

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

### **Evaluación hidráulica y propuesta de rediseño de las unidades de mezcla rápida y floculación de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Nero**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.


#### **Autores:**

Daniel Gerardo Guerrero Fernández de Córdova

Junior Michael Rodríguez Mejía

#### **Director:**

Esteban Alonso Pacheco Tobar

ORCID:  0000-0001-9292-7193

Cuenca, Ecuador

2023-07-24

## Resumen

El propósito del presente trabajo de titulación fue la evaluación y rediseño del componente hidráulico de las unidades de mezcla rápida y floculación en la PTAP de Nero. Se evaluó estas unidades con base a la geometría y los factores hidráulicos más influyentes como el tiempo de retención y gradiente de velocidad. Se determinó que la unidad de mezcla rápida funciona adecuadamente para caudales de hasta 70 l/s, pero para caudales superiores el resalto hidráulico se ahoga debido al nivel aguas abajo, lo que reduce la energía disponible para la mezcla, esto ocasiona gradientes de velocidad insuficientes para el tipo de mezcla implementada; en el caso del floculador se determinó que la unidad posee un buen comportamiento hidráulico, en términos de tiempos de retención y flujo, sin embargo, los gradientes de velocidad son notablemente más altos que los contemplados en diseño (50% y 33% mayor en la cámara 1 y 2 respectivamente), esto afecta de manera negativa el desempeño de esta unidad. Con base a los resultados, se propuso mejorar el desempeño de la unidad de mezcla rápida, mediante modificación de cotas de la superficie de agua y la transición entre la unidad de mezcla rápida y la unidad de floculación con el fin de garantizar la efectividad del resalto hidráulico. En la unidad de floculación se propuso reducir los gradientes de velocidad, mediante reconfiguración de los tabiques, proyectándose valores del orden de 60 y 27 s<sup>-1</sup>, los cuales son más cercanos a los valores de diseño, especialmente en la cámara 2, mejorando el comportamiento de la unidad para un caudal analizado de 85 l/s.

*Palabras clave:* coagulación, floculador hidráulico, gradiente de velocidad, tiempo de retención.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

The purpose of the present work was the evaluation and redesign of the hydraulic component of the rapid mixing and flocculation units in the Nero PTAP. These units were evaluated based on the geometry and the most influential hydraulic factors such as retention time and velocity gradient. It was determined that the rapid mixing unit works adequately for flows of up to 70 l/s. However, for higher flows the hydraulic jump drowns due to the higher downstream water level, which reduces the mixing energy. This causes insufficient velocity gradients for the type of mixing implemented. In the case of the flocculation unit, it was determined that the unit has an acceptable hydraulic behavior in terms of retention times and flow. However, the velocity gradients are considerable higher than those considered for the design (50% and 33% higher in the chamber 1 and 2 respectively). This negatively affects the performance of this unit. Based on the results, it was proposed to improve the performance of the rapid mixing unit, by modifying the surface water levels and the transition between the rapid mixing unit and the flocculation unit in order to guarantee the effectiveness of the hydraulic jump. In the flocculation unit, it was proposed to reduce the velocity gradients, by reconfiguring the panels to have velocity gradient in the order of 60 and 27 s<sup>-1</sup> which are closer to the design values, especially in chamber 2. This improves the behavior of the flocculation unit for an analyzed flow of 85 l/s.

*Keywords:* coagulation, hydraulic flocculator, velocity gradient, retention time.



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

1. Introducción .....	10
1.1 Antecedentes, problemática y justificación .....	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos .....	11
2. Marco teórico: tratamiento convencional para purificación de agua .....	12
2.1 Proceso de mezcla rápida (coagulación) .....	12
2.1.1 Tipos de mezcladores .....	13
2.1.2 Factores hidráulicos que influyen en el proceso de mezcla rápida .....	13
2.2 Proceso de floculación.....	13
2.2.1 Tipos de floculadores .....	14
2.2.2 Factores hidráulicos que influyen en el proceso de floculación .....	15
2.3 Tipos de flujo.....	16
3. Materiales y métodos.....	17
3.1 Zona de estudio .....	17
3.2 Unidad de mezcla rápida.....	21
3.2.1 Geometría de la unidad y características hidráulicas.....	21
3.2.2 Variación del caudal en la unidad de mezcla rápida .....	26
3.3 Unidad de Floculación .....	29
3.3.1 Geometría de la unidad .....	29
3.3.2 Parámetros hidráulicos de la unidad de floculación .....	31
3.3.3 Variación del caudal en la unidad de floculación .....	36
3.4 Evaluación complementaria .....	37
4. Resultados y discusión.....	39
4.1 Evaluación hidráulica de la unidad de mezcla rápida .....	39
4.1.1 Análisis de la geometría de la unidad .....	39
4.1.2 Análisis del resalto hidráulico.....	39
4.1.3 Evaluación de la mezcla rápida en diferentes escenarios de caudal .....	41
4.2 Evaluación hidráulica de la unidad de floculación .....	44
4.2.1 Análisis de la geometría de la unidad y capacidad de operación .....	44
4.2.2 Tiempo de retención.....	45
4.2.3 Gradiente de velocidad .....	49

4.2.4	Evaluación del floculador en diferentes escenarios de caudal.....	51
4.3	Resultados de la evaluación complementaria.....	54
4.3.1	Canal de interconexión mezcla rápida – floculador .....	54
4.3.2	Ensayo de jarras.....	54
4.4	Propuesta de rediseño.....	55
4.4.1	Unidad de mezcla rápida .....	55
4.4.2	Unidad de floculación .....	58
5.	Conclusiones y recomendaciones .....	62
5.1	Conclusiones .....	62
5.2	Recomendaciones.....	65
	Referencias .....	67
	Anexos .....	69

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la planta de tratamiento de agua potable de Nero. ....	18
Figura 2. Esquema de flujo y procesos de potabilización en la planta de tratamiento. ....	19
Figura 3 Unidad de mezcla rápida de la PTAP de Nero. ....	19
Figura 4. Unidad de floculación de la PTAP de Nero. ....	20
Figura 5. Vista superior y lateral de la unidad de mezcla rápida en la actualidad. ....	21
Figura 6. Longitud del resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales con base en resultados de a USBR. ....	25
Figura 7. Efecto de las condiciones aguas abajo en la formación de resalto hidráulico. ....	28
Figura 8. Calados en la unidad de mezcla rápida para el análisis del resalto hidráulico. ....	29
Figura 9. Esquema en planta de la unidad de floculación. ....	30
Figura 10. Curva de concentración de trazador vs tiempo. ....	32
Figura 11. Curva 1- $F(t)$ , Modelo simplificado de Wolf – Resnick. ....	34
Figura 12. Comparador de tamaño de flóculo. ....	38
Figura 13. Calibración del vertedero de cresta gruesa de la unidad de mezcla rápida. ....	41
Figura 14. Gradiente de velocidad en la mezcla rápida para escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s y caudal actual 70l/s. ....	43
Figura 15. Curva de concentración del trazador en la cámara 1. ....	46
Figura 16. Curva de concentración del trazador en la cámara 2. ....	46
Figura 17. Comparación entre tiempos de retención teóricos y reales. ....	47
Figura 18. Comparación de tiempos de retención para 60, 70 y 74 l/s. ....	52
Figura 19. Comparación de gradientes de velocidad para 60, 70 y 74 l/s. ....	53
Figura 20. Evaluación en laboratorio, Ensayo de jarras. ....	55
Figura 21. Tiempo de mezcla en la unidad de mezcla rápida rediseñada. ....	57
Figura 22. Gradiente de velocidad en la unidad de mezcla rediseñada. ....	58
Figura 23. Comparación entre los gradientes de velocidad de diseño, reales y de rediseño. ....	60
Figura 24. Análisis complementario en laboratorio, Ensayo de jarras. ....	61

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las unidades de mezcla rápida. ....	13
Tabla 2. Clasificación de los floculadores. ....	15
Tabla 3. Descripción de las medidas que conforman la unidad de mezcla rápida. ....	22
Tabla 4. Clasificación del resalto hidráulico. ....	24
Tabla 5. Caudales evaluados. ....	27
Tabla 6. Descripción de los parámetros que intervienen en el análisis del resalto hidráulico. .....	29
Tabla 7. Medidas geométricas de la unidad de floculación. ....	30
Tabla 8. Parámetros de la curva de concentración de trazador. ....	32
Tabla 9. Criterios de comportamiento hidráulico en un reactor. ....	33
Tabla 10. Índice de floculación de Willcomb. ....	38
Tabla 11. Calados medidos y calculados en el vertedero y canal de mezcla rápida. ....	39
Tabla 12. Determinación de la longitud del resalto y tiempo de mezcla. ....	40
Tabla 13. Gradiente de velocidad en mezcla rápida. ....	40
Tabla 14. Determinación del coeficiente de pérdida K entre el vertedero y el canal de mezcla rápida. ....	42
Tabla 15. Calado contraído al inicio del canal de mezcla rápida en los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s. ....	42
Tabla 16. Análisis de la ubicación del resalto hidráulico para los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s. ....	42
Tabla 17. Tiempos de retención y gradiente de velocidad en unidad de mezcla rápida. ....	43
Tabla 18. Espaciamiento entre tabiques y tabique – muro. ....	44
Tabla 19. Volumen máximo en el floculador. ....	44
Tabla 20. Potencial de producción del floculador. ....	44
Tabla 21. Tiempos teóricos de floculación. ....	45
Tabla 22. Parámetros de la curva de concentración de trazador. ....	47
Tabla 23. Criterios del comportamiento hidráulico del floculador. ....	48
Tabla 24. Resultados del modelo de Wolf & Resnick. ....	49
Tabla 25. Pérdidas de energía medidas en cada cámara de floculación. ....	50
Tabla 26. Gradientes de velocidad medidos en cada cámara de floculación. ....	50
Tabla 27. Gradiente de velocidad a través de la compuerta de salida del floculador (compuerta 2). ....	51
Tabla 28. Determinación del n de Manning del sistema (Floculador). ....	51
Tabla 29. Características hidráulicas del floculador para 60, 70 y 74 l/s. ....	52
Tabla 30. Gradientes de velocidad para 60, 70 y 74 l/s. ....	52
Tabla 31. Gradientes de velocidad en compuerta 2 para 60, 70 y 74 l/s. ....	53
Tabla 32. Gradiente de velocidad en la interconexión mezcla rápida – floculador. ....	54
Tabla 33. Modificaciones propuestas para la unidad de mezcla rápida. ....	56
Tabla 34. Carga de agua sobre el vertedero rediseñado. ....	56
Tabla 35. Análisis de la ubicación y longitud del resalto hidráulico para el rediseño de la unidad de mezcla rápida. ....	57
Tabla 36. Cambios en la geometría del floculador como parte del rediseño propuesto. ....	59
Tabla 37. Características hidráulicas de la propuesta de rediseño. ....	59
Tabla 38. Gradientes de velocidad de la propuesta de rediseño. ....	60

## **Dedicatoria**

Este trabajo lo dedico especialmente a mis padres, Alina y Gerardo, quienes han sido mi mayor soporte para cumplir todas las metas que me he propuesto y me formaron y educaron en un hogar lleno de amor y buenos valores.

A mi hermana, Alina, quien siempre ha estado presente cuando la necesitaba y ha sido uno de mis mayores ejemplos a seguir.

A mi enamorada, Karlita, quien me brindó su amor, apoyo y palabras de aliento en todo el desarrollo de este trabajo.

## **Daniel Gerardo Guerrero Fernández de Córdova**

Dedico este trabajo a mi familia, a mis padres, Esperanza y Jaime, por estar siempre presentes a pesar de la distancia, por siempre comprenderme y nunca demandar nada de mí, espero en el futuro poder retribuir todo su esfuerzo.

A mis hermanos, Kiara, José Luis, Paúl, y Pamela, en especial a Kiara y José Luis, por apoyarme desde un inicio para poder estudiar la carrera que deseaba, y por estar durante todo el proceso, dándome su apoyo y amor incondicional.

A Seymour, Blanca, Tigre y Cuco, los quiero mucho.

A mi amigo David J, su amistad sincera y el tiempo que compartimos significan mucho para mí.

## **Junior Michael Rodríguez Mejía**



## **Agradecimientos**

Agradecemos primeramente a la Universidad de Cuenca y sus docentes de la Facultad de Ingeniería, quienes fueron parte indispensable en nuestro desarrollo profesional y personal.

Agradecemos al Ing. Esteban Pacheco, director del trabajo de titulación, quien nos brindó sus conocimientos y apoyo para poder desarrollar y culminar con éxito el mismo.

A la Dra. Guillermina Pauta, quien, como parte del laboratorio de sanitaria, apoyó, acompañó y facilitó los implementos necesarios para desarrollar el trabajo.

Al Proyecto Nero, especialmente al Bqf. Oscar Vintimilla e Ing. Ximena Criollo, quienes amablemente brindaron información importante para el desarrollo del trabajo y permitieron las visitas a la planta cuando eran requeridas.

Finalmente agradecemos a nuestros familiares, amigos y seres queridos, por haber brindado apoyo, cariño y formar parte importante de todo nuestro proceso de formación académica.

**Daniel Gerardo Guerrero Fernández de Córdova**

**Junior Michael Rodríguez Mejía**

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes, problemática y justificación

El acceso a agua potable de calidad es una necesidad fundamental para garantizar la salud pública y desarrollo económico. Dentro de la labor de brindar agua potable, los entes encargados implementan infraestructuras con funciones específicas, como captaciones, conducciones, plantas de tratamiento (PTAP), redes de distribución, entre otros. El funcionamiento óptimo de cada infraestructura garantiza el suministro adecuado de agua a los usuarios. Dentro de lo mencionado las PTAP cumplen una función importante en el suministro de agua pues en ellas se trata el agua captada y mediante procesos de tratamiento se da al agua las características necesarias para ser considerada agua de consumo que no afecte la salud. En el diseño de una PTAP, el llamado tratamiento convencional está compuesto por las unidades de mezcla rápida y coagulación, floculación, sedimentación, filtración, y desinfección.

La PTAP de Nero fue diseñada y construida hace más de 30 años, implementa el sistema de tratamiento convencional y supone una infraestructura importante, pues abastece de agua potable a varias comunidades y parroquias del cantón Cuenca. Actualmente posee alrededor de 8100 usuarios, número que incrementa cada año y por consecuencia también las demandas de producción del sistema de tratamiento.

La coagulación y floculación son los procesos iniciales en el tratamiento convencional y a su vez los más importantes, pues de la eficiencia de estos dependerá la eficacia de los siguientes procesos, por ello es importante realizar evaluaciones para garantizar el buen funcionamiento de estas etapas y asegurar agua tratada de calidad. En la PTAP de Nero tanto la coagulación como la floculación son realizadas mediante procesos hidráulicos, se cuenta con una unidad de mezcla rápida mediante resalto hidráulico y floculadores hidráulicos de tabiques con flujo horizontal. Estas unidades de tratamiento fueron diseñadas para un caudal de 60l/s, en la actualidad la planta opera habitualmente con caudales del orden de 70 l/s por lo que la capacidad de diseño ha sido sobrepasada lo cual implicaría que las unidades de mezcla rápida y floculación no operan eficientemente afectando a las etapas posteriores de tratamiento, hecho que ha sido evidenciado en los sedimentadores por la gran cantidad de partículas sobrenadantes observadas que son dirigidas a los filtros los cuales requieren de 2 o más lavados diarios consumiendo recursos y tiempo, lo que da la hipótesis de un ineficiente proceso de coagulación y floculación.

Según la literatura las plantas de tratamiento poseen una vida útil de alrededor de 15 a 20 años, rango que ha sido sobrepasado por la PTAP de Nero, con base a esto y las

problemáticas identificadas, se origina el presente trabajo de titulación con el fin de evaluar hidráulicamente las unidades de mezcla rápida y floculación, y realizar una propuesta de rediseño que mejore el desempeño de dichas unidades.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Plantear una propuesta de rediseño para las unidades de mezcla rápida y floculación de la PTAP de Nero.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar las características particulares de las unidades de mezcla rápida y floculación en la PTAP.
- Evaluar hidráulicamente la eficiencia de los procesos de mezcla rápida y floculación.
- Analizar alternativas de rediseño para las unidades de mezcla rápida y floculación de la PTAP.

## 2. Marco teórico: tratamiento convencional para purificación de agua

En la purificación de agua, generalmente las plantas de tratamiento se clasifican de acuerdo al tipo de procesos implementados, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta. Las plantas de filtración rápida se caracterizan, como su nombre lo indica, por poseer altas tasas de velocidad de filtrado, además incluyen los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, este conjunto de procesos también es denominado tratamiento convencional (CEPIS, 2004a).

### 2.1 Proceso de mezcla rápida (coagulación)

#### Generalidades del proceso

Este proceso es el responsable de la formación de coágulos, se produce mediante la incorporación de una sustancia coagulante en el agua, lo que provoca una serie de reacciones físico-químicas que conllevan a un estado general de equilibrio electrostático inestable. El coagulante en el agua se hidroliza en partículas con carga positiva, estas contrarrestan las cargas negativas de las partículas coloidales (Souza, 2007). Al emplear coagulantes las partículas coloidales tienden a aproximarse entre sí ya que en estado natural estas permanecen en suspensión (Andía, 2000).

La coagulación con alumbre (sulfato que contiene un metal alcalino, como potasio o amonio, y un metal trivalente, como aluminio o cromo) ocurre mediante dos mecanismos denominados adsorción-desestabilización y coagulación de barrido. En el mecanismo de adsorción-desestabilización las reacciones se producen en tiempos inferiores a 1 segundo, mientras que en la coagulación de barrido las reacciones se producen en 1 a 7 segundos (Romero, 1999).

El sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado en el mercado, es de bajo costo, fácil manejo, y no sufre cambios químicos con el tiempo. Sin embargo, si no se dosifica adecuadamente, la concentración de aluminio residual puede exceder los límites permisibles para el agua potable. Además, dependiendo de las características del agua, puede disminuir su eficiencia y requerir de un ayudante de coagulación, lo que implica un mayor costo (Chulluncuy-Camacho, 2011).

En el tratamiento del agua para consumo humano la coagulación se lleva a cabo en las unidades de mezcla rápida, en estas unidades se genera una gran turbulencia que permite dispersar el coagulante rápidamente y de manera uniforme.

## 2.1.1 Tipos de mezcladores

Los procesos para producir la agitación se clasifican en dos grandes grupos, pudiendo ser hidráulicos o mecánicos, estos deben de dispersar de manera rápida y homogénea el coagulante (Gonzalez, 2021), en la Tabla 1 se presenta los tipos de mezcladores y ejemplos.

Tipos de mezcladores	Forma de producir agitación	Ejemplo
Mecánicos	Retromezcladores	Retromezcladores en línea
	Resalto hidráulico	Canaleta Parshall
Canal de fondo inclinado		
Vertedero rectangular		
Hidráulicos	En línea	Difusores
		Inyectores
		Estáticos
	Caídas	Orificios
		Vertederos triangulares
	Contracciones	Medidor Venturi
		Reducciones
Orificios ahogados		
Velocidad o cambio de flujo	Línea de bombeo	
	Codos	

Tabla 1. Clasificación de las unidades de mezcla rápida.  
Fuente: (CEPIS, 2004a)

## 2.1.2 Factores hidráulicos que influyen en el proceso de mezcla rápida

La intensidad de mezcla (Gradiente de velocidad) y el tiempo de mezcla son los factores más importantes cuando el mecanismo de mezcla predominante es el de adsorción-desestabilización. El coagulante debe dispersarse de manera instantánea para evitar que la hidrólisis del agua se complete. En cambio, en el mecanismo de coagulación por barrido los tiempos de mezcla son mayores y el gradiente de velocidad es menos influyente en la eficiencia. También influyen en el proceso de coagulación las condiciones particulares de la unidad de mezcla rápida como el tipo de mezclador y el sistema de dosificación del coagulante. (CEPIS, 2004a). De los factores mencionados el gradiente de velocidad es ampliamente aceptado como parámetro para determinar los requisitos energéticos de la mezcla rápida (Romero, 1999).

## 2.2 Proceso de floculación

### Generalidades del proceso

El proceso de floculación tiene como objetivo promover el contacto o colisión entre las partículas que fueron desestabilizadas en el proceso de mezcla rápida y formar partículas de

mayor densidad, denominadas flóculos, que pueden eliminarse eficientemente en procesos de separación posteriores tales como sedimentación, flotación y filtración (AWWA, 1999).

La floculación ocurre a partir de tres mecanismos, desarrollados de forma secuencial, estos son: floculación pericinética, floculación ortocinética y sedimentación diferencial (CEPIS, 2004a).

La floculación pericinética o floculación de micro escala ocurre inmediatamente después de la desestabilización de las partículas, formando mediante movimiento browniano los primeros micro flóculos, y termina al cabo de pocos segundos pues el movimiento browniano tiene poco o ningún efecto en la formación de flóculos de mayor tamaño que un micrómetro (Bratby, 2016). El efecto de la floculación pericinética es muy reducido pues este resulta despreciable para gradientes de velocidad mayores a  $5 \text{ s}^{-1}$  y partículas con un diámetro mayor de un micrómetro (CEPIS, 2004a).

La floculación ortocinética es el principal mecanismo de floculación, llamada también floculación de macroescala, ocasiona la formación de partículas de tamaño mayor a un micrómetro mediante una mezcla lenta del agua con gradientes de velocidad óptimos que generan colisiones entre las partículas desestabilizadas generando la unión entre ellas, sin embargo, en este mecanismo los flóculos están sometidos también a fuerzas de cizallamiento y ruptura hasta alcanzar un punto de equilibrio entre formación y ruptura, logrando un tamaño máximo de flóculo que dependerá de las condiciones hidrodinámicas del sistema y la interacción química entre el coagulante y las partículas (Crittenden et al., 2012).

El último mecanismo denominado sedimentación diferencial, ocurre debido a la sedimentación de las partículas más grandes, que en su proceso de asentamiento colisionan con partículas más pequeñas generando su aglomeración (CEPIS, 2004a).

### **2.2.1 Tipos de floculadores**

La floculación se lleva a cabo en unidades denominadas floculadores y generalmente se clasifican de acuerdo a su forma de agitar el agua, en hidráulicos y mecánicos. Los floculadores hidráulicos a la vez pueden clasificarse según el sentido de flujo, en horizontales, verticales y helicoidales. Por otro lado, los floculadores mecánicos se clasifican por el sentido de movimiento en giratorios y reciprocantes. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los tipos de floculadores y ejemplos (Arboleda, 2000).

Según la energía de agitación	Según el sentido del flujo	Descripción	Nombre
Hidráulicos	Flujo horizontal	Con tabiques de ida y regreso	De tabiques
	Flujo vertical	Con tabiques arriba y abajo del tanque	Alabama
		Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba	
	Flujo helicoidal	Con entrada lateral al tanque	Cox
Mecánicos	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical	De paletas
		De turbinas horizontales o verticales	De turbinas
	Reciprocantes	Rejas o cintas oscilantes	Reciprocantes
Hidromecánicos	Flujo Horizontal	De turbina Pelton y paletas horizontales	Hidromecánicos

Tabla 2. Clasificación de los floculadores.

Fuente: (Arboleda, 2000)

Los floculadores que más ventajas presentan son los floculadores hidráulicos de tabiques con flujo horizontal o vertical, estos al no poseer partes mecánicas o móviles, resultan en una fácil y económica operación y mantenimiento, son confiables (funcionamiento continuo) y presentan un funcionamiento muy similar al teórico (mínimas zonas muertas y cortocircuitos) (CEPIS, 2004b).

### 2.2.2 Factores hidráulicos que influyen en el proceso de floculación

El proceso de floculación es influenciado por varios factores físicos-químicos como el pH del agua, la temperatura, carga eléctrica de las partículas, alcalinidad, turbiedad, y por factores hidráulicos como tiempo de retención, gradiente de velocidad hidráulico y variación de caudal (CEPIS, 2004a).

#### I. Tiempo de retención.

El tiempo de retención en la unidad de floculación, denominado también tiempo de floculación, es un parámetro hidráulico importante pues este es proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas, dependiendo de las características y naturaleza del agua existe un tiempo óptimo, en el cual se logra la máxima eficiencia del proceso, tiempos distantes del óptimo disminuyen la eficiencia del proceso. El tiempo óptimo generalmente se encuentra entre 15 – 30 minutos, dependiendo de la naturaleza del agua; además, con la compartimentalización de la unidad se obtiene un mejor comportamiento hidráulico del floculador, disminuyendo la existencia de cortocircuitos y zonas muertas (CEPIS, 2005).

#### II. Gradiente de velocidad.

El gradiente de velocidad ( $G$ ) determina la intensidad de la mezcla y supone un parámetro importante en el diseño de floculadores, al igual que el tiempo de retención, existen gradientes

de velocidad óptimos que permiten la máxima eficiencia del proceso, mientras más alto es el gradiente de velocidad existe un mayor contacto entre partículas y por tanto una mayor aglomeración (floculación), sin embargo, mientras mayor sea el gradiente de velocidad las fuerzas de cizallamiento resultan más altas limitando el tamaño máximo del flóculo, por el contrario, si el gradiente es muy bajo, no se produce una mezcla adecuada para la aglomeración de las partículas y la floculación resulta incompleta. De estudios realizados, se ha determinado que los mejores resultados de floculación se obtienen al compartimentalizar las unidades de floculación en varias cámaras con gradientes descendentes entre cada cámara, dentro del rango recomendado de 60 a 20  $s^{-1}$ , sin valores mayores a 100  $s^{-1}$  ni menores a 10  $s^{-1}$ , pues fuera de estos últimos la floculación resulta muy complicada (CEPIS, 2004a).

### III. Variación de caudal de operación

La variación de caudal ocasiona variaciones en el tiempo de retención y en el gradiente de velocidad dependiendo del tipo de unidad. En floculadores hidráulicos, estos se adaptan bien a la variación, al aumentar el caudal existe una disminución en el tiempo de retención y el gradiente de velocidad aumenta mientras que si disminuye el caudal ocurre el efecto contrario, aunque estos efectos son pequeños en este tipo de unidades pues se ha evidenciado que el número de Camp (producto del tiempo de retención y gradiente de velocidad) presenta una variación del 20% al haber una variación del 50 % de caudal. Por otro lado, en floculadores hidráulicos la variación de caudal perjudica más los tiempos de retención a diferencia de la intensidad de mezcla la cual permanece constante. (CEPIS, 2004a).

## 2.3 Tipos de flujo

Desde el punto de vista hidráulico, el flujo puede ser de dos tipos en las unidades de tratamiento de una planta: flujo discontinuo y flujo continuo. Este último además se clasifica en flujo de pistón, flujo mezclado y no ideal (CEPIS, 2005).

- Flujo discontinuo

Denominado también flujo intermitente, consiste en llenar la unidad, esperar el tiempo de retención necesario para el proceso deseado, descargar el fluido y repetir el procedimiento; puede haber o no mezcla. Este tipo de flujo es el menos habitual en plantas de tratamiento y es más implementado en pruebas piloto y laboratorio (CEPIS, 2005).

- Flujo de pistón



Denominado también flujo tapón o flujo tubular ideal, se caracteriza porque el tiempo de retención, dentro de la unidad, es igual para todos los elementos del fluido, esto se da porque los elementos del fluido no sobrepasan o se mezclan con elementos antes o después, ocurriendo un flujo regular y pudiéndose dar mezcla lateral pero no a lo largo de la trayectoria del fluido (Levenspiel, 2004).

- Flujo mezclado

Las unidades con este flujo también se les denomina reactores de tanque agitado, este tipo de flujo se caracteriza por poseer una agitación y mezcla perfecta, siendo la composición del fluido, dentro de la unidad, la misma en todos sus puntos, además, la composición del efluente de la unidad es igual a la composición interna (Levenspiel, 2004).

- Flujo no ideal

Este flujo se encuentra en un grado intermedio entre flujo de pistón y mezcla completa, además presenta alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos y recirculación. Este tipo de flujo es el que se encuentra normalmente en las unidades de tratamiento de las plantas de potabilización. (CEPIS, 2005).

Las zonas muertas como su nombre lo indica son zonas en las que el tiempo de residencia del flujo es considerablemente mayor de lo proyectado, mientras que un cortocircuito hidráulico ocurre cuando el flujo se desvía del recorrido esperado de acuerdo al diseño y su tiempo de residencia es inferior al planificado, por último, la recirculación es el fenómeno que ocurre cuando una porción de fluido retorna hacia el punto de origen lo que ocasiona un retraso en la salida del flujo. Estas alteraciones no son deseables puesto que modifican los tiempos de retención del diseño y disminuyen la eficiencia general del sistema (Burgos, 2008).

### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1 Zona de estudio**

La planta de tratamiento de agua potable se encuentra ubicada en lo alto de la comunidad Nero (3040 m.s.n.m), perteneciente a la parroquia Baños, a 8.5 km al sur de Cuenca, como se observa en la figura 1.

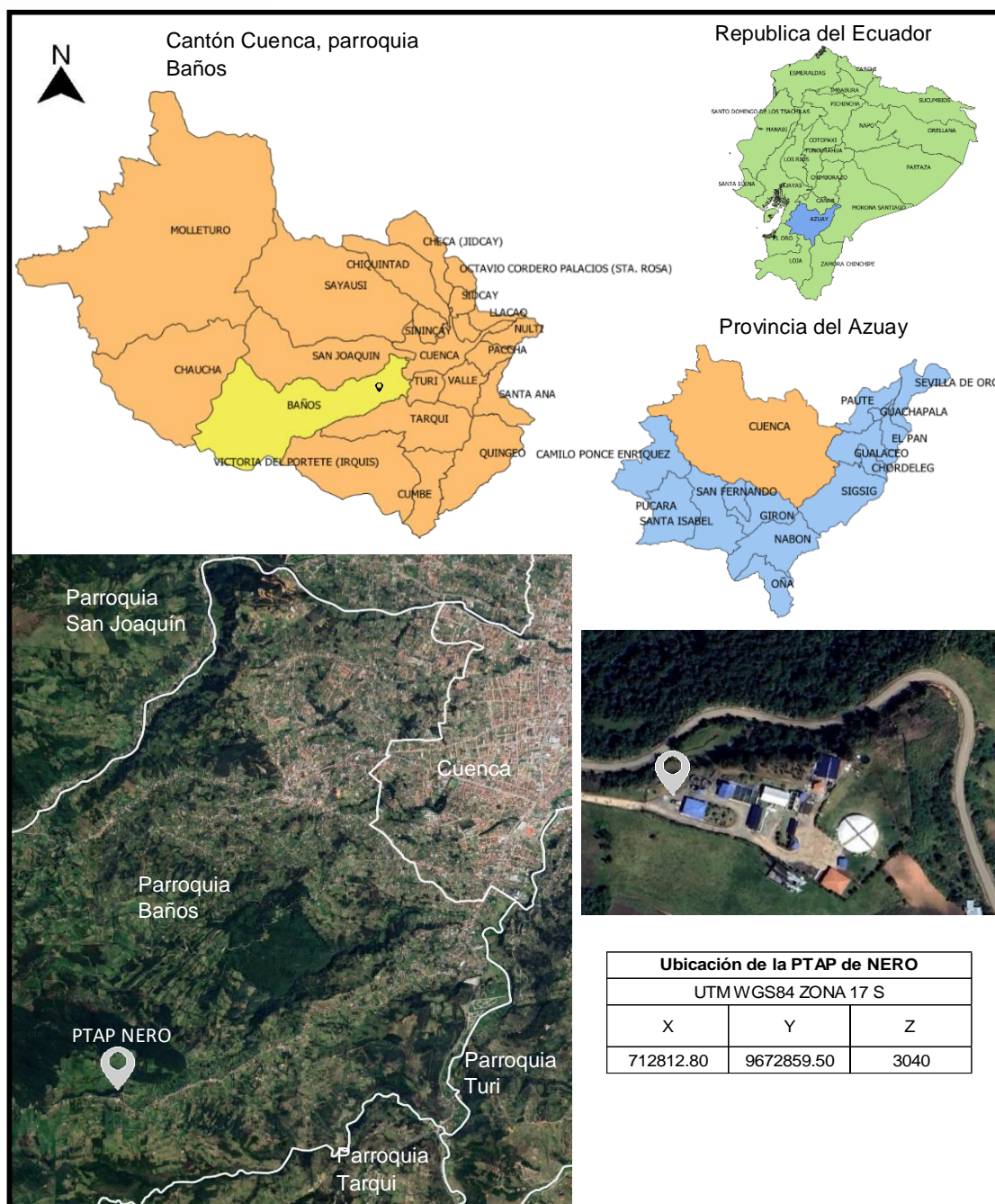


Figura 1. Ubicación de la planta de tratamiento de agua potable de Nero.

La planta fue diseñada para un caudal de 60 l/s y construida en el año 1986, es de tipo convencional e inicialmente contenía los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Posteriormente se añadió aireación y prefiltrado, con el esquema de flujo que se ilustra en la figura 2. Actualmente la planta opera con un caudal promedio de 70 l/s. Es abastecida por fuentes superficiales y posee rango de tratabilidad de color: 20 - 150 UPt-Co y turbiedad: 0.7 – 3.5 NTU.

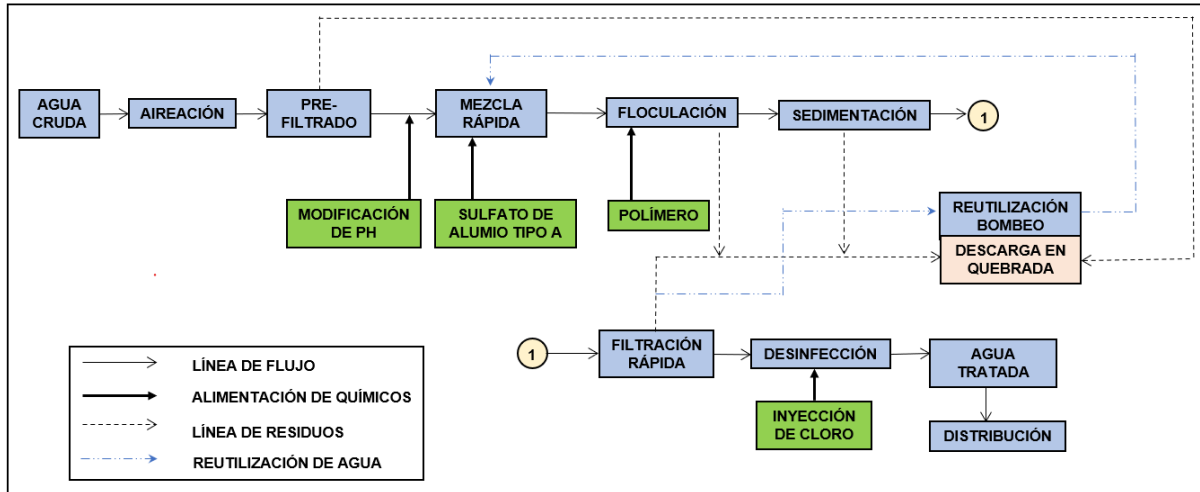


Figura 2. Esquema de flujo y procesos de potabilización en la planta de tratamiento.

I. Unidades de aireación y prefiltrado

Previo a la unidad de mezcla rápida (coagulación) se construyeron dos sistemas de pretratamiento compuestos por dos aireadores de tipo cascada y dos tanques pre filtros, cumplen el objetivo de incorporar aire al agua cruda para mejorar condiciones de color y olor, además, los prefiltros retienen material y sedimento transportados en la conducción. Estas unidades fueron implementadas posterior a las evaluaciones realizadas por León (2007).

II. Unidad de mezcla rápida

Previo a la unidad de mezcla rápida se ha construido un cajón o tanque de entrada de 2m<sup>3</sup> de capacidad el cual se llena desde el fondo y dirige el flujo hacia la unidad de mezcla. El proceso de coagulación es implementado en una unidad de mezcla rápida de tipo hidráulica, mediante resalto hidráulico, compuesta por un canal de 0.40 m de ancho. El resalto hidráulico, punto en que se coloca el coagulante, ocurre por un cambio en la cota de fondo del canal a través de un plano inclinado, como se observa en la figura 3. La unidad finaliza con una caída brusca del fondo hacia un canal de interconexión con la unidad de floculación.



Figura 3 Unidad de mezcla rápida de la PTAP de Nero.

### III. Unidad de floculación

La unidad de floculación es de tipo hidráulica de flujo horizontal, posee dos cámaras, cada una formada por dos tanques o tramos compuestos de tabiques, dos para un determinado gradiente de velocidad (cámara 1) y dos para otro gradiente (cámara 2), los gradientes de diseño fueron  $45 \text{ s}^{-1}$  y  $28 \text{ s}^{-1}$  respectivamente, además cada cámara fue diseñada para tener un tiempo de retención teórico de 10 minutos, en total el tiempo de diseño para la unidad fue de 20 minutos (León, 2007)

La unidad ocupa un espacio de 8.80 m de ancho y 13.55 m de largo, inicialmente los tabiques eran placas onduladas de fibrocemento, las cuales presentaron fuerte deterioro con el pasar de los años y fueron reemplazadas por placas planas de fibra de vidrio que se mantienen hasta la actualidad, como se observa en la figura 4.



Figura 4. Unidad de floculación de la PTAP de Nero.

### IV. Unidad de sedimentación

El agua floculada sigue su tratamiento a la unidad de sedimentación de alta tasa, compuesta por dos cámaras que contienen módulos tubulares de PVC, con inclinación de  $60^\circ$ .

### V. Unidad de filtración

El caudal proveniente del sedimentador es repartido por medio de tuberías a cada filtro, la planta está compuesta por 4 filtros rápidos de doble lecho filtrante de antracita y arena (León, 2007).

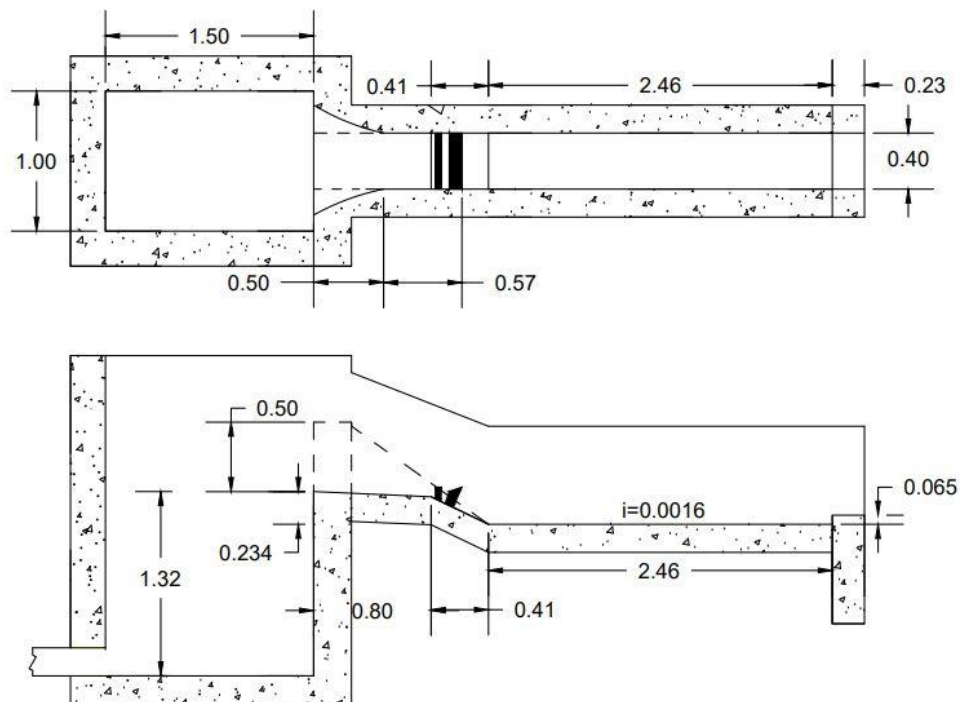
### VI. Unidad de desinfección

El último proceso de tratamiento es la desinfección, la planta cuenta con una cámara de contacto, en donde se inyecta cloro gas a través de una bomba de vacío.

### 3.2 Unidad de mezcla rápida

#### 3.2.1 Geometría de la unidad y características hidráulicas

Las medidas geométricas fueron proporcionadas mediante planos por parte de la Junta Administradora de Agua del Proyecto Nero, además, fueron constatadas in situ mediante cinta métrica, flexómetro y nivel de ingeniero, se muestran en la Tabla 3. Debido a errores en la planificación y/o construcción de los tanques de prefiltros, estos no fueron construidos con la altura suficiente, lo que producía que el agua se desbordara en ellos y no pasara a la unidad de mezcla rápida, para solucionar este inconveniente se decidió disminuir la altura de la rampa, quedando 50 cm por debajo del nivel original. Además, en la parte final de esta estructura se han colocado unos tacos de madera que ocasionan que la longitud de esta superficie aplanada aumente, esto se muestra en la Figura 5. Por lo expresado anteriormente se ha idealizado esta estructura como un vertedero de cresta gruesa sin contracciones.



Nota: Se ha colocado en líneas discontinuas la forma original con la que fue construida la unidad de mezcla rápida. La figura está en unidades métricas.

Figura 5. Vista superior y lateral de la unidad de mezcla rápida en la actualidad.

Elemento	Descripción	valor
Tanque de entrada	Ancho del tanque de entrada [m]	1.00
	Largo del tranque de entrada [m]	1.49
	Longitud de alabeo entre el tanque y el vertedero de cresta gruesa [m]	0.50
Vertedero	Espesor de la cresta "e" [m]	0.57
	Altura desde el fondo del canal de entrada "w" [m]	1.32
	Ancho del vertedero "b" [m]	0.40
	Pendiente de la cresta del vertedero [%]	4.60
Canal de mezcla rápida	Desnivel entre la cresta del vertedero y el canal de mezcla rápida [m]	0.23
	Longitud del canal de mezcla rápida [m]	2.46
	Pendiente del canal de mezcla rápida [%]	0.16
Grada de control	Altura de grada a la salida del canal de mezcla rápida [cm]	6.50
	Longitud de grada a la salida del canal de mezcla rápida [m]	0.23

Tabla 3. Descripción de las medidas que conforman la unidad de mezcla rápida.

- Vertedero rectangular de cresta gruesa.

La ecuación del gasto para un vertedero rectangular de cresta gruesa está dada por la ecuación 1 (Sotelo, 1994).

$$Q = \frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times \mu \times b \times h^{\frac{3}{2}} \times \epsilon_1 \quad (1)$$

donde:

Q: caudal en el vertedero [m<sup>3</sup>/s]

g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

μ: coeficiente de gasto

b: ancho del vertedero [m]

h: desnivel entre la superficie inalterada de agua antes del vertedero y la cresta [m]

ε<sub>1</sub>: coeficiente de reducción para vertedero de cresta gruesa.

En un vertedero de cresta gruesa se cumple que la relación entre el espesor de la cresta (e) y la carga (h) es mayor a 0.67. El coeficiente de reducción ε<sub>1</sub>, depende del valor de la relación e/h, la ecuación (2.1) es válida para e/h ≤ 3, y la ecuación (2.2) para 3 < e/h ≤ 10 (Sotelo, 1994).

$$\epsilon_1 = 0.7 + \frac{0.185}{\frac{e}{h}} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_1 = 0.75 + \frac{0.1}{\frac{e}{h}} \quad (2.2)$$

- Coeficiente de gasto ( $\mu$ )

Debido a las dimensiones del vertedero de mezcla rápida y a los límites de aplicación de estas fórmulas, se determinó el coeficiente de gasto  $\mu$  con la expresión de Rehbock (ecuación 3), esta es válida para vertederos sin contracciones laterales y es una de las más utilizadas por su simplicidad, a continuación, la fórmula desarrollada por Rehbock (Sotelo, 1994).

$$\mu = \left[ 0.6035 + 0.0813 \left( \frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \times \left[ 1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2} \quad (3)$$

- Límites de aplicación:

$$0.01\text{m} \leq h \leq 0.80\text{m}$$

$$b \geq 0.30\text{m}$$

$$w \geq 0.06\text{m}$$

$$\frac{h}{w} \leq 1$$

### **Análisis del resalto hidráulico de la unidad de mezcla rápida**

El resalto hidráulico es un fenómeno en el que ocurre un cambio de régimen de flujo supercrítico a subcrítico, acompañado de una fuerte turbulencia y disipación de energía (French, 1988).

- Número de Froude y tipo de resalto hidráulico

El número de Froude es un número adimensional que representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales en un fluido (French, 1988). El número de Froude para un canal de sección rectangular está dado por la ecuación 4.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times A/T}} = \frac{v}{\sqrt{g \times y}} \quad (4)$$

donde:

Fr: número de Froude

v: velocidad media de la sección [m/s]

g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

y: calado [m]

En función del número de Froude en la sección contraída se clasifica el resalto hidráulico, como se muestra en la Tabla 4.

Número de Froude	Denominación del resalto hidráulico
Fr1 = 1 - 1.7	Resalto ondulante
Fr1 = 1.7 - 2.5	Resalto débil
Fr1 = 2.5 - 4.5	Resalto oscilante
Fr1 = 4.5 - 9	Resalto estable
Fr1 > 9	Resalto fuerte

Tabla 4. Clasificación del resalto hidráulico.

Fuente: (Chow, 1994)

- Longitud del resalto hidráulico

Se empleó las fórmulas de Smetana, de Woycieki y la curva de la USBR, para determinar la longitud del resalto hidráulico, con el objetivo de determinar el tiempo de mezcla y gradiente de velocidad entre un valor mínimo y un máximo.

La ecuación de Smetana se expresa mediante la ecuación 5.

$$LR = 6 \times (y_2 - y_1) \quad (5)$$

donde:

LR: longitud del resalto hidráulico [m]

$y_1$ : calado contraído [m]

$y_2$ : calado conjugado [m]

Mediante la ecuación 6 de Woycieki se obtienen longitudes de resalto mayores.

$$LR = (y_2 - y_1) \times \left( 8 - \frac{0.05 \times y_1}{y_2} \right) \quad (6)$$

También es ampliamente usada la Figura 6, que representa los resultados experimentales del US Bureau of Reclamation (USBR), esta figura sirve para determinar la longitud del resalto hidráulico en función del número de Froude en la sección contraída y del calado conjugado (Sotelo, 2002).



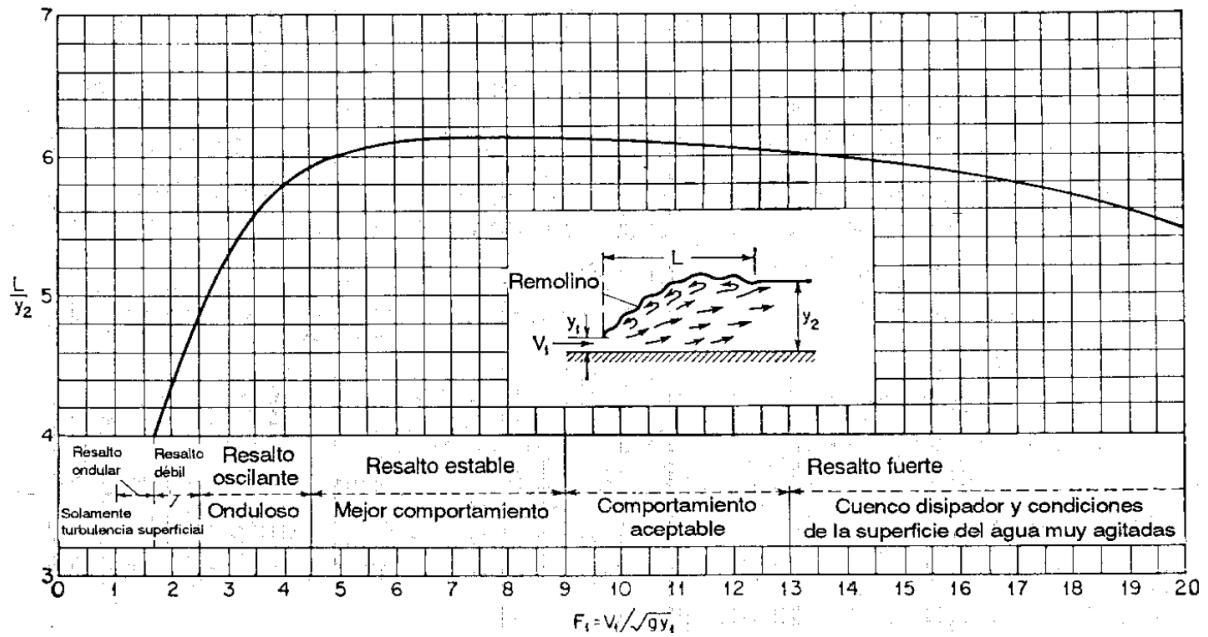


Figura 6. Longitud del resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales con base en resultados de a USBR.

Fuente: (Chow, 1994)

- Calado contraído y calado conjugado

Cuando se forma un resalto hidráulico en un canal de sección rectangular el calado contraído y el calado conjugado satisfacen la ecuación 7.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \times \left( \sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1 \right) \tag{7}$$

donde:

$Fr_1$ : número de Froude en la sección del calado contraído.

- Pérdida de energía en el resalto hidráulico

La pérdida de energía en el resalto hidráulico está dada por la ecuación la ecuación 8.

$$\Delta E = H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \times y_2 \times y_1} \tag{8}$$

donde:

$\Delta E$ : pérdida de energía [m]

- Tiempo de mezcla

El tiempo de mezcla se define como el tiempo que se demora una partícula en entrar y salir de una unidad (Uribe, 2019), para el caso de un resalto hidráulico este tiempo está dado por la ecuación 9.

$$T = \frac{2 \times LR}{v_1 + v_2} \quad (9)$$

donde:

T: tiempo de retención [m]

$v_1$ : velocidad media en la sección del calado contraído [m/s]

$v_2$ : velocidad media en la sección del calado conjugado [m/s]

Este tiempo se determinó midiendo el calado contraído al inicio del resalto, con este dato y con el caudal de operación se determinó la velocidad  $v_1$ , luego se determinó la velocidad  $v_2$ , usando el calado conjugado obtenido de la ecuación de Belanger. De esta forma se determinó todas las variables para calcular el tiempo de mezcla.

- Intensidad de mezcla

La intensidad de mezcla o gradiente de velocidad se interpreta como la cantidad de energía disipada en un sistema (Ayros & Coaquira, 2015). Se determinó de acuerdo a la ecuación 10:

$$G = \sqrt{\frac{g \times H}{v \times T}} \quad (10)$$

donde:

H: pérdida de energía [m]

g: aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

v: viscosidad cinemática del agua [ $m^2/s$ ]

T: tiempo de retención [s]

### 3.2.2 Variación del caudal en la unidad de mezcla rápida

Se estimó teóricamente las características hidráulicas de la unidad en otros escenarios de caudal que han sido registrados en la planta de tratamiento, los de mayor interés se detallan en la tabla 5, los cuales se evaluó en el presente trabajo.

Caudal [l/s]	Descripción
60	Caudal mínimo registrado actualmente, igual a caudal de diseño
70	Caudal promedio actual
74	Caudal máximo histórico registrado

Tabla 5. Caudales evaluados.

Con la expresión para caudal en un vertedero rectangular de cresta gruesa presentada en la sección 3.2.1 se determinó la carga de agua para distintos caudales analizados, comparando dicha carga con la carga real medida, se determinó la diferencia y en base a esto se calibró la ecuación de vertedero.

Sotelo (2002) expone la existencia de una pérdida de energía de coeficiente K, el cual se determinará a partir de los calados medidos en las secciones antes y después del vertedero, aplicando conservación de energía en estos dos puntos (Ecuación 11.2).

$$E_1 = E_2 + \Delta E \quad (11.1)$$

$$h + \Delta Z + \frac{v_0^2}{2g} = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} (1 + K) \quad (11.2)$$

donde:

h: carga de agua sobre el vertedero [m]

$\Delta Z$ : desnivel entre la parte inicial de la cresta del vertedero y el canal de mezcla rápida [m]

$v_0$ : velocidad de aproximación, igual a cero por simplificación [m/s]

$v_1$ : velocidad media del agua en la sección contraída [m/s]

g: aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

k: coeficiente de pérdida de energía entre las secciones

Además, se debe tener en cuenta el calado de aguas abajo ya que, dependiendo de esto, se podrá tener tres casos distintos con respecto a la ubicación del resalto, como se ilustra en la Figura 7.

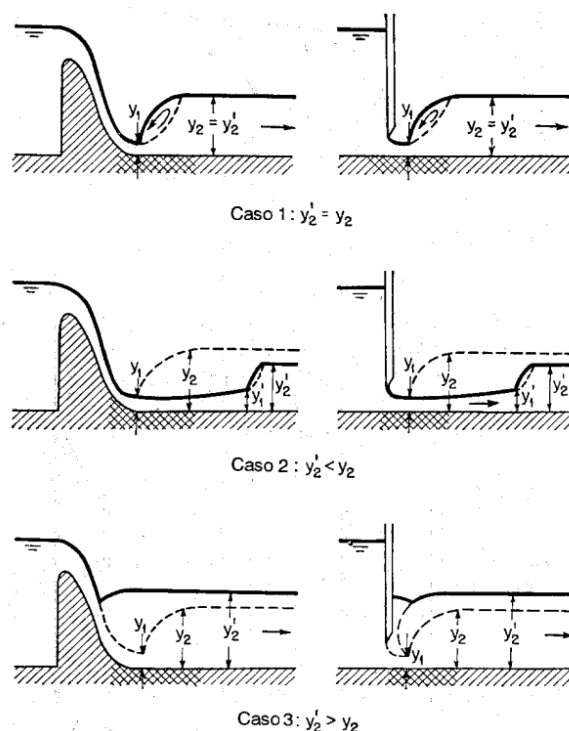


Figura 7. Efecto de las condiciones aguas abajo en la formación de resalto hidráulico.  
Fuente: (Chow, 1994)

En los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s para determinar el calado aguas abajo en el canal de mezcla rápida se aplica conservación de energía entre las secciones antes y sobre la grada, considerando que el calado que está en la grada es el calado normal del floculador, siempre que este sea mayor que el calado crítico en la sección de la grada, en caso de que el calado del floculador este por debajo del calado crítico en la sección de la grada, se debe de producir una caída libre del agua hacia el floculador y el calado sobre la grada debe de ser el calado crítico.

En resumen, el calado aguas abajo del canal de mezcla rápida ( $y_2$ ) se determina por conservación de la energía y mediante la ecuación de Belanger se obtiene el calado contraído requerido del resalto, con esto se determina la longitud de perfil M3 formada como se muestra esquemáticamente en la Figura 8, en caso de formarse. De esta forma se obtienen todas las variables para poder estudiar estos escenarios de caudales y así determinar el gradiente de velocidad y el tiempo de mezcla que son los factores más importantes en la evaluación la mezcla rápida.

En la tabla 6 se describen los calados que se presentan en la Figura 8 .

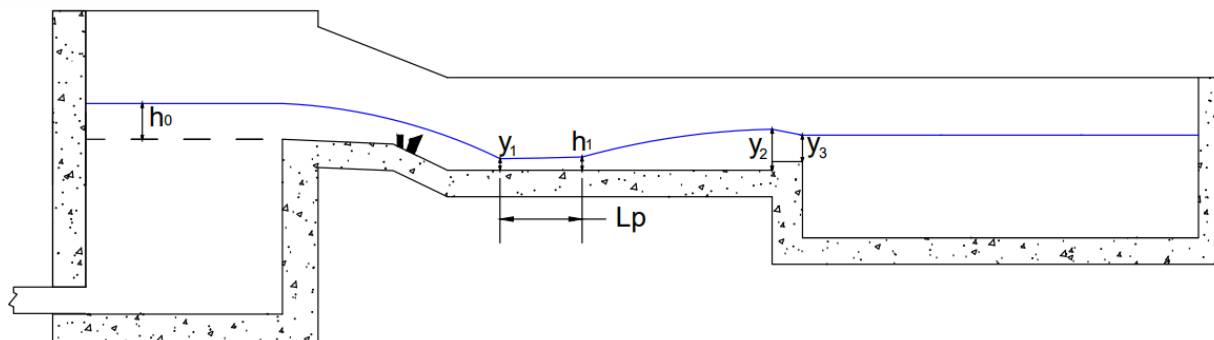


Figura 8. Calados en la unidad de mezcla rápida para el análisis del resalto hidráulico.

Parámetro	Descripción
$h_0$	Carga sobre vertedero [m]
$y_1$	Calado contraído inicial [m]
$y_c$	Calado crítico [m]
$y_3$	Calado sobre la grada [m]
$y_2$	Calado antes de la grada [m]
$h_1$	Calado contraído requerido [m]
$L_p$	Longitud del perfil M3 [m]

Tabla 6. Descripción de los parámetros que intervienen en el análisis del resalto hidráulico.

### 3.3 Unidad de Floculación

Se evaluaron los parámetros hidráulicos que influyen en el proceso de floculación, tiempo de retención, gradientes de velocidad, evaluación en diferentes caudales.

#### 3.3.1 Geometría de la unidad

Al igual que la unidad de mezcla rápida las medidas geométricas fueron proporcionadas mediante planos por parte de la Junta Administradora y fueron constatadas in situ.

El floculador de la planta de Nero está compuesto por dos cámaras de floculación de flujo horizontal con tabiques, cada una formada por dos tanques o tramos. En la tabla 7 se detallan las medidas del floculador y en la Figura 9 se ilustra un esquema en planta del mismo.

Descripción [unidad]	Cámara 1		Cámara 2	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2
Longitud de tramo [m]	8.40	8.40	8.40	8.40
Ancho de tramo [m]	2.95	2.97	3.34	3.37
Diferencia de cotas del fondo, inicio-final [cm]	12.50	12.50	3	3
Número de canales	21	21	13	13
Número de tabiques	20	20	12	12
Longitud de tabique [m]	2.50	2.50	2.50	2.50
Altura de tabique [m]	1.15	1.15	1.15	1.15
Separación promedio entre tabiques [m]	0.39	0.39	0.64	0.64
Separación entre tabique - muro [m]	0.45	0.47	0.84	0.87
Espesor de tabiques [mm]	8	8	8	8
Longitud de recorrido [m]	124.51		87.63	

Tabla 7. Medidas geométricas de la unidad de floculación.

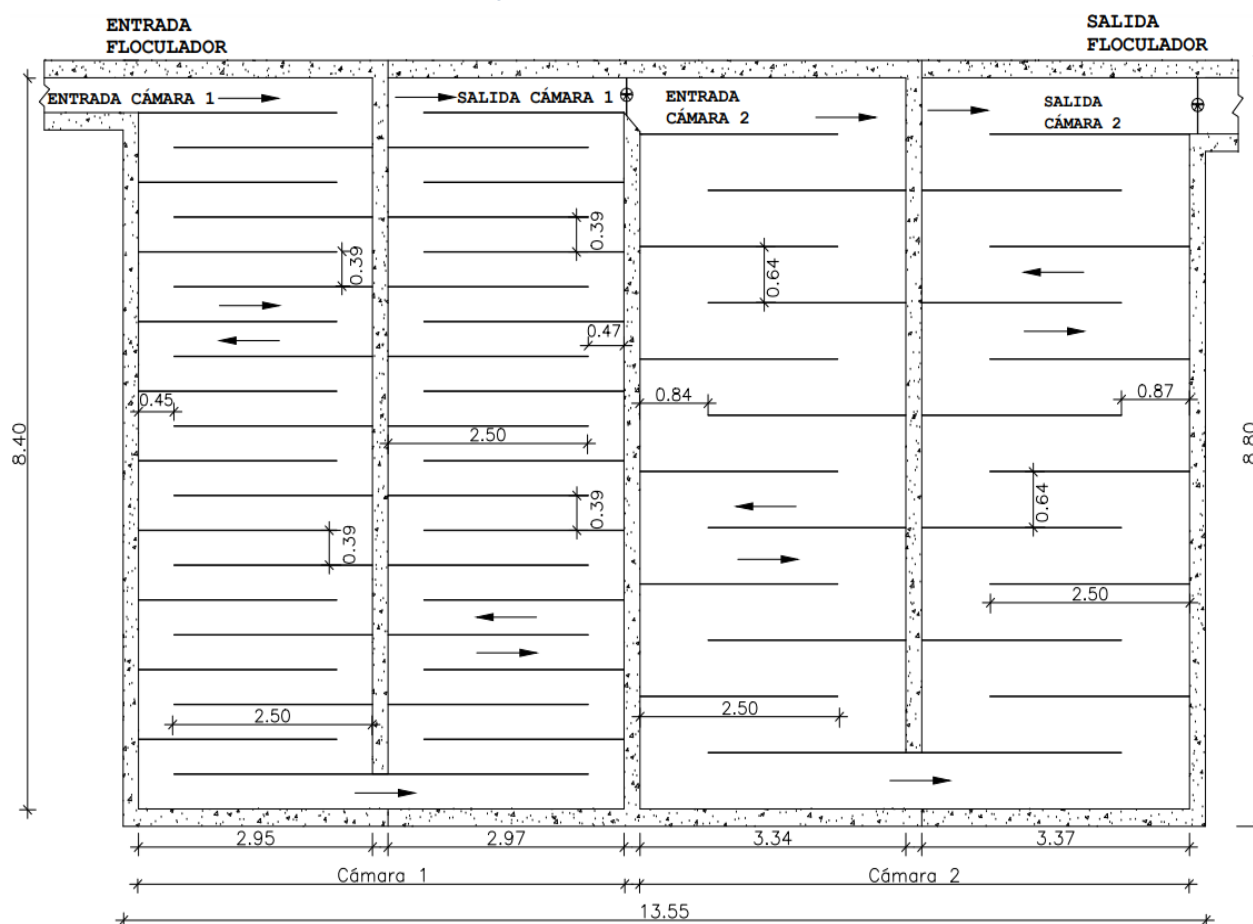


Figura 9. Esquema en planta de la unidad de floculación.

- **Potencial de Producción**

Para determinar el potencial de producción de los floculadores, se siguió el procedimiento propuesto por CEPIS (2005), el cual plantea, como recomendación, un tiempo base de 20 minutos de floculación; se determinó el volumen máximo de la unidad en función de su

geometría y por último se determinó el caudal máximo que puede producir, según la ecuación 12.

$$\text{Potencial de producción, caudal } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] = \text{Volumen/tiempo de retención} \quad (12)$$

### 3.3.2 Parámetros hidráulicos de la unidad de floculación

#### Tiempo de retención

Corresponde al tiempo de permanencia del agua dentro del floculador, de forma teórica, se calculó como la relación entre el volumen de la unidad y el caudal de ingreso, además en floculadores hidráulicos de flujo horizontal se puede aproximar como la relación entre la longitud de recorrido del flujo y la velocidad media de flujo; se expresa mediante la ecuación 13.

$$t_o = \frac{V}{Q} = \frac{L_r}{v} \quad (13)$$

donde:

$t_o$ : tiempo de retención teórico [s]

$V$ : volumen de la unidad [ $\text{m}^3$ ]

$Q$ : caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L_r$ : longitud de recorrido [m]

$v$ : velocidad media de flujo [m/s]

En la práctica, es inusual que el tiempo de retención real sea igual al tiempo teórico calculado debido a las condiciones geométricas, constructivas y del flujo mismo que ocurre en un floculador, la existencia de zonas muertas, cortocircuitos y flujo no ideal ocasiona que no ocurra el comportamiento hidráulico esperado (CEPIS, 2004a). Un método usado para medir el tiempo de retención real y que se empleó en el presente trabajo, es el uso de trazadores.

- Ensayo de trazadores

Los resultados del ensayo de trazadores permiten graficar la curva de tendencia de concentración del trazador y mediante su análisis es posible inferir la eficiencia hidráulica de un reactor al relacionar parámetros de la curva con condiciones del flujo. La Figura 10 muestra una curva típica de tendencia de concentración de trazador. (CEPIS, 2005).

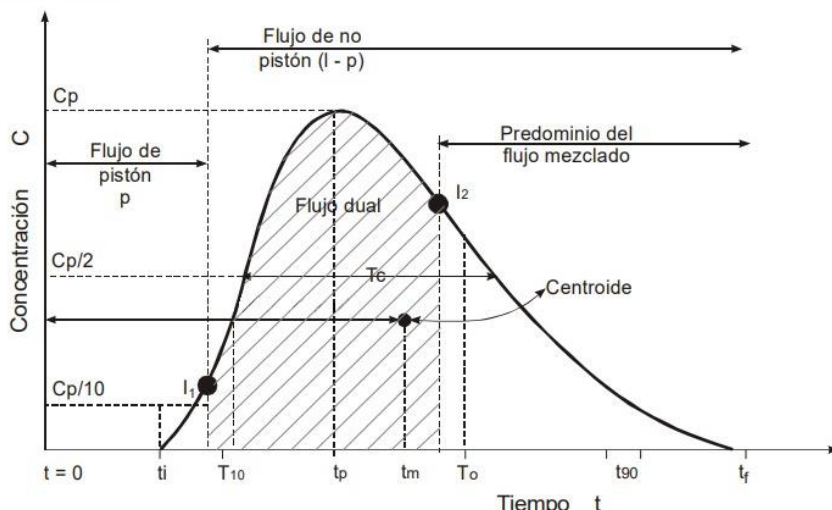


Figura 10. Curva de concentración de trazador vs tiempo.  
Fuente: (CEPIS, 2005)

En la tabla 8 se destacan los parámetros de la curva.

Parámetro	Descripción
$t_i$	Tiempo inicial, tiempo que tarda el trazador en aparecer en el efluente
$t_{10}$	tiempo correspondiente al paso del 10% del trazador
$t_p$	tiempo modal, tiempo en que se registra la máxima concentración en el efluente.
$t_m$	Tiempo mediano, tiempo correspondiente al paso del 50% del trazador
$t_o$	tiempo de retención teórico
$t_{90}$	tiempo correspondiente al paso del 90% del trazador.
$t_f$	tiempo correspondiente al paso del 100% del trazador.
$t_c$	tiempo en que la concentración es mayor a $C_p/2$ .
$t_b$	tiempo en que la concentración es mayor a $C_p/10$ .
$C_o$	concentración inicial.
$C_p$	concentración máxima.

Tabla 8. Parámetros de la curva de concentración de trazador.  
Fuente: (CEPIS, 2005)

El tiempo de retención real corresponde al tiempo modal ( $t_p$ ), tiempo en que se registra máxima concentración.

Los criterios de análisis del comportamiento hidráulico a partir de los parámetros de la curva de concentración de trazador según CEPIS (2005) son los listados en la tabla 9:



Criterio	Interpretación
ti/to	ti/to = 1, flujo de pistón
	ti/to = 0, flujo de mezclado
	ti/to < 0.3, existencia de cortocircuito hidráulico
tm/to	tm/to < 1, existencia de cortocircuitos
	tm/to > 1, existencia de zonas muertas
tp/to	tp/to = 1, existe únicamente flujo de pistón
	tp/to = 0, flujo mezclado
	tp/to ≈ 1 y ti/to > 0.5, predominio flujo de pistón
tc/to	tc/to = 0.7, corrientes de inercia o turbulencia (flujo mezclado)
tb/to	tb/to = 2.3 corrientes de inercia o turbulencia (flujo mezclado)
e = $\frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	e = 0, flujo de pistón
	e > 2.3, flujo mezclado ideal

Tabla 9. Criterios de comportamiento hidráulico en un reactor.  
Fuente: (CEPIS, 2005)

Por último, el índice de Morril es un parámetro que cuantifica la dispersión de la concentración de trazador, está dado por la ecuación 14.

$$\text{Índice de morril} = \frac{t_{90}}{t_{10}} \tag{14}$$

Un valor de 1 corresponde a flujo puramente pistón, mientras más se aleja de la unidad el flujo es de tipo mezclado (CEPIS, 2005).

- Modelo matemático de Wolf-Resnick

El modelo matemático propuesto por Wolf y Resnick (1963) permite evaluar el comportamiento hidráulico de un reactor, cuantificando los porcentajes de flujo de pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m) (Enderica & Delgado, 2022).

El modelo está expresado mediante la función F(t) la cual describe la concentración acumulativa de una sustancia trazadora en el efluente del reactor de análisis (Arroyave et al.,). F(t) está expresado por la ecuación 15:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{(1 - P) \times (1 - M)} \times \left( \frac{t}{t_o} - P \times (1 - M) \right) \right] \tag{15}$$

donde:

P: porcentaje de flujo de pistón;

M: porcentaje de flujo de mezcla completa

t: tiempo [min]

t<sub>o</sub>: tiempo de retención teórico [min]

Un método simplificado de aplicar el modelo, es graficar la curva  $1-F(t)$  vs la relación  $t/t_0$ , en escalas semilogarítmicas y trazar una recta tangente donde la curva comienza a volverse vertical o tener una tendencia lineal, como se muestra en la Figura 11 (Mañara, 2015).

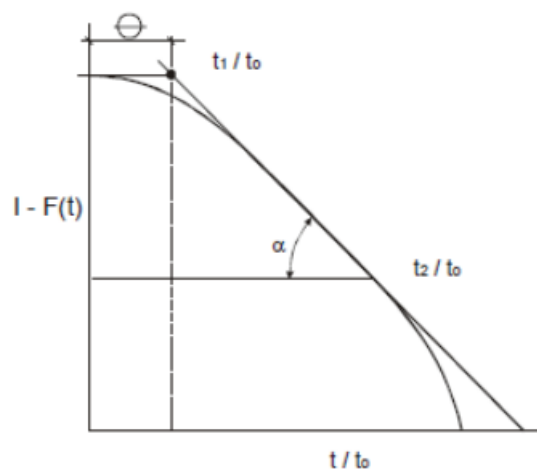


Figura 11. Curva  $1-F(t)$ , Modelo simplificado de Wolf – Resnick.  
Fuente: (Mañara, 2015)

De la curva se destacan los siguientes parámetros:

$\theta$ : corresponde al valor en las ordenadas de la intersección de la recta con el valor  $1-F(t) = 1$ ;

$\frac{t_1}{t_0}$ : igual al valor de  $\theta$ ;  $\frac{t_2}{t_0}$ : valor de la ordenada en la recta tangente cuando  $1-F(t) = 0.1$ .

Además, la pendiente de la recta trazada,  $\tan(\alpha)$ , se determina mediante la ecuación 16.

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_1}{t_0} - \frac{t_2}{t_0}} \quad (16)$$

Mediante estos parámetros se calculó los porcentajes de tipos de flujo presentes en la unidad, aplicando las ecuaciones 17, 18 y 19.

Porcentaje de flujo de pistón:

$$P = \frac{\theta \times \tan(\alpha)}{0.435 + \theta \times \tan(\alpha)} \times 100\% \quad (17)$$

Porcentaje de flujo de mezcla completa:

$$M = 100 - P \quad (18)$$

Volumen de espacios muertos:

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \quad (19)$$

### Gradiente de velocidad

El gradiente de velocidad hidráulico está relacionado con la potencia disipada por unidad de volumen del floculador, se determina mediante la ecuación 10 (CEPIS,2005).

De forma experimental el gradiente de velocidad se determinó midiendo la pérdida de energía (H) al nivelar la superficie del agua entre inicio y final de la cámara; el tiempo de retención (T) se obtuvo mediante ensayo de trazadores; por último, se midió la temperatura del agua y se determinó la viscosidad cinemática según el anexo A.

La pérdida de energía total H se expresa como la suma de las pérdidas por fricción y por cambios de dirección, ecuación 20.

$$H = h_1 + h_2 \quad (20)$$

De forma teórica, la pérdida de energía por fricción se determinó mediante la ecuación de Manning (21):

$$h_1 = S \times L_r = \frac{(n \times v)^2}{Rh^{\frac{4}{3}}} \times L_r \quad (21)$$

donde:

h<sub>1</sub>: pérdida de energía por fricción [m]

S: pendiente de la línea de energía

L<sub>r</sub>: longitud de recorrido [m]

n: coeficiente de rugosidad de Manning

v: velocidad media del flujo [m/s]

Rh: radio hidráulico[m]

Por otro lado, la pérdida de energía debido a los cambios de dirección se calculó mediante la ecuación de pérdidas, ecuación 22.

$$h_2 = N \times K \frac{v^2}{2 \times g} \quad (22)$$

donde:

N: número de tabiques

$h_2$ : pérdida de energía por cambios de dirección [m]

K: coeficiente de pérdida de energía

v: velocidad media del flujo [m/s]

g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

El coeficiente K puede tomar valores entre 2 y 4, siendo 3 el valor más común utilizado en diseños (Arboleda, 2000), además, en floculadores hidráulicos de tabiques, las velocidades de flujo se encuentran en el rango de 0.1 y 0.6 m/s; con las velocidades mayores (0.3 – 0.6 m/s) en las cámaras iniciales y las velocidades menores (0.1 – 0.2 m/s) en las cámaras finales para asegurar un gradiente decreciente en la unidad (Pacheco, 2022).

- Gradiente de velocidad en oficios

En el floculador se han ubicado dos compuertas, una al final de cada cámara, la primera permanece abierta completamente, mientras que la segunda presenta una abertura de 35 cm y ancho de 65 cm, por tanto, se verificó el gradiente de velocidad a través de esta compuerta mediante la ecuación 23 (Pacheco, 2022), dicho gradiente de velocidad debe ser menor al de la cámara, de esta forma se evita la rotura de los flóculos formados al pasar por estos elementos.

$$G = \sqrt{\frac{f \times v_o^3}{8 \times R_h \times \nu}} \quad (23)$$

donde:

G: gradiente de velocidad [s<sup>-1</sup>]

f: factor de ecuación [0.03 – 0.04]

$v_o$ : velocidad de flujo a través del orificio [m/s]

$R_h$ : radio hidráulico [m]

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua [m<sup>2</sup>/s]

### 3.3.3 Variación del caudal en la unidad de floculación

Se estimó teóricamente las características hidráulicas del floculador en otros escenarios de caudal que han sido registrados en la planta de tratamiento, los caudales analizados son los presentados en la tabla 5.

- Método de evaluación

Se planteó estimar el n de Manning del sistema, para ello se midió el caudal mediante el método de flotadores y la sección transversal (calado y ancho) del flujo en un momento dado

en cada cámara del floculador. Estas mediciones se utilizaron para calcular el n de Manning considerando que el calado de agua presente en el floculador corresponde al calado normal, se aplica la ecuación 24.

$$n = \frac{A \times Rh^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{S}}{Q} \quad (24)$$

donde:

n: coeficiente de rugosidad de Manning

A: área transversal de flujo [m<sup>2</sup>]

Rh: radio hidráulico [m]

Q: caudal medido [m<sup>3</sup>/s]

S: pendiente de la línea de energía

La pendiente de la línea de energía, se aproximó mediante la ecuación 25.

$$S = \frac{h_f}{L_r} \quad (25)$$

donde:

S: pendiente de la línea de energía

h<sub>f</sub>: diferencia de cota del fondo de la cámara (inicio - final) [m]

L<sub>r</sub>: longitud de recorrido del flujo [m]

Mediante el n obtenido, se calculó el calado normal para los caudales planteados mediante la ecuación de Manning, se determinó la velocidad promedio como la relación entre caudal / área y se determinó el tiempo de retención teórico mediante la ecuación 13. Finalmente, mediante las ecuaciones 21 y 22 se determinó las pérdidas h<sub>1</sub> y h<sub>2</sub> con el objetivo de determinar el gradiente de velocidad hidráulico mediante la ecuación 10; se utilizó la viscosidad cinemática correspondiente a una temperatura promedio del agua de 10 °C, el material de los tabiques es fibra de vidrio, se utilizó un n de Manning de 0.013 (Villón, s.f.).

### 3.4 Evaluación complementaria

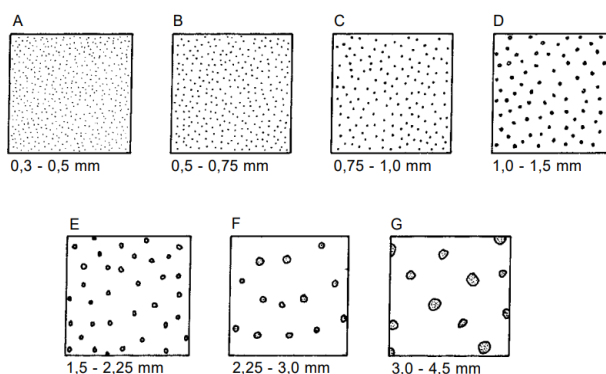
- Interconexión mezcla rápida – floculador

Se recomienda que el proceso de floculación debe iniciarse inmediatamente después de la coagulación del agua, en algunos casos la unidad de mezcla rápida y la unidad de floculación están unidas por canales o tuberías, los gradientes de velocidad en estas estructuras de interconexión no deben exceder de 100s<sup>-1</sup>, valores superiores son perjudiciales (CEPIS,

2005). En la PTAP de Nero las unidades están conectadas por un canal de 3.20 m de longitud en el cual se verificó que el valor de gradiente de velocidad se encuentra por debajo del límite recomendado.

- Ensayo en laboratorio

Para complementar la evaluación hidráulica se realizó ensayos de jarras en laboratorio, en estos se determinó visualmente la calidad del flóculo producido, usando de guía el comparador de tamaño del flóculo de la Water Research Association (Figura 12) y el índice de floculación de Willcomb (Tabla 10) (CEPIS, 2005).



Nota: tamaños mayores de flóculo indican una mejor calidad.

Figura 12. Comparador de tamaño de flóculo.

Fuente: (CEPIS,2005)

Número de índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado, pero no uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita totalmente, dejando el agua cristalina.

Tabla 10. Índice de floculación de Willcomb.

Fuente: (CEPIS,2005)

Los materiales de ensayo utilizados son los mismos que se implementan en la planta de tratamiento de Nero, los cuales son: sulfato de aluminio, como coagulante y polímero catiónico, como ayudante de floculación. Además, las condiciones de ensayo, como gradiente de velocidad y tiempos de floculación, son las mismas que ocurren en la planta de tratamiento.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Evaluación hidráulica de la unidad de mezcla rápida

#### 4.1.1 Análisis de la geometría de la unidad

El caudal actual de operación es de 70l/s y para este valor se midieron y calcularon los calados presentados en la Tabla 11.

Parámetro	Descripción	Valor
Q	Caudal medido [l/s]	70
$h_{0\text{-Medido}}$	Carga de agua sobre el vertedero, valor medido [cm]	22
$y_1$	Calado contraído al inicio del canal de mezcla rápida, valor medido [cm]	68
$y_2$	Calado conjugado al final del canal de mezcla rápida, valor medido [cm]	26
$h_{0\text{-Teórico}}$	Carga de agua sobre el vertedero, valor calculado con la ecuación 1 [cm]	24.60
$\Delta h_0$	Diferencia entre la carga medida y la carga calculada [cm]	2.60

Tabla 11. Calados medidos y calculados en el vertedero y canal de mezcla rápida.

La estructura se ha idealizado como un vertedero de cresta gruesa, pero su geometría tiene algunas características particulares como el alabeo a la entrada, la pendiente de la cresta y, la extensión de la cresta mediante unos troncos de madera, estas serían las causas de que la carga de agua medida y la calculada mediante la ecuación 1, presenten la diferencia que se muestra en la Tabla 11.

#### 4.1.2 Análisis del resalto hidráulico

El resalto hidráulico se clasifica de acuerdo al número de Froude en la sección contraída, para el caudal promedio actual de operación (70 l/s), se determinó a partir de las mediciones lo siguiente:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times y}} = \frac{\frac{Q}{b \times h_1}}{\sqrt{g \times y}} = 2.98$$

De acuerdo al número de Froude se tiene un resalto oscilante el cual es un resalto que produce ondas de periodo irregular que pueden recorrer varios km aguas abajo, no es recomendable este resalto y en el diseño de unidades de mezcla rápida debería de evitarse.

Para el caso de 70l/s no se forma ningún perfil de flujo gradualmente variado, el resalto se produce inmediatamente al inicio del canal de mezcla rápida. La longitud del resalto hidráulico se determinó de acuerdo a lo presentado en la sección 3.2.1 y los resultados se muestra en la Tabla 12.

- Tiempo de mezcla

Para calcular el tiempo se determinó primero la longitud del resalto hidráulico empleando los calados medidos de la Tabla 11 y las ecuaciones de Smetana, Woycieki, y la Figura 6 (USBR), a partir de la longitud del resalto se determina, mediante la ecuación 9, el tiempo de mezcla, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 12.

Autor	LR [m]	T [s]
Smetana	1.16	0.74
Woycieki	1.51	0.96
USBR	1.39	0.89

Tabla 12. Determinación de la longitud del resalto y tiempo de mezcla.

Para este tipo de unidad en el que el mecanismo de coagulación predominante es el de absorción-desestabilización el tiempo de mezcla determinado resulta adecuado ya que es menor a un segundo lo que permite que el coagulante se disperse de manera instantánea en toda la masa de agua antes de que la hidrólisis del agua se complete (CEPIS, 2005).

- Intensidad de mezcla

El gradiente de velocidad en la mezcla rápida se determinó empleando la ecuación 10. La pérdida de energía en el resalto hidráulico se determinó de acuerdo a la ecuación 9, obteniendo el siguiente valor:

$$\Delta E = H = 0.0975m$$

Se determinó los gradientes de velocidad presentados en la Tabla 13.

Autor	T [s]	G [ $s^{-1}$ ]
Smetana	0.74	1037
Woycieki	0.96	909
USBR	0.89	948

Nota: se emplea el valor de la viscosidad cinemática para 10 °C cuyo valor es 1.307E-06 m<sup>2</sup>/s.

Tabla 13. Gradiente de velocidad en mezcla rápida.

Los resultados obtenidos para el caudal actual de operación son adecuados, ya que tanto el gradiente de velocidad como el tiempo de mezcla se encuentra dentro del rango óptimo para el tipo de mezcla implementada, el tiempo es inferior a un segundo y el gradiente de velocidad es cercano a 1000 s<sup>-1</sup>. En las tres metodologías usadas para determinar la longitud del resalto hidráulico se obtienen resultados similares en el gradiente de velocidad y tiempo de mezcla, cabe señalar que los resultados obtenidos a partir de la curva de la USBR poseen una mayor precisión ya que se considera el tipo de resalto hidráulico.



### 4.1.3 Evaluación de la mezcla rápida en diferentes escenarios de caudal

Se evaluó de manera teórica para los caudales de 60 l/s y de 74 l/s por ser los caudales en época de estiaje y el caudal máximo registrado, respectivamente.

Como se explicó en la sección 3.2.2 para evaluar el funcionamiento de la unidad para los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s se calibró la ecuación de carga sobre el vertedero comparando la carga medida con la calculada, esta diferencia que se determinó en la Tabla 11 se resta de la ecuación teórica, así se obtiene la nueva expresión para la carga estimada sobre el vertedero:

$$Q = \frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times \mu \times b \times h^{\frac{3}{2}} \times \epsilon_1 - \Delta h_0 \tag{26}$$

En la Figura 13 se muestran los resultados de la calibración para caudales desde 30l/s hasta 74l/s.

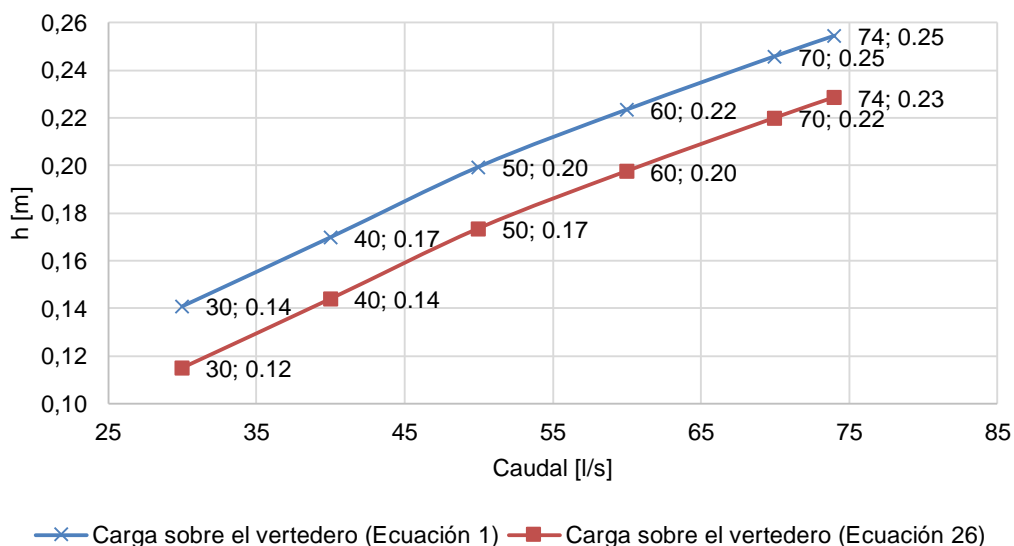


Figura 13. Calibración del vertedero de cresta gruesa de la unidad de mezcla rápida.

Para determinar el calado al inicio del canal de mezcla rápida primero se determinó el valor de K (Coeficiente de pérdida) realizando conservación de la energía entre las secciones donde se mide la carga de agua sobre el vertedero y el calado contraído, usando la ecuación 11.2. Como se observa en la Tabla 14 el valor de K que satisface la ecuación anterior es K = 0.2, valor de coeficiente de pérdida que se usó para los cálculos posteriores.

Parámetro	Descripción	Valor
$h_0$	Carga de agua medida sobre el vertedero [cm]	22
$\Delta Z$	Desnivel entre la cresta y el canal de mezcla rápida [cm]	23.40
$v_0$	Velocidad de aproximación [m/s]	0
$y_1$	Calado contraído al inicio del canal de mezcla rápida [cm]	7
Q	Caudal [l/s]	70
B	Ancho del vertedero [cm]	40
K	Coefficiente de pérdida	0.2

Nota: El coeficiente de pérdida K se estimó de acuerdo a la pérdida observada para el caudal de 70 l/s.

Tabla 14. Determinación del coeficiente de pérdida K entre el vertedero y el canal de mezcla rápida.

Mediante el coeficiente de pérdida K estimado y la altura de agua sobre el vertedero (ecuación 26), se determinó, empleando la ecuación de la conservación de la energía, el calado al inicio del canal de mezcla rápida, obteniendo los resultados de la Tabla 15.

Parámetro	Descripción	Q, caudal [l/s]	
		60	74
$h_0$	Carga sobre el vertedero [cm]	20	23
$v_1$	Velocidad en la sección contraída [m/s]	2.46	2.52
$y_1$	Calado contraído [cm]	6.10	7.30

Tabla 15. Calado contraído al inicio del canal de mezcla rápida en los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s.

De acuerdo a la metodología explicada en la sección 3.2.5 se determinó el calado aguas abajo del canal de mezcla rápida y su respectivo calado contraído requerido generando una longitud de perfil M3. Estos resultados se visualizan en la Tabla 16.

Parámetro	Descripción	Caudal (l/s)	
		60	74
$y_1$	Calado contraído inicial [cm]	6.10	7.30
$y_c$	Calado crítico [cm]	13.20	15.20
$y_3$	Calado sobre la grada [cm]	13.20	20
$y_2$	Calado antes de la grada [cm]	24.40	28.70
$h_1$	Calado contraído requerido [cm]	6.20	6.80
$L_p$	Longitud del perfil M3 [cm]	7.10	0

Tabla 16. Análisis de la ubicación del resalto hidráulico para los escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s.

Para el caso del 74 l/s la longitud del perfil es cero porque el resalto se ve forzado aguas arriba y se ahoga ya que el calado contraído que se produce por conservación de la energía, es menor que el calado contraído requerido para que su conjugado empate aguas abajo.

Se determinó la longitud del resalto hidráulico y el tiempo de retención, finalmente se calculó el gradiente de velocidad. Los resultados de la evaluación para los caudales analizados (60l/s y 74l/s) se muestran en la Tabla 17.

Autor	Q = 60 l/s			Q = 70 l/s			Q = 74 l/s		
	L[m]	T[s]	G[s <sup>-1</sup> ]	L[m]	T[s]	G[s <sup>-1</sup> ]	L[m]	T[s]	G[s <sup>-1</sup> ]
Smetana	1.09	0.72	1067	1.16	0.74	1037	1.46	2.04	731
Woycieki	1.42	0.93	935	1.51	0.96	909	1.70	2.65	642
USBR	1.30	0.85	980	1.39	0.89	949	1.56	2.42	672

Nota: En la tabla además de los escenarios de caudales nuevos, también se agregó el caudal actual (70l/s), para poder comparar los resultados.

Tabla 17. Tiempos de retención y gradiente de velocidad en unidad de mezcla rápida.

Los resultados de la Tabla 17 se visualizan en la Figura 14, se puede ver como los gradientes de velocidad disminuyen abruptamente cuando el caudal es mayor a 70l/s debido a que el resalto hidráulico se ahoga y disipa menor energía.

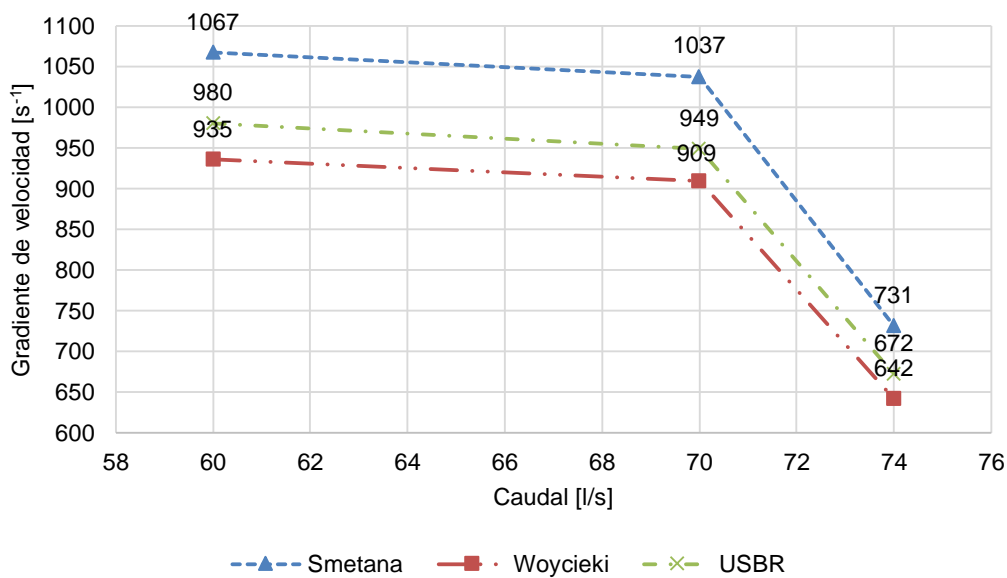


Figura 14. Gradiente de velocidad en la mezcla rápida para escenarios de caudal de 60l/s y 74l/s y caudal actual 70l/s.

Los gradientes de velocidad son mayores cuando se emplea la ecuación de Smetana, pero esta ecuación debería de aplicarse únicamente para resalto hidráulico estable, en ninguno de los tres caudales analizados se tiene este tipo de resalto, por lo que los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Smetana no serían los más precisos.

Los gradientes de velocidad en los que se determinó el tiempo de mezcla a partir de la longitud calculada con el método de la USBR son los más precisos, puesto que este método contempla el efecto del tipo de resalto producido. Por otro lado, los gradientes de velocidad determinados a partir de la longitud de resalto de Woycieki se interpretan como el valor mínimo que ocurre en la unidad de mezcla rápida

## 4.2 Evaluación hidráulica de la unidad de floculación

### 4.2.1 Análisis de la geometría de la unidad y capacidad de operación

De las mediciones in situ se halló que la separación entre tabiques no presenta uniformidad, esta variación ocasiona que no se dé una mezcla suave y homogénea perjudicando la formación del flóculo.

La abertura entre el tabique y el muro no cumple con el espaciamiento recomendado de 1.5 veces el espaciamiento entre tabiques (Arboleda, 2000) como se observa en la Tabla 18, lo cual genera altas velocidades en los giros y por tanto altas pérdidas de energía en esos puntos, siendo esto desfavorable para la formación del flóculo.

Parámetro	Cámara 1		cámara 2	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2
Espaciamiento entre tabiques [m]	0.35 – 0.45		0.60 – 0.69	
Espaciamiento tabique – muro real [m]	0.45	0.47	0.84	0.87
Espaciamiento tabique – muro recomendado [m]	0.59	0.59	0.96	0.96

Nota: en la cámara 1 la separación entre tabiques promedio es de 0.39 m y en la cámara 2 de 0.64m.

Tabla 18. Espaciamiento entre tabiques y tabique – muro.

- Potencial de producción

El tiempo base de floculación recomendado es 20 minutos. El volumen se determinó como el producto del calado máximo de agua, la longitud de recorrido y la separación promedio entre tabiques en cada cámara. El calado máximo se consideró 1 metro, con esto se deja un bordo libre de 0.15 m por seguridad, en la Tabla 19 se muestra los resultados del cálculo.

Parámetro	Cámara 1	Cámara 2
Volumen [m <sup>3</sup> ]	48.71	56.15
Total [m <sup>3</sup> ]	104.86	

Tabla 19. Volumen máximo en el floculador.

El caudal máximo de producción calculado se exhibe en la Tabla 20.

Parámetro	Valor
Tiempo de retención [min]	20
Volumen máximo [m <sup>3</sup> ]	104.86
Potencial de producción [l/s]	87

Tabla 20. Potencial de producción del floculador.

El caudal máximo que puede producir el floculador en base a su geometría y un tiempo de retención de 20 minutos es de 87 l/s; en la actualidad, el máximo registro en la planta ha sido 74 l/s por lo que su producción podría aumentar hasta 13 l/s más.

## 4.2.2 Tiempo de retención

Se realizó 3 ensayos de trazadores, los dos primeros en un mismo día y el tercero en otro día posterior, en cada ensayo se estimó el tiempo de retención teórico y el tiempo de retención real.

El tiempo de retención teórico ( $t_o$ ) se determinó midiendo el caudal; mediante el método de flotadores y midiendo el volumen de cada cámara a partir del calado presente y la geometría, obteniéndose los resultados de la Tabla 21.

Parámetro	Medición 1		Medición 2		Medición 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	cámara 2
Q, caudal [l/s]	68	68	69.7	69.7	69	69
V, volumen [m <sup>3</sup> ]	34.1	36.64	35.19	38.18	33.97	35.8
$t_o$ , tiempo de retención teórico [min]	8.36	8.98	8.42	9.13	8.21	8.65
$t_o$ total [min]	17.34		17.55		16.86	

Nota: En los anexos B, C y D, se adjunta la medición del caudal mediante el método de flotador.

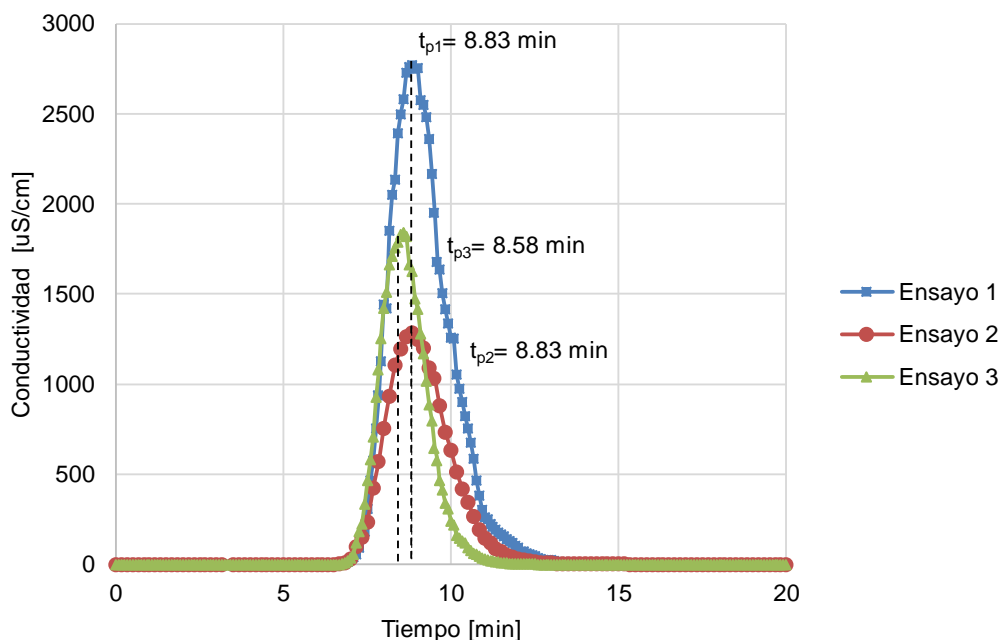
Tabla 21. Tiempos teóricos de floculación.

En las tres mediciones realizadas existe una ligera variación entre los tiempos teóricos estimados, esto debido a que el caudal no es constante además que los estados de operación en que se encontraba la planta eran diferentes, en el ensayo 1 la operación era normal; en el ensayo 2 que fue realizado horas después del ensayo 1, los filtros de la planta se encontraban colmatados, esto reduce su tasa de filtración y ocasiona un aumento de volumen aguas atrás; y en el ensayo 3 los filtros se encontraban en proceso de lavado, lo que ocasiona un flujo más rápido y tiempos más cortos.

- Distribución del trazador y patrones hidrodinámicos

Para determinar el tiempo de retención real se utilizó el ensayo de trazadores, aplicando una mezcla de agua y cloruro de sodio (sal de mesa) de alta concentración, mediante sondas en la salida se registró la conductividad en intervalos pequeños y contantes de tiempo (5s).

Las curvas de concentración de trazador obtenidas, correspondientes a conductividad vs tiempo, se muestran en la Figura 15 para la cámara 1 y Figura 16 para la cámara 2.



Nota: El ensayo 1 presenta una conductividad pico notablemente más alta debido a que se usó mayor cantidad de sal, ya que se evaluaron el floculador y sedimentador al mismo tiempo.

Figura 15. Curva de concentración del trazador en la cámara 1.

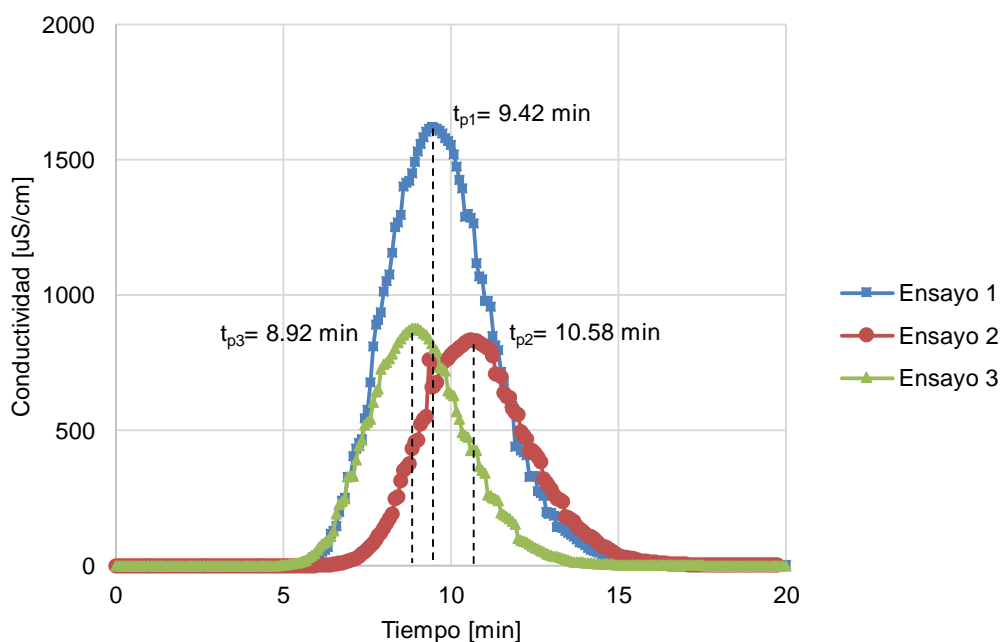


Figura 16. Curva de concentración del trazador en la cámara 2.

En la cámara 1, las curvas de concentración presentan un comportamiento semejante, con valores pico de concentración muy similares entre sí, mientras que en la cámara 2 existe una mayor diferencia, lo que se deduce en una mayor influencia de las condiciones aguas abajo;

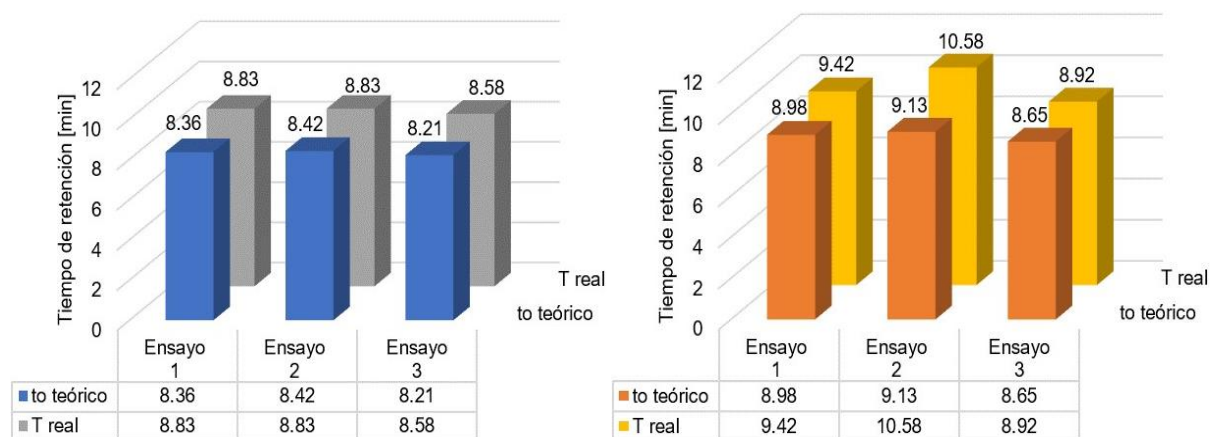
Por otro lado, las curvas en todos los ensayos muestran un comportamiento típico de un reactor que combina en mayor porcentaje flujo de pistón y menor flujo mezclado.

Los parámetros de la curva de concentración, detallados en la Tabla 8, sirven para analizar el comportamiento hidráulico del floculador con criterios hidrodinámicos que relacionan dichos parámetros con el tiempo de retención teórico. Los parámetros de la curva de trazador obtenidos se detallan en la Tabla 22.

Parámetro	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2
ti [min]	6.33	4.75	6.17	5.33	6.33	4.33
t <sub>10</sub> [min]	8.07	7.76	7.88	8.84	7.75	7.28
tp [min]	8.83	9.42	8.83	10.58	8.58	8.92
tm [min]	8.99	9.59	8.92	10.68	8.54	8.98
to [min]	8.36	8.98	8.42	9.13	8.21	8.65
t <sub>90</sub> [min]	10.29	11.77	10.29	12.91	9.52	10.98
tf [min]	17	21.75	21	19.75	20.33	20.5
tc [min]	1.88	3.68	2.09	3.67	1.57	3.32
tb [min]	3.5	6.52	3.87	6.73	2.89	5.98
Co	34.3	33	42	34	23.8	23.8
Cp	2772.7	1622	1289	835	1842.4	878.7

Tabla 22. Parámetros de la curva de concentración de trazador.

Los tiempos en que se registra la máxima concentración (tp) corresponde al tiempo real de retención (T) de cada cámara. La Figura 17 compara los tiempos de retención teóricos y reales.



(a) Cámara 1 (b) Cámara 2  
Figura 17. Comparación entre tiempos de retención teóricos y reales.

El tiempo de retención real resulta mayor para todos los ensayos en las dos cámaras, siendo del orden de un 5% mayor, porcentaje bajo que representa un buen comportamiento

hidráulico de la unidad a excepción del ensayo 2 en la cámara 2, que presenta un aumento del 16%, debido a la influencia de los filtros cuando se encuentran colmatados.

Promediando los tres ensayos, la cámara 1 posee un tiempo de retención real de 8.75 min y la cámara 2 de 9.64 min, resultando un total de 18.39 min, lo cual representa un 92% del tiempo de diseño (20 min), esto se considera un buen comportamiento pues en la práctica los reactores difícilmente presentan tiempos exactamente iguales a los proyectados.

mediante los parámetros determinados de la curva de concentración de trazador se determinan los siguientes criterios expuestos en la Tabla 23.

Criterio	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	cámara 2
ti/to	0.76	0.53	0.73	0.58	0.77	0.50
tm/to	1.10	1.09	1.09	1.17	1.06	1.06
tp/to	1.06	1.05	1.05	1.16	1.05	1.03
tc/to	0.23	0.41	0.25	0.4	0.19	0.38
tb/to	0.42	0.73	0.46	0.74	0.35	0.69
e	0.68	0.85	1.13	0.43	1.16	0.81
Índice de Morril	1.27	1.52	1.31	1.46	1.23	1.51

Tabla 23. Criterios del comportamiento hidráulico del floculador.

El criterio ti/to tiene un valor promedio de 0.76 en la cámara 1 y 0.53 en la cámara 2, lo que indica inexistencia de cortocircuitos. En todos los ensayos tm/to > 1 especialmente en el ensayo 2 de la cámara 2, lo que indica existencia de zonas muertas. La relación tp/to es mayor a 1 en todos los ensayos, a la vez que ti/to > 0.5, por tanto, según CEPIS (2005), el floculador tiene un predominio de flujo de pistón. Según la interpretación de los criterios de la Tabla 9, los criterios tc/to y tb/to refuerzan la existencia de un predominio de flujo de pistón. La excentricidad (e) de la curva indica existencia de solo flujo de pistón cuando es igual a cero y flujo mezclado cuando es mayor a 2.3, en los resultados obtenidos la excentricidad se encuentra entre 0.43 y 1.16 indicando un predominio de flujo de pistón.

Por último, el índice de Morril obtenido se encuentra entre 1.27 y 1.51, por lo que su comportamiento es mayoritariamente flujo de pistón.

De los criterios analizados se puede decir, finalmente, que el floculador posee un comportamiento predominante de flujo de pistón y en menor medida flujo mezclado. Desde el punto de vista hidráulico, este comportamiento resulta adecuado y esperado en un floculador hidráulico de tabiques.



- Modelo matemático de Wolf & Resnick

Se elaboró las curvas 1-F(t) vs t/to en escalas semilogarítmicas y mediante el método simplificado se determinó los parámetros  $\theta$ , t2/to y tan( $\alpha$ ), posteriormente se determinó los porcentajes de flujo de pistón, flujo mezclado y zonas muertas según lo expuesto en la sección 3.3.2. En los anexos EEE a JJJ se adjunta las curvas 1-F(t) desarrolladas.

Las curvas 1-F(t) presentan una fuerte pendiente, lo cual es típico de unidades con un predominio de flujo de pistón.

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Wolf & Resnick en los tres ensayos realizados en cada cámara se detallan en la Tabla 24.

Parámetro	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	cámara 2
$\theta$	0.99	0.97	0.98	1.05	0.97	0.95
t2/to	1.27	1.34	1.25	1.45	1.2	1.28
tan ( $\alpha$ )	3.57	2.7	3.77	2.5	4.35	3.03
Flujo de pistón, P [%]	89.04	85.77	89.52	85.78	90.6	86.87
Flujo mezclado, M [%]	10.96	14.23	10.48	14.22	9.04	13.13
zonas muertas	-0.11	-0.13	-0.1	-0.23	-0.13	-0.09

Tabla 24. Resultados del modelo de Wolf & Resnick.

Se evidencia que la cámara 1 se encuentra operando en promedio con un porcentaje de flujo de pistón del 90 % y 10 % de flujo mezclado, mientras, que la cámara 2 posee un flujo de pistón promedio de 86% y 14% de flujo mezclado, en ambas cámaras el modelo dio un resultado negativo en el valor de zonas muertas, diversos autores como Aguirre (2015) y García et al. (2023), en trabajos similares, concluyen que un valor negativo de zonas muertas en el modelo de Wolf & Resnick indica la inexistencia de las mismas; por tanto, la posible existencia de zonas muertas que indicaba el criterio  $t_m/t_o > 1$  en realidad se debe a la presencia de flujo mezclado lo que origina el aumento del tiempo real de retención frente al tiempo teórico.

En general los resultados del modelo concuerdan con el análisis de la curva de concentración de trazador, en donde el floculador presenta un buen comportamiento hidráulico con predominio de flujo de pistón e inexistencia de cortocircuitos y zonas muerta.

#### 4.2.3 Gradiente de velocidad

Para determinar el gradiente de velocidad se siguió la metodología descrita en la sección 3.3.3. Las pérdidas de energía medida se presentan en la tabla 25.

Parámetro	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	cámara 2
H, Pérdida total [m]	0.31	0.10	0.30	0.10	0.32	0.12

Tabla 25. Pérdidas de energía medidas en cada cámara de floculación.

Se observa que, en las dos cámaras de floculación, el calado no permanece constante, este disminuye entre el inicio y el final de cada cámara, lo cual indica mayores pérdidas de energía que las previstas en el diseño y por tanto los gradientes reales resultarían mayores a los contemplados en diseño.

La medición de velocidades y caudales, presentada en los anexos B, C y D muestra que el floculador posee una velocidad promedio de 0.24 m/s en la cámara 1 y 0.16 m/s en la cámara 2, lo que origina un mayor gradiente en la primera cámara y uno menor en la segunda; cumpliendo las recomendaciones de diseño en que se debe disponer de 2 o más cámaras con gradientes (velocidades) decrecientes entre ellas, para obtener un proceso eficiente.

Se determinó el gradiente de velocidad presente en cada uno de los tres ensayos realizados en cada cámara, mediante la ecuación 10. En la Nota: se midió una temperatura de 11°C, se usó su correspondiente viscosidad cinemática; los tiempos de retención corresponden a los medidos mediante trazadores.

Tabla 26 se detallan los resultados.

Parámetro	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	cámara 2
G, gradiente de velocidad [ $s^{-1}$ ]	67.48	36.01	65.84	34.85	69.00	40.71

Nota: se midió una temperatura de 11°C, se usó su correspondiente viscosidad cinemática; los tiempos de retención corresponden a los medidos mediante trazadores.

Tabla 26. Gradientes de velocidad medidos en cada cámara de floculación.

En promedio la cámara 1 tiene un gradiente de  $67.44 s^{-1}$  y la cámara 2 de  $37.20 s^{-1}$ . Arboleda (2000) menciona que los gradientes de velocidad en floculadores hidráulicos de tabiques no deben ubicarse fuera del rango  $100 - 10 s^{-1}$  y más recomendable entre  $60$  y  $20 s^{-1}$ , según esto, los gradientes de las cámaras de floculación de la planta se encuentran dentro del rango habitual para el tipo de unidad, sin embargo, estos son notablemente superiores a los gradientes de diseño ( $45$  y  $28 s^{-1}$ ), suponiendo un aumento del 50% en la cámara 1 y 33% en la cámara 2, lo cual ocasiona una floculación menos eficiente.

En la

Tabla 27 se presentan los resultados de gradiente de velocidad en la compuerta de salida del floculador para los caudales analizados, los valores obtenidos son menores a los gradientes

de velocidad del floculador, por tanto, esta abertura de compuerta no perjudica a los flóculos formados.

Q, caudal medido [l/s]	v, velocidad a través de la compuerta [m/s]	Go, en compuerta [s <sup>-1</sup> ]
68	0.30	30.0
69.7	0.31	31.1
69	0.30	30.6

Nota: en la ecuación 23 se utilizó  $f = 0.04$  por conservación.

Tabla 27. Gradiente de velocidad a través de la compuerta de salida del floculador (compuerta 2).

#### 4.2.4 Evaluación del floculador en diferentes escenarios de caudal

Para estimar el  $n$  de Manning del sistema se realizaron dos mediciones de caudal en días diferentes, mediante el método de flotador; se registraron las medidas de calado de agua y ancho del canal y mediante el uso de las ecuaciones 24 y 25 se determinó el  $n$  promedio del sistema, como se muestra en la Tabla 28. En los anexos K y L se adjunta la medición del caudal.

Parámetro	Medición 1		Medición 2	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2
Q, caudal medido [l/s]	73	73	76	76
B, ancho de canal [m]	0.42	0.66	0.42	0.66
Y, calado de agua [m]	0.71	0.66	0.73	0.66
A, área de flujo [m <sup>2</sup> ]	0.30	0.44	0.31	0.43
Rh, radio hidráulico [m]	0.16	0.22	0.16	0.22
S, pendiente de la línea de energía	2.03E-03	6.85E-04	2.03E-03	6.85E-04
$n$	0.056	0.057	0.054	0.054
$n$ promedio	0.0554			

Nota: se promedió el  $n$  de las dos cámaras al ser similares entre sí, este promedio se usará en los cálculos posteriores. En la segunda medición se registró un caudal de 76 l/s lo cual es superior al máximo registro de 74 l/s en la planta, lo que indica registros inexactos.

Tabla 28. Determinación del  $n$  de Manning del sistema (Floculador).

En promedio el floculador opera con un  $n$  de 0.0554, se hace énfasis que en este coeficiente corresponde a un  $n$  equivalente del sistema mas no del material, es por ello que se obtiene un valor bastante alto.

Mediante el  $n$  obtenido se determinó, para los caudales de 60, 70 y 74 l/s, las características hidráulicas que se muestran en la Tabla 29.

Cámara de floculación	n	B promedio [m]	Y [m]	v [m/s]	T [min]	T total [min]
Caudal = 60 l/s						
Cámara 1	0.0554	0.39	0.66	0.23	8.99	17.88
Cámara 2	0.0554	0.64	0.57	0.16	8.89	
Caudal = 70 l/s						
Cámara 1	0.0554	0.39	0.76	0.24	8.81	17.45
Cámara 2	0.0554	0.64	0.65	0.17	8.64	
Caudal = 74 l/s						
Cámara 1	0.0554	0.39	0.80	0.24	8.76	17.31
Cámara 2	0.0554	0.64	0.68	0.17	8.55	

Tabla 29. Características hidráulicas del floculador para 60, 70 y 74 l/s.

Las velocidades de flujo aumentan y los tiempos de retención disminuyen a medida que el caudal aumenta, aunque este efecto es pequeño como se observa en la Figura 18 donde el tiempo total de retención disminuye 3.2% cuando aumenta el caudal de 60 a 74 l/s.

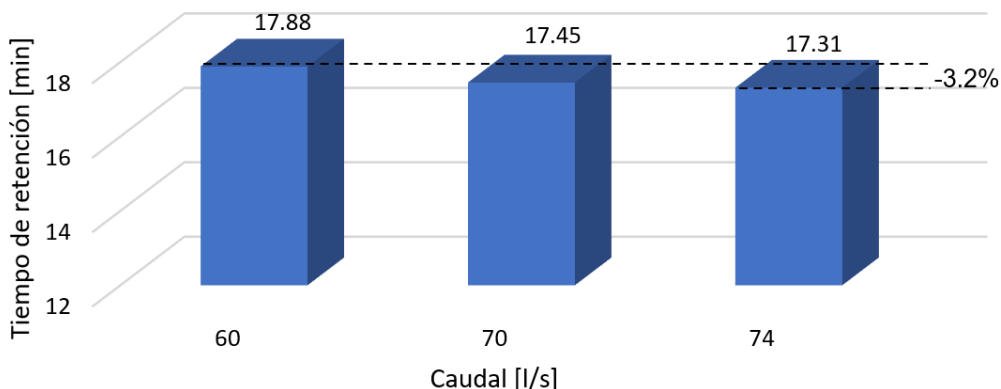


Figura 18. Comparación de tiempos de retención para 60, 70 y 74 l/s.

Mediante las velocidades calculadas, se determinó las pérdidas de energía por fricción ( $h_1$ ) y por cambios de dirección ( $h_2$ ), finalmente se calculó los gradientes de velocidad hidráulico, obteniéndose los resultados de la Tabla 30.

Cámara de floculación	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	H total [m]	G [ $s^{-1}$ ]
Caudal = 60 l/s				
Cámara 1	0.014	0.29	0.31	66.00
Cámara 2	0.003	0.09	0.09	36.40
Caudal = 70 l/s				
Cámara 1	0.014	0.31	0.32	67.90
Cámara 2	0.003	0.09	0.10	37.90
Caudal = 74 l/s				
Cámara 1	0.014	0.31	0.32	68.50
Cámara 2	0.003	0.10	0.10	38.50

Nota: para el cálculo de  $h_2$  se utilizó un coeficiente promedio de pérdidas  $K = 2.75$ , estimado en el anexo M.

Tabla 30. Gradientes de velocidad para 60, 70 y 74 l/s.

Al igual que el tiempo de retención, los gradientes de velocidad presentan una ligera variación cuando aumenta el caudal, se presenta un aumento aproximado del 3.85% en la cámara 1 y del 5.88% en la cámara 2, esto con una variación de 14 l/s del caudal (60 – 74 l/s), como se observa en la Figura 19.

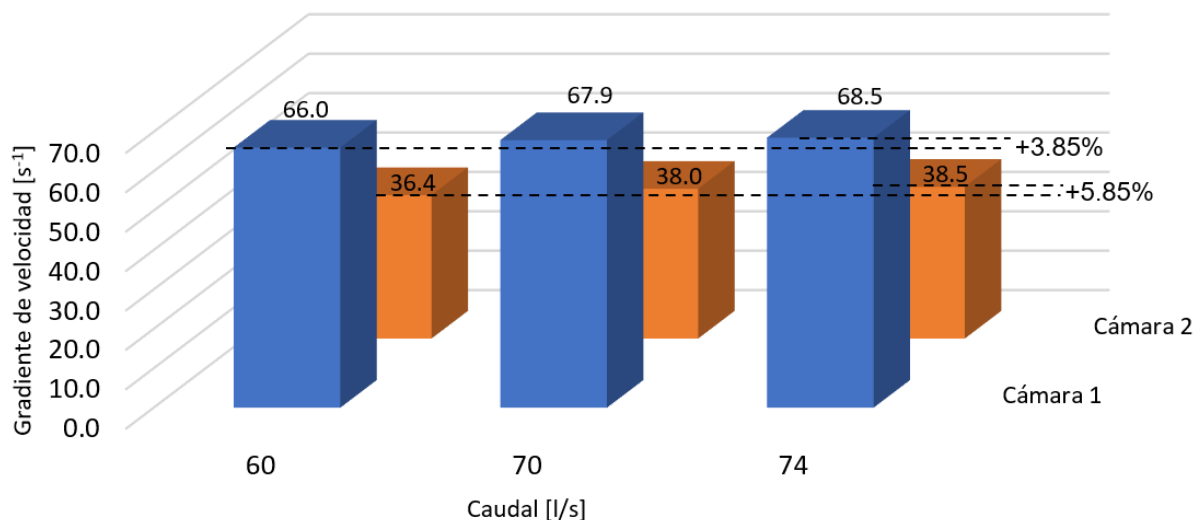


Figura 19. Comparación de gradientes de velocidad para 60, 70 y 74 l/s.

En el rango de caudales analizados las variaciones de tiempo de retención y gradiente de velocidad son pequeñas lo que indica que la unidad se adapta bien a los cambios de caudal. Los gradientes velocidad obtenidos se encuentran dentro de los rangos recomendados, sin embargo, estos son superiores a los gradientes de diseño del floculador, por tanto, se recomienda bajar de magnitud estos gradientes de velocidad mediante un rediseño de la unidad y lograr un proceso más eficaz.

Por último, se determinó los gradientes de velocidad a través de la compuerta de salida del floculador en su abertura habitual de 35 cm. Los resultados presentados en la Tabla 31 demuestran que los gradientes de velocidad generados a través de la compuerta son menores que los presentes en la floculación por tanto no se perjudican los flóculos formados.

Q, caudal [l/s]	v, velocidad a través de la compuerta [m/s]	Go, en compuerta [s <sup>-1</sup> ]
60	0.26	24.84
70	0.31	31.30
74	0.33	34.02

Tabla 31. Gradientes de velocidad en compuerta 2 para 60, 70 y 74 l/s.

### 4.3 Resultados de la evaluación complementaria

#### 4.3.1 Canal de interconexión mezcla rápida – floculador

Entre el canal de mezcla rápida y el floculador existe un canal de 3.20 m de longitud que une estas dos unidades, de acuerdo a las mediciones realizadas se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 32.

Descripción	Valor
H, Pérdida de energía [m]	0.01
$\nu$ , viscosidad cinemática [m]	1.307E-06
t, Tiempo [s]	13.30
G, Gradiente de velocidad [ $s^{-1}$ ]	73.81

Nota: El tiempo de retención se determinó mediante el ensayo de trazadores.

Tabla 32. Gradiente de velocidad en la interconexión mezcla rápida – floculador.

De acuerdo a CEPIS (2005), el valor de gradiente de velocidad debe ser menor que  $100s^{-1}$ , por lo tanto, si se está cumpliendo con este criterio.

#### 4.3.2 Ensayo de jarras

Se preparó las mismas dosis de sulfato de aluminio y polímero que aplicaron en la planta para la muestra tomada, se procedió a ensayar bajo los mismos tiempos de floculación y gradientes de velocidad presentes en la planta. La ficha técnica del ensayo se adjunta en el anexo N.

Durante el tiempo de floculación, la formación de flóculos apenas progresaba y tras finalizar el proceso se determinó que su tamaño varía entre 0.75 – 1.0 mm, un tamaño pequeño que pertenece a un tipo C en la escala comparadora de la Water Research Association, presentada en la figura 12; y se dio una calificación de cuatro sobre diez en la escala de Willcomb (tabla 10), pues el flóculo se encuentra disperso en el agua y en su mayoría no sedimenta, permaneciendo adherido a las paredes de las jarras y flotando en la masa y superficie del agua, como se observa en la Figura 20. Finalmente, se discutió que el flóculo producido no es bueno, pues este no adquiere un tamaño y densidad adecuada que permita una eficiente sedimentación.

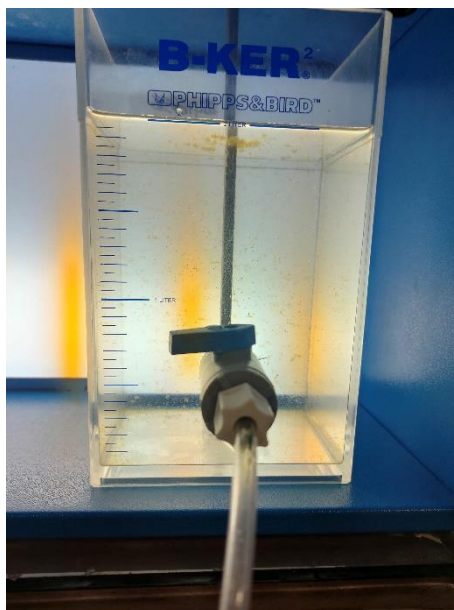


Figura 20. Evaluación en laboratorio, Ensayo de jarras.

Además, se realizó el ensayo de sedimentación con flotadores, como parte del trabajo de titulación, simultaneo al presente, que evalúa los sedimentadores de la planta de Nero, en el cual se determinó que el proceso de sedimentación tiene una eficiencia de apenas el 36%, resultado que concuerda con el ineficiente proceso de floculación observado y la sobrecarga en los filtros que ocurre en la planta.

Por otro lado, al realizar la mezcla del sulfato de aluminio, este no se disolvió completamente en el agua lo cual ocasiona que la dosis inyectada no sea igual a la calculada y necesaria para tratar el agua. El agua presenta condiciones de bajas turbiedades y colores relativamente altos, naturaleza que resulta más complicada de tratar, por lo que el uso de dosis precisas y productos de calidad es importante.

#### **4.4 Propuesta de rediseño**

##### **4.4.1 Unidad de mezcla rápida**

- Elección de la alternativa de rediseño

Se busca mejorar los valores del gradiente de velocidad y tiempo de mezcla de acuerdo a las recomendaciones bibliográficas.

El mezclador deberá seguir siendo de tipo hidráulico, por ser práctico y no requerir servicios de operación y mantenimiento como los mezcladores mecánicos.

La alternativa más óptima es seguir usando un vertedero de cresta gruesa, pero cambiar las dimensiones y cotas tanto del vertedero como del canal de mezcla rápida para que funcione adecuadamente con nuevos calados proyectados ante un aumento de caudal.

- Análisis de la propuesta de rediseño

De los resultados de la evaluación de la unidad de mezcla rápida, se determinó que funciona correctamente, de acuerdo a los criterios de tiempo de mezcla y gradiente de velocidad para caudales de hasta 70 l/s, por esto, lo más conveniente sería seguir empleando el vertedero, pero ajustar las medidas y cotas de la unidad de mezcla rápida para un nuevo caudal proyectado de 85l/s, que corresponde a la capacidad máxima del floculador.

La unidad de mezcla rápida se rediseña incrementando la cota del vertedero de cresta gruesa en 15 cm por encima del nivel actual, también se acorta la longitud de la cresta a 40 cm, la cota del canal de mezcla rápida también se incrementa en 10 cm, y la grada de control tiene una altura de 7.5 cm, dimensiones que se detallan en el plano adjunto. Estas medidas fueron obtenidas mediante tanteo, considerando los calados del floculador, con el objetivo que el resalto hidráulico se desarrolle de manera completa en el canal de mezcla rápida sin sufrir ahogamiento o desplazamiento excesivo. Las modificaciones nombradas se enlistan en la Tabla 33.

Parámetro	Descripción	Valor
$w'$	Profundidad desde el tanque de entrada [m]	1.47
$\Delta w'$	Incremento de cota en Vertedero [m]	0.15
$e$	Longitud de la cresta del vertedero [m]	0.40
$\Delta H_{V-c}$	Desnivel entre cresta y canal de mezcla rápida [m]	0.28
$H_G$	Altura de grada de control [cm]	7.50
$L_p$	Longitud de canal de mezcla [m]	3.03

Tabla 33. Modificaciones propuestas para la unidad de mezcla rápida.

Se determinó la carga de agua sobre el vertedero mediante la ecuación 1 y se obtuvo los resultados de la Tabla 34. El vertedero propuesto no presenta alabeo a la entrada, pendiente en la cresta, ni objetos al final del mismo por lo que la ecuación 1 representará mejor el comportamiento del mismo y se podrá determinar el caudal de entrada a partir de la carga de agua medida sobre el vertedero.

Parámetro	Descripción	Caudal (l/s)	
		70	85
$h$	Carga de agua sobre el vertedero [m]	0.24	0.27
$\mu$	Coeficiente de descarga	0.62	0.62
$\epsilon_1$	Coeficiente de reducción vertedero de cresta gruesa	0.81	0.83
$\frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times \mu \times \epsilon_1$	Coeficiente de vertedero	1.49	1.52

Tabla 34. Carga de agua sobre el vertedero rediseñado.



Para determinar los tiempos de mezcla y gradientes de velocidad para las nuevas condiciones se usó la metodología descrita en la sección 3.2.2, con lo que se obtienen los resultados de la Tabla 35.

Parámetro	Descripción	Caudal (l/s)	
		70	85
$y_1$	Calado contraído inicial [cm]	6.40	7.60
$y_c$	Calado crítico [cm]	14.60	16.60
$y_3$	Calado sobre la grada [cm]	14.60	20.70
$y_2$	Calado antes de la grada [cm]	27.30	31.20
$h_1$	Calado contraído requerido [cm]	6.70	7.60
$Fr_1$	Numero de Froude en $h_1$	3.21	3.23
$L_p$	Longitud del perfil M3 [cm]	29.80	0.70
LR Smetana	Longitud de resalto hidráulico [m]	1.24	1.42
LR Woycieki	Longitud de resalto hidráulico [m]	1.60	1.84
LR USBR	Longitud de resalto hidráulico [m]	1.44	1.64

Tabla 35. Análisis de la ubicación y longitud del resalto hidráulico para el rediseño de la unidad de mezcla rápida.

El tiempo de mezcla se determinó usando la metodología explicada en la sección 3.2.1 y los resultados se muestran en la Figura 21.

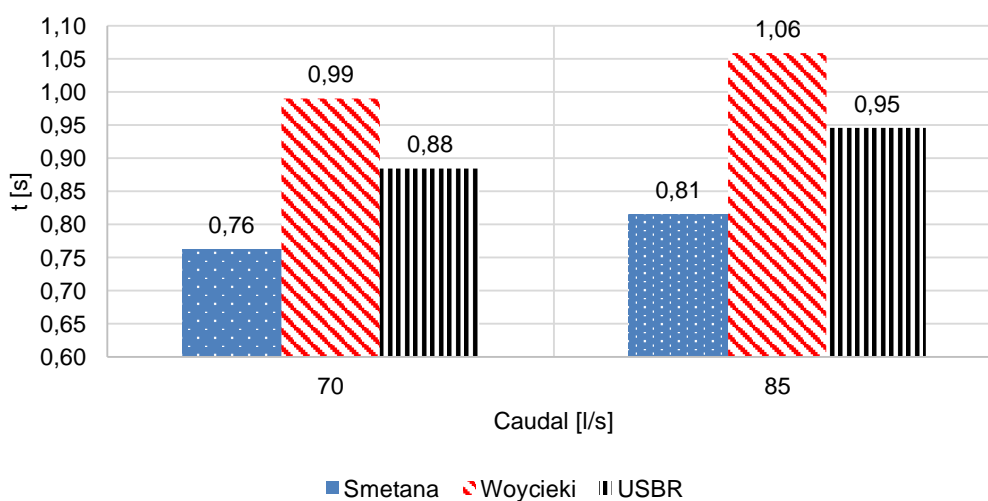


Figura 21. Tiempo de mezcla en la unidad de mezcla rápida rediseñada.

Se obtienen tiempos de mezcla adecuados para coagulación por adsorción-desestabilización. En este mecanismo de coagulación el coagulante debe dispersarse tan rápido como sea posible, en tiempos inferiores a 1 segundo (Romero, 1999).

El tiempo de mezcla máximo que se calculó es apenas mayor a 1 segundo, esto debido a que con la ecuación de Woycieki se obtienen las mayores longitudes de resalto hidráulico y en consecuencia los mayores tiempos de mezcla.

Empleando los tiempos de mezcla de la figura 21, se determinó los gradientes de velocidad, para el caudal actual y el caudal proyectado, los resultados se muestran en la Figura 22.

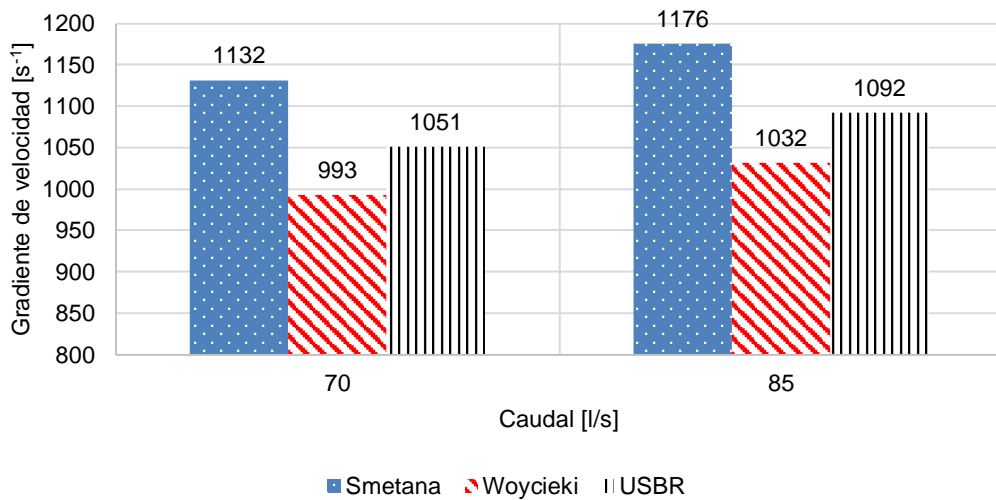


Figura 22. Gradiente de velocidad en la unidad de mezcla rediseñada.

El gradiente de velocidad determinado para el caudal de 70  $l/s$  y 85  $l/s$ , en todos los casos resulta ser el óptimo para este tipo de unidad, ya que es de aproximadamente  $1.000 s^{-1}$ .

#### 4.4.2 Unidad de floculación

- Elección de la alternativa de rediseño

En base a los resultados de la evaluación hidráulica del floculador, se ha determinado que los gradientes de velocidad son notablemente más altos a los proyectados en el diseño original, por tanto, como propuesta de rediseño, se propone disminuir el valor de dichos gradientes de velocidad aprovechando la infraestructura existente.

No resulta factible implementar un cambio a un floculador hidráulico de flujo vertical pues este requiere una alta profundidad de niveles de agua (entre 3-4 m) y se requeriría excavaciones significativas, encareciendo mucho la propuesta de mejora; los floculadores de tipo Alabama y helicoidal son sensibles a la variación de caudal y esto no es controlado en la PTAP de Nero, por otro lado, los floculadores mecánicos requieren de personal calificado para su operación y mantenimiento, además que los equipos y repuestos se adquieren por importación (CEPIS, 2004a). Estas alternativas mencionadas suponen un costo muy elevado frente al beneficio que se busca y considerando que se trata de una planta pequeña – mediana, perteneciente a una comunidad rural, lo ideal es aprovechar la infraestructura ya implementada.

- Análisis de la propuesta de rediseño

Mediante tanteo se buscó reducir el número de tabiques donde se logre un aumento de su separación y por ende una disminución de la velocidad y gradiente de velocidad a la vez que la pérdida de energía calculada coincida con el desnivel de fondo construido, de esta forma el calado se mantiene constante, dando una mezcla suave y homogénea al agua; y asegurando el gradiente de velocidad calculado.

Considerando que el floculador posee una capacidad de producción de hasta 87 l/s, la propuesta de rediseño se realizó para 85 l/s, además se verificó para el caudal de 70 l/s, correspondiente al caudal promedio actual.

Se propone disminuir 4 tabiques en cada cámara (2 por tramo), la separación entre tabiques y los consecuentes cambios en la configuración del floculador se muestran en la Tabla 36.

Descripción [unidad]	Cámara 1		Cámara 2	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2
Número de tabiques	18	18	10	10
Número de canales	19	19	11	11
Separación entre tabiques [m]	0.435	0.435	0.755	0.755
Separación tabique - muro [m]	0.65	0.65	1.13	1.13
Longitud de tabique [m]	2.30	2.32	2.21	2.24
Longitud de recorrido [m]	112.67		74.21	

Tabla 36. Cambios en la geometría del floculador como parte del rediseño propuesto.

Mediante estos cambios propuestos se determinó las características del flujo presentadas en la Tabla 37.

Parámetro	Q = 85 l/s		Q = 70 l/s	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2
Y [m]	0.89	0.89	0.73	0.73
A [m]	0.39	0.68	0.32	0.56
v [m/s]	0.22	0.13	0.22	0.13
T teórico [min]	8.55	9.82	8.56	9.83
T teórico total [min]	18.36		18.38	

Nota: El calado (Y) se calculó mediante iteración, de tal forma que las pérdidas calculadas coincidan con los desniveles construidos de 0.25 y 0.06 m en las cámaras de floculación 1 y 2 respectivamente, y se verificó que el calado para 70 l/s sea igual al presente en la actualidad.

Tabla 37. Características hidráulicas de la propuesta de rediseño.

Se logra disminuir la velocidad en las cámaras a 0.22 y 0.13 m/s respectivamente, los resultados de pérdida de energía y gradientes de velocidad calculados se detallan en la Tabla 38.

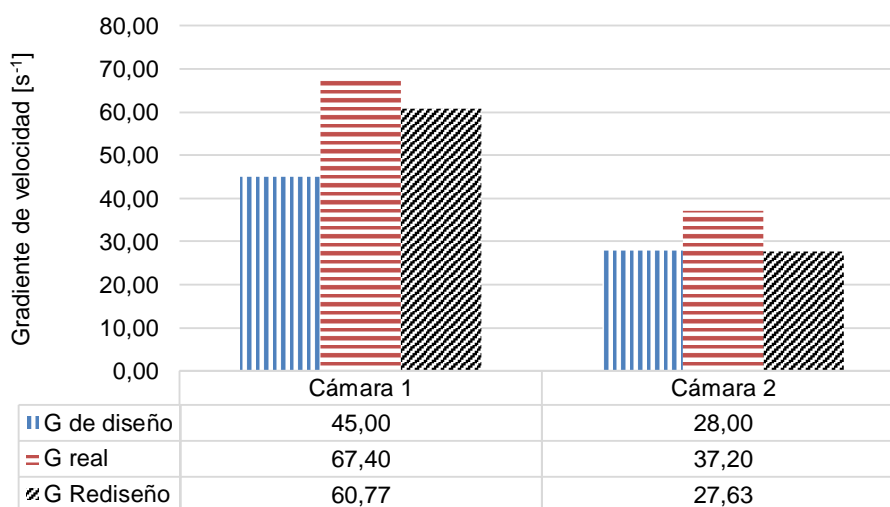
Parámetro	Q = 85 l/s		Q = 70 l/s	
	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 1	Cámara 2
h1 [cm]	1	0.20	1	0.20
h2 [cm]	24	5.80	24	5.80
H [cm]	25	6	25	6
G [s <sup>-1</sup> ]	60.81	27.65	60.77	27.63

Nota: Para el cálculo de h2, se mantuvo el K=2.75, debido a que no existe un cambio de materiales o forma de los tabiques.

Tabla 38. Gradientes de velocidad de la propuesta de rediseño.

Mediante este rediseño se disminuye el gradiente de velocidad a aproximadamente 60.8 y 27.6 s<sup>-1</sup> en la cámara 1 y 2 respectivamente.

En la Figura 23 se muestra una gráfica comparativa de los gradientes de velocidad de diseño, los reales y los de rediseño. En la cámara 1 el gradiente de velocidad real es 50% mayor al de diseño, con el rediseño se logra que este porcentaje disminuya a 35%; mientras que en la cámara 2 el gradiente real es 33% mayor al de diseño, mediante el rediseño se logra que estos gradientes, se igualen, generando las condiciones originales necesarias en la cámara 2 y mejorando las condiciones para la floculación.



Nota: los valores de gradiente de velocidad real corresponden al promedio de las 3 mediciones realizadas y el gradiente de velocidad de rediseño corresponde al valor calculado para el caudal de 70 l/s.

Figura 23. Comparación entre los gradientes de velocidad de diseño, reales y de rediseño.

Mediante la propuesta de rediseño se logra reducir los gradientes de velocidad, principalmente en la cámara 2, de esta forma se crea un mejor comportamiento hidráulico en beneficio de la formación de flóculos, además, considerando una dotación de 250 l/hab/día y 5 habitantes por usuario, el incremento de caudal a 85 l/s permite incrementar aproximadamente 1000 usuarios más.

Finalmente, se calculó la abertura necesaria de la compuerta de salida del floculador, mediante la ecuación 23, de modo que el gradiente de velocidad generado no sea mayor al del floculador ( $27s^{-1}$ ) para el caudal de 85 l/s, se determina que esta no debe ser menor a 45 cm, lo que implica que se debe incrementar la apertura actual 10 cm.

- Análisis complementario en laboratorio

Para complementar la propuesta de rediseño del floculador se ha realizado un ensayo de jarras con los nuevos valores de gradiente de velocidad y tiempo de floculación, además el ensayo fue realizado con un nuevo coagulante denominado policloruro de aluminio (PAC), del cual se ha evidenciado que presenta mayores eficiencias en el proceso de purificación del agua, presenta un mayor rango de pH de trabajo, es menos sensible a las temperatura bajas, menor aluminio residual y no necesita adición de ayudante de floculación (Polímero) (Torra, 1998).

El ensayo consistió en colocar diferentes dosis de PAC en varias jarras ya que no se conoce dosificación óptima y visualizar el flóculo producido en la mejor jarra. Tras finalizar el proceso de floculación, se produjo un mejor resultado de formación de flóculos, se determinó que corresponde a un tipo D según la escala de la Water Research Association y en la escala de Willcomb, se calificó 6 sobre 10, siendo un flóculo claramente formado, con tamaño relativamente grande y de lenta precipitación. En la Figura 24 se muestra el resultado. Ante los nuevos gradientes y químico se vio una mejora en la formación de flóculos.



Figura 24. Análisis complementario en laboratorio, Ensayo de jarras.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

En el presente trabajo de titulación se ha realizado la evaluación hidráulica de la unidad de mezcla rápida y unidad de floculación de la PTAP de Nero. Se ha identificado las características específicas de las unidades, y se ha realizado su evaluación hidráulica mediante mediciones *in situ* y la determinación de los parámetros fundamentales que influyen en los procesos realizados en cada unidad. El estudio se realizó con el caudal de operación actual (70 l/s) y además se determinó teóricamente el comportamiento en escenarios de caudales de 60 l/s, caudal con el que fue diseñada la planta y 74 l/s, caudal máximo registrado. Con base a los resultados de la evaluación se propuso una alternativa de rediseño para las unidades mencionadas, en un nuevo escenario de caudal de 85 l/s, con el objetivo de mejorar el componente hidráulico y la capacidad de las mismas.

Respecto a la caracterización y evaluación hidráulica de la unidad de mezcla rápida se ha establecido lo siguiente:

- La unidad de mezcla rápida está compuesta por un tanque de entrada, un vertedero de cresta gruesa, un canal de 2.46 m de longitud con pendiente de 0.16% en donde se produce la mezcla del coagulante mediante resalto hidráulico, al final del canal existe una grada de control cuya altura es de 6.5 cm, esta grada ayuda a contener el resalto en el canal de mezcla.
- Se determinó tiempos de mezcla entre 0.74 a 0.96 segundos para el caudal actual de operación produciéndose un proceso inicial de mezcla como se recomienda en la literatura especializada (<1s) cuando el mecanismo de coagulación es por adsorción-desestabilización.
- Los valores de gradiente de velocidad para el caudal actual de operación se encuentran en un rango entre  $909 \text{ s}^{-1}$  y  $1037 \text{ s}^{-1}$ , siendo muy cercanos el valor óptimo, que para este tipo de unidades es de  $1000 \text{ s}^{-1}$ .
- Tanto para el caudal actual de operación (70 l/s) como para los caudales de otros escenarios analizados, se estableció que el resalto hidráulico producido corresponde a un resalto hidráulico oscilante. Así mismo, la longitud del perfil M3 más la longitud del resalto hidráulico que se produce para el caudal de 60 l/s es menor que la longitud disponible para el proceso de mezcla rápida, por lo que se concluye que el resalto hidráulico dispondría de suficiente longitud para que sus efectos aguas abajo puedan ser controlados.
- En la evaluación para distintos escenarios de caudal se determinó que la unidad funciona adecuadamente para caudales de hasta 70 l/s, pues el gradiente de velocidad

está en el rango de  $1000 \text{ s}^{-1}$ , y el tiempo de retención para el proceso inicial de mezcla sería de aproximadamente un segundo. Para caudales superiores, específicamente para el caudal máximo analizado ( $74 \text{ l/s}$ ) el gradiente de velocidad disminuye a un valor cercano a  $700 \text{ s}^{-1}$ , valor que obedece a que el resalto hidráulico presentaría condiciones de sumergencia, dando como resultado una disminución de la intensidad de mezcla.

- En el canal de interconexión entre la unidad de mezcla rápida y la unidad de floculación se determinó un gradiente de velocidad de  $73 \text{ s}^{-1}$ , valor considerado como adecuado en comparación al límite máximo de  $100 \text{ s}^{-1}$  que se recomienda en la literatura técnica. Se concluye de esta manera que, la configuración geométrica y las condiciones de flujo presentes en la obra de interconexión entre la unidad de mezcla rápida y el floculador, presenta un desempeño aceptable y no afectaría los posteriores procesos de purificación de agua.

Con relación a la alternativa de rediseño propuesta para la mezcla rápida se destaca lo siguiente:

- Se incremento en 15 cm la cota del vertedero de cresta gruesa, y en 10 cm la cota del canal del canal de mezcla rápida, con el objetivo de que los niveles en la mezcla rápida y el floculador empaten adecuadamente, tanto para el caudal actual ( $70 \text{ l/s}$ ) como para el caudal proyectado ( $85 \text{ l/s}$ ), también se colocó una grada de control de 7.5cm de altura al final del canal de mezcla rápida que sirve para contener al resalto hidráulico en el canal. Además, se eliminó el alabeo en la zona de entrada y se niveló la cresta del vertedero, con el propósito que la ecuación de vertedero de cresta gruesa represente mejor el comportamiento del mismo y las cargas de agua reales resulten más próximas a las proyectadas.
- Las dimensiones propuestas para el rediseño de la unidad garantizarán un mejor desempeño hidráulico, tanto en relación con el gradiente de velocidad, así como, respecto al tiempo de mezcla para el caudal actual ( $70 \text{ l/s}$ ) y el proyectado ( $85 \text{ l/s}$ ).
- Al igual que en las condiciones actuales, el resalto hidráulico que se produciría en la unidad rediseñada también sería un resalto hidráulico oscilante. Cabe señalar que, para lograr un resalto hidráulico estable, se tendría que subir considerablemente la cota del vertedero (al menos 40 cm), caso que resulta inviable dada la altura limitada de los muros en los prefiltros (aguas atrás).

Respecto la caracterización y evaluación hidráulica del floculador se ha establecido lo siguiente:

- El floculador es tipo hidráulico con flujo horizontal, compuesto de dos cámaras con tabiques. En las dos cámaras los tiempos de retención de diseño fueron de 10 minutos y los gradientes de velocidad de diseño fueron de 45 y 28  $s^{-1}$  en la cámara 1 y 2 respectivamente.
- Para el estudio se ha realizado ensayos de trazadores, habiéndose determinado que el tiempo de retención actual promedio de la cámara 1 es 8.75 min y en la cámara 2 es 9.64 min, en total 18.39 min, siendo ligeramente menor a los 20 minutos proyectados en diseño, hecho que resulta esperado pues la capacidad de diseño de la unidad ha sido sobrepasada.
- El análisis de las curvas de concentración de trazador, permitió determinar que el floculador opera predominantemente con flujo de pistón y en menor medida flujo mezclado, hecho que concuerda con la aplicación del modelo de Wolf & Resnick, donde se cuantificó 90 % de flujo de pistón y 10 % de flujo mezclado en la cámara 1 y 86 % de flujo de pistón y 14 % de flujo mezclado en la cámara 2; en las dos cámaras, el modelo indicó inexistencia de zonas muertas; estos resultados son óptimos para un floculador de tipo hidráulico.
- Se midió velocidades de flujo promedio de 0.24 m/s y 0.16 m/s en la cámara 1 y 2 respectivamente, lo cual cumple la recomendación de diseño en que las velocidades deben decrecer en cada cámara subsiguiente del floculador, sin embargo, se midió gradientes de velocidad promedio de 67.44 y 37.19  $s^{-1}$  en la cámara 1 y 2 respectivamente, lo que supone un incremento del 50%, respecto al diseño original, en la cámara 1 y del 33 % en la cámara 2. Hecho que afecta el proceso de floculación.
- Se estimó, teóricamente, el comportamiento hidráulico del floculador para los caudales de 60, 70 y 74 l/s, determinando que el tiempo de retención disminuye un 3.2% cuando el caudal varía de 60 a 74 l/s, en este mismo escenario el gradiente de velocidad aumenta un 3.85% en la cámara 1 y 5.85% en la cámara 2. La variación de tiempo y gradiente no suponen valores importantes, por tanto, el floculador se adapta bien a la variación de caudal, algo característico en unidades hidráulicas.
- Se complementó la evaluación con ensayo de jarras en laboratorio, donde se observó una pobre formación de flóculos, los cuales presentan sedimentación muy lenta y se adhieren a la superficie de la jarra y agua, además el sulfato de aluminio utilizado no presenta solubilidad completa lo que incurre en dosificaciones incorrectas.

La evaluación del floculador permitió determinar que esta unidad presenta buen comportamiento hidráulico en términos de tiempos de retención y tipos de flujo, sin embargo, los gradientes de velocidad son notablemente más altos que los considerados



en diseño, de esto surge la propuesta de rediseño cuyo objetivo es disminuir los gradientes en cada cámara.

Respecto a la alternativa de rediseño propuesta del floculador se destaca lo siguiente:

- Se propone reducir los gradientes de velocidad, aumentando el espaciamiento entre tabiques y logrando reducir la velocidad de flujo; se disminuye 4 tabiques en cada cámara, lo que genera un nuevo espaciamiento de 43.5 y 75.5 cm en la cámara 1 y 2 respectivamente.
- Mediante este espaciamiento propuesto se reduce la velocidad de flujo a 0.22 y 0.13 m/s, los gradientes de velocidad promedio del diseño analizado son 60.8 y 27.6 s<sup>-1</sup>, esto representa una disminución del 15% en la cámara 1 y en la cámara 2 se iguala al gradiente de velocidad de diseño; lo que genera mejores condiciones para el proceso de floculación.
- Por último, se complementó el análisis de la propuesta mediante ensayo de jarras, proponiendo el uso de PAC, como coagulante, bajo estas nuevas condiciones se observó una mejor formación de flóculos, de mayor tamaño y en mayor cantidad, sin embargo, esto se ensayó bajo condiciones particulares de agua y es necesario complementar con estudios de determinación de dosis óptima y en variadas condiciones de agua para determinar la conveniencia del uso del nuevo químico,

## 5.2 Recomendaciones

Con base al trabajo realizado y las conclusiones establecidas, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda hacer la adición del coagulante justo al inicio del resalto hidráulico, actualmente este se adiciona varios centímetros antes, lo que ocasiona una mezcla ineficiente debido a la rápida hidrólisis del coagulante.
- Realizar una evaluación estructural de los tanques de prefiltro, para determinar si pueden resistir una ampliación en altura, de ser el caso se podría incrementar aún más la cota del vertedero de cresta rediseñado y conseguir un resalto estable en el canal de mezcla rápida.
- Se recomienda reparar o cambiar la válvula de aire ubicada previa al medidor de caudal para obtener mediciones correctas en el mismo, además como respaldo a este dispositivo, se recomienda emplear una regleta de medición en el vertedero de la unidad de mezcla rápida, esta regleta debe tener las relaciones calado – caudal de acuerdo al anexo O.

- Al momento de realizar el estudio, en la entrada del floculador, se ha dispuesto un dispositivo de madera para mitigar las ondas producidas por el resalto oscilante, sin embargo, se recomienda implementar una compuerta o un difusor que permita la mitigación de ondas y la regulación o uniformización de flujo para un rango amplio de calados.
- Al momento de cambiar o reconfigurar los tabiques, se recomienda espaciarlos uniformemente, ya que actualmente estos no tienen una separación constante, generando un flujo menos homogéneo y suave, contrario a lo que se exige en el proceso de floculación.
- La apertura de la compuerta al final del floculador debe ser de al menos 45 cm para no generar gradientes de velocidad altos en el flujo, al pasar por este elemento, y no perjudicar los flóculos formados.
- Finalmente, con respecto al coagulante, se recomienda hacer un control de calidad del sulfato de aluminio, químico implementado en la actualidad y de las dosificaciones implementadas. Así mismo, se recomienda hacer análisis y pruebas con nuevos coagulantes, como puede ser el Policloruro de Aluminio (PAC), para determinar el que genere un mayor beneficio/costo y se adapte mejor a las necesidades de tratamiento de la planta, y de manera complementaria, se recomienda realizar estudios que permitan identificar sustancias/componentes presentes en el agua cruda de ecosistemas de páramo que tienen efectos adversos sobre los procesos de coagulación.

## Referencias

- Aguirre, D. (2015). *Evaluación del floculador en la planta de tratamiento de agua potable "La Esperanza" que abastece a los cantones Machala, Pasaje y El Guabo, provincia de El Oro* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Machala, Machala.
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal*, Lima, 2021.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Arroyave, D., González, M. & Gallego, D. (s.f.). *Evaluación del comportamiento hidráulico un reactor USAB utilizado para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- AWWA (American Water Works Association). (1999). *Water quality and treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Ayros Carpio, E. S., & Coaquira Larico, A. D. (2015). *Optimización del proceso coagulación–floculación para la eliminación de arsénico en la planta de tratamiento de agua potable Hernán Perochena–Mollendo*. Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Londres: McGraw-Hill.
- Burgos, D. (2008). *Modelación del comportamiento hidráulico de unidades de tratamiento de agua y su validación en un proceso de sedimentación*. Universidad de Sonora. México.
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). (2004a). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría*. Lima, Perú.
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). (2004b). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada*. Lima, Perú.
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). (2005). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Lima, Perú.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de los canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Chulluncuy-Camacho, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Ingeniería industrial, (029), 153-170.
- Crittenden, J., Rhodes, R., Hand, D, Howe, K., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: Principles and design*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- Enderica, C. & Delgado, J. (2022). *Evaluación hidráulica de un floculador convencional en la planta potabilizadora de la junta administradora de agua potable regional Bayas-Azogues* (tesis de pregrado). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- French, R. H. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.
- García, F., Méndez, A., Trelles, A., Sánchez, E., Alfaro, E., Criollo, F., Tonon, M., Heredia, G. (2023) Experimental Evaluation of Tubular Flocculator Implemented in the Field for Drinking Water Supply: Application in the Developing World. *Water*, 15(5),833.
- Gonzalez Villamil, O. F. (2021). *Evaluación hidráulica de los procesos de mezcla rápida y floculación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocaima-Cundinamarca* (Doctoral dissertation). Universidad piloto de Colombia, Girardot.
- León, M. (2007). *Diagnóstico de los servicios de agua potable en el área de cobertura del sistema Nero y la factibilidad de mejoramiento y ampliación para atender la demanda hasta el año 2030: Memoria técnica*. Cuenca, Ecuador: Autor.
- Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las reacciones químicas*. México: Limusa Wiley.
- Mañara, E. (2015) *Determinación del tiempo de residencia de las aguas en los humedales artificiales de flujo vertical* (tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena de indias.
- Pacheco, E. (2022). *3 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN: Notas del Curso: Diseño Hidráulico de Pequeñas Plantas de Agua Potable – 2022*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Romero, J. (1999). *Potabilización del agua*. México: Alfaomega grupo editor.
- Souza, W. (2007). *Tratamento de Água*. Rio Grande: CEFET-RN editorial.
- Sotelo, G. (1994). *Hidráulica general*. México: Limusa.
- Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Torra, A., Valero F., Bisbal, J., Tous, J. (1998) Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales. *Tecnología Del Agua*. Barcelona.
- Uribe, E., (2019). *Determinación de la dosificación óptima en el tratamiento de agua potable en la empresa de servicios públicos CARIBABARE E.S.P basados en los diseños hidráulicos de las estructuras*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia.
- Villón, M. (s.f.). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Wolf, D. & Resnick, W. (1963). Residence time distribution in real systems. *I.E.C. Fundamentals*, 2(4).

## Anexos

### Anexo A. Viscosidad del agua (CEPIS, 2004b)

Temperatura (°C)	Sistema métrico				Inglés	
	Viscosidad dinámica (poises)	Viscosidad cinemática (Stokes)	Viscosidad dinámica (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	Viscosidad dinámica (lb = s/ft <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática (ft <sup>2</sup> /s)
0	1,787·10 <sup>-2</sup>	1,787·10 <sup>-2</sup>	1,787·10 <sup>-3</sup>	1,787·10 <sup>-6</sup>	3,73·10 <sup>-5</sup>	1,92·10 <sup>-5</sup>
1	1,728·10 <sup>-2</sup>	1,728·10 <sup>-2</sup>	1,728·10 <sup>-3</sup>	1,728·10 <sup>-6</sup>	3,61·10 <sup>-5</sup>	1,86·10 <sup>-5</sup>
2	1,671·10 <sup>-2</sup>	1,671·10 <sup>-2</sup>	1,671·10 <sup>-3</sup>	1,671·10 <sup>-6</sup>	3,49·10 <sup>-5</sup>	1,80·10 <sup>-5</sup>
3	1,618·10 <sup>-2</sup>	1,618·10 <sup>-2</sup>	1,618·10 <sup>-3</sup>	1,618·10 <sup>-6</sup>	3,38·10 <sup>-5</sup>	1,74·10 <sup>-5</sup>
4	1,567·10 <sup>-2</sup>	1,567·10 <sup>-2</sup>	1,567·10 <sup>-3</sup>	1,567·10 <sup>-6</sup>	3,27·10 <sup>-5</sup>	1,69·10 <sup>-5</sup>
5	1,519·10 <sup>-2</sup>	1,519·10 <sup>-2</sup>	1,519·10 <sup>-3</sup>	1,519·10 <sup>-6</sup>	3,17·10 <sup>-5</sup>	1,63·10 <sup>-5</sup>
6	1,472·10 <sup>-2</sup>	1,472·10 <sup>-2</sup>	1,472·10 <sup>-3</sup>	1,472·10 <sup>-6</sup>	3,08·10 <sup>-5</sup>	1,58·10 <sup>-5</sup>
7	1,428·10 <sup>-2</sup>	1,428·10 <sup>-2</sup>	1,428·10 <sup>-3</sup>	1,428·10 <sup>-6</sup>	2,98·10 <sup>-5</sup>	1,54·10 <sup>-5</sup>
8	1,386·10 <sup>-2</sup>	1,386·10 <sup>-2</sup>	1,386·10 <sup>-3</sup>	1,386·10 <sup>-6</sup>	2,90·10 <sup>-5</sup>	1,49·10 <sup>-5</sup>
9	1,346·10 <sup>-2</sup>	1,346·10 <sup>-2</sup>	1,346·10 <sup>-3</sup>	1,346·10 <sup>-6</sup>	2,81·10 <sup>-5</sup>	1,45·10 <sup>-5</sup>
10	1,307·10 <sup>-2</sup>	1,307·10 <sup>-2</sup>	1,307·10 <sup>-3</sup>	1,307·10 <sup>-6</sup>	2,73·10 <sup>-5</sup>	1,41·10 <sup>-5</sup>
11	1,271·10 <sup>-2</sup>	1,271·10 <sup>-2</sup>	1,271·10 <sup>-3</sup>	1,271·10 <sup>-6</sup>	2,66·10 <sup>-5</sup>	1,37·10 <sup>-5</sup>
12	1,235·10 <sup>-2</sup>	1,235·10 <sup>-2</sup>	1,235·10 <sup>-3</sup>	1,235·10 <sup>-6</sup>	2,58·10 <sup>-5</sup>	1,33·10 <sup>-5</sup>
13	1,202·10 <sup>-2</sup>	1,203·10 <sup>-2</sup>	1,202·10 <sup>-3</sup>	1,203·10 <sup>-6</sup>	2,51·10 <sup>-5</sup>	1,29·10 <sup>-5</sup>
14	1,169·10 <sup>-2</sup>	1,170·10 <sup>-2</sup>	1,169·10 <sup>-3</sup>	1,170·10 <sup>-6</sup>	2,44·10 <sup>-5</sup>	1,26·10 <sup>-5</sup>
15	1,139·10 <sup>-2</sup>	1,140·10 <sup>-2</sup>	1,139·10 <sup>-3</sup>	1,140·10 <sup>-6</sup>	2,38·10 <sup>-5</sup>	1,23·10 <sup>-5</sup>
16	1,109·10 <sup>-2</sup>	1,110·10 <sup>-2</sup>	1,109·10 <sup>-3</sup>	1,110·10 <sup>-6</sup>	2,32·10 <sup>-5</sup>	1,19·10 <sup>-5</sup>
17	1,081·10 <sup>-2</sup>	1,082·10 <sup>-2</sup>	1,081·10 <sup>-3</sup>	1,082·10 <sup>-6</sup>	2,26·10 <sup>-5</sup>	1,16·10 <sup>-5</sup>
18	1,053·10 <sup>-2</sup>	1,054·10 <sup>-2</sup>	1,053·10 <sup>-3</sup>	1,054·10 <sup>-6</sup>	2,20·10 <sup>-5</sup>	1,13·10 <sup>-5</sup>
19	1,027·10 <sup>-2</sup>	1,029·10 <sup>-2</sup>	1,027·10 <sup>-3</sup>	1,029·10 <sup>-6</sup>	2,14·10 <sup>-5</sup>	1,11·10 <sup>-5</sup>
20	1,002·10 <sup>-2</sup>	1,004·10 <sup>-2</sup>	1,002·10 <sup>-3</sup>	1,004·10 <sup>-6</sup>	2,09·10 <sup>-5</sup>	1,08·10 <sup>-5</sup>
21	0,9779·10 <sup>-2</sup>	0,9799·10 <sup>-2</sup>	0,978·10 <sup>-3</sup>	0,980·10 <sup>-6</sup>	2,04·10 <sup>-5</sup>	1,05·10 <sup>-5</sup>
22	0,9548·10 <sup>-2</sup>	0,9569·10 <sup>-2</sup>	0,954·10 <sup>-3</sup>	0,957·10 <sup>-6</sup>	1,99·10 <sup>-5</sup>	1,03·10 <sup>-5</sup>
23	0,9325·10 <sup>-2</sup>	0,9348·10 <sup>-2</sup>	0,932·10 <sup>-3</sup>	0,935·10 <sup>-6</sup>	1,95·10 <sup>-5</sup>	1,01·10 <sup>-5</sup>
24	0,9111·10 <sup>-2</sup>	0,9136·10 <sup>-2</sup>	0,911·10 <sup>-3</sup>	0,914·10 <sup>-6</sup>	1,90·10 <sup>-5</sup>	0,98·10 <sup>-5</sup>
25	0,8904·10 <sup>-2</sup>	0,8930·10 <sup>-2</sup>	0,890·10 <sup>-3</sup>	0,893·10 <sup>-6</sup>	1,86·10 <sup>-5</sup>	0,96·10 <sup>-5</sup>
26	0,8705·10 <sup>-2</sup>	0,8733·10 <sup>-2</sup>	0,870·10 <sup>-3</sup>	0,873·10 <sup>-6</sup>	1,82·10 <sup>-5</sup>	0,94·10 <sup>-5</sup>
27	0,8513·10 <sup>-2</sup>	0,8543·10 <sup>-2</sup>	0,851·10 <sup>-3</sup>	0,854·10 <sup>-6</sup>	1,78·10 <sup>-5</sup>	0,92·10 <sup>-5</sup>
28	0,8327·10 <sup>-2</sup>	0,8359·10 <sup>-2</sup>	0,833·10 <sup>-3</sup>	0,836·10 <sup>-6</sup>	1,74·10 <sup>-5</sup>	0,90·10 <sup>-5</sup>
29	0,8148·10 <sup>-2</sup>	0,8181·10 <sup>-2</sup>	0,815·10 <sup>-3</sup>	0,818·10 <sup>-6</sup>	1,70·10 <sup>-5</sup>	0,88·10 <sup>-5</sup>

## Anexo B. Medición de caudal al realizar ensayo de trazadores, ensayo 1.

Cámara 1				Cámara 2			
Longitud	2.03 m			Longitud	2.3 m		
Calado	0.7 m			Calado	0.655 m		
Ancho	0.425 m			Ancho	0.664 m		
Área	0.298 m <sup>2</sup>			Área	0.435 m <sup>2</sup>		
Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	9.40	0.22	0.064	1	15.21	0.15	0.066
2	8.88	0.23	0.068	2	15.73	0.15	0.064
3	9.13	0.22	0.066	3	13.99	0.16	0.072
4	8.65	0.23	0.070	4	14.58	0.16	0.069
5	8.61	0.24	0.070	5	14.70	0.16	0.068
6	8.69	0.23	0.069	6	15.20	0.15	0.066
7	8.70	0.23	0.069	7	14.53	0.16	0.069
8	8.74	0.23	0.069	8	14.75	0.16	0.068
9	8.66	0.23	0.070	9	14.93	0.15	0.067
10	9.15	0.22	0.066	10	13.84	0.17	0.072
11	8.95	0.23	0.067	<b>promedio</b>		<b>0.16</b>	<b>0.0679</b>
12	8.99	0.23	0.067	<b>Q promedio medido [m<sup>3</sup>/s]</b>		<b>0.068</b>	
<b>promedio</b>		<b>0.23</b>	<b>0.068</b>				

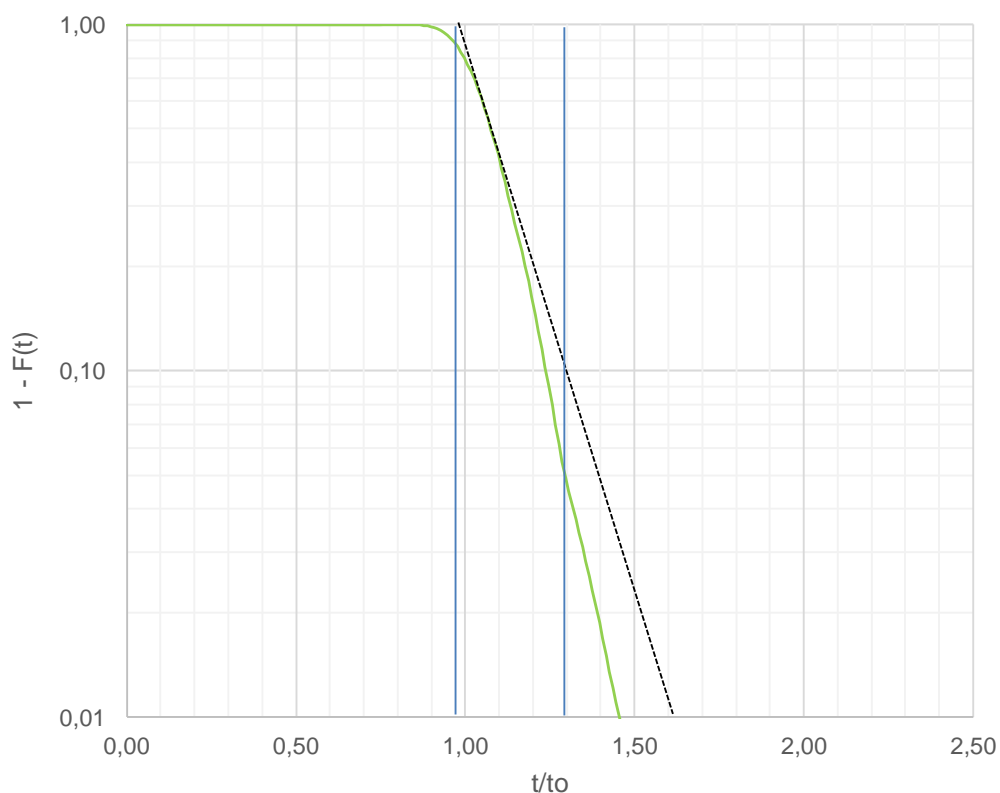
## Anexo C. Medición de caudal al realizar ensayo de trazadores, ensayo 2.

Cámara 1				Cámara 2			
Longitud	2.03 m			Longitud	2.30 m		
Calado	0.725 m			Calado	0.69 m		
Ancho	0.425 m			Ancho	0.664 m		
Área	0.308 m <sup>2</sup>			Área	0.458 m <sup>2</sup>		
Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	9.63	0.21	0.065	1	14.78	0.16	0.071
2	9.38	0.22	0.067	2	17.35	0.13	0.061
3	9.20	0.22	0.068	3	13.75	0.17	0.077
4	8.38	0.24	0.075	4	14.80	0.16	0.071
5	9.45	0.21	0.066	5	14.25	0.16	0.074
6	9.35	0.22	0.067	6	16.98	0.14	0.062
7	8.73	0.23	0.072	7	14.78	0.16	0.071
8	8.60	0.24	0.073	8	15.30	0.15	0.069
9	8.45	0.24	0.074	9	14.48	0.16	0.073
10	9.20	0.22	0.068	10	13.70	0.17	0.077
11	8.83	0.23	0.071	11	14.08	0.16	0.075
12	8.73	0.23	0.072	12	13.55	0.17	0.078
13	9.08	0.22	0.069	13	15.53	0.15	0.068
14	8.53	0.24	0.073	14	14.33	0.16	0.074
15	9.53	0.21	0.066	15	14.25	0.16	0.074
16	8.80	0.23	0.071	16	14.10	0.16	0.075
17	9.60	0.21	0.065	17	15.38	0.15	0.069
18	8.60	0.24	0.073	18	14.40	0.16	0.073
19	8.60	0.24	0.073	19	15.20	0.15	0.069
<b>promedio</b>		<b>0.23</b>	<b>0.0698</b>	20	15.83	0.15	0.067
				21	14.78	0.16	0.071
				22	15.30	0.15	0.069
				23	15.83	0.15	0.067
				24	15.03	0.15	0.070
				25	17.35	0.13	0.061
				26	17.73	0.13	0.059
				27	14.25	0.16	0.074
				28	17.35	0.13	0.061
				29	15.90	0.14	0.066
				30	13.88	0.17	0.076
				31	16.85	0.14	0.063
				32	14.40	0.16	0.073
				33	17.58	0.13	0.060
<b>Q promedio medido [m<sup>3</sup>/s]</b>		<b>0.0697</b>		<b>promedio</b>		<b>0.15</b>	<b>0.0696</b>

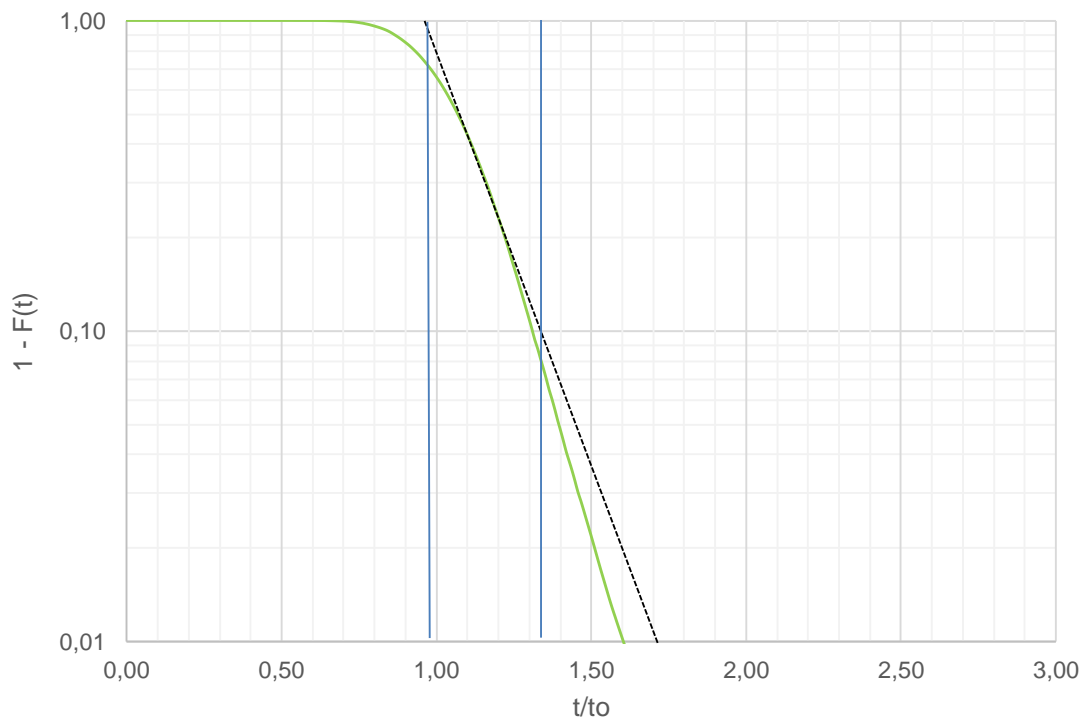
## Anexo D. Medición de caudal al realizar ensayo de trazadores, ensayo 3.

Cámara 1				Cámara 2			
Longitud	2.07 m			Longitud	2.3 m		
Calado	0.7 m			Calado	0.64 m		
Ancho	0.385 m			Ancho	0.66 m		
Área	0.270 m <sup>2</sup>			Área	0.422 m <sup>2</sup>		
Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	8.14	0.25	0.067	1	13.21	0.17	0.074
2	8.33	0.24	0.066	2	13.63	0.17	0.071
3	8.12	0.25	0.067	3	13.53	0.17	0.072
4	8.10	0.25	0.068	4	14.22	0.16	0.068
5	7.95	0.26	0.069	5	13.50	0.17	0.072
6	8.05	0.25	0.068	6	13.49	0.17	0.072
7	8.29	0.24	0.066	7	14.03	0.16	0.069
8	8.32	0.24	0.066	8	13.25	0.17	0.073
9	8.09	0.25	0.068	9	14.13	0.16	0.069
10	8.12	0.25	0.067	10	13.79	0.17	0.070
11	8.22	0.25	0.067	11	13.49	0.17	0.072
12	8.19	0.25	0.067	12	14.00	0.16	0.069
13	8.12	0.25	0.067	13	13.75	0.17	0.071
14	8.10	0.25	0.068	14	13.80	0.17	0.070
<b>promedio</b>		<b>0.249</b>	<b>0.067</b>	15	14.29	0.16	0.068
				16	13.67	0.17	0.071
				17	13.42	0.17	0.072
				<b>promedio</b>		<b>0.17</b>	<b>0.071</b>
				<b>Q promedio medido [m<sup>3</sup>/s]</b>			<b>0.069</b>

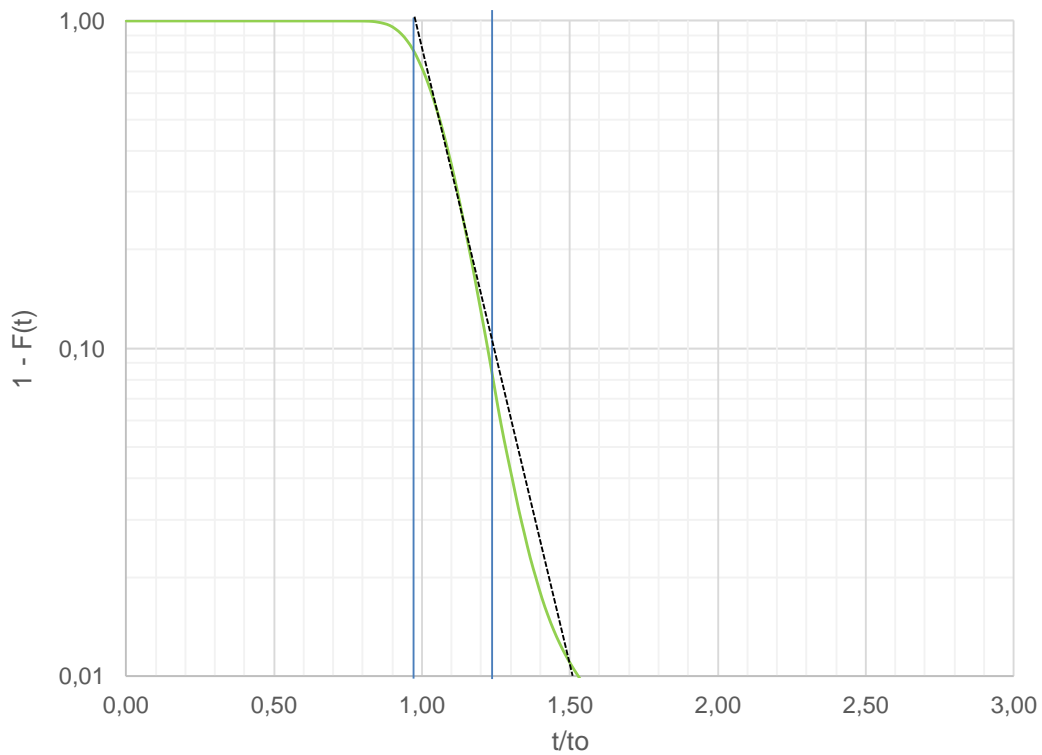
## Anexo E. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 1, ensayo 1



Anexo F. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 2, ensayo 1

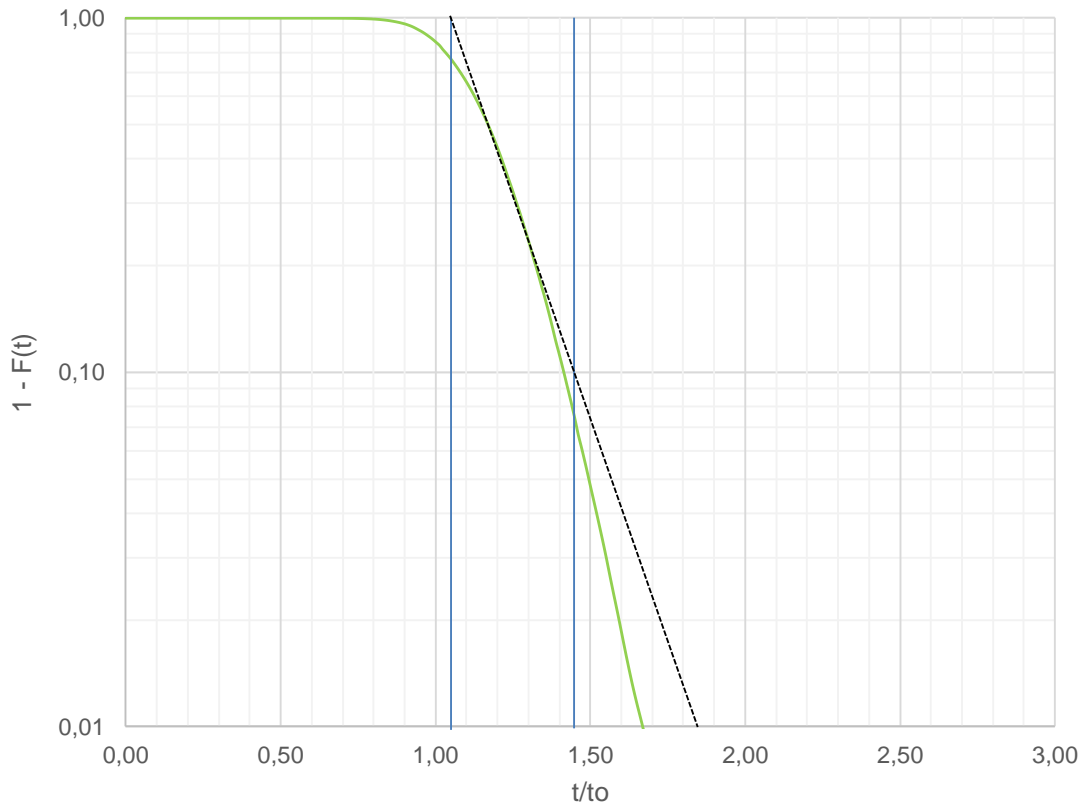


Anexo G. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 1, ensayo 2

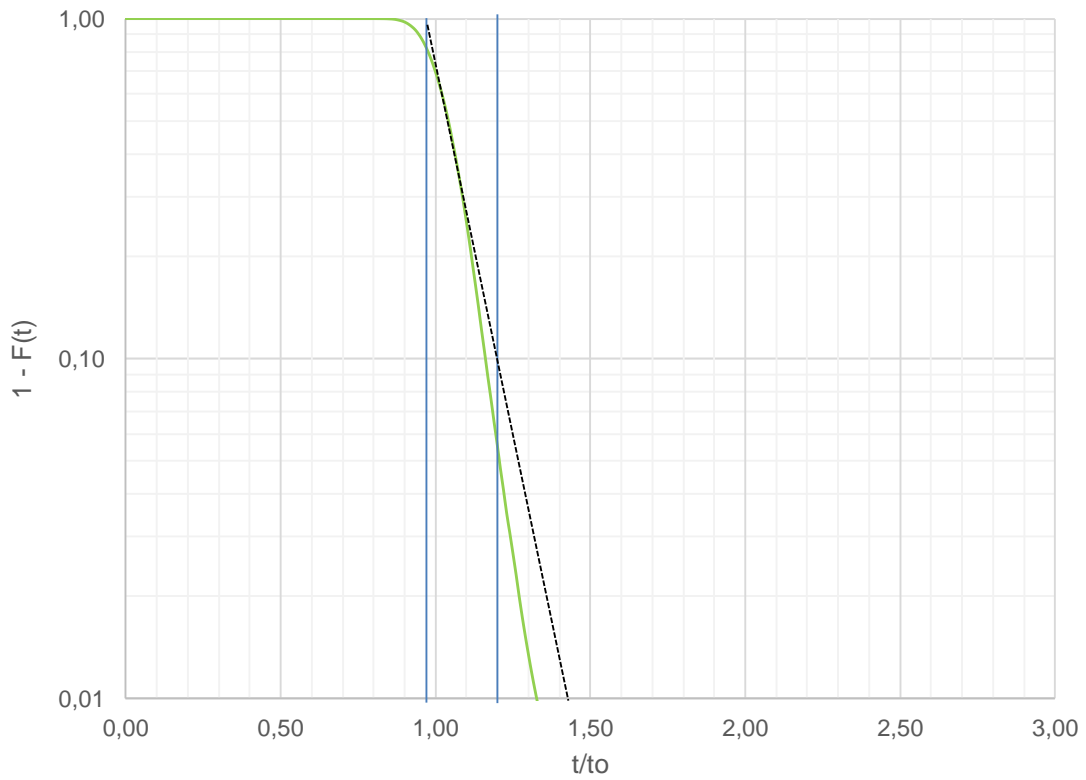




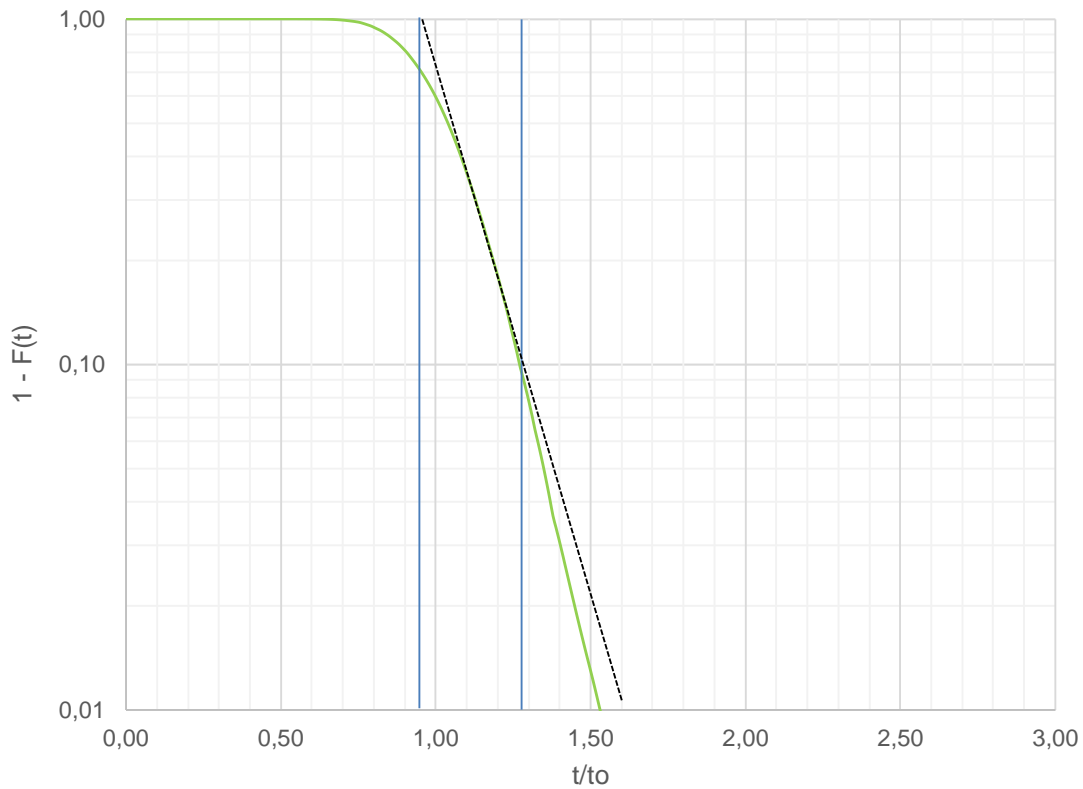
Anexo H. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 2, ensayo 2



Anexo I. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 1, ensayo 3



## Anexo J. Curva 1-F(t) del modelo simplificado de Wolf & Resnick, cámara 1, ensayo 3



## Anexo K. Medición 1 de caudal para estimar n de Manning

Cámara 1				Cámara 2			
Longitud	2.04 m			Longitud	2.23 m		
Calado	0.71 m			Calado	0.66 m		
Ancho	0.425 m			Ancho	0.664 m		
Área	0.302 m <sup>2</sup>			Área	0.438 m <sup>2</sup>		
Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	8.25	0.25	0.074	1	14.83	0.15	0.066
2	8.85	0.23	0.069	2	12.90	0.17	0.076
3	8.80	0.23	0.070	3	13.50	0.17	0.072
4	8.68	0.23	0.071	4	12.63	0.18	0.077
5	8.60	0.24	0.071	5	13.23	0.17	0.074
6	8.20	0.25	0.075	6	14.10	0.16	0.069
7	7.70	0.26	0.080	7	12.05	0.19	0.081
8	8.03	0.25	0.077	8	12.95	0.17	0.075
<b>promedio</b>		<b>0.24</b>	<b>0.073</b>	9	15.18	0.15	0.064
				10	13.28	0.17	0.074
				11	13.90	0.16	0.070
				<b>promedio</b>		<b>0.166</b>	<b>0.073</b>
				<b>Q promedio medido [m<sup>3</sup>/s]</b>		<b>0.073</b>	

## Anexo L. Medición 2 de caudal para estimar n de Manning

Cámara 1				Cámara 2			
Longitud	2.05 m			Longitud	2.34 m		
Calado	0.725 m			Calado	0.655 m		
Ancho	0.425 m			Ancho	0.664 m		
Área	0.308 m <sup>2</sup>			Área	0.435 m <sup>2</sup>		
Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Ensayo de flotador	t [s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	8.85	0.23	0.071	1	13.28	0.18	0.077
2	8.35	0.25	0.076	2	13.35	0.18	0.076
3	7.80	0.26	0.081	3	12.88	0.18	0.079
4	8.40	0.24	0.075	4	12.48	0.19	0.082
5	8.40	0.24	0.075	5	13.83	0.17	0.074
6	8.05	0.25	0.078	6	13.63	0.17	0.075
7	7.58	0.27	0.083	7	12.30	0.19	0.083
8	8.00	0.26	0.079	8	12.05	0.19	0.084
9	9.05	0.23	0.070	9	13.83	0.17	0.074
10	8.00	0.26	0.079	10	13.33	0.18	0.076
11	8.15	0.25	0.078	11	13.08	0.18	0.078
12	8.93	0.23	0.071	12	13.13	0.18	0.078
13	7.93	0.26	0.080	13	12.48	0.19	0.082
14	9.05	0.23	0.070	14	14.03	0.17	0.073
<b>promedio</b>	<b>0.245</b>	<b>0.075</b>		<b>promedio</b>	<b>0.17</b>	<b>0.077</b>	
			<b>Q promedio medido [m<sup>3</sup>/s]</b>			<b>0.076</b>	

## Anexo M. Estimación del coeficiente de pérdidas K

Cámara 1				Cámara 2			
Caudal medido [l/s]	H, Pérdida de energía medida	v, velocidad medida [m/s]	K real	Caudal medido [l/s]	H, Pérdida de energía medida	v, velocidad medida [m/s]	K real
68	0.30	0.23	2.77	68	0.10	0.16	3.00
69.7	0.29	0.23	2.72	69.7	0.10	0.15	3.15
69	0.31	0.25	2.42	69	0.12	0.17	3.12
73	0.32	0.24	2.65	73	0.10	0.17	2.65
76	0.32	0.25	2.63	76	0.10	0.17	2.61
	<b>promedio</b>		<b>2.64</b>		<b>promedio</b>		<b>2.90</b>
K promedio del floculador		<b>2.77</b>					
Para efectos de cálculo se usará un valor de K = 2.75							

## Anexo N Ficha técnica del ensayo de jarras complementario a la evaluación del floculador

Ficha técnica de ensayo de jarras																																																																												
<b>1. Equipo de jarras</b>																																																																												
Volumen de jarras: 2 l			Paletas: simples	Estatores: sí																																																																								
<b>2. Agua cruda</b>																																																																												
Turbiedad:	0.926	NTU(FTU)	Color Aparente:	24	U.C. (Pt-Co)																																																																							
pH:	8.1		Alcalinidad total:	28	mg/l CaCO <sub>3</sub>																																																																							
<b>3. Dosis óptima</b>																																																																												
Coagulante: Solución sulfato de aluminio (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> AL <sub>2</sub> , alumbre 1%	Dosis: 15.4 mg/l																																																																											
Polímero: Cationico 0.05%	Dosis: 0.03 mg/l																																																																											
Modificador de pH: No se utilizó																																																																												
<b>4. Mezcla rápida</b>																																																																												
Velocidad: 300 rpm	Tiempo de mezcla: 1 min																																																																											
<b>5. Floculación</b>																																																																												
Tramo 1: 60 rpm	T <sub>f</sub> : 5.71 min																																																																											
Tramo 2: 45 rpm	T <sub>f</sub> : 7.33 min																																																																											
<b>6. Sedimentación</b>																																																																												
Profundidad de toma de muestra: 8cm	Tiempo de sedimentación: 10 min																																																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tiempo de sedimentación</th> <th rowspan="2">Velocidad de sedimentación <math>w_s</math></th> <th rowspan="2">Turbiedad [UN]</th> <th colspan="3">Turbiedad [UN]</th> </tr> <tr> <th>Inicial</th> <th>Muestra 1</th> <th>Muestra 2</th> <th>Muestra 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30"</td> <td>0.267</td> <td>0.926</td> <td>1.79</td> <td>0.758</td> <td>1.04</td> </tr> <tr> <td>1'</td> <td>0.133</td> <td>0.926</td> <td>1.22</td> <td>0.62</td> <td>0.867</td> </tr> <tr> <td>1'30"</td> <td>0.089</td> <td>0.926</td> <td>1.29</td> <td>0.988</td> <td>0.687</td> </tr> <tr> <td>2'</td> <td>0.067</td> <td>0.926</td> <td>1.04</td> <td>0.717</td> <td>0.605</td> </tr> <tr> <td>3'</td> <td>0.044</td> <td>0.926</td> <td>1.05</td> <td>0.614</td> <td>0.674</td> </tr> <tr> <td>4'</td> <td>0.033</td> <td>0.926</td> <td>1</td> <td>0.59</td> <td>0.546</td> </tr> <tr> <td>5'</td> <td>0.027</td> <td>0.926</td> <td>0.915</td> <td>0.62</td> <td>0.622</td> </tr> <tr> <td>6'</td> <td>0.022</td> <td>0.926</td> <td>1.06</td> <td>0.618</td> <td>0.718</td> </tr> <tr> <td>8'</td> <td>0.017</td> <td>0.926</td> <td>0.37</td> <td>0.565</td> <td>0.606</td> </tr> <tr> <td>10'</td> <td>0.013</td> <td>0.926</td> <td>0.694</td> <td>0.561</td> <td>0.489</td> </tr> </tbody> </table>							Tiempo de sedimentación	Velocidad de sedimentación $w_s$	Turbiedad [UN]	Turbiedad [UN]			Inicial	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	30"	0.267	0.926	1.79	0.758	1.04	1'	0.133	0.926	1.22	0.62	0.867	1'30"	0.089	0.926	1.29	0.988	0.687	2'	0.067	0.926	1.04	0.717	0.605	3'	0.044	0.926	1.05	0.614	0.674	4'	0.033	0.926	1	0.59	0.546	5'	0.027	0.926	0.915	0.62	0.622	6'	0.022	0.926	1.06	0.618	0.718	8'	0.017	0.926	0.37	0.565	0.606	10'	0.013	0.926	0.694	0.561	0.489
Tiempo de sedimentación	Velocidad de sedimentación $w_s$	Turbiedad [UN]	Turbiedad [UN]																																																																									
			Inicial	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3																																																																						
30"	0.267	0.926	1.79	0.758	1.04																																																																							
1'	0.133	0.926	1.22	0.62	0.867																																																																							
1'30"	0.089	0.926	1.29	0.988	0.687																																																																							
2'	0.067	0.926	1.04	0.717	0.605																																																																							
3'	0.044	0.926	1.05	0.614	0.674																																																																							
4'	0.033	0.926	1	0.59	0.546																																																																							
5'	0.027	0.926	0.915	0.62	0.622																																																																							
6'	0.022	0.926	1.06	0.618	0.718																																																																							
8'	0.017	0.926	0.37	0.565	0.606																																																																							
10'	0.013	0.926	0.694	0.561	0.489																																																																							

## Anexo O. Carga de agua sobre el vertedero de cresta gruesa para la propuesta de rediseño planteada.

Q(l/s)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
h(m)	0.140	0.154	0.170	0.183	0.196	0.207	0.219	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270