54
4.3 ANÁLISIS DE COEFICIENTES DE DESCARGA.....	59
4.4 COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS DE CARGA Y COEFICIENTE DE DESCARGA.....	61
CAPÍTULO V	65
5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	65
5.1 RESUMEN	65
5.2 CONCLUSIONES.....	65
5.3 TRABAJOS FUTUROS	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales características de los filtros	7
Tabla 2.2. Metodología de lavado y principales características	10
Tabla 2.3. Capa soporte de grava utilizada con sistema de drenaje por tuberías	14
Tabla 2.4. Sistemas de drenajes.....	14
Tabla 2.5. Datos para diseño de tubería principal o matriz en sistemas de tubería perforada	22
Tabla 3.1. Dimensiones del modelo para determinar el área de influencia de las ranuras.....	31
Tabla 3.2. Caudales experimentales.....	31
Tabla 3.3. Características y requerimientos de la bomba de recirculación	38
Tabla 3.4. Datos obtenidos del aforo	42
Tabla 3.5. Volumen y caudal para obtener la curva característica.....	43
Tabla 3.6. Carga sobre el vertedero rectangular para obtener la curva característica	43
Tabla 3.7. Resumen de [Q] y [H].....	44
Tabla 3.8. Carga sobre el vertedero asociada a cada caudal experimental a partir de la curva de descarga	45
Tabla 3.9. Verificación de caudales asociados a las cargas sobre el vertedero calculadas de manera teórica	45
Tabla 3.10. Alturas de agua obtenidas de los piezómetros durante los ensayos del modelo experimental	47
Tabla 3.11. Valores de $[C_d]$ obtenidos de los ensayos: Ensayo N°1	49
Tabla 3.12. Valores de $[C_d]$ obtenidos de los ensayos: Ensayo N°2	49
Tabla 3.13. Valores de $[C_d]$ obtenidos de los ensayos: Ensayo N°3	50
Tabla 4.1. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°1, densidad de orificios= 246 orif/m ²	55

Tabla 4.2. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°2, densidad de orificios= 246 orif/m ²	56
Tabla 4.3. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°3, densidad de orificios= 246 orif/m ²	57
Tabla 4.4. Resumen de coeficientes de descarga resultantes de los ensayos	59
Tabla 4.5. Valores de [C _d] obtenidos del ensayo en tubo con orificios circulares	61
Tabla 4.6. Pérdida de carga obtenida del ensayo en tubo con orificios circulares	61
Tabla 4.7. Resultados del análisis de los orificios tipo ranura y de los orificios circulares	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Vista en perspectiva de un filtro rápido convencional.....	6
Figura 2.2. Uso de válvulas y proceso de filtración en un filtro rápido.....	8
Figura 2.3. Uso de válvulas y proceso de lavado en un filtro rápido.....	9
Figura 2.4. Componentes de un filtro rápido a gravedad.....	11
Figura 2.5. Medios filtrantes en filtros rápidos.....	12
Figura 2.6. Capa soporte típica utilizada en filtros rápidos.....	13
Figura 2.7. Diagrama de presiones en un dren.....	15
Figura 2.8. Secciones de canaletas de lavado.....	17
Figura 2.9. Canal de recolección ubicado al centro del filtro: a) Vista en planta, b) Corte 1-1.....	18
Figura 2.10. Canal de recolección ubicado al costado del filtro: a) Vista en planta, b) Corte 1-1.....	18
Figura 2.11. Drenaje con tuberías perforadas.....	22
Figura 2.12. Sistema de drenaje con Falso fondo Leopold.....	23
Figura 2.13. Sistema de drenaje con bloque Wagner y tubería perforada.....	24
Figura 2.14. Desagüe con boquillas: (a) con tubería perforada, (b) con falso fondo.....	25
Figura 2.15. Falso fondo Weeler: losa con orificios piramidales y esferas de porcelana.....	25
Figura 2.16. Sistema de drenaje de falso fondo con placas porosas.....	26
Figura 3.1. Área de drenaje de la tubería perforada propuesta.....	30
Figura 3.2. Esquema de la propuesta y montaje en laboratorio.....	33
Figura 3.3. Dimensiones de CLASS 125 CAST IRON GATE VALVE.....	34
Figura 3.4. Dimensiones del prototipo de tubería perforada.....	35
Figura 3.5 Orificios tipo ranuras:(a) Dimensiones, (b) Disposición en la tubería.....	36
Figura 3.6. Configuración vista en corte para 2 y 3 orificios.....	36
Figura 3.7. Cajón de vidrio para ensayos en laboratorio.....	37

Figura 3.8. Forma y dimensiones del tanque para aforo de caudales	37
Figura 3.9. Instalación de bomba para sistema de recirculación	38
Figura 3.10. Instrumentos para aforo de caudales por el método volumétrico	39
Figura 3.11. Volumen de un tronco-cónico	40
Figura 3.12. Vertedor rectangular de pared delgada	41
Figura 3.13. Nivel del vertedero para aforo de caudales	41
Figura 3.14. Simbología para determinar los valores de H.....	42
Figura 3.15. Curva de descarga del vertedero de control.....	44
Figura 3.16. Piezómetros: Al inicio y al final de la tubería perforada	46
Figura 3.17. Instrumento para medición de alturas piezométricas, graduado en centímetros	46
Figura 3.18. Simbología utilizada para medir alturas piezométricas.....	47
Figura 4.1. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 1, densidad de orificios= 246 orif/m ²	55
Figura 4.2. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 2, densidad de orificios= 246 orif/m ²	56
Figura 4.3. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 3, densidad de orificios= 246 orif/m ²	57
Figura 4.4. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 1	60
Figura 4.5. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 2	60
Figura 4.6. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 3	60
Figura 4.7. Coeficientes de descarga en los dos sistemas de drenaje en función de la velocidad en los orificios	62
Figura 4.8. Pérdida de carga en los dos sistemas de drenaje en función del caudal de lavado	63
Figura 4.9. Capa soporte: a) convencional, b) con drenaje de ranuras	64

SIMBOLOGÍA

Q	Caudal que entra al drenaje [m ³ /s]
q _o	Caudal en cada orificio [l/s; m ³ /s]
P ₁ , P _n	Presión a la entrada y al final del dren [mca]
v	Velocidad media del orificio [m/s]
A _o	Área del orificio [m ²]
A _c	Área del orificio contraída [m ²]
C _c	Coefficiente de contracción
C _v	Coefficiente de Velocidad
C _d	Coefficiente de Gasto o descarga.
g	Gravedad [m/s ²]
H	Carga hidráulica hasta en el orificio [m]
ΔH	Carga hidráulica en orificios sumergidos [m]
TF	Tasa o velocidad de filtración [m ³ /m ² día; m/día]
TL	Tasa o velocidad de lavado [m ³ /m ² día; m/día]
A	Área del filtro [m ²]
ΔV	Volumen [l]
Δt	Tiempo [s]
H _f	Pérdida de carga en los orificios [m]
k	Coefficiente de pérdidas localizadas
n	Números de orificios

RESUMEN

El presente trabajo de titulación propone un sistema de drenaje de tubería perforada con orificios tipo ranura para filtros rápidos. Este sistema consiste en tubos de PVC con ranuras para la recepción y evacuación de agua. La configuración de las ranuras plantea la posibilidad de reducir el espesor de la capa soporte al disminuir el tamaño de los granos del medio filtrante y, por ende, el alto de las paredes del depósito que contiene al filtro.

El análisis experimental del dren está basado en la pérdida de carga durante el proceso de lavado, así como, el coeficiente de descarga en condiciones críticas de caudal. Al recabar información relacionada al tema, se definieron parámetros de estudio, tales como: caudales experimentales y alturas piezométricas. Para posteriormente, establecer los métodos de control de caudal y medición de presiones.

Al tratarse de un trabajo técnico-experimental se recurrió a la modelación física del fenómeno hidráulico en laboratorio. Para lo cual se estableció un plan de pruebas, en el cual se realizaron 3 ensayos en el prototipo (Tubo de PVC de diámetro 100 mm y ranuras de 1 mm de ancho y 26 mm de largo, con separación de 5 cm). Además, se realizó el procedimiento en un tubo perforado con orificios circulares de área semejante, para comparar los resultados de pérdida de carga y coeficientes de descarga, de la propuesta y de un sistema convencional.

Palabras claves: Sistema de drenaje, tubería perforada, orificios tipo ranura, filtros rápidos, pérdida de carga, coeficiente de descarga.

ABSTRACT

The present degree work proposes a perforated pipe drainage system with slot type holes for rapid filters. This system consists on PVC pipes with slots for the reception and evacuation of water. The configuration of the slots raises the possibility of reducing the thickness of support layer, size of the grains of the filter media and, therefore, the height of the walls of the deposit containing the filter.

The experimental analysis of drain is based on the head loss during the washing process, as well as, discharge coefficient in critical flow conditions. When gathering information related to subject, study parameters were defined, such as: experimental flow rates and piezometric head. For later, to establish the methods of flow control and pressure measurement.

Being a technical-experimental work, the physical modeling of hydraulic phenomenon was made in laboratory. To this end, a test plan was established, in which 3 tests were carried out on the prototype (PVC tube with a diameter of 100 mm and slots 1 mm wide and 26 mm long, with a separation of 5 cm). Additionally, the procedure was performed in a perforated tube with circular holes of similar area, to compare the results of head loss and discharge coefficients, of the proposal and of a conventional system.

Key words: Drainage system, perforated pipe, slot type holes, rapid filters, head loss, discharge coefficient.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto de titulación consta de cinco capítulos organizados de la siguiente manera:

El primer capítulo abarca los antecedentes relacionados a la evolución de los drenajes en los filtros rápidos y los parámetros que intervienen en el análisis de los mismos. También, señala los objetivos que se pretende obtener durante la investigación y la justificación del estudio.

En el segundo capítulo, se presenta el fundamento teórico y el estado del arte que se indagó para la elaboración del tema, y donde se explica la teoría específica de los filtros rápidos, en especial de los tipos de drenajes y su funcionamiento.

En el tercer capítulo, la metodología enfoca la planificación de los ensayos en laboratorio, preparación del modelo y los parámetros a los que estarán sometidos durante las pruebas.

El cuarto capítulo aborda los resultados obtenidos al someter los prototipos a la experimentación planteada en el capítulo tres, tales como pérdida de carga y coeficientes de descarga.

Por último, el quinto capítulo expondrá las conclusiones que se ha podido obtener de los resultados y las propuestas por parte del autor para investigaciones futuras que se podrían desarrollar a partir de este análisis.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable se torna en un requerimiento cada vez más difícil de satisfacer para los Gobiernos a nivel nacional en el Ecuador (SENAGUA, 2014). La disminución en las fuentes de las cuales se podría captar y la constante contaminación de las mismas exige que las plantas de tratamiento para potabilización sean cada vez más eficientes y a la vez, no eleven el costo del agua en comparación a sistemas ya existentes (EPMAPS, 2011).

El correcto diseño y funcionamiento de cada proceso unitario en la potabilización permitirá tratar un volumen diario de agua suficiente y necesario para la población (Gomella & Guerrée, 1977). Por lo que es indispensable mejorar los procesos tecnológicos que intervienen en el tratamiento del agua.

Entre otros elementos, los filtros rápidos tienen el sistema de drenaje el cual debe asegurar dos condiciones de trabajo óptimo. Primero, extraer toda el agua filtrada; y segundo, distribuir uniformemente el líquido para el proceso de lavado. (Kemmer & McCallion, 1996).

La tecnología para los drenes ha evolucionado en gran manera de acuerdo a las nuevas solicitudes que la sociedad ha requerido de ellos. La más antigua de estas es aquella que utiliza tuberías perforadas para trabajo con grava. Sin embargo, el mayor problema que se presenta en este tipo de dren es la alta pérdida de carga en el proceso, la cual varía de 1.80 a 2.80 m (Arboleda, 1973).

Al pasar las décadas, se han optimizado los procesos de filtración y de lavado implementando nuevos medios para coleccionar el agua. Por ejemplo, el “bloque Wagner” es un sistema que utiliza tuberías perforadas y bloques de concreto para la captación del agua; el objetivo es disminuir el tamaño de los granos del filtro y obtener una mejor distribución del agua en las secciones laterales durante el lavado (Arboleda, 1973).

De la misma manera, se podría mencionar muchos más sistemas como: fondo Weeler, fondo Leopold, o aquellos que utilizan boquillas: Dagremont, Paterson, EIMCO. Todos estos sistemas comparten el mismo propósito, pero tienen algo más en común, cada uno de los drenajes está regido a una patente (CONAGUA, 2007)

Con lo planteado, se genera un dilema para los interesados en potabilizar agua. ¿Cómo realizar los procesos más efectivos y eficaces sin necesidad de elevar los costos al utilizar sistemas patentados para cumplir las condiciones de cantidad y calidad del líquido? Como respuesta a esta interrogante se presenta la siguiente investigación experimental, para que los involucrados en el tema tengan una alternativa de drenaje que cumpla con las condiciones hidráulicas en los procesos de filtración y lavado; y a la vez, disminuya la inversión en comparación con sistemas patentados.

Se propone un sistema de drenaje de tubería perforada con orificios tipo ranura, el cual se someterá al análisis de pérdida de carga durante el proceso de lavado por ser el caso más crítico de caudal, así como, el coeficiente de descarga del mismo en las condiciones críticas. Además, se plantea la posibilidad de disminuir el espesor de la capa soporte al disminuir el tamaño de los granos y por ende el alto de las paredes del depósito que contiene al filtro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar hidráulicamente un sistema de drenaje de tubo perforado constituido por orificios tipo ranura para filtros rápidos, mediante ensayos en laboratorio con el fin de determinar las condiciones hidráulicas de pérdida de carga y coeficiente de descarga para distintos caudales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer parámetros y criterios mediante la recopilación de información con el fin de obtener fundamentos teóricos confiables que se requieren en los procesos de filtración y lavado.

- Obtener valores de caudal y diferencia de presión por medio de ensayos en laboratorio para determinar las condiciones hidráulicas de trabajo de la propuesta.
- Definir el grado de mejora de la propuesta mediante el análisis de resultados obtenidos en los modelos físicos para determinar las dimensiones que brindan la menor pérdida de carga y mejor coeficiente de descarga.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la potabilización de agua, la filtración pretende separar sólidos suspendidos y microorganismos del líquido que no han sido retenidos previamente en los procesos anteriores. La adherencia y la resistencia al esfuerzo cortante permiten que los sólidos suspendidos sean retenidos entre los granos en la parte superior del filtro, mientras el agua filtrada es recogida por el sistema de drenaje (Arboleda, 1973; Gomella & Guerrée, 1977).

Por otro lado, el lavado del filtro es la operación donde se suspende el filtrado y se inyecta agua a presión desde la parte baja mediante el drenaje con el fin de expandir los granos y que el material retenido se desprenda (Kemmer & McCallion, 1996).

Como se explicó anteriormente, el sistema de drenaje debe asegurar dos condiciones de trabajo óptimo. Primero, extraer toda el agua filtrada; y segundo, distribuir uniformemente el líquido para el proceso de lavado. Los drenajes con tuberías perforadas han sido utilizados por mucho tiempo para este fin, pero la alta pérdida de carga en el proceso genera un gran problema en el diseño (Arboleda, 1973).

El presente proyecto de titulación propone un sistema de drenaje de tubería perforada con orificios tipo ranura, con el fin de obtener una adecuada pérdida de carga a partir del análisis de coeficiente de descarga y disminuir la altura del fondo drenante, ya que se puede colocar la arena filtrante directamente en contacto con el dren o utilizando apenas una capa torpedo.

La metodología utilizada para la elaboración de este trabajo de titulación se basa en los lineamientos generales y modelos teóricos enunciados por Jorge Arboleda Valencia (1973). Los conceptos teóricos de Kemmer & McCallion (1996) sustentan el modelo que Arboleda presentó en su investigación, permitiendo de esta manera validar la hidráulica de filtración y lavado.

Arboleda (1973) enuncia las tasas normales al que opera un filtro rápido y al analizar los requerimientos en los que se desarrollan se establece que el proceso más crítico es el de lavado. Las tasas de lavado, en comparación a las tasas normales de filtración, son mayor a 3 veces induciendo una mayor pérdida de carga durante su desarrollo (Arboleda, 1973).

Algunos autores sugieren que las tasas de lavado no deben ser inferiores a $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$, debido a que en la operación de un filtro real no se produciría la correcta limpieza de los granos del medio filtrante. Por esta razón, se ha optado en realizar ensayos a diferentes tasas apeándose en lo posible a la realidad (Gomella & Guerrée, 1977; Arboleda, 1973, Kemmer & McCallion, 1996).

Cabe recalcar que el presente estudio se concentrará en el análisis de pérdida de carga que se produce por el paso del agua entre las ranuras del tubo de PVC perforado. Con el fin de lograr buenos resultados se utilizarán distintos caudales y se comparará las mediciones obtenidas en los piezómetros que serán colocados en el drenaje y en la evacuación del agua por el vertedero de control.

Para determinar el coeficiente de descarga (C_d) del orificio tipo ranura, se contará con un vertedero rectangular para el aforo de caudales mediante su curva de descarga. Por consiguiente, la cantidad de líquido que traviese por el vertedero será el mismo que atravesase por los orificios debido al principio de continuidad. Esto nos permitirá determinar el C_d basándose en la teoría de la hidráulica general de orificios (Sotelo, 2011).

Finalmente, la propuesta permitirá la disminución de la capa soporte, ya que se necesitaría grava de menor tamaño por la configuración de las ranuras y de esta forma la altura de las paredes en los depósitos bajaría, otorgando un ahorro en su construcción.

En forma práctica, la propuesta permitirá reducir el gasto presupuestal y, por ende, obtener una mejor calidad de líquido si consideramos que la Secretaria Nacional del Agua (2014) indica que los ineficientes «y en algunos casos ausentes» procesos de potabilización están asociados a la baja inversión monetaria que los gobiernos hacen para lograr la calidad del producto. (SENAGUA, 2014). Por otro lado, se dispondría de una tecnología simple y eficiente, no sujeta a patentes.

De esta manera, se podría garantizar el acceso y de la misma manera, la calidad y cantidad del agua como lo estipula la Constitución política del Ecuador (2008, art. 12) y que no se ha cumplido según lo señala Acosta (2010) que para el año 2006 el 54% del país es abastecido de agua en condiciones de regulares a malas.

1.4 GUÍA DEL DOCUMENTO

La redacción de esta guía tiene como finalidad: indicar brevemente el contenido de los 5 capítulos que conforman la tesis de grado y manifestar el trabajo de investigación realizado por el autor durante el desarrollo del proyecto de titulación.

El primer capítulo abarca los antecedentes relacionados a la evolución de los drenajes en los filtros rápidos y los parámetros que intervienen en el análisis de los mismos. También, señala los objetivos que se pretende obtener durante la investigación y la justificación del estudio.

En el segundo capítulo, se presenta el fundamento teórico y el estado del arte que se indagó para la elaboración del tema, y donde se explica la teoría específica de los filtros rápidos, en especial de los tipos de drenajes y su funcionamiento.

En el tercer capítulo, la metodología enfoca la planificación de los ensayos en laboratorio, preparación del modelo y los parámetros a los que estarán sometidos durante las pruebas.

El cuarto capítulo aborda los resultados obtenidos al someter los prototipos a la experimentación planteada en el capítulo tres, tales como pérdida de carga y coeficientes de descarga.

Por último, el quinto capítulo expondrá las conclusiones que se ha podido obtener de los resultados y las propuestas de parte del autor para investigaciones futuras que se podrían desarrollar a partir de este análisis.

CAPÍTULO 2

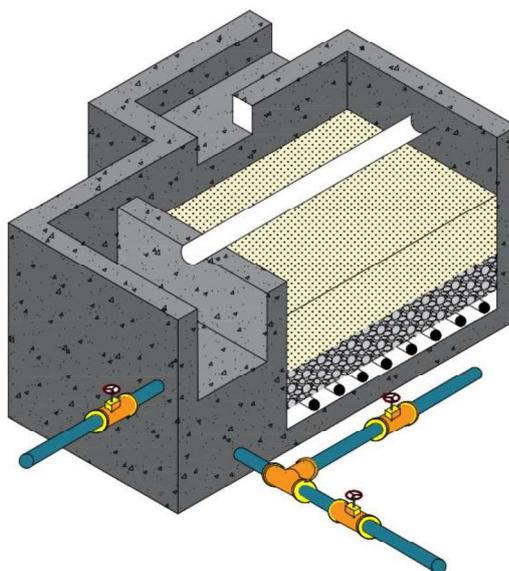
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 FILTROS RÁPIDOS

Los filtros rápidos, cuya operación consta de dos etapas: filtración y lavado, son el mecanismo más utilizado en la potabilización de agua en la actualidad (Romero, 1999). En general, están formados por un lecho filtrante de arena o multicapa, con flujo a gravedad y lavado ascendente (Arboleda, 1973; Gomella & Guerrée, 1977; Kemmer & McCallion, 1996; Romero, 1999). En la figura 2.1 se presenta un filtro rápido convencional

Figura 2.1. Vista en perspectiva de un filtro rápido convencional



Elaborado por: Eduardo Pinos

Su nombre hace referencia a las altas tasas con las que opera el filtro en comparación a los filtros lentos (Cleasby & Baumann, 1962; Romero, 1999). Las tasas normales de operación de un filtro lento están entre los valores de 7 a 14 m^3/m^2 día, mientras que un filtro rápido podría funcionar con tasas de 120 a 360 m^3/m^2 día (Arboleda, 1973). Otras características de los filtros rápidos y lentos se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales características de los filtros

CARACTERÍSTICAS	FILTROS LENTOS DE ARENA	FILTROS RÁPIDOS DE ARENA	FILTROS DE ALTA TASA
Tasa de filtración Medio	2-5 (<12 m/d) Arena	120 m/d Arena	180-480 m/d Arena, antracita y otros
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado de fino a grueso	Estratificado de grueso a fino
Duración carrera	20-60 días	12-36 horas	12-36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0.6m Final: 1.2 m	Inicial: 0.3m Final: 2.4-3 m	Inicial: 0.6m Final: 2.4-3 m
Agua de lavado	No usa	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0.6-1.0 m	0.6-0.75 m	Antracita: 0.4-0.6 m Arena: 0.15-0.3 m
Profundidad de grava Drenaje	0.30 m Tubería perforada	0.3-0.45 m Tubería perforada Falso fondo	0.3-0.45 m Tubería perforada Falso fondo

Fuente: Romero, J. (1999).

Elaborado por: Eduardo Pinos

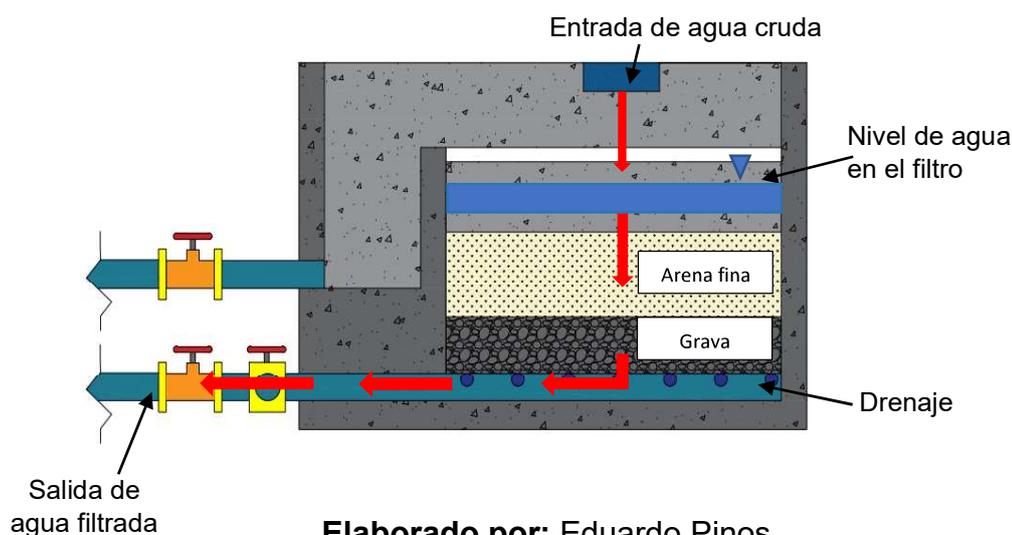
Con base en que este tipo de filtro ejecuta su operación con altas tasas de filtrado, Kemmer y McCallion (1996) aseveran que prácticamente no se forma biopelícula y por lo tanto los procesos biológicos son casi nulos. Además, Romero (1999) por la misma razón explica que se requiere menores áreas de construcción para lograr la misma cantidad de agua filtrada.

2.1.1.1 PROCESO DE FILTRACIÓN

Corresponde al proceso en el cual un caudal atraviesa un lecho granular en sentido descendiente debido a la acción de la gravedad. La fuerza ejercida por la columna de agua sobre el lecho es la causante que el líquido pase por los poros del medio y sea succionada mediante un dren (Arboleda, 1973). La filtración se efectúa mediante el control de válvulas y realiza el recorrido indicado en la figura 2.2.

La filtración se utiliza para remover partículas que no pudieron ser retenidas anteriormente, mediante interacciones físicas y químicas, tales como: adsorción o fuerzas de atracción (Romero, 1999; CEPIS, 2002, Silva, 2015). La obstrucción de sólidos se produce en los primeros centímetros del filtro de manera que forma un colchón en la superficie (Kemmer y McCallion, 1996)

Figura 2.2. Uso de válvulas y proceso de filtración en un filtro rápido



La temperatura es un factor que afecta el rendimiento de la filtración. Debido a la dependencia de la viscosidad del líquido con la temperatura, se aumenta o se disminuye la facilidad de paso entre los poros del medio filtrante (CONAGUA, 2007; Kemmer y McCallion, 1996)

Para asegurar un correcto funcionamiento del filtro a gravedad se debe considerar los procesos predecesores: cribado, floculación y sedimentación (Arboleda, 1973). La mezcla rápida es un factor indispensable para obtener buenos rendimientos, en especial cuando se utiliza altas tasas de filtración (AWWA & ASCE, 2005).

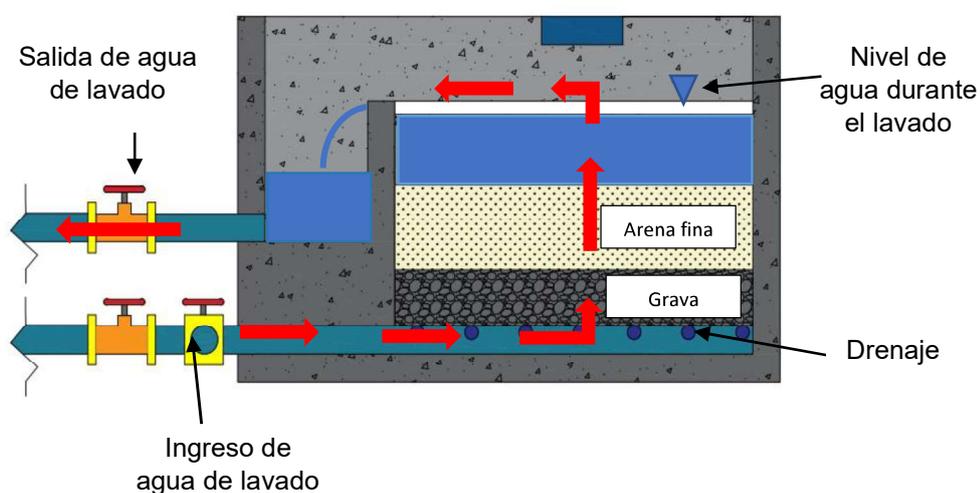
2.1.1.2 LAVADO DE FILTROS

El objetivo es regresar la capacidad de retención inicial de los granos del filtro cuando la calidad del efluente es menor a la esperada, es decir, el filtro permite el paso de una cantidad de partículas no admisible. O, cuando la pérdida de carga es igual a la carga hidráulica disponible sobre el lecho filtrante (Kemmer & McCallion, 1996).

Para el proceso de lavado se cambia la dirección del flujo realizada en la filtración. Este procedimiento se lo conoce como retro lavado y generalmente es en sentido ascendente (Arboleda, 1973; Gomella & Guerrée, 1977).

El agua destinada para el lavado puede provenir de: a) un tanque elevado, b) un sistema de bombeo, u c) otros filtros trabajando en paralelo (Arboleda, 1973; CONAGUA, 2007). La figura 2.3 indica la trayectoria que realiza el agua durante el lavado.

Figura 2.3. Uso de válvulas y proceso de lavado en un filtro rápido



Elaborado por: Eduardo Pinos

El lavado de los granos puede realizarse por fluidización simple, otorgando un caudal suficiente para lograr separar los granos del medio y despegar las partículas retenidas colocándolas en suspensión; o, mediante un lavado superficial adicional e introducción de aire (Romero, 1999). En la tabla 2.2 se presenta las metodologías de lavado que se pueden realizar en la limpieza de un filtro rápido.

Un problema recurrente que se presenta durante el lavado es la pérdida de material granular, especialmente cuando se utiliza arena fina. Como soluciones Arboleda (1973) aconseja recurrir a la utilización de arenas más gruesas, o su vez, usar arenas con mayores coeficientes de uniformidad. Otra recomendación del autor es cambiar el drenaje por uno de mejor distribución de agua.

Tabla 2.2. Metodología de lavado y principales características

TIPO DE LAVADO	CARACTERISTICAS PRINCIPALES
Flujo ascendente	Inyección solo de agua por los drenes. Expansión del 10 al 50%. Tasas de lavado siempre mayor a velocidades de fluidización.
Flujo ascendente y lavado superficial	Inyección de agua por los drenes e introducción de agua a presión por encima de la superficie del lecho. El lavado superficial rompe las bolas de barro alojadas en la superficie mediante chorros de agua provenientes de rociadores o brazos giratorios tipo Palmer. Las tasas y presiones del agua para lavado superficial dependen de cada inyector.
Lavado con agua y aire	Inyección de agua y aire por los mismos drenes. El aire inyectado produce gran turbulencia y fuerzas de tipo cortante que facilitan el desprendimiento del material retenido. Se puede introducir primero el aire y posteriormente el agua, o hacerlo de manera conjunta. Expansión del 10%. Tasas de aire: 432 a 1296 m ³ /m ² día durante 3 min. Tasas de agua: 432 a 846 m ³ /m ² día durante 4 a 7 min.
Flujo ascendente y lavado subsuperficial	Inyección de agua por 10os drenes e inyección de agua a través de una malla de tubos colocada dentro del lecho filtrante. Se utiliza en caso de penetración profunda cuando el lavado superficial no es suficiente y el lavado con aire no es confiable. Se debe evitar el taponamiento de los tubos por los granos del lecho filtrante.
Lavado mecánico	Inyección de agua por los drenes y agitación del lecho fluidificado mecánicamente.

Fuente: Arboleda, J. (1973).

Elaborado por: Eduardo Pinos

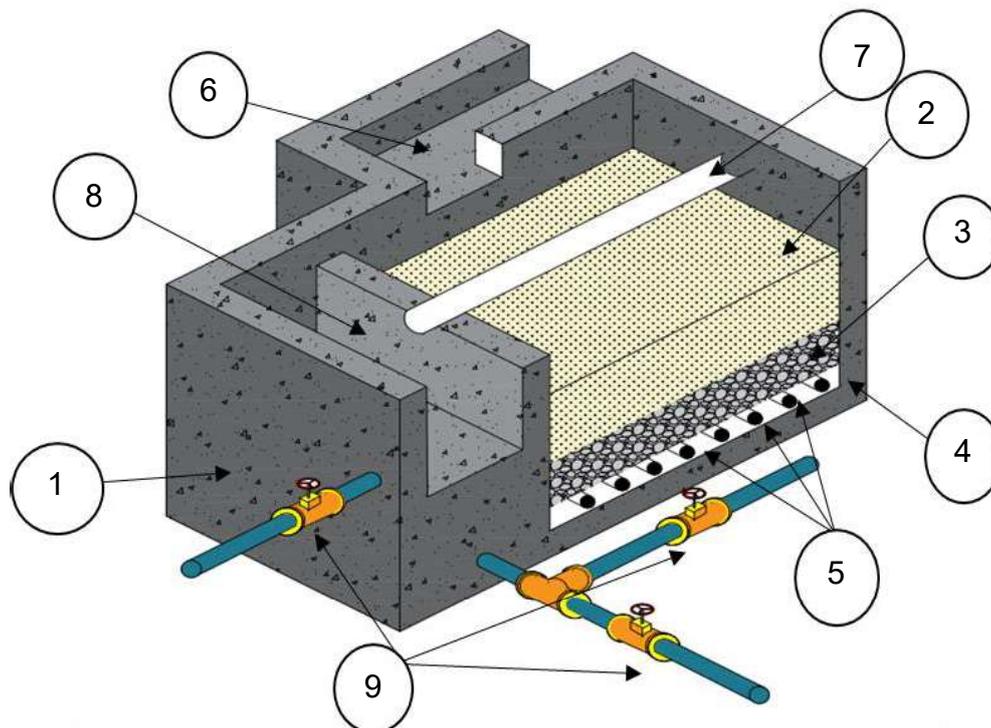
2.1.2 COMPONENTES DE UN FILTRO RÁPIDO

Un filtro rápido está compuesto por los siguientes elementos y representados en la figura 2.4:

1. Depósito de hormigón en filtros a gravedad. Para filtros a presión, metálico.
2. Lecho filtrante, de una capa o multicapa, colocado sobre el falso fondo.
3. Capa soporte de material granular grueso. El espesor de esta capa generalmente es de 30 a 45 centímetros, en este estudio es lo que se pretende reducir; por cuanto el orificio ranura permite utilizar solo arena gruesa y no grava como capa soporte.

4. Falso fondo de hormigón, plástico o cerámica para colocación de drenaje
5. Sistema de drenaje e inyección de agua y aire de lavado.
6. Entrada de agua bruta mediante canales con vertederos o compuertas.
7. Canaletas de lavado.
8. Canal de desagüe para recoger el agua de lavado
9. Válvulas de control.

Figura 2.4. Componentes de un filtro rápido a gravedad



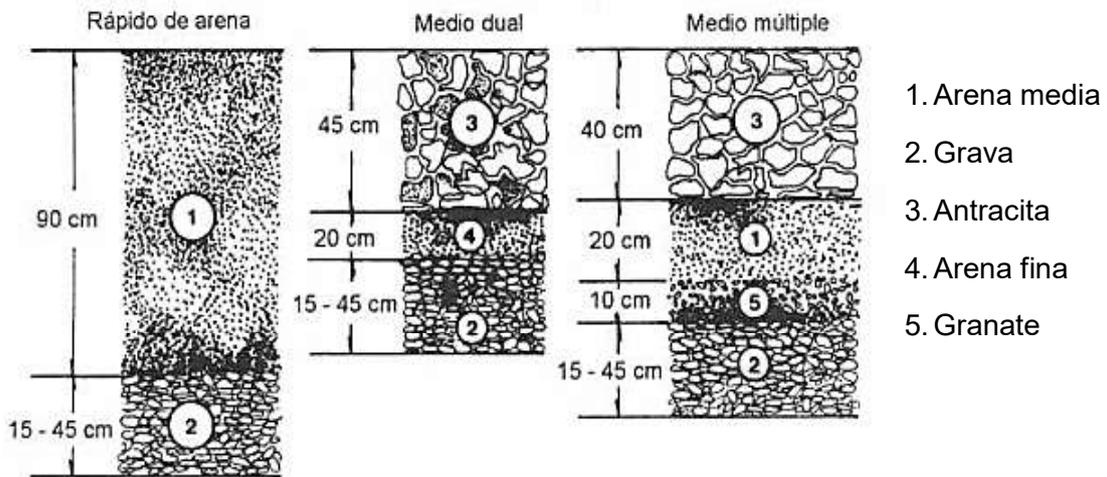
Elaborado por: Eduardo Pinos

2.1.2.1 MEDIO FILTRANTE

En general, un filtro puede utilizar lechos de un solo medio, medio dual o múltiple (Romero, 1999). De la gran variedad de materiales que se utilizan en la actualidad, se tiene como más común a la arena de sílice, y con mucha frecuencia a la antracita triturada (Kemmer y McCallion, 1996; Romero, 1999).

Otros materiales como el granate o la ilmenita son usados para filtrar agua. Sin embargo, son menos populares y se consideran para capas de menor tamaño en medios múltiples (Romero, 1999). Las configuraciones de medios filtrantes de mayor frecuencia se indican en la figura 2.5.

Figura 2.5. Medios filtrantes en filtros rápidos



Fuente: Romero, J. (1999).

Para determinar el material granular y el tamaño de capa es necesario realizar un análisis granulométrico por tamizado, ya sea en la serie americana o la serie de Tyler (Kemmer y McCallion, 1996). El diseño del medio filtrante se especifica considerando características físicas como coeficiente de uniformidad [C_u], tamaño efectivo [d_e] y peso específico [γ] (Ojeda, 2013). Estos parámetros se definen de la siguiente manera:

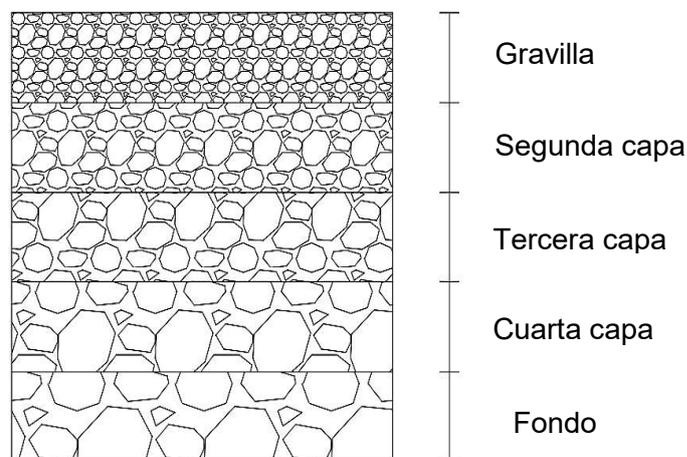
- **Tamaño efectivo:** es el diámetro de los granos relacionado al 10% del material que pasa la serie de tamices en la curva granulométrica.
- **Coficiente de uniformidad:** es la relación entre el diámetro de los granos relacionado al 60% del material que pasa la serie de tamices en la curva granulométrica con el tamaño efectivo.
- **Peso específico:** es el peso del material por unidad de volumen que ocupa. Este parámetro es importante porque ayuda a determinar la tasa de lavado para lograr una correcta fluidización.

El material acogido para formar el lecho filtrante debe cumplir con las condiciones de ser lo suficientemente grueso para otorgar la capacidad suficiente de almacenamiento y lo suficientemente fino para detener el paso de sólidos suspendidos. Además, la graduación del lecho tiene responsabilidad en la eficiencia de lavado (Arboleda, 1973; CONAGUA, 2007).

2.1.2.2 CAPA SOPORTE

En un filtro rápido se coloca un medio granular grueso entre el medio filtrante y el dren, con el propósito de servir como soporte e impedir el paso de los granos por las aberturas del drenaje (CONAGUA, 2007; Ojeda, 2013). Dicho medio está conformado por varias capas como se indica en la figura 2.6; normalmente, de grava dura y limpia, con forma esférica sin aristas conocida como canto rodado, de densidad relativa superior a 2,5 (Arboleda, 1973; Ojeda, 2013).

Figura 2.6. Capa soporte típica utilizada en filtros rápidos



Fuente: Romero, J. (1999).

Elaborado por: Eduardo Pinos

El tamaño de la grava se incrementa uniformemente de arriba hacia abajo, de tal manera que la capa superior tenga elementos de tamaño adecuado para evitar el paso del medio filtrante y la capa inferior contenga material de mayor tamaño que las aberturas del drenaje. Esta configuración logra alturas del medio entre 15 a 60 cm en total e impide el desarreglo después del lavado (Arboleda, 1973; Romero, 1999). El orificio tipo ranura del sistema de drenaje propuesto permite disminuir esta altura, evitando usar capas de grava por una capa de arena gruesa.

La mayoría de sistemas de drenaje necesitan que se coloque la capa soporte o medio granular para su correcto funcionamiento. En algunos casos, los fabricantes especifican los tamaños y las alturas requeridas para su producto. Sin embargo, existen algunos otros que no requieren la utilización de la misma por lo que es indispensable conocer el tipo de dren a usarse (Arboleda, 1973; CONAGUA, 2007).

En la tabla 2.3 se presenta la típica capa soporte utilizada en filtros rápidos con drenaje de tubería perforada. Como recomendación, las alturas individuales de las capas no deben ser inferiores a 5 cm (Arboleda, 1973).

Tabla 2.3. Capa soporte de grava utilizada con sistema de drenaje por tuberías

DESCRIPCIÓN	N° DE CAPA				
	1	2	3	4	5
Profundidad de la capa en cm	10	7,5	7,5	10	10
Abertura de malla cuadrada en pulgadas pasando	1	3/4	1/2	1/4	1/8
Abertura de malla cuadrada en pulgadas retenido	3/4	1/2	1/4	1/8	1/16

Fuente: Romero, J. (1999).

Elaborado por: Eduardo Pinos

2.1.2.3 DRENAJE

El sistema de drenaje es primordial para la recolección del agua después de ser filtrada a través del lecho filtrante. Aunque, la función más importante de este es la distribución uniforme del agua para el lavado del filtro (CONAGUA, 2007; CEPIS, 2002).

Existen muchas tecnologías para el dren del agua, las mismas que abarcan tuberías perforadas, placas porosas, bloques y boquillas (Arboleda, 1973). La mayoría de estos sistemas son patentados por lo que es necesario conocer las especificaciones técnicas de implementación y funcionamiento de cada uno (Romero, 1999). En la tabla 2.4 se indica el tipo de sistema y el uso que tiene.

Tabla 2.4. Sistemas de drenajes

TIPO	USO
Tuberías perforadas	Para trabajo con grava Para trabajo con bloques y grava Para trabajos con boquillas
Falsos fondos	Fondo Weeler Fondo Leopold Boquillas Prefabricados
Placas porosas	Bloques permeables

Fuente: CONAGUA (2007).

Elaborado por: Eduardo Pinos

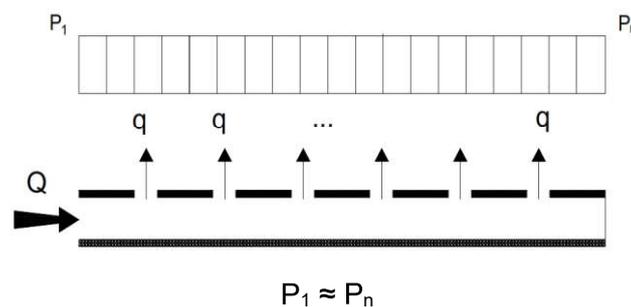
La información básica que se requiere para el uso de los drenajes incluye: número de drenes, separación entre elementos y el tipo de capa soporte (CONAGUA, 2007). En general, se complementan con el uso de grava para evitar el paso de material y distribuir el agua de lavado; sin embargo, existen algunos sistemas que no requieren de capa soporte (Romero, 1999).

Arboleda (1973) señala que es importante diseñar correctamente el drenaje de un filtro, a causa de la desestratificación que se produce en la grava por la distribución no uniforme del líquido. Este problema conlleva a un desplazamiento irregular de la grava y que parte del medio filtrante se hunda para ser mezclado con el medio de soporte. Teniendo como consecuencia final, la obligatoriedad de retirar todo el material y reconstruir el filtro.

Con base a la desestratificación del medio de soporte por la mala distribución del agua de lavado, se debe prestar mayor atención a la hidráulica del sistema de drenaje (Arboleda, 1973).

Los sistemas de drenaje, que tienen buen funcionamiento hidráulico, procuran que la diferencia de presión sea mínima entre las secciones de inicio y fin del dren con el fin de uniformizar el diagrama de presiones y lograr el paso de casi el mismo caudal en cada orificio [Figura 2.7] (Arboleda, 1973).

Figura 2.7. Diagrama de presiones en un dren



Elaborado por: Eduardo Pinos

Dónde: Q = Caudal que entra al drenaje

q = Caudal en cada orificio

P_1, P_n = Presión a la entrada y al final del dren

Para el caso de tuberías perforadas se controla el problema mediante la regulación de la velocidad del agua a la entrada al dren, esto se analizará en el apartado 2.1.4.1 (Arboleda, 1973).

En el análisis hidráulico de los sistemas de drenaje, se debe considerar que se trata de orificios sumergidos y, por ende, la hidráulica general de orificios es aplicable para su diseño.

Partiendo de la ecuación de Torricelli (Sotelo, 2011):

$$v = \sqrt{2 g H} \quad (2.1)$$

Dónde: v = Velocidad media del orificio [m/s]

g = Gravedad [m/s^2]

H = Carga hidráulica hasta el centro de gravedad del orificio [m]

En términos experimentales, para tener datos conformes a la realidad se debe corregir la ecuación de la siguiente manera:

$$v = C_v \sqrt{2 g H} \quad (2.2)$$

Dónde: C_v = Coeficiente de Velocidad

De la misma manera el área que interviene en el paso del agua se debe corregir debido a la contracción que se efectúa en las paredes del orificio, obteniendo:

$$A_c = C_c A_o \quad (2.3)$$

Dónde: A_c = Área contraída [m^2]

A = Área del orificio [m^2]

C_c = Coeficiente de contracción

Del concepto de caudal:

$$Q = v A_c \quad (2.4)$$

Remplazando:

$$Q = C_c C_v A \sqrt{2 g H} \quad (2.5)$$

Si $C_d = C_c C_v$, se obtiene la ecuación general de orificios de pared delgada

$$Q = C_d A \sqrt{2 g H} \quad (2.6)$$

Dónde: C_d = Coeficiente de Gasto o descarga.

Para la presente investigación, se determina que el caso de estudio se refiere a orificios totalmente sumergidos dando paso a la siguiente ecuación:

$$Q = C_d A \sqrt{2 g \Delta H} \quad (2.7)$$

Dónde: ΔH = Diferencia de carga hidráulica en los orificios [m]

2.1.2.4 CANALETAS DE LAVADO

Se utilizan para recoger el agua de lavado e impedir la salida del material del medio filtrante durante el proceso. Son de varias formas [Figura 2.8] y de materiales anticorrosivos, conectadas al canal de recolección ubicado al centro del filtro o a un costado como se muestran en las figuras 2.9 y 2.10 respectivamente (Arboleda, 1973; Romero, J. 1999).

Se debe evitar el ahogamiento de las canaletas durante la expansión del medio asegurando un correcto funcionamiento, para lo cual se colocan en posición horizontal o con pendientes de 2 a 5% sobre el lecho filtrante expandido más un borde libre no menor al tamaño de la canaleta. En ciertos diseños no se utiliza canaletas, lo cual tiene sus ventajas como desventajas (Arboleda, 1973).

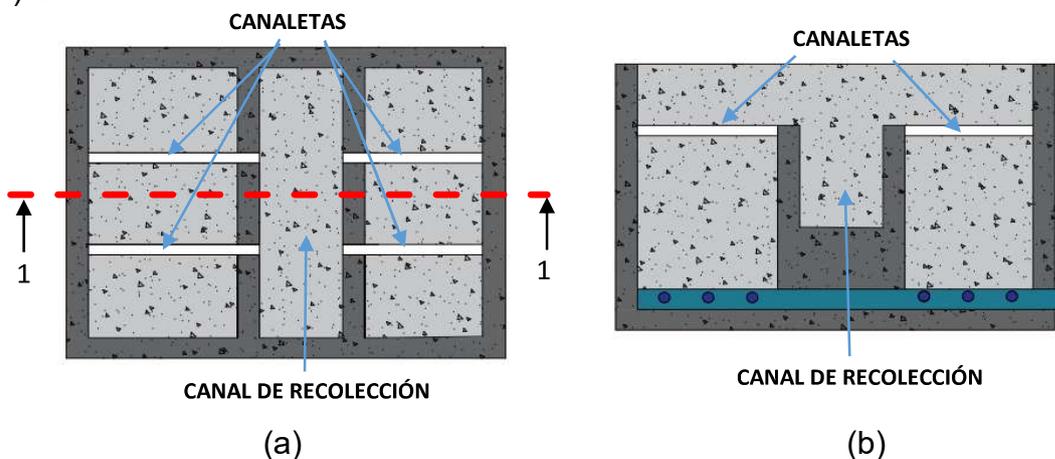
Figura 2.8. Secciones de canaletas de lavado



Elaborado por: Eduardo Pinos

Fuente: Arboleda, J (1973).

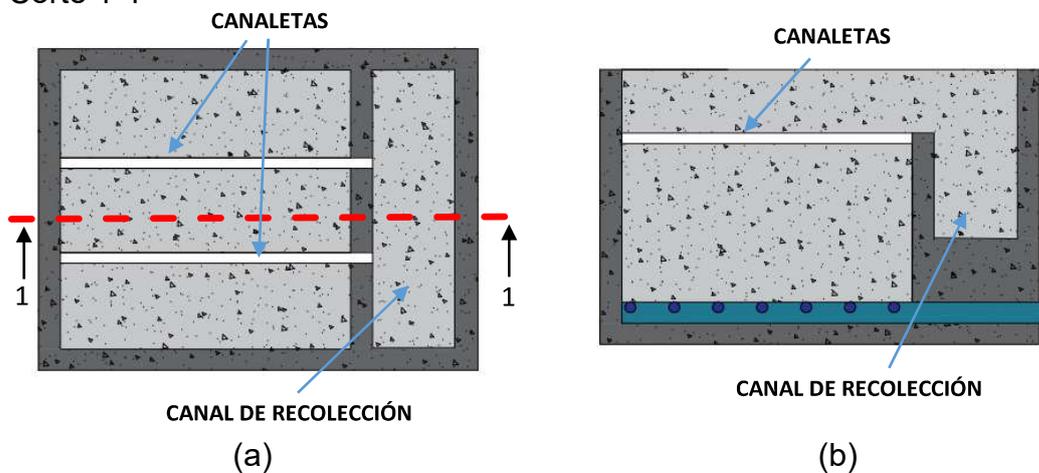
Figura 2.9. Canal de recolección ubicado al centro del filtro: a) Vista en planta, b) Corte 1-1



Fuente: Arboleda, J (1973).

Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 2.10. Canal de recolección ubicado al costado del filtro: a) Vista en planta, b) Corte 1-1



Fuente: Arboleda, J (1973).

Elaborado por: Eduardo Pinos

2.1.3 MEDIOS FILTRANTES

2.1.3.1 ARENA SILÍCEA

Está conformado por granos de cuarzo con características de alta dureza, consistencia y resistencia a la abrasión (Ojeda, 2013). Es el material de mayor uso debido su gran oferta en el mercado y su bajo costo, lo que lo hace económicamente accesible (Romero, 1999).

La arena para uso en medios filtrante debe ser lavada, de tal manera que no presente contenido orgánico, arcillas y limos. Estos materiales disminuyen la capacidad de almacenamiento del filtro y presentan otras condiciones desfavorables (Ojeda, 2013).

El mayor inconveniente en la arena es que no se puede utilizar medios filtrantes de un solo material estratificado de mayor a menor en dirección del flujo, porque después del lavado se auto gradúa de menor a mayor. El proceso mencionado produce una penetración profunda, sin embargo, para colocar en su posición original se debe retirar todo el material y estratificarlo de nuevo para empezar la filtración (Arboleda, 1973).

La norma AWWA B100-53 establece las características que debe cumplir la arena para filtración (AWWA & ASCE, 2005):

- Tamaño efectivo: 0.45 – 0.60 mm
- Coeficiente de uniformidad: < 1.6
- Tamaño máximo: 1.2 mm
- Tamaño mínimo: 0.42 mm
- Dureza en la escala Moh: 7.0
- Densidad relativa: ≥ 2.6
- Solubilidad en HCl al 40% en 24 horas: <5%
- Porosidad: 40 – 44 % arenas redondas
42 – 46 % arenas angulares

2.1.3.2 GRAVA

Es un medio conformado por cantos rodados de forma esférica y tendencia ovalada, libre de impurezas y material fino (Romero, 1999; CEPIS, 2002). Generalmente, se usa como capa soporte luego de la arena compuesto de 4 a 5 capas con una altura total de 45 a 50 cm (Arboleda, 1973).

En caso de utilizar fondos patentados, las alturas totales de la capa de grava disminuyen y dependen exclusivamente del sistema de drenaje escogido (Arboleda, 1973). Por ejemplo, en fondos Wagner se utiliza una capa de 35 cm, y en fondos Weeler, se coloca 30 cm de grava.

El tamaño de la grava se incrementa uniformemente de arriba hacia abajo, de tal manera que la capa superior tenga elementos lo suficientemente gruesos para evitar el paso del medio filtrante y la capa inferior contenga material de mayor tamaño que las aberturas del drenaje. Esta configuración impide el desarreglo después del lavado (Arboleda, 1973; Romero, 1999).

2.1.3.3 ANTRACITA

Es un tipo de carbón mineral no aglomerante con porcentaje de material volátil mayor a 2% y menor o igual a 8% (Romero, 1999; CEPIS, 2002). Al igual que la arena debe estar limpia de cualquier impureza y debe tener una alta durabilidad para resistir abrasión.

La norma AWWA establece los parámetros para evaluar la antracita que tiene como destino filtrar agua y se presenta las características que debe cumplir la arena para filtración, a continuación:

- Tamaño efectivo: 0.6 – 1.4 mm (filtros duales)
0.6 – 0.8 mm (filtro de un solo medio)
- Densidad relativa: ≥ 1.55
- Contenido de carbón libre: $\geq 85\%$ del peso
- Solubilidad en HCl al 40% en 24 horas: despreciable
- No perder más del 2% en una solución al 1% de NaOH
- Porcentaje de partículas planas: $\leq 30\%$
- Porosidad: 50 – 55 %
- Dureza en la escala Moh: ≥ 3.0

2.1.3.4 CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material altamente poroso con grietas tanto visibles como del tipo molecular, esta característica le permite tener propiedades propicias para el proceso de adsorción. Además, presenta una importante resistencia a las pérdidas por desgaste durante el transporte y la manipulación (AWWA & ASCE, 2005).

Este material se puede utilizar en forma de polvo o en su forma granular. La segunda presentación expuesta se la utiliza para reemplazar parcial o totalmente los medios granulares en filtros convencionales. En la Norma B604 de la American Water Works Association se detallan los ensayos para aprobar los tipos y marcas de carbón activado granular (AWWA & ASCE, 2005)

Los parámetros para el carbón activado según la AWWA (2005) son:

- Contenido de humedad: < 8%
- Resistencia a la abrasión: Mayor número de abrasión posible
- Durabilidad: retención de tamaño promedio < 70%.
- Contenido de cenizas: 5 - 8%. (Carbones bituminosos de grado metalúrgico)
10 - 15%. (Carbones sub-bituminosos)
20%. (Lignito)
- Cenizas solubles en agua: < 4%.
- Coeficiente de uniformidad: 1.7 a 2.4

2.1.4 TIPOS DE DRENAJES EN FILTROS RÁPIDOS

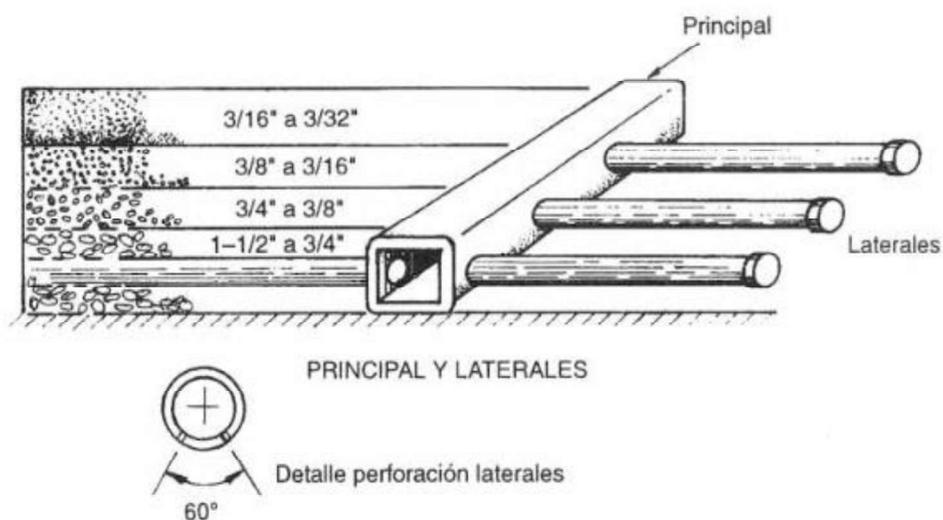
2.1.4.1 TUBERÍAS PERFORADAS

Conocido como el sistema de drenaje más antiguo utilizado en la filtración, las tuberías perforadas son de materiales plásticos para evitar corrosiones y deben presentar resistencia a la abrasión (CONAGUA, 2007).

La estructura del sistema está basada en una tubería central o matriz [Figura 2.11], de la que se distribuye el agua hacia otras tuberías de menor tamaño conocidas como laterales (Arboleda, 1973). Los laterales se perforan con orificios de tamaño relativo al diámetro de las tuberías, en cantidades de 1 a 3 por cada espaciamiento (AWWA & ASCE, 2005).

El mayor problema relacionado al uso de tuberías perforadas es la alta pérdida de carga generada por el paso del agua en los orificios. Este valor oscila entre 1.8 a 2.8 m, derivando la necesidad de diseñar el sistema de manera que se distribuya correctamente el agua de lavado (AWWA & ASCE, 2005; Arboleda, 1973). La tabla 2.5 sirve como ayuda para el dimensionamiento de la tubería principal la cual permite regular las velocidades de ingreso en los laterales.

Figura 2.11. Drenaje con tuberías perforadas



Fuente: Romero, J. (1999).

Tabla 2.5. Datos para diseño de tubería principal o matriz en sistemas de tubería perforada

ÁREA DE LOS FILTROS	GASTO MÁXIMO DE LAVADO	DIÁMETRO		ÁREA	VELOCIDADES EN EL TUBO
		mm	pulg		
m ²	l/s	mm	pulg	m ²	m/s
2.5	38	200	8	0.031	1.21
5	75	250	10	0.049	1.52
7.5	113	300	12	0.071	1.60
10.0	150	350	14	0.096	1.55
15.0	225	450	18	0.159	1.41
20.0	300	500	20	0.196	1.52
25.0	375	550	22	0.238	1.58
30.0	450	600	24	0.283	1.59
35.0	525	700	28	0.385	1.43
40.0	600	800	32	0.503	1.19
45.0	675	800	32	0.503	1.34
50.0	750	800	32	0.503	1.49

Fuente: Arboleda, J (1973).

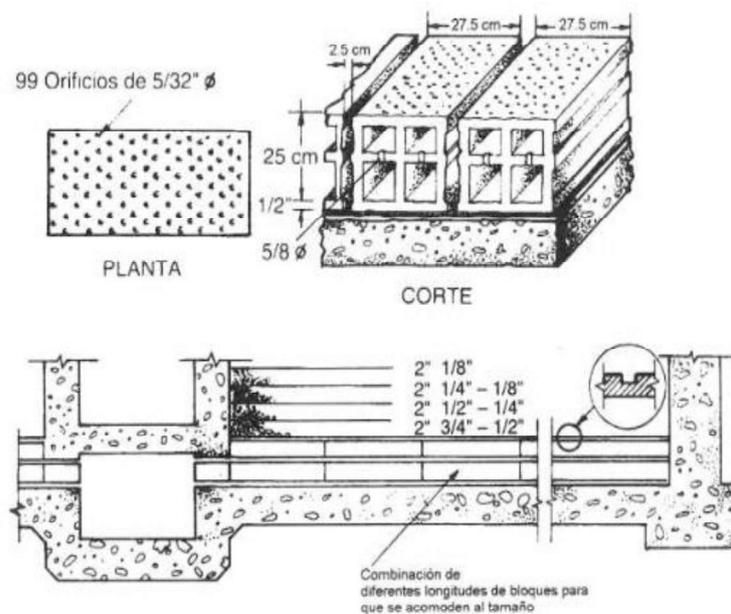
Elaborado por: Eduardo Pinos

2.1.4.2 FONDOS LEOPOLD

Patentado por F.B. Leopold Co. Inc, es un falso fondo constituido por bloques de arcilla vitrificada con 99 orificios, de diámetro 4 mm y espaciados de centro a centro 31 mm (CONAGUA, 2007). Los bloques son colocados sobre mortero formando filas separadas 25.4 mm (1 pulgada) entre ellas. El espacio vacío se rellena de mortero reforzado con varilla de acero a los costados de cada fila (Arboleda, 1973).

El objetivo de los fondos Leopold es disminuir el tamaño de la grava hasta el punto de utilizar solo las capas más finas, y la perforación del bloque funciona como criba la cual es la causante de la distribución homogénea del agua (CONAGUA, 2007).

Figura 2.12. Sistema de drenaje con Falso fondo Leopold



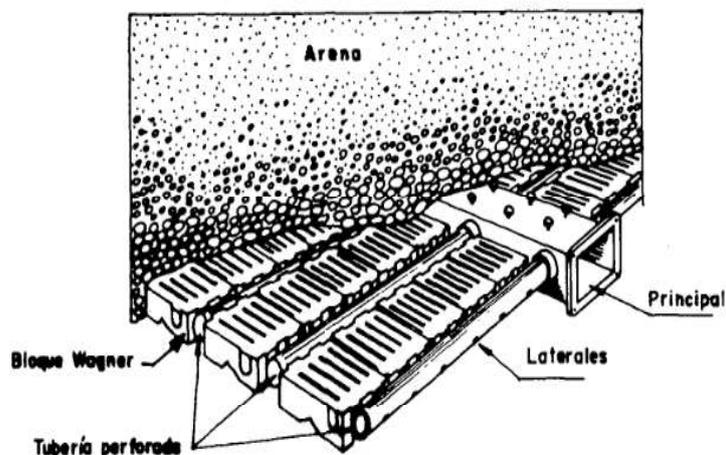
Fuente: Romero, J. (1999).

2.1.4.3 BLOQUE WAGNER

Patentado por Infilco Inc., es un sistema que utiliza tuberías para trabajo con bloques y grava [Figura 2.13]. El bloque es fabricado de concreto en sitio o prefabricado, de varias dimensiones para ser intercalado (Arboleda, 1973).

La ventaja de uso de bloques Wagner es la disminución de la capa soporte debido a su configuración, eliminando la capa de grava más gruesa y permitiendo una mejor distribución de los chorros desde las tuberías (CONAGUA, 2007).

Figura 2.13. Sistema de drenaje con bloque Wagner y tubería perforada



Fuente: Arboleda, J (1973).

2.1.4.4 BOQUILLAS PLÁSTICAS

Las boquillas plásticas se utilizan en sistemas de drenaje con tuberías o también en falsos fondos. Existe una gran variedad de boquillas, son de plástico resistente a la abrasión y diseñadas para trabajo con aire y agua. (CONAGUA, 2007).

Patentado por Patterson Candy Inc., se puede colocar boquillas sobre los laterales cada 15 cm de centro a centro para trabajo con aire y/o agua como se muestra en la Figura 2.14 (a) (Arboleda, 1973).

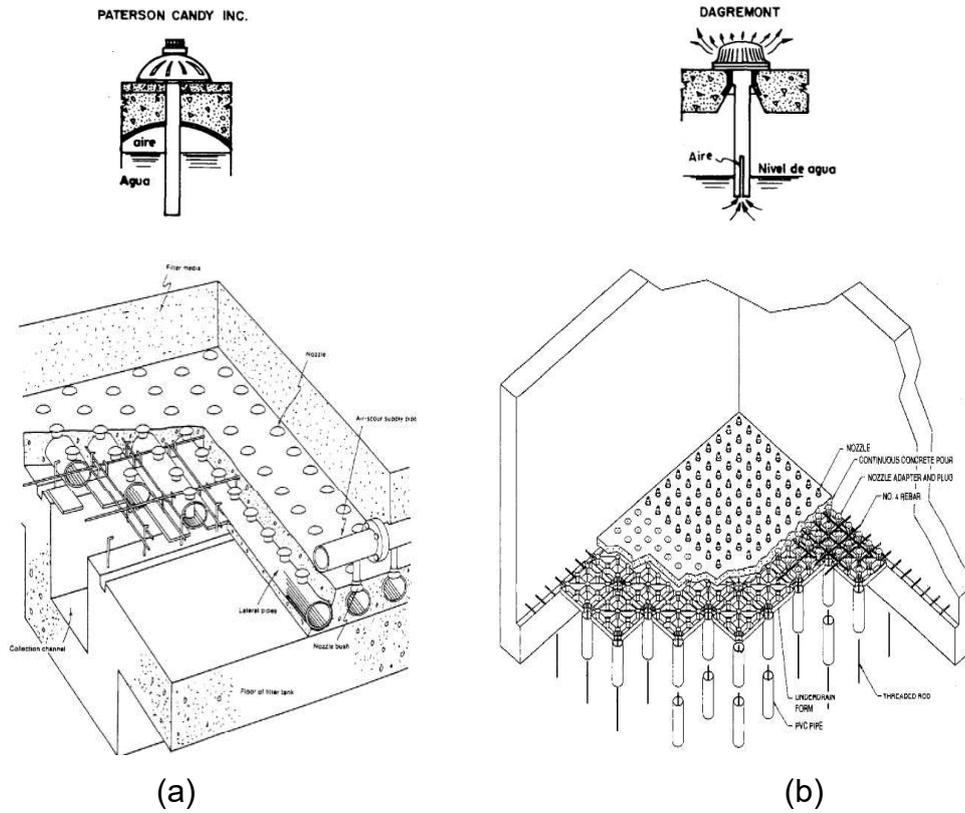
Patentado por Ondeo Degremont, se colocan boquillas sobre un falso fondo de hormigón monolítico como en la Figura 2.14 (b) para trabajo con aire y/o agua (AWWA & ASCE, 2005).

2.1.4.5 FONDO WHEELER

Patentado por Builder Providence Inc., es un falso fondo de hormigón armado dotado de orificios piramidales invertidos, en los cuales se colocan esferas de porcelana sin esmaltar para mejorar la distribución del agua [Figura 2.15 (a)] (CONAGUA, 2007; AWWA & ASCE, 2005).

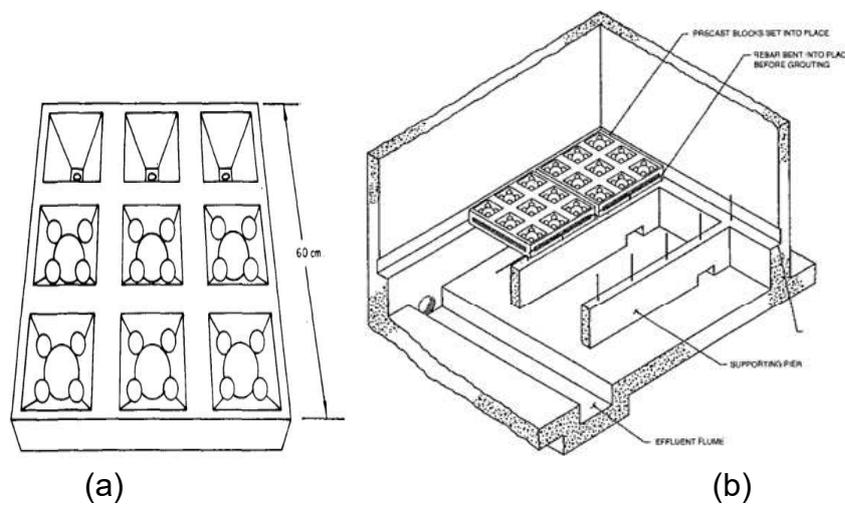
Pueden ser contruidos de dos maneras: a) losas prefabricadas y b) en sitio. En las dos formas, las dimensiones son semejantes a causa de los moldes que son suministrados por la compañía que ostenta la patente (Arboleda, 1973). En la Figura 2.15 (b) se presenta la disposición final de las losas

Figura 2.14. Desagüe con boquillas: (a) con tubería perforada, (b) con falso fondo.



Fuente: AWWA & ASCE (2005), Arboleda, J (1973).

Figura 2.15. Falso fondo Weeler: losa con orificios piramidales y esferas de porcelana



Fuente: Arboleda, J (1973).

Fuente: AWWA & ASCE (2005)

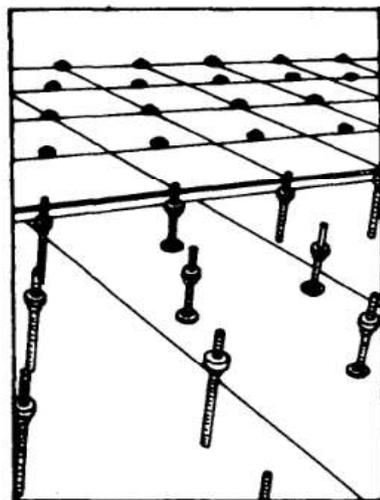
2.1.4.6 PLACAS POROSAS

Patentado por Carborundum Co., son menos usadas que los sistemas de bloque o falso fondo discutidos anteriormente por las condiciones de fragilidad y susceptibilidad a taponamientos (Arboleda, 1973; CONAGUA, 2007).

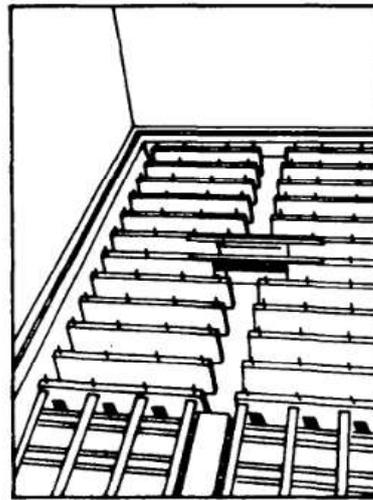
Se utilizan placas de óxido de aluminio mezclado con cerámica, las cuales son montadas sobre pilotes de hormigón o soportes metálicos a una altura de 0.20 a 0.60 m [Figura 2.16] (AWWA & ASCE, 2005; Arboleda, 1973).

En este dren es innecesario el uso de capa soporte, ya que las aberturas de las placas son del mismo tamaño que la arena (Arboleda, 1973).

Figura 2.16. Sistema de drenaje de falso fondo con placas porosas



a) Sistema de tres soportes



b) Soportes en vigas de concreto

Fuente: Arboleda, J (1973).

2.2 ESTADO DEL ARTE

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y FECHA	AUTOR(ES)	OBJETIVO	RESUMEN	RESULTADO(S)
An experimental study of head loss and pressure recovery in perforated pipes	Kansas State University Manhattan, Kansas (1967)	Wen-hsiung Chiu	Determinar el efecto del número de Reynolds en el extremo de entrada y la relación de área de las aberturas a la sección transversal de la tubería en la pérdida general de carga y la recuperación de presión en una tubería perforada.	Aunque la literatura sobre el problema existe desde alrededor de 1900, poco conocimiento se ha reunido sobre las características de flujo de las tuberías múltiples, tales como: coeficiente de descarga variable, factor de carga de velocidad, eficiencia de conversión de energía cinética a energía de presión y factor de fricción. En general, es imposible obtener una distribución exactamente uniforme de la descarga a través de un tubo colector de sección transversal constante con orifios uniformemente espaciados del mismo diámetro. Por lo tanto, las condiciones de flujo optimizadas, asegurarán una distribución aproximadamente uniforme de la descarga y que se producirá cuando la pérdida general de carga es igual a la recuperación de presión.	Llegó a la conclusión de que la relación de área no debería exceder la unidad y que la relación de longitud a diámetro no debe ser mayor de 70 para obtener una distribución sustancialmente uniforme. En esta investigación, cuando la relación de área es igual a la unidad, la uniformidad es del 80 por ciento para una fila de agujeros y del 75 por ciento para dos filas de agujeros

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y FECHA	AUTOR(ES)	OBJETIVO	RESUMEN	RESULTADO(S)
Alternative underdrain designs for reducing pressure drop across sand media filters	Wageningen, Netherlands (2018)	T. Pujol; G. Arbat; J. Bové; J. Puig-Bargués; M. Duran-Ros; J. Velayos; F. Ramírez de Cartagena	<p>Probar en condiciones de laboratorio los tres nuevos diseños de drenaje inferior, comparar la caída de presión resultante con los producidos por una boquilla comercial y usar una versión modificada del modelo analítico de Arbat, modificado por Pujol, para predecir y explicar el efecto de las diferentes configuraciones de desagüe, el medio granular y sus interacciones.</p>	<p>La reducción de la caída de presión en los filtros de medios de arena, que se utilizan ampliamente para prevenir la obstrucción del emisor, debería ayudar a reducir el consumo de energía en los sistemas de microrregión. Investigaciones anteriores han demostrado que la mayor parte de la caída de presión se encuentra en el desagüe del filtro de arena. En este trabajo, se estudió experimentalmente el efecto de la geometría de la boquilla sobre la caída de presión de un filtro de arena.</p> <p>Se analizaron cuatro boquillas: una producida comercialmente con una forma cónica y tres subterráneos cilíndricos alternativos que se construyeron para el experimento y que diferían en la ubicación y el número de ranuras. Los experimentos en el modo de filtración y las condiciones de lavado a contracorriente para un amplio rango de velocidades superficiales se llevaron a cabo en el laboratorio.</p>	<p>Los resultados informaron que se podría lograr una reducción del consumo de energía del filtro superior al 20% simplemente modificando la posición de las ranuras por encima de la superficie del elemento debajo del dren. Los efectos de la boquilla se investigaron más a fondo mediante un modelo analítico que predijo la caída de presión del flujo de agua a través del filtro. El modelo confirmó que la distribución de las ranuras en el drenaje inferior era un factor crítico para determinar la longitud de la región con un flujo no uniforme dentro de la arena. Cuando se utiliza la boquilla comercial a caudales > 0,85 l / s, esta región produjo la mayor contribución a las pérdidas de energía en el filtro debido a los aumentos en la tortuosidad de la trayectoria del agua dentro del medio poroso.</p>

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 CAUDALES EXPERIMENTALES

Para empezar con la determinación de caudales experimentales [Q] se debió definir dos conceptos de gran importancia para el diseño y funcionamiento de un filtro rápido, como lo son la tasa de filtración y la tasa de lavado.

De manera común, la tasa de filtración [TF] considera la velocidad que el agua recorre a través del medio filtrante para cumplir la carrera de filtración deseada. Esta velocidad depende del material filtrante y es el parámetro que determina el área requerida para obtener un determinado caudal filtrado, o viceversa.

$$TF = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

Dónde: TF= Tasa o velocidad de filtración [m³/m² día; m/día]

Q = Caudal que se filtra [m³/día]

A = Área del filtro [m²]

Las velocidades de filtración al que opera un filtro rápido convencional varia de los 100 m³/m²día a los 180 m³/m²día, donde se considera una tasa normal de filtración a aproximadamente 120 m³/m²día [2 gpm/pie²]. Las unidades que se utilizan para las tasas de filtración generalmente son: m³/m²día, gpm/pie², Lpm/pie², m/día.

En segundo lugar, la tasa de lavado [TL] es un parámetro que determina la eficiencia del lavado de los granos y, por lo tanto, es la velocidad con la que se inyecta el agua por el drenaje para lograr la fluidización del medio en la limpieza del filtro. Durante el diseño debe tomarse en cuenta que la tasa de lavado no debe ser excesiva o insuficiente; trayendo como consecuencias el arrastre de material o una inadecuada separación de los granos del lecho, respectivamente.

$$TL = \frac{Q}{A} \quad (3.2)$$

Dónde: TL= Tasa o velocidad de lavado [m^3/m^2 día; $\text{m}/\text{día}$]

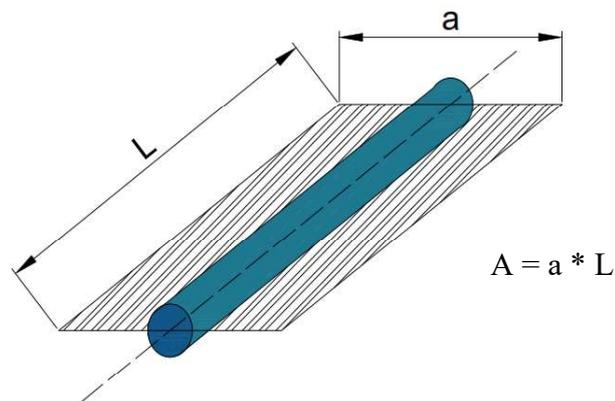
Q = Caudal para lavado del filtro [$\text{m}^3/\text{día}$]

A = Área del filtro [m^2]

Algunos autores sugieren que las tasas de lavado no deben ser inferiores a $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$, debido a que en la operación de un filtro real no se produciría la correcta limpieza de los granos del medio filtrante. Sin embargo, algunos diseños antiguos consideran velocidades para lavado de $900 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$. Las unidades son las mismas que las tasas o velocidades de filtración.

El siguiente factor que intervino para la determinación de caudales es el área de drenaje de la tubería perforada [A]. Comúnmente, este tipo de dren recolecta el agua con espaciamientos entre laterales de 20 a 30 cm. Para el presente caso de estudio se escogió como ancho [a] de drenaje 20 cm, lo que corresponde 10 cm a cada lado desde el centro de la tubería. El análisis de pérdida de carga se realizó en un prototipo de longitud [L] de 60 cm, como se indica en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Área de drenaje de la tubería perforada propuesta



Elaborado por: Eduardo Pinos

Del modelo en laboratorio se obtuvieron las medidas indicadas en la Tabla 3.1 y con las que se adoptó el área de drenaje. Se debe mencionar que los valores no coinciden exactamente con los propuestos por factores como apreciación de la persona, montaje del modelo, etc. Sin embargo, estos “errores” son menores y no alteran el resultado esperado.

Tabla 3.1. Dimensiones del modelo para determinar el área de influencia de las ranuras.

Medición	1	2	3	Media
Ancho (a)=	19.1	19	18.9	19.0 cm
Longitud (L)=	60	60	60.1	60.0 cm

Elaborado por: Eduardo Pinos

Entonces:

$$A = a * L \quad (3.3)$$

$$A = 19.0 \text{ cm} * 60.0 \text{ cm} = 1140 \text{ cm}^2 = 0.114 \text{ m}^2$$

Al haber definido las tasas de filtración y lavado que se utilizan para el diseño de filtros, así como el área de drenaje de la tubería, se calcularon los caudales para la experimentación del modelo a partir de las ecuaciones 3.1 y 3.2. Estos valores se los presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Caudales experimentales

Tasa de filtración [TF]	Caudal [Q]	
m ³ /m ² día	m ³ /día	l/s
100	11.4	0.13
110	12.5	0.15
120	13.7	0.16
130	14.8	0.17
140	16.0	0.18
150	17.1	0.20
160	18.2	0.21
170	19.4	0.22
180	20.5	0.24
Tasa de lavado [TL]	Caudal [Q]	
m ³ /m ² día	m ³ /día	l/s
900	102.6	1.19
1000	114.0	1.32
1100	125.4	1.45
1200	136.8	1.58
1300	148.2	1.72
1400	159.6	1.85
1500	171.0	1.98

Elaborado por: Eduardo Pinos

Es importante mencionar que el proceso experimental se desarrolló para una densidad de orificios determinada. Dicha densidad se trata del número de orificios requeridos por cada metro cuadrado de filtración.

$$\text{Densidad de orificios} = \frac{28 \text{ orificios}}{0.114 \text{ m}^2} = 246 \frac{\text{orif}}{\text{m}^2}$$

En el caso de estudio se efectuaron 28 orificios tipo ranura en un área de 0.114 m², obteniendo una densidad de orificios de 246 orificios/m². Las dimensiones y configuración de las ranuras se presentarán a detalle en el apartado 3.2, literal e.

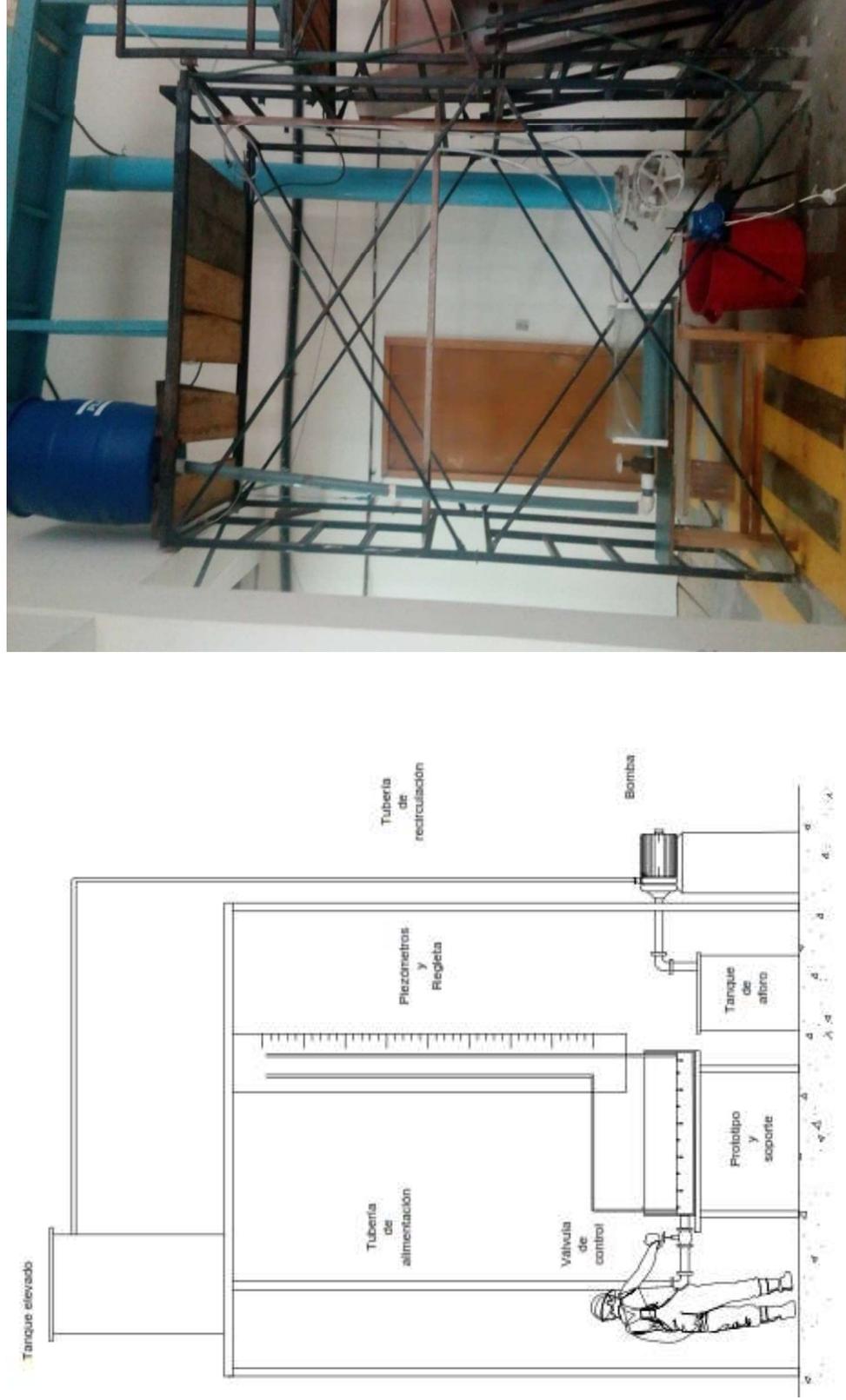
Al analizar los requerimientos en los que se desarrollan tanto el proceso de filtración como el de lavado, se estableció que el proceso más crítico es el segundo caso. Las tasas de lavado, en comparación a las tasas normales de filtración, son alrededor de 3 veces mayores induciendo una mayor pérdida de carga durante su desarrollo. Por esta razón, se estableció realizar ensayos exclusivamente para las tasas de lavado y la densidad de orificios expuesta anteriormente.

3.2 AFORO DE CAUDALES

Para iniciar con el proceso experimental de la investigación, se procedió al montaje del modelo propuesto en el esquema de la Figura 3.2 y que se explica a continuación:

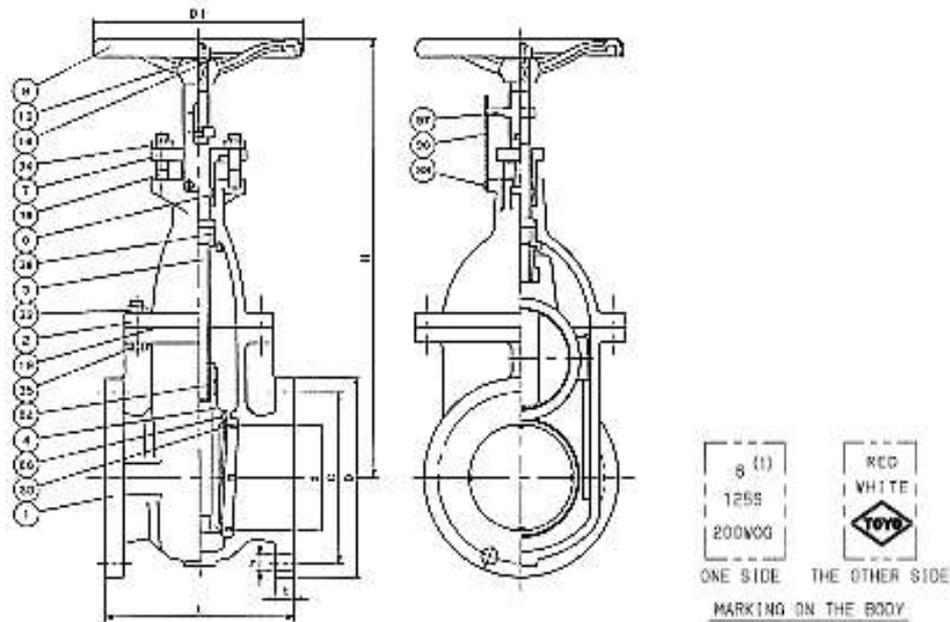
- a) Se utilizó un tanque elevado para abastecer los caudales experimentales previamente calculados en el apartado 3.1. El reservorio tuvo una capacidad de 220 litros y se ubicó a una altura de 3.56 m, medios desde el piso del laboratorio.
- b) La tubería de alimentación fue de material PVC (Policloruro de vinilo), de espesor [e] 4.5 mm, y cuyas características son:
 - Diámetro nominal [DN]= 2 pulgadas
 - Diámetro interno [DI] = 50 mm
 - Presión = 116 Psi (0.80 MPa)
- c) Para la regulación o control de caudales se utilizó una válvula del mismo tamaño que la tubería de alimentación. Sus dimensiones y nominación se presentan en la Figura 3.3.

Figura 3.2. Esquema de la propuesta y montaje en laboratorio.



Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 3.3. Dimensiones de CLASS 125 CAST IRON GATE VALVE



DIMENSIONES

TAMAÑO	d [mm]	H [mm]	D1 [mm]	L [mm]	BRIDA					
					D [mm]	HOYO DEL TORNILLO			TAMAÑO DEL PERNO [pulg]	T [mm]
						C [mm]	N°	H [mm]		
2	50	319	180	178	152	120.5	4	19	5/8	15.9

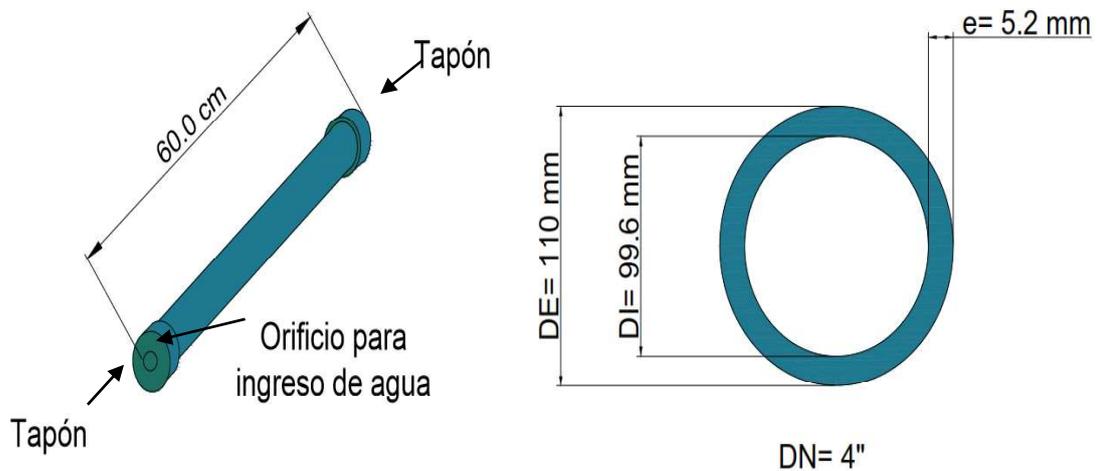
Fuente: Red-White TOYO (2018)

d) Cabe recalcar que la presente investigación se concentró en el análisis de pérdida de carga que se produce por el paso de agua entre las ranuras del sistema de tubería perforada, por lo que es imprescindible describir la configuración y dimensiones del tubo y ranuras.

La tubería fabricada en PVC para trabajo a presión tuvo una longitud de 60.0 cm y un diámetro nominal de 4 pulgadas. El espesor de pared fue 5.2 mm y presión nominal 181 Psi (1,25 MPa). En la figura 3.4 se presenta las dimensiones de la propuesta.

En base a que la tubería debía estar en condiciones de hermetismo para evitar la salida de agua por sitios que no sean las ranuras, se colocaron tapones a los extremos y se dispuso de un orificio en uno de ellos para el ingreso de la tubería de alimentación.

Figura 3.4. Dimensiones del prototipo de tubería perforada



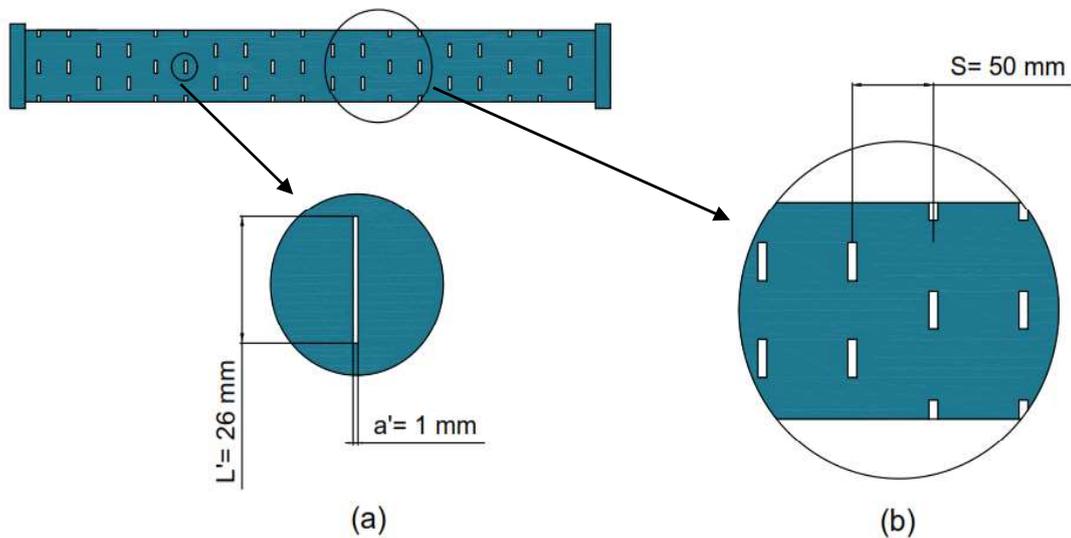
Elaborado por: Eduardo Pinos

e) Respecto a las ranuras, se elaboraron perforaciones de forma rectangular sobre la pared del tubo. Los orificios constaron con un tamaño promedio de: longitud [L_o]= 26 mm y ancho [a_o]= 1 mm [Figura 3.5 (a)].

Para el caso de estudio se implantó un espaciamiento entre orificios [S] de 5 cm. La disposición de las ranuras se realizó de manera alternada de 3 y 2 orificios cada 5 cm [Figura 3.5 (b)], teniendo un total de 28 ranuras distribuidas a lo largo de la tubería.

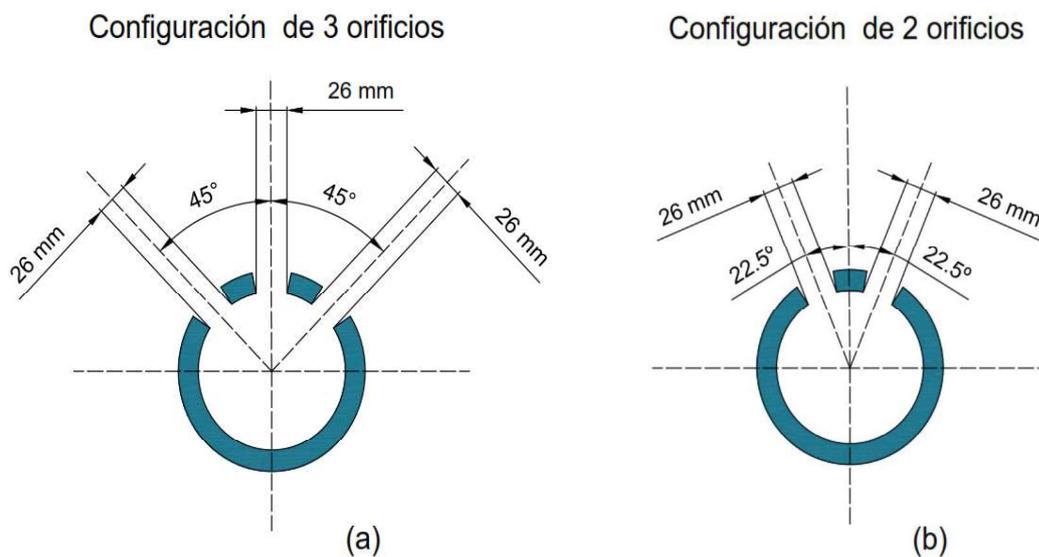
En la configuración de 3 orificios, se realizaron las perforaciones a 45° a cada lado con respecto al centro de la ranura ubicada en el eje vertical [Figura 3.6 (a)]. En la configuración de 2 orificios, se elaboraron las perforaciones a 22.5° a cada lado con respecto al eje vertical [Figura 3.6 (b)].

Figura 3.5 Orificios tipo ranuras: (a) Dimensiones, (b) Disposición en la tubería



Elaborado por: Eduardo Pinos

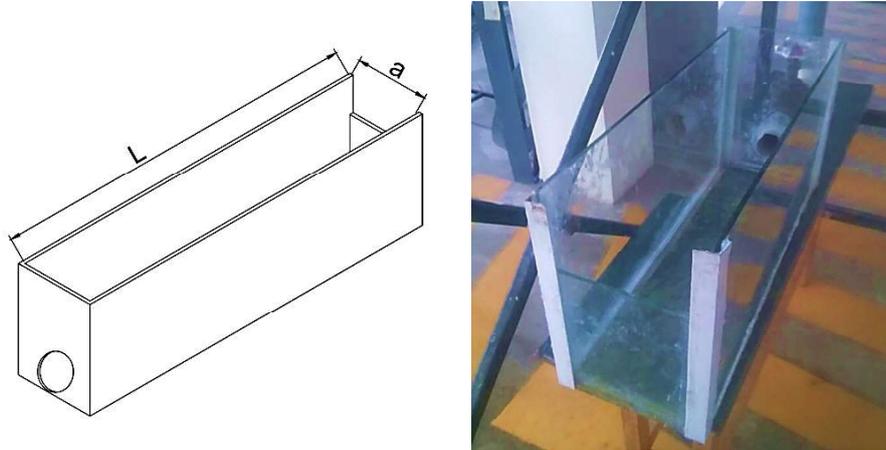
Figura 3.6. Configuración vista en corte para 2 y 3 orificios



Elaborado por: Eduardo Pinos

- f) La tubería perforada se colocó dentro de un cajón de vidrio (espesor 6 mm) de medidas: largo= 60 cm, ancho= 20 cm y altura: 30 cm. El recipiente contaba con un orificio de diámetro 55 mm en uno de sus extremos para el ingreso del agua mediante la tubería de alimentación; y un vertedero rectangular de altura [w] 20.8 cm para aforo de caudales al otro extremo [Figura 3.7].

Figura 3.7. Cajón de vidrio para ensayos en laboratorio



Elaborado por: Eduardo Pinos

- g) Se destinó un recipiente plástico de forma tronco – cónica, de capacidad nominal de 70 litros para la medición de caudales por el método volumétrico. En la Figura 3.8 se presenta el recipiente que se utilizó para el aforo de caudales y sus dimensiones.

Figura 3.8. Forma y dimensiones del tanque para aforo de caudales



Elaborado por: Eduardo Pinos

- h) Para mantener un nivel constante en el tanque elevado, se utilizó un sistema de recirculación gracias al accionamiento de una bomba eléctrica periférica modelo QB-60. Las características físicas y los requerimientos de la bomba fueron obtenidas del manual técnico entregado por el fabricante, las cuales se indican en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características y requerimientos de la bomba de recirculación

Peso	5.2 Kg
Medidas	25 x 11x 14 cm
Cantidad de impulsores	1
Tipo de impulsor	Semiabierto en bronce
Potencia	0.5 Hp
H_{max}	35 m
Q_{max}	30 l/min – 8 Gal/min
Diámetro de succión	1”
Diámetro de descarga	1”
Tipo de motor	Eléctrico monofásico
Velocidad de giro	3500 rpm
Frecuencia	60 Hz

Elaborado por: Eduardo Pinos

La instalación se realizó bajo los parámetros exigidos para su correcto funcionamiento y se presenta en la Figura 3.9. La máquina hidráulica permitió bombear el agua desde el recipiente del aforo hasta el tanque elevado mediante una tubería de diámetro ½ pulgada.

Figura 3.9. Instalación de bomba para sistema de recirculación

Elaborado por: Eduardo Pinos

- i) Para terminar la descripción del modelo experimental, se dispuso de piezómetros colocados en el drenaje y en la evacuación del agua por el vertedero de control para la medición de presiones. Este tema se analizará con detenimiento en el apartado 3.3

Culminada la instalación del modelo físico y al corroborar el correcto funcionamiento para los ensayos en laboratorio, se dispuso efectuar el aforo de caudales utilizando el método volumétrico como se mencionó anteriormente.

El método volumétrico se utiliza para aforar caudales pequeños mediante la medición de volúmenes de agua en un determinado tiempo. El caudal se obtiene dividiendo el volumen que se recoge en el recipiente para el intervalo de tiempo que transcurre en recolectar dicho volumen.

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Dónde: Q = Caudal [l/s]

ΔV = Volumen [l]

Δt = Tiempo [s]

Durante el proceso se utilizó los siguientes instrumentos [Figura 3.10]: a) recipiente o tanque, b) regleta, c) cronómetro digital. La graduación de cada instrumento es: recipiente en litros, regleta en centímetros, y cronometro en segundos.

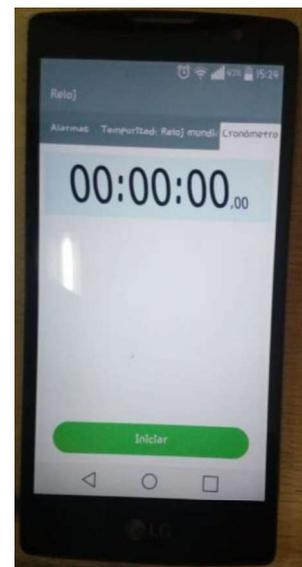
Figura 3.10. Instrumentos para aforo de caudales por el método volumétrico



(a)



(b)



(c)

Elaborado por: Eduardo Pinos

Para el cálculo del volumen se utilizó las ecuaciones 3.5 y 3.6, de acuerdo a la simbología indicada de la Figura 3.11. Los volúmenes obtenidos de las ecuaciones se encuentran en valores de cm^3 .

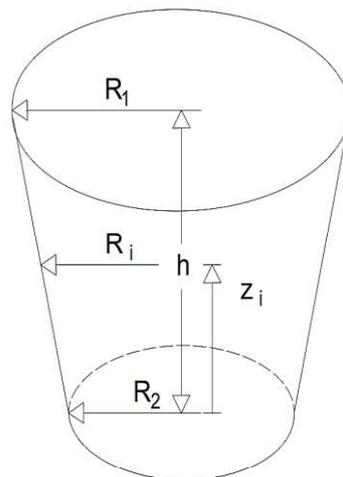
Volumen total

$$V = \frac{\pi h}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2) \quad (3.5)$$

Volumen parcial

$$V = \frac{\pi z_i}{3} (r_i^2 + R_2^2 + r_i R_2) \quad (3.6)$$

Figura 3.11. Volumen de un tronco-cónico



Elaborado por: Eduardo Pinos

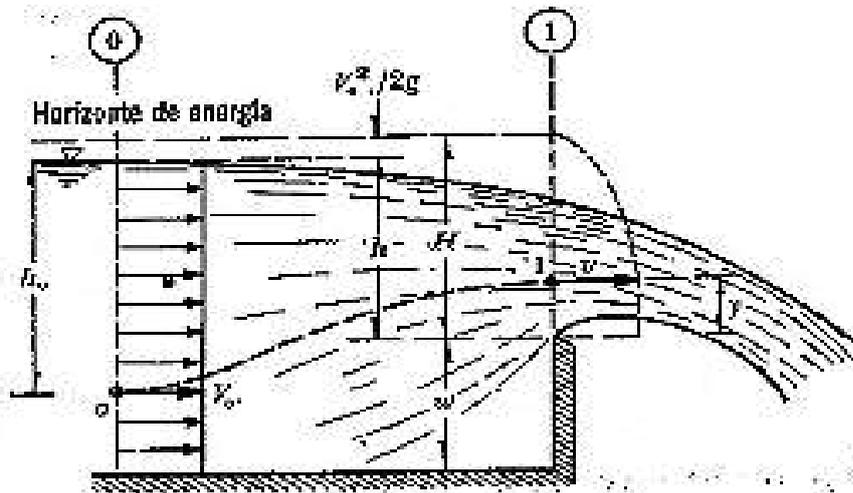
Para facilitar el proceso se obtuvo la curva de descarga y la ecuación $Q = f(H)$ del vertedero rectangular de control con la finalidad de conocer la carga de agua sobre el vertedero necesaria para conseguir los caudales de la experimentación y su consiguiente verificación.

El objetivo de la curva de descarga es determinar la relación entre el caudal $[Q]$ que es descargado a través de un vertedero y la carga hidráulica $[H]$ correspondiente. Sin importar el tipo del vertedor la expresión general que relaciona Q y H es:

$$Q = \alpha H^\beta \quad (3.7)$$

Se denomina carga sobre el vertedero [H] a la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero y es la responsable de la descarga del flujo. En la Figura 3.12 se presenta de manera general un vertedor rectangular de pared delgada.

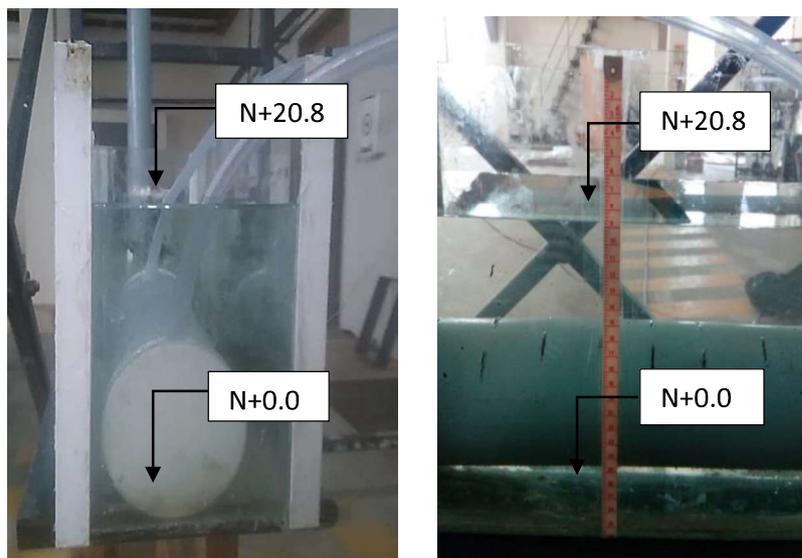
Figura 3.12. Vertedor rectangular de pared delgada



Elaborado por: Eduardo Pinos

El procedimiento para determinar la carga sobre el vertedero en los ensayos, se basó en el uso de una regleta de 30 cm colocada desde el nivel de referencia 0.0; en la cual se indicó que la cresta del vertedero rectangular estuvo al nivel +20.8 cm [Figura 3.13]

Figura 3.13. Nivel del vertedero para aforo de caudales



Elaborado por: Eduardo Pinos

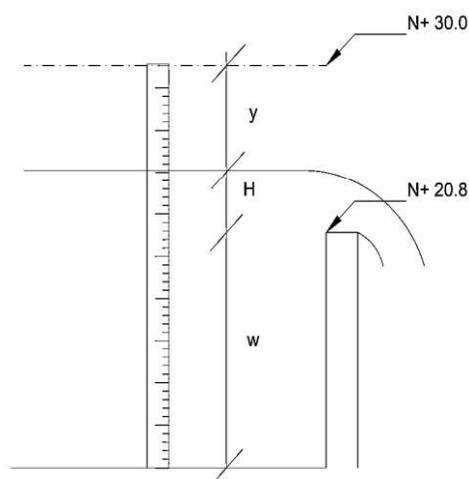
La carga sobre el vertedero [H] relacionado a un caudal [Q] se obtuvo de las siguientes ecuaciones:

$$\text{cota} = 30 - y \quad (3.8)$$

$$H = \text{cota} - w \quad (3.9)$$

La Figura 3.14 indica la simbología que se utilizó para obtener los valores de [H].

Figura 3.14. Simbología para determinar los valores de H



Elaborado por: Eduardo Pinos

Se prosiguió a realizar el procedimiento explicado anteriormente y se obtuvieron los valores descritos en la Tabla 3.4. Donde los valores [z₁] y [z₂] son las alturas en el recipiente de aforo al inicio y al final de [Δt]; y [y] la altura del borde libre en la regleta para determinar la carga sobre el vertedero.

Tabla 3.4. Datos obtenidos del aforo

Lectura No.	Tiempo				Altura	Altura	Altura
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	[Δt]	[z ₁]	[z ₂]	[y]
	(s)	(s)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(cm)
1	15.13	15.23	14.96	15.11	10	11.8	8.5
2	14.96	15.00	14.98	14.98	10	20.4	7.2
3	15.00	15.00	15.00	15.00	10	29.7	5.8
4	15.15	15.07	14.86	15.03	10	35	5.2
5	14.96	15.23	14.86	15.02	10	38	4.4
6	15.01	15.03	14.97	15.00	10	43	3.7
7	14.86	15.04	15.11	15.00	10	44	3.0

Elaborado por: Eduardo Pinos

Datos del recipiente de aforo

Diámetro mayor [D ₁]=	45.8 cm	Radio mayor [R ₁]=	22.9 cm
Diámetro menor [D ₂]=	38.0 cm	Radio menor [R ₂]=	19.0 cm
Altura [h]=	49.6 cm		
Volumen [V]=	68.6 l		

De la ecuación 3.6, se obtuvieron los volúmenes asociados a cada lectura de [z]; y en consecuencia el caudal [Q] de la ecuación 3.4. Estos valores son tabulados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Volumen y caudal para obtener la curva característica

Lectura No.	Tiempo [Δt]	Altura [z ₁]	Radio [r ₁]	Volumen [V ₁]	Altura [z ₂]	Radio [r ₂]	Volumen [V ₂]	Volumen [ΔV=V ₁ -V ₂]	Caudal (Q)
	(s)	(cm)	(cm)	(l)	(cm)	(cm)	(l)	(l)	(l/s)
1	15.11	10.0	19.8	11.8	11.8	19.9	14.0	2.2	0.15
2	14.98	10.0	19.8	11.8	20.4	20.6	25.1	13.3	0.89
3	15.00	10.0	19.8	11.8	29.7	21.3	38.0	26.2	1.75
4	15.03	10.0	19.8	11.8	35.0	21.8	45.7	33.9	2.26
5	15.02	10.0	19.8	11.8	38.0	22.0	50.2	38.4	2.56
6	15.00	10.0	19.8	11.8	43.0	22.4	58.0	46.1	3.08
7	15.00	10.0	19.8	11.8	44.0	22.5	59.5	47.7	3.18

Elaborado por: Eduardo Pinos

En base a la metodología descrita, se obtuvieron las cargas sobre el vertedero rectangular de control y se presentan en la Tabla 3.6

Tabla 3.6. Carga sobre el vertedero rectangular para obtener la curva característica

Lectura No.	Altura [y]	Nivel de agua [cota]	Carga sobre el vertedero [H]
	(cm)	(cm)	(cm)
1	8.5	21.5	0.7
2	7.2	22.8	2.0
3	5.8	24.2	3.4
4	5.2	24.8	4.0
5	4.4	25.6	4.8
6	3.7	26.3	5.5
7	3.0	27.0	6.2

Elaborado por: Eduardo Pinos

Finalmente, en la Tabla 3.7 se presenta un resumen de los valores de [Q] y [H] que se utilizaron para la obtención de la curva característica del vertedero de control para aforo de caudales en el modelo experimental.

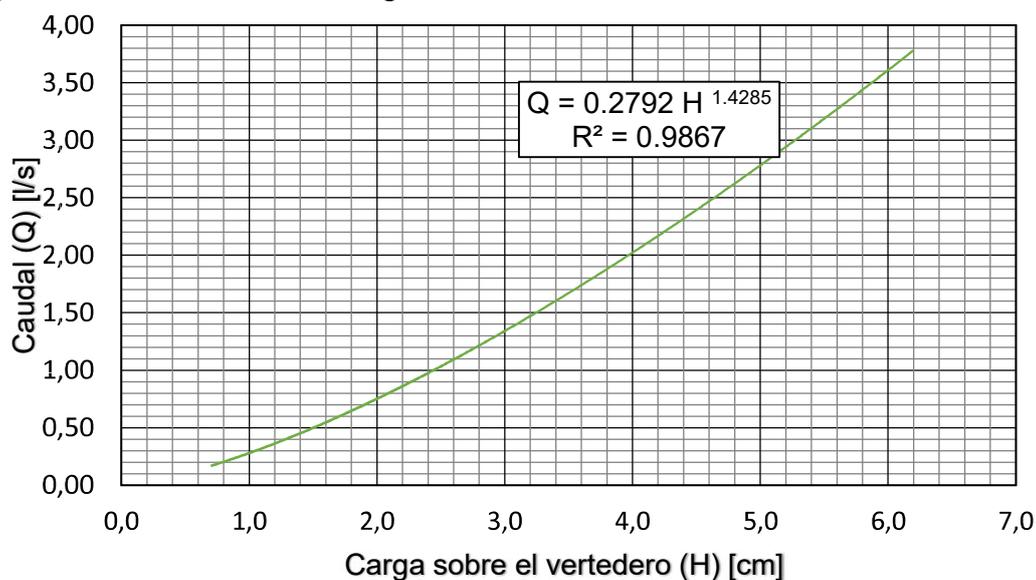
Tabla 3.7. Resumen de [Q] y [H]

Lectura No.	Caudal (Q)	Carga sobre el vertedero [H]
	(l/s)	(cm)
1	0.15	0.7
2	0.89	2.0
3	1.75	3.4
4	2.26	4.0
5	2.56	4.8
6	3.08	5.5
7	3.18	6.2

Elaborado por: Eduardo Pinos

Mediante el uso de una hoja electrónica Microsoft Excel 2016, y su herramienta “análisis de datos” se realizó una regresión por medio del método de los mínimos cuadrados. En el Anexo A1 se indica los resultados proveídos por la herramienta mencionada y de los cuales se obtiene la curva de descarga del vertedero y su correspondiente ecuación como se observa en la Figura 3.15.

Figura 3.15. Curva de descarga del vertedero de control



Elaborado por: Eduardo Pinos

A partir de la ecuación de la curva de descarga, se obtiene la carga sobre el vertedero asociada a cada caudal experimental determinado en el apartado 3.1. Estos valores se presentan en la tabla 3.8

Tabla 3.8. Carga sobre el vertedero asociada a cada caudal experimental a partir de la curva de descarga

Caudal (Q)	Carga sobre el vertedero (H)	Altura (y)
(l/s)	(cm)	(cm)
1.19	2.8	6.4
1.32	3.0	6.2
1.45	3.2	6.0
1.58	3.4	5.8
1.72	3.6	5.6
1.85	3.8	5.4
1.98	3.9	5.3

Elaborado por: Eduardo Pinos

Por lo tanto,

$$Q = 0.2792 H^{1.4285}$$

Con el fin de validar los resultados obtenidos de manera teórica, se procedió a aforar los caudales correspondientes a los valores calculados de [H]. De lo cual, se obtuvieron los siguientes resultados indicados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Verificación de caudales asociados a las cargas sobre el vertedero calculadas de manera teórica

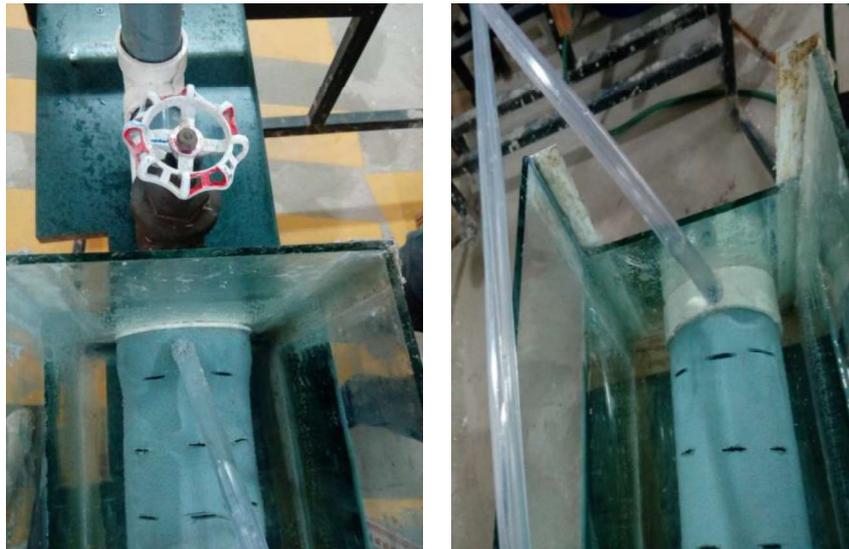
Lectura No.	Tiempo	Altura	Radio	Volumen	Altura	Radio	Volumen	Volumen	Caudal (Q)		Error
	[Δt]	[z ₁]	[r ₁]	[V ₁]	[z ₂]	[r ₂]	[V ₂]	[ΔV=V ₁ -V ₂]	Real	Teórico	[E%]
	(s)	(cm)	(cm)	(l)	(cm)	(cm)	(l)	(l)	(l/s)	(l/s)	(%)
1	18.3	25	21.0	31.4	40.0	22.1	53.3	21.9	1.20	1.19	0.77
2	15	21	20.7	25.9	35.0	21.8	45.7	19.8	1.32	1.32	0.09
3	15	21	20.7	25.9	36.3	21.9	47.7	21.7	1.45	1.45	0.25
4	15	27	21.1	34.2	43.0	22.4	58.0	23.8	1.59	1.58	0.17
5	15	25	21.0	31.4	42.7	22.4	57.5	26.1	1.74	1.72	1.42
6	15	25	21.0	31.4	43.6	22.4	58.9	27.5	1.83	1.85	0.69
7	15	28	21.2	35.6	47.2	22.7	64.7	29.1	1.94	1.98	2.05

Elaborado por: Eduardo Pinos

3.3 MEDICIONES DE PRESIÓN

La metodología utilizada para el estudio de presión en el modelo experimental se basó en el uso de piezómetros, instalados al inicio y al final de la tubería perforada [Figura 3.16]. Las mediciones se realizaron referenciadas al nivel +0.0, en una regleta graduada en centímetros, con precisión en milímetros Figura 3.17.

Figura 3.16. Piezómetros: Al inicio y al final de la tubería perforada



Elaborado por: Eduardo Pinos

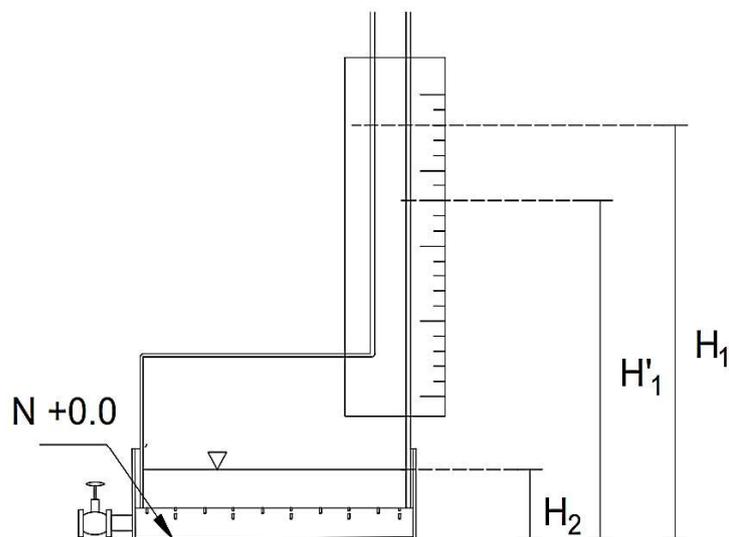
Figura 3.17. Instrumento para medición de alturas piezométricas, graduado en centímetros



Elaborado por: Eduardo Pinos

En la figura 3.18 se presenta un esquema que representa gráficamente las alturas que se obtuvieron de los ensayos y que se utilizarán durante el análisis de la investigación.

Figura 3.18. Simbología utilizada para medir alturas piezométricas



Elaborado por: Eduardo Pinos

Planteada la parte metodológica, se procedió a realizar los ensayos para cada caudal experimental; de los que se obtuvieron las alturas piezométricas tabuladas en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Alturas de agua obtenidas de los piezómetros durante los ensayos del modelo experimental

Lectura No.	Caudal [Q] (l/s)	Alturas Piezométricas								
		Ensayo 1			Ensayo 2			Ensayo 3		
		[H ₁] cm	[H' ₁] cm	[H ₂] cm	[H ₁] cm	[H' ₁] cm	[H ₂] cm	[H ₁] cm	[H' ₁] cm	[H ₂] cm
1	1.20	75.5	73.6	23.6	74.6	72.8	23.6	74.9	72.6	23.6
2	1.32	86.5	89.2	23.8	87.3	84.0	23.8	86.0	90.5	23.8
3	1.45	101.7	106.3	24.0	100.8	105.6	24.0	101.3	107.5	24.0
4	1.59	115.5	121.6	24.2	115.2	122.3	24.2	115.8	120.8	24.2
5	1.74	131.4	139.8	24.4	130.3	137.6	24.4	130.2	139.1	24.4
6	1.83	151.8	161.3	24.6	150.5	160.2	24.6	151.8	162.8	24.6
7	1.94	164.5	176.3	24.7	164.3	178.3	24.7	165.0	177.5	24.7

Elaborado por: Eduardo Pinos

3.4 COEFICIENTES DE DESCARGA

El análisis hidráulico de los sistemas de drenaje de tuberías perforadas consiste en considerar que los orificios realizados en las paredes de los tubos están en condiciones de totalmente sumergidos y, por ende, la hidráulica general de orificios es aplicable para su diseño.

El valor del coeficiente de descarga [C_d], es de suma importancia para el correcto diseño y funcionamiento del drenaje en un filtro rápido. Este dato se asume como un valor constante y permite relacionar la diferencia de carga hidráulica que se necesita para transportar el caudal a través de un área. Por lo tanto, es un factor de estudio para la presente investigación.

Cabe recalcar que el parámetro desconocido, que interviene en la ecuación 2.7, es el valor del coeficiente de descarga [C_d], según la metodología elegida y explicada anteriormente. Entonces, para un área [A_o] de orificio se tiene lo siguiente:

$$C_d = \frac{q_o}{A_o \sqrt{2g \Delta H}} \quad (3.10)$$

Dónde: q_o = Caudal en cada orificio [m^3/s]

A_o = Área del orificio [m^2]

G = gravedad [m/s^2]

ΔH = Diferencia de carga hidráulica [m]

ΔH es la diferencia de carga hidráulica [$H_1 - H_2$], según la simbología indicada en la Figura 3.18 y que se determinó mediante la metodología explicada en el apartado 3.3.

Los datos de q_o son los valores del caudal que atraviesa cada orificio teniendo relación a los caudales experimentales obtenidos en el apartado 3.1, aforados y verificados en el apartado 3.2. Por último, el valor de [A_o] se estableció según las dimensiones expuestas en la Figura 3.5.

Entonces,

Dimensiones del orificio tipo ranura

Largo [L']= 26 mm= 0.026 m

Ancho [a']= 1 mm= 0.001 m

Área [A_o]= 0.000026 m²

De la ecuación 3.10 se obtuvieron los valores de [C_d] para los ensayos realizados, según el plan de pruebas planteado y presentados a continuación:

Tabla 3.11. Valores de [C_d] obtenidos de los ensayos: Ensayo N°1

Ensayo 1									
Lectura No.	Caudal [Q]	Número de orificios [n]	Caudal por orificio [q _{orif}]		Alturas Piezométricas				C _d
			(l/s)	(m ³ /s)	H ₁	H ₂	ΔH		
	(cm)	(cm)			(cm)	(m)			
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	75.5	23.6	51.9	0.52	0.51
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	86.5	23.8	62.7	0.63	0.52
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	101.7	24.0	77.7	0.78	0.51
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	115.5	24.2	91.3	0.91	0.51
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	131.4	24.4	107.0	1.07	0.52
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	151.8	24.6	127.2	1.27	0.50
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	164.5	24.7	139.8	1.40	0.51

Elaborado por: Eduardo Pinos

Tabla 3.12. Valores de [C_d] obtenidos de los ensayos: Ensayo N°2

Ensayo 2									
Lectura No.	Caudal [Q]	Número de orificios [n]	Caudal por orificio [q _{orif}]		Alturas Piezométricas				C _d
			(l/s)	(m ³ /s)	H ₁	H ₂	ΔH		
	(cm)	(cm)			(cm)	(m)			
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	74.6	23.6	51.0	0.51	0.52
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	87.3	23.8	63.5	0.64	0.51
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	100.8	24.0	76.8	0.77	0.51
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	115.2	24.2	91.0	0.91	0.52
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	130.3	24.4	105.9	1.06	0.52
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	150.5	24.6	125.9	1.26	0.51
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	164.3	24.7	139.6	1.40	0.51

Elaborado por: Eduardo Pinos

Tabla 3.13. Valores de $[C_d]$ obtenidos de los ensayos: Ensayo N°3

Ensayo 3									
Lectura No.	Caudal	Número de orificios	Caudal por orificio		Alturas Piezométricas				C_d
	[Q]		[q _{orif}]		H ₁	H ₂	ΔH		
	(l/s)	[n]	(l/s)	(m ³ /s)	(cm)	(cm)	(cm)	(m)	
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	74.9	23.6	51.3	0.51	0.52
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	86.0	23.8	62.2	0.62	0.52
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	101.3	24.0	77.3	0.77	0.51
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	115.8	24.2	91.6	0.92	0.51
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	130.2	24.4	105.8	1.06	0.52
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	151.8	24.6	127.2	1.27	0.50
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	165.0	24.7	140.3	1.40	0.51

Elaborado por: Eduardo Pinos

3.5 PLAN DE PRUEBAS

Los ensayos de laboratorio se realizaron de acuerdo a lo estipulado en este apartado. El plan de pruebas se dividió en tres etapas, explicadas a continuación:

3.5.1 ETAPA I: ACTIVIDADES PRELIMINARES

PASO 1: Revisión general de información acerca del tema

Actividades:

- a) Se compiló información de trasfondo que fuese confiable, sustentada, y obtenida de documentos, tales como: tesis, manuales, guías, artículos científicos, etc.

PASO 2: Trabajo de gabinete

Actividades:

- a) Se revisó la información adquirida y se definieron parámetros de estudio, tales como: caudales experimentales y alturas piezométricas.
- b) Se determinó los métodos de control de caudal y el método de medición de presiones.

3.5.2 ETAPA II: TRABAJO DE LABORATORIO

PASO 1: Montaje de modelo hidráulico en laboratorio.

Actividades:

- a) Se procedió a elaborar tubos de PVC perforados con orificios tipo ranura, los mismos que se ubicaron en el fondo de un cajón fabricado en vidrio.
- b) Se conectó la tubería de alimentación al cajón de vidrio, la cual es suministrado de agua a partir de un tanque elevado y regulada mediante una válvula ubicada en la entrada del cajón.
- c) Se instaló el sistema de recirculación, contando con una bomba y una tubería plástica. La bomba succionó el líquido desde el tanque de aforo hacia el tanque de alimentación.
- d) Se colocaron piezómetros al inicio y al final de la tubería.
- e) Terminado el montaje, se realizó ensayos preliminares para asegurar el correcto funcionamiento de cada parte del modelo.

PASO 2: Ensayos en laboratorio

Actividades:

- a) Se obtuvo la curva de descarga y la ecuación $Q = f(H)$ del vertedero de control, con la finalidad de conocer la carga de agua sobre el vertedero necesaria para conseguir los caudales de la experimentación.
- b) Se efectuó el aforo de caudales utilizando el método volumétrico para corroborar que las cargas sobre la cresta del vertedero, obtenidas de la curva de descarga, permite el paso de los caudales requeridos para la experimentación
- c) Se procedió a realizar las mediciones de las alturas piezométricas para cada caudal experimental; de los que se obtuvieron los valores y se fueron tabulando para su posterior análisis.
- d) Se repitió el paso C para cada caudal experimental en los ensayos 2 y 3. Además, se realizó el procedimiento en un tubo perforado con orificios circulares de área semejante, para comparar los resultados de la propuesta y un sistema convencional

3.5.3 ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Actividades:

- a) Se determinará el grado de mejora de la propuesta mediante el análisis de coeficiente de descarga y pérdida de carga; con esto, se tendrá una idea de la eficiencia para drenar de los orificios tipo ranura y de los parámetros que se requieren para su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 INTRODUCCIÓN

El actual capítulo, denominado “RESULTADOS Y DISCUSIONES”, tiene como objetivo proporcionar los resultados obtenidos de la metodológica aplicada durante la investigación. Como se ha mencionado el presente proyecto de titulación propone un sistema de drenaje de tubería perforada con orificios tipo ranura; con el fin de obtener un rendimiento satisfactorio se efectuó el análisis de coeficiente de descarga y la pérdida de carga que se produce por el paso del agua a través de las aberturas.

Los resultados expuestos son tanto para la propuesta de orificios tipo ranura, como para los orificios circulares que se utilizan generalmente en sistemas de drenaje con tuberías perforadas. Realizar ensayos bajo las mismas condiciones sobre tuberías con orificios circulares y tipo ranura permite una comparación de las características hidráulicas y, por consiguiente, la evaluación del grado de mejora de la propuesta para esta investigación.

Como punto focal del estudio, se debe mencionar que la configuración de las ranuras permitirá disminuir la altura de la capa soporte o, a su vez, eliminarla. En base a que la forma del orificio tiene una dimensión mucho más grande que la otra, se puede aseverar que el tamaño de los granos para el soporte del medio filtrante está en función exclusivamente de la dimensión más pequeña de la ranura.

Después de efectuar el proceso metodológico escogido y expuesto en el capítulo 3, el debate de la propuesta está definido en el análisis del desempeño hidráulico. Si el comportamiento es el adecuado, es decir, parecido o igual a los orificios circulares, sería innecesario el uso de grava de mayor tamaño como soporte induciendo a tener una capa de gravilla o, simplemente, la capa torpedo. El análisis hidráulico para los orificios tipo ranura se presenta en los siguientes apartados.

4.2 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CARGA

En la redacción del capítulo 2 del presente documento, se mencionó que la limpieza de un filtro rápido se lo efectúa bajo dos consideraciones. Primero, si la calidad del efluente es menor a la esperada, es decir, el filtro permite el paso de una cantidad de partículas no admisible. O, si la pérdida de carga es igual a la carga hidráulica disponible sobre el lecho filtrante.

Con base en la hidráulica de la filtración citada por Arboleda (1973), se puede avalar la relación directa entre el caudal que se puede filtrar y la carga disponible en el lecho filtrante. Mientras tanto que, al aumentar la pérdida de carga en el sistema, el caudal filtrado es menor, resultando una relación inversamente proporcional entre los dos parámetros. La interpretación anterior prioriza a la pérdida de carga como un parámetro fundamental para la correcta operación de un filtro.

Debido a que influye sustancialmente en el proceso, la pérdida de carga se la analiza tomando en cuenta varios factores, tales como: fricción en los drenes, fricción en tuberías, accesorios, entradas y salidas, fricción inicial en el lecho filtrante [lecho limpio], carga hidráulica del elemento de salida y fricción resultante de la retención de material en los granos del medio.

El estudio de la pérdida de carga, que se produce debido al paso del agua por las ranuras de los tubos perforados, es absolutamente necesario por las razones expuestas, y se sustenta en la ecuación 4.1.

$$H_f = k \frac{v^2}{2g} \quad (4.1)$$

Dónde: H_f = Pérdida de carga [m]

v = Velocidad a través del orificio [m/s]

k = Coeficiente de pérdidas localizadas

La velocidad se puede expresar a partir de la definición de caudal, de esta manera:

$$v = \frac{q_o}{C_d A_o} \quad (4.2)$$

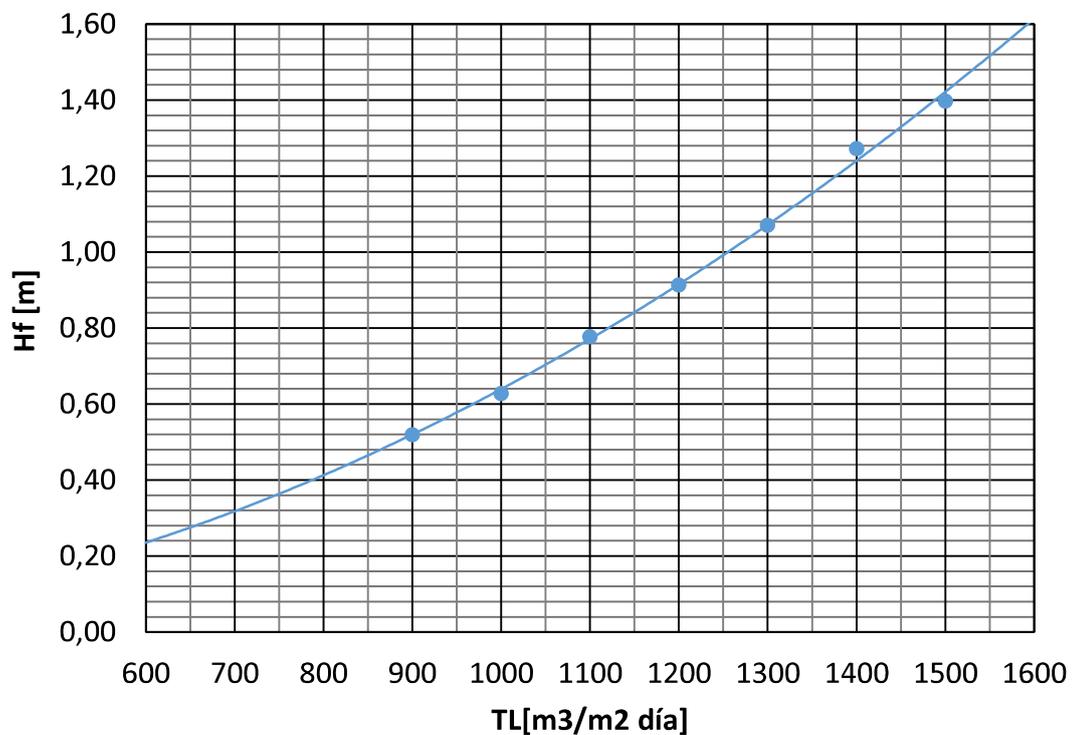
A partir de esto, se presentan los siguientes resultados.

Tabla 4.1. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°1, densidad de orificios= 246 orif/m²

Ensayo 1										
Lectura No.	Caudal [Q]	Número de orificios [n]	Caudal por orificio		Coeficiente de descarga [Cd]	Coeficiente de pérdidas [k]	Velocidad en el orificio [v]	Alturas Piezométricas		Pérdida de carga [H _f]
			[l/s]	[m ³ /s]				[H ₁]	[H' ₁]	
	(l/s)	(m ³ /s)	---	(m/s)	(m/s)	(cm)	(cm)	(m)		
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	0.51	1.00	3.19	75.50	73.60	0.52
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	0.52		3.51	86.50	89.20	0.63
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	0.51		3.91	101.70	106.30	0.78
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	0.51		4.23	115.50	121.60	0.91
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	0.52		4.58	131.40	139.80	1.07
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	0.50		5.00	151.80	161.30	1.27
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	0.51		5.24	164.50	176.30	1.40

Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.1. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 1, densidad de orificios= 246 orif/m²



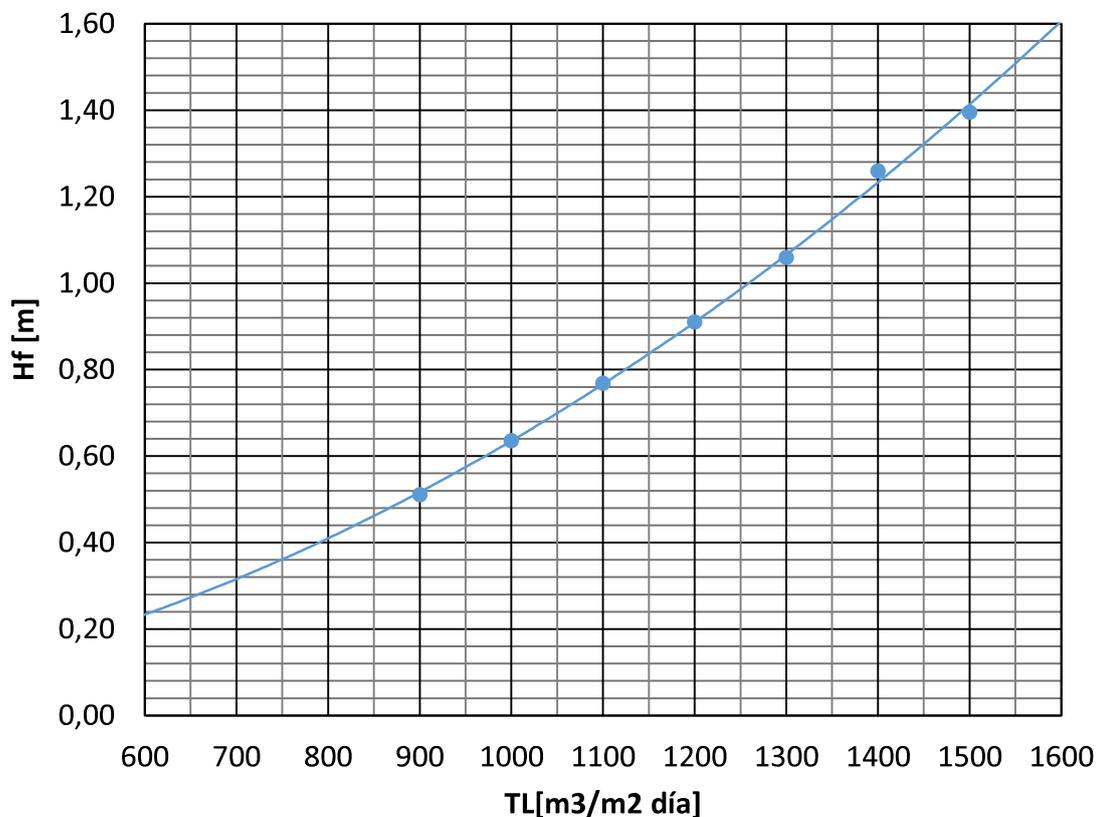
Elaborado por: Eduardo Pinos

Tabla 4.2. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°2, densidad de orificios= 246 orif/m²

Ensayo 2										
Lectura No.	Caudal	Número de orificios [n]	Caudal por orificio		Coeficiente de descarga [Cd]	Coeficiente de pérdidas [k]	Velocidad en el orificio [v]	Alturas Piezométricas		Pérdida de carga [H _f]
	[Q]		[q _o]					[H _i]	[H' _i]	
	(l/s)		(l/s)	(m ³ /s)				(cm)	(cm)	
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	0.52	1.00	3.16	74.60	72.80	0.51
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	0.51		3.53	87.30	84.00	0.64
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	0.51		3.88	100.80	105.60	0.77
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	0.52		4.23	115.20	122.30	0.91
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	0.52		4.56	130.30	137.60	1.06
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	0.51		4.97	150.50	160.20	1.26
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	0.51		5.23	164.30	178.30	1.40

Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.2. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 2, densidad de orificios= 246 orif/m²



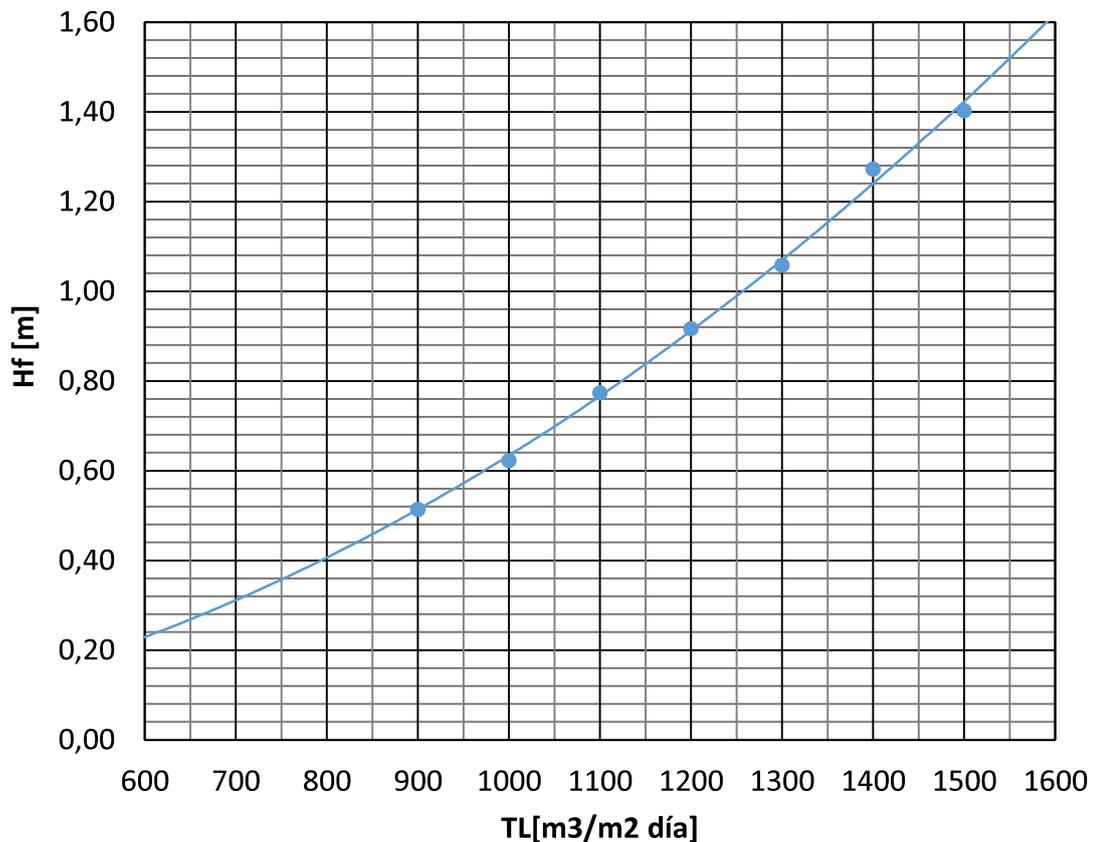
Elaborado por: Eduardo Pinos

Tabla 4.3. Pérdida de carga resultante del Ensayo N°3, densidad de orificios= 246 orif/m²

Ensayo 3										
Lectura No.	Caudal	Número de orificios [n]	Caudal por orificio		Coeficiente de descarga [Cd]	Coeficiente de pérdidas [k]	Velocidad en el orificio [v] (m/s)	Alturas Piezométricas		Pérdida de carga [H _f] (m)
	[Q]		[q _o]					[H _i]	[H' _i]	
	(l/s)		(l/s)	(m ³ /s)				(cm)	(cm)	
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	0.52	1.00	3.17	74.90	72.60	0.51
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	0.52		3.49	86.00	90.50	0.62
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	0.51		3.90	101.30	107.50	0.77
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	0.51		4.24	115.80	120.80	0.92
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	0.52		4.56	130.20	139.10	1.06
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	0.50		5.00	151.80	162.80	1.27
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	0.51		5.25	165.00	177.50	1.40

Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.3. Curva de tendencia: Pérdida de carga (H_f) – Tasa de lavado (TL); Ensayo 3, densidad de orificios= 246 orif/m²



Elaborado por: Eduardo Pinos

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 representan las curvas de tendencia que existe entre la Pérdida de carga y la Tasa de lavado para cada ensayo realizado. En las figuras mencionadas se puede observar que dicha relación tiene una forma curva y que analizando matemáticamente corresponde a una ecuación cuadrática, como se indica en el Anexo 2.

Ahora bien, el caudal individual en cada orificio (q_o) es prácticamente el mismo, dada la condición de que las presiones al inicio y al final de la tubería, no presentan una notable diferencia, según lo explica Arboleda (1973). De esta aseveración se obtiene:

$$q_o = \frac{Q}{n} \quad (4.3)$$

Dónde: Q= Caudal que entra al drenaje [m^3/s]

n= Números de orificios

De la ecuación 3.2, se despeja [Q] y reemplazando en la ecuación 4.3 se obtiene:

$$q_o = \frac{TL * A}{86400 * n} \quad (4.4)$$

Dónde: TL= Tasa o velocidad de lavado [m^3/m^2 día; m/día]

A= Área de drenaje [m^2]

De las deducciones anteriores y reemplazando en 4.1:

$$H_f = \frac{k}{2g} \left(\frac{TL * A}{86400 * n * C_d * A_o} \right)^2 \quad (4.5)$$

Dónde: H_f = Pérdida de carga [m]

A_o = Área del orificio [m^2]

C_d = Coeficiente de descarga del orificio tipo ranura

k = Coeficiente de pérdidas localizadas

g = Gravedad [m/s^2]

La ecuación 4.5 es aplicable para determinar la pérdida de carga cualquiera sea el sistema de drenaje de tuberías perforadas. En este sentido, para el análisis de los orificios tipo ranura de dimensiones: $L_o = 26$ mm y ancho $a_o = 1$ mm, con valor medio de $C_d = 0.51$ y una densidad de orificios de 246 orif/m²; se tiene:

$$H_f = 6.44 \cdot 10^{-7} \times T^2 \quad (4.6)$$

La ecuación 4.6 puede ser utilizada para determinar la pérdida de carga en el proceso de filtración o lavado [$T = TL$ ó TF]. No obstante, debe tomarse en cuenta las unidades en las que se dedujo la ecuación y que la pérdida de carga calculada es para separación entre laterales de 20 cm. Además, se debe mantener una relación entre el área total de orificios y el área del lecho filtrante de 0.64%.

4.3 ANÁLISIS DE COEFICIENTES DE DESCARGA

Como se discutió anteriormente en el capítulo 3, los coeficientes de descarga fueron obtenidos de acuerdo a la metodología programada en el plan de pruebas. Estos coeficientes fueron analizados y los resultados se sintetizan en la Tabla 4.4

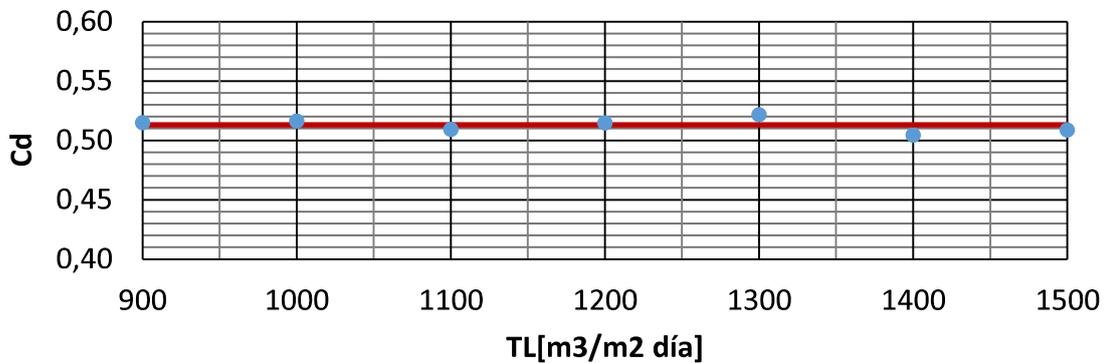
Tabla 4.4. Resumen de coeficientes de descarga resultantes de los ensayos

Tasa de lavado	Coeficiente de descarga		
	[TL]	[Cd]	
m ³ /m ² día	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
900	0.51	0.52	0.52
1000	0.52	0.51	0.52
1100	0.51	0.51	0.51
1200	0.51	0.52	0.51
1300	0.52	0.52	0.52
1400	0.50	0.51	0.50
1500	0.51	0.51	0.51
Media	0.51	0.51	0.51
Desviación	0.006	0.006	0.007

Elaborado por: Eduardo Pinos

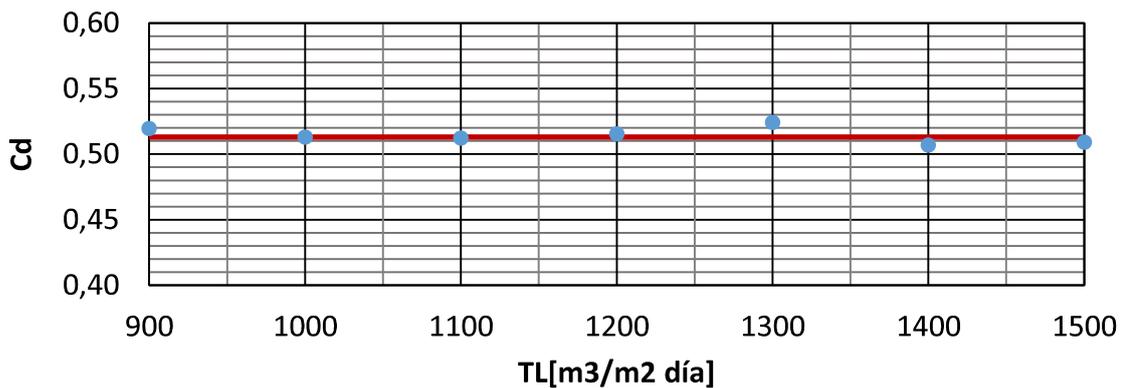
Para observar gráficamente la variación del coeficiente de descarga en relación a las tasas de lavado se efectuaron las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

Figura 4.4. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 1



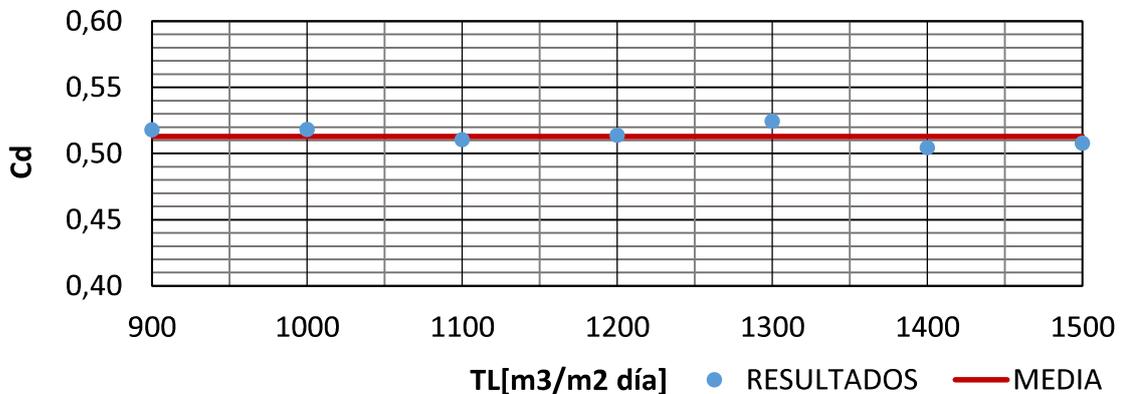
Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.5. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 2



Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.6. Variación del coeficiente de descarga (C_d) en función de la Tasa de lavado (TL): Ensayo 3



Elaborado por: Eduardo Pinos

Las figuras anteriores muestran que el coeficiente de descarga de los orificios tipo ranura, varía entre los valores 0.50 a 0.52 y tienen un valor medio representativo en los eventos de 0.51.

4.4 COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS DE CARGA Y COEFICIENTE DE DESCARGA

Se realizó el mismo procedimiento anterior en un tubo perforado con orificios circulares de área semejante, para comparar los resultados de la propuesta con un sistema convencional. El diámetro [Φ] del orificio circular fue 5.95 mm, con un área [A'] de 0.000028 m². Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 4.5. Valores de [C_d] obtenidos del ensayo en tubo con orificios circulares

Lectura No.	Caudal [Q]	Número de orificios [n]	Caudal por orificio [q _o]		Alturas Piezométricas				C _d
					H ₁	H ₂	ΔH		
	(l/s)		(l/s)	(m ³ /s)	(cm)	(cm)	(cm)	(m)	
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	58.6	23.6	35.0	0.35	0.59
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	66.4	23.8	42.6	0.43	0.59
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	75.7	24.0	51.7	0.52	0.58
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	83.6	24.2	59.4	0.59	0.60
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	96.7	24.4	72.3	0.72	0.59
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	107.4	24.6	82.8	0.83	0.58
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	115.8	24.7	91.1	0.91	0.59

Elaborado por: Eduardo Pinos

Tabla 4.6. Pérdida de carga obtenida del ensayo en tubo con orificios circulares

Lectura No.	Caudal [Q]	Número de orificios [n]	Caudal por orificio [q _o]		Coeficiente de descarga [C _d]	Coeficiente de pérdidas [K]	Velocidad en el orificio [v]	Alturas Piezométricas		Pérdida de carga [H _f]
								[H ₁]	[H' ₁]	
	(l/s)		(l/s)	(m ³ /s)	---	---	(m)	(cm)	(cm)	(m)
1	1.20	28	0.043	4.27E-05	0.59	1.00	2.80	58.60	56.40	0.40
2	1.32	28	0.047	4.71E-05	0.59		3.09	66.40	63.50	0.49
3	1.45	28	0.052	5.17E-05	0.58		3.41	75.70	70.60	0.59
4	1.59	28	0.057	5.66E-05	0.60		3.65	83.60	76.50	0.68
5	1.74	28	0.062	6.21E-05	0.59		4.03	96.70	87.40	0.83
6	1.83	28	0.066	6.55E-05	0.58		4.31	107.40	96.40	0.95
7	1.94	28	0.069	6.93E-05	0.59		4.52	115.80	106.50	1.04

Elaborado por: Eduardo Pinos

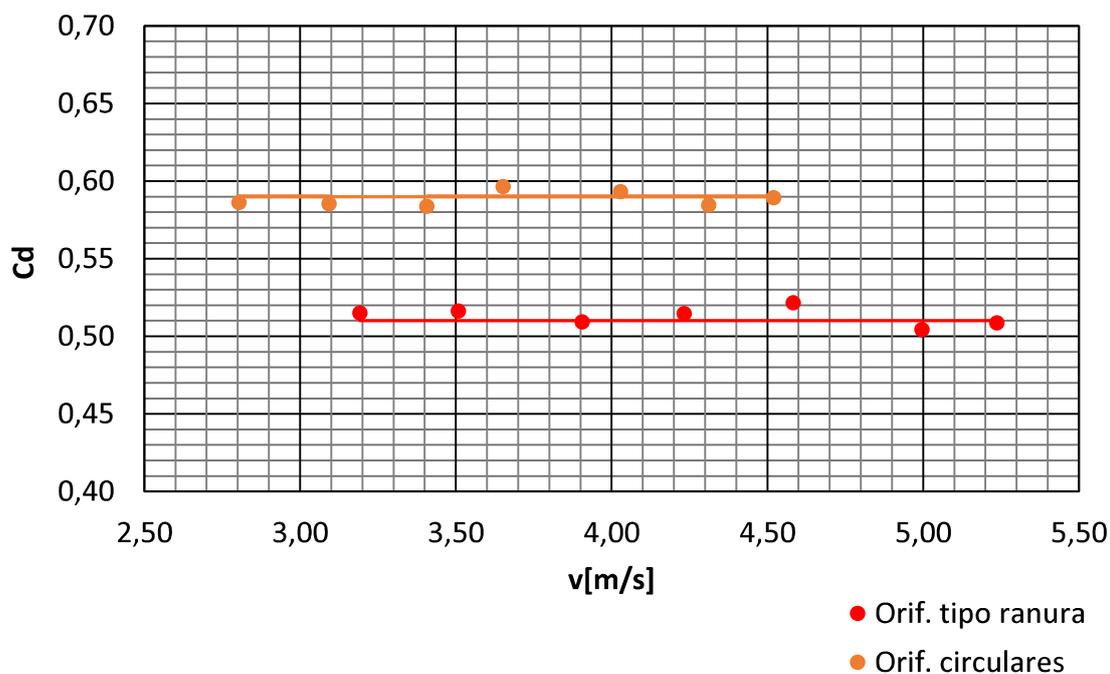
Para comparar los resultados entre los orificios tipo ranura y los orificios circulares, se tabulo los parámetros que se definieron para el análisis como se puede ver que en la Tabla 4.7. A partir de esta tabla, para tener una percepción gráfica de las diferencias entre los dos sistemas se elaboró las Figuras 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7. Resultados del análisis de los orificios tipo ranura y de los orificios circulares

Tasa de lavado	Caudal	Orificios tipo ranura			Orificios circulares		
		Coefficiente de descarga	Pérdida de carga	Velocidad en el orificio	Coefficiente de descarga	Pérdida de carga	Velocidad en el orificio
[TL]	[Q]	[Cd]	[Hf]	[v]	[Cd]	[Hf]	[v]
m ³ /m ² día	(l/s)	---	(m)	(m/s)	---	(m)	(m)
900	1.20	0.51	0.52	3.19	0.59	0.40	2.80
1000	1.32	0.52	0.63	3.51	0.59	0.49	3.09
1100	1.45	0.51	0.78	3.91	0.58	0.59	3.41
1200	1.59	0.51	0.91	4.23	0.60	0.68	3.65
1300	1.74	0.52	1.07	4.58	0.59	0.83	4.03
1400	1.83	0.50	1.27	5.00	0.58	0.95	4.31
1500	1.94	0.51	1.40	5.24	0.59	1.04	4.52

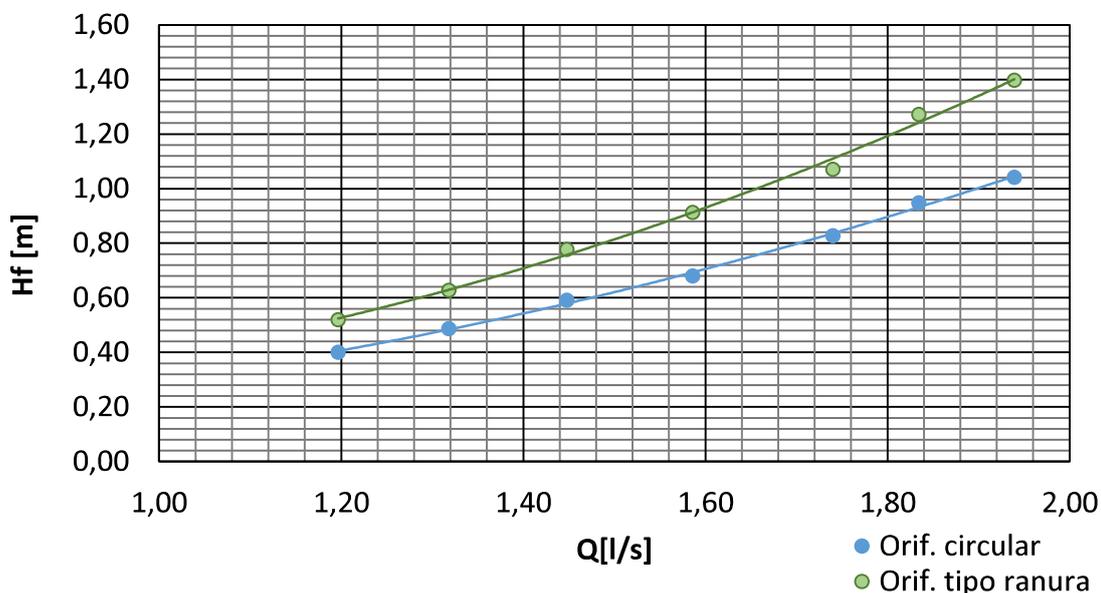
Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.7. Coeficientes de descarga en los dos sistemas de drenaje en función de la velocidad en los orificios



Elaborado por: Eduardo Pinos

Figura 4.8. Pérdida de carga en los dos sistemas de drenaje en función del caudal de lavado



Elaborado por: Eduardo Pinos

Las líneas de la Figura 4.7 representan el comportamiento del coeficiente de descarga con la velocidad de paso en los orificios para la propuesta de esta investigación y de un sistema convencional de orificios circulares. De la manera que se puede observar, los coeficientes de descarga permanecen prácticamente constantes con una desviación estándar muy pequeña (alrededor de 0.006).

Al inicio de este capítulo, se presentó el coeficiente de descarga de las aberturas circulares, el mismo que indicó ser más eficiente que las ranuras en un 8%. Para entender lo acontecido entre los coeficientes de descarga, consideraremos la influencia del radio hidráulico.

$$\text{Ranuras: } R_h = \frac{26 \cdot 1}{26 + 26 + 2} = 0.48 \text{ mm; } C_d = 0.51$$

$$\text{Orificios circulares: } R_h = \frac{5.95}{4} = 1.48 \text{ mm; } C_d = 0.59$$

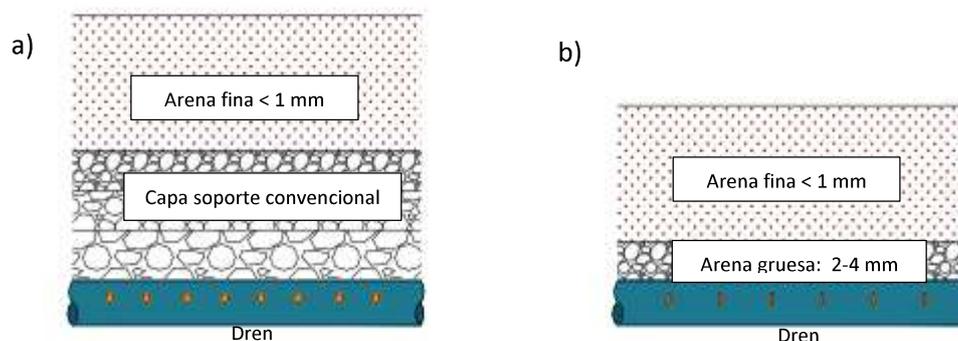
En base a los resultados, se visualiza que las ranuras presentan menor valor de radio hidráulico, lo que justifica el menor coeficiente de descarga. Esto es debido a que el rozamiento no depende solo de la sección transversal sino del contacto con las paredes [perímetro mojado]. De lo cual se puede interpretar que la forma del orificio influirá en la salida del agua, y que los orificios circulares por contar con un perímetro mojado mucho menor podrán descargar más eficientemente el líquido.

Mostradas como líneas sólidas, en la Figura 4.8 se presentan las tendencias de la pérdida de carga en relación al caudal que entra al dren. La línea correspondiente a los orificios circulares indica una menor pérdida que la desarrollada por los orificios tipo ranura para las mismas condiciones de caudal, debido a que este concepto está en base a la velocidad que atraviesa los orificios; y, a su vez, este parámetro depende de las características de las aberturas realizadas en la tubería.

Al analizar las velocidades basándose en la Figura 4.7, se puede identificar que en las ranuras son mayores a las determinadas en los orificios circulares, debido a que el coeficiente de descarga del sistema convencional es mayor que el de las ranuras. Según la Tabla 4.7 y en base, a la ecuación 4.2 se puede concluir que entre mayor sea el coeficiente de descarga menor será la pérdida de carga en el proceso. Sin embargo, la diferencia entre las pérdidas de carga entre los dos sistemas empieza a tener relevancia a partir del caudal 1.59 l/s, correspondiente a una tasa de 1200 m³/m² día y superiores, donde se nota claramente que dicha variación es en mayor proporción ante el aumento de velocidad.

Por lo tanto, esta condición haría necesario el aumento en la carga hidráulica que se requeriría para el lavado de un filtro en operación. El diseñador debería analizar si es factible utilizar la propuesta desde el punto de vista económico. Mientras que, para tasas inferiores se podría optar por cualquiera de las dos opciones ya que no se hallaría una notable diferencia entre los dos sistemas. Además, el orificio tipo ranura, aunque tiene un coeficiente de descarga menor, disminuye la capa soporte a una sola capa de arena gruesa o, a su vez, colocar la arena directamente sobre el dren como se muestra en la Figura 4.9.

Figura 4.9. Capa soporte: a) convencional, b) con drenaje de ranuras



Elaborado por: Eduardo Pinos

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 RESUMEN

El presente proyecto de investigación propuso un sistema de drenaje de tubería perforada con orificios tipo ranura. Esperando obtener un rendimiento adecuado para la implementación como dren en un filtro rápido. Se analizó los coeficientes de descarga y la pérdida de carga producida por el paso del agua entre las ranuras en el proceso de lavado según la metodología adoptada, y los resultados fueron presentados en el capítulo previo a este. La presente sección corresponde al quinto capítulo de este trabajo de titulación, en el cual se expondrá las conclusiones que se ha podido obtener de los resultados y las propuestas de parte del autor para investigaciones futuras que se podrían desarrollar a partir de este análisis.

5.2 CONCLUSIONES

- Los coeficientes de descarga de los orificios tipo ranura varían entre los valores 0.5 a 0.52. Teniendo un valor promedio de 0.51, el cual se puede considerar como el valor representativo para diseñar sistemas de drenajes para filtros rápidos con este tipo de orificios, sea cualquiera la condición de tasa y/o caudal requerido.
- El coeficiente de descarga de los orificios tipo ranura de la propuesta es menor al de orificios circulares debido a que cuentan con un mayor perímetro de contacto con el agua (menor radio hidráulico) dificultando la salida del fluido; de lo que se concluye que, en este tipo de drenajes la geometría de los orificios determina la eficiencia del mismo.
- La propuesta del presente trabajo de titulación muestra un rendimiento satisfactorio, aunque no superior al que se desarrolla en un sistema convencional de orificios circulares. Sin embargo, puede mejorarse aumentando la densidad de orificios, es decir, aumentando el número de orificios en la tubería. Esto disminuye el caudal en los orificios y, por ende, la velocidad que provoca la pérdida de carga excedente.

- Los orificios tipo ranura como sistema de drenaje permiten una adecuada pérdida de carga, mostrando un comportamiento parecido a su homólogo ante tasas inferiores a $1200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$. Para tasas superiores, la variación es en mayor proporción comparados con orificios circulares implicando aumento en la carga hidráulica que se requeriría para el lavado de un filtro en operación. El diseñador debería analizar si es factible utilizar la propuesta desde el punto de vista económico u optar por otro sistema de drenaje.
- Debido al buen comportamiento hidráulico, a la forma y configuración de las ranuras se puede evitar el uso de grava de mayor tamaño como soporte induciendo a tener una sola capa de gravilla o, simplemente, la capa torpedo. Ya que el tamaño de los granos del medio no sería capaz de atravesar la sección de los orificios, ni taponar los mismos.
- La propuesta es óptima para plantas de tratamiento que no requieran velocidades de lavado superiores a lo ya mencionado y en las cuales se desee disminuir el tamaño de las paredes de los tanques que contienen los filtros

5.3 TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda continuar con la investigación del comportamiento hidráulico de las ranuras, para lo cual se propone cambiar las dimensiones del orificio de tal manera que el perímetro de contacto con el agua se menor y determinar la variación del coeficiente de descarga respecto a este factor.
- El alcance de este trabajo de titulación no abarca el análisis de la distribución del agua durante el lavado, por lo cual sería una buena opción implementar un prototipo de filtro con drenaje de orificios tipo ranura y estudiar mediante trazadores como el agua es repartida durante este proceso.
- Otra opción para trabajos futuros sería variar la separación entre orificios, así como, el espaciamiento entre laterales y mediante los resultados obtener un ábaco que facilite la determinación de la pérdida de carga de manera gráfica.
- Por otra parte, se podría verificar el tamaño de granos óptimo del medio de soporte para el uso de orificios tipo ranura, mediante la experimentación del lavado con diferentes diámetros de granos y tamaños de capa.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A. (2010). *El agua, un derecho humano fundamental*. En A. Acosta & E. Martínez (Eds.). *Agua. Un derecho humano fundamental* (pp. 7-46) Quito, Ecuador: Ediciones Abya-Yala
- Arboleda, J (1973). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, pp. 296-405
- AWWA & ASCE (2005). *Water treatment plant design* (4ta ed). New York, USA: McGraw-Hill, Inc. pp.8.1-8.40
- CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua*. Manual de capacitación para operadores. Lima, Perú. pp. 452-485
- Cleasby, J & Baumann, R. (1962). Selection of sand filtration rates. *Journal AWWA*. Vol.54, (5), pp.579-602
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2007). *Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada*. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México, México. pp.117-126, 304-316
- Constitución política del Ecuador (2008). Asamblea Nacional Constituyente. Montecristi, Ecuador.
- EPMAPS, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (2018). *Tratamiento-Bienvenido a EPMAPS*. Recuperado de: https://www.aguaquito.gob.ec/?page_id=1387 [Fecha de acceso: 4 de enero de 2018]. Quito, Ecuador.
- EPMAPS, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2011). *Estudios de actualización del plan maestro integrado de agua potable y alcantarillado para el distrito metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador: Hazen and Sawyer, P.C. pp.23-28

- Gomella, C. & Guerrée, H. (1977). *Tratamiento de aguas para abastecimiento público* (J. Cantó, Trad.). Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados. Vol.1. pp.47-51
- Kawamura, S. (1975). *Design and operation of high –rate filters*. *Journal AWWA*. Vol.67, (11), pp.653
- Kemmer, F. & McCallion, J. (1996). *Manual del agua*. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones (M. Espinoza & F. Medina, Trads.). México, México: McGraw-Hill. pp. 9.1-9.21
- Ojeda, J. (2013). *Evaluación del sistema de filtración de la planta de tratamiento de Puengasí-EPMAPS-Quito, e investigación en columna de filtración piloto* (Tesis previa a la obtención del grado de magister en Ingeniería Ambiental). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Red-White TOYO, (2018). Catálogo de productos Red-White TOYO
- Romero, J. (1999). *Potabilización del agua* (3rd. ed.). México, México: Alfaomega. pp. 191-237
- Sotelo, G. (2011). *Hidráulica general*. Fundamentos. México, México: Limusa. Vol.1. pp.203-213

ANEXOS

ANEXO I

OBTENCIÓN DE LA CURVA DE DESCARGA DEL VERTEDERO RECTANGULAR DE CONTROL

Partiendo de la ecuación general de la curva de descarga

$$Q = \alpha H^\beta$$

El objetivo de este proceso es obtener los valores de los coeficientes α y β , a partir de los datos obtenidos del aforo de caudal y medición de carga sobre el vertedero.

Si tomamos en cuenta que $Q = f(H)$ es una expresión potencial, es posible encontrar una ecuación logarítmica aplicando las propiedades de los mismos, de la cual se obtiene lo siguiente:

$$\log Q = \log \alpha + \beta \log H$$

Si reemplazamos $a = \log \alpha$, $b = \beta$, $y = \log Q$ & $x = \log H$, se tiene:

$$y = a + b x$$

Al tratarse de una ecuación de primer grado es factible realizar una regresión lineal por el método de los máximos cuadrados.

Entonces,

Lectura No.	Caudal	Carga sobre el vertedero	$y = \log (Q)$	$x = \log (H)$
	(Q)	[H]		
	(Lt/s)	(cm)		
1	0.15	0.7	-0.831	-0.155
2	0.89	2.0	-0.051	0.301
3	1.75	3.4	0.242	0.531
4	2.26	4.0	0.353	0.602
5	2.56	4.8	0.408	0.681
6	3.08	5.5	0.488	0.740
7	3.18	6.2	0.503	0.792

De la herramienta "análisis de datos" de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9933
Coefficiente de determinación R ²	0.9867
R ² ajustado	0.9840
Error típico	0.0602
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	1.339	1.339	369.9	7.01E-06
Residuos	5	0.018	0.003619		
Total	6	1.357			

	Coefficientes	Error típico
Intercepción	-0.5541	0.0435
Variable X	1.4285	0.0743

Entonces,

$$a = \log(\alpha) = -0.5541; \alpha = 0.2792$$

$$\beta = b = 1.4285$$

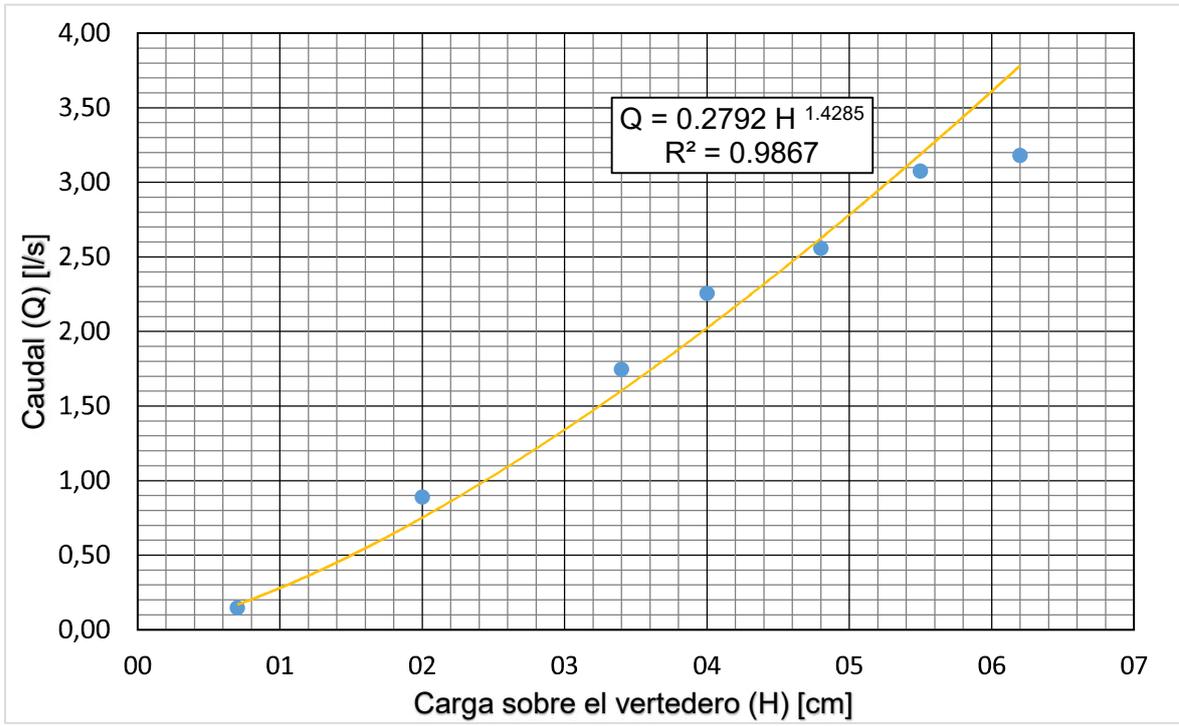
Por lo tanto,

$$Q = 0.2792 \quad H = 1.4285$$

De lo cual se obtiene,

Caudal	Carga sobre el vertedero
(Q)	[H]
(Lt/s)	(cm)
0.15	0.6
0.89	2.3
1.75	3.6
2.26	4.3
2.56	4.7
3.08	5.4
3.18	5.5

Gráficamente,



ANEXO II

**ANÁLISIS DE MÍNIMOS CUADRADOS PARA LA RELACIÓN
PÉRDIDA DE CARGA – TASA DE LAVADO.**

AII.1 ENSAYO 1

a. Tendencia lineal:

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	Hf
0	0.00
900	0.52
1000	0.63
1100	0.78
1200	0.91
1300	1.07
1400	1.27
1500	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9892
Coefficiente de determinación R ²	0.9786
R ² ajustado	0.8119
Error típico	0.1559
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	6.6739	6.6739	274.45	1.4633E-05
Residuos	6	0.1459	0.0243		
Total	7	6.8198			

Coefficientes Error típico

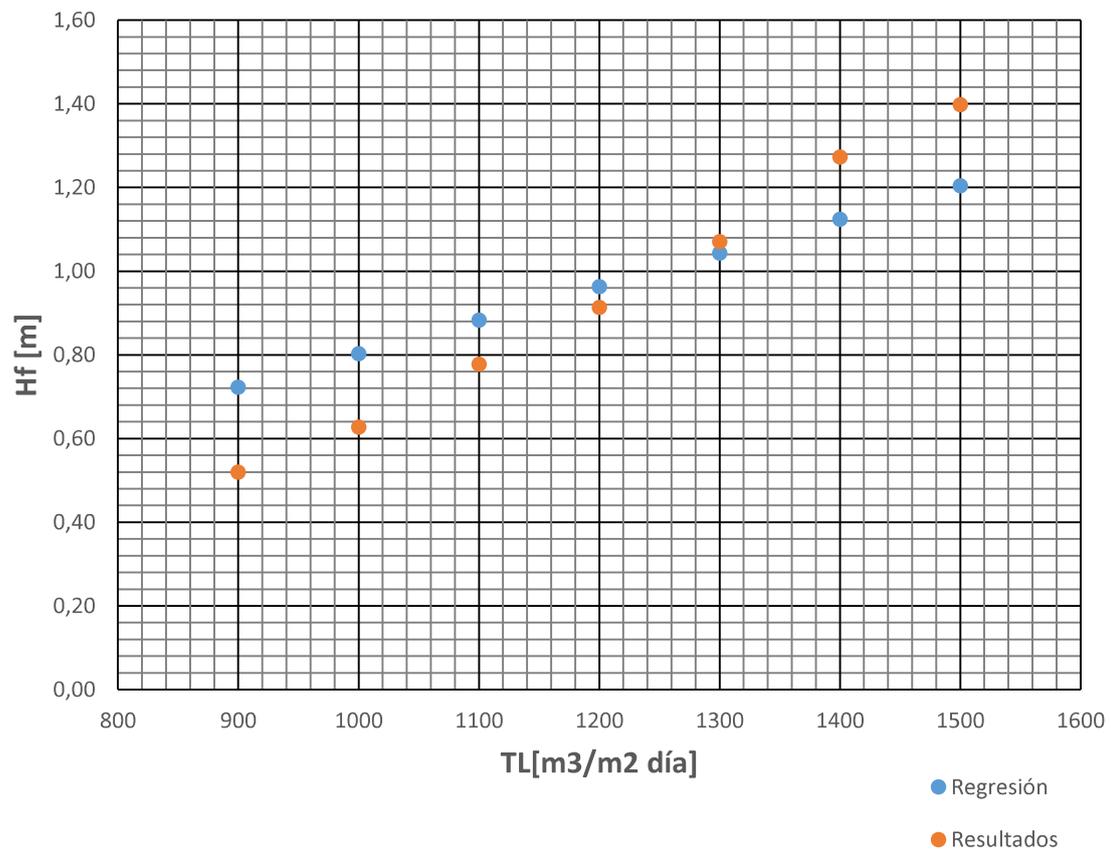
Intercepción	0	#N/D
Variable X	0.0008026	4.8448E-05

Por lo tanto,

$$H_f = 0.0008026 TL$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.72	0.52
1000	0.80	0.63
1100	0.88	0.78
1200	0.96	0.91
1300	1.04	1.07
1400	1.12	1.27
1500	1.20	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf no tiene tendencia lineal.

b. Tendencia cuadrática

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	TL ²	Hf
0	0	0.00
900	810000	0.52
1000	1000000	0.63
1100	1210000	0.78
1200	1440000	0.91
1300	1690000	1.07
1400	1960000	1.27
1500	2250000	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9998
Coefficiente de determinación R ²	0.9997
R ² ajustado	0.7996
Error típico	0.0189
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	6.8180	3.4090	9540.69	4.39E-08
Residuos	5	0.0018	0.000357		
Total	7	6.8198			

Coefficientes Error típico

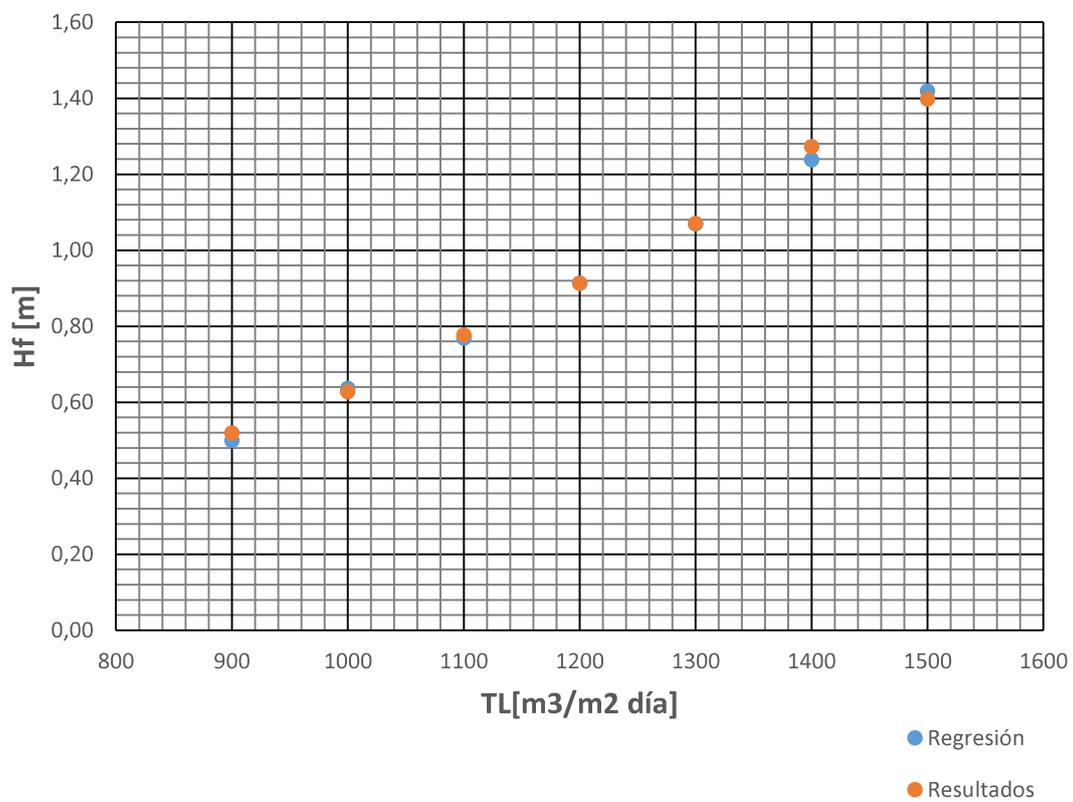
Intercepción	0	#N/D
Variable X	2.28E-05	3.92E-05
Variable X ²	6.16E-07	3.06E-08

Por lo tanto,

$$H_f = 6.16 \cdot 10^{-07} TL^2 + 2.28 \cdot 10^{-05} TL$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.50	0.52
1000	0.64	0.63
1100	0.77	0.78
1200	0.91	0.91
1300	1.07	1.07
1400	1.24	1.27
1500	1.42	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf tiene tendencia cuadrática.

AIL.2 ENSAYO 2

a. Tendencia lineal:

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	Hf
0	0.00
900	0.51
1000	0.64
1100	0.77
1200	0.91
1300	1.06
1400	1.26
1500	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9893
Coefficiente de determinación R ²	0.9786
R ² ajustado	0.8120
Error típico	0.1549
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	6.5953	6.5953	274.78	1.45E-05
Residuos	6	0.1440	0.0240		
Total	7	6.7393			

Coefficientes Error típico

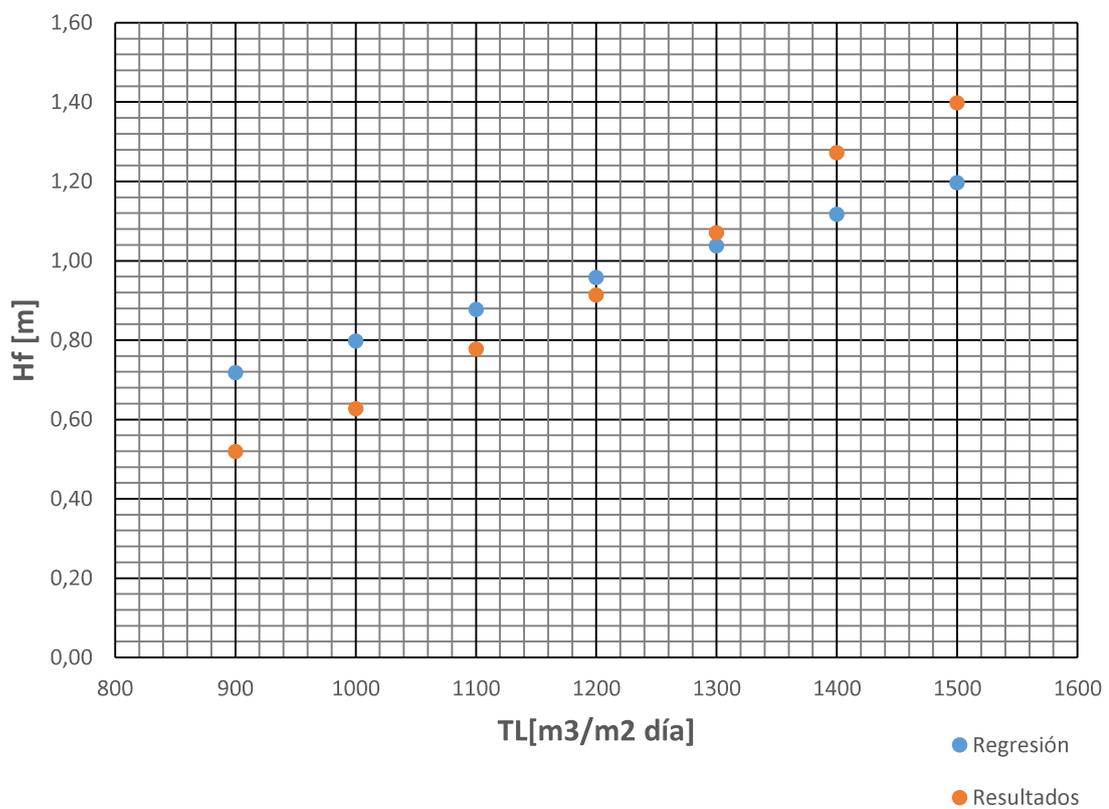
Intercepción	0	#N/D
Variable X	0.0007979	4.81E-05

Por lo tanto,

$$H_f = 0.0007979 \text{ TL}$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.72	0.52
1000	0.80	0.63
1100	0.88	0.78
1200	0.96	0.91
1300	1.04	1.07
1400	1.12	1.27
1500	1.20	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf no tiene tendencia lineal.

b. Tendencia cuadrática

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	TL ²	[Hf]
0	0	0.00
900	810000	0.51
1000	1000000	0.64
1100	1210000	0.77
1200	1440000	0.91
1300	1690000	1.06
1400	1960000	1.26
1500	2250000	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9999
Coefficiente de determinación R ²	0.9998
R ² ajustado	0.7998
Error típico	0.0147
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	6.7382	3.3691	15574.1	1.65E-08
Residuos	5	0.001082	0.0002163		
Total	7	6.7393			

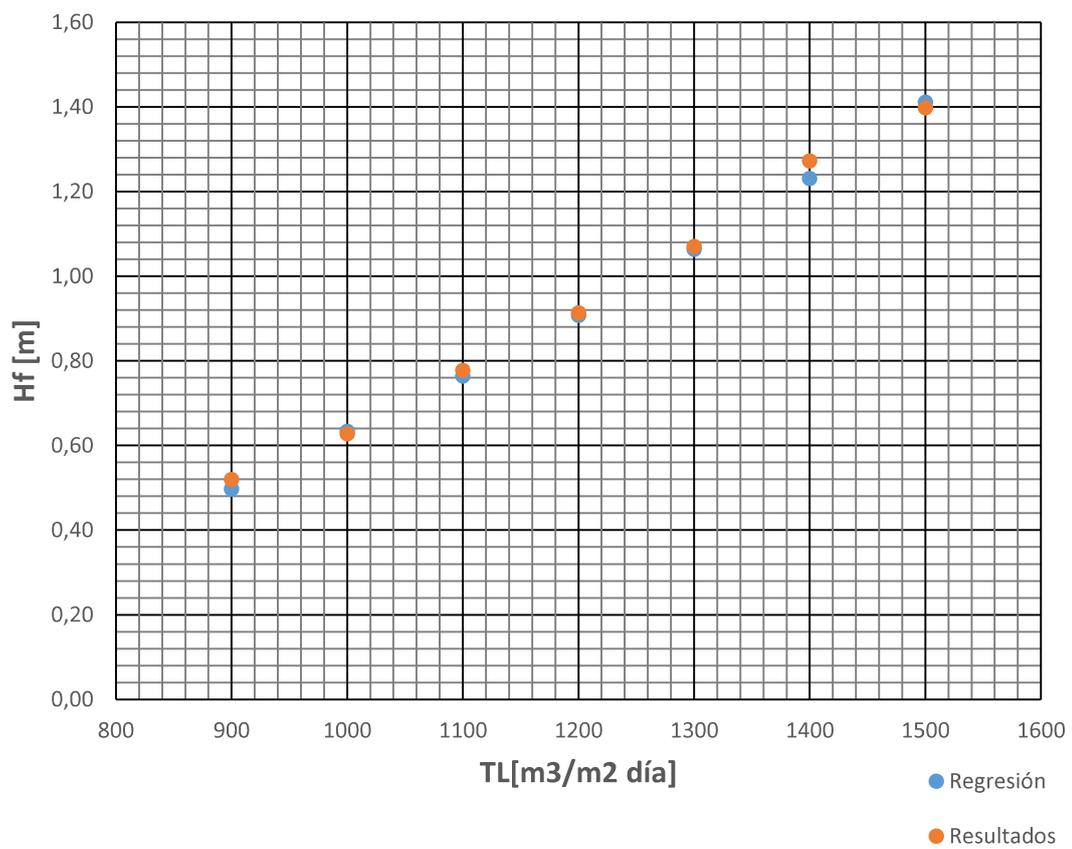
	Coefficientes	Error típico
Intercepción	0	#N/D
Variable X	2.13E-05	3.06E-05
Variable X ²	6.14E-07	2.39E-08

Por lo tanto,

$$Hf = 6.14 \cdot 10^{-07} TL^2 + 2.13 \cdot 10^{-05} TL$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.50	0.52
1000	0.63	0.63
1100	0.76	0.78
1200	0.91	0.91
1300	1.06	1.07
1400	1.23	1.27
1500	1.41	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf tiene tendencia cuadrática.

AIL.3 ENSAYO 3

a. Tendencia lineal:

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	Hf
0	0.00
900	0.51
1000	0.62
1100	0.77
1200	0.92
1300	1.06
1400	1.27
1500	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9887
Coefficiente de determinación R ²	0.9776
R ² ajustado	0.8109
Error típico	0.1592
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	6.6430	6.6430	261.97	1.64E-05
Residuos	6	0.1521	0.0254		
Total	7	6.7951			

Coefficientes Error típico

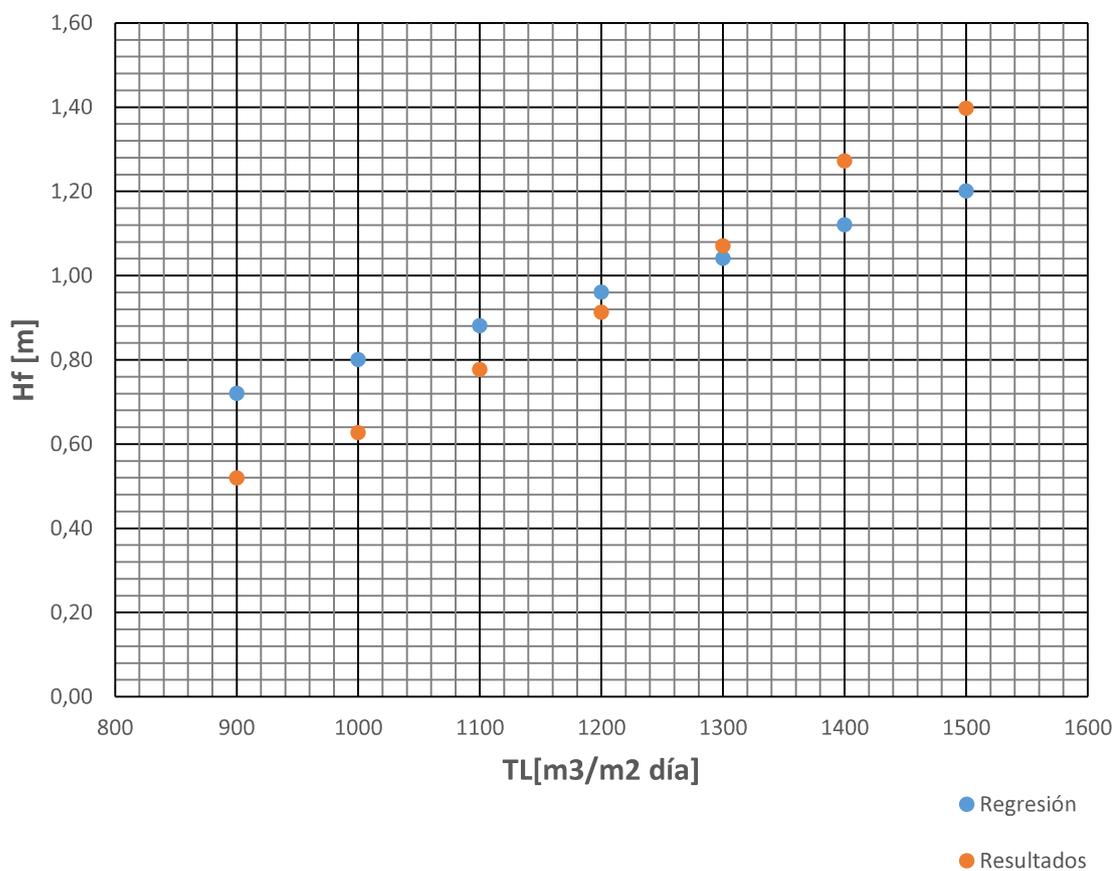
Intercepción	0	#N/D
Variable X	0.0008008	4.95E-05

Por lo tanto,

$$H_f = 0.0008008 \text{ TL}$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.72	0.52
1000	0.80	0.63
1100	0.88	0.78
1200	0.96	0.91
1300	1.04	1.07
1400	1.12	1.27
1500	1.20	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf no tiene tendencia lineal.

b. Tendencia cuadrática

Datos: de los análisis de pérdida de carga se obtienen las siguientes relaciones

TL	TL ²	[Hf]
0	0	0.00
900	810000	0.51
1000	1000000	0.62
1100	1210000	0.77
1200	1440000	0.92
1300	1690000	1.06
1400	1960000	1.27
1500	2250000	1.40

De la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel 2016,

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.9999
Coefficiente de determinación R ²	0.9997
R ² ajustado	0.7997
Error típico	0.0190
Observaciones	7

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	6.7933	3.3967	9457.46	4.47E-08
Residuos	5	0.0018	0.0004		
Total	7	6.7951			

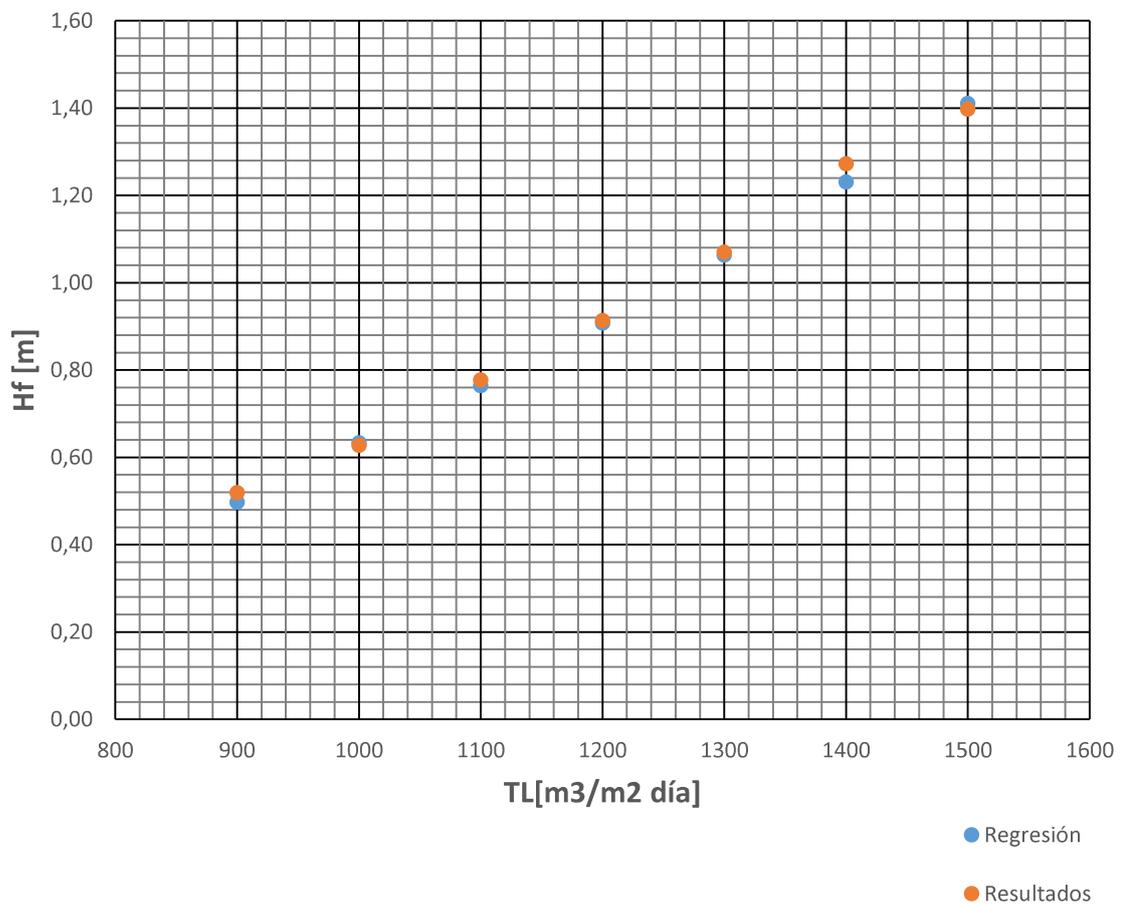
	Coefficientes	Error típico
Intercepción	0	#N/D
Variable X	4.31E-06	3.94E-05
Variable X ²	6.30E-07	3.08E-08

Por lo tanto,

$$H_f = 6.30 \cdot 10^{-07} TL^2 + 4.31 \cdot 10^{-05} TL$$

De lo cual se obtiene,

Tasa de lavado	Pérdida de carga	
	Regresión	Resultados
0	0.00	0.00
900	0.51	0.52
1000	0.63	0.63
1100	0.77	0.78
1200	0.91	0.91
1300	1.07	1.07
1400	1.24	1.27
1500	1.42	1.40



Conclusión: la relación TL – Hf tiene tendencia cuadrática