



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN
COMO UNIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS
DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. CASO
COMUNIDAD DE CHACRASANA, DISTRITO DE CHOSICA**

Línea de investigación:

**Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y
geotecnia**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Cahuantico Lopez, Edgard Daniel

Asesor:

Aybar Arriola, Gustavo Adolfo
(ORCID: 0000-0001-8625-3989)

Jurado:

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique
Ayquipa Quispe, Evelyn Estefany
Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima - Perú

2023



EVALUACION HIDRÁULICA DEL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN COMO UNIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. CASO COMUNIDAD DE CHACRASANA, DISTRITO

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	idoc.pub Fuente de Internet	1%
3	jsaer.com Fuente de Internet	1%
4	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1%
6	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
7	"Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable", FapUNIFESP (SciELO), 2022 Publicación	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN COMO
UNIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. CASO COMUNIDAD DE CHACRASANA,
DISTRITO DE CHOSICA

Línea de Investigación:

Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y geotecnia

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Cahuantico Lopez, Edgard Daniel

Asesor:

Aybar Arriola, Gustavo Adolfo
(ORCID: 0000-0001-8625-3989)

Jurado:

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique
Ayquipa Quispe, Evelyn Estefany.
Madrid Saldaña, Cesar Karlo.

Lima – Perú

2023

Dedicatoria

*A mis padres Carolina y Santos, por su apoyo
incondicional en cada etapa de mi vida.*

*A mi hermana Maylee de quien admiro su
perseverancia.*

*A mis abuelos Orlando, Fabiana, Mariano y Lola;
quienes me enseñaron que en la vida se puede lograr todo con
esfuerzo y dedicación.*

Agradecimiento

A la comunidad Chacrasana por permitirme llevar a cabo esta investigación en su planta de tratamiento, especialmente a Vladimir, quien me apoyó con las gestiones correspondientes.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Descripción y formulación del problema.....	13
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	18
1.4 Justificación.....	18
1.5 Hipótesis.....	19
II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	20
2.2 Unidad de Mezcla Rápida.....	21
2.2.1 Mezcladores hidráulicos.....	21
2.2.2 Criterios de diseño de la unidad de mezcla rápida.....	23
2.3 Unidad de Floculación.....	23
2.3.1 Floculadores hidráulicos.....	24
2.3.2 Criterios de diseño de la unidad de floculación.....	26
2.3.3 Altura hidráulica H.....	26
2.4 Unidad de sedimentación.....	27
2.4.1 Criterios de diseño de la unidad de sedimentación.....	27
2.4.2 Tipos de sedimentadores.....	28
2.5 Unidad de Filtración.....	29
2.6 Proceso de la Electrocoagulación.....	31
2.6.1 Principios de funcionamiento.....	31
2.6.2 Electrocoagulación por lotes.....	33
2.6.3 Electrocoagulación por gradiente de corriente.....	33
III. MÉTODO.....	34
3.1 Tipo de Investigación.....	34
3.2 Ámbito temporal y espacial.....	34
3.3 Variables.....	35
3.4 Población y muestra.....	36
3.5 Instrumentos.....	36
3.6 Procedimientos.....	37
3.6.1 Diseño de la Investigación.....	37

3.6.2	Sobre la unidad piloto de electrocoagulación.	44
3.7	Análisis de datos.....	45
IV.	RESULTADOS	46
4.1	Respecto del reactor de electrocoagulación	46
4.1.1	Costo del reactor de la electrocoagulación	48
4.2	Costo de obras civiles de las unidades de tratamiento de la planta de agua	49
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
5.1	Respecto de la evaluación hidráulica de la unidad de electrocoagulación.....	51
5.2	Respecto de la altura hidráulica H.....	53
5.3	Respecto de los parámetros de diseño de la electrocoagulación.....	61
5.4	Respecto de los costos de las unidades de tratamiento	61
VI.	CONCLUSIONES.....	64
VII.	RECOMENDACIONES	69
VIII.	REFERENCIAS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Caracterización fisicoquímica del efluente en dos tipos de calidades</i>	46
Tabla 2 <i>Parámetros de diseño para el funcionamiento de la unidad de electrocoagulación</i>	47
Tabla 3 <i>Resultados de la altura de tratamiento H para el agua tipo I: 48 UNT, 10 minutos.</i>	47
Tabla 4 <i>Resultados de la altura de tratamiento H para el agua tipo I: 210 UNT, 10 minutos.</i>	48
Tabla 5 <i>Dimensionamiento del reactor hidráulico de electrocoagulación de flujo horizontal</i>	52
Tabla 6 <i>Áreas de las unidades de electrocoagulación, canal de interconexión y floculador</i>	53
Tabla 7 <i>Costos de las unidades de electrocoagulación, canal de interconexión y floculador.</i>	62
Tabla 8 <i>Parámetros de diseño de operación de la unidad de electrocoagulación.....</i>	67

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 <i>Tipos de unidades de mezcla rápida.</i>	22
Figura 2 <i>Esquema de un floculador de flujo horizontal con pantallas.</i>	24
Figura 3 <i>Esquema de un floculador de flujo vertical con pantallas.</i>	25
Figura 4 <i>Decantador Laminar de tolvas separadas y canal colector múltiple.</i>	29
Figura 5 <i>Corte de perfil de un filtro lento de flujo descendente</i>	30
Figura 6 <i>Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 26cm</i>	55
Figura 7 <i>Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 40cm</i>	55
Figura 8 <i>Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 54cm</i>	56
Figura 9 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 26 cm</i>	56
Figura 10 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 40 cm</i>	57
Figura 11 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 54 cm</i>	57
Figura 12 <i>Remoción de turbiedad, Agua Tipo II:210 UNT, altura hidráulica=26 cm..</i>	58
Figura 13 <i>Remoción de turbiedad, Agua Tipo II:210 UNT, altura hidráulica = 40 cm..</i>	58
Figura 14 <i>Remoción de turbiedad, Agua Tipo II:210 UNT, altura hidráulica = 54 cm..</i>	59
Figura 15 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 26 cm</i>	59
Figura 16 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 40 cm</i>	60
Figura 17 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 54 cm</i>	60
Figura 18 <i>Porcentaje de Remoción de turbiedad vs. la altura hidráulica de tratamiento. 48 UNT</i>	65
Figura 19 <i>Porcentaje de remoción de turbiedad vs. la altura hidráulica de tratamiento. 210 UNT</i>	66
Figura 20 <i>Área instalada de la unidad de electrocoagulación, floculador y canal de interconexión.</i>	68
Figura 21 <i>Costo de la unidad de electrocoagulación, floculador y canal de interconexión</i>	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	74
Anexo B. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN.....	75
Anexo C. ÁRBOL DEL PROBLEMA	76
Anexo D. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	77
Anexo E. REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN	102
Anexo F. COSTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL CANAL DE INTERCONEXIÓN.....	105
Anexo G. Costo del proceso constructivo de la unidad de Flocculación	108

RESUMEN

Esta tesis de investigación tiene como fin aplicar procesos unitarios cada vez más eficientes en base a la determinación de la carga hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento. La investigación cuantitativa se realizó con agua superficial captada al ingreso de la planta de agua de la comunidad de Chacrasana, Chosica para ello se diseñaron 3 reactores de electrocoagulación a escala piloto. Los resultados mostraron porcentaje de remoción de turbiedad de 59.6%, 8 minutos de tratamiento, altura hidráulica de 40.0 cm (12 litros de muestra) para una muestra de agua cruda de 48 UNT; porcentaje de remoción de turbiedad de 90.1%, 10 minutos de tratamiento, carga hidráulica de 40.4 cm (12 litros de muestra) para una muestra de agua cruda de 210 UNT. Los costos de construcción de una unidad de electrocoagulación representan una reducción alrededor del 50.6 %. Respecto a los costos por construcción de obras civiles de las unidades de mezcla rápida y floculación en conjunto, y disminución del 52,4 % del área operativa de la unidad de electrocoagulación respecto de las unidades de mezcla rápida y floculación. Finalmente, dichos resultados representan índices que cumplen la normatividad de calidad de agua para consumo humano y en reducción de los costos de construcción.

Palabras claves: Electrocoagulación, altura hidráulica, reactor hidráulico, flujo horizontal

ABSTRACT

This research thesis aims to apply increasingly efficient unit processes based on the determination of the hydraulic load of the electrocoagulation process as a treatment unit. The quantitative research was carried out with surface water collected at the entrance to the water plant of the community of Chacrasana, Chosica, for which 3 pilot-scale electrocoagulation reactors were designed. The results showed a percentage of turbidity removal of 59.6 %, 10 minutes of treatment, hydraulic load of 40.0 cm (12 liters of sample) for a raw water sample of 48 NTU; turbidity removal percentage of 90.1 %, 10 minutes of treatment, hydraulic head of 40.0 cm (12 liters of sample) for a raw water sample of 210 UNT. The construction costs of an electrocoagulation unit represent a reduction of around 50.6 % with respect to the costs for construction of civil works of the rapid mixing and flocculation units as a whole, and a 52.4 % reduction in the operational area of the electrocoagulation unit with respect to of the rapid mix and flocculation units. Finally, these results represent indices that comply with the regulations on water quality for human consumption and in reducing construction costs.

Keywords: Electrocoagulation, hydraulic head, hydraulic reactor, horizontal flow.

I. INTRODUCCIÓN

La autoridad sanitaria del Perú, en el año 2011, mediante El Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano de la Dirección General de Salud Ambiental (MINSA, 2010), da a conocer que varias poblaciones del Perú se encuentran en la problemática de no contar con acceso a un agua de calidad para su consumo y, si se tiene acceso, es un agua potable de baja calidad y cuya consecuencia directa es la exposición y padecimiento de enfermedades en la población. Es una realidad que actualmente la comunidad científica sanitaria y civil hacen grandes esfuerzos por controlar y revertir esta dificultad, que se genera, en parte, en plantas de tratamiento de agua para consumo humano. Lo hace también, diseñando y construyendo plantas de tratamiento de agua cada vez más eficientes o evaluándolas en la mejora de los procesos de tratamiento.

El diseño y construcción de plantas de tratamiento de agua consumo humano actualmente requieren que sean cada vez más eficientes debido a la alta demanda de agua por efecto del crecimiento de la población y de actividades humanas en las últimas décadas y al aumento y complejidad de agentes contaminantes presentes en las fuentes de agua superficial, como es el caso del río Rímac. También, que sus costos de construcción, operación y mantenimiento sean lo razonables accesibles a las comunidades del Perú, como la de Chacrasana-Chosica, que no cuentan con suficientes recursos para construirlos y mantenerlos. El factor energético también involucra porque a medida que los usemos significa que podremos sostener o mejorar la eficiencia de las plantas de tratamiento de agua; pero sin que esto se convierta en un costo insostenible en el tiempo para las empresas o juntas administrativas de agua

En las plantas de tratamiento de agua para consumo humano en pequeñas o medianas comunidades, como la de Chacrasana- Chosica, los procesos que constituyen las unidades de

tratamiento deben ser cada vez más analizados y comprendidos en su proceso constructivo, operación y mantenimiento, y en su mejoramiento. Estudiarlos y dar a conocer nuevos mecanismos y procesos para que puedan ser viables en su costos constructivos y energéticos, además del sustento técnico óptimo en el tiempo. Es decir, el estudio debe presentar una alternativa de solución técnica, constructiva, económica, energética que sea acorde a nuestra realidad nacional respecto a la implementación de una unidad de tratamiento aplicable en este tipo de comunidades del Perú.

La comunidad de Chacrasana es un pueblo de aproximadamente 1200 habitantes que pertenece al distrito de Chosica ubicada en la quebrada del ex – fundo Chacrasana, Km 27.8 de la Carretera Central, a 861 msnm., tiene una planta de tratamiento de agua de tecnología de filtro lento con pretratamiento que presenta problemas hidráulicos, en las unidades de pretratamiento, mezcla rápida y floculador, haciendo que no logren trabajar eficientemente y provocando que el filtro no pueda operar correctamente debido a que la unidad no permite variaciones bruscas y/o constantes de la calidad del agua tratada porque, además, el filtro lento es también un filtro biológico. Así, como en Chacrasana, la dificultad en los demás pueblos del distrito para acceder a un agua potable de calidad es patente.

Actualmente, se recurre a otras tecnologías para resolver las soluciones a los antiguos y a los nuevos problemas que presenta el tratamiento de aguas en el Perú. La tecnología de la electrocoagulación posee ciertas ventajas técnicas que la hacen más eficientes respecto a la tecnología convencional y que a través de los años ha ido consolidando dichas ventajas. El proceso no requiere de insumos químicos y de muchos criterios hidráulicos como, por ejemplo, el fenómeno del resalto hidráulico (algo importantísimo para las unidades convencionales de mezcla rápida), de los sistemas mecánicos de dosificación de coagulantes y de rampas de interconexión; pero sí requiere del análisis hidráulico de la columna de agua o altura hidráulica

de tratamiento de la unidad de electrocoagulación y de sus factores de influencia como son el pH, temperatura, separación y material de los electrodos e intensidad de corriente.

Esta investigación realizó el estudio del análisis hidráulico del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la planta de tratamiento de agua para consumo humano de Chacrasana, mediante una planta piloto constituido por una baterías de 03 reactores electrolíticos de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ con un caudal de operación aproximado de 0.01 l/s, y cuyos resultados del estudio de la evaluación hidráulica, de la altura hidráulica, el costo de su proceso constructivo y energético muestran al proceso de la electrocoagulación como posible alternativa de tratamiento de agua con mayor eficiencia y de menor costo de instalación y mantenimiento respecto de las unidades convencionales de tratamiento de mezcla rápida y floculación de la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana-Chosica.

Por lo tanto, la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, tomando el caso de la comunidad de Chacrasana-Chosica logra el propósito de conocer la altura hidráulica óptima de operación en función de un costo óptimo de implementación y construcción de dicha unidad de tratamiento.

1.1 Descripción y formulación del problema

Los países del primer mundo presentan una gran variedad de soluciones en resolver sistemas de tratamiento de aguas para consumo humano porque disponen de tecnologías y recursos que resuelven los inconvenientes técnicos, constructivos y energéticos (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

En nuestra región, la situación es variable dependiendo de la fortaleza de sus instituciones y políticas públicas en cada país. En el Perú realizar estudios respecto a tecnologías que sean innovadoras y que mejoren los procesos en las plantas de tratamiento de

agua para consumo humano es recurrente. La mayoría de las plantas de tratamiento de agua presentan un comportamiento hidráulico sencillo lo cual les permiten que se adapten convenientemente a nuestra realidad nacional; pero cómo hacer que estas operen y se mantengan, de acuerdo al diseño, en el tiempo resolviendo las variaciones de los parámetros de calidad del agua superficial, sabiendo que el Perú presenta diversidad geográfica, de calidad de agua y población, sólo en mencionar algunas de las características que definen que tipo de tecnología debe elegirse para construir una planta de tratamiento de agua (Howe et al., 2017).

Este hecho también involucra el caso de la comunidad de Chacrasana, en Chosica, a través de su planta de tratamiento de agua en que se ha constatado que los procesos unitarios de la mezcla rápida y del floculador no operan convenientemente. Esto debido a que, en la temporada de lluvias, de enero a marzo, la planta de tratamiento de agua recibe en la captación un agua superficial mayor a 50 UNT por varios días, algo que el Reglamento Nacional de Edificaciones emitido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento / SENCICO (MVCS y SENCICO, 2006), en la Norma OS.020, no lo permite. Altas turbiedades por períodos largos deterioran inexorablemente una planta de filtro lento con pretratamiento como el que posee la comunidad.

Hace 13 años, estudiantes de pregrado de la Universidad de Ingeniería, realizaron un diagnóstico del tipo de tratamiento de agua para consumo humano en 07 pueblos de la parte central de la ciudad de Chosica. Demostraron que 06 de ellos no tenían una planta de tratamiento de agua y que lo que realizaban era un tratamiento defectuoso e incompleto. Hasta la fecha de hoy, esta problemática continúa en estos pueblos de Chosica.

La tecnología de la electrocoagulación presenta una alta eficiencia en su proceso de tratamiento de agua para consumo humano como unidad de remoción de turbiedad y otros contaminantes presentes en el agua superficial (Perozo y Abreu, 2019; Aguilar, 2014;

Orescanin et al., 2013; Kumari y Kumar, 2020; Llanos et al., 2016; Du et al., 2021); pero aún falta definir alcanzar un consenso entre las investigaciones sobre cómo deberían ser los parámetros de diseño en la construcción del proceso como unidad de tratamiento (Piña et al., 2011). Por eso, aunque existan muchas investigaciones que definen los criterios de diseño en el proceso de la electrocoagulación, sin embargo, el estudio hidráulico es poco o se desconoce por esta falta de apoyo entre una investigación y otra. En la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación ¿cómo definiríamos la geometría de la unidad, circular o rectangular? ¿una batería de reactores o sólo uno? ¿la configuración del flujo desplazándose a través de un canal lineal o serpentin? Para ello se hará el estudio de los niveles de la altura hidráulica que nos permitirá conocer aquella altura de tratamiento óptima que mejor alcance los niveles de calidad de agua que el reglamento nacional exige y que implementará un proceso que se acerque al de máxima eficiencia hidráulica y en la posterior construcción de una planta de tratamiento de agua para consumo humano óptimo y de bajo consumo energético.

Planteada y definida la necesidad de conocer a detalle otra alternativa en el tratamiento de aguas superficiales para consumo humano dentro del cumplimiento de las normas técnicas, y por todo lo expuesto anteriormente, se plantea lo siguiente:

¿Cuál es el efecto de la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica?

1.2 Antecedentes

Du et al. (2021), investigadores de la Universidad Tecnológica de Guangzhou, del Centro de Remediación Ambiental (GCER), de la Universidad de Newcastle, del SKLUWRE y del Instituto de Tecnología Harbin propusieron un sistema integral de tratamiento de aguas rural para consumo humano, a partir, del proceso de la electrocoagulación sostenido por las fuentes

energéticas solar e hidroeléctrica gravitacional. Emplearon un caudal de tratamiento de 25,9 l/h para la remoción de turbidez, materia orgánica y nitratos con una columna de agua de 1.0 m, y concluyeron que su estudio podría ser una opción sostenible para el tratamiento de agua rural.

Llanos et al. (2016) investigadores químicos del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Castilla-La Mancha realizaron el estudio de la electrocoagulación como proceso en el ciclo integral del agua urbana en localidades del centro de España, demostrándose que el proceso de la electrocoagulación en la producción de agua potable a partir del tratamiento de aguas superficiales es eficiente y presenta un buen desempeño en la remoción de turbidez y de la materia orgánica.

Kumari y Kumar (2020), investigadores del Departamento de ingeniería Ambiental y Civil del Instituto de Tecnología Birla, aplicaron el proceso de la electrocoagulación en la remoción de materia orgánica natural de agua de río, y obtuvieron resultados, como el costo operativo del proceso fue de USS 0,22/m³ y del proceso de la EC con buen desempeño al ser comparado con una planta de tratamiento de agua para consumo humano.

Orescanin et al. (2013), investigadores del Advanced Energy Ltd., Zagreb, Croatia EKO INVEST Ltd., Zagreb, Croatia, respectivamente, utilizaron agua subterránea de las fuentes que abastecen dos pueblos en Vojvodina, Serbia para ser usada en una planta piloto de electrocoagulación-ozonización/UV con capacidad de 1000 l/día y con el fin de producir agua de consumo humano. La eficiencia de remoción del proceso de tratamiento fue bastante óptima de alrededor del 100% respecto de la turbiedad, color, sólidos suspendidos, entre otros.

Perozo y Abreu (2019). Investigadores de los Departamentos de Energética y Química de la Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda realizaron la evaluación de las variables del proceso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas crudas con fines de

potabilización. Determinaron los porcentajes de remoción de los parámetros de color, sólidos totales y turbidez para a una distribución de dos tipos de combinación de electrodos como fueron los de aluminio – acero inoxidable y hierro – acero inoxidable, mostrando resultados de las eficiencias de remoción de turbidez y color respecto al ánodo de aluminio varían entre 40% y 80%, para el ánodo de hierro fueron entre 10% a 50% en condiciones favorables de separación de electrodos, tiempo de retención y voltaje.

Aguilar (2014), Catedrático investigador del Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima (IDIC) logra evaluar la eficiencia del proceso de la electrocoagulación, con buenos resultados en remoción de contaminantes en aguas residuales e industriales, en aguas superficiales. Recolecta agua del río Rímac y evalúa la eficiencia del proceso en la remoción de la turbiedad. La investigación analiza el agua del río con tres tipos de agua de 60, 122, y 312 UNT. Estudia el tratamiento mediante variaciones de la corriente a un pH natural evaluando su comportamiento mediante la turbiedad. Obteniendo remoción de turbiedad en los tres casos un porcentaje superior a 90% y mostrando que a pH natural se tiene una corriente continua de 5 amperios para un tiempo de tratamiento de 15 minutos.

1.3 Objetivos

Objetivo General

- Determinar la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua de consumo humano. Caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.

Objetivos Específicos

- Determinar la altura hidráulica de operación del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.
- Determinar los parámetros de diseño del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.
- Determinar el costo del proceso constructivo y energético del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.

1.4 Justificación

Esta investigación está dirigida a la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación, en el estudio de la carga hidráulica, como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, en la comunidad de Chacrasana, del distrito de Chosica.

La razón para realizar este estudio se fundamenta en que las plantas de tratamiento de agua para consumo humano en la zona operan deficientemente, en especial el caso de la comunidad de Chacrasana desde hace 10 años, período en donde la planta de agua empieza a tener problemas de funcionamiento y en el descenso en la calidad de agua para consumo humano.

Aquellos problemas guarda relación directa con el aumento en la complejidad en la composición de las fuentes de agua; el aumento de la demanda de agua para consumo humano por efecto del crecimiento de las poblaciones y de las actividades humanas; las plantas de agua

cumplieron su período de diseño y no han sido mejoradas, mala operación y mantenimiento, deficiente gestión por parte de las autoridades del agua de la comunidad y eventos naturales desfavorables como el período de avenidas (de alta turbiedad en las aguas superficiales) y huaycos. Por lo tanto, estos problemas muy propios de esta zona del Este de Lima, Chosica, donde se ubica la comunidad de Chacrasana, requiere un estudio con el fin de ser una opción de solución a partir de resultados precisos.

1.5 Hipótesis

Hipótesis general

La evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento servirá para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano. Caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.

Hipótesis específicas

- La determinación de la altura hidráulica de operación del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento optimizará las plantas de tratamiento de agua para consumo humano.
- La determinación de los parámetros de diseño de la tecnología de la electrocoagulación como unidad de tratamiento optimizará las plantas de tratamiento de agua para consumo humano.
- La determinación del costo constructivo y energético del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento optimizará plantas de tratamiento de agua para consumo humano.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

Agua potable.

Es aquella agua conveniente para el consumo humano y libre de agentes nocivos para la salud (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Conductividad.

Referido a la facultad del agua para transportar la corriente eléctrica (Solís et al., 2012).

Efluente.

Agua que proviene de un proceso o unidad de tratamiento. También, aquella agua que sale en la suma de todos los procesos. Reglamento Nacional de Edificaciones. (MVCS y SENCICO, 2006)

Flóculo.

Aquellas partículas coloidales que fueron desestabilizadas y luego aglomeradas por un agente coagulante. Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS y SENCICO, 2006).

Mezcla rápida.

Es el mecanismo que consigue una homogénea e instantánea distribución del coagulante dosificado a una masa de agua. Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS y SENCICO, 2006).

Partículas floculentas.

Referente a partículas en suspensión que logran aglutinarse en una masa de agua a medida que descienden. Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS y SENCICO, 2006).

Proceso unitario.

Proceso que desarrolla la remoción de un contaminante presente en el agua (Howe et al., 2017).

Turbiedad.

Parámetro de calidad que indica el nivel de claridad visual del agua (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

2.2 Unidad de Mezcla Rápida

Diseñado con el fin de provocar la dispersión rápida y uniforme del coagulante químico o natural en toda la masa o flujo de agua. Dicha dispersión podrá presentarse en un medio turbulento, generado por principios hidráulicos o mecánicos. Si necesitamos una turbulencia a partir de un régimen de flujo, se emplearán los mezcladores hidráulicos como una canaleta Parshall, canales de resalto hidráulico y los vertederos rectangulares, por mencionar a los más empleados para este fin (Romero, 1999).

Es en esta unidad donde la coagulación rápida ocurre para promover que ciertos tipos de partículas suspendidas puedan colisionar y adherirse entre ellas con el fin de generar partículas más grandes y logren sedimentar por gravedad (Masters y Ela, 2008). Hay que considerar que este objetivo de promoción de dichas partículas depende de la calidad del agua y de su composición de partículas orgánicas suspendidas, coloidales y disueltas (Howe et al., 2017).

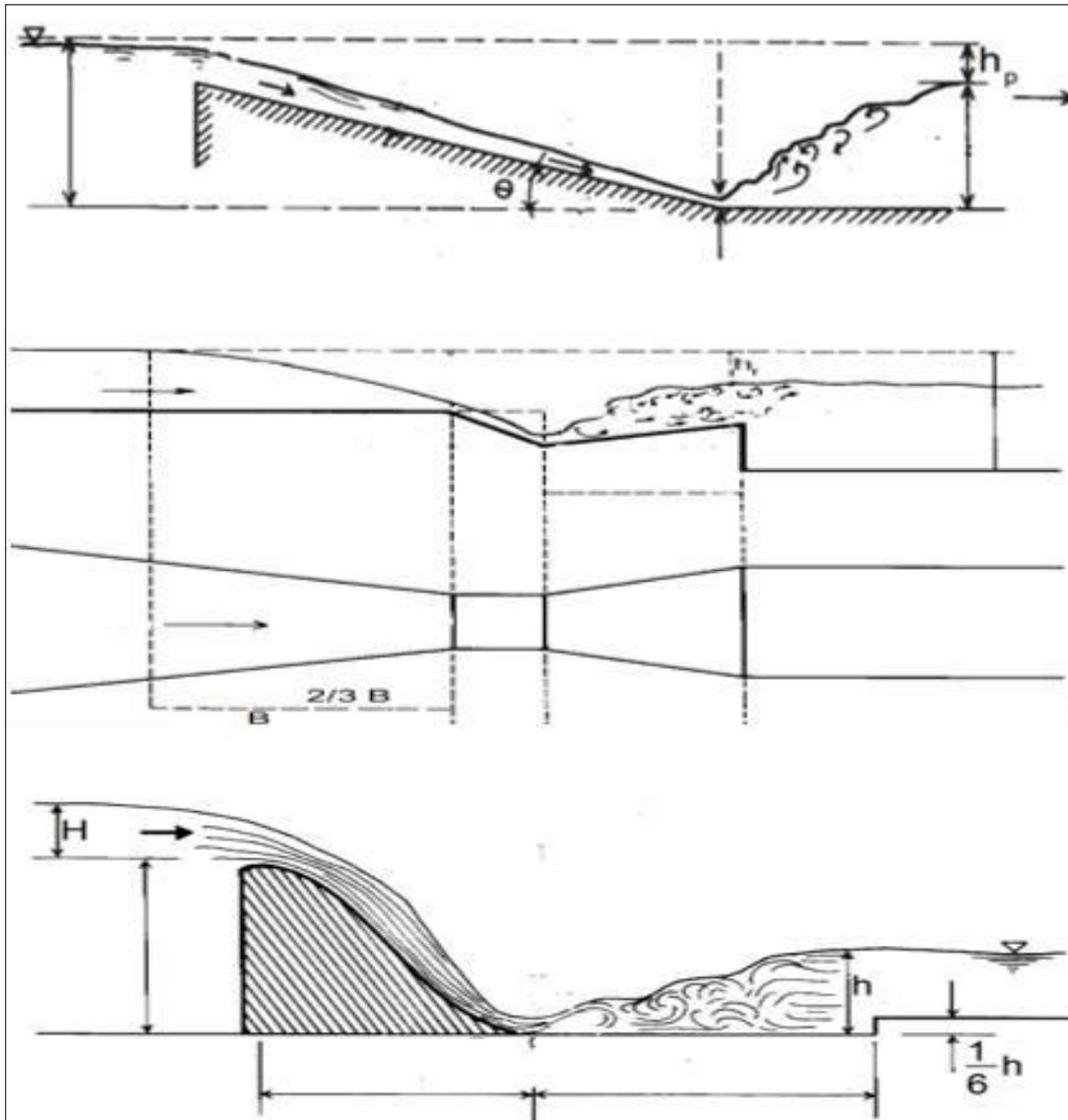
2.2.1 Mezcladores hidráulicos

Su empleo se fundamenta si se tiene carga hidráulica o energía de flujo a la entrada de la unidad. Para ello, se emplean los canales con resalto hidráulico, canaletas Parshall vertederos

rectangulares y triangulares, tubos Venturi, dispersores de tubos perforados, entre otros, ver figura 1 (Romero, 1999).

Figura 1

Tipos de unidades de mezcla rápida.



Nota: De Arriba hacia abajo, canal rectangular con resalto hidráulico o cambio de pendiente, canaleta Parshall y vertedero rectangular. Adaptado de *Gráfico de Mezcladores*, por OPS/CEPIS/PUB/04.111, 2004, Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada

Al ser hidráulica el efecto de la mezcla del flujo con el coagulante no emplea equipo mecánico para generarlo, convirtiéndole en una gran ventaja al diseñar esta unidad en las plantas de tratamiento de aguas en lugares que no poseen energía eléctrica, personal calificado y disposición inmediata y apropiada de repuestos (Romero, 1999).

2.2.2 Criterios de diseño de la unidad de mezcla rápida

El mayor criterio de diseño que debe de presentar la unidad es la producción de una dispersión uniforme entre el coagulante y el agua cruda. Para ello, el tiempo y el grado de la mezcla se convierten en los principios más relevantes para el diseño (Romero, 1999).

Si es el caso de diseñar una planta de tratamiento pequeña de caudal constante y con flujo de gravedad es conveniente emplear una unidad con vertedero rectangular sin contracciones laterales, y en caso contrario para el diseño de grandes caudales se requiere usualmente el de canal rectangular con resalto hidráulico (Romero, 1999).

2.3 Unidad de Floculación

Aquellas partículas formadas a partir de la coagulación rápida en el cuerpo de agua en la unidad de la mezcla rápida, en la unidad de tratamiento de floculación será la promoción de partículas desestabilizadas y las generadas por precipitación debido a la adición de coagulantes que formarán partículas de mayor dimensión o flóculos, como se les denomina usualmente (Howe et al., 2017). El flujo de agua en esta unidad se presenta en régimen lento, es decir, al inicio, empieza con un gradiente de velocidad mayor que a la salida de la unidad con el fin de promover flocs que sedimentarán con mayor facilidad (Masters y Ela, 2008), respecto a un tiempo de retención. En realidad, es una mezcla suave, necesaria para la formación de los flóculos (Mihelcic y Zimmerman, 2012) para que estas se puedan remover en las siguientes unidades de sedimentación, por gravedad, y filtración (Masters y Ela, 2008).

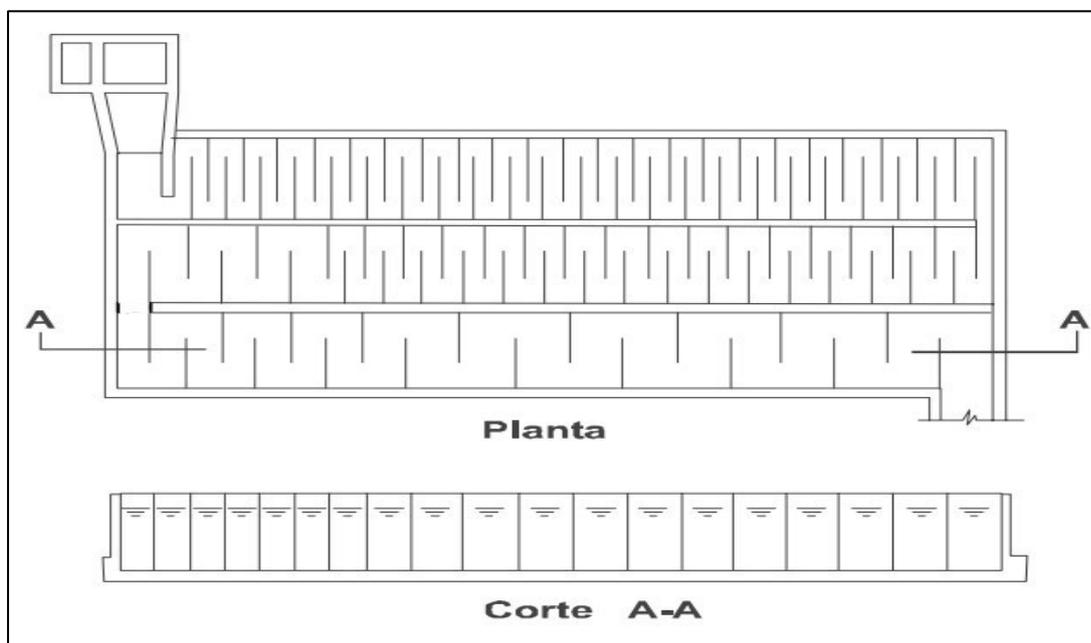
2.3.1 Floculadores hidráulicos

Para esta unidad, la floculación puede darse mecánicamente, pero nos apoyaremos en los fundamentos de los floculadores hidráulicos, debido al ahorro energético, operacional y de mantenimiento del proceso.

Los floculadores hidráulicos se presentan en dos tipos. De flujo horizontal, que posee una estructura de concreto dividido por pantallas, u otro material idóneo, presentados en una disposición tal que el flujo de agua hace un recorrido de ida y vuelta, o serpenteo, en todo el ancho de la unidad a través de las pantallas (figura 2). Se les utiliza en plantas de tratamiento de agua que reciben caudales menores a 50 l/s (Romero, 1999).

Figura 2

Esquema de un floculador de flujo horizontal con pantallas.

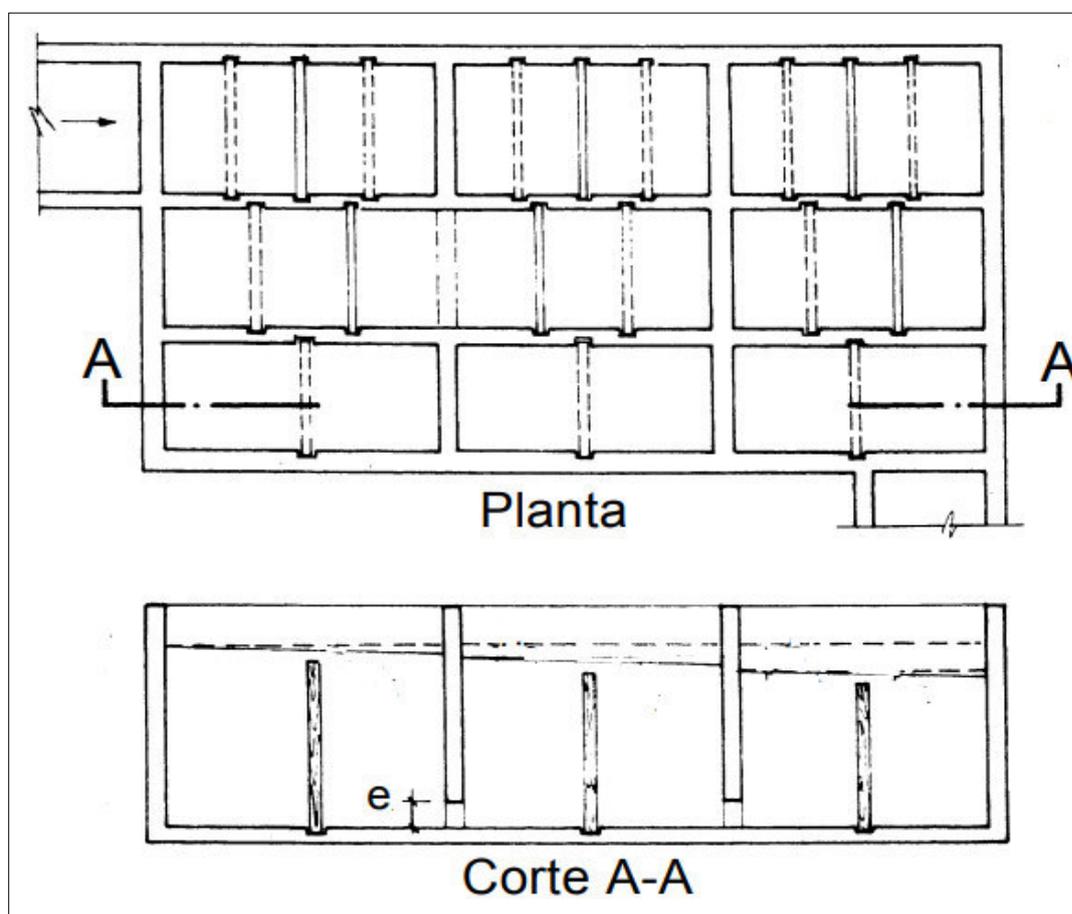


Adaptada de *Grafico de floculador de pantalla de flujo horizontal*, por OPS/CEPIS/PUB/04.111, 2004, Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada.

En el caso de los floculadores de flujo vertical (figura 3), el flujo de agua lo hace de arriba hacia abajo, de abajo hacia arriba, sobrepasándolas por arriba y pasando por la parte inferior de las pantallas del floculador (área del 5% del área horizontal de cada canal entre pantallas). Este tipo de unidades son profundas debido a que pueden recibir altos caudales de mayores a 50 l/s (Romero, 1999).

Figura 3

Esquema de un floculador de flujo vertical con pantallas.



Adaptada de *Grafico de floculador de pantallas de flujo horizontal*, por OPS/CEPIS/PUB/04.111, 2004, Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada.

2.3.2 Criterios de diseño de la unidad de floculación

Respecto del gradiente de velocidad, este debe ir disminuyendo gradualmente desde el inicio hasta la salida de la unidad. Dicho principio es para promover la formación de flóculos al inicio de la unidad con una gradiente inicial tal que genere flocs que posteriormente sedimentarán en la siguiente unidad, e ir reduciendo la gradiente para que, los flóculos formados de mayor tamaño no colisionen entre sí, y terminen rompiéndose provocando que nuevamente vuelvan a perder peso y se conviertan en partículas no discretas (Romero, 1999).

La unidad de mezcla rápida debe empalmar con la unidad de floculación de forma inmediata, y en donde el flujo de agua deba hacer su entrada a la unidad uniformemente en toda la extensión de su área de ingreso (Romero, 1999).

En resumen, la intensidad de la mezcla, en términos de gradiente de velocidad, y el tiempo de agitación o período de agitación se convierten en los parámetros de diseño para la unidad de floculación (Romero, 1999).

2.3.3 Altura hidráulica H

Conviene analizar en la profundidad de una sección hidráulica de un canal abierto para conducir en forma óptima un flujo de agua (Villón, 2007). Aquella altura hidráulica se relaciona con el tirante de agua que sería la profundidad máxima de agua en el canal de tal forma que asegure un transporte óptimo de la masa de agua (Villón, 2007; French, 1985; Saldarriaga, 1998).

La altura hidráulica óptima o altura de tratamiento en el proceso de la electrocoagulación corresponde a la altura en que presenta la mayor masa de agua tratada en el menor tiempo posible para producir un efluente de 20 UNT de nivel máximo que deberá ser entregado al filtro (Maldonado, 2004).

Esta altura hidráulica le corresponde una sección rectangular por ser la sección más simple y eficiente hidráulicamente a la unidad de electrocoagulación y que se sugiere cuando no se dispone de suficiente área (Villón, 2007; Cadavid, 2006).

2.4 Unidad de sedimentación

Después de que el agua a pasado a través de las unidades anteriores, la calidad del agua al llegar a esta unidad deberá poseer una mayoría de partículas que decantarán por gravedad en un lapso de tiempo razonable. La característica más relevante de estas partículas es que poseen densidades superiores a 1000 kg/m^3 nivel necesaria para que la unidad pueda remover eficientemente (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Pueden ser empleadas en las plantas de tratamiento de agua como unidades de sedimentación de pretratamiento, o de clarificación, y unidades de segunda sedimentación, en condiciones de régimen de flujo lento (Masters y Ela, 2008). Es un proceso en donde el principio físico es el fundamento de esta unidad con el fin de clarificar el volumen de agua (Maldonado, 2004).

Las partículas presentes en la unidad lograrán sedimentar en forma distinta porque dependerán de sus características y concentración. Por lo tanto, se presentará en la unidad, la sedimentación de partículas floculentas, de partículas discretas y las de caída libre e interferida (Maldonado, 2004).

2.4.1 Criterios de diseño de la unidad de sedimentación

Los criterios del diseño de esta unidad contemplan la calidad de agua, porque influirá en las dimensiones de la unidad; condiciones hidráulicas, respecto de la zona de sedimentación con flujo laminar que estabilice el flujo, respecto a la zona de entrada, para la distribución

homogénea del flujo de agua al ingreso de la unidad, respecto de la zona de salida, para la homogénea recolección del agua sedimentada (Maldonado, 2004).

2.4.2 Tipos de sedimentadores

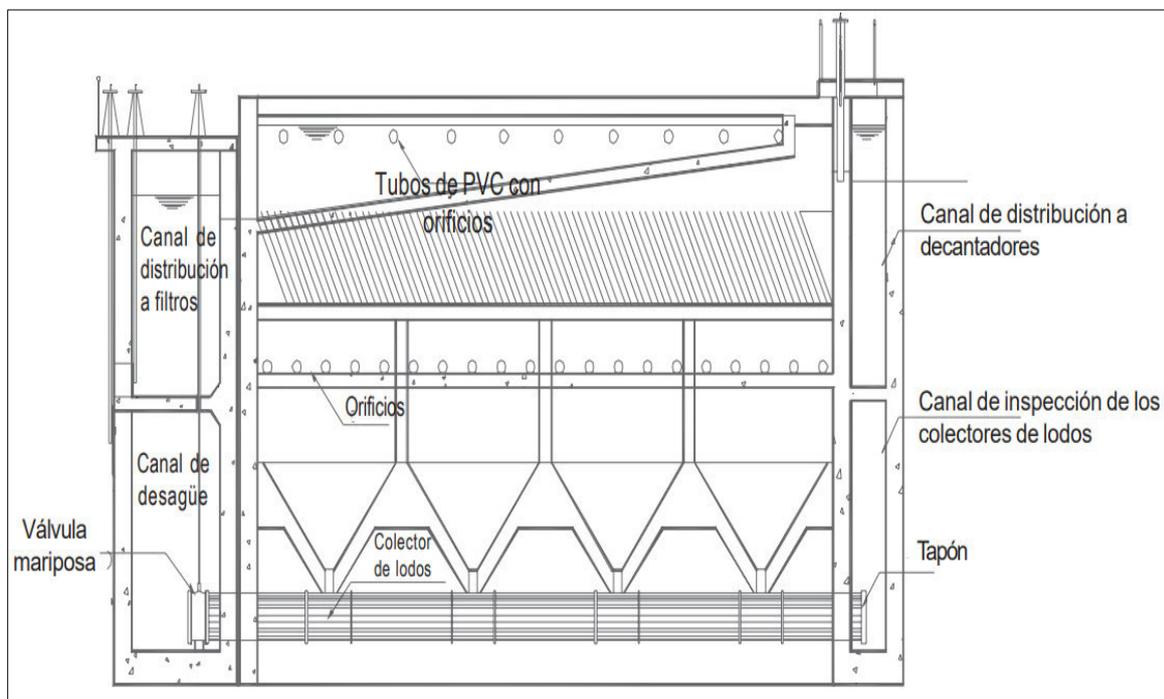
Sedimentadores estáticos. Presenta el principio de remoción de partículas por caída libre bajo un régimen turbulento o de transición y con flujo horizontal. Ejemplos de esos sedimentadores son los desarenadores, de flujo horizontal, de flujo vertical y los de flujo helicoidal (Maldonado, 2004).

Sedimentadores dinámicos. Emplea la decantación interferida requiriendo una concentración alta de partículas que permita la mayor posibilidad de contacto entre ellos para así ser arrastradas por el flujo formando un manto de lodos. Existen dos tipos de estas unidades dinámicas, las de suspensión hidráulica y las de suspensión mecánica (Maldonado, 2004).

Decantadores laminares. Desarrollan un comportamiento de las partículas en un flujo laminar haciéndolas muy eficientes. También se les conoce como sedimentadores de alta tasa (figura 4), y existen dos tipos, las unidades de flujo horizontal y de flujo inclinado (Maldonado, 2004).

Figura 4

Decantador Laminar de tolvas separadas y canal colector múltiple.



Adaptada de *Grafico de tolvas separadas y colector múltiple*, por OPS/CEPIS/PUB/04.111, 2004, Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada.

2.5 Unidad de Filtración

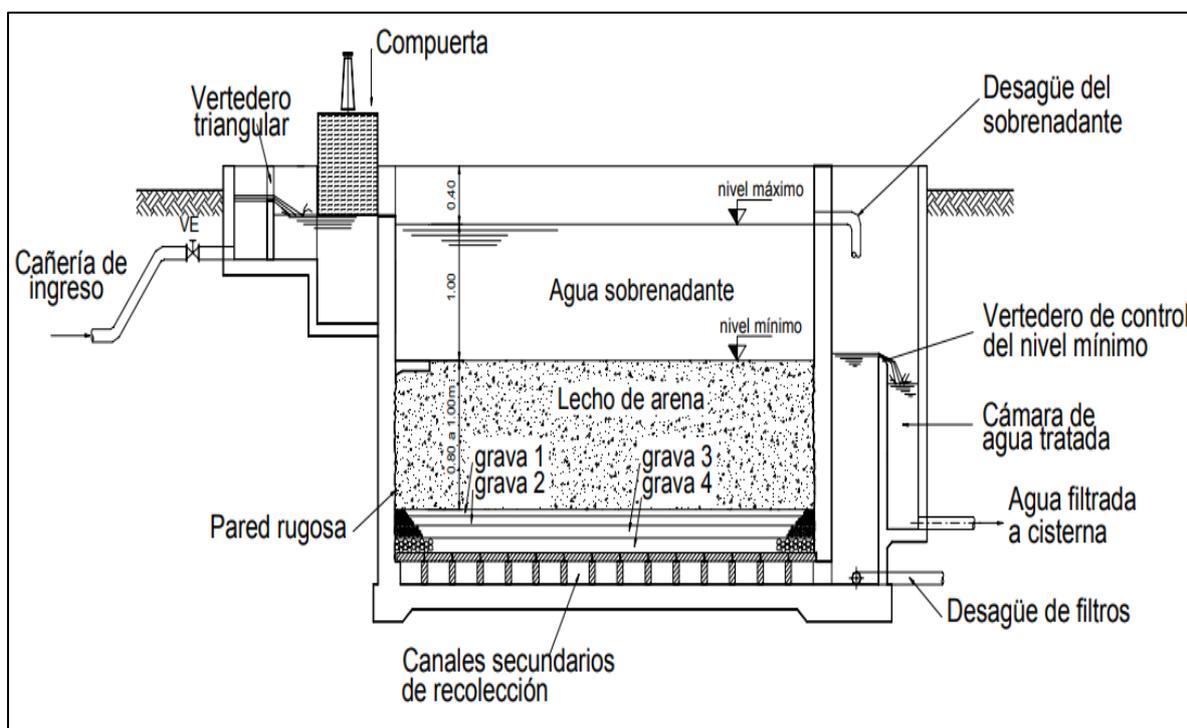
La filtración es el proceso final de clarificación en el tratamiento de agua para consumo humano y el caso de los filtros lentos (figura 5) tienen el principio de funcionamiento de filtración directa porque el flujo de agua atraviesa en forma descendente, por gravedad, un medio filtrante y poroso cuyo mecanismo físico e hidráulico del fluido logra retener partículas del agua en el medio filtrante (Maldonado, 2004).

También, los filtros lentos son filtros biológicos (como el de la planta de tratamiento agua de Chacrasana – Chosica) porque remueve contaminantes biológicos, entre otros, a partir de una capa biológica que se forma en la superficie superior del manto de arena.

Este tipo de filtro puede recibir turbiedades de agua superficial menores a 20 UNT y el parámetro de color inferior a 40 UC (Maldonado, 2004).

Figura 5

Corte de perfil de un filtro lento de flujo descendente



Adaptada de *Detalles de un filtro lento*, por ENOHSA Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento, 2012, Fundamentación – Capítulo VII – 4 – Filtración Lenta / pág. 2.

2.6 Proceso de la Electrocoagulación

2.6.1 Principios de funcionamiento

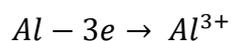
El funcionamiento de este proceso se sustenta sobre principios electroquímicos y ha sido utilizado como un proceso de tratamiento en los últimos años; pero su estudio y desarrollo data desde el siglo pasado (Perozo y Abreu, 2019). La forma más elemental de una unidad de electrocoagulación es la de un pequeño reactor electrolítico conformado por un par de electrodos, ánodo y cátodo, que son alimentados eléctricamente por una fuente de poder externa provocando que el electrodo anódico se desgaste por oxidación y el electrodo catiónico sea reducido (Piña et al., 2011). Esta reacción electroquímica en el agua va a generar en el medio, una variedad de coagulantes por efecto de la disolución del ánodo, la producción de H_2 gaseoso junto con una entrega de OH (Kobyta et al., 2011).

Tales iones metálicos son los hidróxidos responsables de la coagulación y remoción de los contaminantes y son hidróxidos metálicos muy eficientes para la aglomeración de partículas. Debido a que se presentan en cadenas de polihidróxidos que son menos hidratadas que las cadenas de los coagulantes químicos, es decir, la formación de flocs por efecto de los iones liberados por el proceso de la electrocoagulación, lograrán agruparse y compactarse con mayor facilidad que los flóculos por coagulación química convencional (Piña et al., 2011)

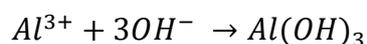
Podríamos definir que el proceso de la electrocoagulación se desarrolla en tres etapas: en el principio, se genera el coagulante como consecuencia de la oxidación electrolítica del electrodo anódico; desestabilización de los contaminantes y emulsiones por acción de los hidróxidos metálicos; y, finalmente, la producción de flóculos por aglomeración de partículas por efecto de la adsorción química (Perozo y Abreu, 2019).

Las reacciones químicas que se presentan en la electrocoagulación fueron definidas por Chen en su investigación del 2003 (Piña et al., 2011).

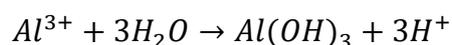
Para el ánodo de aluminio:



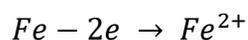
En condiciones alcalinas:



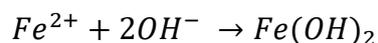
En condiciones ácidas:



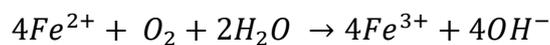
Para ánodo de hierro:



En condiciones alcalinas:

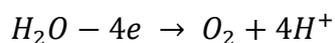


En condiciones ácidas:

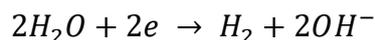


La electrólisis del agua produce oxígeno e hidrógeno de la siguiente manera:

En el ánodo:



En el cátodo:



En el tratamiento de las aguas, los requisitos actuales para poder ser tomado en cuenta como tecnología viable pasa por presentar un bajo costo, ecológico, versátil y eficiente. Las investigaciones que utilizaron la electrocoagulación para remover contaminantes presentes en

el agua lo consiguieron respecto algunos de los parámetros como coliformes y turbiedad (Aguilar, 2014), DQO, DBO, color, algas, metales pesados, entre otros (Piña et al., 2011).

2.6.2 *Electrocoagulación por lotes*

Corresponde a estudiar el proceso de la electrocoagulación haciendo tiempos de sedimentación, con la fuente de poder apagada, dentro del tiempo de tratamiento.

Por lotes o por tiempos iguales de proceso electroquímico y de sedimentación que hace que dentro del tiempo de tratamiento por la electrocoagulación se pueda aplicar el proceso de sedimentación. Este método busca tres motivos muy importantes: reducir el consumo de corriente, dar un tiempo para la sedimentación de los primeros flóculos formados y mejorar la calidad de los flóculos.

Es un método del proceso de la electrocoagulación que mejora aún más el tratamiento porque potencia la eficiencia del consumo energético, la calidad del agua tratada y reduce el tiempo de retención.

2.6.3 *Electrocoagulación por gradiente de corriente*

Corresponde a estudiar el proceso de la electrocoagulación mediante la aplicación de corriente que va cambiando de intensidad, por lapsos de tiempo, durante todo el tiempo de tratamiento. Pueden presentarse en 2 o en más niveles de corriente en forma ascendente, descendente o aleatoria.

Este método tiene objetivos semejantes que el método anterior; pero lo realiza no haciendo paradas para introducir la sedimentación en medio del proceso de la sedimentación sino, variando los niveles de la corriente dentro del tiempo de tratamiento y reservando la sedimentación al final del tratamiento.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

Estará definida sobre los términos de una investigación cuantitativa aplicada experimental debido a los propósitos que esta investigación persigue, la naturaleza del problema y de los objetivos planteados.

Considerar, debido a que se utilizarán técnicas y métodos que han sido empleadas en investigaciones semejantes, logrando mejorar los principios técnicos y aportando soluciones a la ingeniería civil estamos también, ante una investigación aplicada.

3.2 Ámbito temporal y espacial

Ámbito temporal.

Se desarrollará en los tiempos de época de avenida, meses de noviembre diciembre enero febrero, y en época de estiaje, meses de abril, mayo junio. Resultando un tiempo total de investigación en campo de 06 meses.

Ámbito espacial.

Se realizará en la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana, pueblo que pertenece al distrito de Chosica ubicada en la quebrada del ex – fundo Chacrasana, altura del Km 27.8 de la Carretera Central, a 800 msnm. Chosica es un distrito del este de Lima, a 2 horas de viaje por bus.

Chosica. Es la capital del distrito de Lurigancho – Chosica, ubicado al este, en la periferia de la provincia de Lima. Posee una población urbana – rural de 240. 814 habitantes (según censo del 2017) y presenta una superficie de 236,5 km². En verano se tiene una temperatura de 26,1°C, y en el resto del año se tiene 17.1 °C, humedad de 80% en promedio

en todos los niveles descritos. Mucha de su población tiene instalada su vivienda en quebradas y cerros. El agua para consumo humano en Chosica no está administrada por Sedapal sino por el municipio y por instituciones del agua como la JASS en varios pueblos, y el río Rímac es la principal fuente de agua para su consumo.

3.3 Variables

Variables independientes

- Evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación.

Variables dependientes

- Optimización de planta de tratamiento de agua para consumo humano

Variables intervinientes

- Turbiedad (UTN)
- Tiempo de retención (minutos)
- Temperatura (°C)
- Distancia entre electrodos (cm)
- Material del electrodo.
- Número de electrodos
- Área del electrodo (cm²)
- Corriente (A)
- pH del agua residual

3.4 Población y muestra

Población

La población de esta investigación está definida por las plantas de tratamiento de Chosica.

Muestra

La muestra está conformada por la planta de tratamiento de agua para consumo humano de la comunidad de Chacrasana en Chosica.

3.5 Instrumentos

Turbidímetro

Medidor de la turbidez presente en el agua y es el modelo 2100Q portátil de la marca HACH con rango de medición de 0 a 1000 UNT. Permitirá conocer los niveles de eficiencia de los procesos mediante la medición del parámetro de la turbiedad.

Fuente de Poder

También conocido como fuente de alimentación de corriente, es el equipo que va generar la corriente continua para el proceso de la electrocoagulación. Es un equipo digital con pantalla LED que puede regular la corriente y el voltaje en los rangos de corriente de 0 a 5 amperios y de 0 a 30 voltios, respectivamente.

Medidor multiparamétrico

Es un instrumento portátil tipo lapicero de medición de parámetros de calidad de agua que permite conocer los niveles de temperatura, pH, salinidad, conductividad y de sólidos totales disueltos. Para nuestro estudio, los parámetros a utilizar por este equipo serán la temperatura y el pH.

Celda o reactor de electrocoagulación.

Es donde ocurre todos los fenómenos electroquímicos que causan la remoción de contaminantes en el agua. Es la fuente donde descansa el soporte de los electrodos, los electrodos metálicos y es la que contiene el agua que será sometida a la electrólisis. Pueden presentarse de diversas dimensiones, pero para nuestro estudio es de 22x15x55 cm³ de capacidad y de material acrílico.

3.6 Procedimientos

El método cuantitativo permitirá conseguir la información necesaria del comportamiento de las variables involucradas desarrollándose sobre los fundamentos teóricos, la medición, el análisis de los datos, las conclusiones, la mejora de variables y recomendaciones, y el control de las variables.

3.6.1 *Diseño de la Investigación*

Se hará respecto sobre la modificación y control de las variables independientes y se medirá sus efectos sobre las variables dependientes.

El estudio utilizará el agua del río Rímac en la captación de la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana en la búsqueda de las variables del proceso de la electrocoagulación que permitan su operación. Conocidas las variables, se estudiará la eficiencia del proceso de la electrocoagulación por lotes y por gradiente de corriente para cumplir con los estándares de calidad de agua tratada para consumo humano, para luego determinar la carga hidráulica de tratamiento del proceso de la electrocoagulación.

Conviene hacer la caracterización del agua del río Rímac en la captación de la planta de tratamiento de agua residual mediante la medición de los parámetros del pH, temperatura, alcalinidad, conductividad.

3.6.1.1 Respecto a la celda de electrocoagulación:

Corriente óptima.

- La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, distribución de 06 electrodos de aluminio y se evaluará para una distancia entre placas de 1.0 cm, área de los electrodos será de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y espesor de 1mm, tiempo de tratamiento de 15 minutos y corriente continua de estudio de 1.5, 3.0 y 4.5 amperios. La turbiedad será el parámetro de evaluación de la corriente óptima para la mejor remoción.

Material de los electrodos.

- Se estudiará con 02 tipos de materiales: hierro – aluminio, y aluminio – aluminio distribuido en 06 electrodos en ambos casos. La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, distancia entre placas de 1.0 cm, área de los electrodos será de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y espesor de 1mm, tiempo de tratamiento de 15 minutos y corriente óptima. La turbiedad será el parámetro de evaluación del material óptimo para la mejor remoción.

Distancia entre electrodos.

- Será estudiada para 0.5 cm, 1.0 cm y 1.5cm La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, electrodos de material óptimo, área de los electrodos será de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y espesor de 1 mm, tiempo de tratamiento 15 minutos y la corriente óptima. La turbiedad será el parámetro de evaluación de la distancia óptima para la mejor remoción

Número de electrodos.

- Será estudiada para 4, 6 y 8 unidades de electrodos. La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, electrodos de material óptimo, distancia óptima, área de los electrodos será de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y espesor de 1 mm, tiempo de tratamiento 15 minutos y la corriente óptima. La turbiedad será el parámetro de evaluación del número de electrodos óptimo para la mejor remoción.

Área entre electrodos.

- Será estudiada para $8 \times 8 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $12 \times 12 \text{ cm}^2$. La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, distancia óptima, número de electrodos óptimo, electrodos de material óptimo, espesor de 1 mm, tiempo de tratamiento 15 minutos y corriente óptima. La turbiedad será el parámetro de evaluación del número del área de electrodos óptimo para la mejor remoción.

pH de la muestra.

- Será estudiada para pH 6.8, natural y 8.8. La celda se ordenará para una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, volumen de tratamiento de 4 litros, electrodos de material óptimo, número electrodo óptimo, distancias óptimo, área de electrodo óptimo, corriente óptima y espesor de 1mm, tiempo de tratamiento 15 minutos. La turbiedad será el parámetro de evaluación del pH óptimo para la mejor remoción.

3.6.1.2 Respecto a la electrocoagulación por lotes.

Para 1.5 amperios.

- Iniciamos el proceso con 1.5 A por 5 minutos e inmediatamente dejamos sedimentar por 5 minutos con la fuente de poder apagada. Al minuto 10 de tratamiento damos inicio nuevamente al proceso de la EC por otros 5 minutos, al minuto 15 damos otros 5 minutos de sedimentación y así, sucesivamente, hasta un tiempo de tratamiento de 30 minutos. En cada proceso de electrocoagulación y sedimentación se evaluará el comportamiento del agua tratada con la medición de la turbiedad para generar una curva eficiencia entre remoción de turbiedad y tiempo de tratamiento.
- El análisis comparativo se completa, de la misma forma que la metodología anterior, con el estudio de los tiempos de 7 minutos de proceso de electrocoagulación con 7 minutos de sedimentación, y 9 minutos de proceso de electrocoagulación con 9 minutos de sedimentación.
- Los tres tipos de lotes generarán sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

Para 3.0 amperios:

- Iniciamos el proceso con 3.0 A por 3 minutos e inmediatamente dejamos sedimentar por 3 minutos con la fuente de poder apagada. Al minuto 6 de tratamiento, damos inicio nuevamente al proceso de la EC por otros 3 minutos, al minuto 9 damos otros 3 minutos de sedimentación y así, sucesivamente, hasta un tiempo de tratamiento de 30 minutos. En cada proceso de electrocoagulación y sedimentación se evaluará el comportamiento del agua tratada con la medición

de la turbiedad para generar una curva eficiencia entre remoción de turbiedad y tiempo de tratamiento.

- El análisis comparativo se completa, de la misma forma que la metodología anterior, con el estudio de los tiempos de 5 minutos de proceso de electrocoagulación con 5 minutos de sedimentación, y 7 minutos de proceso de electrocoagulación con 7 minutos de sedimentación.
- Los tres tipos de lotes generarán sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

Para 4.5 amperios:

- Iniciamos el proceso con 4.5 A por 2 minutos e inmediatamente dejamos sedimentar por 2 minutos con la fuente de poder apagada. Al minuto 4, de tratamiento damos inicio nuevamente al proceso de la EC por otros 2 minutos, al minuto 6 damos otro tiempo 2 minutos de sedimentación y así, sucesivamente, hasta un tiempo de tratamiento de 30 minutos. En cada proceso de electrocoagulación y sedimentación se evaluará el comportamiento del agua tratada con la medición de la turbiedad para generar una curva eficiencia entre remoción de turbiedad y tiempo de tratamiento.
- El análisis comparativo se completa, de la misma forma que la metodología anterior, con el estudio de los tiempos de 4 minutos de proceso de electrocoagulación con 4 minutos de sedimentación, y 6 minutos de proceso de electrocoagulación con 6 minutos de sedimentación.
- Los tres tipos de lotes generarán sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

3.6.1.3 Respecto a la electrocoagulación por gradiente de corriente.

Para corrientes 4.5A – 3.0A – 1.5A (amperios):

- Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 3 minutos, a los 3 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 3 minutos y a los 6 minutos se regula la fuente a 1.5 amperios por 9 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación, con la fuente de poder apagada, que va del minuto 15 hasta el tiempo de 25 minutos.
- Variamos el tiempo de aplicación de las corrientes. Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 5 minutos, a los 5 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 5 minutos y a los 10 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperios por 5 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- La última variación de tiempo, se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 7 minutos, a los 7 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 7 minutos y a los 14 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperios por 1 minuto. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- Los tres tipos de gradiente de corriente van a generar sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

Para corrientes 4.5A – 3.0A amperios:

- Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 3 minutos, a los 3 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 12 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación, con la fuente de poder apagada, que va del minuto 15 hasta el tiempo de 25 minutos.

- Variamos el tiempo de aplicación de las corrientes. Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 5 minutos, a los 5 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 10 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- La última variación de tiempo, se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 7 minutos, a los 7 minutos se regula la fuente de poder a 3.0 amperios por 8 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- Los tres tipos de gradiente de corriente van a generar sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

Para corrientes 4.5A – 1.5A (amperios):

- Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 3 minutos, a los 3 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 12 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación, con la fuente de poder apagada, que va del minuto 15 hasta el tiempo de 25 minutos.
- Variamos el tiempo de aplicación de las corrientes. Se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 5 minutos, a los 5 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 10 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- La última variación de tiempo, se inicia el proceso de electrocoagulación con 4.5 amperios por 7 minutos, a los 7 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 8 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.

- Los tres tipos de gradiente de corriente van a generar sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

Para corrientes 3.0A – 1.5A (amperios):

- Se inicia el proceso de electrocoagulación con 3.0 amperios por 5 minutos, a los 3 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 10 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación, con la fuente de poder apagada, que va del minuto 15 hasta el tiempo de 25 minutos.
- Variamos el tiempo de aplicación de las corrientes. Se inicia el proceso de electrocoagulación con 3.0 amperios por 7 minutos, a los 7 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 13 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- La última variación de tiempo, se inicia el proceso de electrocoagulación con 3.0 amperios por 9 minutos, a los 9 minutos se regula la fuente de poder a 1.5 amperio por 6 minutos. Concluye con 10 minutos de sedimentación desde los 15 minutos hasta el tiempo de 25 minutos.
- Los tres tipos de gradiente de corriente van a generar sus respectivas curvas de eficiencia entre el tiempo de tratamiento respecto de la remoción de turbiedad.

3.6.2 *Sobre la unidad piloto de electrocoagulación.*

Con los parámetros del proceso conocidos y estudiados, corresponde ahora realizar el estudio de la carga hidráulica de operación óptima de tratamiento del proceso con un caudal $q=0.01$ l/s (tentativo) de llegada permanente a la unidad prototipo, a través de un número N de baterías de reactores de electrocoagulación.

El número N de reactores que tendrá la unidad de electrocoagulación dependerá de la altura hidráulica H de tratamiento óptimo, el caudal de entrada a la unidad y del tiempo de retención. La eficiencia del proceso será medida en función de la remoción de turbiedad en el efluente de la unidad.

La altura hidráulica será estudiada a partir de 3 columnas de tratamiento (cm.) que representa a 3 de volúmenes distintos. La celda, con una capacidad de $22 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, electrodos de material óptimo, número electrodo óptimo, distancia óptima, área de electrodo óptimo, corriente óptima, pH óptimo y espesor de 1mm. La turbiedad será el parámetro de evaluación de la altura de tratamiento o altura hidráulica H .

3.7 Análisis de datos

Los datos que se obtendrán en campo por el estudio de los fenómenos hidráulicos y electroquímicos de la unidad de tratamiento serán hechos por los equipos, debidamente calibrados, de turbidímetro portátil HACH, la fuente de poder y el medidor multiparámetro. Luego ser descargados a una ficha Excel para su tratamiento e interpretación mediante tablas de indicadores óptimos y gráficas de curvas de eficiencia de remoción de turbiedad.

Finalmente, se hará un análisis comparativo entre los resultados, los objetivos y la hipótesis.

IV. RESULTADOS

4.1 Respecto del reactor de electrocoagulación

En la tabla 1 se muestra los niveles de los dos tipos de calidades de agua (efluente) que presenta la planta de tratamiento de agua a través del año. A la primera, le llamaremos Tipo I: 48 UNT (próximo a época de estiaje), y Tipo II; 210 UNT (época de avenidas)

Tabla 1

Caracterización fisicoquímica del efluente en dos tipos de calidades

Calidad	Turbiedad (UNT)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alcalinidad (mg/l)
Tipo I	48	8.07	792	110
Tipo II	210	8.21	970	120

También, los valores de los parámetros de diseño que fueron obtenidos mediante pruebas de ensayos con el agua superficial captadas en la toma de la planta de tratamiento para el proceso de la electrocoagulación, son presentados en la tabla 2. El modo de tratamiento de operación del proceso, es decir, el modo por lotes, por gradientes de corriente y el continuo, quedará como forma de funcionamiento, según los resultados, el de modo continuo.

Tabla 2

Parámetros de diseño para el funcionamiento de la unidad de electrocoagulación

Parámetros	Calidad de Agua	
	Tipo A: 48 UNT	Tipo B: 250 UNT
Corriente	3 amperios	3 amperios
Tiempo de tratamiento	15 minutos	15 minutos
Distancia de electrodos	1 cm	1 cm
Número de electrodos	8	8
Material de electrodos	Aluminio	aluminio
Área de electrodos	10x10cm ²	10x10cm ²
pH	Natural	Natural

Definido los parámetros de diseño y la forma de operación, estos servirán para el estudio y comportamiento de la altura hidráulica H o altura de tratamiento para el proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento. Los mejores resultados obtenidos de la altura hidráulica para los 02 tipos de aguas estudiadas se presentan en la tabla 3 y 4.

Tabla 3

Resultados de la altura de tratamiento H para el agua tipo I: 48 UNT, 10 minutos.

Parámetro	Corriente (amperios)		
	3.0 A	3.0 A	4.5 A
H (cm)	26	40	54
Turbiedad (UNT)	17.6	19.4	18.7

Tabla 4

Resultados de la altura de tratamiento H para el agua tipo II: 210 UNT, 10 minutos.

Parámetro	Corriente (amperios)		
	3.0 A	3.0 A	4.5 A
H (cm)	26	40	54
Turbiedad (UNT)	19.7	20.8	40.4

4.1.1 Costo del reactor de la electrocoagulación

Del costo de aluminio:

Precio unitario de plancha de aluminio (1x1500x2500 mm) = 318.0 soles

Cantidad de planchas para el reactor hidráulico EC = 10 unidades

Costo total por uso de aluminio = 318.0 x 10 = 3180.00 soles

Del costo del acrílico:

Costo unitario de plancha acrílica (0.006x1.2x2.4 m²) = 283.0 soles

Área total del reactor hidráulico = 4.52x0.5x2 + 3.51x0.5x2 + 15x0.22x30

$$= 107.03 \text{ m}^2$$

Costo total acrílico = 283.0x107.03 = 10,517.20 soles

Del costo de la energía solar:

Precio unitario de panel de 200 W = 680.0 soles

Batería de acumulación = 1200 soles

Mano de obra por instalación= 200.0 soles

Costo total panel solar= 2080.00 soles

4.1.2 Gasto energético del reactor de electrocoagulación y del uso de panel solar

Respecto del agua tipo I: 48 UNT

- A) Producción energética de 01 panel solar = $200\text{ W} = 0.20\text{ kW}$
- B) Tiempo de radiación solar = 7 horas
- C) Energía generada por el panel solar = $0.2 \times 7 = 1.4\text{ kW.h}$
- D) Potencia usada por la celda de electrocoagulación = $31.2\text{ W} = 0.031\text{ kW}$
- E) Tiempo empleado por el reactor para tratamiento = 13 horas
- F) Energía de Reactor de electrocoagulación= $0.031 \times 13 = 0.403\text{ kW.h}$

Respecto del agua tipo II: 210 UNT

- A) Producción energética de 01 panel solar = $200\text{ W} = 0.20\text{ kW}$
- B) Tiempo de radiación solar = 7 horas
- C) Energía generada por el panel solar = $0.2 \times 7 = 1.4\text{ kW.h}$
- D) Potencia usada por la celda de electrocoagulación = $60.9\text{ W} = 0.061\text{ kW}$
- E) Tiempo empleado por el reactor para tratamiento = 13 horas
- F) Energía de Reactor de electrocoagulación= $0.061 \times 13 = 0.793\text{ kW.h}$

4.2 Costo de obras civiles de las unidades de tratamiento de la planta de agua

Costo del canal de interconexión:

Precio concreto = S/.1012.14

Precio acero = S/.596.31

Precio encofrado = S/. 1431.79

Costo total Canal de concreto = S/. 3040.24

Costo del floculador:

Precio encofrado = S/. 8,699.46

Precio concreto = S/. 11,799.25

Precio acero = S/.8,388.34

Costo total Floculador de concreto = S/. 28,887.05

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Respecto de la evaluación hidráulica de la unidad de electrocoagulación

Con una altura hidráulica de 40 cm, 10 minutos de tratamiento, dimensiones de reactor de 14x22cm², 3amperios, son necesarios para el tratamiento de 12 litros de agua cada 10 minutos. El caudal que puede tratar el reactor de electrocoagulación para estos dos tipos de calidades de agua, sería:

$$Q_R = 12 \text{ litros} / 10 \text{ minutos} = 0.02 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{PLANTA}} = 10 \text{ l/s}$$

Para atender el caudal, que la planta emplea para la producción de agua tratada, se necesitaría:

$$0.02 \text{ l/s} (N) = 10 \text{ l/s}$$

Donde:

N= el número de reactores de electrocoagulación con capacidad de tratar 12 litros de agua superficial.

Entonces: $N = 500$ unidades

Este valor sería inconveniente si quisiéramos construirla y operarla en la planta de agua. Entonces, emplearemos el principio hidráulico de los floculadores de flujo horizontal para pequeños caudales para construir nuestra unidad de electrocoagulación. El principio de funcionamiento de los floculadores hidráulicos de flujo horizontal es que pueden tratar caudales inferiores a 50 l/s, según el Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS/SENCICO, 2006); el comportamiento hidráulico es de flujo pistón, que provoca un buen ajuste del tiempo de retención en el floculador (principios extraídos del Manual II de

diseño del OPS/CEPIS/PUB/04.111, respecto de plantas de tecnología apropiada para Plantas de Filtración Rápida). Estas dos condiciones hidráulicas, permiten entregar al proceso de la electrocoagulación los 10 minutos que necesita para tratar el agua sin necesidad de emplear un gran número de reactores, tratar los 10 l/s que recibe la planta de tratamiento de agua y hacerlo en un área reducida sin necesidad de emplear una mayor área o profundización del terreno si se desearía implementar esta unidad.

Los parámetros y recomendaciones de diseño de las unidades de flocladores de flujo horizontal son presentados en la tabla 5, que sería la hoja de cálculo para la unidad de electrocoagulación empleando los principios hidráulicos de los flocladores de flujo pistón.

Tabla 5

Dimensionamiento del reactor hidráulico de electrocoagulación de flujo horizontal

Parámetros	Principios	Cálculos	Resultados
Ancho de canal: $a=0.14$ m	$a= A/H$	$0.14= A/0.4$	$A=0.056$ m ²
Altura de agua: $H= 0.40$ m			
Ancho de vueltas: d	$d= 1.5xa$	$d= 1.5x0.14$	$d= 0.21$ m
Sección canal: $A=0.056$ m ²	$A= Q/ V$	$0.056= 0.01/ V$	$V= 0.18$ m/s
Caudal: $Q= 0.010$ m ³ /s			
Longitud de canales: l	$l = V \times T \times 60$	$l = 0.18 \times 10 \times 60$	$l = 107.14$ m
Ancho del reactor: B	$B= 15xb + d$	$B= 15 \times 0.22 + 0.21$	$B= 3.51$ m
Número canales: N	$N= l / B$	$N= 107.14/3.51$	$N= 31$ unid.
Longitud reactor: L	$L= N \times a + (N-1) \times e$	$L= 31 \times 0.14 + (31-1) \times 0.006$	$L= 4.52$ m
Espesor acrílico= 0.006 m			
Área total reactor: A_R	$A_R= L \times B$	$A_R= 4.52 \times 3.51$	$A_R= 15.9$ m ²

El dimensionamiento de la unidad de tratamiento de la electrocoagulación tendría un área total efectiva de 15.9 m², en contraste con el área que emplea actualmente las unidades de tratamiento de la planta de agua de Chacrasana. Los valores comparativos de dichas áreas, el del canal de interconexión y del floculador, y la del reactor de la electrocoagulación son presentados en la tabla 6.

Tabla 6

Áreas de las unidades de electrocoagulación, canal de interconexión y floculador

Unidades	Principios	Cálculos	Resultados
Área Canal Interconexión: A _I	A = A _I + A _F	A = 9.70x0.81 +	A = 33.4 m ²
Área de floculador: A _F		3.50x7.30	
Área Reactor EC hidráulico: A _R	A _R = LxB	A _R = 4.52x3.51	A _R = 15.9 m ²

Estos resultados nos pueden dar el valor comparativo entre ambas áreas y encontrar la disminución de las dimensiones entre las unidades de tratamiento, así:

$$\text{Porcentaje de disminución (\% A)} = \frac{(33.4-15.9)}{33.4} \times 100 = 52.4\%$$

Es decir, el construir una unidad de electrocoagulación, con las especificaciones técnicas sugeridas líneas arriba, significaría una disminución del 52% respecto a las áreas de las unidades de mezcla rápida y floculación, conjuntamente.

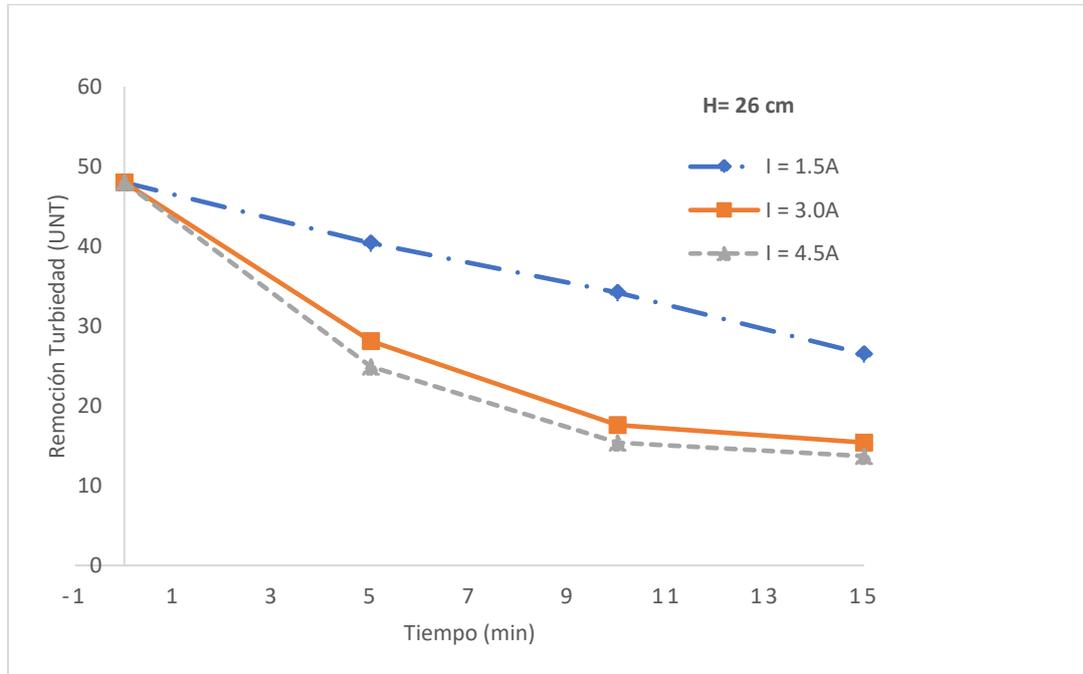
5.2 Respecto de la altura hidráulica H

La altura hidráulica incide inversamente el rendimiento del proceso de la Electrocoagulación. Esta variable hidráulica determina la cantidad de agua que el proceso

puede tratar eficientemente, es decir, que el proceso entregue un efluente con una turbiedad menor o igual a 50 UNT como indica la Norma OS.0.20 del Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS/SENCICO, 2006) respecto al diseño de filtros lentos. Se emplearon corrientes de 1.5, 3.0 y 4.5 A evaluados cada uno en tres cargas hidráulicas de 26, 40 y 54 cm. La calidad del agua del tipo I:48 UNT (figuras 6,7,8) y la de tipo II:210 UNT (figuras 12, 13, 14) muestran como los niveles de remoción, de turbiedad aumenta a medida que aumenta el amperaje en el reactor. También, los mejores resultados de porcentaje de remoción, 90%, del reactor ocurren cuando el proceso utiliza 3A y tiempo de 10 minutos para una carga hidráulica de 40 cm. Es decir, a medida que aumentamos la carga, el proceso puede remover turbiedad por niveles por debajo de 20 UNT: pero superada esta carga el rendimiento empieza descender. Esto ocurre, tanto en el tipo I: 48 UNT (figuras 9, 10, 11) y en el de tipo II: 210 UNT (figuras 15, 16, 17). En general, se obtienen mejores niveles y porcentajes de remoción a medida que aumentamos el amperaje y/o el tiempo de retención; pero habría que considerar el gasto energético y si ya se superó la normatividad de calidad de consumo humano.

Figura 6

Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 26cm

**Figura 7**

Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 40cm

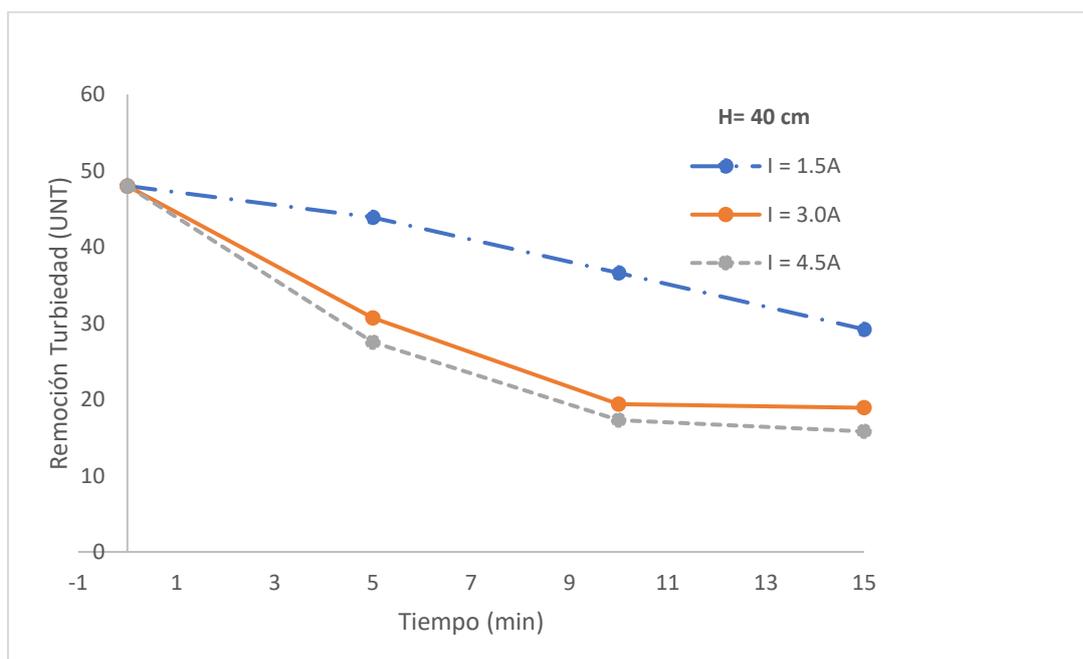
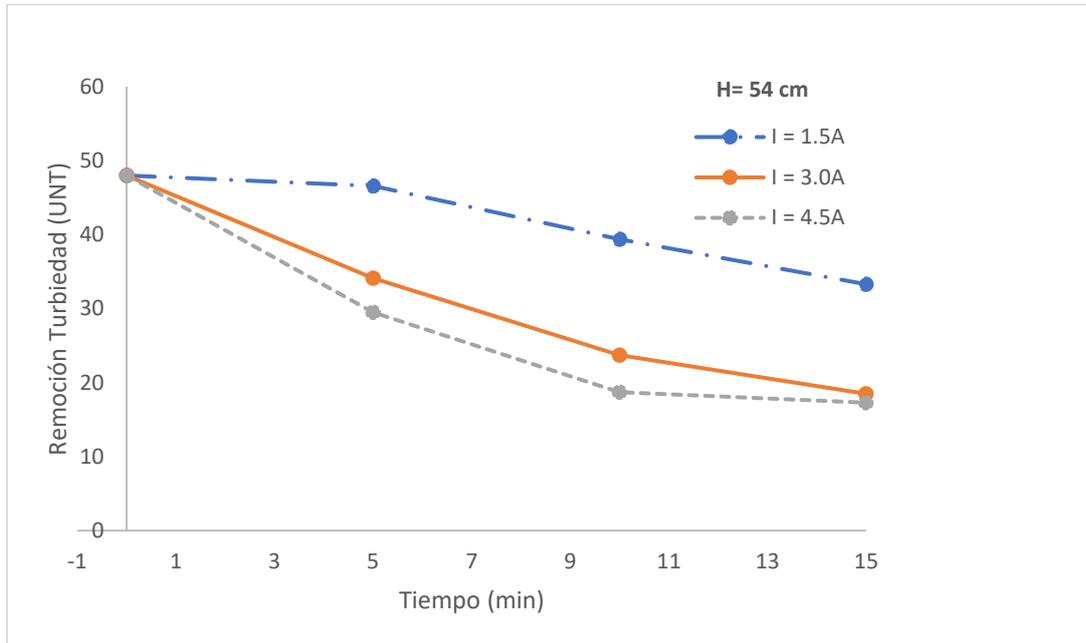


Figura 8

Remoción de turbiedad en el agua Tipo I: 48 UNT a una altura hidráulica de 54cm

**Figura 9**

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 26 cm

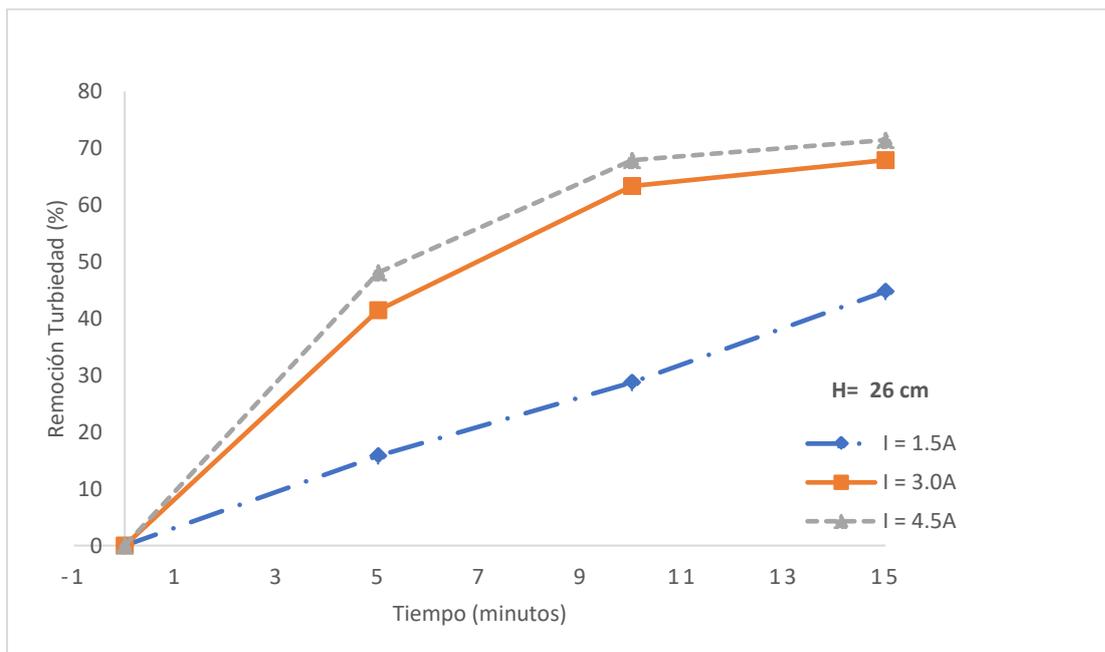
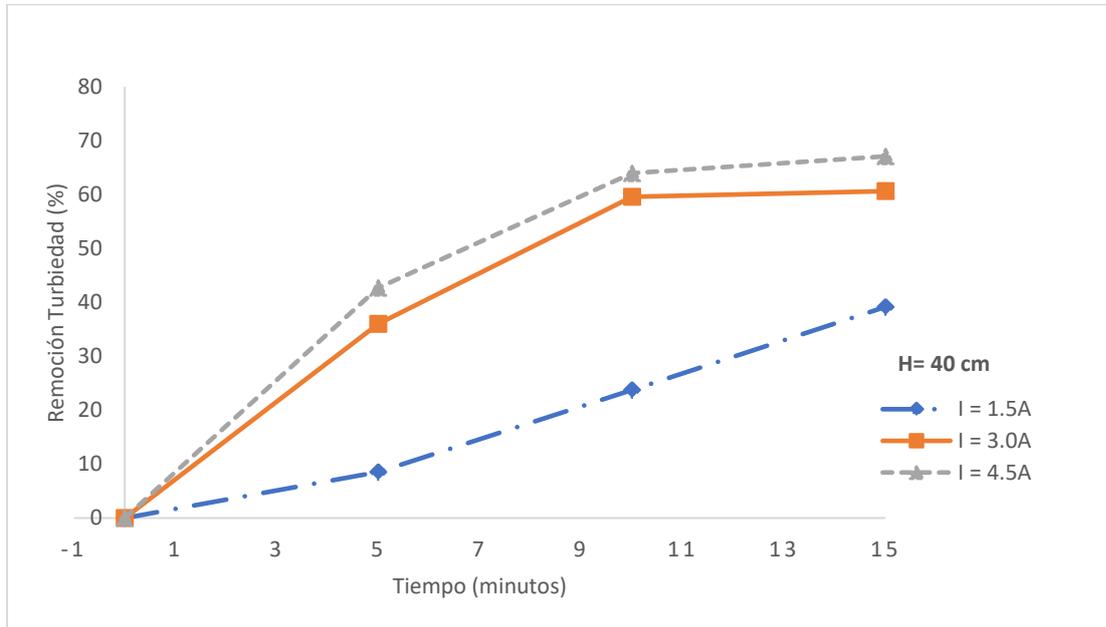


Figura 10

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 40 cm

**Figura 11**

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua tipo I:48 UNT, altura hidráulicas 54 cm

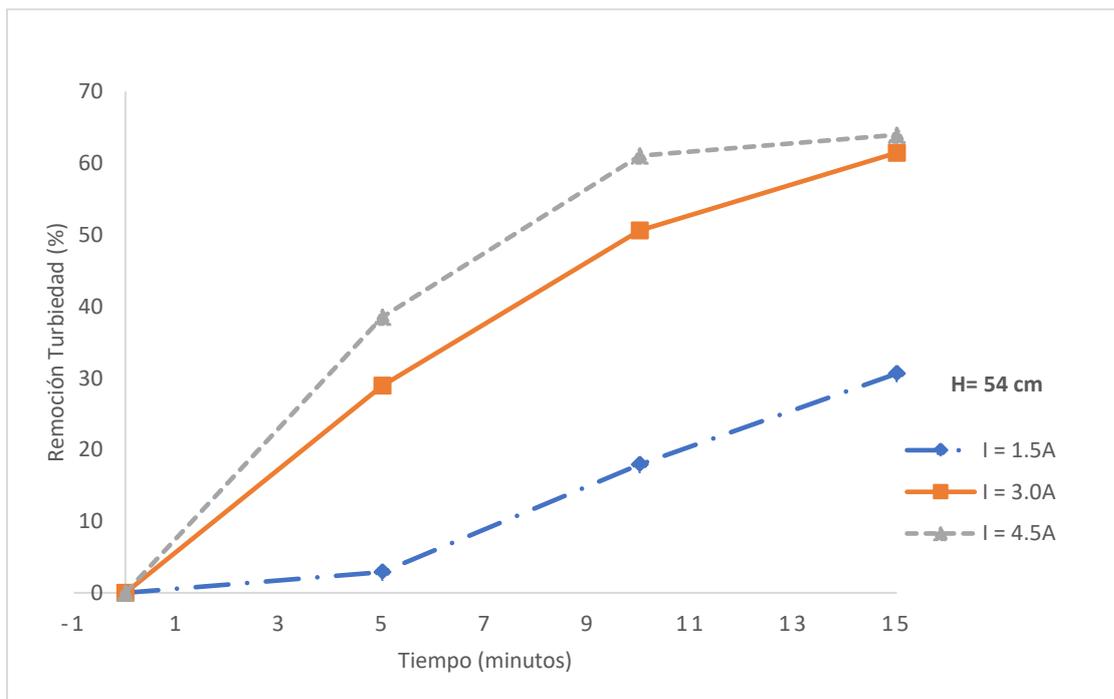
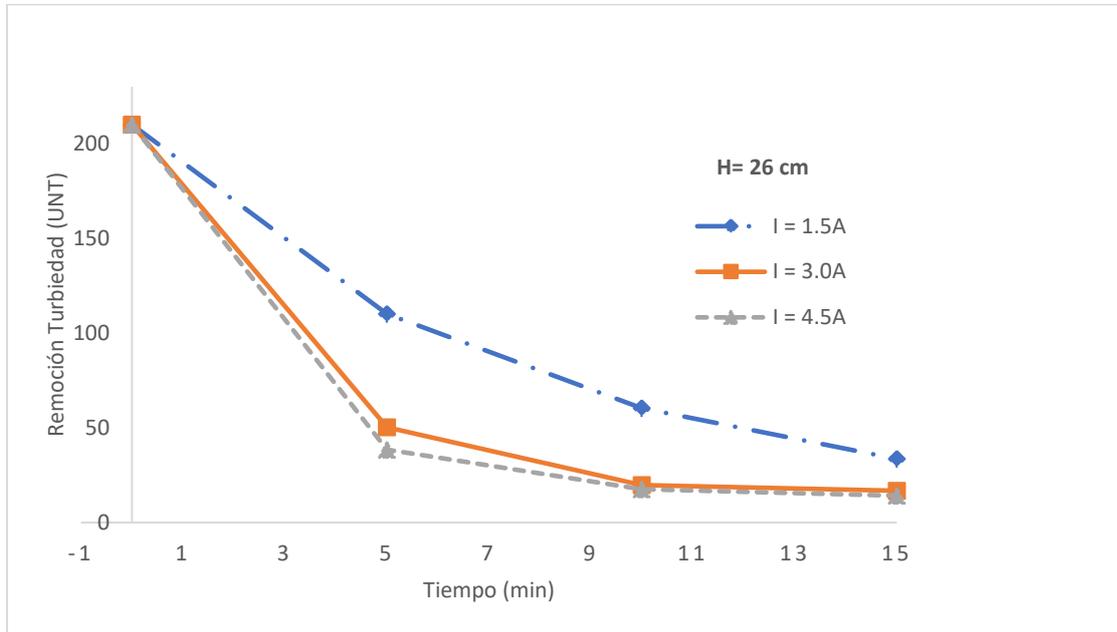


Figura 12

Remoción de turbiedad, Agua Tipo II:210 UNT, altura hidráulica = 26 cm

**Figura 13**

Remoción de turbiedad, Agua Tipo II:210 UNT, altura hidráulica = 40 cm

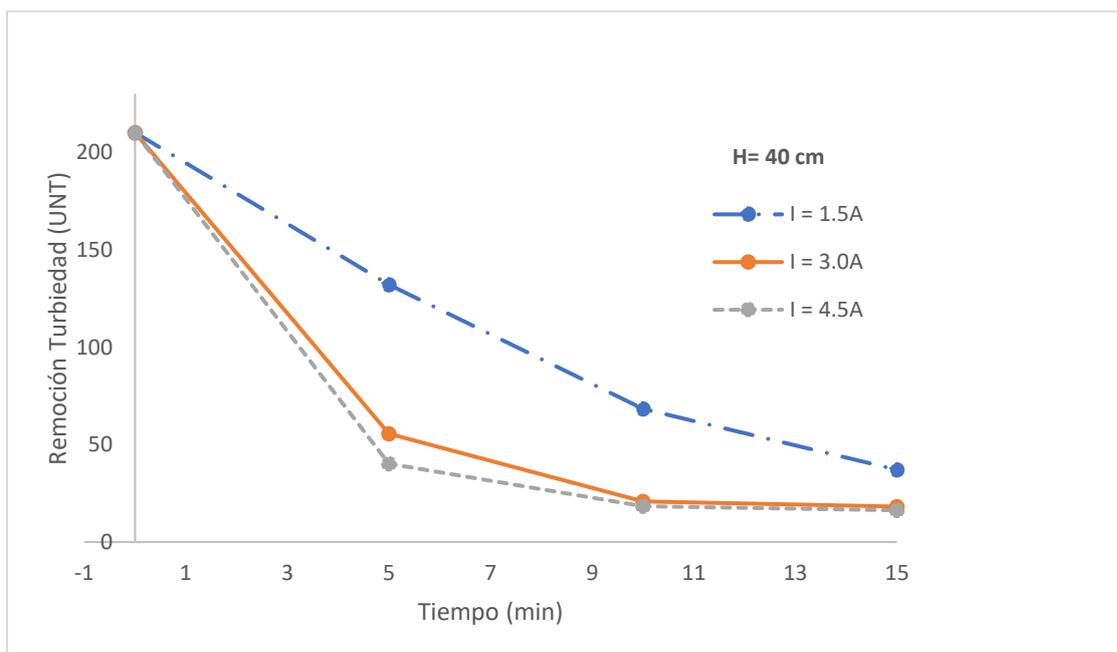
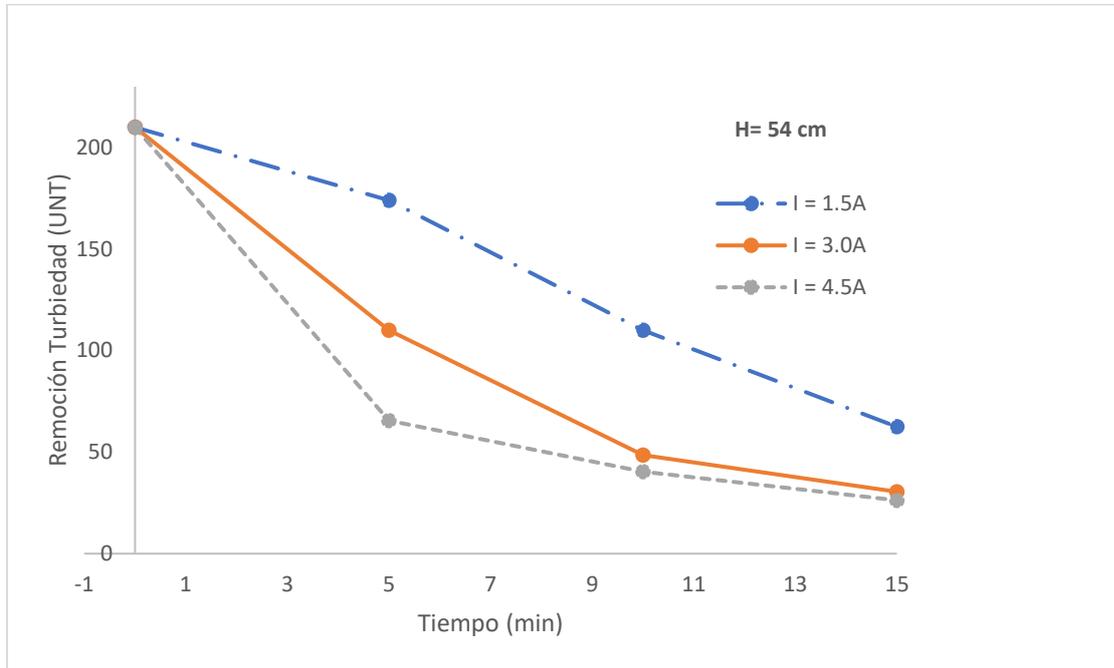


Figura 14

Remoción de turbiedad, Agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica = 54 cm

**Figura 15**

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 26 cm

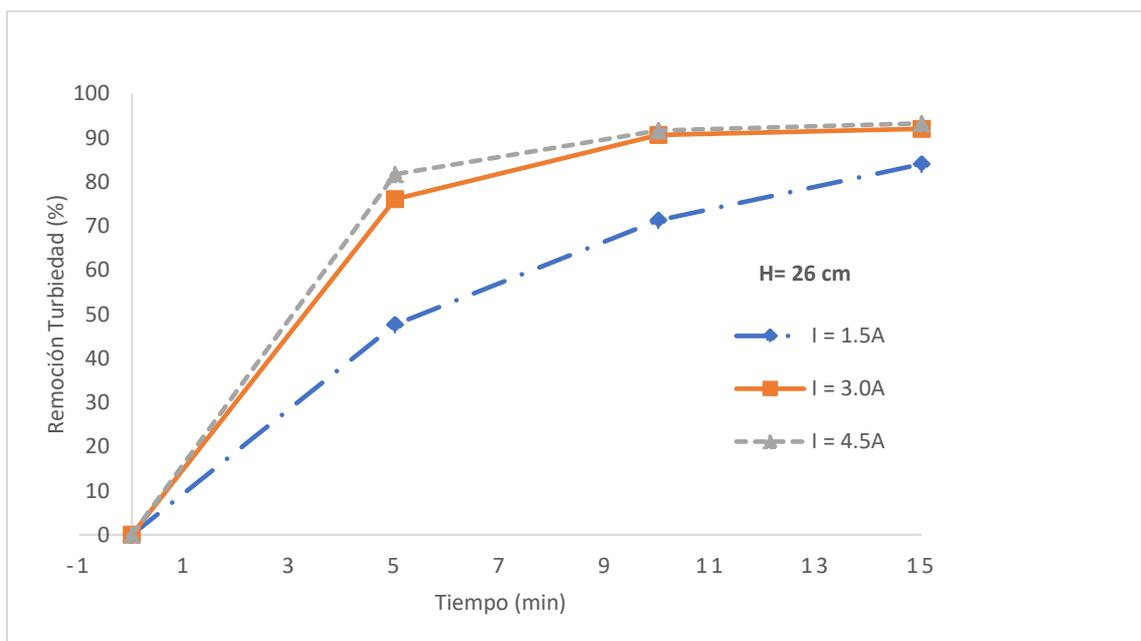
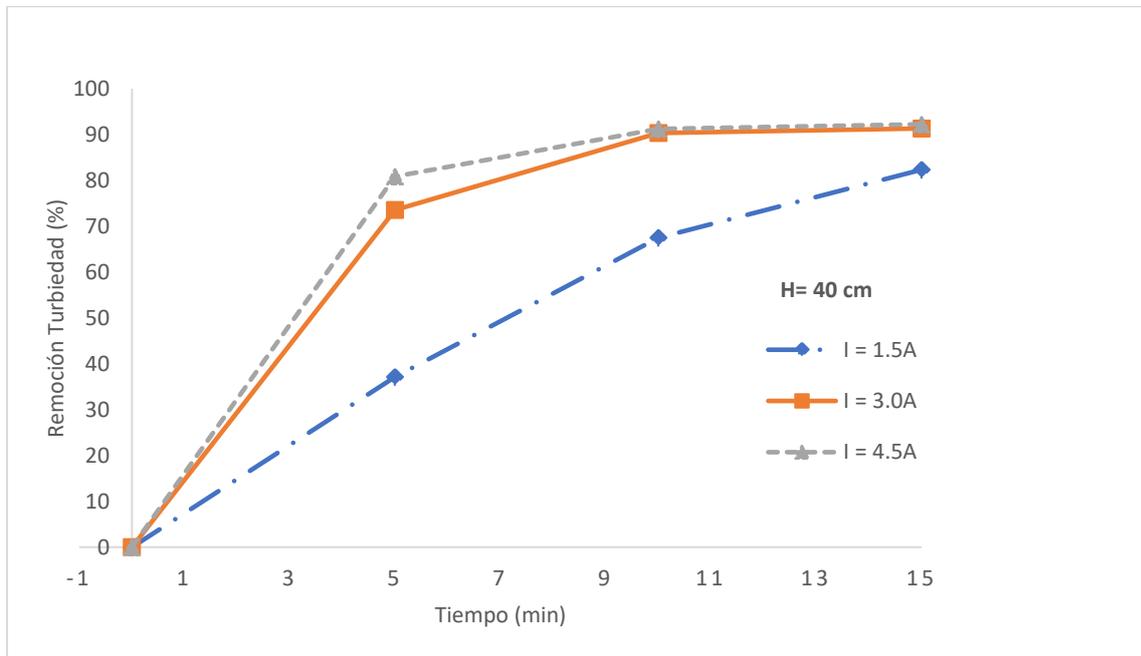
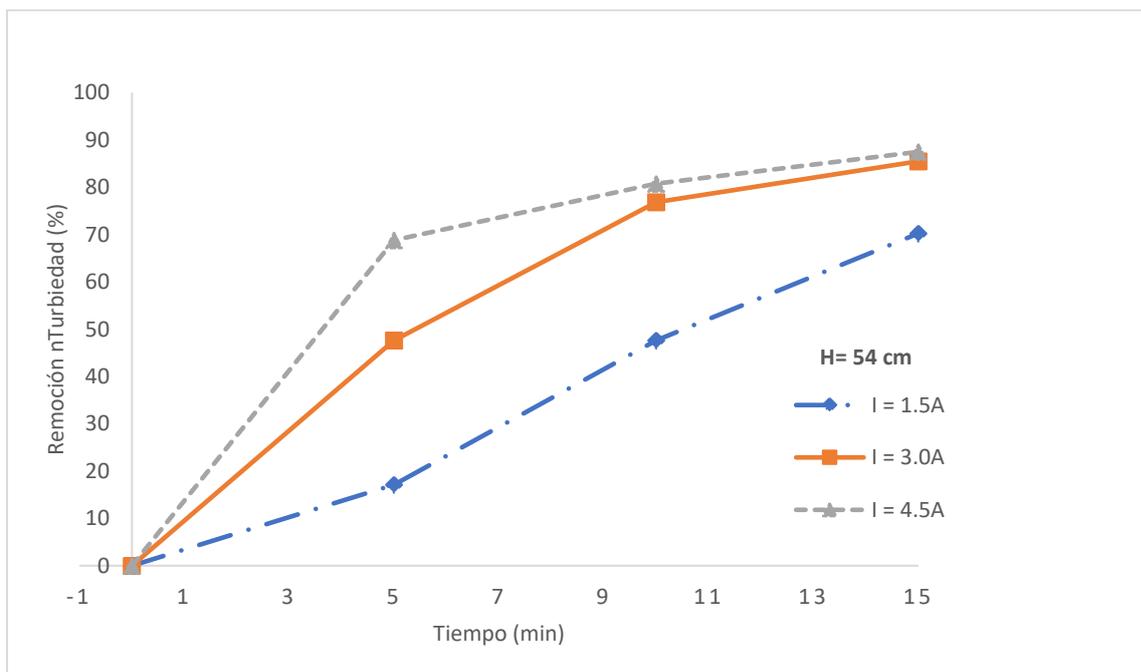


Figura 16

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 40 cm

**Figura 17**

Porcentaje de remoción de turbiedad, agua Tipo II: 210 UNT, altura hidráulica 54 cm



Por lo tanto, con los resultados obtenidos se valida la hipótesis y el objetivo planteados de optimizar plantas de tratamiento de agua de consumo humano: el hallazgo de los niveles de la altura de tratamiento hace que la unidad de electrocoagulación cumpla con la reglamentación nacional (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006), al lograr que remueva turbiedad por debajo de los 20 UNT , en 20 minutos, en comparación al de la unidades convencionales de mezcla rápida y floculación, 30 minutos, que posee la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana.

5.3 Respetto de los parámetros de diseño de la electrocoagulación

Los 3 amperios que utiliza el sistema de la electrocoagulación para los dos tipos de calidades de agua, 48 UNT y 250 UNT es un nivel alcanzado para una altura hidráulica óptimo de 40 cm y obteniendo una remoción de turbiedad de hasta 20.8 UNT en el caso más desfavorable que la unidad de electrocoagulación pueda tratar un agua de ingreso a la planta de agua de 250 UNT

Por lo tanto, con los resultados conseguidos se valida la hipótesis y el objetivo de optimizar plantas de tratamiento de agua de consumo humano a partir de los niveles alcanzados por los parámetros de diseño del proceso de electrocoagulación en el cumplimiento de la reglamentación nacional (Reglamento Nacional de Edificaciones del 2006), al lograr que remueva turbiedad por debajo de los 20 UNT , en 20 minutos, 1 cm de distancia entre placas, 8 electrodos de aluminio, corriente óptima de 3amperios y tiempo de tratamiento de 10 minutos por el proceso de la electrocoagulación.

5.4 Respetto de los costos de las unidades de tratamiento

Los materiales para la construcción de la unidad de la electrocoagulación, y del proceso constructivo de las unidades del canal de interconexión y floculador, los costos son presentados

en la tabla 7. Los costos del material acrílico para la unidad de electrocoagulación fueron tomados de la empresa A&N Acrílicos S.A.C., y del aluminio de Inversiones Aguirre E&R S.A.C.

Tabla 7

Costos de las unidades de electrocoagulación, canal de interconexión y floculador.

Costo	Principios	Cálculos	Resultados
Del aluminio: C_{AL}			
Del Acrílico: C_{AC}	$C_1 = C_{AL} + C_{AC}$	$C_1 = 3,180.0 + 10,517.2$	$C_1 = 15,777.2$ soles
Del panel solar: C_{SOL}	$+ C_{SOL}$	$+ 2,080$	
Del Canal Intern.: C_I		$C_2 = 3,040.24 +$	$C_2 = 31,927.3$ soles
Del floculador: C_F	$C_2 = C_I + C_F$	$28,887.05$	

Del reactor de electrocoagulación

Precio del acrílico, plancha de 6x1200x2400 mm: S/. 284.0

Precio del aluminio, plancha de 1x1500x2500 mm: S/.318.0

Del canal de Interconexión:

Precio concreto: S/.1012.14

Precio acero: S/.596.31

Precio encofrado: S/. 1431.79

Costo total Canal de concreto: S/. 3040.24

Del floculador

Precio encofrado: S/. 8,699.46

Precio concreto: S/. 11,799.25

Precio acero: S/.8,388.34

Costo total Floculador de concreto: S/. 28,887.05

Estos resultados nos pueden dar el valor comparativo entre ambos costos y encontrar el ahorro en el uso de emplear una tecnología y la otra, así:

$$\text{Porcentaje de disminución (\% C)} = \frac{(31,927.3 - 15,772.2)}{31,927.3} \times 100 = 50.6\%$$

Es decir, el construir una unidad de electrocoagulación, con las especificaciones técnicas sugeridas líneas arriba, significaría una disminución del costo en 50.6% si desearíamos construir una unidad de electrocoagulación respecto de las unidades de mezcla rápida y floculación.

Por lo tanto, con los resultados obtenidos se valida la hipótesis y el objetivo planteados de optimizar plantas de tratamiento de agua de consumo humano: la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación produjo que pueda ser una unidad geoméricamente compacta de flujo pistón, el hallazgo de los costos constructivos y energéticos de la unidad de electrocoagulación, son comparativamente mejores que el de las unidades de la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana en el caso si se quisiera construirse.

VI. CONCLUSIONES

- La evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación dio como resultados que tiene un comportamiento de unidad de tratamiento para la planta de agua de la comunidad de Chacrasana, su funcionamiento posee los principios de un floculador hidráulico de flujo horizontal, de geometría rectangular, en reemplazo de una unidad de electrocoagulación de varios reactores planteado inicialmente. El flujo de agua recorre canales rectangulares en forma de serpentín provocando que se pueda tratar mayor cantidad de volúmenes de agua sin aumentar considerablemente las dimensiones de la unidad de tratamiento y el tiempo de retención. La evaluación hidráulica permite conocer que el proceso de la electrocoagulación es flexible en tratar calidades de agua superficial en un rango amplio de turbiedades que va desde 48 a 210 UNT sin cambios operacionales, cumpliendo con la reglamentación nacional, y empleando un mínimo aumento energético.
- La evaluación hidráulica muestra que la unidad de tratamiento de electrocoagulación puede construirse al mostrar resultados más económicos que el de los procesos constructivos del canal de interconexión y del floculador. Finalmente, de toda la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación se ha encontrado que puede sustituir varias unidades de tratamiento en la planta de agua de la comunidad de Chacrasana porque hace el trabajo de las unidades de mezcla rápida y floculación simultáneamente, incluso, la del sedimentador si se plantea diseñar la unidad de electrocoagulación para ello.

- La altura hidráulica para el proceso de la electrocoagulación representa, según los resultados, un fenómeno inverso a la eficiencia, ver figuras 18 y 19. Es decir, a medida que va aumentando la columna de agua de tratamiento, la eficiencia va decayendo y provocando que la calidad del efluente también disminuya, pero soportando una altura hidráulica de hasta 40 cm, nivel en donde el proceso de la electrocoagulación produce un efluente de hasta 20 UNT. El tiempo de retención es similar para ambas calidades de agua superficial, esto significa, que puede recibir diversos tipos de calidades de agua superficial en un margen amplio de turbiedades sin necesidad de modificar los parámetros de operación de la unidad de electrocoagulación desde aguas claras, como el de tipo I: 48 UNT, hasta una turbiedad alta para la planta de agua como la de tipo II: 210 UNT, permitiéndole ser flexible a las variaciones de la turbiedad y sin emplear un mayor gasto energético.

Figura 18

Porcentaje de Remoción de turbiedad vs. la altura hidráulica de tratamiento. 48 UNT

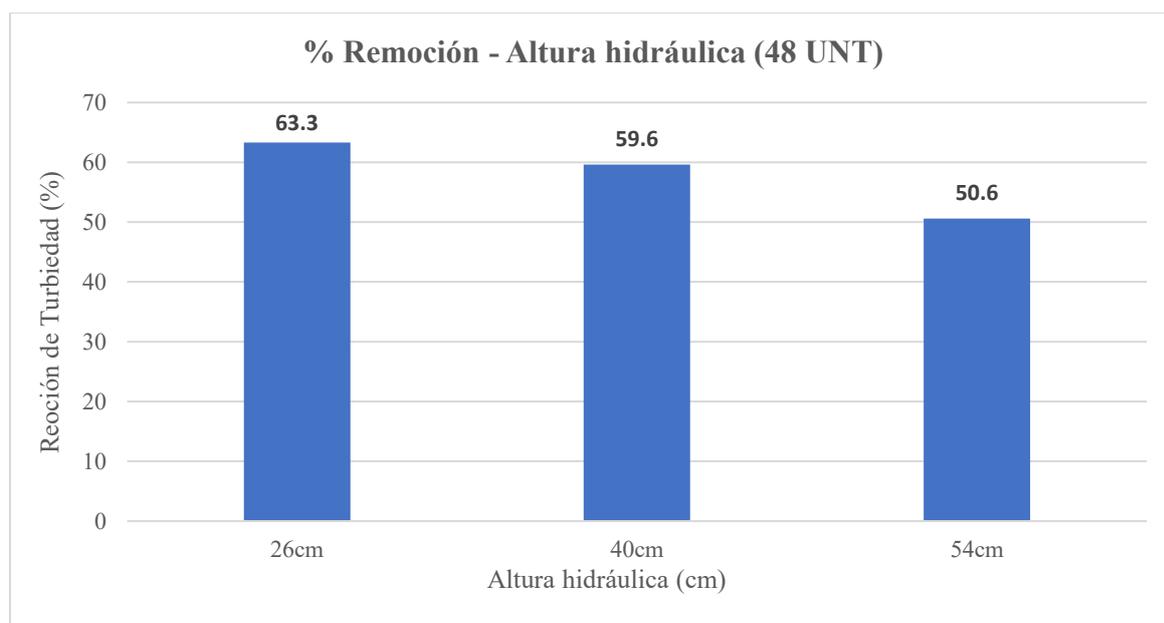
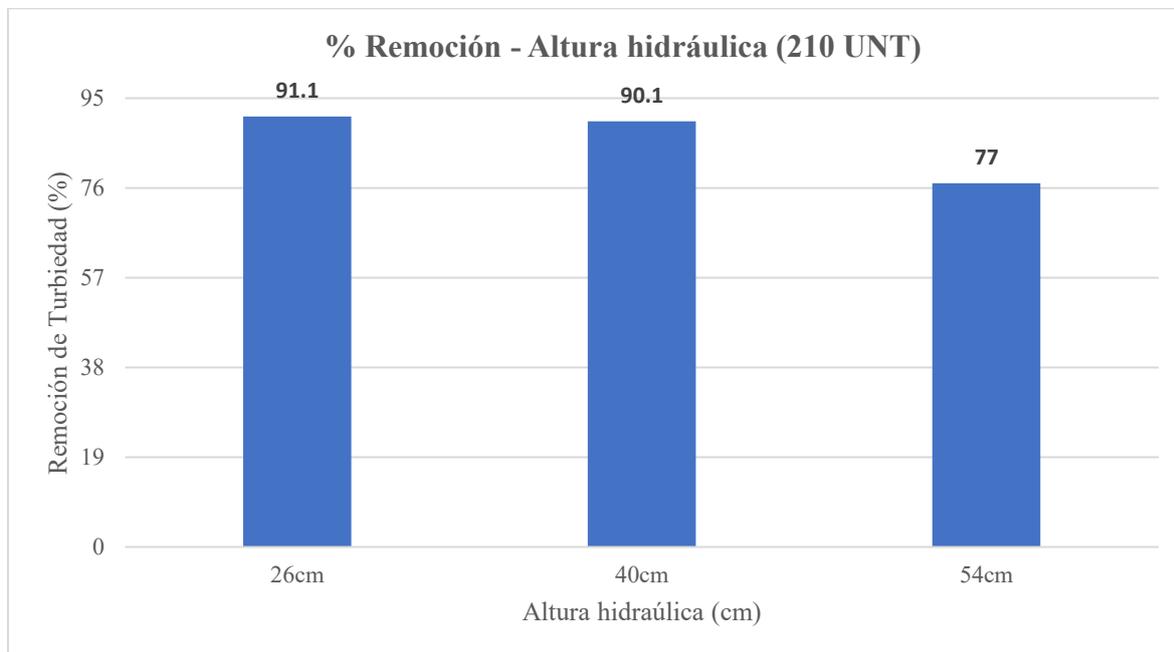


Figura 19

Porcentaje de remoción de turbiedad vs. la altura hidráulica de tratamiento. 210 UNT



- Los parámetros de diseño de operación de la electrocoagulación (tabla 8) como unidad de tratamiento logra la optimización de la planta de tratamiento de agua para consumo humano de la comunidad de Chacrasana, acorde al Reglamento Nacional de Edificaciones, RNE – OS.020 y son representativos para un rango de calidades de agua superficial amplio que va desde 48 UNT hasta 210 UNT (el límite más máximo de turbiedad en el agua superficial que la planta de agua de la comunidad puede recibir para su correcto funcionamiento es de 250 UNT), lo cual asegura la eficiencia del proceso de tratamiento para entregar un agua de consumo a la población acorde al Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano de DIGESA, DS N°031 – 2010 – SA.

Tabla 8*Parámetros de diseño de operación de la unidad de electrocoagulación*

Parámetros	Calidad de Agua	
	Tipo A: 48 UNT	Tipo B: 210 UNT
Corriente	3 amperios	3 amperios
Tiempo de tratamiento	10 minutos	10 minutos
Distancia de electrodos	1 cm	1 cm
Número de electrodos	8	8
Material de electrodos	Aluminio	Aluminio
Área de electrodos	10x10cm ²	10x10cm ²
pH	Natural	Natural
Altura hidráulica (cm)	40 cm	40 cm

- El proceso de la electrocoagulación no emplea insumos químicos para la remoción de turbiedad y necesita de 10 minutos de retención hidráulica para asegurar la remoción de la turbiedad, entregando un efluente de buena calidad que significará el correcto funcionamiento del filtro lento. También, se podrá prescindir del canal de interconexión y de la unidad de floculación, en su reemplazo se podría colocar la unidad de electrocoagulación que representa una reducción del 52.4% del área inicial (figura 20) entre el canal de interconexión y el floculador. Los costos del proceso constructivo de la unidad de electrocoagulación representan una reducción del costo del 50.6 % (figura 21) respecto del costo del canal de interconexión y el floculador. El gasto energético que emplea el proceso de la electrocoagulación puede ser atendido por la fuente de energía solar que es transformado por las celdas fotovoltaicas de un panel solar en

energía eléctrica, y cuyo costo resulta en 2080.00 soles. Por lo tanto, el costo constructivo y energético de la unidad de tratamiento de la electrocoagulación es beneficioso para la optimización para la planta de tratamiento de agua de la comunidad de Chacrasana.

Figura 20

Área instalada de la unidad de electrocoagulación, floculador y canal de interconexión.

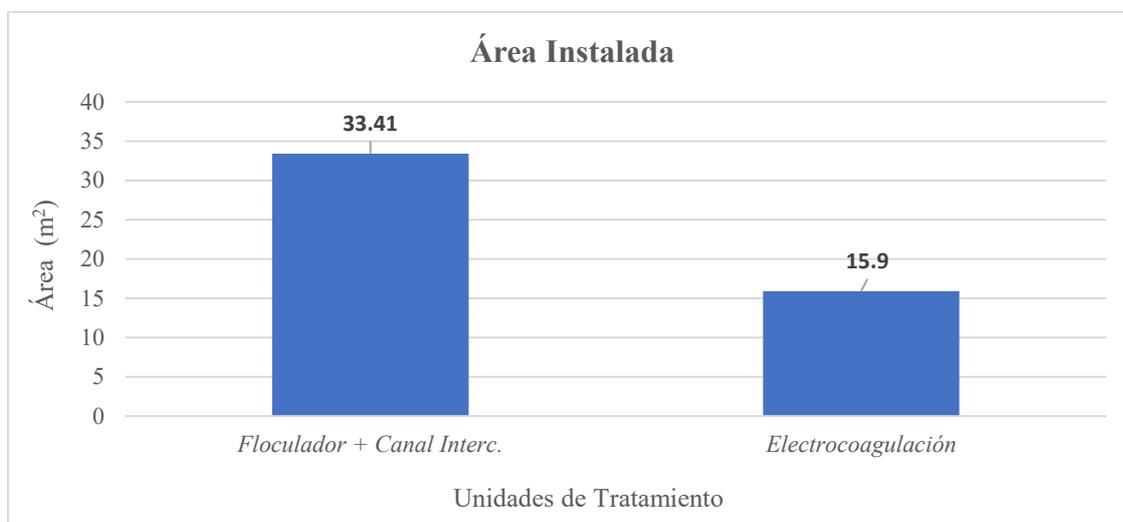
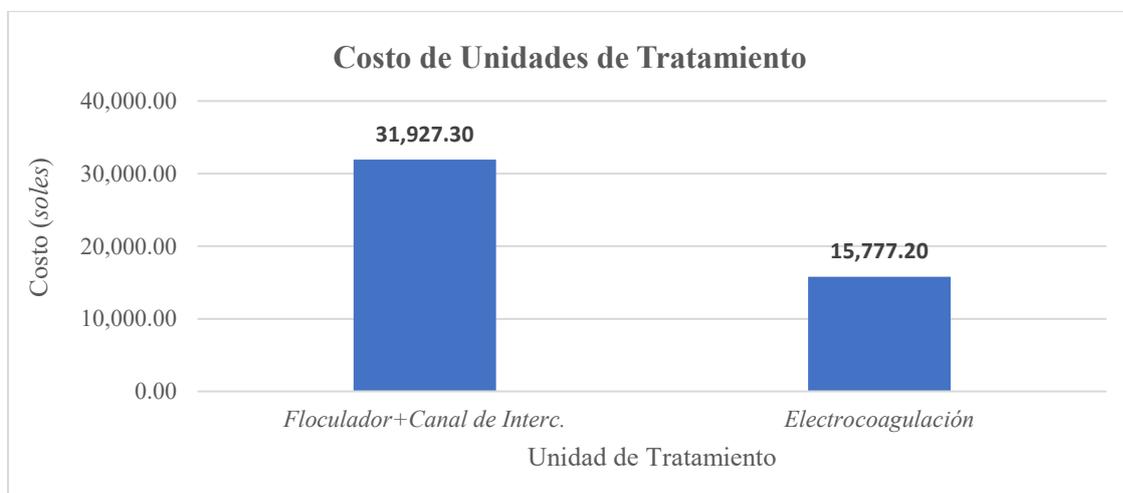


Figura 21

Costo de la unidad de electrocoagulación, floculador y canal de interconexión



VII. RECOMENDACIONES

- Considerar, con los resultados obtenidos de la evaluación hidráulica, que el proceso de la electrocoagulación: puede ser destinado como un proceso de tratamiento de aguas para consumo humano. Presenta ventajas comparativas respecto a otros procesos de tratamiento convencionales, como en los resultados en la investigación de Aguilar en el 2014 sobre la eficiencia del proceso de la electrocoagulación en el tratamiento del agua del río Rímac, tiempo de retención entre 10 a 15 minutos y niveles de remoción entre 20 y 25 UNT. También, lograr la investigación cuando la unidad de tratamiento por el proceso de la electrocoagulación pueda hacer el trabajo simultáneo de las unidades de mezcla rápida (dosificación de coagulante), floculación (formación de flóculos) y decantación (sedimentación de las partículas floculentas).
- La altura hidráulica de tratamiento de la unidad de tratamiento debería ser estudiado para niveles mayores de turbiedad del agua superficial para conocer el alcance y los niveles máximos que puede lograr el proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento de aguas. También, involucra el estudio de la eficiencia del proceso cuando se logre el tratamiento de aguas superficiales con caudales superiores a los 10 l/s, y así, determinar si el proceso de la electrocoagulación puede ser útil a la planta de agua como unidad de tratamiento, atendiendo medianas y grandes poblaciones.
- Respecto de los parámetros de diseño de la electrocoagulación en la evaluación del proceso para la optimización de planta de tratamiento de la comunidad de Chacrasana, se plantea que este debe ser a lo máximo de 20 UNT la calidad del efluente tratado por la electrocoagulación. El Reglamento Nacional de Edificaciones del 2006, norma OS.020, sugiere que la turbiedad del agua superficial, previamente sedimentada o

prefiltrada, no exceda los 50 UNT al ingreso del filtro lento; pero para el filtro lento de la planta de agua de la comunidad de Chacrasana ese valor le ha ocasionado problemas de operación y en la calidad del agua para su consumo porque no lo puede tratar eficientemente por largos períodos. Por lo tanto, se sugiere que la calidad de agua cruda que recibirá el filtro no exceda de 20 UNT, tal como lo sugiere el Ing. Maldonado en el libro Tratamiento de Aguas para Consumo Humano, Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada, publicado en el 2004. Este valor también es asumido por el Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA, 2014) del gobierno de Argentina, que, en sus consideraciones técnicas para conseguir óptimos resultados de la unidad de filtración lenta convencional, debe ingresar una turbiedad promedio del agua no superior de 20 UNT.

VIII. REFERENCIAS

- Aguilar, E. (2014). *Viabilidad del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua del río Rímac*. Universidad de Lima. http://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/ulima/2080/Aguilar_Ascon_2014.pdf?sequence=1
- Cadavid, J. (2006). *Hidráulica de Canales: Fundamentos*. Fondo Editorial Universidad EAFIT
- Du, X., Zhao, W., Wang, Z., Ma, R., Luo, Y., Wang, Z., Sun, O. y Liang, H. (2021). Rural drinking water treatment system combining solar-powered electrocoagulation and a gravity-driven ceramic membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119383>
- Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (2014). *Sistemas de Tratamiento de Potabilización de Agua, Capítulo VII. Selección del Sistema de Tratamiento, Filtración Lenta*, <https://vdocuments.mx/enohsa-sistemas-tratamiento-potabilizacion-de-agua-5620213ca83eb.html>
- French, R. (1985). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw–Hill
- Howe, K.J., Hand, D.W., Crittenden, J.C., Trussell, R. y Tchobanoglous, G. (2017). *Principios del Tratamiento del Agua*. CENCAGE Learning.
- Kobyas, M., Gebologlu, U., Ulu, F., Oncel, S. y Demirbas, E. (2011). Removal of arsenic from drinking water by the electrocoagulation using Fe and Al electrodes. *Electrochimica Acta*, 56(14). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.086>
- Kumari, S. y Kumar, R. N. (2020). River water treatment using electrocoagulation for removal of acetaminophen and natural organic matter. *Chemosphere*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128571>

- Llanos, J., Cotillas, S., Cañizares, P. y Rodrigo, M. (2016). Electrocoagulation as a key technique in the integrated urban water cycle – A case study in the centre of Spain. *Urban Water Journal*, 6(14). <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223322>
- Maldonado, V. (2004). *Capítulo 7. Sedimentación*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/siete.pdf>
- Masters, G. M. y Ela, W. P. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Pearson Prentice Hall.
- Mihelcic, J. y Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, sustentabilidad, diseño*. Alfaomega.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y Servicio de Capacitación para la Industria de la Construcción (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones. DS N° 011-2006- VIVIENDA. Norma OS.020, Plantas de tratamiento de agua para consumo humano*.
<https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/viviendayurbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Orescanin, V., Kollar, R., Nad, K. y Mikulic, N. (2013). Preparation of drinking water used in water supply systems of the towns Zrenjanin and Temerin by electrochemical methods. *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 48(4), 437-445, <http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2013.729896>
- Organización Panamericana de la Salud y Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada*.
https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual2/ma2_cap3.pdf

Perozo, J. y Abreu, R. (2019). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable, *Química Viva*, 16(1), 56-69.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86351157005>

Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C.A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A. y García-Espinoza, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257-271.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S166527382011000200010&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S166527382011000200010&lng=es&tlng=es)

Romero R. J. (1999). *Potabilización del Agua*. Alfaomega Grupo Editor.

https://www.academia.edu/43327791/Romero_Rojas_Jairo_Alberto_Potabilizaci%C3%B3n_Del_Agua

Saldarriaga, J. (1998). *Hidráulica de Tuberías*. Mc Graw-Hill

Solis-Silvan, R., Laines-Canepa, J. y Hernández-Barajas, J. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista. Internacional. Contaminación Ambiental*. 28 (3), 229-236. <https://www.researchgate.net/publication/262746203>

Villón, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. Editorial Villón

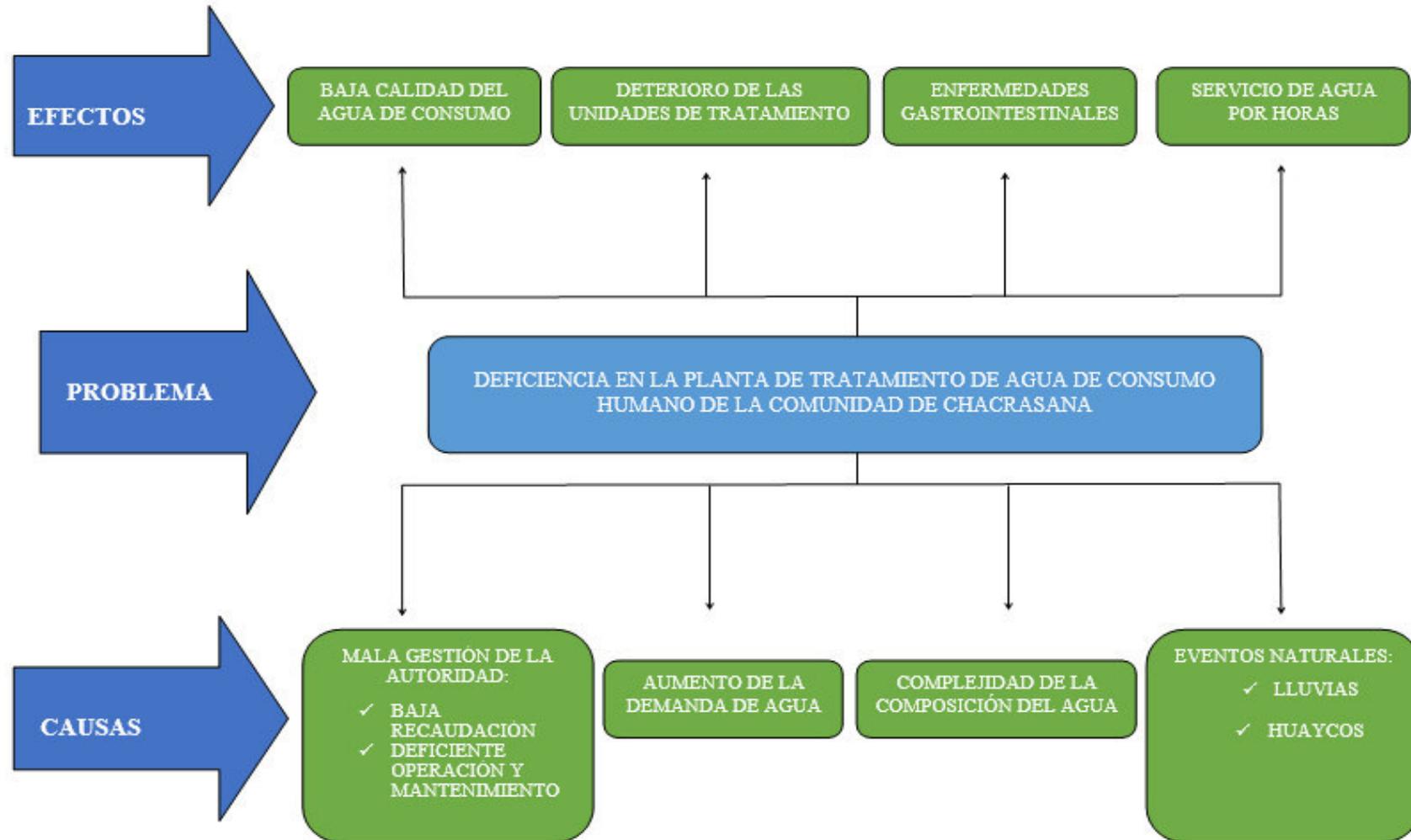
ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿Cuál es el efecto de la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>a) ¿Cuál es el efecto de la altura hidráulica de operación del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica?</p> <p>b) ¿Cuál es el efecto de los parámetros de diseño del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica?</p> <p>c) ¿Cuál es el efecto de los costos constructivos y energéticos del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Determinar la evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>a) Determinar la altura hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>b) Determinar los parámetros de diseño del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>c) Determinar los costos constructivos y energéticos del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento en la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento servirá para la optimización de plantas de tratamiento de agua para consumo humano. Caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>a) La determinación de la altura hidráulica de operación del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento optimizará plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>a) La determinación de los parámetros de diseño del proceso de la electrocoagulación como unidad de tratamiento optimizará plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica.</p> <p>c) La determinación de los costos constructivos y energéticos optimizará plantas de tratamiento de agua para consumo humano, caso comunidad de Chacrasana, distrito de Chosica</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación. <p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Optimización de planta de tratamiento de agua para consumo humano <p>VARIABLE INTERVINIENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Turbiedad (UTN) • Tiempo de retención (minutos) • Temperatura (°C) • Distancia entre electrodos (cm) • Material del electrodo. • Número de electrodos • Área del electrodo (cm²) • Corriente (A) • pH del agua residual 	<p>Tipo de Investigación: Investigación cuantitativa aplicada no experimental: por el propósito de la investigación, naturaleza del problema y de los objetivos planteados. Investigación aplicada: aporte técnico y opción a aplicarse en la ingeniería.</p> <p>Nivel de investigación: La primera parte será investigación descriptiva, después investigación explicativa y luego la investigación causal comparativa.</p> <p>Metodología de la investigación: Cuantitativo. Desarrollada sobre la definición del problema, la medición, el análisis, la conclusión, la mejora y el control de las variables.</p> <p>Diseño de Investigación: Se modificará y controlará las variables independientes y se medirá sus efectos sobre las variables dependientes.</p> <p>Población: La población de esta investigación está definida por las plantas de tratamiento de Chosica.</p> <p>Muestra: La muestra está conformada por la planta de tratamiento de agua para consumo humano de la comunidad de Chacrasana en Chosica.</p>

ANEXO B. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Ítem	Fuente del ítem	Técnica e instrumentos	
Variable independiente Evaluación hidráulica del proceso de la electrocoagulación	Estudio que determina la comprensión de los factores hidráulicos para una correcta operación del proceso (Du et al., 2021)	Ámbito interno de la planta de tratamiento de agua superficial	Sentido del flujo	El flujo horizontal favorece la eficiencia	Piña et al. (2011)	Tipo de Investigación Aplicada Alcance de la investigación Causal comparativa Diseño de Investigación cuantitativo continua Población plantas de tratamiento de Chosica Muestra planta de tratamiento de agua para consumo humano de la comunidad de Chacrasana en Chosica Técnica medición Instrumento tablas	
			Espacio entre placas	Canales múltiples disminuye la velocidad			
			Geometría de la unidad	La altura de tratamiento de mayor eficiencia			
Variable dependiente Optimización de planta de tratamiento de agua para consumo humano	Técnica en alcanzar los mejores niveles de eficiencia en consonancia con los componentes de un proceso (Llanos et al., 2016)	Remoción de turbiedad	Porcentaje de remoción de turbiedad	¿Cuánto es el porcentaje de remoción de turbiedad en tiempo de lluvias?	Du et al., (2021)		
			Disminución de área de la unidad	Porcentaje de disminución de área de la unidad			¿Cuál es el porcentaje de disminución de área de la unidad?
			Disminución del costo de la unidad	Porcentaje de disminución del costo de la unidad			¿Cuál es el porcentaje de disminución del costo de la unidad?

ANEXO C. ÁRBOL DEL PROBLEMA



ANEXO D.

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Respecto de la Corriente Óptima

Los parámetros de operación de la EC a través de la corriente, son definidos en la tala 1, y los resultados de los ensayos del comportamiento de las corrientes de 1.5, 3 y 4.5 amperios en el lapso de tiempo de 20 minutos para un agua tipo II: 210 UNT, nivel propio de la época de avenidas o de lluvias, en las tablas 2, 3 y 4. El ensayo de mejor remoción de la turbiedad en el tiempo de 20' es presentado en las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 1

Parámetros de Operación de EC para la Corriente Óptima – Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros de Operación	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen de tratamiento	4 litros		
Nº placas		08	
Material		aluminio	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Tiempo tratamiento			20 minutos
Amperaje			1.5, 3.0 y 4.5 A

Tabla 2

Ensayos de EC para 1.5 A. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
1° (UNT)	223	205	210	180	134	68.9
2° (UNT)	230	208	203	175	145	70.6
3° (UNT)	242	221	222	183	128	62.7

Tabla 3

Selección de Mejor Remoción de Turbiedad para 1.5 A. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
(UNT)	242	221	222	183	128	62.7

Tabla 4

Ensayos de EC para 4.5 A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
1° (UNT)	139	102	98.3	28.4	22.5	18.6
2° (UNT)	148	93.1	90.8	26.1	20.5	17.8
3° (UNT)	136	109	106	30.8	23.9	20.4

Tabla 5

Selección de Mejor Remoción de Turbiedad para 1.5 A. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
2° (UNT)	148	93.1	90.8	26.1	20.5	17.8

Tabla 6

Ensayos de EC para 4.5 A. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
1° (UNT)	90.5	30.4	27.8	19.6	17.8	16.5
2° (UNT)	95.1	45.6	26.2	21.3	19.6	19.3
3° (UNT)	88.4	51.9	31.8	22.7	20.5	18.6

Tabla 7

Selección de Mejor Remoción de Turbiedad para 4.5 A. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	8'	9'	10'	15'	20'
1° (UNT)	90.5	30.4	27.8	19.6	17.8	16.5

De los resultados de las tres corrientes evaluadas, se elegirá el de mayor remoción, y ocurre para 4.5 A, ver tabla 8. Además, se consigue la remoción de turbiedad a los 10 minutos, y el nivel de remoción alcanza un valor menor de 20 UNT, nivel que es indispensable lograr en las unidades de tratamiento previo al filtro lento.

Tabla 8

Resumen de Remoción de Turbiedad (UNT) – 1.5, 3.0 y 4.5 A'. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	1.5A	3.0 A	4.5A
10'	183	26.1	19.6
20'	62.7	17.8	16.5

Respecto del Material de los Electrodo

Los parámetros de operación de la EC, respecto de tipos de electrodos, son definidos en la tabla 9, y los resultados de los ensayos para un agua tipo II: 210 UNT, se muestran en las tablas 10 y 12. La mejor remoción de turbiedad son presentados en las tablas 11 y 13.

Tabla 9

Parámetros de Operación. Estudio de los Electrodo – Agua Tipo II: 210 UNT.

Parám. Operac.	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		08	
Material		Al – Fe, Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Tiempo Trat.			20 minutos
Amperaje			4.5A

Electrodos de Aluminio – Fierro:**Tabla 10***Ensayos de la EC para Al – Fe, 4.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.3	40.2	26.1	22.5
2° (UNT)	86.1	56.3	30.9	25.6
3° (UNT)	77.6	39.4	29.6	23.5

Tabla 11*Selección de Mejor Remoción de Turbiedad para Al – Fe. Agua tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.3	40.2	26.1	22.5

Electrodos de Aluminio – Aluminio:**Tabla 12***Ensayos de la EC para Al – Al, 4.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	85.8	21.5	18.6	17.4
2° (UNT)	90.4	25.2	20.7	18.1
3° (UNT)	80.3	18.6	17.5	16.2

Tabla 13

Mejor Remoción de Turbiedad para Al – Al. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	80.3	18.6	17.5	16.2

Respecto a la Distancia Entre Electrodo

Los parámetros de operación de la EC, de la distancia entre electrodos, son definidos en la tala 14, los resultados de remoción de turbiedad para un agua tipo II: 210 UNT, se muestran en las tablas 15,17 y 19. La mejor remoción de turbiedad para las tres distancias entre electrodos son presentados en las tablas 16, 18 y 20.

Tabla 14

Parámetros de Operación. Distancia entre Electrodo. EC– Agua Tipo I: 210 UNT.

Parámetros de Operación	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
N° placas	08		
Material	Al – Al		
Espesor	1 mm		
Área de placas	10x10 cm ²		
Distancia de placas	0.5, 1.0 y 1.5 cm		
Tiempo tratamiento	20 minutos		
Amperaje	4.5A		

Distancia de 0.5 cm:**Tabla 15**

Ensayos para la distancia entre electrodos de 0.5 cm. Agua Tipo I: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	82.6	49.1	33.9	29.6
2° (UNT)	79.2	45.4	31.0	26.3
3° (UNT)	91.9	41.5	29.7	22.8

Tabla 16

Mejor Remoción de Turbiedad. Distancia 0.5 cm. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	91.9	41.5	29.7	22.8

Distancia de 1.0 cm:**Tabla 17**

Ensayos para la distancia entre electrodos de 1.0 cm. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.6	20.7	18.5	17.4
2° (UNT)	85.8	21.1	20.7	19.8
3° (UNT)	80.3	25.6	21.4	19.2

Tabla 18

Mejor Remoción de Turbiedad. Distancia 1.0 cm. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.6	20.7	18.5	17.4

Distancia de 1.5 cm:

Tabla 19

Ensayos para la distancia entre electrodos de 1.5 cm. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	93.7	40.8	34.9	27.2
2° (UNT)	90.6	48.1	30.2	25.3
3° (UNT)	95.9	38.3	27.4	23.1

Tabla 20

Mejor Remoción de Turbiedad. Distancia 1.5 cm. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	95.9	38.3	27.4	23.1

De los resultados obtenidos favorece una distancia de 1.0 cm entre placas para una mejor eficiencia de remoción de turbiedad, ver tabla 21.

Tabla 21

Resultados de Remoción de Turbiedad. Distancia entre placas aluminio. Agua Tipo I: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm
10'	41.5	18.5	38.3
20'	2.8	17.4	23.1

Respecto al número de Electrodo

Los parámetros de operación de la EC para el número de placas son definidos en la tala 22, los resultados de los ensayos de la remoción de turbiedad para un agua tipo II: 210 UNT, se muestran en las tablas 23,25 y 27. La mejor remoción de la turbiedad para las tres distancias entre electrodos son presentados en las tablas 24, 26 y 28.

Tabla 22

Parámetros de Operación. Electrodo para la celda de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros de Operación	Celda	Electrodo	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		06, 08 y 10 unid.	
Material		Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Tiempo tratamiento			20 minutos
Amperaje			4.5A

06 unidades de placas de aluminio:**Tabla 23***Ensayos para la EC con 06 placas de aluminio. Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	98.4	59.8	29.6	24.7
2° (UNT)	101	47.3	33.2	28.6
3° (UNT)	112	38.7	28.4	22.8

Tabla 24*Mejor Remoción de Turbiedad para 06 placas. Agua tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (min)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	112	38.7	28.4	22.8

08 unidades de placa de aluminio:**Tabla 25***Ensayos para la EC con 08 placas de aluminio. Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (min)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	92.1	31.5	20.6	18.5
2° (UNT)	88.3	20.4	18.4	16.9
3° (UNT)	96.0	22.7	20.3	18.7

Tabla 26

Selección de Mejor Remoción de Turbiedad para 08 placas. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (min)	5'	10'	15'	20'
2° (UNT)	88.3	20.4	18.4	16.9

10 unidades de placas de aluminio:

Tabla 27

Ensayos para la EC con 10 placas de aluminio. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (min)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	53.6	22.5	18.5	15.9
2° (UNT)	48.2	20.9	19.7	17.1
3° (UNT)	49.1	19.6	16.8	16.3

Tabla 28

Mejor Remoción de Turbiedad para 10 placas. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	49.1	19.6	16.8	16.3

De los resultados obtenidos favorece para el proceso de la EC usar 08 placas de aluminio, eso implica que emplearemos un mayor consumo energético; pero con una mejora de la calidad de agua tratada, es decir, estaremos cumpliendo con entregar un agua residual menor a 20 UNT a la unidad del filtro, ver tabla 29.

Tabla 29

Resultados de Remoción de Turbiedad. Cantidad de placas. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	04 unid.	06 unid.	08 unid.
10'	38.8	20.4	19.6
20'	22.8	16.9	16.3

Respecto al Área de los Electrodo

Los parámetros de operación para la EC a través del número de placas son definidos en la tala 30, los resultados de los ensayos de la remoción de turbiedad para un agua tipo I: 210 UNT, se muestran en las tablas 31,33 y 35. La mejor remoción de la turbiedad para las tres áreas de los electrodo son presentados en las tablas 32, 34 y 36.

Tabla 30

Parámetros de Operación. Área de Electrodo para la EC– Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros de Operación	Celda	Electrodo	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		08 unid.	
Material		Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		8x8, 10x10, 12x12 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Tiempo tratamiento			20 minutos
Amperaje			4.5A

Área de placas 8x8 cm²:**Tabla 31***Ensayos para la EC con placas de aluminio de 8x8 cm². Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	98.5	41.6	27.8	19.5
2° (UNT)	92.2	34.7	30.1	24.5
3° (UNT)	81.3	33.8	22.7	18.7

Tabla 32*Selección de Mejor Remoción de Turbiedad, placas 8x8 cm². Agua tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
3° (UNT)	81.3	33.8	22.7	18.7

Área de placas 10x10 cm²:**Tabla 33***Ensayos para la EC con placas de aluminio de 10x10 cm². Agua Tipo II: 210 UNT.*

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	75.6	18.5	17.6	16.8
2° (UNT)	86.1	20.5	19.3	19.7
3° (UNT)	80.4	19.4	18.7	17.4

Tabla 34

Mejor remoción de turbiedad, placas 10x10 cm². Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	75.6	18.5	17.6	16.8

Área de placas 12x12 cm²:

Tabla 35

Ensayos para la EC con placas de aluminio de 12x12 cm². Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	50.2	20.6	18.5	18.5
2° (UNT)	46.1	18.7	18.4	17.2
3° (UNT)	47.3	21.5	20.8	20.1

Tabla 36

Mejor remoción de turbiedad, placas 12x12 cm². Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
2° (UNT)	46.1	18.7	18.4	17.2

De los resultados obtenidos favorece para el proceso de la EC usar placas de aluminio de 10x10cm². Con la placa de 12 x12cm² obtiene mejores resultados de remoción; pero con aumento del consumo energético, ver tabla 37.

Tabla 37

Resultados de Remoción de Turbiedad. Cantidad de placas. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	8x8 cm ²	10x10 cm ²	12x12 cm ²
10'	33.8	18.5	18.7
20'	18.7	16.8	17.2

Respecto el pH de la Muestra

Los parámetros de operación para la EC, pH del agua superficial del río Rímac, son definidos en la tala 38, los resultados de los ensayos de la remoción de turbiedad para el agua tipo II: 210 UNT, se muestran en las tablas 39,41 y 43. La mejor remoción de la turbiedad para los tres tipos de pH son presentados en las tablas 40, 42 y 45.

Tabla 38

Parámetros de Operación. pH del agua del río Rímac. Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		08 unid.	
Material		Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Tiempo tratamiento			20 minutos
Amperaje			4.5A
pH			7.21, 8.83, 9.12

pH de muestra = 7.21

Tabla 39

Ensayos para la EC para pH = 7.21. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	68.4	16.4	17.8	17.7
2° (UNT)	77.3	20.5	19.2	18.6
3° (UNT)	71.9	19.3	17.8	16.4

Tabla 40

Mejor Remoción de Turbiedad para pH = 7.21. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	68.4	16.4	17.8	17.7

pH de muestra = 8.83 (natural):

Tabla 41

Ensayos para la EC para pH = 8.83. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.7	17.2	16.7	17.9
2° (UNT)	80.8	19.7	19.3	20.4
3° (UNT)	75.5	21.8	18.4	18.2

Tabla 42

Mejor Remoción de Turbiedad para pH = 8.83. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	78.7	17.2	16.7	17.9

pH de muestra = 9.12:

Tabla 43

Ensayos para la EC para pH = 9.12. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	96.5	26.8	21.7	19.2
2° (UNT)	92.3	28.1	24.9	20.7
3° (UNT)	88.4	30.6	23.2	22.1

Tabla 44

Mejor Remoción de Turbiedad para pH = 9.12. Agua tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'
1° (UNT)	96.5	26.8	21.7	19.2

De los resultados obtenidos, favorece para el proceso de la EC tener una muestra con pH natural. Así como lo indica los antecedentes, un pH cerca al neutral, aumenta la eficiencia de remoción de turbiedad; pero habría que modificar el pH agregando una sustancia química, p.ej. ácido sulfúrico, y con pH natural logra alcanzar el mismo resultado, que significa obtener un agua tratada menor a 20 UNT, ver tabla 45.

Tabla 45

Resultados de Remoción de Turbiedad. pH agua superficial. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7.12	8.83 (natural)	9.12
10'	16.4	17.2	26.8
20'	17.7	17.9	19.2

Respecto de la EC por Lotes

Los parámetros de operación para la EC por lotes son definidos en la tabla 46, para el agua superficial tipo II: 210 UNT.

Tabla 46

Parámetros de Operación de la EC por lotes. Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros de Operación	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		08 unid.	
Material		Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Amperaje			4.5A
Tiempo tratamiento			30'
pH			8.83
Lote			5'x5', 7'x7', 9'x9'

EC – Sedimentación, 5'x5':

Es un método que consiste en la aplicación del proceso de la EC por 5' e inmediatamente después otros 5' de sedimentación donde la fuente de poder está apagada, repitiéndose este proceso hasta completar los 30', ver tabla 47.

Tabla 47

EC por Lotes. 5' de tratamiento y 5' de Sedimentación. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	20'	25'	30'
(UNT)	81.5	-	29.7	-	21.6	(19.2)

EC – Sedimentación, 7'x7':

Es un método que consiste en la aplicación del proceso de la EC por 7' e inmediatamente después otros 7' de sedimentación donde la fuente de poder está apagada, repitiéndose este proceso hasta completar los 28', ver tabla 48.

Tabla 48

EC por Lotes. 7' de tratamiento y 7' de Sedimentación. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7'	14'	21'	28'
(UNT)	73.1	-	22.8	(18.3)

EC – Sedimentación, 9'x9':

Es un método que consiste en la aplicación del proceso de la EC por 9' e inmediatamente después otros 9' de sedimentación donde la fuente de poder está apagada, repitiéndose este proceso hasta completar los 36', ver tabla 49.

Tabla 49

EC por Lotes. 9' de tratamiento y 9' de Sedimentación. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	9'	18'	27'	36'
(UNT)	28.5	-	18.4	(16.3)

Se consigue mejor resultado para una EC por lotes de 9'x9'; pero se debe considerar que debemos producir un mayor volumen en menor tiempo posible, un agua tratada para las siguientes unidades de tratamiento.

Respecto de la EC por Gradiente de Corriente

Los parámetros de operación para la EC por gradiente de corriente son definidos en la tabla 50.

Tabla 50

Parámetros de Operación. Gradiente de Corriente. Agua Tipo II: 210 UNT.

Parámetros	Celda	Electrodos	EC
Dimensiones	20x15x25 cm ³		
Volumen	4 litros		
Nº placas		08 unid.	
Material		Al – Al	
Espesor		1 mm	
Área de placas		10x10 cm ²	
Distancia de placas		1.0 cm	
Amperaje			4.5A
Tiempo tratamiento			10'
pH (natural)			8.83
Gradientes (A)			3.5 – 2.5 – 1.5; 3.5 – 2.5; 3.5 – 1.5; 2.5 – 1.5

Gradientes de 4.5A – 3A – 1.5A:

El proceso inicia con 3.5A por 3 minutos, continua con otros 3' de 3A y finaliza con el último gradiente 1.5A por 3'. Manteniendo el mismo método de tratamiento, variaremos el tiempo de ampliación de las corrientes analizadas para los tiempos de 5' y 7' con. En los tres ensayos derivados por la variación de los tiempos de aplicación de las corrientes en la EC, finalizarán con 10' de sedimentación, ver las tablas 51, 52 y 53.

Tabla 51

Gradientes de Corriente de 4.5A – 3A – 1.5A en 9' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	3'	6'	9'	19'
(UNT)	74.2	45.1	22.1	(18.4)
Amperios	4.5	3.0	1.5	-

Tabla 52

Gradientes de Corriente de 4.5A – 3A – 1.5A en 15' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	15'	25'
(UNT)	60.7	18.8	17.5	(15.6)
Amperios	4.5	3.0	1.5	-

Tabla 53

Gradientes de Corriente de 4.5A – 3A – 1.5A en 21' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7'	14'	21'	31'
(UNT)	41.4	18.9	21.3	(19.2)
Amperios	4.5	3.0	1.5	-

En la tabla 52, muestra las gradientes que han conseguido la mejor remoción de la turbiedad para un tiempo de 10 minutos. Es decir, obtengo una remoción menor a 20 UNT en un tiempo razonable de tratamiento. Las otras gradientes consiguen ese resultado, pero en mayor tiempo, con mayor gasto energético y decaimiento de la calidad de agua tratada.

Gradientes de 4.5A – 3A:

El proceso inicia con 4.5A por 3', continua con 7' de 3A. Manteniendo el mismo método de tratamiento, variaremos el tiempo de ampliación de las corrientes analizadas para los tiempos de 5' con 4.5A y 5' con 3A; 7' con 4.5A y 3' con 3A. En los tres ensayos derivados por la variación de los tiempos de aplicación de las corrientes en la EC, finalizarán con 10' de sedimentación, ver las tablas 54, 55 y 56.

Tabla 54

Gradientes de Corriente de 3'– 4.5A y 3A – 7' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	3'	7'	20'
(UNT)	74.2	30.1	(23.9)
Amperios	4.5	3.0	

Tabla 55

Gradientes de Corriente de 5'– 4.5A y 5'–3A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	20'
(UNT)	60.7	21.4	(18.5)
Amperios	4.5	3.0	

Tabla 56

Gradientes de Corriente de EC 7' – 4.5A y 3' – 3A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7'	3'	20'
(UNT)	35.6	17.3	(15.7)
Amperios	4.5	3.0	

Los resultados de la tabla 56 muestra las gradientes que han conseguido la mejor remoción de la turbiedad para un tiempo de 10 minutos y la combinación de gradientes de 4.5A en 7', y 3A en 3'.

Gradientes de 4.5A – 1.5A:

El proceso inicia con 4.5A por 3', continua con 7' de 1.5A. Manteniendo el mismo método de tratamiento, variaremos el tiempo de ampliación de las corrientes analizadas para los tiempos de 5' con 4.5A y 5' con 1.5A; 7' con 4.5A y 3' con 1.5A. En los tres ensayos derivados por la variación de los tiempos de aplicación de las corrientes en la EC, finalizarán con 10' de sedimentación, ver las tablas 57, 58 y 59.

Tabla 57

Gradientes de Corriente de 3' – 4.5A y 1.5A – 7' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	3'	7'	20'
(UNT)	74.9	37.8	(26.1)
Amperios	4.5	1.5	

Tabla 58

Gradientes de Corriente de EC 5'– 4.5A y 5'– 1.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	20'
(UNT)	66.7	27.3	(20.5)
Amperios	4.5	1.5	

Tabla 59

Gradientes de Corriente de EC 7'– 4.5A y 3'– 1.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7'	3'	20'
(UNT)	40.8	20.4	(18.7)
Amperios	4.5	1.5	

Los resultados de la tabla 59 muestra las gradientes que han conseguido la mejor remoción de la turbiedad para un tiempo de 10 minutos y la combinación de gradientes de 4.5A en 7', y 1.5A en 3'.

Gradientes de 3A – 1.5A:

El proceso inicia con 3A por 3', continua con 7' de 1.5A. Manteniendo el mismo método de tratamiento, variaremos el tiempo de ampliación de las corrientes analizadas para los tiempos de 5' con 3A y 5' con 1.5A; 7' con 3A y 3' con 1.5A. En los tres ensayos derivados por la variación de los tiempos de aplicación de las corrientes en la EC, finalizarán con 10' de sedimentación, ver las tablas 60, 61 y 62.

Tabla 60

Gradientes de Corriente de 3' con 3A y 1.5A en 7' de EC. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	3'	7'	20'
(UNT)	74.9	37.8	(26.1)
Amperios	3.0	1.5	

Tabla 61

Gradientes de Corriente de EC 5'– 3A y 5' – 1.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	5'	10'	20'
(UNT)	66.7	27.3	(20.5)
Amperios	3.0	1.5	

Tabla 62

Gradientes de Corriente de EC 7'– 3A y 3' – 1.5A. Agua Tipo II: 210 UNT.

Tiempo (minutos)	7'	3'	20'
(UNT)	40.8	21.4	(18.7)
Amperios	3.0	1.5	

Los resultados de la tabla 62 muestra las gradientes que han conseguido la mejor remoción de la turbiedad para un tiempo de 10 minutos y la combinación de gradientes de 3A en 7', y 1.5A en 3'.

ANEXO E.

REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN

TIPO I: 48UNT

26.0 cm - (UNT)

X1 (min)	1.5A	3.0A	4.5A
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	48	48	48
5	40.4	28.1	24.9
10	34.2	17.6	15.4
15	26.5	15.4	13.7

40.0 cm- (UNT)

X1 (min)	1.5A	3.0A	4.5A
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	48	48	48
5	43.9	30.7	27.5
10	36.6	19.4	17.3
15	29.2	18.9	15.8

54.0 cm- (UNT)

X1 (min)	1.5A	3.0A	4.5A
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	48	48	48
5	46.6	34.1	29.5
10	39.4	23.7	18.7
15	33.3	19.5	17.3

PORCENTAJES (%) - H= 26cm

X1 (min)	PORCENTAJES (%) - H= 26cm		
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	15.8	41.5	48.1
10	28.8	63.3	67.9
15	44.8	67.9	71.5

X1 (min)	PORCENTAJES (%) - H= 40cm		
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	8.5	36.0	42.7
10	23.8	59.6	64.0
15	39.2	60.6	67.1

X1 (min)	PORCENTAJES (%) - H= 54cm		
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	2.9	29.0	38.5
10	17.9	50.6	61.0
15	30.6	61.5	64.0

TIPO II: 210 UNT

X1 (min)	26.0 cm - (UNT)		
	1.5A I = 1.5A	3.0A I = 3.0A	4.5A I = 4.5A
0	210	210	210
5	110	50.3	38.5
10	60.3	19.7	17.6
15	33.6	18.8	14.2

X1 (min)	40.0 cm- (UNT)		
	1.5A I = 1.5A	3.0A I = 3.0A	4.5A I = 4.5A
0	210	210	210
5	132	55.6	40.2
10	68.3	20.8	18.4
15	37.1	18.2	16.3

54.0 cm- (UNT)			
X1 (min)	1.5A	3.0A	4.5A
	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	210	210	210
5	174	110	65.5
10	110	48.6	40.4
15	62.5	30.5	26.3

PORCENTAJES (%) - 26 cm			
X1 (min)	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	47.6	76.0	81.7
10	71.3	90.6	91.6
15	84.0	92.0	93.2

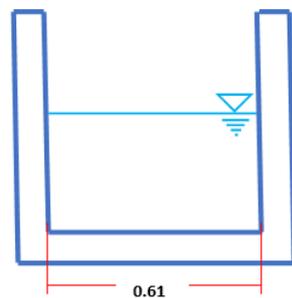
PORCENTAJES (%) - 40 cm			
X1 (min)	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	37.1	73.5	80.9
10	67.5	90.3	91.2
15	82.3	91.3	92.2

PORCENTAJES (%) - 54 cm			
X1 (min)	I = 1.5A	I = 3.0A	I = 4.5A
0	0	0	0
5	17.1	47.6	68.8
10	47.6	76.9	80.8
15	70.2	85.5	87.5

ANEXO F.

**COSTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL CANAL DE
INTERCONEXIÓN**

CANAL DE INTERCONEXION



Largo de canal = 9.70 m

Espesor de paredes del canal = 0.1 m

Ancho interno = 0.61 m

Altura interna = 0.56 m

- Se considera una malla simple de 5/8"@20 para la base de acuerdo a como fue construido.
- También se considera una longitud de empalme de 0.70 m de acuerdo a como fue construido.

Encofrado:

Muros de concreto: $(2 \times (0.56) \times 9.70) \times 2 = 21.73 \text{ m}^2$

Área impermeabilizada;

Muros de concreto: $0.56 \times 2 \times 9.70 = 10.86 \text{ m}^2$

Losa de fondo: $0.61 \times 9.70 = 5.92 \text{ m}^2$

Total, área impermeabilizada: = 16.78 m²

Volumen de concreto:

Muros de concreto: $2 \times (0.56 + 0.10) \times 0.10 \times 9.70 = 1.28 \text{ m}^3$

Losa de fondo: $0.61 \times 0.10 \times 9.70 = 0.59 \text{ m}^3$

Total, de volumen de concreto: = 1.87 m³

Acero de refuerzo:

Longitud de aceros en X: $0.61 + 0.10 + 0.10 - 2 \times 0.04 = 0.73 \text{ m}$

Longitud de aceros en Y: $9.70 - 2 \times 0.04 + 2 \times 0.60 = 10.82 \text{ m}$

Cantidad de aceros en X: 9.70/0.20 = 49 und.

Cantidad de aceros en Y: 0.81/0.20 = 4 und.

Equivalencia de peso para acero de 5/8" = 1.459 kg/m

Kilaje de aceros en X: 0.73x49x1.459 = 52.19 kg

Kilaje de aceros en Y: 10.82x4x1.459 = 63.15 kg

Total, acero para canal = 115.34 kg.

Precio encofrado: 65.89 x21.73 = S/. 1431.79

Cod.k&bcop	Descripción	Costo Por : M2					
P10-000066	ENCOFRADO/DESENCOF DE PLACAS (1er PISO)						
	UNIDAD = M2						
	Rendimiento = 10 M2/Dia						
	Ecuacion a usar = 0.1 Cp"B" + 1.0 Op + 1.0 Of +						
	Mano de Obra						50.17
30	CAPATAZ	47	HH	0.0800	28.08	2.25	
72	OFICIAL	47	HH	0.8000	18.89	15.11	
76	OPERARIO	47	HH	0.8000	23.94	19.15	
78	PEON	47	HH	0.8000	17.08	13.66	2.51
	Equipo						
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	5.0000		2.51	
	Materiales						13.21
3909	ALAMBRE NEGRO # 8	2	KG	0.2000	6.36	1.27	
3149	CLAVOS DE 2 A 4	2	KG	0.1800	4.66	0.84	
14064	MADERA TORNILLO LARGA	43	P2	3.7000	3.00	11.10	
	TOTAL de la Partida =						65.89

Precio concreto: 541.25x1.87 = S/.1012.14

Cod.k&bcop	Descripción						
P11-000102	CONCRETO CISTERNA F' C = 210 KG/CM2						
	UNIDAD = M3	Costo Por : M3					
	Rendimiento = 10 M3/Dia						
	Ecuacion a usar = 0.2 Cp"B" + 2.0 Op + 1.0 Of + 12.0 Pe						
	Mano de Obra						260.18
30	CAPATAZ	47	HH	0.1600	28.08	4.49	
72	OFICIAL	47	HH	0.8000	18.89	15.11	
74	OPERADOR	47	HH	1.6000	23.94	38.30	
76	OPERARIO	47	HH	1.6000	23.94	38.30	
78	PEON	47	HH	9.6000	17.08	163.97	
	Equipo						37.21
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	1.0000		2.60	
925	MEZCLADORA CONCRETO TAMBOR 16P3 20-35HP	48	HM	0.8000	31.50	25.20	
1554	VIBRADOR DE CONCRETO GASOLIONA 5 HP	49	HM	0.8000	11.76	9.41	
	Materiales						243.86
2024	ARENA GRUESA	4	M3	0.4700	29.66	13.94	
2394	ACEITE M. 300	1	GL	0.0080	49.51	0.40	
3273	AGUA	39	M3	0.1890	7.60	1.44	
8005	PIEDRA CHANCADA DE 1/2	5	M3	0.6100	55.08	33.60	
8430	CEMENTO PORTLAND TIPI (B 42.5KG)	21	BL	9.8800	19.41	191.77	
12621	GASOLINA 84 OCTANOS	34	GL	0.3200	8.40	2.69	
12696	GRASA POTE 200 GR	53	UN	0.0080	4.19	0.03	
	TOTAL de la Partida =						541.25

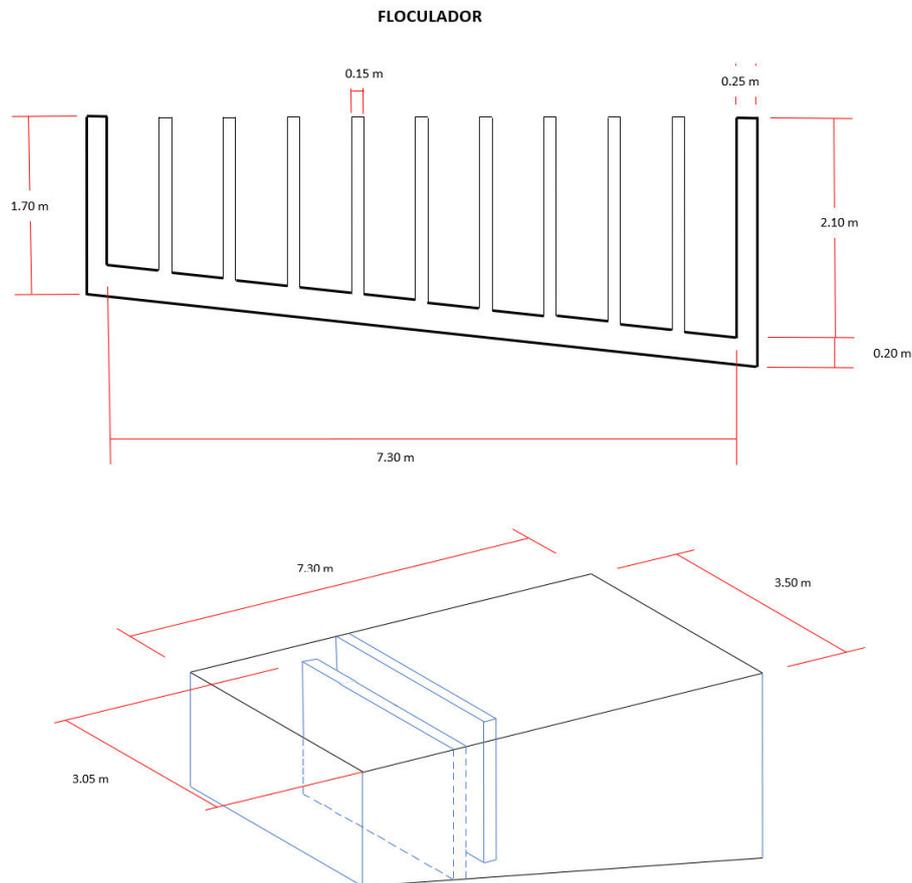
Precio acero: 5.17x115.34 =S/.596.31

Cod.k&bcop	Descripción						
P11-000287	ACERO EN CISTERNA	HABILITACION Y COLOCACION					
	UNIDAD = KG	Costo Por : KG					
	Rendimiento = 180 KG/D						
	Ecuacion a usar = 0.2 Cp"B" + 1.0 Op + 1.0 Of +						
	Mano de Obra						2.15
30	CAPATAZ	47	HH	0.0089	28.08	0.25	
72	OFICIAL	47	HH	0.0444	18.89	0.84	
76	OPERARIO	47	HH	0.0444	23.94	1.06	
	Equipo						0.10
499	CIZALLA FE CONSTRUCCION MANUAL HASTA 1"	37	HM	0.0230	1.55	0.04	
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	3.0000		0.06	
	Materiales						2.92
3909	ALAMBRE NEGRO # 8	2	KG	0.0500	6.36	0.32	
12282	FIERRO CORRUGADO PROMEDIO	3	KG	1.0450	2.49	2.60	
	TOTAL de la Partida =						5.17

Costo total Canal de concreto: =S/. 3040.24

ANEXO G.

COSTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN

**Encofrado:**

$$\text{Muros intermedios: } (9 \times 3.05 \times (\frac{2.10 + 1.50}{2})) \times 2 = 98.82 \text{ m}^2$$

$$\text{Muros de fondo: } 1.50 \times 3.0 + 2.10 \times 3.0 = 10.80 \text{ m}^2$$

$$\text{Muros longitudinales: } 2 \times 6.90 \times (\frac{2.10 + 1.50}{2}) = 24.84 \text{ m}^2$$

$$\text{Muros transversales } -9 \times 0.15 \times (\frac{2.10 + 1.50}{2}) = -2.43 \text{ m}^2$$

$$\text{Total, \u00e1rea encofrada: } = 132.03 \text{ m}^2$$

\u00c1rea impermeabilizada:

$$\text{Muros de concreto: } (10 \times 3.05 \times (\frac{2.10 + 1.50}{2})) \times 2 = 109.80 \text{ m}^2$$

$$\text{Losa de fondo: } 7.30 \times 3.50 = 25.50 \text{ m}^2$$

Total, área impermeabilizada: **=135.35 m²**

Volumen de concreto:

Muros de concreto: $(9 \times 3.05 \times (\frac{2.10+1.50}{2})) \times 0.15 = 7.41 \text{ m}^3$

Muros laterales: $2 \times 7.30 \times (\frac{2.10+1.50}{2}) \times 0.25 + 1.50 \times 3.0 \times 0.25 + 2.1 \times 3.0 \times 0.25 = 9.27 \text{ m}^3$

Losa de fondo: $7.32 \times 0.20 \times 3.50 = 5.12 \text{ m}^3$

Total, de volumen de concreto: **= 21.80 m³**

Acero de refuerzo:

Muro en serpentín malla simple 5/8" @ 20 cm

Longitud de aceros en X: $3.05 - 2 \times 0.04 = 2.97 \text{ m}$

Longitud de aceros en Y: $(\frac{2.10+1.50}{2}) - 2 \times 0.04 = 1.72 \text{ m}$

Cantidad de aceros en X: $9 \times 1.80 / 0.20 = 81 \text{ und.}$

Cantidad de aceros en Y: $9 \times 3.05 / 0.20 = 138 \text{ und.}$

Equivalencia de peso para acero de 5/8" **= 1.459 kg/m**

Kilaje de aceros en X: $81 \times 2.97 \times 1.459 = 350.99 \text{ kg}$

Kilaje de aceros en Y: $138 \times 1.72 \times 1.459 = 346.31 \text{ kg}$

Total **= 697.30 kg**

Muros de fondo malla simple 5/8" @ 20 cm

Longitud de aceros en X: $3.50 - 2 \times 0.04 = 3.42 \text{ m}$

Longitud de aceros en Y: $(\frac{2.10+1.50}{2}) - 2 \times 0.04 = 1.72 \text{ m}$

Cantidad de aceros en X: $2 \times 1.80 / 0.20 = 18 \text{ und.}$

Cantidad de aceros en Y: $2 \times 3.50 / 0.20 = 35 \text{ und.}$

Equivalencia de peso para acero de 5/8" **= 1.459 kg/m**

Kilaje de aceros en X: $3.42 \times 18 \times 1.459 = 89.82 \text{ kg}$

Kilaje de aceros en Y: $1.72 \times 35 \times 1.459 = 87.83 \text{ kg}$

Total **= 177.65 kg**

Muros longitudinales malla simple 5/8" @ 20 cm

Longitud de aceros en X: $7.30 - 2 \times 0.04 = 7.22 \text{ m}$

Longitud de aceros en Y: $(\frac{2.10+1.50}{2}) - 2 \times 0.04 = 1.72 \text{ m}$

Cantidad de aceros en X: $2 \times 1.80 / 0.20 = 18 \text{ und.}$

Cantidad de aceros en Y: $2 \times 7.30 / 0.20$	= 73 und.
Equivalencia de peso para acero de 5/8"	= 1.459 kg/m
Kilaje de aceros en X: $7.22 \times 18 \times 1.459$	= 189.61 kg
Kilaje de aceros en Y: $1.72 \times 73 \times 1.459$	= 183.19 kg
Total	= 372.80 kg
Muros de fondo malla simple 5/8"@20 cm	
Longitud de aceros en X: $7.32 - 2 \times 0.04$	= 7.24 m
Longitud de aceros en Y: $3.50 - 2 \times 0.04$	= 3.42 m
Cantidad de aceros en X: $3.50 / 0.20$	= 18 und.
Cantidad de aceros en Y: $7.32 / 0.20$	= 37 und.
Equivalencia de peso para acero de 5/8"	= 1.459 kg/m
Kilaje de aceros en X: $7.24 \times 18 \times 1.459$	= 190.14 kg
Kilaje de aceros en Y: $3.42 \times 37 \times 1.459$	= 184.62 kg
Total	= 374.76 kg
Total, de acero para floculador	= 1622.51 kg.

Precio encofrado: 65.89×132.03 = S/. 8,699.46

Cod.k&bcop	Descripción			Costo Por : M2		
P10-000066	ENCOFRADO/DESECOF DE PLACAS (1er PISO)	UNIDAD = M2				
		Rendimiento = 10 M2/Dia				
		Ecuacion a usar = $0.1 \text{ Cp} \times \text{B} + 1.0 \text{ Op} + 1.0 \text{ Of} +$				
		Mano de Obra		50.17		
30	CAPATAZ	47	HH	0.0800	28.08	2.25
72	OFICIAL	47	HH	0.8000	18.89	15.11
76	OPERARIO	47	HH	0.8000	23.94	19.15
78	PEON	47	HH	0.8000	17.08	13.66
	Equipo					2.51
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	5.0000		2.51
	Materiales					13.21
3909	ALAMBRE NEGRO # 8	2	KG	0.2000	6.36	1.27
3149	CLAVOS DE 2 A 4	2	KG	0.1800	4.66	0.84
14064	MADERA TORNILLO LARGA	43	P2	3.7000	3.00	11.10
	TOTAL de la Partida =					65.89

Precio concreto: 541.25×21.80 = S/. 11,799.25

Cod.k&bcop	Descripción						
P11-000102	CONCRETO CISTERNA F' C = 210 KG/CM2						
	UNIDAD = M3	Costo Por : M3					
	Rendimiento = 10 M3/Dia						
	Ecuacion a usar = 0.2 Cp"B" + 2.0 Op + 1.0 Of + 12.0 Pe						
	Mano de Obra						260.18
30	CAPATAZ	47	HH	0.1600	28.08	4.49	
72	OFICIAL	47	HH	0.8000	18.89	15.11	
74	OPERADOR	47	HH	1.6000	23.94	38.30	
76	OPERARIO	47	HH	1.6000	23.94	38.30	
78	PEON	47	HH	9.6000	17.08	163.97	
	Equipo						37.21
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	1.0000		2.60	
925	MEZCLADORA CONCRETO TAMBOR 16P3 20-35HP	48	HM	0.8000	31.50	25.20	
1554	VIBRADOR DE CONCRETO GASOLIONA 5 HP	49	HM	0.8000	11.76	9.41	
	Materiales						243.86
2024	ARENA GRUESA	4	M3	0.4700	29.66	13.94	
2394	ACEITE M. 300	1	GL	0.0080	49.51	0.40	
3273	AGUA	39	M3	0.1890	7.60	1.44	
8005	PIEDRA CHANCADA DE 1/2	5	M3	0.6100	55.08	33.60	
8430	CEMENTO PORTLAND TIPI (B 42.5KG)	21	BL	9.8800	19.41	191.77	
12621	GASOLINA 84 OCTANOS	34	GL	0.3200	8.40	2.69	
12696	GRASA POTE 200 GR	53	UN	0.0080	4.19	0.03	
	TOTAL de la Partida =						541.25

Precio acero: $5.17 \times 1622.51 = \$8,388.34$

Cod.k&bcop	Descripción						
P11-000287	ACERO EN CISTERNA	HABILITACION Y COLOCACION					
	UNIDAD = KG	Costo Por : KG					
	Rendimiento = 180 KG/D						
	Ecuacion a usar = 0.2 Cp"B" + 1.0 Op + 1.0 Of +						
	Mano de Obra						2.15
30	CAPATAZ	47	HH	0.0089	28.08	0.25	
72	OFICIAL	47	HH	0.0444	18.89	0.84	
76	OPERARIO	47	HH	0.0444	23.94	1.06	
	Equipo						0.10
499	CIZALLA FE CONSTRUCCION MANUAL HASTA 1"	37	HM	0.0230	1.55	0.04	
855	HERRAMIENTAS MANUALES(% MANO DE OBRA)	37	%1	3.0000		0.06	
	Materiales						2.92
3909	ALAMBRE NEGRO # 8	2	KG	0.0500	6.36	0.32	
12282	FIERRO CORRUGADO PROMEDIO	3	KG	1.0450	2.49	2.60	
	TOTAL de la Partida =						5.17

Costo total Canal de concreto: $= \$28,887.05$