

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL



TESIS

“Evaluación del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA
AMBIENTAL**

AUTORA: Calixto Cruz, Mely

ASESOR: Riveros Agüero, Elmer

HUÁNUCO – PERÚ

2023

U

TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional ()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación Ambiental

AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Biotecnología ambiental

Disciplina: Biorremediación, Biotecnologías de diagnóstico en la gestión ambiental

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniera ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 72103919

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 28298517

Grado/Título: Maestro en administración y gerencia en salud

Código ORCID: 0000-0003-3729-5423

DATOS DE LOS JURADOS:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Vásquez Baca, Yasser	Título oficial de máster universitario en planificación territorial y gestión ambiental	42108318	0000-0002-7136-697X
2	Morales Aquino, Milton Edwin	Maestro en ingeniería, con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	44342697	0000-0002-2250-3288
3	Valdivia Martel, Perfecta Sofía	Maestro en Ingeniería con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	43616954	0000-0002-7194-3714

D

H



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 15:30 horas del día 23 del mes de agosto del año 2023, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Mg. Yasser Vasquez Baca (Presidente)
- Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Secretario)
- Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 1616-2023-D-FI-UDH**, para evaluar la Tesis intitulada: **"EVALUACIÓN DEL ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE CALCIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA DESTINADAS A USO DOMÉSTICO - 2022"**, presentado por el (la) Bach. **CALIXTO CRUZ, MELY**, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

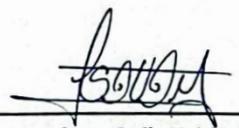
Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo cuantitativo de **1.6** y cualitativo de **BUENO** (Art. 47)

Siendo las ~~16:28~~ horas del día ~~23~~ del mes de ~~Agosto~~ del año ~~2023~~, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.


Mg. Yasser Vasquez Baca
ORCID: 0000-0002-7136-697X
Presidente


Mg. Milton Edwin Morales Aquino
ORCID: 0000-0002-2250-3288
Secretario


Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel
ORCID: 0000-0002-7194-3714
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Yo, **FRANK ERICK CAMARA LLANOS**, en condición de Coordinador del P.A de **INGENIERIA AMBIENTAL** manifiesto: que el asesor de tesis Mg. Elmer Riveros Agüero, docente que ya no labora en nuestro programa académico fue designado(a) mediante documento: **RESOLUCIÓN 1980 -2022-D-FI-UDH del 6 de OCTUBRE del 2022**; del bachiller **CALIXTO CRUZ Mely**, cuya investigación titulada; **“EVALUACIÓN DEL ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE CALCIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA DESTINADAS A USO DOMÉSTICO - 2022”**.

Puedo constar que la misma tiene un índice de similitud del 22 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Antiplagio Turnitin. Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 11 de octubre del 2023

Mg. Riveros Agüero, Elmer

DNI. 28298517

CODIGO ORCID: 0000-0003-3729-5423

1era Entrega

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	4%
2	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	1%
7	link.springer.com Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	hmong.es Fuente de Internet	<1%


Mg. Frank E. Cámara Llanos
MÉDICO VETERINARIO
CMV. 7185

Mg. Riveros Agüero, Elmer

DNI. 28298517

CODIGO ORCID: 0000-0003-3729-5423

DEDICATORIA

Esta tesis dedico a mis padres por confiar en mis decisiones, a mis hermanas por creer en mí, a mi sobrina por las fuerzas que me inspiran; gracias familia, a quienes amo y han sido mi apoyo en todo momento y han creído en mí. Y a dios por la oportunidad.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad me dio la bienvenida al mundo como tal, las oportunidades que me ha brindado son incomparables.

Agradezco mucho por la ayuda de mis maestros, mis compañeros, y a la Universidad en general por todo lo anterior en conjunto con todos los copiosos conocimientos que me ha otorgado.

Y los esfuerzos impresionantes y tu amor son para mí invaluable, junto con mi padre me has educado, me has proporcionado todo y cada cosa que he necesitado, tus enseñanzas las aplico cada día; de verdad que tengo mucho por agradecerte, tus ayudas fueron fundamental para la culminación de mi tesis.

Te doy gracias, madre.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
CAPÍTULO I	14
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	16
1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICOS	16
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	18
CAPÍTULO II	19
MARCO TEORICO	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	19
2.1. BASES TEÓRICAS	22
2.1.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
2.1.2. AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA	28
2.1.3. REGULACIONES PARA LA CONCENTRACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO O DUREZA EN AGUA POTABLE A NIVEL INTERNACIONAL	30
2.1.4. ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO	32
2.1.5. MARCO NORMATIVO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	37
2.1.6. MARCO INSTITUCIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	40
2.1.7. TIPOS DE POZOS	40

2.1.8. EFECTO A LA SALUD DE LAS AGUAS DURAS	41
2.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES	42
2.3. HIPÓTESIS.....	44
2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL	44
2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	44
2.4. VARIABLES.....	44
2.4.1. VARIABLES DEPENDIENTES.....	44
2.4.2. VARIABLES INDEPENDIENTES	45
2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	46
CAPÍTULO III.....	48
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	48
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.1.1. ENFOQUE	49
3.1.2. ALCANCE O NIVEL	49
3.1.3. DISEÑO	49
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	50
3.2.1. POBLACIÓN	50
3.2.2. MUESTRA.....	51
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .51	
3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	51
3.3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO EXPERIMENTAL	52
3.3.3. PRUEBAS PRELIMINARES CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL.....	53
3.3.4. PRUEBA CENTRAL CON LAS MUESTRAS RECOGIDAS	54
3.3.5. MUESTREO Y ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DURANTE EL EXPERIMENTO	55
3.3.6. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS.....	56
3.4. PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	57
CAPÍTULO IV.....	58
RESULTADOS.....	58
4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS	58
4.2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LAS CONCENTRACIONES CÁLCICAS, TOTALES Y MAGNÉSICAS	83
4.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE LAS CONCENTRACIONES	

CÁLCICAS, TOTALES Y MAGNÉSICAS	85
4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS...	86
4.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	86
4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1	89
4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2	91
CAPÍTULO V.....	94
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	94
5.1. CONTRASTACIÓN DE LOS RESULTADOS	94
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización química y física para NGPW, OPW, TGSPW, SGPW y CBMPW	24
Tabla 2 Sólidos Totales Disueltos en Varios Aguas.....	25
Tabla 3 Clases de agua en función de la dureza	26
Tabla 4 Concentraciones Permisibles de CaCO ₃ en usos Industriales	28
Tabla 5 Concentraciones mínimas requeridas y recomendadas de minerales en agua blanda o desmineralizada (desalinizada) según lo propuesto por varios estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE	31
Tabla 6 Operacionalización de variables	46
Tabla 7 Tipo de investigación	48
Tabla 8 Coordenadas de los Puntos de Monitoreo de las Aguas Subterráneas	51
Tabla 9 Materiales empleados en la construcción del módulo experimental	52
Tabla 10 Condiciones de operación.....	55
Tabla 11 Soluciones preparadas para cuantificar la dureza cálcica y total por volumetría y sus estandarizaciones	56
Tabla 12 Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 01 de monitoreo	58
Tabla 13 Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 02 de monitoreo	63
Tabla 14 Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 03 de monitoreo	68
Tabla 15 Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 04 de monitoreo	73
Tabla 16 Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 05 de monitoreo	78
Tabla 17 Análisis de dureza cálcica, total y magnésica	83
Tabla 18 Prueba de Shapiro-Wilk sobre la normalidad de la dureza cálcica,	

total y magnésica	85
Tabla 19 Análisis de pruebas para muestras emparejadas	87
Tabla 20 Análisis para subconjuntos homogéneos	88
Tabla 21 Análisis de Prueba de muestra única para la dureza cálcica antes de su tratamiento	90
Tabla 22 Análisis de Prueba de muestra única para la dureza cálcica después de su tratamiento electroquímico	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas en Chilca.....	29
Figura 2 Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas en Chilca.....	29
Figura 3 Tipos de ablandamiento de las aguas superficiales	34
Figura 4 Efecto del pH en la solubilidad de CaCO ₃	35
Figura 5 Efecto de la temperatura en la solubilidad de CaCO ₃	36
Figura 6 Imagen SEM de carbonatos en sus 3 forma cristalinas	37
Figura 7 Diseño de experimento	49
Figura 8 Diseño de grupos evaluados	50
Figura 9 Esquema del módulo experimental.....	53
Figura 10 Recojo de las muestras de los cinco puntos subterráneos	54
Figura 11 Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01	60
Figura 12 Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01	61
Figura 13 Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01	62
Figura 14 Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02	65
Figura 15 Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02	66
Figura 16 Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02	67
Figura 17 Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03	70
Figura 18 Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03	71
Figura 19 Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03	72
Figura 20 Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de	

tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04	75
Figura 21 Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04	76
Figura 22 Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04	77
Figura 23 Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05	80
Figura 24 Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05	81
Figura 25 Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05	82

RESUMEN

El trabajo de investigación realizado con el objetivo de evaluar la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico – 2022, se enmarcó bajo la metodología del nivel aplicativo, con un enfoque cuantitativo de intervención experimental, se evaluaron en cinco puntos, cada uno con sus cinco réplicas correspondientes, que en total se realizaron 25 experimentos. Para poder llegar al objetivo se diseñó y construyó un módulo experimental, con una capacidad de 2 litros, con dos electrodos metálicos (acero inoxidable/titanio en forma de mallas), una membrana catiónica, dos depósitos y una fuente de poder y dos bombas. Bajo las condiciones de operación de 15 voltios y 1 hora de tratamiento, se obtuvieron como resultado para el primer punto una eficiencia de 57.39%, reduciendo de 418,8 mg/L CaCO_3 hasta 178,44 mg/L CaCO_3 , para el punto 02 se llegó hasta 67.52%, reduciendo de 285,4 mg/L CaCO_3 hasta 92,68 mg/L CaCO_3 , para el punto 03 la eficiencia llegó en 63.73%, llevando de 342,6 mg/L CaCO_3 hasta 124,2 mg/L CaCO_3 , para el punto 04 logrando llegar en 56.72%, llevando de 405,6 mg/L CaCO_3 hasta 175,36 mg/L CaCO_3 y para el punto 05 se redujo en 56.59%, llevando de 520,6 mg/L CaCO_3 hasta 225,8 mg/L CaCO_3 . Con lo cual, la eficiencia general se llegó para los cinco puntos en un 60% sobre la reducción de la dureza cálcica. En conclusión, mediante el análisis estadístico de t de student para muestras relacionadas se verificó que la concentración de calcio después de su tratamiento electroquímico se ha reducido significativamente, con lo cual se demostró que la técnica además de ofrecer muchas ventajas como el respeto hacia el medio ambiente, sin productos químicos adicionales, sin producción de salmuera y conveniente control del proceso es muy eficiente.

Palabras claves: Evaluación, Ablandamiento, dureza cálcica, electroquímica, aguas subterráneas.

ABSTRACT

The research work carried out with the objective of evaluating the efficiency of the electrochemical softening of calcium in the subterranean waters of Chilca destined for domestic use - 2022, was framed under the methodology of the application level, with a quantitative approach of experimental intervention, they were evaluated in five points, each with its five corresponding replicates, which in total 25 experiments were performed. In order to reach the objective, an experimental module was designed and built, with a capacity of 2 liters, with two metallic electrodes (stainless steel/titanium in the form of meshes), a cationic membrane, two tanks and a power source and two pumps. Under the operating conditions of 15 volts and 1 hour of treatment, an efficiency of 57.39% was obtained as a result for the first point, reducing from 418.8 mg/L CaCO₃ to 178.44 mg/L CaCO₃, for point 02. it reached 67.52%, reducing from 285.4 mg/L CaCO₃ to 92.68 mg/L CaCO₃, for point 03 the efficiency reached 63.73%, taking from 342.6 mg/L CaCO₃ to 124.2 mg/ L CaCO₃, for point 04 reaching 56.72%, taking from 405.6 mg/L CaCO₃ to 175.36 mg/L CaCO₃ and for point 05 it was reduced by 56.59%, taking 520.6 mg/L CaCO₃ up to 225.8 mg/L CaCO₃. With which, the general efficiency was reached for the five points by 60% on the reduction of calcium hardness. In conclusion, through the statistical analysis of student's t for related samples, it was verified that the calcium concentration after its electrochemical treatment has been significantly reduced, with which it was demonstrated that the technique, in addition to offering many advantages such as respect for the environment. environment, no additional chemicals, no brine production and convenient process control is very efficient.

Keywords: Evaluation, Softening, calcium hardness, electrochemistry, groundwater.

INTRODUCCIÓN

La dureza es uno de los problemas comunes de calidad del agua en todo el mundo. El agua dura se encuentra en una tasa superior al 85%, ya que el agua recoge minerales como los iones de magnesio y calcio de las rocas y el suelo, lo que lleva al agua dura. El agua subterránea contiene más minerales que el agua superficial, por lo que es más dura que el agua superficial. Conocer la dureza del agua es importante a la hora de evaluar su uso como medio doméstico o suministro de agua industrial.

Bajo este contexto, en la actualidad, en el Distrito de Chilca existen una infinidad de fuente de aguas subterráneas, extraídas mediante pozos tubulares, pozos a tajo abierto y pozos mixtos, cada uno de ellos con fines específicos (uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial); sin embargo la mayoría de ellos presentan una dureza total entre 18.04 ppm y 2802.09 ppm CaCO_3 que corresponden a aguas blandas y muy duras en base a los rangos de dureza (Zenteno & Ayasta, 2005).

La presente tesis se justifica ya que, en la actualidad, hay una señal de una realidad muy alarmante, según estudios realizados por el diario el Peruano más de tres millones de peruanos no tienen acceso al servicios de agua y desagüe, motivo por el cual se ven en la necesidad de contratar camiones cisternas que los provean con agua para beber, cocinar y/o asearse; pero estas aguas en la mayor parte provienen de aguas subterráneas con altos niveles de dureza. El agua dura interfiere con el lavado, lavado, baño y aseo personal.

Por ende mediante el objetivo planteado de evaluar la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico – 2022, se pudo evidenciar la efectividad del tratamiento electroquímico sobre la reducción de la concentración de calcio en estas aguas, obteniendo buenos resultados.

La investigación se realizó a nivel laboratorio del tipo batch, con recirculación, todas las corridas se realizaron en la ciudad de Lima, guiadas y supervisadas por un especialista en el tema.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El agua potable es necesaria para la vida, nuestro alimento más importante, y para su consumo tiene que ser microbiológicamente segura y libre de contaminantes y sustancias tóxicas. La presencia de ciertas cantidades de sólidos disueltos totales (TDS) y algunos elementos esenciales son necesarios no sólo para evitar que las tuberías se corroen sino también para garantizar que el sabor sea aceptable, además también para prevenir subaguda y efectos adversos crónicos para la salud derivados del consumo inadecuado a largo plazo (Rosborg & Kozisek, 2020).

Conocer la dureza del agua es importante a la hora de evaluar su uso como medio doméstico o para su uso industrial. Una de las características indeseables de algunas fuentes de agua subterráneas y naturales es la dureza. El agua dura puede causar muchos problemas en todo el mundo.

El agua dura interfiere con el lavado de baño y limpieza personal. La ropa lavada con agua dura puede verse sucia y áspera. Utilización de agua dura en el hogar también puede conducir a otros problemas. También afecta a los jabones y detergentes utilizados para la limpieza porque el jabón usado en agua dura se combina con la gran cantidad de minerales para formar un lodo pegajoso. Baños con jabón en agua dura puede depositarse como residuo pegajoso en la piel y puede provocar irritación debajo condiciones ligeramente ácidas (Padmapriya et al., 2015) y (Kyung Ahn et al., 2018) y (Zeppenfeld, 2018).

Por otro lado, el agua con niveles muy altos de Ca y Mg puede tener menor aceptabilidad debido al sabor, y así mismo con altos niveles de TDS puede aumentar el riesgo de cálculos renales y problemas de artritis. Sin embargo, la carga de esta enfermedad es mucho menor que los riesgos de mortalidad por enfermedad cardiovascular asociados con agua de baja concentración de Mg y Ca (Kozisek, 2020). Según la Organización Mundial de

la Salud (OMS), en 2009 en su informe sobre la relación entre la concentración de calcio y magnesio en el agua señala que el agua debería contener como mínimo entre 25-50 mg/l para prevenir la arterioesclerosis.

El calcio y el magnesio son los dos cationes principales responsables de la dureza del agua natural, por lo tanto, para la mayoría de las aguas, la dureza total es causada por los principales cationes y aniones asociados, entre ellos los aniones de HCO_3^- , CO_3^{2-} , dichos iones son asociados a la alcalinidad de OH^- e iones asociados a la acidez como SO_4^{2-} , NO_3^- , y Cl^- . De esta manera el agua puede precipitar como una escama dura y por otra parte la dureza del carbonato es sensible a la temperatura y puede precipitar fácilmente.

En Chilca existe un marcado déficit de agua superficial, motivo por el cual se tomó como alternativa la captación de las aguas subterráneas almacenadas en el acuífero, pero éste al no tener una recarga suficiente fue paulatinamente sobreexplotado, lo cual sucede en la actualidad. Existen una infinidad de fuente de aguas subterráneas, extraídas mediante pozos tubulares, pozos a tajo abierto y pozos mixtos, cada uno de ellos con fines específicos (uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial); sin embargo la mayoría de ellos presentan una dureza total entre 18.04 ppm y 2802.09 ppm CaCO_3 que corresponden a aguas blandas y muy duras en base a los rangos de dureza (Zenteno & Ayasta, 2005).

Frente a ello, desde antes existen técnicas para reducir la dureza, entre ellos, los tratamientos químicos, adicionando inhibidores (Zhi & Zhang, 2014), adición de ácido sulfúrico a pH más bajo, que no solo es laborioso sino también ambientalmente hostil debido a la generación de grandes volúmenes de soluciones ácidos o sales (Jiang et al., 2018). Entre los tratamientos electroquímicos, el ablandamiento del agua ha llamado mucho la atención en los últimos años, ya que tiene muchas ventajas con respecto al medio ambiente, sin productos químicos adicionales, sin producción de salmuera y conveniente control del proceso (Gabrielli et al., 2006). Desde el punto de vista de Sanjuán et al. (2019), el proceso electroquímico de ablandamiento del agua empieza con desprendimiento de hidrógeno y formación de OH^- en el cátodo, seguido la reacción con el catión Ca^{2+} para formar CaCO_3 y luego depositarse en la superficie del cátodo.

Teniendo en cuenta por lo expuesto, esta línea de investigación va dirigido al desarrollo y empleo de la técnica electroquímica mediante la realización de una serie de experimentos a nivel laboratorio para evaluar la eficiencia del proceso electroquímico, utilizando como insumo químico a los electrones y obtener agua blanda con relación a la concentración de calcio.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022?

1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo?
- ¿Cuál es la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca después de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico – 2022.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo.
- Determinar la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca después de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El suministro de agua potable tiene el objetivo principal de proteger la salud humana, lo que incluye garantizar el acceso a cantidades adecuadas de agua segura.

En las últimas cinco décadas más o menos se ha ido acumulando evidencias sobre un factor ambiental que parece estar influyendo en la mortalidad, varias investigaciones epidemiológicas han demostrado la relación entre el riesgo de enfermedad cardiovascular, retraso en el crecimiento, falla reproductiva y otros problemas de salud con la dureza del agua potable o su contenido de magnesio y calcio (Sengupta, 2013).

En el Perú, más de 3,6 millones de peruanos no tienen acceso a agua potable segura, estos ciudadanos son abastecidos de agua a través de camiones cisterna que les venden el recurso a un costo elevado y la mayoría de ellos son extraídas de aguas subterráneas con altos niveles de dureza cálcica, pagando hasta 2 veces más, en comparación con las personas que tienen conexión domiciliaria.

En Chilca existen una infinidad de fuente de aguas subterráneas, extraídas mediante pozos tubulares, pozos a tajo abierto y pozos mixtos, cada uno de ellos con fines específicos (uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial); sin embargo la mayoría de ellos presentan una dureza total entre 18.04 ppm y 2802.09 ppm CaCO_3 que corresponden a aguas blandas y muy duras en base a los rangos de dureza (Zenteno & Ayasta, 2005).

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones que marcaron esta investigación fueron con respecto a la adquisición de las muestras, en Chilca muchas de las fuentes del agua subterránea no accedieron fácilmente a las muestras, otra limitación estuvo con respecto al uso de la membrana catiónica, estos materiales tuvieron un cuidado especial por cada experimento, ya que aparte del costo su manipulación es muy delicado, cualquier rotura o cambio químico alteraría la investigación. La otra limitación es con referente al trabajo de campo, cuantos más experimentos uno realiza, las muestras tienden a alterarse, por más que las muestras se hayan conservado.

1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es viable debido a que al emplearse esta técnica electroquímica sólo se usa como producto químico a la corriente eléctrica, a diferencia de otras técnicas donde se usan insumos químicos exteriores. En cuanto a su operacionalidad, utilizando esta técnica se puede reducir la dureza cálcica mediante los mecanismos de la electrodeposición, electrocoagulación y precipitación iónica, en los tres casos la única fuente de energía es la corriente eléctrica, por otra parte, fue viable el estudio porque el costo integral ha sido autofinanciado, además se contó con especialistas en el tema de la investigación.

Este trabajo de investigación es viable socialmente, económicamente y ambientalmente, ya que mediante este estudio la población será favorecida, dado que esta alternativa de mejorar la calidad del agua mejorará la calidad de vida, tanto a la población actual como a las generaciones futuras, incluso este tratamiento no solo se puede emplear en pequeña escala, también se puede emplear para diferentes usos de agua como domésticas, industriales, etc., de tal modo que la población mostrara interés por el presente estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Wang et al (2021), Instituto de Tecnología de Wuhan – China. En su publicación de “Efecto de los parámetros operativos y las propiedades del material sobre la eficiencia de eliminación de dureza por técnica electroquímica”, el objetivo fue estudiar los efectos de los parámetros operacionales sobre la eficiencia de la reducción de la dureza, consumo de energía y forma cristalina del precipitado, emplearon una metodología experimental a nivel laboratorio donde se evaluaron los factores de potencial aplicado, tipo de material del electrodo (titanio y cobre) y la formación de la cristalización del precipitado. Como resultado obtuvieron que el factor de mayor influencia es el voltaje y para reducir en 40% los sólidos disueltos totales se trabajaron a las condiciones óptimas de 25 voltios y con material de titanio, del mismo modo el consumo de energía utilizando la placa de titanio es 16% menor cuando se utiliza el cobre, además estos dos valores se correlacionan positivamente con la concentración de Ca^{2+} en la solución con respecto a la masa formada del carbonato de sodio el que predominó fue el aragonito. Concluyendo que las placas de titanio son más eficientes que las de cobre y consumen menos energía (Wang et al., 2021).

Luan J. et al (2019), Universidad Tecnológica de Dalian – China. En su publicación de “Multi-meshes coupled cathodes enhanced performance of electrochemical water softening system”, con el objetivo de conocer el efecto de múltiples electrodos a base de malla de acero inoxidable y aumentar el área de contacto y reducir la dureza, para ellos se empleó un módulo tipo batch recirculante con una capacidad de 50 litros. Como parte de la metodología, se usaron 7 electrodos de ánodo y 6 electrodos de cátodo, en ello se evaluaron los factores de flujo de alimentación y densidad de corriente sobre la tasa de descalcificación y consumo de energía electroquímica. Como resultado indicaron que el cátodo acoplado aumenta la tasa de descalcificación del sistema de ablandamiento de agua electroquímico debido

al efecto de auto-sinergia producido basado en su estructura multicapa única. El efecto sinérgico está construido por separar y posicionar las reacciones químicas (producción de alcalinidad y deposición de incrustaciones) en diferentes regiones del cátodo acoplado, por lo tanto, una gran cantidad de iones OH^- de las capas internas y, preferentemente, las incrustaciones depositadas en las capas externas aceleran la posterior deposición de las incrustaciones en la etapa posterior del proceso, logrando reducir en 71.48 % de la dureza y alcalinidad después de horas de horas de tratamiento para la solución preparada a base de CaCl_2 y NaHCO_3 , en cambio para el agua de enfriamiento se logró reducir en 52.94 % para las 8 horas de tratamiento. Concluyendo que mediante este trabajo se proporciona una estrategia fácil para el desarrollo y aplicaciones de la técnica electroquímica (Luan et al., 2019).

Zhang Ch. et al (2020), Universidad de Minería y Tecnología de China – China. En su publicación de “Investigation on an electrochemical pilot equipment for water softening with an automatic descaling system: Parameter optimization and energy consumption analysis”, con el objetivo de evaluar un dispositivo de tecnología electroquímica de ablandamiento de agua de recirculación industrial. Para optimizar y llevar adelante la investigación emplearon la Metodología de Superficie de Respuesta basado en el diseño de Boxe-Behnken, donde buscaron evaluar cuatro factores operacionales: concentración inicial de calcio, relación entre dureza y bicarbonato, densidad de corriente y flujo de circulación. Como resultado a condiciones operacionales de 1150 mg Ca^{++}/L , relación entre dureza y bicarbonato de 0.5, 30 A/m² de densidad de corriente y 20 m³/h de caudal se obtuvieron 19,95 g $\text{CaCO}_3/\text{h}/\text{m}^2$ y consumos de energía 27,1 kW h / kg CaCO_3 . Concluyendo que evidentemente presenta ventajas económicas y medioambientales en comparación con el método inhibidor de incrustaciones químicas, este trabajo proporciona una estrategia fácil para el desarrollo y aplicaciones industriales de tecnología para ablandar el agua (Zhang et al., 2020).

Muddemann T. et al (2020), Universidad Tecnológica de Clausthal, Clausthal-Zellerfeld – Alemania. En su publicación de “Combination of magnetically actuated flexible graphite–polymer composite cathode and

boron-doped diamond anode for electrochemical water softening or wastewater treatment”, con el objetivo de evaluar un dispositivo conformado por electrodo de diamante dopado de boro para ánodo y para el cátodo un electrodo de polímero de grafito en movimiento sobre aguas residuales de inodoros, siguieron una metodología basado en obtener un cátodo adecuado, se investigaron la estabilidad química y la conductividad de varios compuestos y sus características de flexión y actuador magnético. Como resultado la dureza del agua se redujo hasta un 72% y más del 90% en los modos de electrolitos mixtos y separados. Como conclusión esta técnica se puede utilizar para el tratamiento de aguas residuales al igual que las aguas residuales artificiales de los inodoros con una decoloraron con éxito para su reutilización como agua de descarga (Muddemann et al., 2020).

Sanjuán et al. (2019), Universidad de Alicante – España. En su publicación de “Electrochemical water softening: Influence of water composition on the precipitation behaviour”, el objetivo de la investigación fue estudiar la eficiencia de la técnica electroquímica sobre la reducción del ión calcio en forma de precipitado sobre el electrodo de cátodo. La metodología utilizada para llevar a cabo los experimentos fueron a nivel laboratorio, se enfocaron en utilizar un reactor de filtro prensa y como electrodo se usó acero inoxidable 3D, en ello se varío los siguientes parámetros operacionales de: alcalinidad, relación Mg / Ca y presencia de un compuesto anti incrustante. Como resultado se observó que en términos de eliminación de calcio tiene mayor eficiencia que de magnesio y el anti incrustante no afectó en nada a los resultados, con respecto a la morfología del precipitado formado en el cátodo sigue el comportamiento de calcita, aragonita, vaterita y brucita. Concluyendo que esta información contribuye al desarrollo de la técnica, necesaria para una futura aplicación en desalación práctica (Sanjuán et al., 2019).

Clauwaert et al. (2019), Universidad de Gante – Bélgica. Mediante su publicación de “Electrochemical tap water softening: a zero chemical”, con el objetivo de plantearse como una alternativa sustentable para el ablandamiento por intercambio iónico, la utilización de una celda con membranas catiónicas y aniónicas evitando el aporte de sal al agua potable y la producción de una salmuera concentrada. Como parte de la metodología

se enfocó en la utilización de una celda separada por unas membranas aniónicas y catiónicas, de forma continua, y como medio de cristalización se usó uno de los depósitos donde ingresa la muestra a tratar, para este trabajo se usaron dos configuraciones, la primera configuración donde se utilizó una membrana catiónica el efluente saliente es mezclado con el anolito anódico, y la otra configuración no se mezcla ambos electrolitos. Como resultado obtuvieron para la primera configuración una reducción de la dureza con unas eficiencias promedio de eliminación de calcio y magnesio en 75-86% y 7-21% respectivamente, podrían alcanzarse de manera sostenible, con un consumo de energía específico de 7,0-10,1 kWh kg⁻¹ CaCO₃, en cambio para la segunda configuración se obtuvieron eficiencias promedio de remoción de calcio y magnesio de 73-78% y 40-44% con consumos específicos de energía de 5.8-7.5 kWh kg⁻¹ CaCO₃. Concluyendo que estos nuevos métodos de ablandamiento podrían usarse en lugares remotos donde el acceso a productos químicos o la descarga de salmueras de intercambio iónico resulten difíciles, o en caso de que se agreguen.

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS

Desde la posición de O'Carroll (2014), las aguas subterráneas son una fuente importante de agua en todo el mundo y, como tal, su protección es primordial. Se estima que las fuentes de agua subterránea proporcionan entre el 95% y el 100% de suministros de agua potable en algunos países en desarrollo, mientras que la mayoría de las regiones del mundo obtienen entre el 30% y el 50% de sus suministros de agua potable de fuentes de agua subterránea.

Para Macklin et al. (2021), La descarga submarina de agua subterránea lo definen como cualquier flujo de agua que pasa a través de los sedimentos hacia los océanos costeros, independientemente de la composición del agua o la fuerza impulsora.

Desde el punto de vista de Goldstein y DellaSala (2020), el agua subterránea, la parte "invisible" del ciclo hidrológico, está en conexión y

constante intercambio de agua con los cuerpos de agua superficial; los acuíferos de agua subterránea se forman debido a la percolación desde el fondo de los ríos, lagos, humedales, estuarios y, a cambio, los cuerpos de agua superficial se reponen por los flujos de agua subterránea.

Para Stephenson (2018), el agua subterránea es un componente importante del suministro público de agua, así como también sustenta ríos y humedales. El agua subterránea es un recurso que se repone lentamente; en la mayoría de los casos, las tasas de reabastecimiento son significativamente más bajas que las tasas de explotación, lo que a menudo resulta en una caída rápida del nivel freático y el secado del recurso.

El agua subterránea juega un papel crucial en el sostenimiento del flujo de agua durante los períodos secos y es vital para muchos lagos y humedales. Además de los usos humanos, muchas plantas y animales acuáticos dependen del agua subterránea que se descarga en arroyos, lagos y humedales.

a) Calidad de las aguas subterráneas: La composición de las aguas subterráneas es complejo, variante y es un desafío permanente que obliga a ser estudiado para sus diversos usos. La composición química de estas aguas es de suma importancia para las personas que lo reutilizan en las diferentes actividades.

Las composiciones químicas de estas aguas subterráneas dependen directamente de varios factores entre ellos: Tipo de roca huésped, tipo de aguas superficiales, clima, duración del flujo, etc.

Chamley (2003), Considera que las características químicas del agua subterránea generalmente se etiqueta por la naturaleza de los aniones dominantes: bicarbonatos (HCO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^-), cloruros (Cl^-) y los cationes dominantes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+). El agua subterránea está más mineralizada cuanto más profunda y prolongada es su migración, y cuanto más marcado es por los intercambios con rocas huésped más calientes y solubles.

Matter (2013) diferencia a las aguas subterráneas según la composición de los aniones y cationes: Constituyentes mayoritarios (HCO_3^- , CO_4^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^-), (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) y (CO_2 , O_2 , SiO_2), Constituyentes minoritarios (F^- , S^- , SH^- , I^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^-) y (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+}) y constituyentes trazas (Al^{3+} , Ti^{4+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , etc.).

b) Clasificación de aguas subterráneas

De acuerdo con las condiciones de ocurrencia las aguas subterráneas, se distinguen en cuatro tipos principales.

El agua connata también puede referirse como agua fósil. Esta es agua atrapada en los poros de la roca durante la formación de las rocas. La composición química del agua cambia con los cambios que sufre la roca. La mayor parte del agua connata es salina.

Tabla 1
Caracterización química y física para NGPW, OPW, TGSPW, SGPW y CBMPW

Constituyentes	NGPW (mg/L)	SGPW (mg/L)	TGSPW (mg/L)	CBMPW (mg/L)	OPW (mg/L)
pH	7	8.36	8.6	9.87	8.9
Conductivity (uS/cm)	586000	32200	24400	145000	1469
Alkalinity	285	188	1424	9450	380
Sulfate	47	3663	48	5590	13686
Ca	51300	83950	74185	5870	52920
Cl	190000	212700	216000	70100	52920
Na	120000	204302	80000	34100	126755
Mg	433	25340	8750	1830	5096

Nota. Principales sustancias presentes para las aguas connatas. Extarido de (Alley et al., 2011). **Dónde:** NGPW: Fuente de agua a partir de gas natural convencional, SGPW: Fuente de agua a partir de gas de esquisto, TGSPW: Fuente de agua a partir de arenas compactas de gas, CBMPW: Fuente de agua a partir de metano de lecho de carbón, OPW: Fuente de agua a partir de petróleo convencional

El agua meteórica se refiere al agua subterránea que se origina de la lluvia y otras formas de precipitación, como granizadas y nevadas. Es el resultado del agua de precipitación que se filtra en el suelo.

El agua juvenil también se conoce como agua magmática. Esta es el agua que se acerca a la superficie de la tierra debido a las actividades volcánicas. Suele tener un alto contenido en minerales.

El agua oceánica subterránea que resulta de la filtración de agua subterránea en el suelo. Es común en las áreas costeras donde el agua del océano se filtra horizontalmente hacia el suelo desde el océano.

Mediante la presencia de los sólidos disueltos totales se puede diferenciar el tipo de agua, en la tabla 2 se muestran la cantidad de sólidos disueltos de diversas aguas.

Tabla 2
Sólidos Totales Disueltos en Varios Aguas

Agua	Rangos Típicos de TDS (mg/L)
Precipitación	<20
Fresco	20 - 1000
Salobre	1000 - 35000
Océano	30000 - 40000
Solución salina	35000 - 100000
Salmuera	>100000

Nota. Valores de los TDS para diferentes soluciones.
Extraído de (Matter, 2013)

Estos constituyentes para un entendimiento mejor exigen una clasificación en grupos que conforman con características comunes y sean relativos con fines prácticos.

En aguas subterráneas pueden acumularse calcio y magnesio a medida que se filtra a través de depósitos de piedra caliza o tiza. El agua que tiene grandes cantidades de calcio y magnesio puede dejar residuos duros o incrustaciones. Un ejemplo de este residuo son las manchas de agua en la puerta de la ducha de vidrio. La dureza del agua se refiere a su contenido total de iones polivalentes que causan esta incrustación, siendo los principales contribuyentes el calcio y el magnesio divalentes. Algunos estudios consideran que las durezas de las aguas subterráneas

naturales están entre 10 a 2000 mg/L de CaCO₃. En tabla 3 se muestra la clasificación en función de la dureza.

Tabla 3
Clases de agua en función de la dureza

Dureza como Carbonato de calcio (mg/L)	Clase de agua
0 - 75	Suave
75 - 100	Moderadamente duro
150 - 3000	Difícil
>3000	Muy duro

Nota. Valores de las concentraciones de carbonato. Extraído de Sawyer (1960).

Por otra parte según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las aguas son moderadamente blandas están en el rango de 61 a 120 mg/L, agua dura entre 121 a 180 mg/L, y muy dura mayores a 180 mg/L.

c) Fuente de aguas subterráneas

Para Maltby (2009), las diversas fuentes que existen para formar las aguas subterráneas son: Agua de lluvia, agua derretida, agua de superficie, agua magmática, muelles, etc. Las fuentes de recarga de aguas subterráneas se han clasificado en muy adecuadas, adecuadas, moderadamente adecuadas, menos adecuadas e inadecuadas.

El agua almacenada en los humedales marginales de los ríos y lagos debido a las inundaciones desbordantes o la escorrentía de las laderas puede filtrarse hacia los acuíferos subterráneos. Esto puede reponer los recursos de aguas subterráneas, mantener los ecosistemas de humedales que dependen de las aguas subterráneas en las áreas de descarga o mantener el flujo base en los ríos alimentados por descargas en otros lugares.

Para que ocurra el ciclo de la recarga y descarga de las aguas subterráneas se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Los humedales debe recibir importantes aportes de agua, ya sea por escorrentía o por inundación desbordante. Si los únicos aportes provienen de la lluvia, es poco probable que la recarga ocurra a tasas más altas que en áreas que no son humedales.
2. Antes de la entrada de agua, el nivel freático debe ser lo suficientemente bajo para permitir que el agua estancada se infiltre en el suelo antes de que se evapore o se escurra.
3. El humedal debe conectarse a un acuífero por medio de una vía hidrológica. Esto generalmente significa que el humedal debe estar sobre el acuífero y no estar separado de él por depósitos de baja permeabilidad.
4. No puede haber descarga de agua subterránea.

d) Usos de aguas subterráneas: Como fuente principal para todo tipo de requerimiento, estas aguas deben ser analizadas para contrarrestar los efectos como la corrosión o incrustamiento en el uso diario, para ello se debe tener en cuenta factores como el pH efectivo del agua, pH en el nivel de saturación, índice de Langelier y la presencia de carbonato de calcio y magnesio con la finalidad de prevenir efectos secundarios tanto para la salud humana y accesorios empleados para el abastecimiento de agua doméstica e industrial.

El nivel de la dureza del agua es evaluado por la OMS en diferentes niveles de rechazo para su uso. Por otra parte nos interesa conocer los efectos corrosivos e incrustantes de la dureza. La OMS indica que la aceptación de la dureza por parte de la población es variable. Aguas con concentraciones superiores a 125 mg/L de $MgCO_3$ tienen efectos laxantes y con contenido superior a 200 mg/L pueden generar problemas de incrustaciones en las redes de distribución. Por otra parte según Calvo y Sardiñas (1992), han relacionado las aguas blandas con problemas ocasionados a cardiovasculares, sin embargo en otros estudios la presencia de carbonato de calcio ayuda a la formación de cálculos renales. En la tabla 3 se muestra las concentraciones permitidas de las durezas en forma de carbonato de calcio en las diferentes actividades según la guía de calidad de Canadá.

Tabla 4
Concentraciones Permisibles de CaCO₃ en usos Industriales

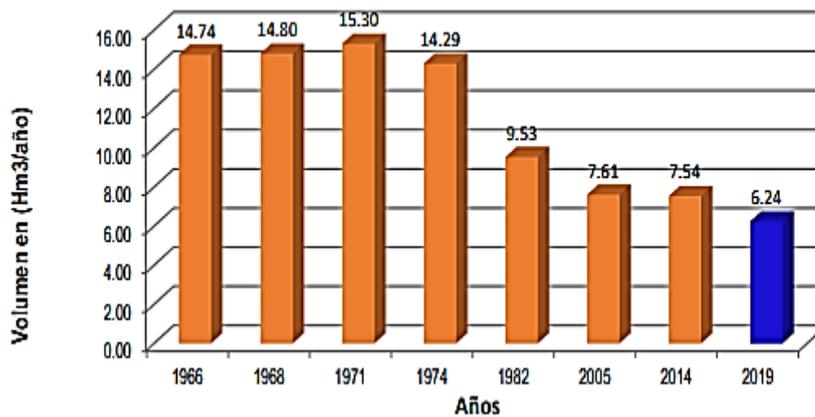
Industria	CaCO₃ (mg/L)	MgCO₃ (mg/L)
Generación eléctrica de vapor	<1.0	
Industria de acero y hierro	<100	
Pulpa y papel	<20	<20
Petróleo	<350	<25
Gaseosas	<200	
Lechería	<180	
Refinería y azúcar	<100	
Fábrica de hielo	<70	
Química orgánica	<250	
Textiles	<25	
Tenería cueros	<150	

Nota. Concentraciones recomendados de carbonato para las industrias. Extraído de Mora y Alfaro (1999).

2.1.2. AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA

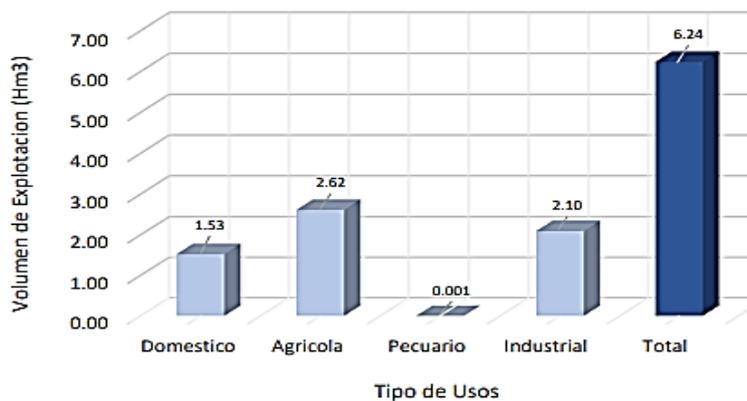
La sobreexplotación de las aguas subterráneas en el Distrito de Chilca ha conllevado a serios problemas tanto en la calidad como fuente de reserva para muchas aplicaciones. Según la ANA (2019), en Chilca el volumen total de extracción de agua fue de 6'236,822.51 m³, de las cuales una parte se utilizó para la actividad agrícola (2'615,290.03 m³ /año), para la actividad de la población local (1'525,149.6 m³ /año), para la zona pecuaria (768.78 m³ /año) y para las actividades industriales (2'095,614.10 m³ /año). En la figura 1 se muestra el volumen de extracción de las aguas subterráneas por años y en la figura 2 la extracción de agua destinadas según la actividad humana.

Figura 1
Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas en Chilca



Nota. Explotación de aguas subterráneas en Chilca para los años 1966 y 2019 (hm³).
 Extraído de (ANA, 2019).

Figura 2
Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas en Chilca



Nota. Extracción de los pozos por su uso (hm³), acuífero Chilca - 2019. Extraído de (ANA, 2019).

2.1.3. REGULACIONES PARA LA CONCENTRACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO O DUREZA EN AGUA POTABLE A NIVEL INTERNACIONAL

Concentraciones muy bajas o muy altas de calcio (Ca) y magnesio (Mg) o dureza total en el agua potable han sido reconocidos empíricamente como la causa de los problemas de corrosión, descamación o sabor del agua, a sí mismo se han evidenciado diversos problemas de salud generados por las concentraciones extremas y mínimas de estos minerales, sin embargo este conocimiento no está debidamente contemplado en las normas de calidad del agua potable, sobre todo, porque cada vez que se produce más agua por desalinización, perturba su composición mineral natural. Aunque la actual Directiva de agua potable de la UE no incluye límites de dureza, Ca o Mg, sin embargo la mayoría de los estados miembros regulan estos parámetros ya sea a través de leyes (12 países) u orientación técnica (7 países), y varios países han emitido información educativa para el público (Kozisek, 2020).

Recientemente un grupo de investigadores relacionados a la importancia de Ca y Mg, concluyeron que existe un consenso creciente entre los epidemiólogos de que la evidencia epidemiológica, junto con evidencia clínica y nutricional, es ya lo suficientemente fuerte como para sugerir que se debe emitir una nueva guía, ya que en muchos países carecen de esta, por lo tanto es sorprendente que este vasto conocimiento sobre los efectos en la salud de dureza del agua, Ca y Mg no se ha abordado adecuadamente en el actual Directiva de Agua Potable.

La primera directiva europea común para la calidad del agua potable fue emitida en 1980. De acuerdo con la ciencia predominante de la opinión sobre la importancia para la salud del Ca y Mg en el agua potable según OMS (1979 y 1984), se incluyeron requisitos cualitativos en la directiva. Habían niveles de referencia para Ca (100 mg/L) y Mg (30 mg/L) y concentración máxima admisible de Mg (125 mg/L); y una

concentración mínima de 60 mg/L para la dureza total (TH) expresada como calcio o cationes equivalentes para el agua ablandada (EEC, 1980).

La OMS (2017b) recomendó a la Directiva de la Comisión Europea de que incluya en el informe, la concentración de los minerales (Ca y Mg), citando que cualquier agua potable que se obtenga de la desalinización o cualquier tratamiento de ósmosis inversa, se debe añadir sales de calcio y magnesio para acondicionar y reducir la corrosión y mejorar el sabor”.

Las aguas no deben ser agresivas ni corrosivas, esto se aplica particularmente a las aguas que provienen del proceso (desmineralización, ablandamiento, tratamiento de membranas, ósmosis inversa, etc.), y estén destinados para consumo humano, a estas aguas se le pueden agregar sales de calcio y magnesio y acondicionarlas para reducir posibles impactos negativos en la salud, como la corrosión (Kozisek, 2020). Por otro lado en el anexo se muestra algunas regulaciones de otros países sobre la concentración de Ca y Mg en el agua tratado para consumo.

Tabla 5
Concentraciones mínimas requeridas y recomendadas de minerales en agua blanda o desmineralizada (desalinizada) según lo propuesto por varios estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE

Parámetro	Unidad	Concentración mínima requerida en ablandados o desmineralizados (desalinizada) del agua (a)	Concentración óptima recomendada desde el punto de salud (b)
Calcio (Ca)	mg/L	30	40 - 80
Magnesio (Mg)	mg/L	10	20 - 40
Sólidos disueltos totales (TDS)	mg/L	100	200 - 500

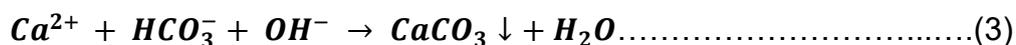
Nota. Concentraciones mínimas recomendadas. Extraído de (Kozisek, 2020). (a) El agua que contiene una concentración más baja de Ca, Mg o TDS no debe someterse a ablandamiento o desmineralización (desalinización) y (b) Los valores se basan en estudios epidemiológicos que muestran que la incidencia de enfermedades relacionadas es la más baja en estos rangos de calidad del agua

2.1.4. ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO

Por lo general, hay dos tipos de tratamientos o ablandamiento electroquímicos para eliminar la dureza del agua. Uno es la precipitación electroquímica, que elimina los iones de dureza mediante la creación de un entorno de pH alto alrededor de la superficie del cátodo en la que OH⁻ se crean con la ayuda de electrodos y un flujo suficientemente alto de corriente eléctrica está presente en la vecindad de la superficie del electrodo. Durante la electrólisis del agua, el oxígeno disuelto y el agua se reducen en el cátodo (Zeppenfeld, 2018):



El ambiente alcalino conduce a las reacciones de precipitación como sigue:



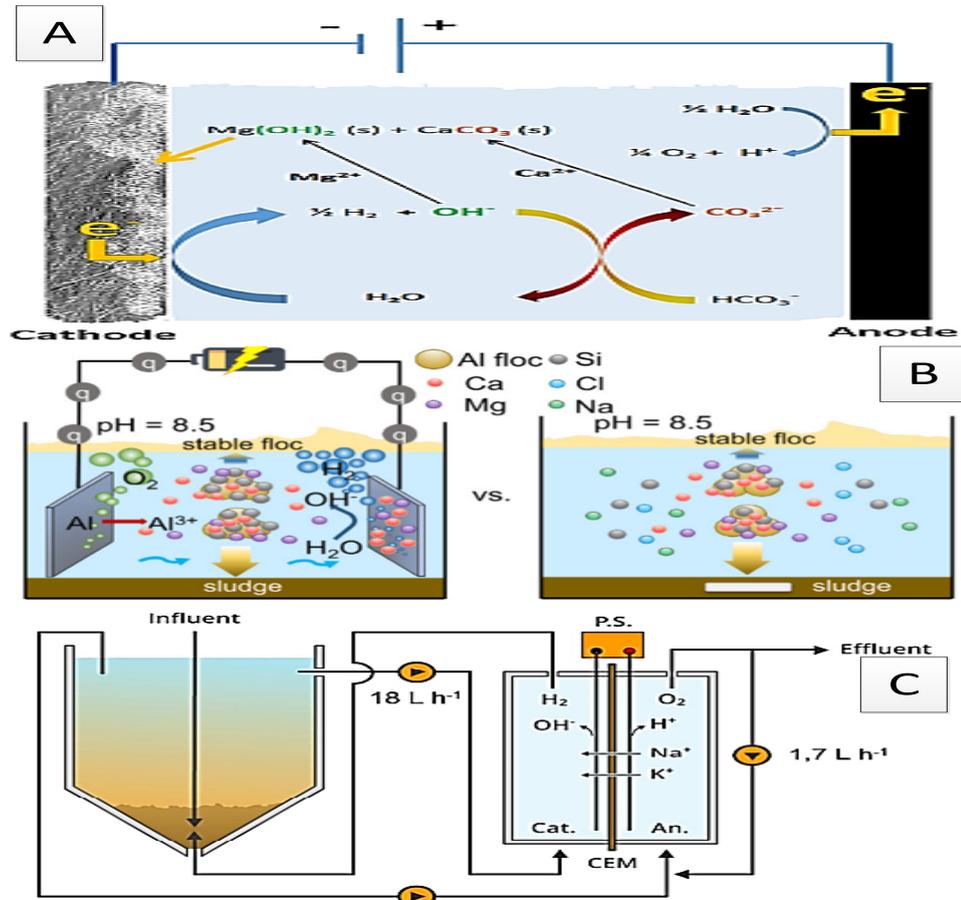
Las principales reacciones anódicas son la reacción electrolítica de H₂O, generando oxígeno en ánodos dimensionalmente estables (DSA). Según Liao et al. (2009), la segunda forma de ablandamiento es mediante la electrocoagulación (EC), el cual elimina la dureza representado por los iones no solo por precipitación de incrustaciones en la superficie del cátodo como en sino también por la adsorción de Ca²⁺ y Mg²⁺ al floculo de Al(OH)_{3n} producido a partir de la superficie del ánodo de Al de la siguiente manera:



Sin embargo, cada uno de los dos métodos de control de incrustación electroquímica tiene sus propias desventajas: la primera configuración necesita un área catódica alta para precipitan de los iones de dureza, lo que inevitablemente da como resultado un alto costo y una limpieza onerosa de la superficie del cátodo, para la segunda configuración siempre produce grandes volumen de lodo en el proceso de disolución del ánodo de Al con alta densidad de corriente, que no es respetuoso con el medio ambiente hasta un cierto punto.

Con el fin de superar las limitaciones de cada método electroquímico, se propuso una nueva configuración electroquímica. Simplemente, se empleó una membrana catiónica como medio de separación entre los electrodos anódicos y catódicos. La finalidad es generar e incrementar en el lado del cátodo la concentración del radical OH^- mediante la oxidación del agua, incrementando el valor de pH, con lo cual, secuencialmente y paralelamente el calcio y magnesio en la solución empezaría a precipitar, este comportamiento se puede ver en la figura del efecto generado del pH en la solubilidad de carbonato de calcio.

Figura 3
Tipos de ablandamiento de las aguas superficiales

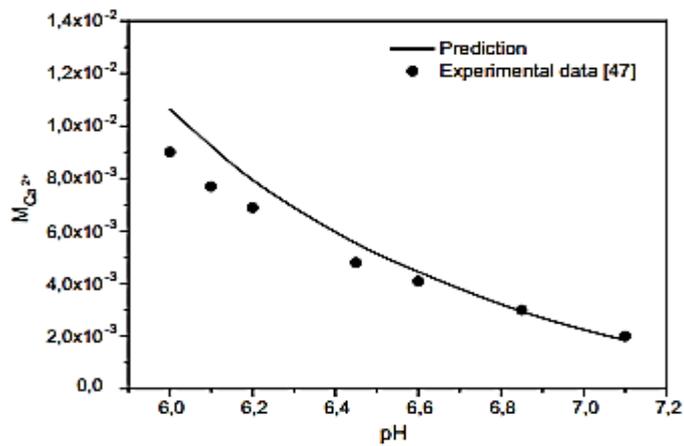


Nota.(A)ablandamiento por electrodeposición, (B) ablandamiento por electrocoagulación y (C) ablandamiento por precipitación en una celda con membrana catiónica.

a) Propiedades físicas y químicas del CaCO_3

Solubilidad de carbonato de calcio (CaCO_3): Es una de las propiedades a tener en cuenta para manejar el comportamiento del carbonato de calcio, según la figura 4 podemos apreciar que la solubilidad de la sal aumenta a medida que el pH de la solución disminuye, este efecto sucede porque a condiciones ácidas predomina iones de bicarbonato y carbonato (HCO_3^- y CO_3^{2-}), favoreciendo la absorción del CO_2 , y con ello hay mayor solubilidad en forma de iones de carbonato.

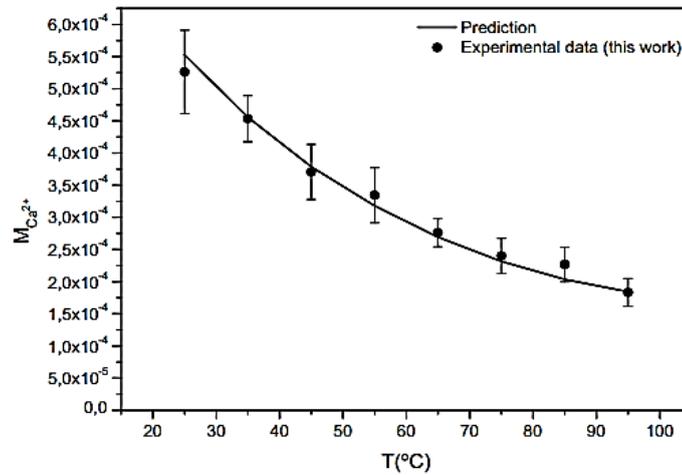
Figura 4
Efecto del pH en la solubilidad de CaCO₃



Nota. Figura del comportamiento de la solubilidad del carbonato a diferentes grados de pH, a condiciones de 25°C y 1 bar de presión de aire. Extraído de Coto et al. (2012).

En cambio, si a la solución de carbonato de calcio se le somete a diferentes grados de temperatura, la solubilidad disminuye a medida que se aumenta la temperatura, empieza la formación de la cristalización formándose insoluble, tal como se muestra en la figura 5.

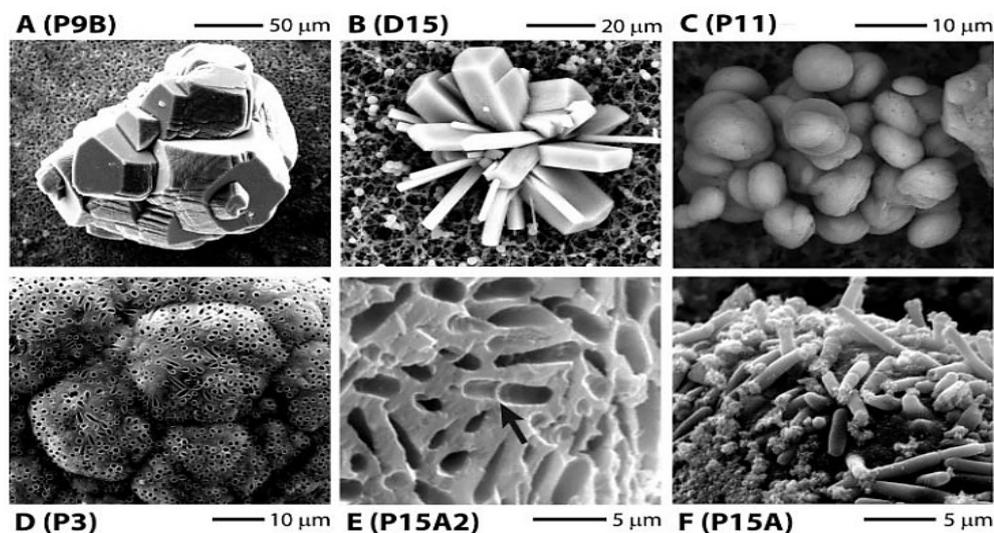
Figura 5
Efecto de la temperatura en la solubilidad de CaCO₃



Nota. Figura del comportamiento de la solubilidad del carbonato a diferentes grados de temperatura, a 1 bar de presión de aire. Extraído de Coto et al. (2012).

El carbonato de calcio una vez solidificado puede formar 6 diferentes estructuras reticuladas, cada una con diferentes propiedades físicas y química. Las formas conocidas de estas sales son: carbonato amorfo, carbonato monohidratado y calcio hexahidratado. Las tres formas más conocidas se muestran en la siguiente figura 6.

Figura 6
Imagen SEM de carbonatos en sus 3 forma cristalinas



Nota. Diferentes formas de carbonato de calcio en sus estados cristalinos (A) calcita, (B) aragonita y (C) vaterita. Extraído de Banks et al. (2010).

2.1.5. MARCO NORMATIVO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el marco legal se encuentra toda la normativa legal (leyes, normas, reglamentos y ordenanzas) que generalmente se relacionan entre sí y que proporciona la información reglamentaria necesaria para realizar cierta actividad, dependiendo del sector, en este caso saneamiento y manejo de recursos hídricos.

a) Reglamento de la calidad del agua para consumo humano, D.S.N°031-2010-SA

El acceso al agua potable es una necesidad primaria y por lo tanto un derecho humano fundamental; en este contexto, era necesario actualizar el Reglamento de los requisitos oficiales físicos, químicos y bacteriológicos, que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables; que, por su antigüedad (1946), se hacía inaplicable; es entonces que, en el año 2000, la Dirección General de Salud Ambiental (2011) asume la tarea de elaborar el Reglamento de la calidad del agua para consumo humano, tarea que el 26 de setiembre de 2010, a través del D.S. N° 031-2010-SA, se vio felizmente culminada.

Este nuevo reglamento, a través de sus 10 títulos, 81 artículos, 12 disposiciones complementarias, transitorias y finales y 5 anexos, no solo establece límites máximos permisibles, en lo que a parámetros microbiológicos, parasitológicos, organolépticos, químicos orgánicos e inorgánicos y parámetros radiactivos se refiere; sino también le asigna nuevas y mayores responsabilidades a los gobiernos regionales, respecto a la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano; además, fortalecer a la DIGESA en el posicionamiento como autoridad sanitaria frente a estos temas.

Artículo 2. Objeto

Con arreglo a la Ley N° 26842, Ley General de Salud, el presente Reglamento tiene como objeto normar los siguientes aspectos:

1. La gestión de la calidad del agua;
2. La vigilancia sanitaria del agua;
3. El control y supervisión de la calidad del agua;
4. La fiscalización, las autorizaciones, registros y aprobaciones sanitarias respecto a los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano;
5. Los requisitos físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos del agua para consumo humano;
6. La difusión y acceso a la información sobre la calidad del agua para consumo humano.

b) Estándares de Calidad de Ambiental (ECA) para agua D.S. N° 004-2017- MINAM

Artículo 1. Objeto

La presente norma tiene por objeto compilar las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

para agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente decreto supremo y el anexo que forma parte integrante del mismo. Esta compilación normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros que fueron aprobados por los referidos decretos supremos.

Artículo 3. Categorías de los estándares de calidad ambiental para agua

1. Categoría 1: Población y recreacional

Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable. Entiéndase como aquellas aguas que, previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano.

- A1. Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección. Entiéndase como aquellas aguas que, por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente.
- A2. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional, mediante dos o más de los siguientes procesos: coagulación, floculación, decantación, sedimentación, y/o filtración o procesos equivalentes; incluyendo su desinfección de conformidad con la normativa vigente.
- A3. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado. Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional que incluye procesos físicos y químicos avanzados como percloración, micro filtración, ultra filtración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa o procesos equivalentes establecidos por el sector competente.

2.1.6. MARCO INSTITUCIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El término “marco institucional” se refiere a un conjunto de estructuras organizativas formales, reglas y normas formal para la prestación de servicios. En el campo de la gestión del agua y el saneamiento, un marco institucional implica delinear las responsabilidades de las instituciones de servicios para varios aspectos del sector. En el anexo 10 se observa algunas instituciones tutelares que ven velan sobre las aguas subterráneas.

2.1.7. TIPOS DE POZOS

a) Pozos tubulares

Un pozo entubado es un tipo de pozo de agua en el que se perfora bajo tierra un tubo o tubería de acero inoxidable largo, de 100 a 200 milímetros (3,9 a 7,9 pulgadas) de ancho. El extremo inferior está equipado con un colador y una bomba eleva el agua para el riego. La profundidad requerida del pozo depende de la profundidad del nivel freático (Mather & Rose, 2012).

b) Pozos tajo abierto

Cuando se excava el suelo de un tajo abierto por debajo del nivel freático, el agua subterránea ingresa al tajo a través de las caras de filtración que se forman en las paredes del tajo y como un flujo ascendente en el piso del tajo. Por lo general, hay dos componentes en el flujo de entrada; entrada difusa ampliamente distribuida a través del macizo rocoso general y flujo concentrado donde las fracturas permeables intersectan la pared del tajo (Mather & Rose, 2012).

c) Pozos mixtos

Los pozos mixtos están conformados tanto en forma tubular y tajo abierto, Hoy en día, cavar un pozo a mano se está volviendo obsoleto, ya que los métodos de perforación automatizados reemplazan los métodos de trabajo manual. Los pozos modernos se perforan más a menudo con

un equipo de perforación montado en un camión. Aún así, hay muchas formas de colocar un pozo; estos son algunos de los métodos comunes (Mather & Rose, 2012).

2.1.8. EFECTO A LA SALUD DE LAS AGUAS DURAS

La dureza del agua es perjudicial para las calderas y tuberías de agua caliente ya que se produce la deposición de sales, lo que puede reducir su eficacia, lo duro del agua no es buena para lavar ya que es difícil que se forme espuma con jabón. La Organización Mundial de la Salud afirma que el agua dura no tiene efectos adversos para la salud conocidos, no hay efectos graves para la salud asociado con el consumo de agua dura. Sin embargo, el agua sólida actúa como un alimento complemento ya que contiene calcio y magnesio que fortalece huesos y dientes. El agua dura contiene una alta concentración de minerales disueltos por lo tanto millones de personas piensan que estos minerales disueltos tienen efectos positivos en la salud de sus bebedores. Muchos estudios sugirieron que el calcio y el magnesio presentes en el agua dura pueden actuar como protectores factores contra las enfermedades cardiovasculares. Se ha informado que beber agua dura podría tener influencia a la formación de condiciones de ciertas enfermedades. El agua dura puede cambiar el equilibrio del pH de la piel dejando nuestra piel menos saludable que antes. Por lo tanto, las personas con enfermedades de la piel pueden encontrar su condición de enfermedad aumentando cuando se lavan con agua dura. El pH oscila entre 0 y 14 indica qué tan ácida o alcalina es la sustancia. El agua ácida tiene un pH menor de 7 y el agua alcalina tiene un pH superior a 7 y el agua pura neutra tiene un valor de pH de 7. El equilibrio del pH de la piel se puede cambiar debido al uso de agua dura, que disminuye la fuerza protectora de la piel contra las bacterias e infecciones. Los problemas de la piel son causados por la presencia de exceso de minerales en el agua. Alrededor del 80 por ciento de las enfermedades en los países en desarrollo es causado por el consumo de agua contaminada, sin embargo, muchos de los hogares en todo el país no tratan su agua potable. La Oficina de India Standard (BIS) ha desarrollado una guía para el agua potable segura.

Según la Junta Central de Aguas Subterráneas, el BIS tiene un protocolo de especificaciones para monitorear el nivel de agua potable. La Organización Mundial de la Salud confirma los daños efectos del uso constante de agua dura sobre el sistema cardiovascular. El cuerpo humano obtiene calcio y magnesio de compuestos orgánicos de alimentos pero el agua dura contiene compuestos inorgánicos de estos elementos, y por lo tanto, son absorbidos inaceptable. Como resultado, la acumulación de exceso Pueden ocurrir sales en las articulaciones y, por lo tanto, problemas del sistema musculo esquelético (Research , 2022)

2.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES

- **Agua:** Es un solvente universal líquido sin color, sin sabor e sin olor, fundamental para la vida animal y vegetal (Romero, 2009).
- **Aguas subterráneas:** Es aquella proporción del agua real en la parte inferior de la extensión terrestre que puede ser recaudada por perforaciones, galerías de drenaje o la que emana naturalmente hacia el exterior a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Ordoñez, 2012).
- **Celda electroquímica:** Consiste en dos conductores llamados electrodos, cada uno de los cuales está sumergido en una disolución de electrolito. En la mayoría de las celdas que serán de nuestro interés, las disoluciones que rodean a los dos electrodos son distintas y deben estar separadas para evitar la reacción directa entre los reactantes (Skoog, 2014).
- **Ablandamiento:** El ablandamiento del agua es una técnica que sirve para eliminar los iones que hacen a un agua dura, en la mayoría de los casos iones de calcio y magnesio. En algunos casos iones de hierro también cusan dureza del agua y pueden ser eliminados durante el proceso de ablandamiento (Moreira-Romero, 2016).
- **Desmineralización:** La desmineralización, no es específica para la eliminación de dureza, aunque se reduce el contenido de calcio y

magnesio conjuntamente con otros iones. Es un proceso mejor que el ablandamiento químico, pero también es mucho más caro (Moreira-Romero, 2016).

- **Dureza:** Es una característica que surge de la mayor o menor proporción de sales disueltas presentes, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} , su grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales de calcio y magnesio presentes pueden hallarse junto a diferentes aniones, si se encuentran asociados de HCO_3^- componen la dureza temporaria o carbónica, si lo están de SO_4^{2-} , Cl^- , etc. Componen la dureza permanente o no carbonatada (Bottani & Odetti, 2014).
- **Electrólisis:** La electrolisis es una tecnología electroquímica mediante la que se provoca un cambio químico en un líquido por intervención de la energía eléctrica. La energía eléctrica se introduce mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) sumergidos en el líquido (Barrera, 2014).
- **Carbonato de calcio:** El carbonato de calcio es un compuesto químico cuya fórmula es CaCO_3 . Se trata de un compuesto ternario, que entra en la categoría de las oxosales. Es una sustancia muy abundante en la naturaleza, formando rocas, como componente principal, en todas partes del mundo y es el principal componente de conchas y esqueletos de muchos organismos (p. ej. moluscos, corales) o de las cáscaras de huevo (Aldebarán-Sistemas, 2016).
- **Precipitación:** La precipitación es la creación de un sólido a partir de una solución. Cuando la reacción ocurre en una solución líquida, el sólido formado se llama 'precipitado'. El químico que hace que se forme el sólido se llama 'precipitante'. Sin suficiente fuerza gravitatoria (sedimentación) para unir las partículas sólidas, el precipitado permanece en suspensión (Adler et al., 1967).

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

Hi: El ablandamiento electroquímico es eficiente en la reducción de calcio presente en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico – 2022.

Ho: El ablandamiento electroquímico no es eficiente en la reducción de calcio presente en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico – 2022.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

Hi.1: Al definir la dureza total, cálcica y magnésica en las aguas subterráneas de Chilca, antes de su tratamiento, los valores en los cinco puntos se encuentran por encima de la dureza del caño domiciliario.

Ho.1: Al definir la dureza total, cálcica y magnésica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento, los valores en los cinco puntos, se encuentran por debajo de la dureza del caño domiciliario.

Hi.2: Al definir la dureza total, cálcica y magnésica en las aguas subterráneas, después de su tratamiento, los valores en los cinco puntos se encuentran en las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.

Ho.2: Al definir la dureza total, cálcica y magnésica en las aguas subterráneas, después de su tratamiento, los valores de los cinco puntos no se encuentran en las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.

2.4. VARIABLES

2.4.1. VARIABLES DEPENDIENTES

Concentración de calcio en aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico.

2.4.2. VARIABLES INDEPENDIENTES

Ablandamiento electroquímico.

2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

“EVALUACIÓN DEL ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE CALCIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA DESTINADAS A USO DOMÉSTICO - 2022”

Tabla 6

Operacionalización de variables

Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	DIMENSIÓN	INDICADORES	VALOR FINAL	TIPO DE VARIABLE
Concentración de calcio en aguas subterráneas de Chilca destinadas para el consumo humano	Se define como agua blanda la que presenta concentraciones inferiores a 60 mg/L de carbonato de calcio (CaCO ₃), medianamente dura entre 61 y 120 mg/L, dura entre 121 y 180 mg/L y muy dura aquella con valores superiores a 180 mg/L (OMS)	Se midió la concentración de calcio en agua subterránea empleando la técnica de volumetría, según la norma APHA versión 23. Recogiendo datos antes y después del tratamiento. los resultados son expresados en mg/L.	Parámetro químico	Concentración de calcio expresado en carbonato de calcio (CaCO ₃)	mg/L	Numérica continua

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	DIMENSIÓN	INDICADORES	VALOR FINAL	TIPO DE VARIABLE
Ablandamiento electroquímico	El ablandamiento electroquímico consiste en la reducción de iones calcio y magnesio mediante la electrodeposición y electrocoagulación impulsadas por la corriente eléctrica como insumo	Proceso electroquímico aplicado para reducir la concentración de iones de calcio, tomando en cuenta algunos parámetros como, el voltaje, pH, tiempo, tipo de material de electrodo, etc.	Parámetros operativos de funcionamiento	Reduce la concentración de calcio en forma de (CaCO ₃)	SI/NO	Nominal dicotómica
			Etapas de armado del módulo experimental	Etapa 1,....Etapa final	SI/NO	Nominal dicotómica

Nota. La tabla describe la variable dependiente e independiente y sus dimensiones, sus indicadores, el valor final, el tipo de variable y los instrumentos.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según Supo (2014), la investigación se centra en los cuatro criterios evaluativos:

Tabla 7
Tipo de investigación

CRITERIOS	INDICADOR	JUSTIFICACIÓN
Planificación de las mediciones de la variable de estudio	Prospectivo	Fue prospectivo ya que los datos fueron recogidos directamente del campo experimental, para el caso de la concentración de calcio se recogieron los volúmenes gastados en la volumetría.
Número de mediciones de la variable de estudio	Longitudinal	Fue longitudinal debido a que se realizaron más de una medición de la variable de estudio (concentración final del calcio) expresado en mg/L.
Número de variables analíticas	Analítico	Es analítico debido a que el estudio está conformado con más de una variable enfocado en ablandar la concentración del calcio mediante una celda electrolítica construido a nivel laboratorio.
Intervención del investigador	Con intervención	Con intervención porque la investigación se realizó a nivel experimental donde se modificaron la concentración inicial de calcio mediante el tratamiento eléctrico.

Nota. Tipos de investigación para “Evaluación del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas para el consumo humano – 2022”.

3.1.1. ENFOQUE

En base al criterio de Supo (2014), el estudio tiene un enfoque cuantitativo porque la recolección de datos provienen del campo experimental de forma numérica, el cual fue analizado estadísticamente para corroborar su eficiencia.

Estos datos volumétricos se recogieron después de aplicar la técnica volumétrica para cuantificar el antes y después de la concentración de los iones de calcio y magnesio en las aguas subterráneas.

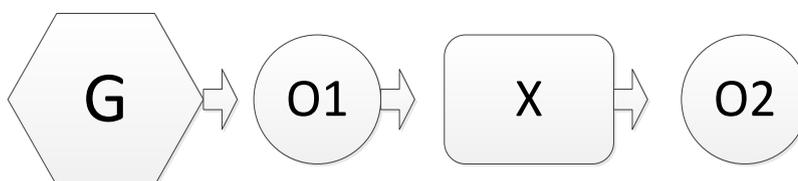
3.1.2. ALCANCE O NIVEL

La investigación pertenece a un nivel aplicativo ya que con la implementación de la técnica electroquímica se da una solución para mejorar la dureza de las aguas subterráneas, de esta forma se mejora la situación inicial después de su aplicación evaluando la eficiencia en función de la reducción de la dureza cálcica (Supo, 2014).

3.1.3. DISEÑO

La investigación tiene la característica de un diseño pre-experimental, ya que se cuantificó antes y después de su tratamiento a un grupo control (Sampieri, 2016).

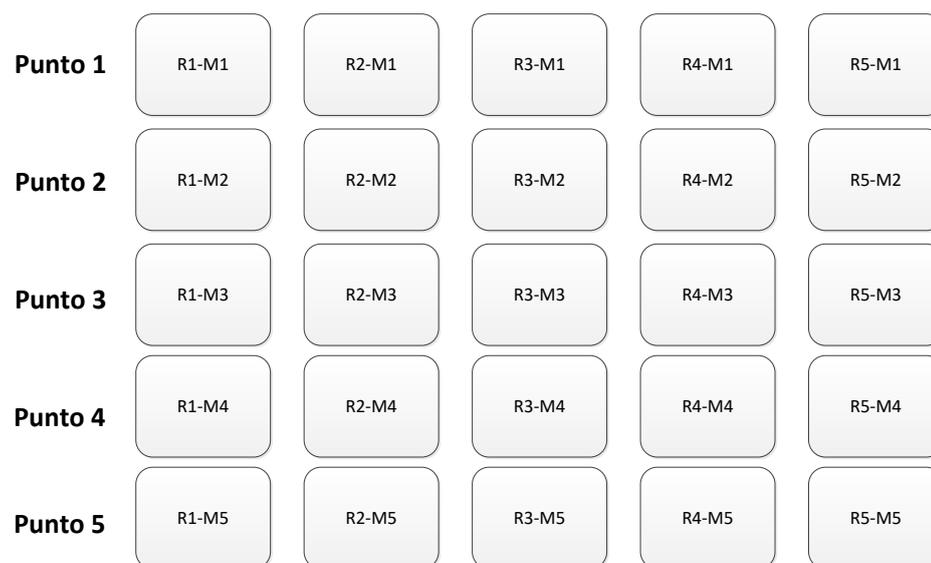
Figura 7
Diseño de experimento



Dónde:

G: Grupo control X: Tratamiento O: Caracterización de muestra

Figura 8
Diseño de grupos evaluados



Nota. La figura muestra el número de experimentos realizados por punto de muestreo

Dónde:

R1.....R5: Réplicas realizadas por punto de monitoreo

M1.....M5: Puntos de monitoreo

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

De acuerdo con Hernández (2014), indica que “la población o universo es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones”. Bajo este criterio la población, estuvo conformado por la unidad de estudio conformado por agua subterránea, estas aguas se encuentran en el distrito de Chilca, provincia de Cañete, Departamento de Lima, el agua subterránea se caracteriza por tener altos niveles de concentración de sólidos disueltos totales.

Coordenadas geográficas con respecto al meridiano de Greenwich el distrito de Chilca se localiza en: LO (76°45' 20") y LS (12° 21' 12").

Tabla 8
Coordenadas de los Puntos de Monitoreo de las Aguas Subterráneas

Puntos de monitoreo	Longitud Oeste	Latitud Sur
Punto 1	76° 43' 16"	12° 32' 29"
Punto 2	76° 43' 15"	12° 32' 15"
Punto 3	76° 44' 02"	12° 31' 15"
Punto 4	76° 43' 16"	12° 32' 50"
Punto 5	76° 43' 19"	12° 32' 22"

Nota. Coordenadas de la ubicación del agua subterránea.

3.2.2. MUESTRA

La muestra en estudio por punto de muestreo estuvo conformado por 10 litros, en total para los 5 puntos de muestreo la muestra total era de 50 litros, esta cantidad también será utilizada para sus cinco réplicas por punto. Para cada corrida experimental se tomaron 2 litros de muestra, de ellos cada 15 minutos se retiró 150 ml de muestra para su respectivo análisis volumétrico con la titulación de EDTA de 0.01N.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1.1. TÉCNICAS

La técnica usada para la acumulación de los datos del campo para la presente tesis consistió en la observación, estos datos fueron recogidos de manera paralela a las corridas experimentales.

Ejecución de la tesis

La presente tesis, su lado de campo experimental se realizó en el mes de octubre del año 2022. Se realizaron las siguientes actividades:

3.3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO EXPERIMENTAL

El diseño del módulo se realizó en función a la tercera forma de reducir la dureza, utilizando una membrana catiónica, para ellos se necesitaron algunos materiales:

Tabla 9

Materiales empleados en la construcción del módulo experimental

Materiales
- Material acrílico para la construcción de los dos depósitos y la celda electrolítica
- Tubería plástica para la recirculación de la muestra desde el depósito hasta la celda
- Dos bombas hidráulicas , uno para recircular desde el depósito 1 hasta la celda del electrodo cátodo, la otra bomba desde el depósito 2 hasta la celda lado anódico con una solución de bicarbonato de sodio
- Estructura del módulo , donde se instalarán los dos depósitos, las bombas, la celda electrolítica y el rectificador de corriente
- Accesorios para las instalaciones, como llaves, pegamento, unión, cables de conexión, etc.
- Membrana catiónica , utilizada para todos los experimentos.
- Electrodos de acero inoxidable en forma de malla, ambos materiales tanto para ánodo y cátodo.
- Tomacorriente .
- Regulador de voltaje para las dos bombas.

Nota. Se enumeraron los materiales más importantes para el armado del módulo experimental.

Figura 9
Esquema del módulo experimental



Nota. El módulo construido, donde consta de una celda electrolítica con su membrana catiónica, dos bombas, dos depósitos y sus rectificadores correspondiente.

Una vez construido el módulo se siguió el siguiente paso, que es la recolección de las muestras en los cinco puntos de muestreo.

3.3.3. PRUEBAS PRELIMINARES CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL

Antes de empezar con las pruebas centrales, se hizo la prueba al módulo construido, con relación a las pruebas hidráulicas, seguido de las conexiones eléctricas, terminado eso se comprobó el funcionamiento del módulo con una muestra sintética preparada, terminado las pruebas preliminares el equipo está listo para ser usado para los experimentos centrales.

3.3.3.1. RECOJO DE LAS MUESTRAS

Las muestras se recogieron de los cinco puntos, para ello se siguieron los procedimientos reglamentados, para el muestreo de agua se usaron los protocolos de procedimientos para la toma de las muestras, seguida de preservación, conservación, transporte y almacenamiento hasta que se empezaron los experimentos.

Figura 10

Recojo de las muestras de los cinco puntos subterráneos



Nota. Recojo de las muestras en los 5 puntos de monitoreo de aguas subterráneas

3.3.4. PRUEBA CENTRAL CON LAS MUESTRAS RECOGIDAS

Para las muestras centrales todas las corridas se realizaron a las condiciones siguientes:

Tabla 10
Condiciones de operación

Variables del proceso	
Parámetro de operación	Valor
Volumen de muestra (cátodo)	2 Litro
Volumen de la solución de bicarbonato de sodio (ánodo)	1 Litro
Tiempo de operación	1 Hora
Muestreo cada	15 minutos
Distancia entre los electrodos	0,6 cm
Área de ánodo y cátodo	7,5*9 cm ²
Voltaje	15 V

Nota. Los valores de los parámetros de operación del módulo están en función a la capacidad del equipo y antecedentes de investigación.

3.3.5. MUESTREO Y ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DURANTE EL EXPERIMENTO

Todas las muestras que se sacaron durante el desarrollo de la investigación han sido analizadas inmediatamente mediante la técnica de método volumétrico de EDTA, para ello se ha retirado por muestreo un volumen de 150 ml. En el anexo se indican los pasos para preparar las soluciones necesarias para hacer la técnica de volumetría tanto para determinar la dureza cálcica, dureza total y el procedimiento volumétrico.

Para determinar la concentración de la dureza cálcica, total y magnésica se usaron las siguientes ecuaciones: Para EDTA = 0.01N.

$$\text{Dureza Total mg/L}_{CaCO_3} = \frac{mL_{EDTA} * 1000}{mL_{muestra}}$$

$$\text{Dureza Ca mg/L}_{CaCO_3} = \frac{mL_{EDTA} * 1000}{mL_{muestra}}$$

$$\begin{aligned} \text{Dureza Mg mg/L}_{CaCO_3} \\ &= \text{Dureza Total mg/L}_{CaCO_3} \\ &- \text{Dureza Ca Mg mg/L}_{CaCO_3} \end{aligned}$$

Tabla 11

Soluciones preparadas para cuantificar la dureza cálcica y total por volumetría y sus estandarizaciones

Para dureza cálcica	Para dureza total	Para titular dureza total	Para titular dureza cálcica
Preparación de carbonato de calcio y estandarización (Ca ⁺⁺)	Preparación de carbonato de calcio y estandarización de EDTA (DT)	Solución de EDTA (0,01N)	Solución de EDTA (0,01N)
		Solución tampón (pH = 10+-0.1)	Solución de NaOH 1N
Preparación de la muestra de control (Ca ⁺⁺)	Preparación de muestra control (DT)	Indicador NET negro de eriocromo	Indicador de MUREXIDA

Nota. Soluciones preparadas tanto para estandarizar el EDTA y titular la dureza total y calcio.

3.3.5.1. INSTRUMENTOS

Los datos se recogieron en base a los siguientes instrumentos:

Ficha técnica:

- Ficha de recolección de datos de campo
- Carta de trazabilidad para la preparación de soluciones

Estas dos fichas se encuentran en la parte de anexo.

3.3.6. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS

3.3.6.1. TÉCNICAS

Las técnicas empleadas que se utilizaron en la presentación y ordenamiento de los datos cuantitativos fueron mediante las tablas, correctamente ordenados, posteriormente estos datos se utilizaron presentados en forma de gráfico de barras, después fueron interpretados y analizados.

3.3.6.2. INSTRUMENTOS

Los instrumentos empleados para el procesamiento, organización y mejor comprensión visual de los datos fueron las tablas y la barra de gráficos.

3.4. PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Los datos recogidos en el campo experimental, una vez ordenados se llevaron al software SPSS para su posterior filtro y procesamiento siguiendo los siguientes criterios: Para examinar los datos numéricos, se procedió hacer la prueba de Normalidad, utilizando la Prueba de Shapiro – Wilk para comprender y seleccionar la prueba estadística. Aquellos datos que cumplieron con la condición de normalidad, fueron procesados mediante la marcha estadístico paramétrico correspondiente a t de student para muestras relacionadas. A sí mismo para corroborar las hipótesis específicas se empleó t de Student para una muestra correspondiente al paramétrico.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

- **Resultados de dureza cálcica, dureza total y magnésica para el punto 01**

Se muestran los datos recogidos cada 15 minutos durante el tratamiento de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica.

Tabla 12

Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 01 de monitoreo

REPLICAS	Tiempo	Punto de muestreo 01					
	(min.)	DCa ²⁺ (ml)	DCa ²⁺ (mg/L)	DT(ml)	DT(mg/L)	DMg ²⁺ (ml)	DMg ²⁺ (mg/L)
R1	0	21,1	422	31,5	630	10,4	208
	15	18,05	361	26,25	525	8,2	164
	30	13,05	261	20,95	419	7,9	158
	45	10,95	219	15,25	305	4,3	86
	60	9,06	181,2	10,35	207	1,29	25,8
R2	0	21,35	427	31,4	628	10,05	201
	15	18,1	362	26,35	527	8,25	165
	30	13,08	261,6	20,9	418	7,82	156,4
	45	11,05	221	15,95	319	4,9	98
	60	9,15	183	10,45	209	1,3	26
R3	0	20,95	419	30,75	615	9,8	196
	15	18,2	364	26,3	526	8,1	162
	30	14,2	284	20,85	417	6,65	133
	45	10,65	213	16,05	321	5,4	108
	60	9	180	10,3	206	1,3	26
R4	0	20,45	409	29,95	599	9,5	190
	15	18,65	373	26,74	534,8	8,09	161,8
	30	13,08	261,6	20,8	416	7,72	154,4
	45	10,25	205	15,35	307	5,1	102
	60	8,75	175	10,95	219	2,2	44
R5	0	20,85	417	30,85	617	10	200

15	18,56	371,2	26,95	539	8,39	167,8
30	13,55	271	20,86	417,2	7,31	146,2
45	9,65	193	14,75	295	5,1	102
60	8,65	173	10,85	217	2,2	44

Nota. En la tabla 12, se muestran los resultados correspondientes al punto de monitoreo 01 y sus 5 réplicas durante 1 hora de tratamiento.

Dónde:

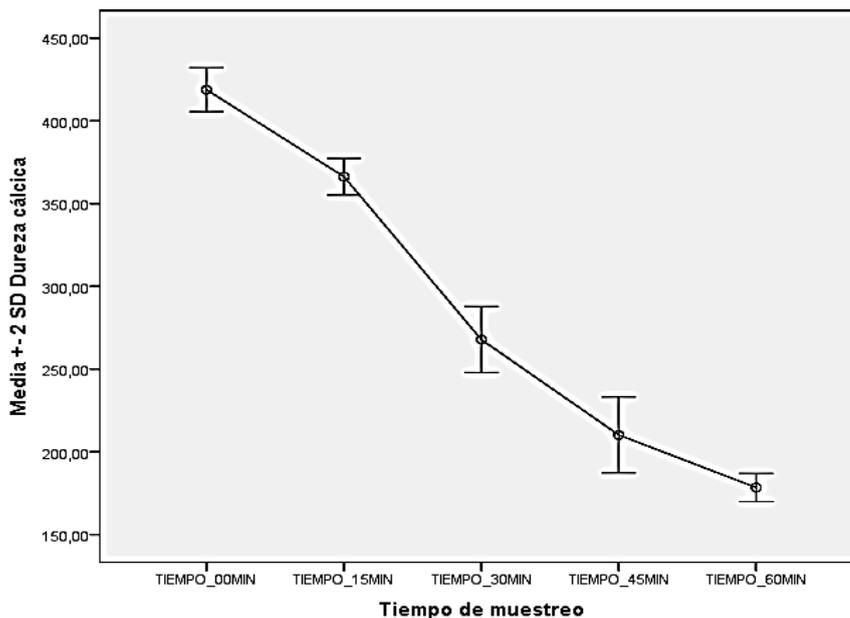
- DCa^{2+} (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza cálcica.
- DCa^{2+} (mg/L): Es la concentración de calcio determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DT (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza total.
- DT (mg/L): Es la concentración de dureza total determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DMg^{2+} (ml): corresponde a la diferencia de volumen gastado entre la dureza total y volumen cálcica de EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza magnésica.
- DMg^{2+} (mg/L): Es la concentración de magnesio determinado en función a la diferencia de volumen consumido de EDTA.

Análisis e interpretación

En la tabla 12, se muestra los resultados obtenidos de la concentración para el punto de monitoreo 01, además los valores obtenidos durante el tratamiento tanto de dureza cálcica, dureza total y magnésica son 422 ppm inicial y 181.2 ppm final, para la dureza total de 630 ppm inicial a 207 ppm final y de magnésica desde 208ppm inicial a 25.8 ppm final.

Figura 11

Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01



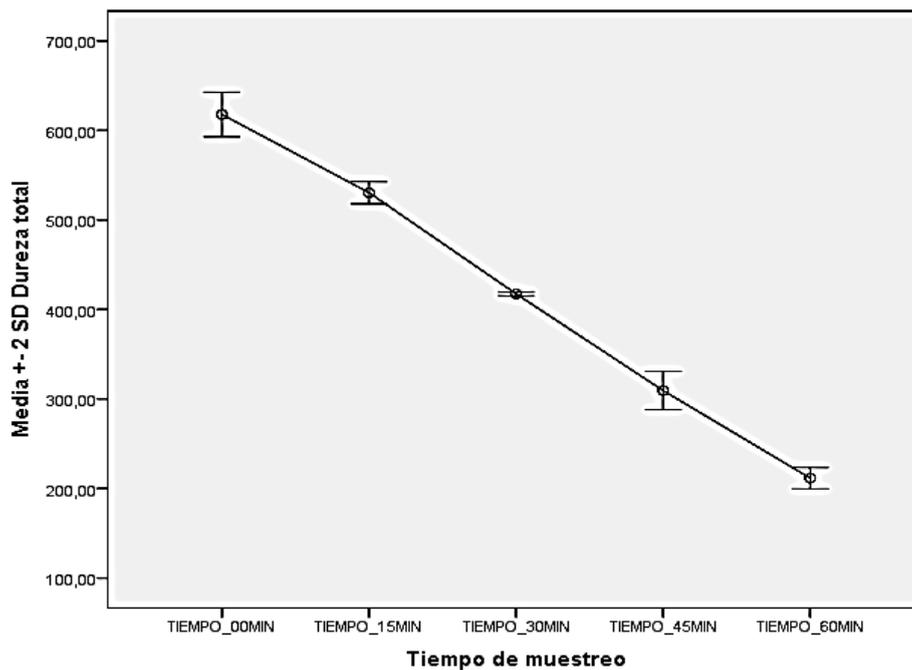
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de calcio a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 11 se muestran el avance de la reducción de la dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza cálcica media en el punto de muestreo 01 antes de su tratamiento es de 418.8 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 178.44 mg/L.

Figura 12

Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01



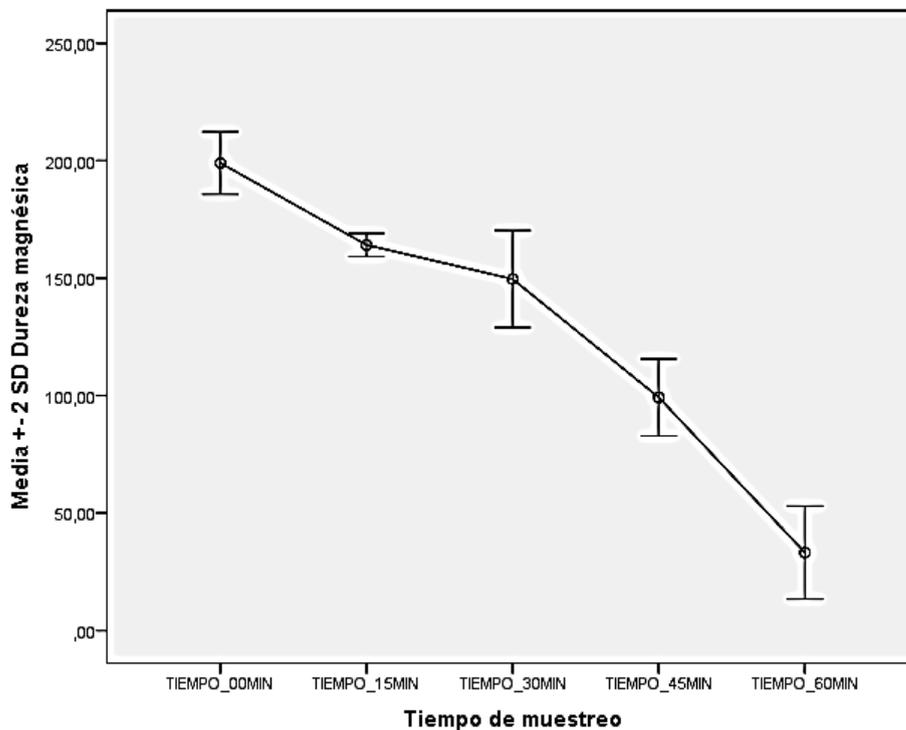
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza total a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 12 se muestran el avance de la reducción de la dureza total media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza total media en el punto de muestreo 01 antes de su tratamiento es de 617.8 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 211.6 mg/L.

Figura 13

Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 01



Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza magnésica a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 13 se muestran el avance de la reducción de la dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza magnésica media en el punto de muestreo 01 antes de su tratamiento es de 199.0 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 33.16 mg/L.

- **Resultados de dureza cálcica, dureza total y magnésica para el punto 02**

Se muestran los datos recogidos cada 15 minutos durante el tratamiento de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica.

Tabla 13
Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 02 de monitoreo

REPLICAS	Tiempo	Punto de muestreo 02					
	(min.)	DCa ²⁺ (ml)	DCa ²⁺ (mg/L)	DT(ml)	DT(mg/L)	DMg ²⁺ (ml)	DMg ²⁺ (mg/L)
R1	0	14,85	297	29,6	592	14,75	295
	15	12,35	247	24,67	493,4	12,32	246,4
	30	9,05	181	19,75	395	10,7	214
	45	5,95	119	13,25	265	7,3	146
	60	4,75	95	6,65	133	1,9	38
R2	0	14,15	283	29,05	581	14,9	298
	15	12,95	259	24,05	481	11,1	222
	30	10,1	202	19,04	380,8	8,94	178,8
	45	5,65	113	13,95	279	8,3	166
	60	4,77	95,4	6,7	134	1,93	38,6
R3	0	14,25	285	29,15	583	14,9	298
	15	12,65	253	24,85	497	12,2	244
	30	9,45	189	19,65	393	10,2	204
	45	6,35	127	14,35	287	8	160
	60	4,75	95	6,75	135	2	40
R4	0	13,95	279	28,95	579	15	300
	15	12,05	241	24,15	483	12,1	242
	30	8,65	173	19,75	395	11,1	222
	45	6,25	125	14,98	299,6	8,73	174,6
	60	4,55	91	6,85	137	2,3	46
R5	0	14,15	283	29,5	590	15,35	307
	15	12,96	259,2	24,75	495	11,79	235,8
	30	9,65	193	20,05	401	10,4	208
	45	6,45	129	15,75	315	9,3	186
	60	4,35	87	6,95	139	2,6	52

Nota. En la tabla 13, se muestran los resultados correspondientes al punto de monitoreo 02 y sus 5 réplicas durante 1 hora de tratamiento.

Dónde:

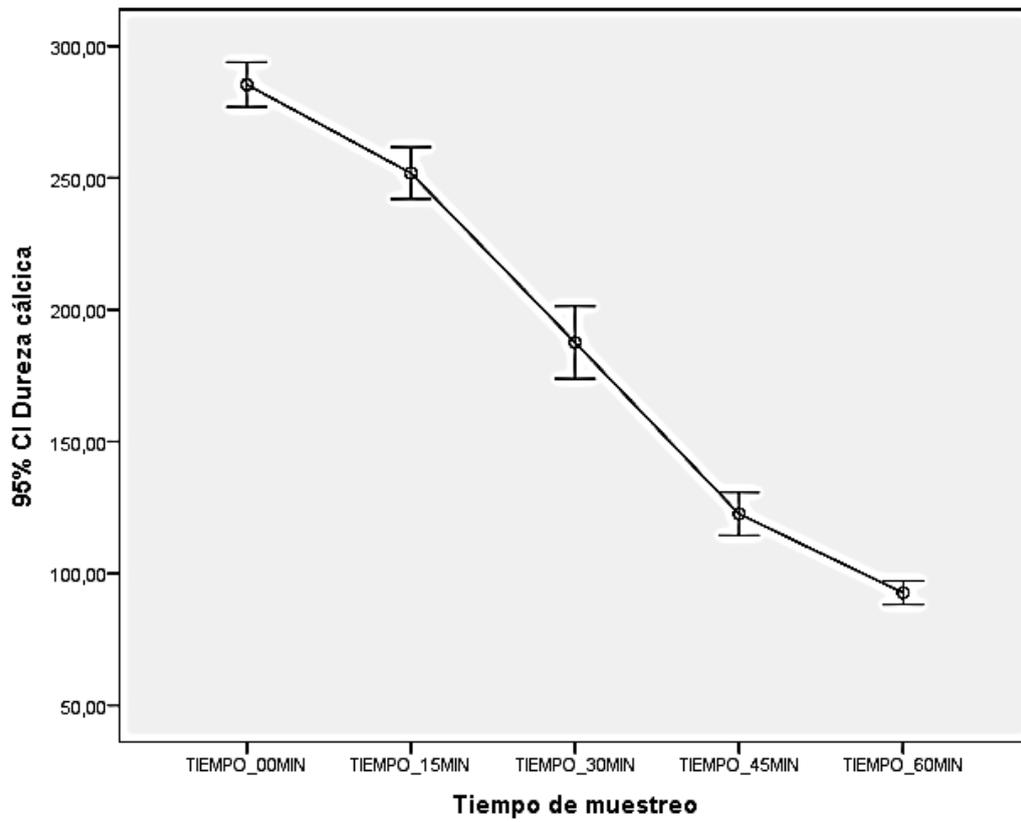
- DCa^{2+} (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza cálcica.
- DCa^{2+} (mg/L): Es la concentración de calcio determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DT (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza total.
- DT (mg/L): Es la concentración de dureza total determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DMg^{2+} (ml): corresponde a la diferencia de volumen gastado entre la dureza total y volumen cálcica de EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza magnésica.
- DMg^{2+} (mg/L): Es la concentración de magnesio determinado en función a la diferencia de volumen consumido de EDTA.

Análisis e interpretación

En la tabla 13, se muestra los resultados obtenidos de la concentración para el punto de monitoreo 02, además los valores obtenidos durante el tratamiento tanto de dureza cálcica, dureza total y magnésica son 427 ppm inicial y 183 ppm final, para la dureza total de 628 ppm inicial a 209 ppm final y de dureza magnésica desde 201 ppm inicial a 26 ppm final.

Figura 14

Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02



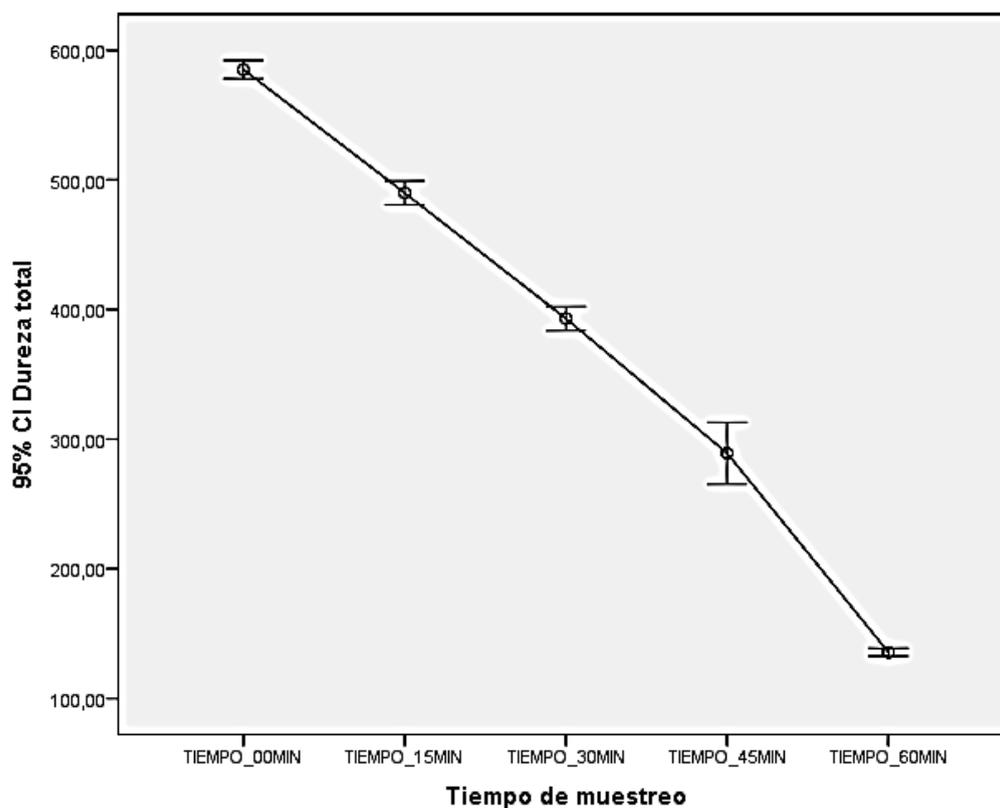
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de calcio a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 14 se muestran el avance de la reducción de la dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza cálcica media en el punto de muestreo 02 antes de su tratamiento es de 285.4 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 92.68 mg/L.

Figura 15

Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02



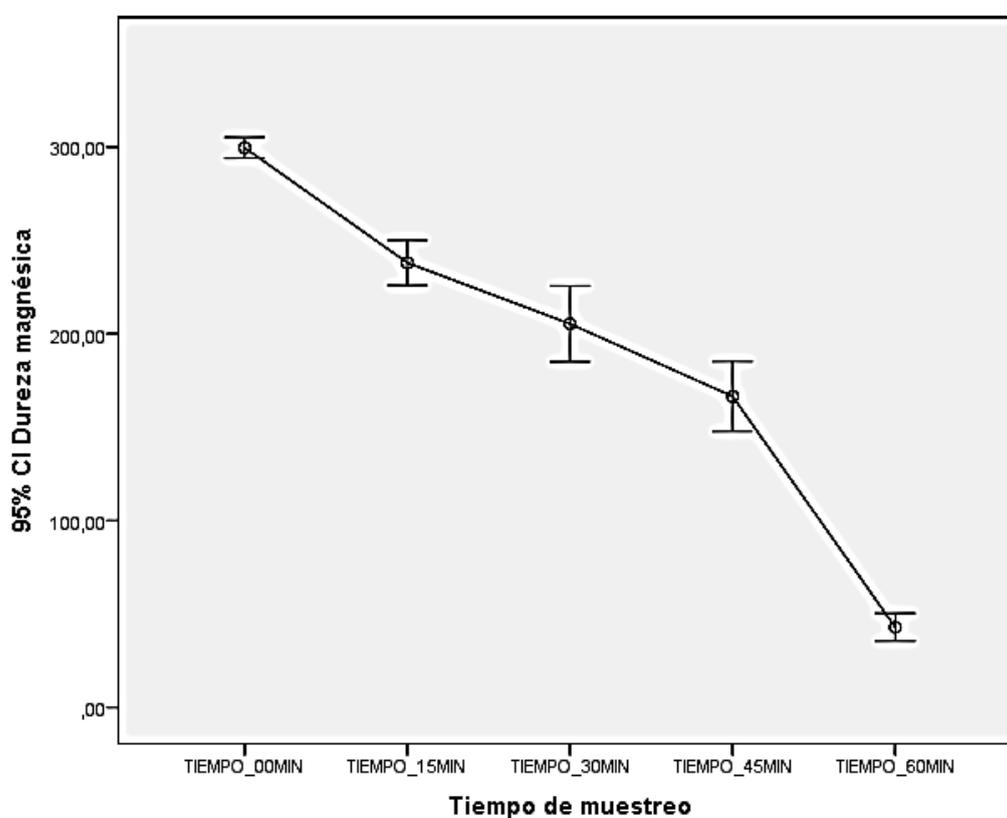
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza total a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 15 se muestran el avance de la reducción de la dureza total media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza total media en el punto de muestreo 02 antes de su tratamiento es de 585.0 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 135.6 mg/L.

Figura 16

Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 02



Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza magnésica a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 16 se muestran el avance de la reducción de la dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza magnésica media en el punto de muestreo 02 antes de su tratamiento es de 299.6 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 42.92 mg/L.

- **Resultados de dureza cálcica, dureza total y magnésica para el punto 03**

Se muestran los datos recogidos cada 15 minutos durante el tratamiento de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica.

Tabla 14
Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 03 de monitoreo

REPLICAS	Tiempo (min.)	Punto de muestreo 03					
		DCa ²⁺ (ml)	DCa ²⁺ (mg/L)	DT(ml)	DT(mg/L)	DMg ²⁺ (ml)	DMg ²⁺ (mg/L)
R1	0	17,75	355	27,75	555	10	200
	15	14,25	285	22,85	457	8,6	172
	30	9,55	191	17,95	359	8,4	168
	45	7,05	141	13,15	263	6,1	122
	60	6,45	129	8,25	165	1,8	36
R2	0	17,35	347	26,15	523	8,8	176
	15	14,05	281	22,15	443	8,1	162
	30	9,25	185	17,15	343	7,9	158
	45	7,25	145	14,05	281	6,8	136
	60	6,15	123	8,35	167	2,2	44
R3	0	17,05	341	27,05	541	10	200
	15	14,98	299,6	22,75	455	7,77	155,4
	30	10,05	201	17,05	341	7	140
	45	7,95	159	13,95	279	6	120
	60	6,25	125	8,55	171	2,3	46
R4	0	16,35	327	26,45	529	10,1	202
	15	13,95	279	22,15	443	8,2	164
	30	11,25	225	17,95	359	6,7	134

	45	7,25	145	13,45	269	6,2	124
	60	6,15	123	8,43	168,6	2,28	45,6
	0	17,15	343	27,95	559	10,8	216
	15	13,45	269	22,75	455	9,3	186
R5	30	11	220	17,15	343	6,15	123
	45	7,05	141	13,05	261	6	120
	60	6,05	121	8,55	171	2,5	50

Nota. En la tabla 14, se muestran los resultados correspondientes al punto de monitoreo 03 y sus 5 réplicas durante 1 hora de tratamiento.

Dónde:

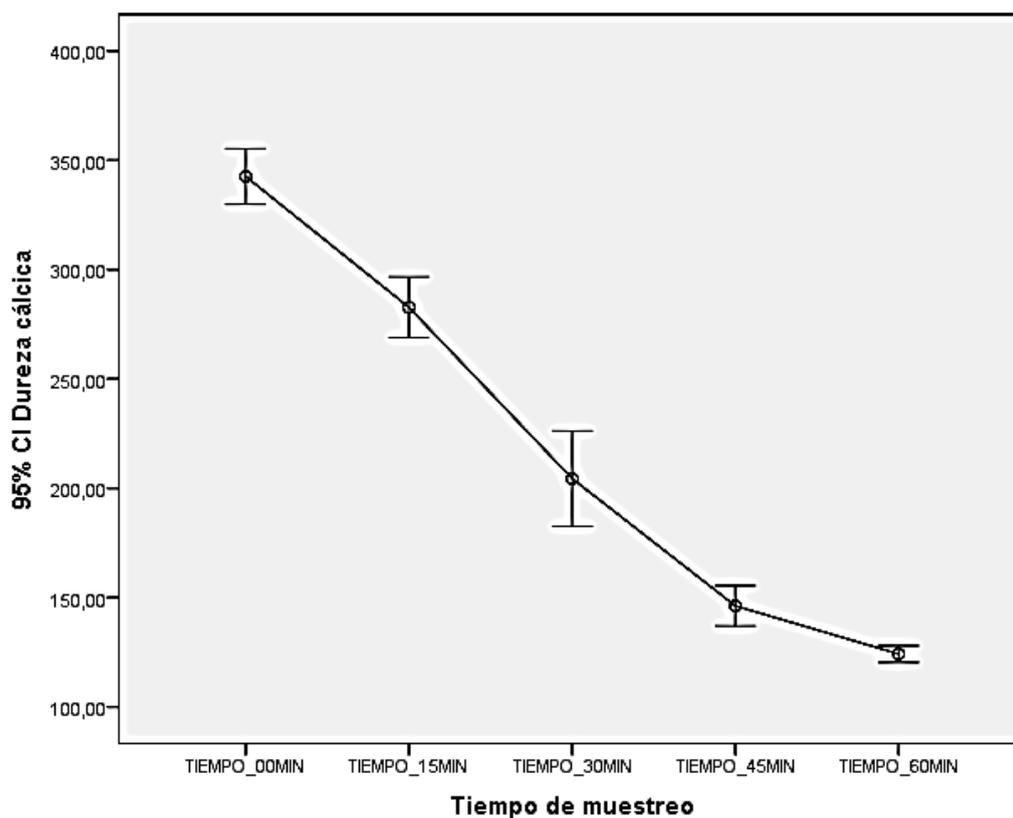
- DCa^{2+} (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza cálcica.
- DCa^{2+} (mg/L): Es la concentración de calcio determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DT (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza total.
- DT (mg/L): Es la concentración de dureza total determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DMg^{2+} (ml): corresponde a la diferencia de volumen gastado entre la dureza total y volumen cálcica de EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza magnésica.
- DMg^{2+} (mg/L): Es la concentración de magnesio determinado en función a la diferencia de volumen consumido de EDTA.

Análisis e interpretación

En la tabla 14, se muestra los resultados obtenidos de la concentración para el punto de monitoreo 03, además los valores obtenidos durante el tratamiento tanto de dureza cálcica, dureza total y magnésica son 419 ppm inicial y 180 ppm final, para la dureza total de 615 ppm inicial a 206 ppm final y de magnésica desde 196 ppm inicial a 26 ppm final.

Figura 17

Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03



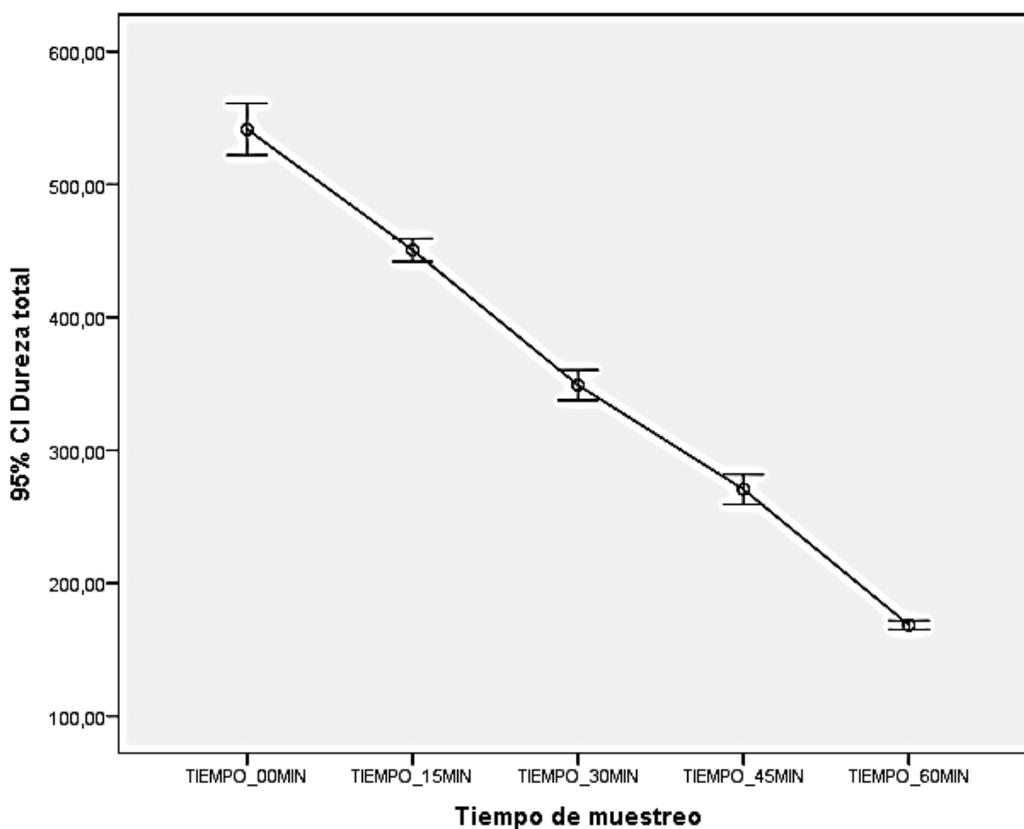
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de calcio a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 16 se muestran el avance de la reducción de la dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza cálcica media en el punto de muestreo 03 antes de su tratamiento es de 342.6 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 124.2 mg/L.

Figura 18

Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03



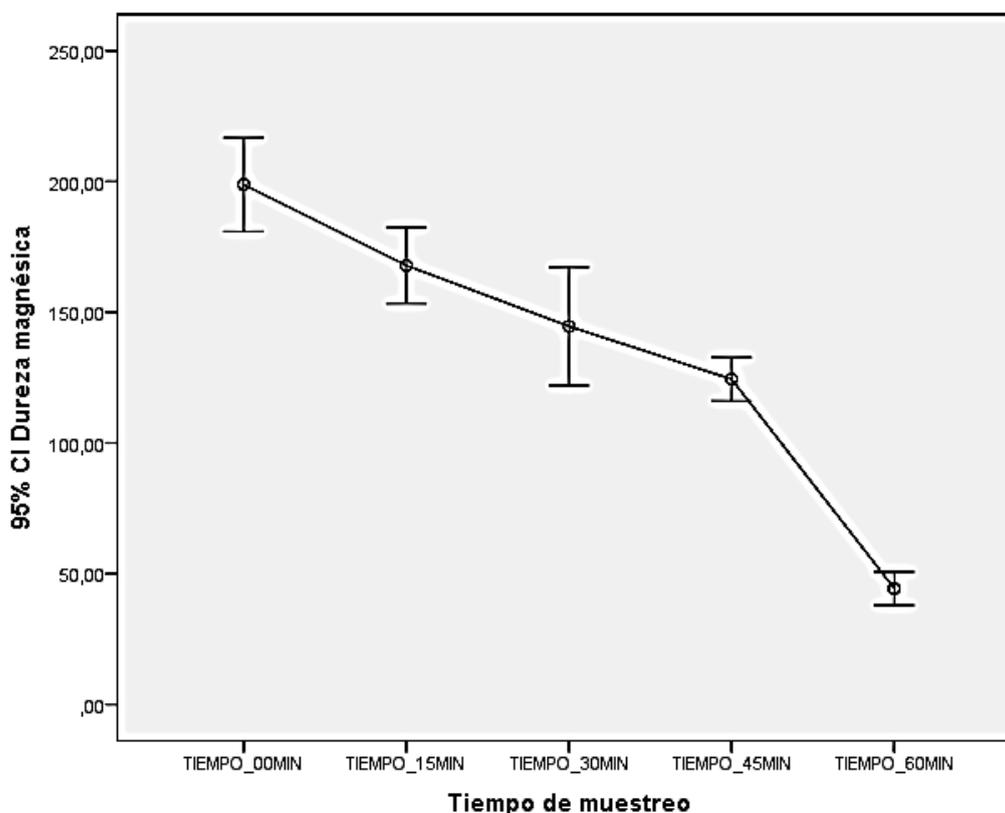
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza total a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 18 se muestran el avance de la reducción de la dureza total media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza total media en el punto de muestreo 03 antes de su tratamiento es de 541.4 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 168.52 mg/L.

Figura 19

Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 03



Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza magnésica a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 19 se muestran el avance de la reducción de la dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza magnésica media en el punto de muestreo 03 antes de su tratamiento es de 198.8 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 44.32 mg/L.

- **Resultados de dureza cálcica, dureza total y magnésica para el punto 04**

Se muestran los datos recogidos cada 15 minutos durante el tratamiento de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica.

Tabla 15
Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 04 de monitoreo

REPLICAS	Tiempo	Punto de muestreo 04					
	(min.)	DCa ²⁺ (ml)	DCa ²⁺ (mg/L)	DT(ml)	DT(mg/L)	DMg ²⁺ (ml)	DMg ²⁺ (mg/L)
R1	0	20,15	403	32,45	649	12,3	246
	15	17,45	349	27,05	541	9,6	192
	30	14,75	295	21,65	433	6,9	138
	45	10,35	207	16,15	323	5,8	116
	60	8,85	177	10,65	213	1,8	36
R2	0	19,55	391	31,65	633	12,1	242
	15	17,85	357	27,35	547	9,5	190
	30	14,35	287	21,15	423	6,8	136
	45	12,05	241	16,45	329	4,4	88
	60	8,95	179	10,85	217	1,9	38
R3	0	20,75	415	31,25	625	10,5	210
	15	17,05	341	27,15	543	10,1	202
	30	10,65	213	21,65	433	11	220
	45	10,25	205	16,98	339,6	6,73	134,6
	60	8,65	173	10,75	215	2,1	42
R4	0	20	400	32,95	659	12,95	259
	15	17,97	359,4	27,49	549,8	9,52	190,4
	30	13,25	265	21,15	423	7,9	158
	45	10,45	209	16,05	321	5,6	112
	60	8,74	174,8	10,68	213,6	1,94	38,8
R5	0	20,95	419	33,05	661	12,1	242
	15	15,95	319	28,15	563	12,2	244
	30	10,65	213	21,95	439	11,3	226
	45	9,95	199	15,65	313	5,7	114
	60	8,65	173	10,75	215	2,1	42

Nota. En la tabla 15, se muestran los resultados correspondientes al punto de monitoreo 04 y sus 5 réplicas durante 1 hora de tratamiento.

Dónde:

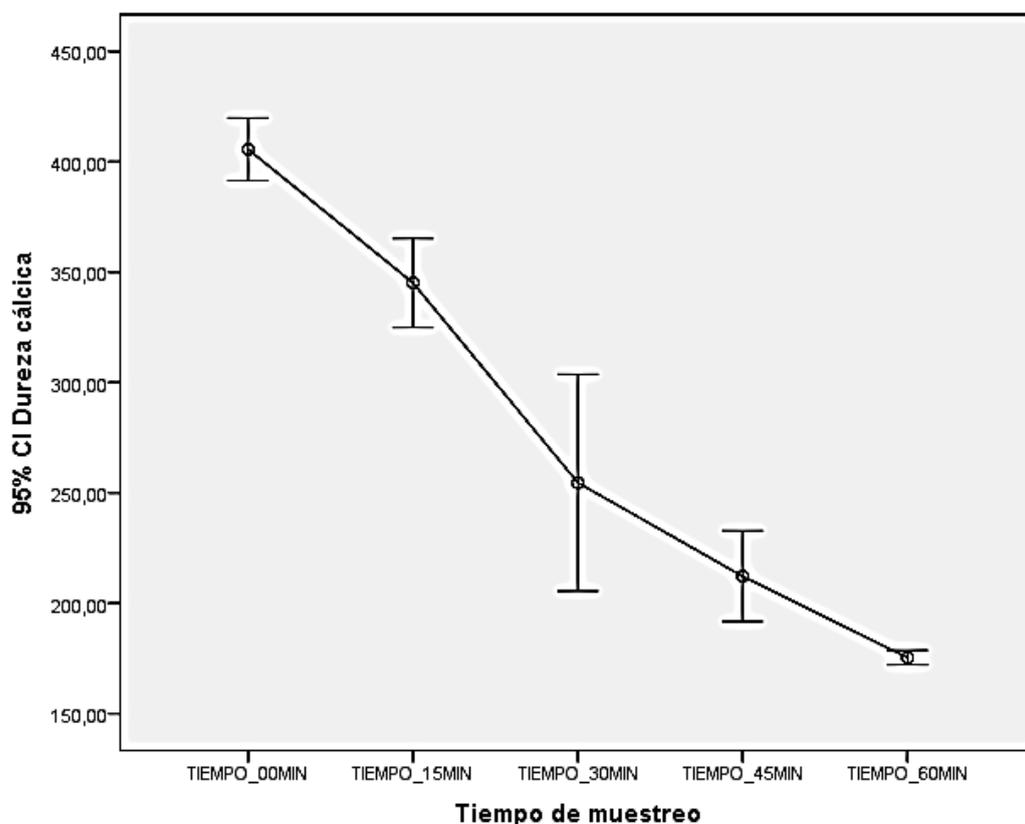
- DCa^{2+} (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza cálcica.
- DCa^{2+} (mg/L): Es la concentración de calcio determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DT (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza total.
- DT (mg/L): Es la concentración de dureza total determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DMg^{2+} (ml): corresponde a la diferencia de volumen gastado entre la dureza total y volumen cálcica de EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza magnésica.
- DMg^{2+} (mg/L): Es la concentración de magnesio determinado en función a la diferencia de volumen consumido de EDTA.

Análisis e interpretación

En la tabla 15, se muestra los resultados obtenidos de la concentración para el punto de monitoreo 04, además los valores obtenidos durante el tratamiento tanto de dureza cálcica, dureza total y magnésica son 409 ppm inicial y 175 ppm final, para la dureza total de 599 ppm inicial a 617 ppm final y de magnésica desde 190 ppm inicial a 44 ppm final.

Figura 20

Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04



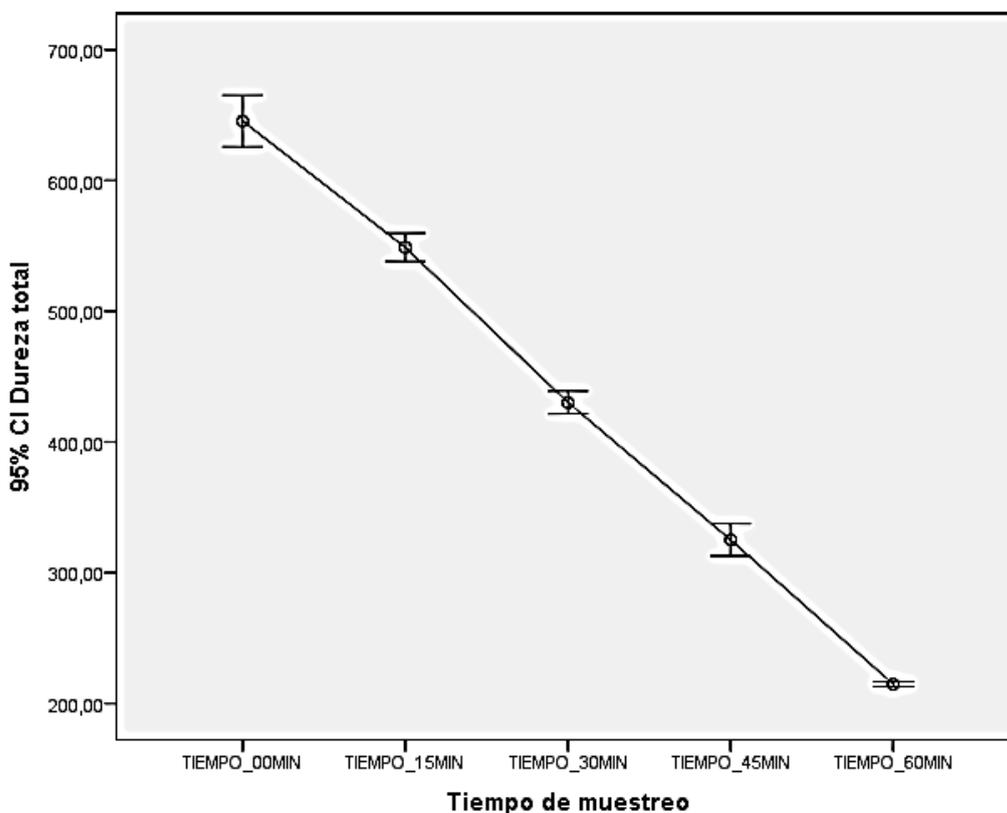
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de calcio a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 20 se muestran el avance de la reducción de la dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza cálcica media en el punto de muestreo 04 antes de su tratamiento es de 405.6 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 175.36 mg/L.

Figura 21

Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04



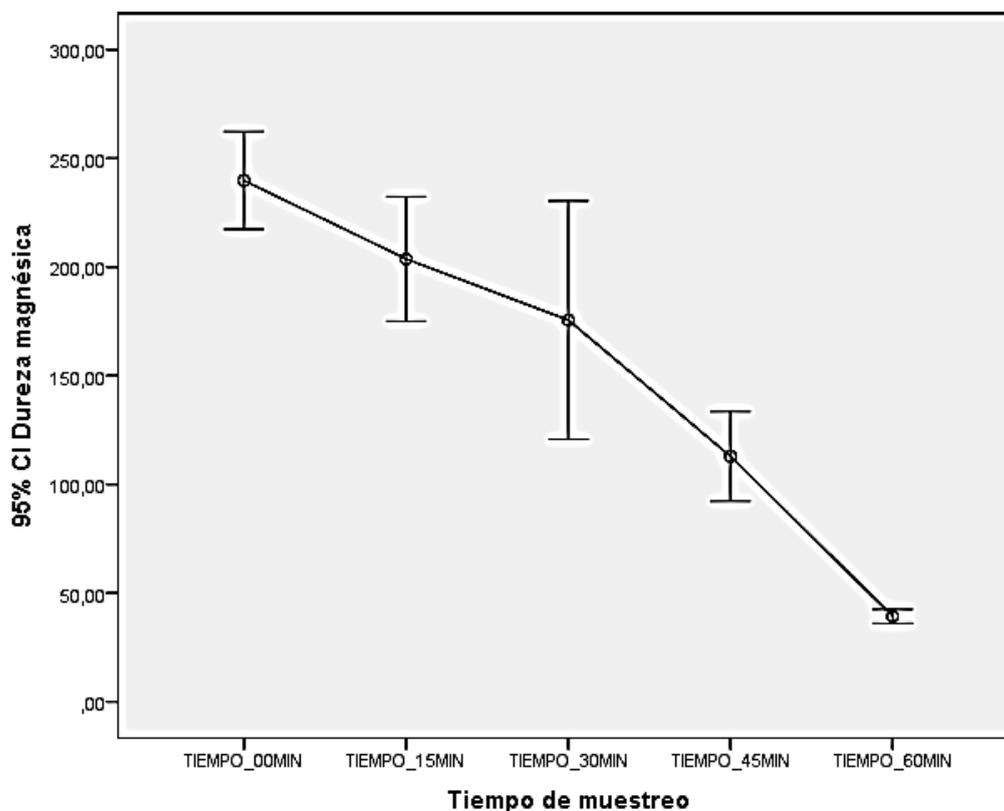
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza total a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 21 se muestran el avance de la reducción de la dureza total media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza total media en el punto de muestreo 04 antes de su tratamiento es de 645.4 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 214.72 mg/L.

Figura 22

Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 04



Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza magnésica a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 22 se muestran el avance de la reducción de la dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza magnésica media en el punto de muestreo 04 antes de su tratamiento es de 239.8 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 39.36 mg/L.

- **Resultados de dureza cálcica, dureza total y magnésica para el punto 05**

Se muestran los datos recogidos cada 15 minutos durante el tratamiento de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica.

Tabla 16*Resultados de las cinco réplicas de tratamiento para el punto 05 de monitoreo*

REPLICAS	Tiempo	Punto de muestreo 05					
	(min.)	DCa ²⁺ (ml)	DCa ²⁺ (mg/L)	DT(ml)	DT(mg/L)	DMg ²⁺ (ml)	DMg ²⁺ (mg/L)
R1	0	26,75	535	36,45	729	9,7	194
	15	20,95	419	30,57	611,4	9,62	192,4
	30	18,95	379	24,7	494	5,75	115
	45	13,75	275	18,85	377	5,1	102
	60	11,15	223	12,95	259	1,8	36
R2	0	25,65	513	35,15	703	9,5	190
	15	22,65	453	30,95	619	8,3	166
	30	19,25	385	24,15	483	4,9	98
	45	14,25	285	18,35	367	4,1	82
	60	11,35	227	12,9	258	1,55	31
R3	0	26,85	537	36,05	721	9,2	184
	15	20,55	411	30,25	605	9,0	194
	30	17,45	349	24,45	489	7	140
	45	14,15	283	18,75	375	4,6	92
	60	11,25	225	12,85	257	1,6	32
R4	0	25,85	517	35,15	703	9,3	186
	15	20,35	407	30,75	615	9,2	208
	30	15,65	313	24,75	495	9,1	182
	45	14,05	281	18,15	363	4,1	82
	60	11,45	229	12,81	256,2	1,36	27,2
R5	0	25,05	501	34,95	699	9,9	198
	15	19,56	391,2	30,45	609	9,7	217,8
	30	16,78	335,6	24,35	487	7,57	151,4
	45	13,95	279	18,65	373	4,7	94
	60	11,25	225	12,74	254,8	1,49	29,8

Nota. En la tabla 16, se muestran los resultados correspondientes al punto de monitoreo 05 y sus 5 réplicas durante 1 hora de tratamiento.

Dónde:

- DCa²⁺ (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza cálcica.
- DCa²⁺ (mg/L): Es la concentración de calcio determinado en función al

volumen consumido de EDTA.

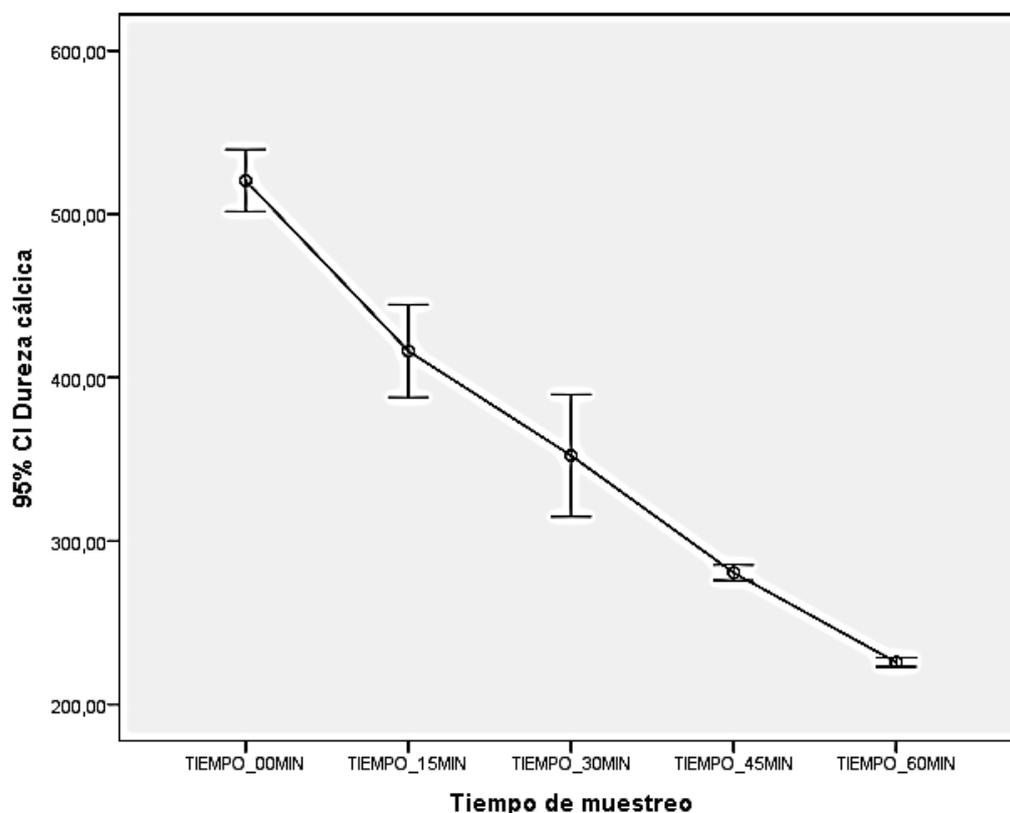
- DT (ml): corresponde al volumen gastado de la solución EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza total.
- DT (mg/L): Es la concentración de dureza total determinado en función al volumen consumido de EDTA.
- DMg^{2+} (ml): corresponde a la diferencia de volumen gastado entre la dureza total y volumen cálcica de EDTA (0.01N) para cuantificar la dureza magnésica.
- DMg^{2+} (mg/L): Es la concentración de magnesio determinado en función a la diferencia de volumen consumido de EDTA.

Análisis e interpretación

En la tabla 16, se muestra los resultados obtenidos de la concentración para el punto de monitoreo 05, además los valores obtenidos durante el tratamiento tanto de dureza cálcica, dureza total y magnésica son 417 ppm inicial y 173 ppm final, para la dureza total de 617 ppm inicial a ppm 217 final y de magnésica desde 200 ppm inicial a 44 ppm final.

Figura 23

Concentración de dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05



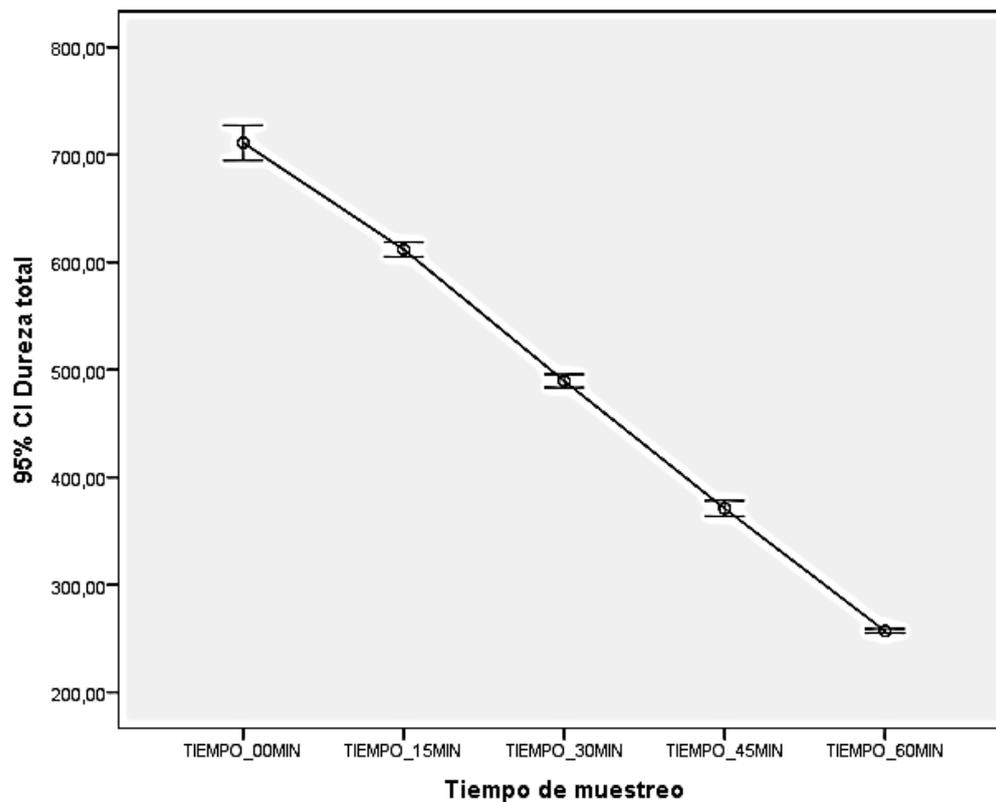
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de calcio a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 23 se muestran el avance de la reducción de la dureza cálcica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza cálcica media en el punto de muestreo 05 antes de su tratamiento es de 520.6 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 225.8 mg/L.

Figura 24

Concentración de dureza total media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05



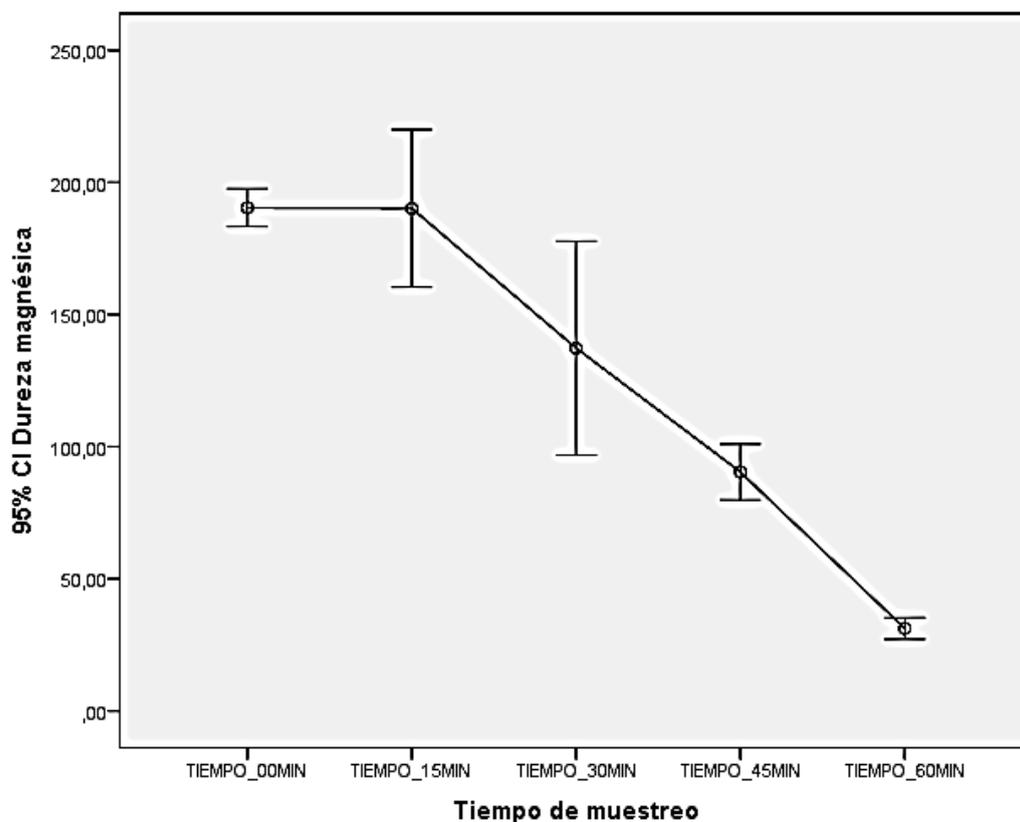
Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza total a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 24 se muestran el avance de la reducción de la dureza total media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza total media en el punto de muestreo 05 antes de su tratamiento es de 711.0 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 257.0 mg/L.

Figura 25

Concentración de dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento para las 5 réplicas para el punto de monitoreo 05



Nota. La gráfica de barras de error muestra la disminución de la concentración de dureza magnésica a medida que transcurre el tratamiento en función a su media para sus 5 réplicas.

Análisis e interpretación

En la figura 25 se muestran el avance de la reducción de la dureza magnésica media en función al tiempo de tratamiento, donde el valor de la dureza magnésica media en el punto de muestreo 05 antes de su tratamiento es de 190.4 mg/L, este valor se redujo después de una hora de tratamiento hasta un valor medio de 31.2 mg/L.

4.2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LAS CONCENTRACIONES CÁLCICAS, TOTALES Y MAGNÉSICAS

Tabla 17
Análisis de dureza cálcica, total y magnésica

Puntos de monitoreo	Antes de su tratamiento			Después de su tratamiento		
	Dureza cálcica	Dureza total	Dureza magnésica	Dureza cálcica	Dureza total	Dureza magnésica
PUNTO_01 Media	418,8000	617,8000	199,0000	178,4400	211,6000	33,1600
Mínimo 95% CI	412,97	606,93	193,19	174,71	206,36	24,49
Máximo 95% CI	424,63	628,67	204,81	182,17	216,84	41,83
Error estándar de la media	2,97321	5,54437	2,96648	1,90095	2,67582	4,42556
PUNTO_02 Media	285,4000	585,0000	299,6000	92,6800	135,6000	42,9200
Mínimo 95% CI	279,40	580,00	295,65	89,48	133,49	37,67
Máximo 95% CI	291,40	590,00	303,55	95,88	137,71	48,17
Error estándar de la media	3,05941	2,54951	2,01494	1,63169	1,07703	2,67701
PUNTO_03 Media	342,6000	541,4000	198,8000	124,2000	168,5200	44,3200
Mínimo 95% CI	333,63	527,63	186,18	121,54	166,24	39,81
Máximo 95% CI	351,57	555,17	211,42	126,86	170,80	48,83
Error estándar de la media	4,57821	7,02567	6,43739	1,35647	1,16207	2,30269
PUNTO_04 Media	405,6000	645,4000	239,8000	175,3600	214,7200	39,3600
Mínimo 95% CI	395,61	631,46	223,97	173,07	213,36	37,07
Máximo 95% CI	415,59	659,34	255,63	177,65	216,08	41,65

	Error						
	estándar de la	5,09510	7,11056	8,07713	1,17030	0,69166	1,17030
	media						
	Media	520,6000	711,0000	190,4000	225,8000	257,0000	31,2000
PUNTO_05	Mínimo 95%						
	CI	507,23	699,44	185,38	223,80	255,58	28,37
	Máximo 95%						
	CI	533,97	722,56	195,42	227,80	258,42	34,03
	Error						
	estándar de la	6,82349	5,89915	2,56125	1,01980	0,72388	1,44361
	media						

Nota. Se aprecia el análisis descriptivo de la concentración de dureza cálcica, total y magnésica en base a los datos obtenidos volumétricamente.

Análisis e interpretación

La tabla 17 nos detalla que, en promedio, la dureza cálcica antes de su tratamiento en menor concentración fue de 285.4 mg/L localizada en el punto de monitoreo 02, en cambio la máxima concentración de calcio fue de 520.6 mg/L en el punto de monitoreo 05, con respecto a la dureza total, la concentración mínima fue de 541.4 mg/L en el punto de monitoreo 03, en cambio la máxima concentración de la dureza total fue de 711.0mg/L en el punto 05, en cambio con respecto a la dureza magnésica, la concentración mínima fue de 190.4 mg/L en el punto 05 y la concentración máxima fue de 299.6 mg/L en el punto de monitoreo 02. En cambio una vez tratado electrolíticamente, la menor reducción de calcio llegó a 92.68 mg/L para el punto de monitoreo 02, en cambio la mayor concentración se llegó a 225.8 mg/L localizada en el punto de monitoreo 05, con respecto a la dureza total, se llegó a una concentración mínima de 135.6 mg/L en el punto 02 y la máxima concentración se llegó a 257.0 mg/L para el punto 05 en cambio la máxima concentración de calcio fue de 520.6 mg/L en el punto de monitoreo 05, con respecto a la dureza magnésica, la concentración mínima obtenida fue de 31.2 mg/L en el punto de monitoreo 05, en cambio la máxima concentración encontrada fue de 44.32 mg/L en el punto 03.

4.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE LAS CONCENTRACIONES CÁLCICAS, TOTALES Y MAGNÉSICAS

Tabla 18

Prueba de Shapiro-Wilk sobre la normalidad de la dureza cálcica, total y magnésica

Tipo de dureza	Puntos de monitoreo	Antes de su tratamiento			Después de su tratamiento		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
D_CALCIO	PUNTO_MONITOREO_01	0,981	5	0,940	0,917	5	0,514
	PUNTO_MONITOREO_02	0,828	5	0,133	0,805	5	0,089
	PUNTO_MONITOREO_03	0,960	5	0,806	0,914	5	0,492
	PUNTO_MONITOREO_04	0,952	5	0,750	0,896	5	0,387
	PUNTO_MONITOREO_05	0,918	5	0,517	0,961	5	0,814
D_TOTAL	PUNTO_MONITOREO_01	0,917	5	0,510	0,853	5	0,205
	PUNTO_MONITOREO_02	0,899	5	0,406	0,957	5	0,787
	PUNTO_MONITOREO_03	0,924	5	0,556	0,908	5	0,458
	PUNTO_MONITOREO_04	0,902	5	0,421	0,938	5	0,655
	PUNTO_MONITOREO_05	0,847	5	0,186	0,993	5	0,989
D_MAGNÉSIO	PUNTO_MONITOREO_01	0,986	5	0,962	0,690	5	0,068
	PUNTO_MONITOREO_02	0,881	5	0,314	0,858	5	0,222
	PUNTO_MONITOREO_03	0,884	5	0,328	0,903	5	0,429
	PUNTO_MONITOREO_04	0,862	5	0,235	0,896	5	0,387
	PUNTO_MONITOREO_05	0,962	5	0,823	0,977	5	0,915

Nota. La tabla contiene las tres durezas que fueron analizados mediante prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Análisis e interpretación

A partir del valor de la Sig. Asintótica bilateral (p-valor) generada mediante la prueba de normalidad, se observa que todos los datos están cumpliendo con el supuesto de normalidad, tanto para calcio, dureza total y magnésica para los cinco puntos de monitoreo, para las etapas del antes y después del tratamiento, por lo tanto se procedió un adecuado análisis estadístico paramétrico, tal como el t de student para muestras relacionadas, para ver las diferencia que existe entre antes y después de su tratamiento.

4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

- **Procedimiento estadístico: t de student para muestras relacionadas**

Para la investigación siguiente se planteó la siguiente hipótesis:

4.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

El análisis inferencial a considerar la hipótesis principal:

El ablandamiento electroquímico es eficiente en la reducción de calcio presente en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022, busca establecer la diferencia de la concentración inicial y final después de su tratamiento en cada punto de monitoreo.

Hi: El ablandamiento electroquímico reduce la concentración de calcio inicial presente en las aguas subterráneas de Chilca.

Ho: El ablandamiento electroquímico no reduce la concentración de calcio inicial presente en las aguas subterráneas de Chilca.

Nivel de significancia: 5%

Tabla 19
Análisis de pruebas para muestras emparejadas

Puntos de monitoreo	Tipos de dureza	Diferencia	Media	t	gl	Sig. (bilateral)
Punto de muestreo 01	CALCIO	D.POST.Ca-D.PRET.Ca	-240,36	-129,413	4	<.001
	DTOTAL	D.POST.Total-D.PRET.Total	-406,20	-52,910	4	<.001
	MAGNESIO	D.POST.Mg-D.PRET.Mg	-165,84	-25,300	4	<.001
Punto de muestreo 02	CALCIO	D.POST.Ca-D.PRET.Ca	-240,36	-129,413	4	<.001
	DTOTAL	D.POST.Total-D.PRET.Total	-406,20	-52,910	4	<.001
	MAGNESIO	D.POST.Mg-D.PRET.Mg	-165,84	-25,300	4	<.001
Punto de muestreo 03	CALCIO	D.POST.Ca-D.PRET.Ca	-218,40	-55,014	4	<.001
	DTOTAL	D.POST.Total-D.PRET.Total	-372,88	-53,523	4	<.001
	MAGNESIO	D.POST.Mg-D.PRET.Mg	-154,48	-25,524	4	<.001
Punto de muestreo 04	CALCIO	D.POST.Ca-D.PRET.Ca	-230,24	-37,282	4	<.001
	DTOTAL	D.POST.Total-D.PRET.Total	-430,68	-57,479	4	<.001
	MAGNESIO	D.POST.Mg-D.PRET.Mg	-200,44	-22,790	4	<.001
Punto de muestreo 05	CALCIO	D.POST.Ca-D.PRET.Ca	-294,80	-40,327	4	<.001
	DTOTAL	D.POST.Total-D.PRET.Total	-454,00	-83,953	4	<.001
	MAGNESIO	D.POST.Mg-D.PRET.Mg	-159,20	-61,394	4	<.001

Nota. Resultados analizados en el software estadístico SPSS – t de student para muestras relacionadas

Análisis e interpretación

Con un valor de nivel dado de significancia del 5%, la significancia asintótica (p-valor) generada, tal como se ve en la última columna de la tabla 19, que efectivamente nos da señal que hay diferencias marcadas entre la concentración inicial de las durezas (calcio, total y magnesio) y la concentración final después de su tratamiento, para todos con un valor de $P < .001$. Esto hace ver que en los cinco puntos de monitoreo hubo una reducción de las concentraciones de las durezas después de sus tratamientos. Por lo tanto, la dureza cálcica y las dos durezas se han reducido significativamente en los cinco puntos.

Tabla 20
Análisis para subconjuntos homogéneos

HSD Tukey	Puntos de monitoreo de aguas subterráneas	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
			1	2	3	4
CALCIO	PUNTO_MONITOREO_05	5	-294,8000			
	PUNTO_MONITOREO_01	5		-240,3600		
	PUNTO_MONITOREO_04	5		-230,2400	-230,2400	
	PUNTO_MONITOREO_03	5			-218,4000	
	PUNTO_MONITOREO_02	5				-192,7200
D.TOTAL	PUNTO_MONITOREO_05	5	-454,0000			
	PUNTO_MONITOREO_02	5	-449,4000			
	PUNTO_MONITOREO_04	5	-430,6800	-430,6800		
	PUNTO_MONITOREO_01	5		-406,2000		
	PUNTO_MONITOREO_03	5			-372,8800	
MAGNESIO	PUNTO_MONITOREO_02	5	-256,6800			
	PUNTO_MONITOREO_04	5		-200,4400		
	PUNTO_MONITOREO_01	5			-165,8400	
	PUNTO_MONITOREO_05	5			-159,2000	
	PUNTO_MONITOREO_03	5			-154,4800	

Nota. Resultados analizados en el software estadístico SPSS – HSD Tukey

Análisis e interpretación

La tabla de subconjuntos homogéneos muestra las diferencias en la reducción de las durezas en cada punto, por ejemplo empleando la técnica electroquímica, se logró mayor reducción de calcio en el punto de monitoreo 02, llegando a un valor de 67.52% en cambio una menor reducción de calcio se logró en el punto de monitoreo 05, obteniendo una eficiencia de 56.59%. Para la dureza total, la mayor reducción se logró en el punto de monitoreo 02, llegando a una eficiencia de 76.82%, mientras la menor eficiencia se logró en el punto de monitoreo 05 llegando a un valor de 63.85%, con respecto a la dureza magnésica, la mayor reducción se logró en el punto de monitoreo 02, con un valor de 85.7%, en cambio la menor reducción se logró en el punto de monitoreo 03, alcanzando una eficiencia de 77.7%.

4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1

Se propuso lo siguiente:

Hi.1: Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento, los valores en los cinco puntos, se encuentran por encima de los 200 mg/L de CaCO_3 , considerada como agua muy dura y donde empiezan a formar incrustaciones de calcio en cañerías según la Organización Mundial de la Salud.

Ho.1: Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento, los valores en los cinco puntos, no se encuentran por encima de los 200 mg/L de CaCO_3 , considerada como agua muy dura y donde empiezan a formar incrustaciones de calcio en cañerías según la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 21*Análisis de Prueba de muestra única para la dureza cálcica antes de su tratamiento*

Valor de prueba = 200 mg/L							
P. muestreo	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia		Media
					Inferior	Superior	
P. muestra 01	73,590	4	<.001	218,80	210,54504	227,05496	418,80
P. muestra 02	27,914	4	<.001	85,40	76,90571	93,89429	285,40
P. muestra 03	31,148	4	<.001	142,60	129,88885	155,31115	342,60
P. muestra 04	40,353	4	<.001	205,60	191,45375	219,74625	405,60
P. muestra 05	46,985	4	<.001	320,60	301,65496	339,54504	520,60

Nota. Se aprecia si existen diferencias con un valor definido por la OMS. En función a la dureza cálcica.

Análisis e interpretación

Bajo un nivel de significancia del 5%, de la significancia asintótica (p-valor) obtenida, tal como se muestra en la tabla 19, indicando, que sí efectivamente para los cinco puntos de monitoreo antes de su tratamiento, la concentración cálcica se encuentran por muy por encima del valor de 200 mg/L de CaCO₃ recomendado por la OMS, ya que estadísticamente el valor de p en cada punto es de (p<.001) dando una diferencia significativamente grande, por lo tanto se puede concluir que se acepta la hipótesis alterna, indicando que en todos los puntos estudiados, las agua subterránea están en las condiciones de alterar y formar los problemas de sarro o incrustaciones en las tuberías domésticas.

4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2

Se propuso lo siguiente

Hi.2: Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas, después de su tratamiento, los valores de los cinco puntos se encuentran en las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.

Ho.2: Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas, después de su tratamiento, los valores de los cinco puntos se encuentran en las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.

Tabla 22*Análisis de Prueba de muestra única para la dureza cálcica después de su tratamiento electroquímico*

Valor de prueba = (40-80) mg/L Concentración óptima recomendada desde el punto de salud							
P. muestras	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia		Media
					Inferior	Superior	
P. muestra 01	51,785	4	<.001	98,44	93,16212	103,71788	178,44
P. muestra 02	7,771	4	0,001	12,68	8,14971	17,21029	92,68
P. muestra 03	32,585	4	<.001	44,20	40,43385	47,96615	124,20
P. muestra 04	81,483	4	<.001	95,36	92,11073	98,60927	175,36
P. muestra 05	142,969	4	<.001	145,80	142,96857	148,63143	225,80

Nota. Se aprecia si existen diferencias con un valor definido por la Directiva de agua potable de la UE. En función a la dureza cálcica.

Análisis e interpretación

Bajo un nivel de significancia del 5%, de la significancia asintótica (p-valor) obtenida, tal como se muestra en la tabla 22, indicando, que sí efectivamente para los cinco puntos de monitoreo después de su tratamiento, la concentración cálcica se encuentran fuera del rango del valor de (40-80) mg/L de CaCO_3 , concentración óptima recomendada desde el punto de la salud, además estos valores se basaron en estudios epidemiológicos que muestran que la incidencia de enfermedades relacionadas es la más baja en estos rangos de calidad del agua. Sin embargo si comparamos estos valores frente a la norma establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la concentración de dureza total de calcio es aceptable hasta los 180 ppm, como límite máximo, comparando este valor frente a lo obtenido, podemos decir que se encuentran dentro del límite aceptable, menos del punto de monitoreo 05 que sobrepasó en 45.8 ppm, bajo estos resultados podemos decir, según la clasificación de la OMS, del tipo de agua según su dureza, estas aguas subterráneas tratadas en los 4 primeros puntos de monitoreo se encuentran en la clasificación de moderadamente hasta dura, en cambio para el punto de monitoreo 05 se encuentra por encima del límite recomendado por la OMS, por lo tanto con esto se acepta la hipótesis nula, ya que los valores obtenidos se encuentran fuera del valor recomendado de las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE, tal como se indica en la tabla 4.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. CONTRASTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Según la investigación realizada por Wang et al. (2021), en su publicación de efectos de los parámetros operativos y propiedades del material sobre la eficiencia de eliminación de dureza por técnica electroquímica, obtuvieron una eficiencia en la reducción de los sólidos disueltos mayor a 40% bajo las condiciones óptimas de 25 voltios y utilizando como electrodo el material de titanio, estos resultados tienen valores que se correlacionan positivamente con la concentración de Ca^{2+} , bajo estos resultados, si hacemos la comparación con los resultados que obtuvimos podemos concluir que con la técnica empleada se redujo la dureza cálcica en un 60% en promedio trabajadas en una hora de tratamiento, usando electrodos de acero inoxidable como cátodo y titanio como ánodo.

Para el trabajo que realizaron por Luan et al. (2019), sobre Cátodos acoplados de múltiples mallas para el mejoramiento del sistema electroquímica en el ablandamiento de las aguas, lograron reducir la dureza y alcalinidad en 71.48 % después de 8 horas de tratamiento para una solución preparada a base de CaCl_2 y NaHCO_3 sobre un volumen de 50 litros, en cambio para el agua de enfriamiento se logró reducir en 52.94 % para las 8 horas de tratamiento, para ambos utilizaron electrodos múltiples en forma de malla de acero inoxidable, estos resultados a diferencia de lo que obtuve, no se encuentran muy lejanos, ya que en el trabajo que realicé se llegó a un promedio del 60% en la reducción de la dureza cálcica, trabajados bajo diferentes condiciones operacionales, en general se redujo a niveles aceptables donde los efectos negativos son muy reducidos.

Para la investigación realizada por Zhang et al. (2020), en su publicación de Investigación sobre un equipo piloto electroquímico para descalcificación de agua con sistema de desincrustación automática: Optimización de parámetros y análisis de consumos energéticos, trabajaron en agua de

refrigeración, en la cual utilizaron 16 pares de electrodos, como cátodo utilizaron el acero inoxidable y para el ánodo se utilizó un material dimensionalmente estable, por cada experimento se trabajó durante 5 horas de tratamiento, en la cual lograron reducir la dureza cálcica en 49.4%, este valor se encuentra cercano al valor que logramos obtener, cabe diferenciar que este sistema propuesto lo trabajaron a nivel planta piloto, en sistema automatizado, en cambio la investigación realizada por mi persona es a nivel laboratorio.

La técnica electrolítica evaluada por Muddemann T. et al (2020), en su publicación de "combination of magnetically actuated flexible graphite–polymer composite cathode and boron-doped diamond anode for electrochemical water softening or wastewater treatment", empelando aguas residuales de inodoros logró reducir la dureza a niveles de 72%, empelando como medio separante una membrana catiónica de nafión, por otra parte para soluciones mixtos se logró llegar en 90% sobre la reducción de la dureza cálcica, estos resultados a comparación con lo que realizamos están muy por encima, sin embargo el tratamiento que hicimos se realizó para un tiempo de una hora, a diferencia de la otra investigación donde se realizó más de una hora.

En el trabajo realizado por Clauwaert et al. (2019), mediante su publicación de "Ablandamiento electroquímico del agua del grifo: un enfoque de cero insumos químicos, como resultado obtuvieron para la primera configuración con electrolitos combinados utilizando una membrana catiónica una reducción de la dureza con una eficiencia promedio de eliminación de calcio y magnesio en 75-86% y 7-21% respectivamente, considerándose un proceso sostenible, se llegó un consumo de energía específico de 7,0-10,1 kWh kg⁻¹ CaCO₃, en cambio para la segunda configuración utilizando una membrana aniónica sin combinación de los electrolitos se obtuvieron eficiencias promedio de remoción de calcio y magnesio de 73-78% y 40-44% respectivamente, con consumos específicos de energía de 5.8-7.5 kWh kg⁻¹ CaCO₃. Haciendo una comparación con el trabajo realizado estos valores se encuentran no tan alejados de los resultados obtenidos, ya que la eficiencia promedio se llegó a 60% sobre la reducción de la dureza cálcica.

CONCLUSIONES

- Mediante la investigación realizada se ha logrado demostrar que la técnica electroquímica específicamente mediante el ablandamiento por precipitación electroquímica se redujo el calcio a diferentes concentraciones finales aceptables. Con respecto al objetivo general, después de haberse evaluado su eficiencia electrolítica sobre la reducción cálcica en los cinco puntos evaluados, para el primer punto de muestreo se redujo en 57.39%, reduciendo de 418,8 mg/L CaCO₃ hasta 178,44 mg/L CaCO₃, para el punto 02 se redujo en 67.52%, reduciendo de 285,4 mg/L CaCO₃ hasta 92,68 mg/L CaCO₃, para el punto 03 se redujo en 63.73%, llevando de 342,6 mg/L CaCO₃ hasta 124,2 mg/L CaCO₃, para el punto 04 se redujo en 56.72%, llevando de 405,6 mg/L CaCO₃ hasta 175,36 mg/L CaCO₃ y para el punto 05 se redujo en 56.59%, llevando de 520,6 mg/L CaCO₃ hasta 225,8 mg/L CaCO₃.
- Al ser analizados mediante volumetría EDTA, antes de su tratamiento, se obtuvieron las siguientes concentraciones cálcicas en los cinco puntos: punto 01 (418.8mg/L), punto 02 (285.4mg/L), punto 03 (342.6mg/L), punto 04 (405.6mg/L) y punto 05 (520.6mg/L). En la figura siguiente se muestra estos valores con respecto a los estándares recomendados.
- Al ser analizados mediante volumetría EDTA, después de su tratamiento, se obtuvieron las siguientes concentraciones cálcicas en los cinco puntos: punto 01 (178,44mg/L), punto 02 (92,68mg/L), punto 03 (124,2mg/L), punto 04 (175,36mg/L) y punto 05 (225,8mg/L). En la figura siguiente se muestra estos valores con respecto a los estándares recomendados.

RECOMENDACIONES

- Para las próximas investigaciones se recomienda realizar el tratamiento de forma continua, para ver la robustez a periodos largos y su funcionalidad de la membrana utilizada.
- Probar la reducción de la dureza cálcica con diferentes configuraciones, con la finalidad de que el tiempo de retención en la celda sea lo mínimo.
- Hacer otras investigaciones empleando otro tipo de electrodo con respecto al ánodo, ya que el material que se utilizó (titanio) es muy costoso con referente hacia otros materiales muy comerciales.
- Para las próximas investigaciones se recomienda buscar técnicas de cuantificación de concentraciones de calcio en forma digitalizadas, ya que la técnica que fue utilizada para esta investigación mediante volumetría con EDTA es u poco tedioso y muy contaminante, si uno quiere sacar más datos rápidamente esta técnica volumétrica particularmente no lo recomiendo.
- Por otra parte, sobre el electrolito utilizado para la parte del ánodo, se recomienda probar con otro tipo de solución más económica y de fácil accesibilidad.
- Se recomienda realizar más trabajos de investigación relacionados al tema empleando esta técnica, ya que no se encontraron trabajos relacionados al tema en ningún repositorio a nivel nacional y local.
- Se recomendaría a las autoridades locales definir valores estándares de concentración de la dureza cálcica, tanto para aguas tratadas y no tratadas con respecto al consumo humano, ya que recientes estudios de epidemiológicos que muestran que la incidencia de enfermedades relacionadas es la más baja en estos rangos de calidad del agua (Concentración óptima recomendada desde el punto de salud (40-80 mg/L Ca)), según la Directiva de agua potable de la UE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler, A., Longo, F., Finarelli, J., Goldmacher, J., Assour, J., & Korsakoff, L. (1967). Una síntesis simplificada de meso-tetrafenilporfina. *J. Org. Chem.* 32 (2), 476-476.
- Aldebarán-Sistemas. (03 de 05 de 2016). *Características y usos del carbonato*. Obtenido de <https://aldebaransistemas.com/caracteristicas-y-usos-del-carbonato-de-calcio/>
- ANA. (2019). *Estudio hidrogeológico del acuífero Chilca: Informe final*. Chilca: Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos.
- Banks, E. D., Taylor, N. M., Gulley, J., Lubbers, B. R., Giarrizzo, J. G., Bullen, H. A., . . . Barton, H. A. (444–454). Bacterial Calcium Carbonate Precipitation in Cave Environments: A Function of Calcium Homeostasis. *Geomicrobiology Journal*, 27, 2010.
- Barrera, C. E. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté Ediciones, México.
- Bottani, E., & Odetti, H. (2014). *Química inorgánica*. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Calvo, D., & Sardiñas, P. (1992). Evaluación de las Concentraciones de Oligoelementos y Dureza Total del Agua y su Posible Relación con la Mortalidad por Miocardia. *El agua y la Salud. Instituto Nacional de Higiene Epidemiológica y Microbiológica. La Habana, Cuba, Editorial Ciencias Médicas*, 115-129.
- Chamley, H. (2003). hapter 6 Underground water. *Developments in Earth and Environmental Sciences, Elsevier, Volumen 1*, 231-269.
- Clauwaert, P., De Paepe, J., Alonso-Fariñas, B., Vaiopoulou, E., Verliefde, A., & Rabaey, K. (2019). Electrochemical tap water softening: A zero chemical input approach. *Water Research*, 115263.

- Coto, B., Martos, C., Pena, J. L., Rodríguez, R., & Pastor, G. (2012). Effects in the solubility of CaCO₃: Experimental study and model description. *Fluid Phase Equilibria* 324, 1-7.
- EEC, (. (1980). *Council Directive 80/778/EEC of 15 July 1980 relating to the quality of water intended for human consumption*. . ENG& toc=OJ:L:1980:229:TOC.: Off. J. Eur. Communities - Legislation 229, 11–29. 30.38.1980.
- Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., They, P., Tran, T., & Tili, M. (2006). Electrochemical water softening: principle and application. *Desalination, Volume 201, Issues 1–3*, 150-163.
- Goldstein, M. I., & DellaSala, D. A. (2020). *Encyclopedia of the World's Biomes*. Elsevier Gezondheidszorg.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación Sexta edición*. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Jiang, N., Zhao, Q., Xue, Y., Xu, W., & Ye, Z. (2018). Removal of dinitrotoluene sulfonate from explosive wastewater by electrochemical method using Ti/IrO₂ as electrode. *Journal of Cleaner Production, Volume 188*, 732-740.
- Kozisek, F. (2020). Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 112, 104589.
- Kyung Ahn, M., Chilakala, R., Han, C., & Thenepalli, T. (2018). Removal of Hardness from Water Samples by a Carbonation Process with a Closed Pressure Reactor. *Water, 10*, 54.
- Luan, J., Wang, L., Sun, W., Li, X., Zhu, T., Zhou, Y., . . . Liu, G. (2019). Multi-meshes coupled cathodes enhanced performance of electrochemical water softening system. *Separation and Purification Technology* 217, 128–136.

- Liao, Z., Gu, Z., Schulz, M. C., Davis, J. R., Baygents, J. C., & Farrell, J. (2009). Treatment of cooling tower blow-down water containing silica, calcium and magnesium by electrocoagulation. *Water Sci. Technol.* 60 , 2345–2352.
- Macklin, P., Rosentreter, J., Arifanti, V., & Suryaputra, G. (2021). Chapter 3 - Groundwater research in mangrove coastal ecosystems—new prospects. En F. Sidik, & D. Friess, *Dynamic Sedimentary Environments of Mangrove Coasts* (págs. 67-81). Elsevier.
- Maltby, E. (2009). 3.1 - Hydrological functions. *Functional Assessment of Wetlands*, Woodhead Publishing, 241-e16.
- Matter, F. (2013). Groundwater Science. En C. Fitts, *1 - Groundwater: The Big Picture* (págs. 1-22). India: Elsevier Science Ltd. .
- Mora, D., & Alfaro, N. (1999). Caracterización y distribución por cantones de la dureza del agua en las fuentes usadas para consumo humano en costa rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, ISSN 1409-1429.
- Moreira-Romero, A. (2016). Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua. *Dom. Cien*, Vol. 2, 334-345.
- Muddemann, T., Haupt, D., Engelke, M., Sievers, M., Fischer, A., Kiefer, C., . . . Kunz, U. (2020). Combination of magnetically actuated flexible graphite–polymer composite cathode and boron-doped diamond anode for electrochemical water softening or wastewater treatment. *Electrochimica Acta* 354, 136729.
- O’Carroll, D. (2014). Chapter 28 - Nanotechnology for Contaminated Subsurface Remediation: Possibilities and Challenges. En A. Street, R. Sustich, J. Duncan, & N. Savage, *In Micro and Nano Technologies* (págs. 441-456). William Andrew Publishing. Nanotechnology Applications for Clean Water (Second Edition). .
- Ordoñez, J. (2012). *Aguas subterráneas acuíferos*. Lima: Sociedad Geográfica del Perú. Lima: ISBN: 978-9972-602-78-8.

- Padmapriya, R., Saranya, T., & Thirunalasundari, T. (2015). Phyllanthus emblica-A Biopotential for hard water treatment. *Int. J. Pure Appl. Biosci.* 3., 291-295.
- Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Medellin: Ediciones de la U.
- Rosborg, I., & Kozisek, F. (2020). *Drinking Water Minerals and Mineral Balance - Importance, Health Significance, Safety Precautions*. Cham, Suiza: Springer International Publishing Switzerland 2015.
- Sanjuán, I., Benavente, D., Expósito, E., & Montiel, V. (2019). Electrochemical water softening: Influence of water composition on the precipitation behaviour. *Separation and Purification Technology* 211, 857-865.
- Sawyer, C. (1960). *Chemistry for Sanitary Engineers*. New York:: McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Sengupta, P. (2013). Potential health impacts of hard water. *Int J Prev Med.* Aug;4(8), 866-875.
- Skoog, D. (2014). *Fundamentos de química analítica*. México: Cengage Learning.
- Stephenson, M. (2018). *Energy and climate change: An introduction to geological controls, interventions and mitigations*. Elsevier.
- Supo, J. (2014). *Seminario de la Investigación Científica (2da Edición ed.)*. Arequipa, Perú: Editorial Bioestadístico.
- Wang, W., Chen, Q., Lin, W., Zheng, X., Xu, J., & Yu, J. (2021). Effect of operational parameters and material properties on hardness removal efficiency by electrochemical technique. *Water Supply*, 1-12.
- Zenteno, E., & Ayasta, H. (2005). *Inventario de fuentes de agua subterránea en el Valle Chilca*. Lurín: Instituto Nacional de Recursos Nsturales Intendencia de Recursos Hídricos Administración Técnica del Distrito de Riego Chillón-Rimác-Lurín.

Zeppenfeld, K. (2018). Elektrochemische Wasserenthärtung: Eine kurze Übersicht über Forschung und Entwicklung Electrochemical water softening: A short overview about research and development. *gwf-Wasser | Abwasser*, 123-129.

Zhang, C., Tang, J., Zhao, G., Tang, Y., Li, J., Li, F., . . . Zhang, Y. (2020). Investigation on an electrochemical pilot equipment for water softening with an automatic descaling system: Parameter optimization and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production* 276, 123178.

Zhi, S., & Zhang, S. (2014). A novel combined electrochemical system for hardness removal. *Desalination, Volume 349*, 68-72.

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Calixto Cruz, M. (2023). *Evaluación del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

“EVALUACIÓN DEL ABLANDAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE CALCIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE CHILCA DESTINADAS A USO DOMÉSTICO - 2022”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	Indicador	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Dependiente		
¿Cuál es la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022?	Evaluar la eficiencia del ablandamiento electroquímico de calcio en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022	Hi: El ablandamiento electroquímico es eficiente en la reducción de calcio presente en las aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico - 2022	Concentración de calcio en aguas subterráneas de Chilca destinadas a uso doméstico	Concentración de calcio expresado en carbonato de calcio (CaCO ₃)	<p>Tipo: Con intervención, analítico, prospectivo y longitudinal.</p> <hr/> <p>Enfoque: Cuantitativo</p> <hr/> <p>Nivel: Aplicativo</p> <hr/> <p>Diseño: Experimento verdadero</p>
P. General	O. General	H. General	Independiente	Indicador	Técnicas de recolección de datos:
¿Cuál es la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento en	Determinar la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento	Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca antes de su tratamiento, los valores en los cinco puntos, se encuentran	Ablandamiento electroquímico	Reduce la concentración de calcio en forma de (CaCO ₃)	<p>- Ficha de campo</p> <p>-Monitoreo en el lugar experimental</p>

los cinco puntos de monitoreo?	en los cinco puntos de monitoreo	por encima de los 200 mg/L de CaCO ₃ , considerada como agua muy dura y donde empiezan a formar incrustaciones de calcio en cañerías según la Organización Mundial de la Salud.	-Análisis por volumetría en el campo experimental
¿Cuál es la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca después de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo?	Determinar la dureza cálcica en las aguas subterráneas de Chilca después de su tratamiento en los cinco puntos de monitoreo	Al definir la dureza cálcica en las aguas subterráneas, después de su tratamiento, los valores de los cinco puntos se encuentran en las concentraciones mínimas requeridas y recomendadas según lo propuesto por algunos estados miembros para refundición de la Directiva de agua potable de la UE.	Etapa 1,...Etapa final

ANEXO 2

PROCEDIMIENTO ANALÍTICO DE LA CUANTIFICACIÓN DE CALCIO Y DUREZA TOTAL POR VOLUMETRÍA

ANÁLISIS DE LA DUREZA TOTAL

DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL – METODOLOGÍA EPA 130.2	
REACTIVOS / SOLUCIÓN	MATERIALES
Solución Buffer pH:10	1 Bureta más soporte universal
Ácido EDTA 0.01 M	1 probeta
Negro de Eriocromo	2 pipetas más 1 micropipeta
Agua Destilada	2 matraces
Muestra de Análisis	1 vaso de precipitado más 1 piseta

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	
PASO	ACTIVIDAD
1	Agregar 50mL de la muestra a una probeta.
2	Agregar a la muestra (Paso N°1), 3 ml de solución buffer pH:10
3	Agregar a la muestra (Paso N°2), una pizca de indicador Negro de Eriocromo
4	Dividir la muestra (Paso N°3) en dos matraces, c/u con un mismo volumen de solución
5	Agregar a la bureta 25 ml de Ácido EDTA(0.01M)
6	Titular la muestra (Paso N°4) con el Ácido EDTA, hasta un cambio de coloración.

CONSIDERACIONES
La muestra de alta dureza (Paso N°4) presentara una tonalidad rojiza y cambiara a color azul (Paso N°6).
La muestra de baja dureza (Paso N°4) presentara una tonalidad morada y cambiara a color azul (Paso N°6).
Para muestras de baja dureza (blandas), considerar una muestra de 200 ml. (Paso N°1).
Para muestras de baja dureza (blandas), considerar 10 ml de solución Buffer pH 10. (Paso N°2).

MÉTODO DE CÁLCULO	
$D.T = (A * M * f * (100000)) / V$	
D. T : Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	f : Factor (mgCaCO ₃ / mol)
A: Volumen gastado del titulante (ml)	V: Volumen muestra (ml)
M: Molaridad de la solución EDTA (0.01M)	100000: Factor de conversión de unidades

Fuente: Metodología EPA 130.2

ANÁLISIS DE LA DUREZA CÁLCICA

DETERMINACIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA– METODOLOGÍA EPA 215.2	
REACTIVOS / SOLUCIÓN	MATERIALES
Hidróxido de Sodio, NaOH 1N	1 Bureta más soporte universal
Ácido EDTA 0.01 M	1 probeta
Murexida	2 pipetas más 1 micro pipeta
Agua destilada	2 matraz
Muestra de Análisis	1 vaso de precipitado más una piseta

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	
PASO	ACTIVIDAD
1	Agregar 50mL de la muestra a una probeta.
2	Agregar a la muestra (Paso N°1), 3 ml de solución hidróxido de sodio 1N.
3	Agregar a la muestra (Paso N°2), una pizca de indicador Murexida.
4	Dividir la muestra (Paso N°3) en dos matraz, c/u con un mismo volumen de solución.
5	Agregar a la bureta 25 ml de Ácido EDTA (0.01M)
6	Titular la muestra (Paso N°4) con el Ácido EDTA, hasta un cambio de coloración.

CONSIDERACIONES
La muestra de alta dureza (Paso N°4) presentara una tonalidad rojiza y cambiara a color azul (Paso N°6)
La muestra de baja dureza (Paso N°4), presentara una tonalidad morada y cambiara a color azul (Paso N°6)
Para muestras de baja dureza (blanda), considerar una muestra de 200 ml (Paso N°1)
Para muestras de baja dureza (blanda), considerar 10 ml de solución NaOH 1N. (Paso N°2)

MÉTODO DE CÁLCULO	
$D.C = (A * M * f * (100000)) / V$	$Ca (mg/l) = (A * M * 20040) / V$
D. C : Dureza cálcica (mgCaCO ₃ /L)	f : Factor (mgCaCO ₃ / mol)
A: Volumen gastado del titulante (ml)	V: Volumen muestra (ml)
M: Molaridad de la solución EDTA (0.01M)	100000: Factor de conversión de unidades

Fuente: Metodología EPA 215.2

ANEXO 3

REQUISITOS PARA LA RECEPCIÓN DE MUESTRAS

Una vez recolectadas las muestras se acondicionaron de acuerdo a los siguientes requisitos del agua.

Ensayo	Tipo de envase	Cantidad mínima de muestra	Preservación / Conservación desde la toma de muestra	Tiempo máximo para transporte al laboratorio
pH			Medido en campo	
Temperatura			Medido en campo	
Conductividad			Medido en campo	
Oxígeno disuelto			Medido en campo	
BÁSICOS				
Turbiedad	P o V (*)	200 mL	Refrigerar a 4°C en oscuridad.	48 horas
Alcalinidad	P o V (*)	200 mL	Refrigerar a 4°C	14 días
Color	P o V (*)	500 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
Sólidos sedimentables	P o V (*)	1000 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
Sólidos (disueltos, fijos, suspendidos, volátiles, totales.)	P o V (*)	1000 mL	Refrigerar a 4°C	7 días
Cloruros	P o V (*)	200 mL	Refrigerar a 4°C	28 días
Sulfatos	P o V (*)	100 mL	Refrigerar a 4°C	28 días
Dureza	P o V (*)	500 mL	Agregar 1,5 mL de HNO ₃ 1+1 ^(*) hasta pH < 2	6 meses
DBOs	P o V (*)	1000 mL	Refrigerar a 4°C	24 horas
Cianuro WAD	P o V (*)	500 mL	Agregar NaOH hasta pH > 12. Refrigerar a 4° C en oscuridad.	14 días
Material extractable en hexano MEH (Aceites y grasas)	V (*) ámbar	1000 mL	Agregar H ₂ SO ₄ 1+1 ^(*) hasta pH < 2, refrigerar 4 ° C.	28 días
METALES				
Metales (°)	F(A) (°) (no tipo de metal)	1000 mL	Agregar 3mL de HNO ₃ 1+1 ^(°) hasta pH < 2 , Refrigerar a 4°C	3 meses
Mercurio	F(A) & V(A) (°) (no tipo de metal)	500 mL	Agregar 4 mL solución dicromato de potasio ^(°) luego agregar 1,5 mL de HNO ₃ 1+1 ^(°) hasta pH < 2, refrigerar a 4 ° C	14 días- F(A) (°) 28 días- V(A) (°)

Fuente: APHA, AWW, WEF. 2012. Standard methods for examination of water & wastewater, 22nd Edition.- Environmental Protection Agency 8015B, 245.7, 8081 B, 8141B. 2007

ANEXO 4
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE AGUA PARA
CONSUMO HUMANO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS DE
CALIDAD ORGANOLÉPTICA

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7. Sólidos totales disueltos	mg.L ⁻¹	1 000
8. Cloruros	mg.Cl ⁻ L ⁻¹	250
9. Sulfatos	mg.SO ₄ ²⁻ L ⁻¹	250
10. Dureza total	mg.CaCO ₃ L ⁻¹	500
11. Amoníaco	mg.N L ⁻¹	1,5
12. Hierro	mg.Fe L ⁻¹	0,3
13. Manganeso	mg.Mn L ⁻¹	0,4
14. Aluminio	mg.Al L ⁻¹	0,2
15. Cobre	mg.Cu L ⁻¹	2,0
16. Zinc	mg.Zn L ⁻¹	3,0
17. Sodio	mg.Na L ⁻¹	200

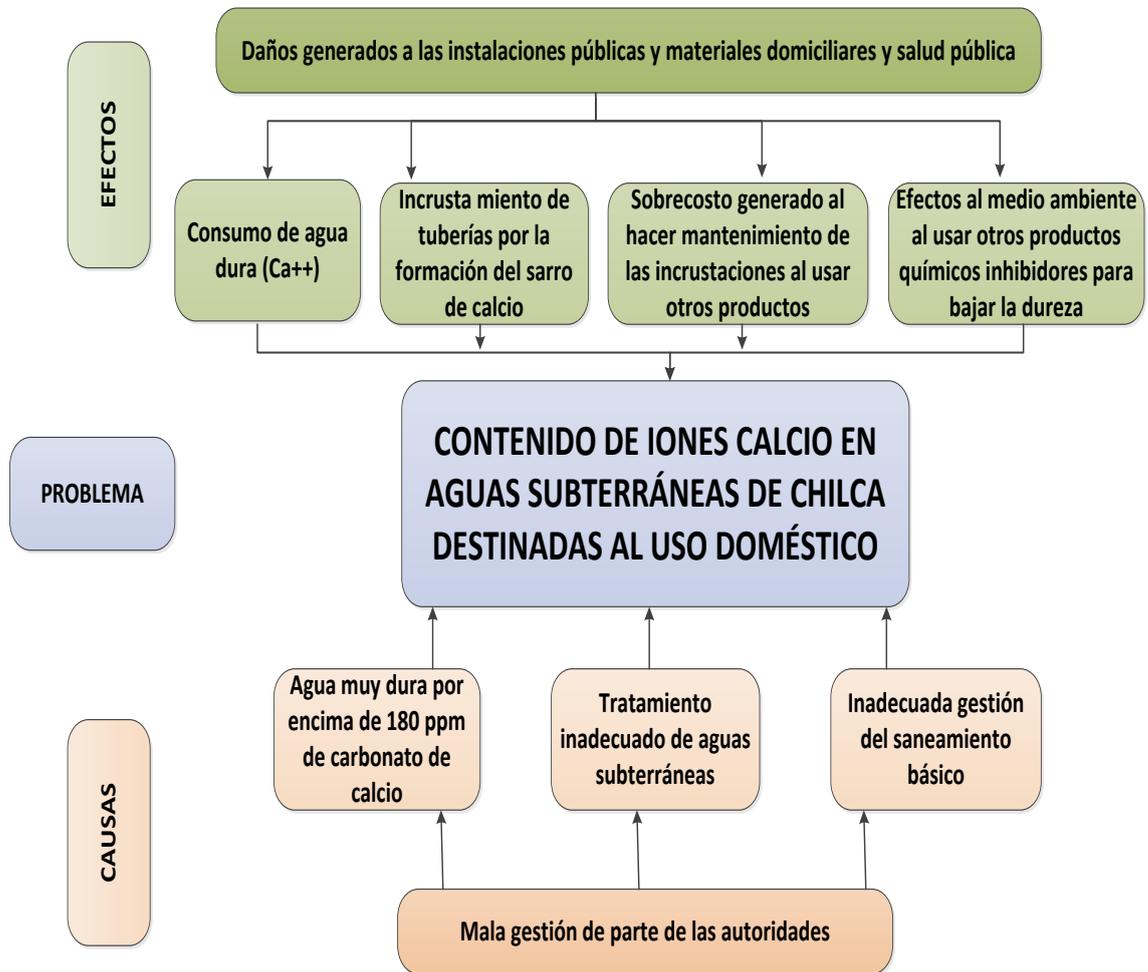
UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

Fuente: Reglamento de calidad de agua para consumo humano D.S (031-2010-SA)

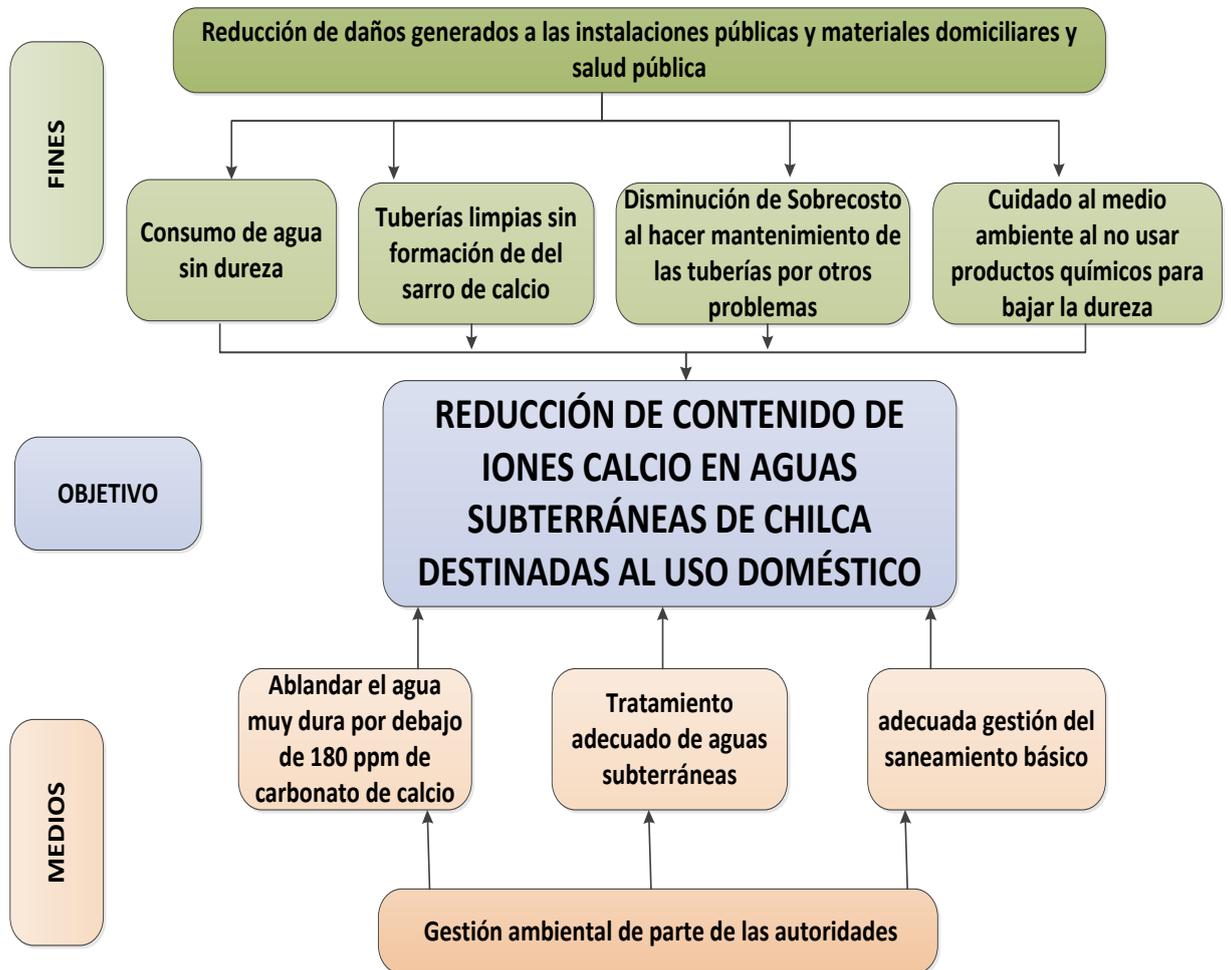
ANEXO 5

ÁRBOL DE CAUSA Y EFECTO



ANEXO 6

ÁRBOL DE MEDIO Y FINES



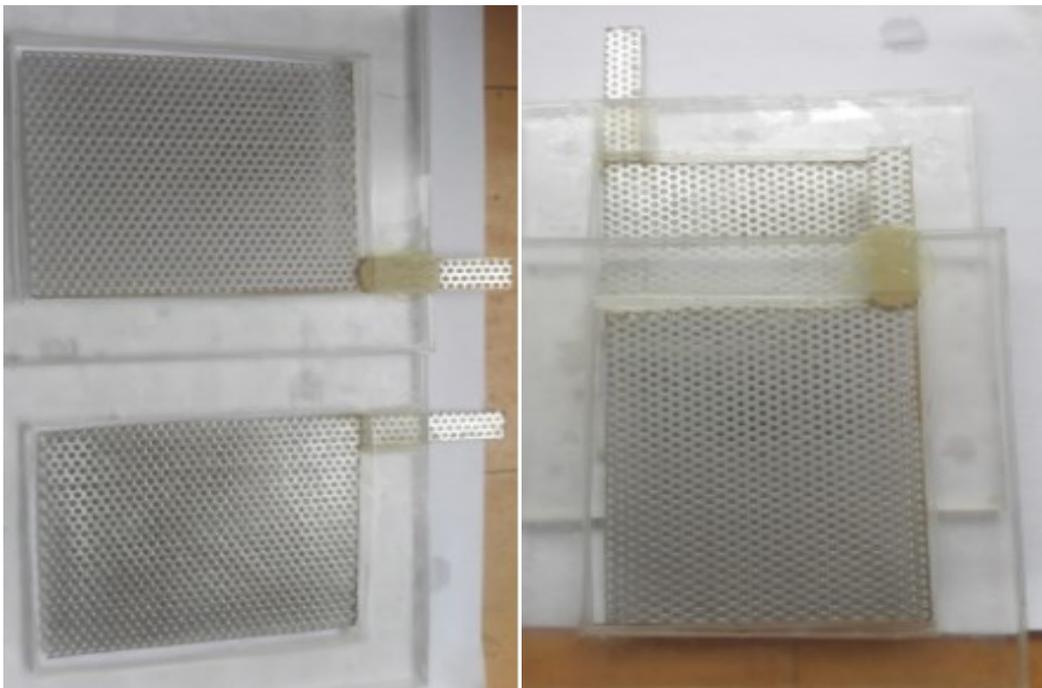
ANEXO 7

PANELES FOTOGRÁFICOS EN LA REALIZACIÓN DE LA TESIS

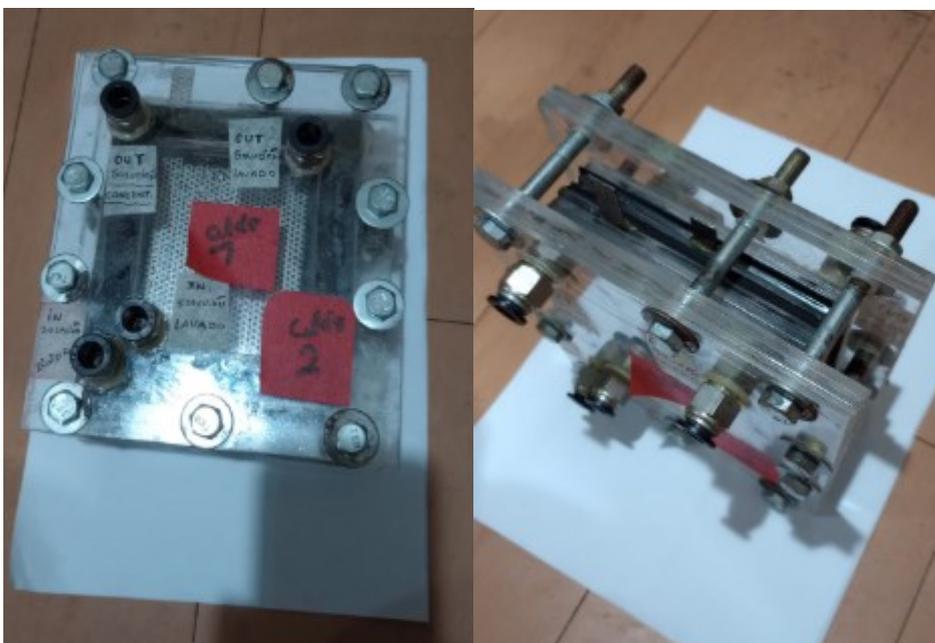
Imagen del módulo montado listo para la parte experimental



La configuración de los electrodos catódicos y anódicos



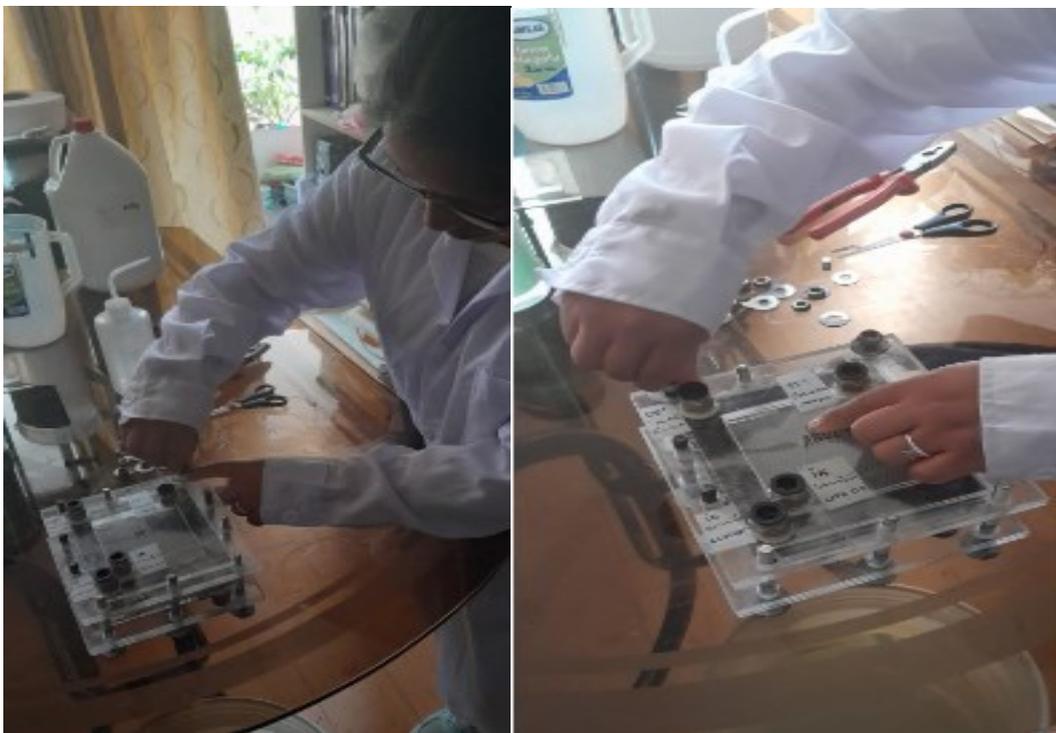
Montaje de la celda electrolytica



Acondicionamiento de la membrana catiónica



Armado de la celda electrolítica



Llenado de la muestra al módulo experimental

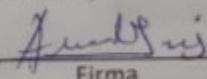
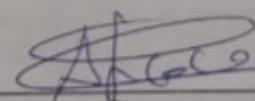


Cuantificación de las muestras recogidas por volumetría EDTA (0.01N)



ANEXO 8

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO							
DATOS DEL SOLICITANTE							
Solicitante: MELY CALIXTO CRUZ				Teléfono: 944 663 629			
Dirección: Jirón Hermilio Valdizan 859 - 885				Ciudad: HUÁNUCO			
DATOS DE LA MUESTRA							
Muestra N°: 01		Cód. de muestra: - CHILCA - PM (3)					
Fecha: 21/10/22		Hora de toma: 8:15 AM					
Sitio de toma: 76° 43' 16" / 12° 32' 29"		Municipio: MUNICIPALIDAD DE CHILCA					
Departamento: LIMA							
TIPO DE MUESTRA							
TIPO DE MUESTRA	Tratada	Sin tratar	En proceso	TIPO DE ENVASE			
				Bolsa	Hielo	Suminis	Otro
Consumo humano:		X					Bidón
Residual:							
Riego:							
Otro:							
DATOS QUIEN TOMÓ LA MUESTRA							
Nombre: Adan Huñaz Jorjao				Teléfono: 984257702			
Cargo: Ing. Ambiente (Ayudante)				Correo: MJA@gmail.com			
 Firma							
DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN EL LABORATORIO							
2022	10	21	13.45	Friedy / Técnico			
AAAA	MM	DD	HORA	Nombre/Cargo			
 Firma							

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO

DATOS DEL SOLICITANTE

Solicitante: *Hely Colixto Cruz* Teléfono: *944 663 629*
 Dirección: *Jr. Herminia Valdizan 859-885* Ciudad: *HUANUCO*

DATOS DE LA MUESTRA

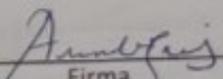
Muestra N°: *02* Cód. de muestra: *- CHILCA - PH ②*
 Fecha: *21/10/22* Hora de toma: *8.45 AM*
 Sitio de toma: *76°43'15" / 12°32'15"* Municipio: *MUNICIPALIDAD DE CHILCA*
 Departamento: *LIMA*

TIPO DE MUESTRA

TIPO DE MUESTRA	Tratada	Sin tratar	En proceso	TIPO DE ENVASE			
				Bolsa	Hielo	Suminis	Otro
Consumo humano:		<i>X</i>					<i>Bidón</i>
Residual:							
Riego:							
Otro:							

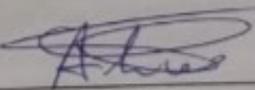
DATOS QUIEN TOMÓ LA MUESTRA

Nombre: *Adan Muñoz Sings* Teléfono: *984297702*
 Cargo: *Ayudante* Correo: *AISA@Gmail.com*


 Firma

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN EL LABORATORIO

<i>2022</i>	<i>10</i>	<i>21</i>	<i>13.45</i>	<i>Fredy Técnico</i>
AAAA	MM	DD	HORA	Nombre/Cargo


 Firma

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO

DATOS DEL SOLICITANTE

Solicitante: Hely Coloto Cruz Teléfono: 944 663 629
 Dirección: Jr. Hernando Valdivia 859-885 Ciudad: Huancayo

DATOS DE LA MUESTRA

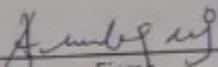
Muestra N°: 03 Cód. de muestra: - CHLO - PH ③
 Fecha: 21/10/22 Hora de toma: 9:10 AM
 Sitio de toma: 76° 44' 02" / 12° 34' 15" Municipio:
 Departamento: Lima

TIPO DE MUESTRA

TIPO DE MUESTRA	TIPO DE MUESTRA			TIPO DE ENVASE			
	Tratada	Sin tratar	En proceso	Bolsa	Hielo	Suminis	Otro
Consumo humano:		x					B. dm
Residual:							
Riego:							
Otro:							

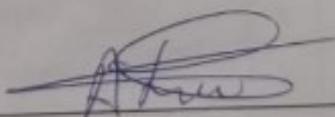
DATOS QUIEN TOMÓ LA MUESTRA

Nombre: Adan Huñig Jorgo Teléfono: 9842 57702
 Cargo: Ayudante Correo: HJA@Gmail.com


 Firma

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN EL LABORATORIO

2022	10	21	13:45	Freddy / Técnico
AAAA	MM	DD	HORA	Nombre/Cargo


 Firma

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO

DATOS DEL SOLICITANTE

Solicitante: *Héley Colivero Cruz* Teléfono: *944 663 629*
 Dirección: *Jr. Hernando Valdivia 8592 885* Ciudad: *HUANUCO*

DATOS DE LA MUESTRA

Muestra N°: Cód. de muestra: *-CHUCA - PM (4)*
 Fecha: *21/10/22* Hora de toma: *9:35 AM*
 Sitio de toma: *76°43'16" / 12°32'50"* Municipio: *MUNICIPALIDAD DE CHILCA*
 Departamento: *LIMA*

TIPO DE MUESTRA

TIPO DE MUESTRA	Tratada	Sin tratar	En proceso	TIPO DE ENVASE			
				Bolsa	Hielo	Suminis	Otro
Consumo humano:		<i>X</i>					<i>Bidón</i>
Residual:							
Riego:							
Otro:							

DATOS QUIEN TOMÓ LA MUESTRA

Nombre: *Adon Muñoz Jongs* Teléfono: *984257702*
 Cargo: *Dyudante* Correo: *HJA@gmail.com*

Adon Muñoz Jongs
 Firma

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN EL LABORATORIO

2022 *10* *21* *13:45* *Fredy / Técnico*
 AAAA MM DD HORA Nombre/Cargo

[Firma]
 Firma

FICHA DE MUESTREO EN EL CAMPO

DATOS DEL SOLICITANTE

Solicitante: *Maly Colato Cruz* Teléfono: *944 663 629*
 Dirección: *Jr. Heriberto Valdizon 854-885* Ciudad: *HUANUCO*

DATOS DE LA MUESTRA

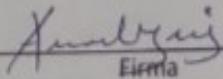
Muestra N°: *05* Cód. de muestra: *- CHILCA - PM (9)*
 Fecha: *21/10/22* Hora de toma: *10:03 AM*
 Sitio de toma: *78° 43' 19" / 12° 32' 22"* Municipio: *MUNICIPALIDAD DE CHILCA*
 Departamento: *LIMA*

TIPO DE MUESTRA

TIPO DE MUESTRA	Tratada	Sin tratar	En proceso	TIPO DE ENVASE			
				Bolsa	Hielo	Suminis	Otro
Consumo humano:		<input checked="" type="checkbox"/>					<i>D. de</i>
Residual:							
Riego:							
Otro:							

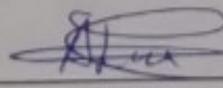
DATOS QUIEN TOMÓ LA MUESTRA

Nombre: *Adan Ruiz Jorge* Teléfono: *9842577 02*
 Cargo: *Ayudante* Correo: *HJA@Gmail.com*


 Firma

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN EL LABORATORIO

2022 *10* *21* *13:45* *Fredy / Técnico*
 AAAA MM DD HORA Nombre/Cargo


 Firma

ANEXO 9

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS NIVEL EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS A NIVEL
EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA
LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS

TIPO DE PUNTO DE MONITOREO: 0.1

REPLICAS	Tiempo (min.)	Volumen gastado de EDTA (0.01 N)		
		DCa ²⁺ (ml)	DT(ml)	DMg ²⁺ (ml)
R1	0	21.1	31.5	15.4
	15	18.05	26.25	8.2
	30	13.05	20.95	7.9
	45	10.95	15.85	4.3
	60	9.05	10.35	1.74
R2	0	21.35	31.4	15.85
	15	18.1	26.35	8.25
	30	13.85	20.9	7.82
	45	11.05	15.95	4.9
	60	9.5	10.95	1.3
R3	0	20.95	30.75	9.8
	15	18.2	26.3	8.1
	30	14.2	20.85	6.45
	45	10.65	16.45	5.4
	60	9.0	10.3	1.3
R4	0	20.45	29.95	9.5
	15	18.65	26.74	8.09
	30	13.85	20.8	7.72
	45	13.10	15.35	5.1
	60	8.75	10.95	2.2
R5	0	20.55	30.55	10.0
	15	18.56	26.95	8.39
	30	13.55	20.86	7.31
	45	9.65	14.70	5.1
	60	8.15	10.85	2.2

**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS A NIVEL
EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA
LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS**

TIPO DE PUNTO DE MONITOREO:

02

REPLICAS	Tiempo (min.)	Volumen gastado de EDTA (0.01 N)		
		DCa ²⁺ (ml)	DT(ml)	DMg ²⁺ (ml)
R1	0	14.85	29.6	14.75
	15	12.85	24.65	12.32
	30	9.05	19.75	10.7
	45	5.95	13.25	7.2
	60	4.75	6.65	1.9
R2	0	14.15	29.05	14.9
	15	12.95	24.05	11.1
	30	10.9	19.05	8.94
	45	5.65	13.95	8.2
	60	4.77	6.9	1.93
R3	0	14.25	29.15	14.3
	15	12.85	24.85	12.2
	30	9.45	19.65	10.2
	45	6.35	14.35	8
	60	4.75	6.75	2
R4	0	13.95	28.95	15
	15	12.05	24.15	12.1
	30	8.65	19.95	11.1
	45	6.25	14.98	8.73
	60	4.55	6.85	2.3
R5	0	14.15	29.5	15.35
	15	12.96	24.75	11.79
	30	9.65	20.05	10.4
	45	6.45	15.75	9.3
	60	4.35	6.95	2.6

**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS A NIVEL
EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA
LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS**

TIPO DE PUNTO DE MONITOREO:

03

REPLICAS	Tiempo (min.)	Volumen gastado de EDTA (0.01 N)		
		DCa ²⁺ (ml)	DT (ml)	DMg ²⁺ (ml)
R1	0	17.75	27.75	10
	15	14.25	28.95	8.6
	30	9.5	17.95	8.4
	45	7.05	13.15	6.1
	60	6.45	8.95	1.8
R2	0	17.35	26.15	9.9
	15	14.05	22.15	8.1
	30	9.25	17.15	7.9
	45	7.25	14.05	6.8
	60	6.15	8.35	2.2
R3	0	17.05	27.05	10
	15	14.98	23.75	7.97
	30	10.95	17.05	7
	45	7.95	13.95	6
	60	6.25	8.55	2.3
R4	0	16.35	26.45	10.1
	15	13.95	22.15	8.2
	30	11.75	17.95	6.7
	45	7.25	13.95	6.2
	60	6.15	8.45	2.28
R5	0	17.15	27.95	10.8
	15	13.45	22.75	9.3
	30	11	17.15	6.15
	45	7.05	13.25	6
	60	6.05	8.55	2.5

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS A NIVEL
EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA
LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS

TIPO DE PUNTO DE MONITOREO:

04

REPLICAS	Tiempo (min.)	Volumen gastado de EDTA (0.01 N)		
		DCa ²⁺ (ml)	DT(ml)	DMg ²⁺ (ml)
R1	0	20.15	32.45	12.3
	15	12.65	27.15	7.1
	30	14.25	21.15	6.4
	45	10.35	11.15	5.8
	60	8.85	10.15	1.8
R2	0	19.55	31.65	12.1
	15	17.85	27.35	9.5
	30	14.35	21.15	6.8
	45	12.05	14.45	4.4
	60	8.95	10.85	1.9
R3	0	20.25	31.25	10.5
	15	17.05	27.15	10.1
	30	10.65	21.65	11
	45	10.25	16.98	6.73
	60	8.65	10.75	2.1
R4	0	20.0	32.95	12.95
	15	17.97	27.49	9.52
	30	13.25	21.15	7.9
	45	10.45	16.05	5.6
	60	8.74	10.68	1.94
R5	0	20.95	33.05	12.1
	15	15.95	28.15	11.8
	30	10.65	21.95	11.3
	45	9.95	15.65	5.7
	60	8.65	10.75	2.1

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS A NIVEL
EXPERIMENTAL CON EL MÓDULO EXPERIMENTAL PARA
LOS VOLÚMENES CONSUMIDOS

TIPO DE PUNTO DE MONITOREO:

05

REPLICAS	Tiempo (min.)	Volumen gastado de EDTA (0.01 N)		
		DCa ²⁺ (ml)	DT(ml)	DMg ²⁺ (ml)
R1	0	26.75	36.45	9.7
	15	20.95	30.57	9.62
	30	18.95	24.7	5.75
	45	13.75	18.85	5.1
	60	11.75	12.95	1.2
R2	0	26.85	35.15	9.5
	15	22.65	30.95	8.3
	30	19.95	24.15	4.2
	45	14.75	18.35	4.1
	60	11.35	12.9	1.55
R3	0	26.85	36.05	9.2
	15	20.55	30.85	9.0
	30	17.45	24.45	7
	45	14.15	18.75	4.6
	60	11.25	12.85	1.6
R4	0	25.85	35.15	9.3
	15	20.35	30.75	9.8
	30	15.65	24.75	9.1
	45	14.05	18.15	4.1
	60	11.45	12.81	1.36
R5	0	25.05	34.95	9.9
	15	19.58	30.45	9.7
	30	16.78	24.35	7.57
	45	13.95	18.65	4.7
	60	11.25	12.74	1.49

ANEXO 10

MARCO INSTITUCIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Organizaciones Nacionales

Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos en el Perú.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Organismo público ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente, tiene como misión generar y proveer información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático para la sociedad peruana de manera oportuna y confiable, contribuyendo de esta manera a la reducción de los impactos

Instituto del Mar del Perú (IMARPE)

Organismo Técnico Especializado del Ministerio de la Producción, orientado a la investigación científica, así como al estudio y conocimiento del mar peruano y sus recursos [...].

Fondo Nacional del Ambiente - Perú (FONAM)

Institución de derecho privado creado con el objetivo de apoyar el financiamiento de planes, programas, proyectos y actividades orientadas a la protección del ambiente,

Defensoría del Pueblo

Facultada para intervenir en los procesos constitucionales de amparo, hábeas corpus, hábeas data, acción de inconstitucionalidad, acción popular y acción de cumplimiento.

ANEXO 11

MAPA DE UBICACIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO

