



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE
PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO**

Edin Elías Morales Lima

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, septiembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS
TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDIN ELÍAS MORALES LIMA

ASESORADO POR EL ING(A). VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de julio de 2015.

Edin Elías Morales Lima

Guatemala, 8 de febrero de 2017

Ing. Carlos Salvador Wong Daví
Director de Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería USAC
Presente

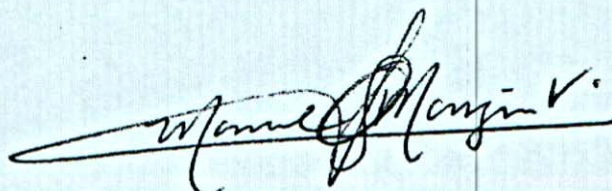
Estimado Ingeniero Wong Daví:

Informo a usted que he revisado el informe Final del Trabajo de Graduación titulado: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO, del estudiante Edin Elías Morales Lima con número de carné: 2010-20735, CUI: 2079 50792 0201, perteneciente a la carrera de Ingeniería Química.

Luego de haber realizado la revisión del Informe Final y haber realizado las correcciones requeridas, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención a la presente, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Asesor
Colegiado No. 656

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656



Guatemala, 29 de marzo de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.011.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **055-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Edin Elías Morales Lima**.
Identificado con número de carné: **2010-20735**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Victor Manuel Monzón Valdez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Certificadora de Acreditación
Programas de Arquitectura e Ingeniería





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.043.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **EDIN ELÍAS MORALES LIMA** titulado: **"ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.401-2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO**, presentado por el estudiante universitario: **Edin Elías Morales Lima**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Angel Roberto Sic García
Decano en Funciones



Guatemala, septiembre de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz que siempre me guió, colocándome siempre en el camino de la responsabilidad y la sabiduría.
- Mis padres** Elías Morales e Isabel Lima de Morales, que me brindaron su apoyo incondicional desde principio a fin, siendo los que siempre me hicieron no perder de vista la meta en el horizonte.
- Mis hermanos** Sindi Morales Lima y Rudy Morales Lima, por su comprensión y respaldo, siendo los amigos ejemplares que tengo como directrices de vida.
- Mis abuelos maternos** Ortencia Pacheco quien es mi claro ejemplo de lucha constante y cariño. Eriberto Lima (q.e.p.d.) a quien no conocí; sin embargo, merece mi admiración por haber sido un hombre honesto y luchador.
- Mis abuelos paternos** Teresa Cardona (q.e.p.d.), quien fue mi maestra de vida y me brindó su ayuda en mis inicios académicos. Candido Morales (q.e.p.d.), quien siempre me instruyó la honestidad, disciplina y trabajo en total armonía.

Mis tíos

Por sus enseñanzas y compartir conmigo grandes consejos de vida, en especial a Elena Morales Cardona quien siempre me respaldó.

Mis primos

Por su ayuda, por compartir mis alegrías y triunfos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios que me permitió culminar esta gran meta.
Facultad de Ingeniería	Por darme el conocimiento científico y mostrar la forma de aplicar dicho conocimiento en actividades que involucran creación de productos.
Mis amigos de la Facultad	Por haber sido esas personas que mediante su compañía y apoyo convirtieron las actividades académicas en momentos valiosos.
Ing. Víctor Monzón	Por su tiempo y conocimiento que promovió el desarrollo de este proyecto de investigación.
Inga. Esther Chávez	Por su tiempo y conocimiento al realizar las debidas correcciones en el desarrollo de este proyecto.
Colegio Enrique Novella Alvarado	Por haber sido la institución que promovió mi introducción a la vida académica científica, brindarme una beca completa de estudio y ser el lugar que me formo como una persona con valores.

Cementos Progreso

Por ser la empresa que me permitió ser acreedor de una beca de estudio, además de permitirme ser parte de la institución que fomenta valores importantes del desarrollo humano.

COMSA

Ser la empresa que me permitió desarrollar la práctica y haber colaborado en el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Incrustación	3
2.2. Cristalización	3
2.3. Sobresaturación	3
2.3.1. Solubilidad	4
2.3.1.1. Solubilidad de equilibrio.....	4
2.3.1.2. Producto de solubilidad	4
2.3.1.3. K_{ps}	4
2.4. Proceso de formación de incrustaciones.....	5
2.4.1. Nucleación.....	5
2.4.2. Crecimiento.....	5
2.5. Compuestos formadores de incrustaciones.....	5
2.6. Análisis e identificación de compuesto incrustantes.....	6
2.6.1. Método de Winkler (titulación ácido/base)	6
2.6.1.1. Reactivos	7

2.6.1.2.	Indicadores.....	7
2.6.1.3.	Reacciones de determinación	8
2.6.2.	Valoración complejométrica	9
2.6.2.1.	Reactivos 10	
2.6.2.2.	Indicadores.....	10
2.6.2.3.	Reacciones de complejamiento	12
2.7.	Factores que influyen en la formación de incrustaciones.....	12
2.8.	Dureza del agua.....	13
2.8.1.	Dureza total.....	13
2.8.2.	Dureza permanente.....	13
2.8.3.	Dureza temporal.....	14
2.9.	Métodos de ablandamiento	14
2.9.1.	Método cal – carbonato.....	14
2.10.	Proceso de producción de hipoclorito de sodio.....	15
2.10.1.	Hidróxido de sodio (NaOH)	15
2.10.2.	Cloro gaseoso (Cl ₂).....	15
2.10.3.	Reacción para obtener hipoclorito de sodio (NaClO).....	15
2.10.4.	Reacciones más comunes de precipitación de compuestos insolubles en el proceso de mezcla previo a inyectar gas cloro (Cl ₂)	17
2.11.	Calcinación de minerales	17
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Variables	19
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	21
	• Área:.....	21
	• Industria:.....	21
	• Proceso:.....	21

	•	Etapa del proceso:.....	21
	•	Ubicación:.....	21
	•	Factores de análisis:.....	21
3.3.		Recursos humanos disponibles.....	21
3.4.		Recursos materiales disponibles.....	22
	3.4.1.	Materia prima.....	22
		3.4.1.1. Determinación de la dureza del agua de producción, % de Ca^{+2} y % de Mg^{+2} en una muestra de incrustación.....	22
		3.4.1.2. Determinación de carbonatos/hidróxidos.....	22
	3.4.2.	Cristalería.....	22
3.5.		Técnica cualitativa-cuantitativa.....	23
3.6.		Recolección y ordenamiento de los datos.....	25
	3.6.1.	Preparación de soluciones a utilizar.....	32
	3.6.2.	Identificación de mezclas hidróxido/carbonatos mediante los volúmenes encontrados.....	32
3.7.		Determinación de las corridas a realizar.....	33
3.8.		Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	33
3.9.		Metodología y cálculos.....	36
	3.9.1.	Determinar la concentración de NaOH y Na_2CO_3 al inicio de la producción.....	36
	3.9.2.	Determinar dureza total.....	37
	3.9.3.	Determinar la dureza total cálcica.....	37
	3.9.4.	Determinar la dureza magnésica.....	38
	3.9.5.	Determinar la solubilidad de la incrustación.....	38
	3.9.6.	Calcular % de CaCO_3 a partir del valor de pérdida por calcinación proporcionado por el	

	análisis de las incrustaciones en el laboratorio	
	LAFIQ.....	38
3.9.7.	Calcular el Kps experimental de CaCO_3	39
3.10.	Análisis estadístico.....	39
3.11.	Plan de análisis de resultados.....	40
3.11.1.	Métodos utilizados según el tipo de variables	40
3.11.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	40
4.	RESULTADOS.....	41
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
	CONCLUSIONES.....	49
	RECOMENDACIONES	51
	BIBLIOGRAFÍA.....	53
	APÉNDICES.....	57
	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Formación de cristales de incrustación	6
2.	Estructura de la fenolftaleína.....	7
3.	Estructura naranja de metilo	8
4.	Estructura del negro de Ericromo T.....	11
5.	Estructura calcón	11
6.	Diagrama de flujo de la planta de producción de hipoclorito de sodio.....	16
7.	Técnica cualitativa-cuantitativa	24
8.	Procedimiento para determinar la dureza total (agua de producción)..	25
9.	Procedimiento para determinar la dureza cálcica (agua de producción)	26
10.	Procedimiento para determinar mezclas hidróxido/carbonato.....	27
11.	Digestión ácida de muestra de incrustación.....	28
12.	Procedimiento para determinar iones calcio en una muestra de incrustación	29
13.	Procedimiento para determinar iones calcio y magnesio en una muestra de incrustación	30
14.	Procedimiento de pérdida por calcinación para determinar la carbonatos	31
15.	Concentraciones de NaOH previo a agregar el gas cloro (Cl ₂)	41
16.	Concentraciones de Na ₂ CO ₃ previo a agregar el gas cloro (Cl ₂)	42
17.	Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de las incrustaciones	44

TABLAS

I.	Análisis de variables (dureza temporal)	19
II.	Análisis de variables (dureza total)	19
III.	Variables dependientes de análisis.....	20
IV.	Variables independientes de análisis.....	20
V.	Variables a medir	20
VI.	Concentraciones promedio de hidróxido/carbonato medidas según registros mensuales previo a agregar gas cloro (Cl ₂)	33
VII.	Volúmenes determinados en la valoración complejométrica del agua de producción	34
VIII.	Volúmenes desplazados en análisis de Winkler	34
IX.	Solubilidad de las incrustaciones a distintas temperatura analizadas...	35
X.	Porcentaje de perdida por calcinación	35
XI.	Porcentajes de iones calcio en las incrustaciones	35
XII.	Porcentajes de iones magnesio en las incrustaciones.....	36
XIII.	Concentraciones promedio de hidróxido/carbonato medidas según registros mensuales previo a agregar gas cloro (Cl ₂)	41
XIV.	Concentraciones de iones metálicos en el agua de producción	42
XV.	Volúmenes analizados método de Winkler	43
XVI.	Concentraciones promedio de hidróxido de sodio y carbonato de sodio en el blanqueador.....	43
XVII.	Porcentajes de óxido de calcio y óxido de magnesio en las incrustaciones.....	43
XVIII.	Porcentajes de pérdida por ignición.....	44
XIX.	Comparación de Kps experimental y teórico del carbonato de calcio, CaCO ₃	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_B	Concentración de hidróxido/carbonato
°C	Grado Celsius
Ca⁺²	Ion calcio
(CO₃)⁻²	Ion carbonato
(HCO₃)⁻	Ion bicarbonato
H⁺	Ion hidrógeno
OH⁻	Ion hidroxilo
Mg⁺²	Ion magnesio
kg	Kilogramo
L	Litro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
ppm	Partes por millón
m/m	Porcentaje masa-masa
K_{ps}	Producto de solubilidad
V_F	Volumen de titulante con indicador fenolftaleína
V_{NM}	Volumen de titulante con indicador naranja de metilo
V_{NET}	Volumen de titulante con indicador NET
V_{ACC}	Volumen de titulante con indicador calcón

GLOSARIO

Ablandamiento	Proceso que elimina los iones metálicos de calcio y magnesio por medio de intercambio iónico con compuestos específicos.
Calcinación	Proceso en el cual se provoca la descomposición térmica de un compuesto, aumentando la temperatura.
Dureza del agua	Concentración de elementos alcalinotérreos en el agua, generalmente expresados en equivalentes mg CaCO ₃ / L.
Indicador	Compuestos químicos generalmente ácidos y bases débiles que puede cambiar su color ante el cambio de concentración de determinado ion.
Incrustación	Aglomeraciones de compuestos orgánicos o inorgánicos que se forman en ciertas superficies.
Ligando	Molécula o ion con por lo menos un par de electrones compartidos disponibles para formar enlaces covalentes coordinados con cationes.
Ligando quelante	Ligando que puede unirse a un ion metálico mediante más de un átomo.

Neutralización	Reacción química que ocurre entre un ácido y una base produciéndose una sal y agua.
Quelato	Compuesto químico que forma complejos con iones metálicos.
Valoración	Procedimiento mediante el cual una disolución estándar reacciona con un analito de estequiometría conocida hasta el punto de equivalencia en el punto final.

RESUMEN

El presente diseño de investigación muestra la metodología para analizar la formación de incrustaciones en las tuberías que se encuentran en una línea de producción de hipoclorito de sodio; teniendo en cuenta que los reactivos activos utilizados en la producción de blanqueador son el hidróxido de sodio (NaOH) y cloro gaseoso (Cl₂). El análisis de incrustaciones en tuberías de producción de hipoclorito de sodio requiere de la utilización de métodos cuantitativos específicamente, titulaciones ácido-base y complejométricas.

El proyecto incluye el planteamiento de las hipótesis que fundamentan el fenómeno de las incrustaciones. La formación de las incrustaciones inicia debido a la precipitación de iones debido a la sobresaturación, variaciones en la alcalinidad de la solución de hipoclorito y la dureza del agua que se suministra a la planta donde se fabrica hipoclorito de sodio (NaClO); además, de la probable sobresaturación de hidróxido de sodio (NaOH) en la elaboración del hipoclorito. La caracterización tanto de compuestos hidróxido/carbonato como de iones Ca⁺² y Mg⁺² existentes en la muestra de material incrustado se realizó mediante la identificación por medio de titulaciones complejométricas.

El análisis de los compuestos se realizó por medio del método de Winkler: se tituló la mezcla carbonato/hidróxido con un ácido estándar y se verificó el viraje en el punto final por medio de dos indicadores: la fenolftaleína y el naranja de metilo.

Mediante el procedimiento de pérdida por calcinación, se cuantificó la cantidad de carbonato de calcio en las incrustaciones a partir de la diferencia de peso de dióxido de carbono producida.

La forma de manejar los datos fue por medio de la tabulación para realizar comparaciones entre los volúmenes de ácido o EDTA desplazados en las titulaciones de la muestra de incrustación disuelta.

Luego de determinar el compuesto, se realizaron pruebas de solubilidad; con el uso de la estadística descriptiva y el muestreo aleatorio se graficaron los resultados de las pruebas de solubilidad en un rango de temperaturas.

OBJETIVOS

General

Analizar y caracterizar las incrustaciones en las tuberías de producción de hipoclorito de sodio.

Específicos

1. Determinar el origen de las incrustaciones en las tuberías de producción de hipoclorito de sodio (NaClO).
2. Determinar la composición de las incrustaciones por medio de valoraciones de neutralización.
3. Analizar los Kps de los compuestos para determinar si existe precipitación.
4. Caracterizar los compuestos presentes en las incrustaciones por medio de una curva de solubilidad.
5. Determinar la dureza total del agua mediante la titulación complejométrica.

Hipótesis

La presencia de hidróxido de sodio en el agua puede provocar incrustaciones en las tuberías debido a una sobresaturación con hidróxido de sodio que es parte de la composición del blanqueador a base de hipoclorito de sodio o bien provocar la precipitación de compuestos de Ca y Mg debido a un aumento de alcalinidad. El hidróxido de sodio y los carbonatos en exceso forman una solución sobresaturada en las tuberías que gradualmente se cristaliza (precipitado) y forma aglomeraciones que se endurecen y crean las incrustaciones.

Hipótesis nula

El hidróxido de sodio se encuentra en una concentración en equilibrio en solución acuosa, por lo tanto, no presenta sobresaturación debido a su dilución total; además, la alcalinidad alta de la solución de hipoclorito de sodio no precipita la dureza temporal o total.

INTRODUCCIÓN

La formación de incrustaciones se debe a la presencia de cationes (dureza total) con cargas múltiples y pueden formar compuestos comúnmente conocidos como sarro que obstruyen las paredes internas de las tuberías, puede existir también la presencia de hidróxidos y carbonatos que debido a una sobresaturación de estos, se cristalizan en las paredes de las tuberías bloqueando el flujo del fluido transportado, por lo tanto, generan pérdidas económicas.

En la fabricación de blanqueador se da el exceso de acumulación de sales en los contenedores o tuberías debido a la sobresaturación del hidróxido de sodio necesario en la producción de blanqueador a base de hipoclorito de sodio o debido a la precipitación de otros metales debido a la alta concentración de carbonatos o soda cáustica; provoca aglomeraciones que por medio de intercambio iónico forman incrustaciones; las incrustaciones obstruyen las tuberías, además, afectan a todos los accesorios en los cuales fluye el hipoclorito de sodio (blanqueador). No todos los minerales o compuestos poseen una misma tendencia de solubilidad con la temperatura, tal es el caso de algunos carbonatos que son más solubles al disminuir la temperatura.

La saturación del hidróxido de sodio (sólo puede encontrarse en un 50 % p/v en la solución) crea grupos de átomos en desequilibrio que forman pequeños cristales; cada átomo representa una semilla que propicia la cristalización, el crecimiento de los cristales se da por el proceso de adsorción hasta formar una incrustación mayor; el tratamiento de estas incrustaciones suele realizarse con agentes secuestrantes.

El K_{ps} permite determinar si un compuesto analizado precipitará, mediante la comparación con el Q_{ps} (producto de las concentraciones molares), dicho producto es considerado un K_{ps} experimental; si Q_{ps} es mayor a K_{ps} , el compuesto analizado precipita.

1. ANTECEDENTES

Se enumeran los estudios de investigación relacionados al análisis de incrustaciones en diversos equipos industriales y métodos de ablandamiento para eliminar las incrustaciones.

En 2014, Mario José Linares Morales, realizó la presentación de los resultados de la investigación de tesis titulada *Evaluación comparativa técnica y económica de los métodos de limpieza hidrocínética y limpieza química para evaporadores tipo Roberts en ingenios azucareros*, en la Universidad de San Carlos de Guatemala; en dicho trabajo de investigación se mencionan los problemas de incrustaciones presentes en las tuberías y otras partes no lisas de los evaporadores, para eliminar las incrustaciones se utilizan dos métodos: uno que implica una limpieza química con hidróxido de sodio y ácido sulfámico; mientras el otro método requiere de una limpieza hidrocínética que requiere de agua a alta presión y soda cáustica.

En 1999, Ivonne Susseth Godínez Miranda, realizó la presentación de los resultados de la investigación de tesis titulada *Automatización de la alimentación y purga de un ablandador del tipo cal-intercambio iónico a elevadas temperaturas*, en la Universidad de San Carlos de Guatemala; dicho trabajo de graduación menciona los procesos de precipitación que ocurren al realizar un procedimiento de ablandamiento mediante cal – carbonato, que explica que para dicho proceso pueden utilizarse otros compuestos hidróxidos distintos al hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para provocar la precipitación de la dureza de calcio y magnesio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Incrustación

Proceso en el cual el material no deseado se deposita en una superficie, dicho proceso puede ocurrir o no ante cambios de temperatura; los productos de la incrustación son un recubrimiento denso de precipitados regularmente de origen inorgánico formados por la precipitación química de estos componentes solubles en agua que se vuelven insolubles por cambios físico-químicos; dichos precipitados al conglomerarse en la superficie constituyen las incrustaciones.

2.2. Cristalización

Es la aglomeración de partículas sólidas cristalinas en el seno de una fase homogénea. La cristalización se desarrolla en dos etapas: la nucleación y el crecimiento.

Los mecanismos que permiten la cristalización son la sobresaturación y la diferencia de temperatura entre cristal y líquido.

2.3. Sobresaturación

Es la diferencia entre la concentración de un soluto en una disolución y la concentración que tendría dicho soluto en una disolución saturada en equilibrio. En dicha condición de sobresaturación la solución contiene cierta cantidad de un soluto que excede la solubilidad de equilibrio; el exceso de soluto aparece regularmente como precipitado.

2.3.1. Solubilidad

Es la medida de la cantidad de cierto soluto que puede disolverse en determinado disolvente a ciertas condiciones para formar una solución saturada.

2.3.1.1. Solubilidad de equilibrio

Es el equilibrio que se da entre un compuesto iónico y sus iones en una disolución; cualquier cantidad adicional del compuesto provoca la sobresaturación de este, dicho equilibrio de solubilidad se expresa mediante la constante de equilibrio de solubilidad. Una solución se encuentra saturada cuando el soluto disuelto y el no disuelto están en equilibrio dinámico entre sí.

2.3.1.2. Producto de solubilidad

Este producto determina la saturación de la solución, se representa con K_{ps} ; representa el equilibrio estando en función de la presión, la actividad iónica y temperatura.

2.3.1.3. K_{ps}

Es la representación matemática de una reacción química en la que se presenta al sólido iónico como reactivo y los iones disueltos del sólido en agua como productos.

2.4. Proceso de formación de incrustaciones

2.4.1. Nucleación

Las incrustaciones se forman debido a un proceso conocido como nucleación mediante el cual se crea una nueva fase estable, creando una superficie de contacto sólido-líquido, seguido del crecimiento del cristal hasta formar una incrustación. La nucleación existe en dos formas:

- Nucleación homogénea: se crea cuando se unen varios átomos y forman un núcleo o semilla rodeado totalmente de líquido.
- Nucleación heterogénea: en este caso el núcleo se forma en materiales considerados impurezas o en las paredes del contenedor del líquido, son el tipo de nucleación más común debido a iones característicos de la dureza del agua.

2.4.2. Crecimiento

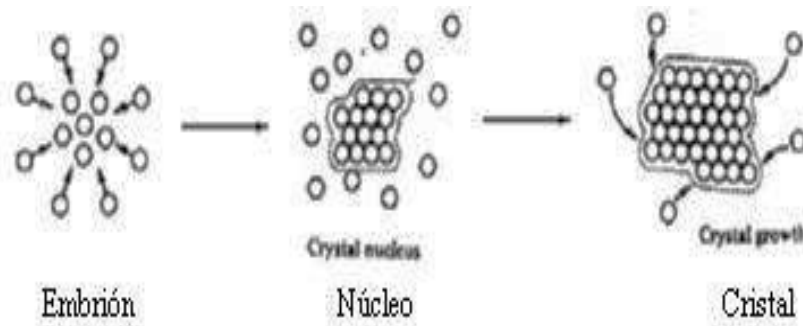
Es el proceso que se desarrolla luego de la nucleación y en el cual el núcleo cristalino aumenta de tamaño debido a la adición de nuevos iones o partículas.

2.5. Compuestos formadores de incrustaciones

La determinación de las incrustaciones en tuberías generalmente conocidas como sarro, permiten verificar la dureza del agua o sobresaturación de un soluto, identificando regularmente tres principales compuestos: el

carbonato de sodio, bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio; aunque suelen encontrarse compuestos similares de calcio y magnesio.

Figura 1. **Formación de cristales de incrustación**



Fuente: *Nucleación*. <http://cienciamaterials.wikifoundry.com/page/Reports+G12>. Consulta: 13 de enero de 2016.

2.6. Análisis e identificación de compuesto incrustantes

2.6.1. Método de Winkler (titulación ácido/base)

Es un método de análisis cuantitativo para carbonatos/hidróxidos, en donde se titulan ambos componentes en una muestra, con un ácido estandarizado como el ácido clorhídrico hasta el punto final con un indicador de intervalo ácido en la primera alícuota. Una cantidad de cloruro de bario no medida se agrega a una segunda alícuota para precipitar el ion carbonato, después el ion hidróxido es titulado hasta el punto final de la fenolftaleína; básicamente el cloruro de bario (BaCl_2), hace precipitar los iones carbonato como carbonato de bario (BaCO_3) para así titular el hidróxido de sodio (NaOH) remanente con ácido clorhídrico (HCl), la titulación con la fenolftaleína como

indicador representa la alcalinidad parcial (alcalinidad P) y la titulación con naranja de metilo representa la alcalinidad total (alcalinidad M)

2.6.1.1. Reactivos

- Ácido clorhídrico (HCl)

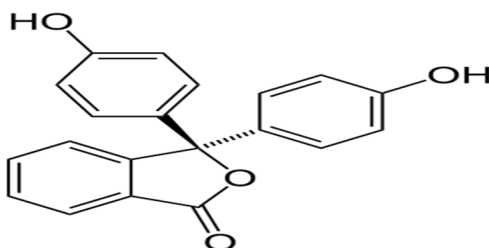
Es un líquido incoloro humeante, posee un tono amarillento. Es un ácido fuerte de alta estabilidad térmica, es obtenido mediante la reacción de cloro e hidrógeno gaseosos en agua.

2.6.1.2. Indicadores

- Indicador fenolftaleína

Es un indicador de pH que en soluciones ácidas es incoloro, pero en presencia de bases se torna rosa o violeta, su rango de viraje es entre un pH = 8.2 (incoloro) y pH = 10 (rosado).

Figura 2. Estructura de la fenolftaleína



Fuente: *Los colores y la química de los indicadores de pH.*

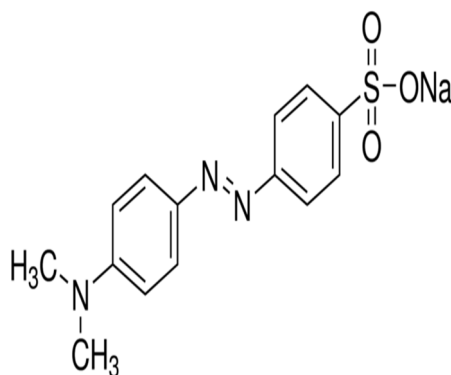
<http://www.compoundchem.com/2014/04/04/the-colours-chemistry-of-ph-indicators/>.

Consulta: 13 de febrero de 2016.

- Indicador naranja de metilo

Es un compuesto colorante indicador azoderivado con viraje de rojo a naranja-amarillento desde un pH = 3,1 hasta un pH = 4,4.

Figura 3. **Estructura naranja de metilo**

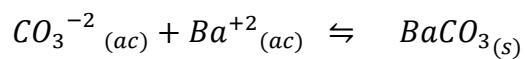


Fuente: *Naranja de metilo*.

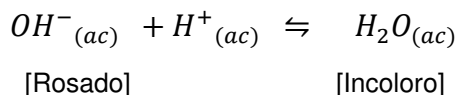
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/114510?lang=en®ion=GT>. Consulta: 13 de febrero de 2016.

2.6.1.3. Reacciones de determinación

- A continuación, para determinar el hidróxido de sodio (NaOH):
 - Precipitar el carbonato



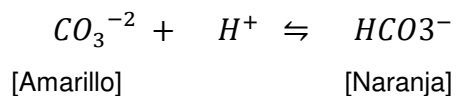
- Para titular el hidróxido



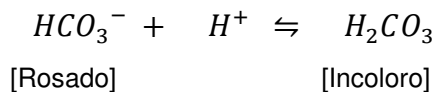
- A continuación, para determinar el carbonato de sodio (Na₂CO₃):

- Titulación del carbonato

- Primera etapa



- Segunda etapa



2.6.2. Valoración complejométrica

Son las titulaciones en las cuales los iones metálicos reaccionan con un ligando apropiado para formar un complejo; identificando el punto de equivalencia mediante el uso de un indicador de iones metálicos al aplicar un método analítico de titulación volumétrica con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).

2.6.2.1. Reactivos

- EDTA

El ácido etilendiaminotetraacético es el titulante complejométrico más utilizado. Para preparar soluciones de EDTA estándar se utiliza el etilendiaminotetraacético disódico dihidrato ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

- Cloruro de amonio (NH_4Cl)

Es un compuesto químico que se encuentra comercialmente como un polvo blanco o incoloro, es inodoro e higroscópico; además, reacciona violentamente con nitrato de amonio y clorato de potasio.

- Hidróxido de amonio (NH_4OH)

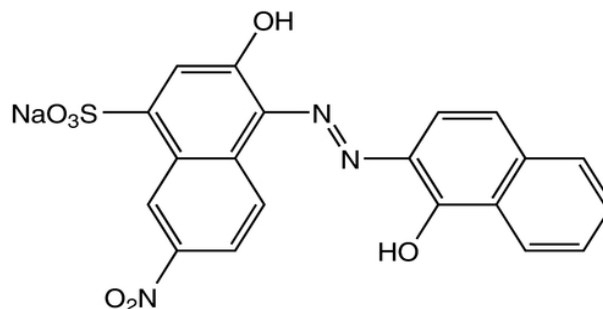
Es una solución incolora de amoníaco en agua con un olor acre. Generalmente se encuentra en concentraciones del 30 % y se utiliza en productos de limpieza y en fertilizantes.

2.6.2.2. Indicadores

- Indicador negro de eriocromo T

El negro de eriocromo T se comporta tanto como indicador ácido/base y como indicador de iones metálicos; dicho compuesto tiene un ácido sulfónico que se disocia por completo en agua y dos grupos fenólicos que se disocian parcialmente.

Figura 4. **Estructura del negro de eriocromo T**



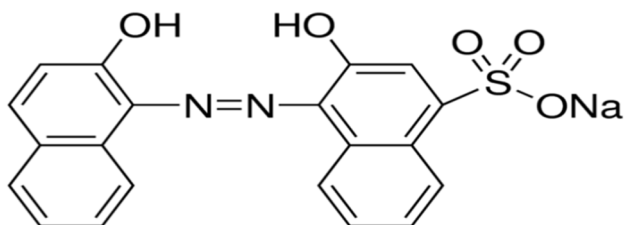
Fuente: *Determinación complejométrica.*

<http://www.escritoscientificos.es/trab21a40/durezagua/pagina09.htm>. Consulta: 13 de febrero de 2016.

- Indicador de calcón

Es un compuesto conocido como eriocromo azul y su nombre IUPAC es ácido 2-hidroxi-1-(2-hidroxinaftil-1-azo) naftaleno-4-sulfónico, sal sódica, se utiliza como indicador complejométrico para análisis de iones metálicos de Al, Ca o Zr.

Figura 5. **Estructura calcón**



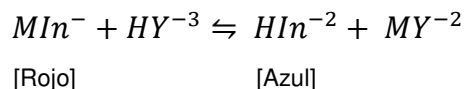
Fuente: *Indicador para complejometría.*

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/fluka/45550?lang=en®ion=GT>. Consulta: 13 de febrero de 2016.

2.6.2.3. Reacciones de complejamiento

- Con NET

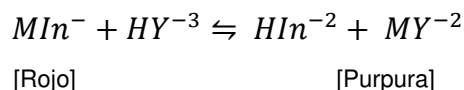
La siguiente reacción muestra el complejo formado del metal con el indicador (MIn) disolución roja, luego con el primer exceso de EDTA la disolución se vuelve azul y se forma un complejo metálico con el EDTA MY^{-2} .



En esta reacción de complejamiento se determina la concentración de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , como un equivalente de carbonato de calcio ($CaCO_3$).

- Con calcón (ACC)

La siguiente reacción muestra el complejo formado del metal con el indicador (MIn) disolución roja, luego con el primer exceso de EDTA la disolución se vuelve púrpura y se forma un complejo metálico con el EDTA (MY^{-2}).



En esta reacción de complejamiento se determina la concentración de iones Ca^{+2} .

2.7. Factores que influyen en la formación de incrustaciones

Los factores principales que determinan la formación de incrustaciones son:

- Temperatura
- Dureza del agua en el sistema de producción
- Nivel de alcalinidad o acidez
- Niveles de iones formadores de incrustaciones

2.8. Dureza del agua

Propiedad del agua que permite medir la capacidad de formar incrustaciones si existen cantidades disueltas de sales de magnesio y calcio.

Los tipos de dureza de agua según los compuestos presentes son los siguientes:

2.8.1. Dureza total

Denominada también título hidrotimétrico (TH). Mide el contenido total de iones Ca^{++} y Mg^{++} . Se puede analizar mediante la dureza del calcio, THCa , y la dureza de magnesio, THMg .

2.8.2. Dureza permanente

Este tipo de dureza existe mientras el agua no contenga carbonatos. Mide el contenido de Ca^{++} y Mg^{++} después de someter el agua a ebullición durante media hora, filtración y recuperación del volumen inicial con agua destilada. El método es de poca exactitud y depende de las condiciones de ebullición.

2.8.3. Dureza temporal

Es la dureza que se determina a partir de la presencia en el agua de los iones HCO_3^{2+} , se elimina por ebullición. Es la diferencia entre la dureza total y la permanente.

2.9. Métodos de ablandamiento

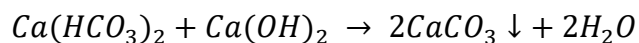
Ablandar el agua de producción permite eliminar los minerales que le dan sus características al agua dura; las reacciones químicas para ablandar el agua, eliminan los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , conocidos como minerales duros.

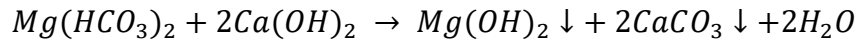
2.9.1. Método cal – carbonato

Mediante este proceso compuestos totalmente solubles se transforman en compuesto insolubles que se precipitan eliminando los metales Ca^{+2} y Mg^{+2} una vez formados sus compuestos inorgánicos.

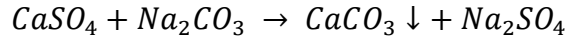
El método cal – carbonato requiere la utilización de dos compuestos para ablandar el agua: hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que elimina la dureza temporal provocada por carbonatos/bicarbonatos y el carbonato de sodio, Na_2CO_3 , que se utiliza para eliminar la dureza permanente que representa los compuestos que no son carbonatos. Las reacciones son las siguientes:

- Eliminar dureza temporal





- Eliminar dureza permanente



2.10. Proceso de producción de hipoclorito de sodio

El proceso de producción de hipoclorito de sodio (NaClO) requiere de los reactivos: hidróxido de sodio (NaOH) y cloro gaseoso (Cl₂).

2.10.1. Hidróxido de sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como disolución al 50% p/v o como escamas sólidas. Es soluble en agua, mientras se diluye en agua se crea una reacción exotérmica (libera calor), absorbe humedad y es corrosivo en metales y tejidos.

2.10.2. Cloro gaseoso (Cl₂)

Es un compuesto químico que se utiliza ampliamente en la industria como blanqueador y para purificar agua, en condiciones normales de presión y temperatura es un gas amarillento.

2.10.3. Reacción para obtener hipoclorito de sodio (NaClO)

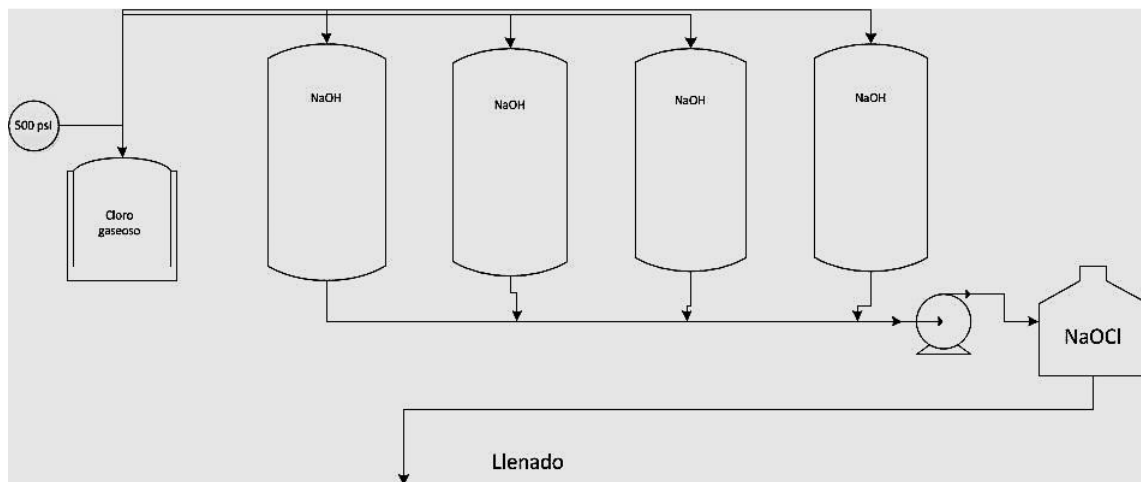
El blanqueador más común que se utiliza en las actividades cotidianas es la que contiene como ingrediente activo al hipoclorito de sodio que comercialmente se encuentra en proporciones de entre 3 % y 6 % en masa,

preparándose por medio de la reacción de cloro gaseoso (Cl_2) y una solución fría de hidróxido de sodio (NaOH).



El hidróxido de sodio se disuelve en agua en grandes contenedores que realizan producción por lotes; luego, de disolver el NaOH se inyecta el gas cloro (Cl_2) continuando la mezcla en un período de tiempo hasta obtener un compuesto amarillento que tiene el olor característico del hipoclorito de sodio, NaClO .

Figura 6. **Diagrama de flujo de la planta de producción de hipoclorito de sodio**

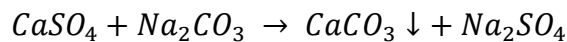


Fuente: elaboración propia.

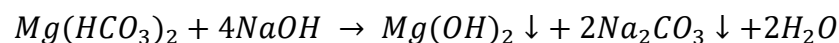
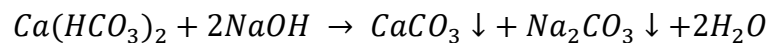
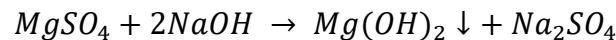
2.10.4. Reacciones más comunes de precipitación de compuestos insolubles en el proceso de mezcla previo a inyectar gas cloro (Cl₂)

Estas reacciones ocurren básicamente debido a un proceso similar al ablandamiento mediante cal-carbonato, con la diferencia de utilizar hidróxido de sodio (NaOH) en vez de hidróxido de calcio (Ca (OH)₂).

- Reacciones de precipitación al agregar el carbonato de sodio, Na₂CO₃



- Reacciones de precipitación al agregar el hidróxido de sodio, NaOH



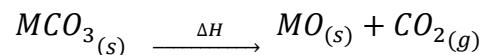
2.11. Calcinación de minerales

La calcinación es la descomposición térmica y química de un compuesto por efecto de la energía calorífica, generalmente al realizar cualquier procedimiento de calcinación se obtendrá un óxido y un gas.

La temperatura permite realizar la descomposición del carbonato de calcio selectivamente mediante la elevación de temperatura hasta aproximadamente

850 °C se da la descomposición total del carbonato de calcio (CaCO₃), en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO₂), cuya reacción inicia desde una temperatura de 700 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 900 °C ya no se produce más CO₂ a partir del carbonato de calcio, aunque si de otros compuestos.

La reacción general para la calcinación de un carbonato es la siguiente:



Donde:

- M, representa al metal (Ca, Mg, Fe, etc.)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla I. **Análisis de variables (dureza temporal)**

No.	Variable	Fórmula química	Factor de análisis		Factor de control	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Determinación de iones hidróxido, carbonato o bicarbonatos						
1	Hidróxido de sodio	[NaOH]		X	X	
2	Carbonato de sodio	[Na ₂ CO ₃]		X	X	
3	Bicarbonato de sodio	[NaHCO ₃]		X		X
4	Hidróxido de sodio / Carbonato de sodio	[NaOH] / [Na ₂ CO ₃]		X		X
5	Carbonato de sodio / Bicarbonato de sodio	[Na ₂ CO ₃] / [NaHCO ₃]		X		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Análisis de variables (dureza total)**

No.	Variable	Fórmula química	Factor de análisis		Factor de control	
			Constante	Variable	Controlable	No Controlable
Determinación de concentración de iones Ca ⁺² y Mg ⁺²						
1	ppm Ca ⁺²	Ca ⁺²		X		X
2	ppm Mg ⁺²	Mg ⁺²		X		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables dependientes de análisis**

Variable	Unidad		Factor de análisis		Factor de control	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Concentración iones	Partes por millón	mg/L		X		X
Solubilidad	Gramos /100 mililitros	g/100mL		X	X	
Volumen de valoración	Mililitro	mL		X		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Variables independientes de análisis**

Variable	Unidad		Factor de análisis		Factor de control	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Temperatura	Grados Celsius	°C		X		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables a medir**

Variable	Unidad		Dispositivo
Temperatura	°C	Grado Celsius	Termómetro
Volumen	mL	Mililitro	Probeta/pipeta/bureta
Masa	G	Gramos	Balanza analítica

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: desinfección y limpieza.
- Industria: detergentes y desinfectantes.
- Proceso: realizar un análisis de los depósitos de incrustaciones en las tuberías que transportan blanqueador para proponer un sistema o medio de limpieza.
- Etapa del proceso: evaluación de los métodos mecánicos y químicos de remoción de incrustaciones, tratar la dureza o evitar la sobresaturación.
- Ubicación: la verificación del problema se desarrollará en una planta de producción de blanqueador en la ciudad capital de Guatemala. En tanto que el análisis de las muestras se realizará en el laboratorio de la fábrica y algunas muestras en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería.
- Factores de análisis: la temperatura contribuye a que los procesos de sobresaturación se desarrollen además de las reacciones de precipitación.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Edin Elías Morales Lima
- Asesor: Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

- Profesional responsable de la planta: Ing. Sergio Echigoyen

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Materia prima

3.4.1.1. Determinación de la dureza del agua de producción, % de Ca^{+2} y % de Mg^{+2} en una muestra de incrustación

- Indicador negro de eriocromo T
- Indicador de calcón
- Solución estándar de EDTA 0,01M
- Solución de NaOH 1 M
- Buffer amoniacal de pH= 10
- Trietanolamina

3.4.1.2. Determinación de carbonatos/hidróxidos

- Indicador fenolftaleína
- Indicador naranja de metilo
- Agua destilada
- Cloruro de bario (BaCl_2)
- Solución de HCl de 0.1M

3.4.2. Cristalería

- 2 matraces volumétricos 500 mL
- 4 matraces Erlenmeyer 250 mL

- Soportes con pinzas para bureta
- 2 buretas 25 mL
- 2 pipetas 10 mL
- 1 desecadora
- 5 beacker 100 mL
- 4 matraces Erlenmeyer 125 mL
- 7 tubos de ensayo
- 1 probeta de 250 mL
- 1 probeta de 10 mL
- 3 crisoles

3.5. Técnica cualitativa-cuantitativa

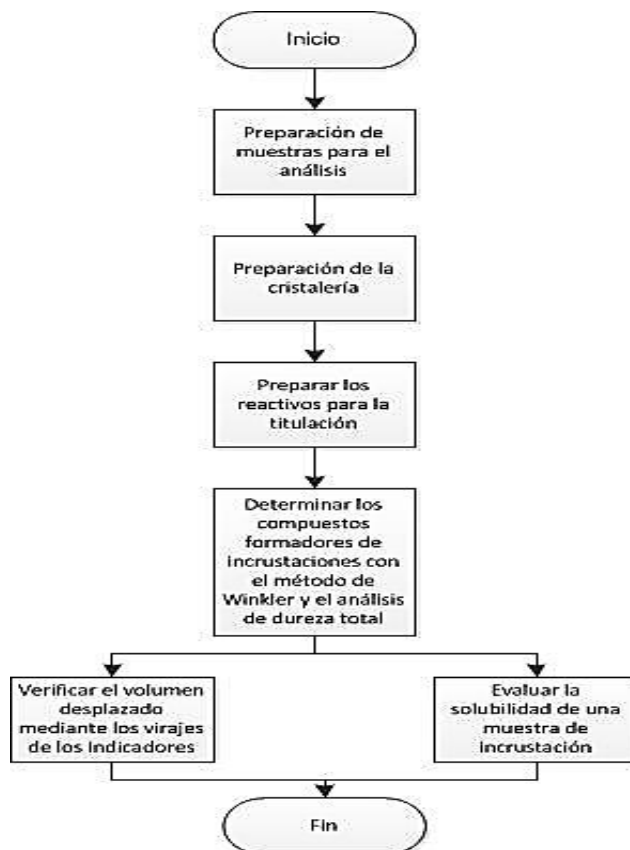
Para analizar la formación de las incrustaciones se utilizan los métodos analíticos de dureza temporal y dureza total, además, de pérdidas por calcinación; se cuantifican de esta manera los iones presentes en el fluido que circula por tuberías, bombas y otros dispositivos; se verifican, además, las reacciones que dan productos insolubles en agua o hipoclorito que provocan una precipitación súbita.

Mediante valores de concentración de iones Ca^{+2} , Mg^{+2} y mezclas hidróxido/carbonatos.

- Método de Winkler: consiste básicamente en dos valoraciones ácido-base que mediante los cambios de color del indicador utilizado en cada alícuota proporciona los volúmenes desplazados por titulación para una comparación de estos y así determinar la mezcla hidróxido/carbonato existente.

- Análisis de dureza total: se determina mediante una titulación complejométrica con la cuantificación de los volúmenes desplazados en la formación de los complejos de EDTA con los iones metálicos, mediante el viraje de los respectivos indicadores.
- Pérdida por calcinación: por medio de una extracción de humedad y un proceso de calcinación se determina el dióxido de carbono (CO₂) eliminado de la muestra que mediante la estequiometría permite determinar la cantidad de carbonato disponible.

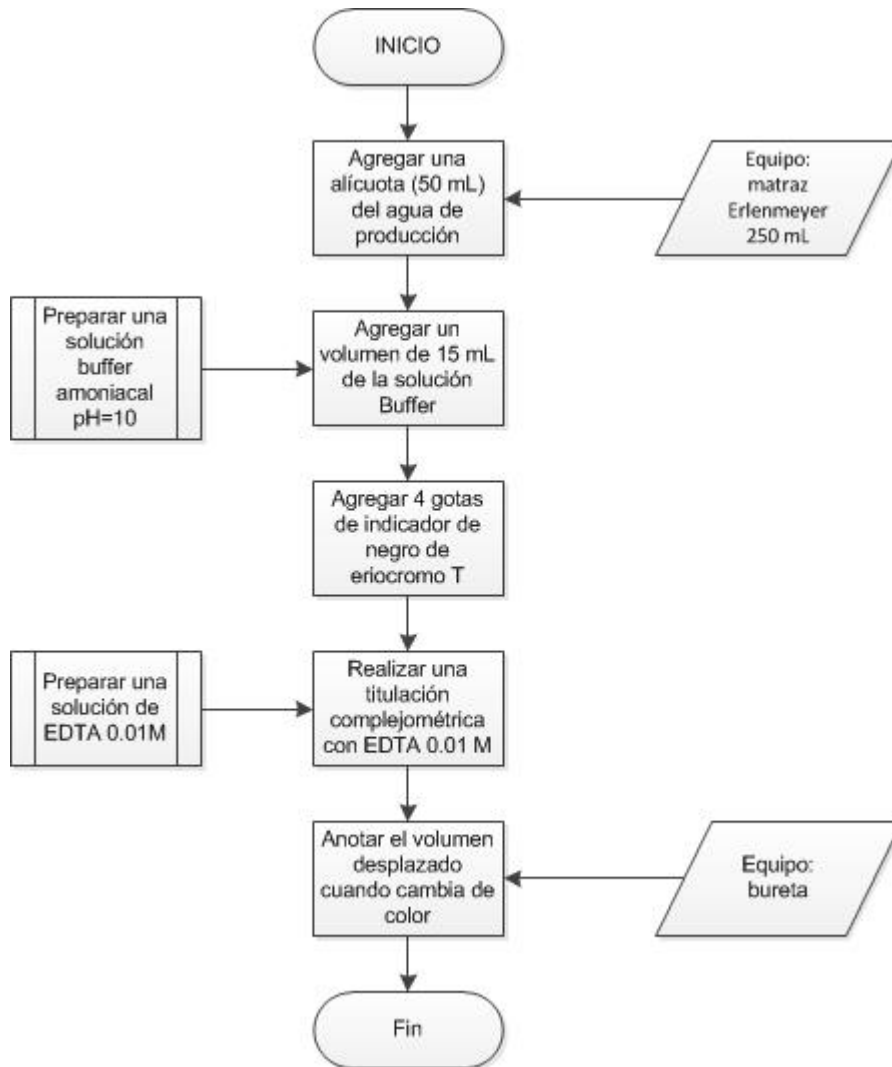
Figura 7. **Técnica cualitativa-cuantitativa**



Fuente: elaboración propia.

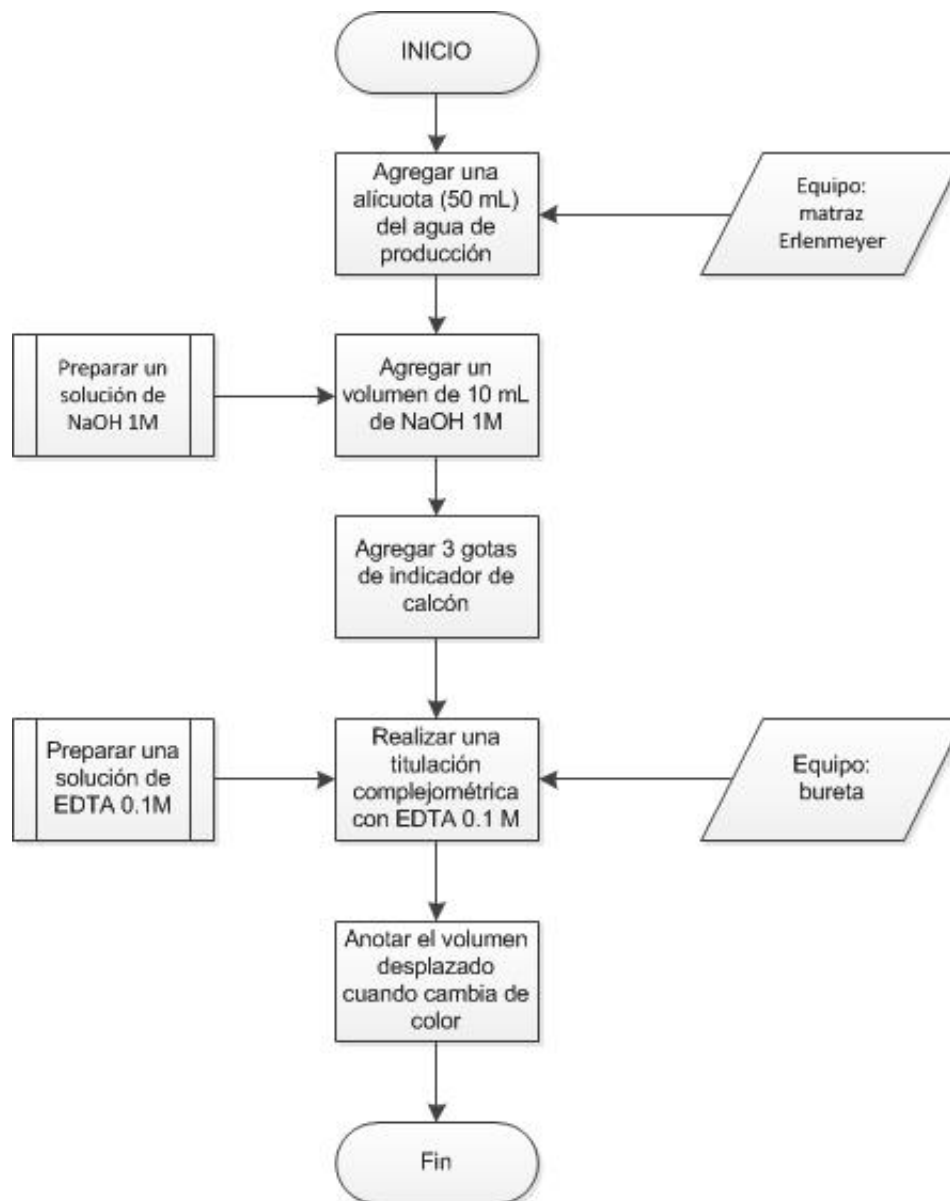
3.6. Recolección y ordenamiento de los datos

Figura 8. Procedimiento para determinar la dureza total (agua de producción)



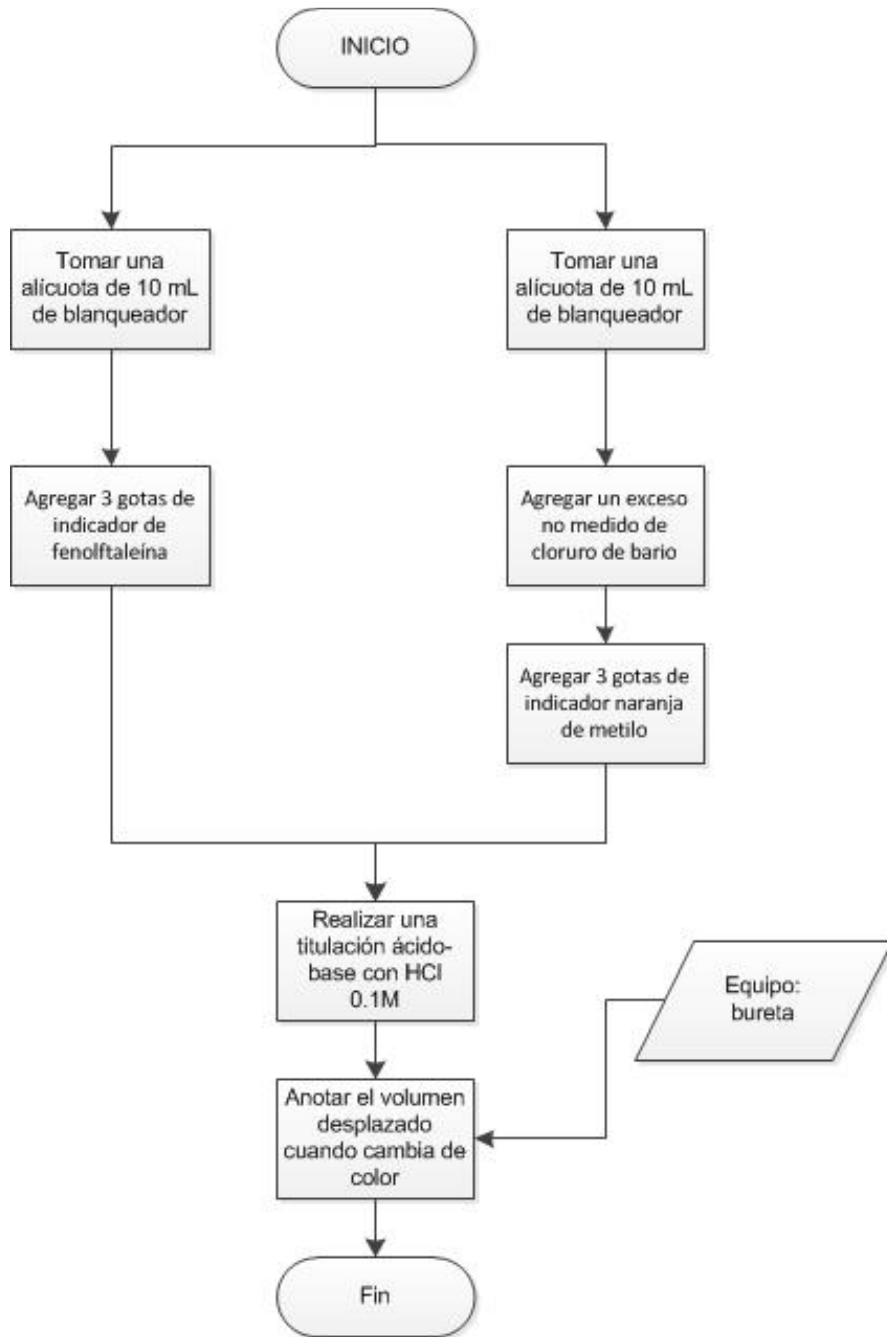
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Procedimiento para determinar la dureza cálcica (agua de producción)**



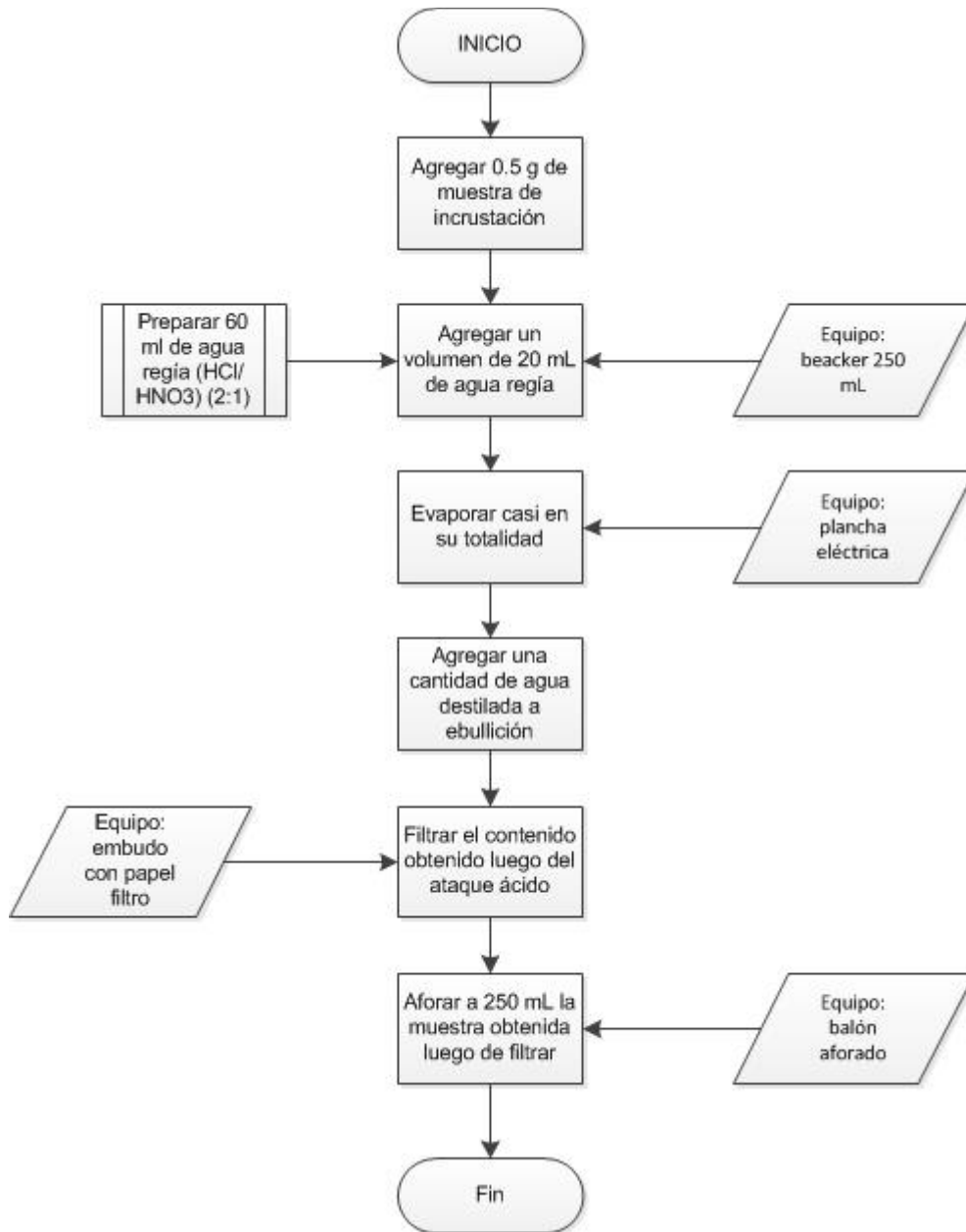
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Procedimiento para determinar mezclas hidróxido/carbonato



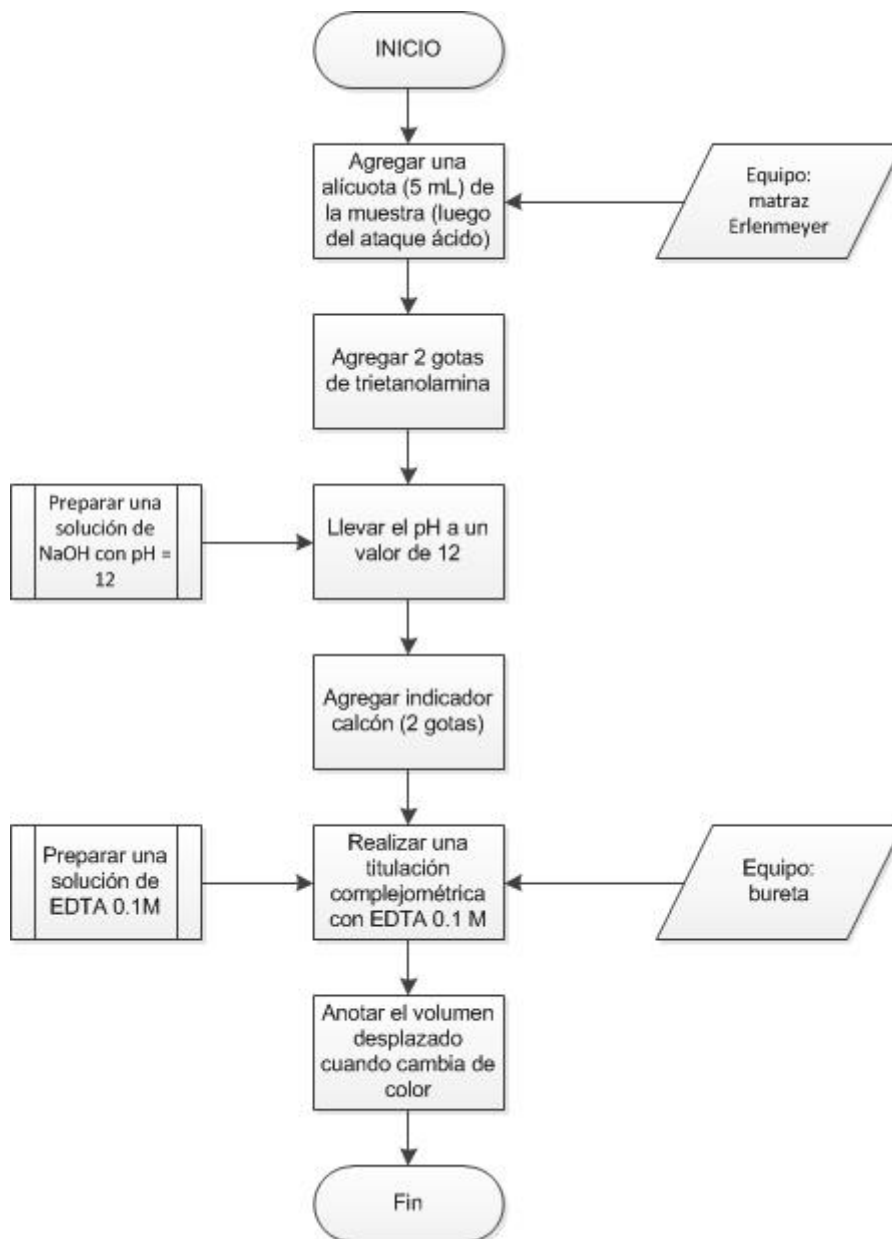
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Digestión ácida de muestra de incrustación



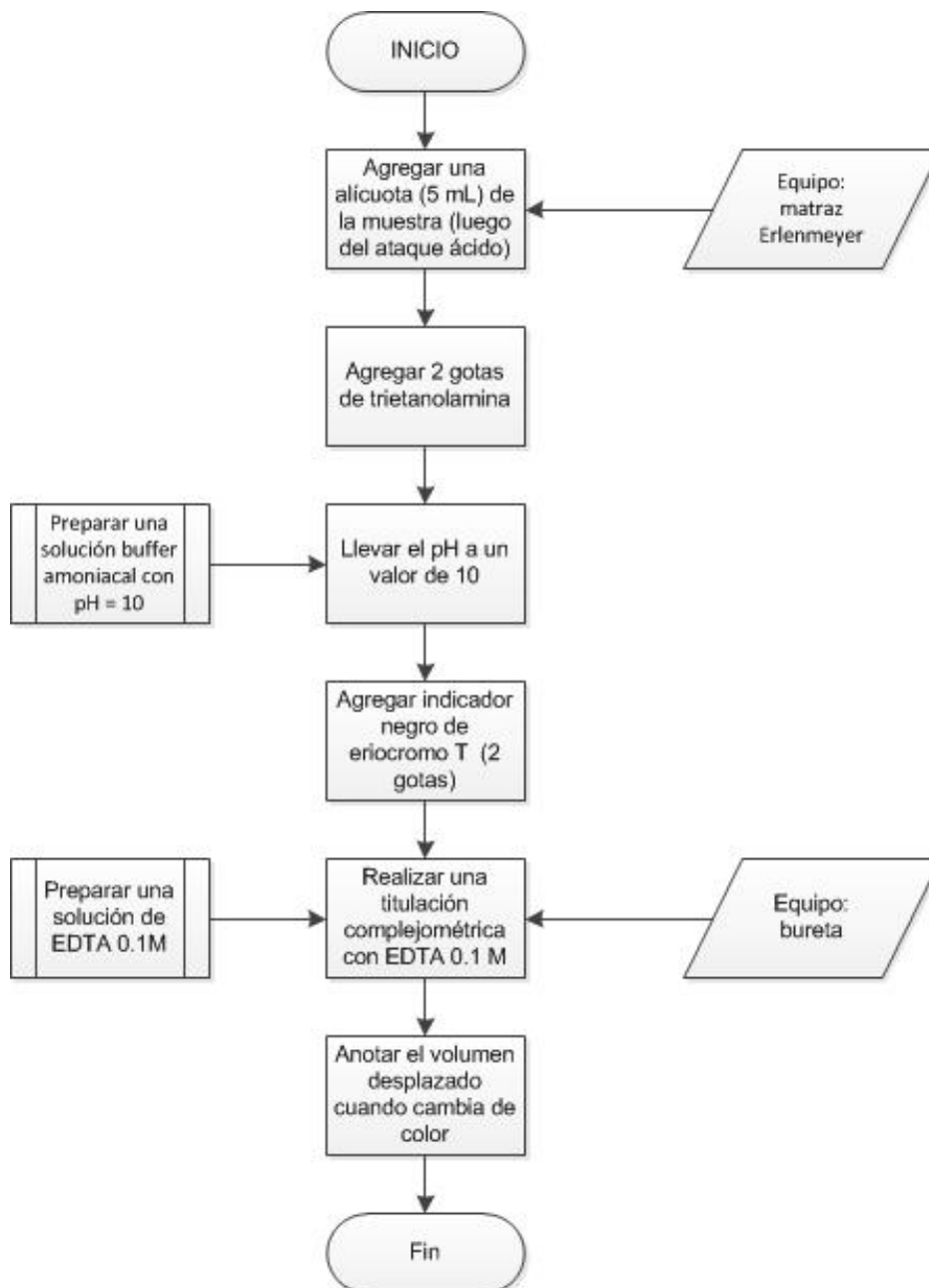
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Procedimiento para determinar iones calcio en una muestra de incrustación**



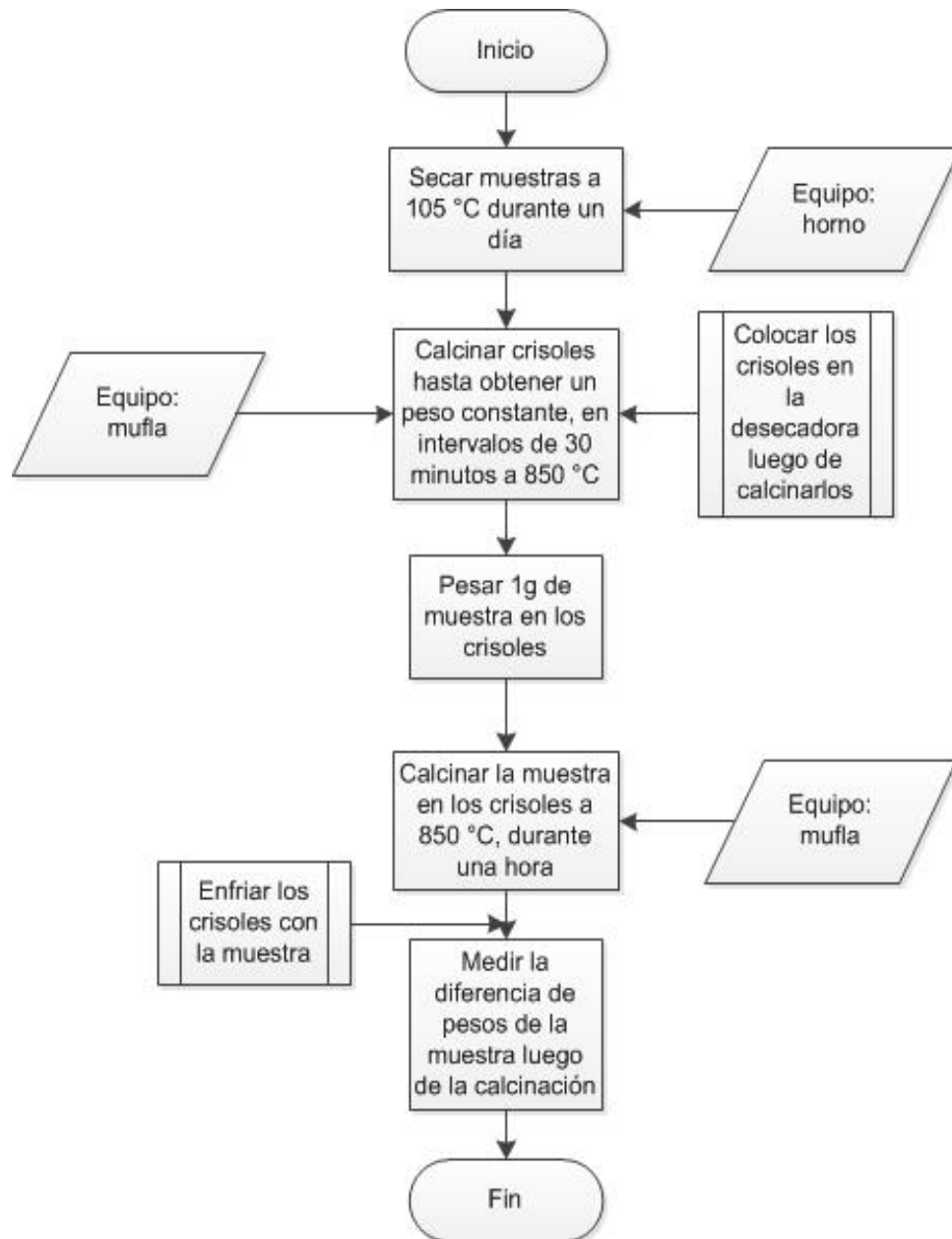
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Procedimiento para determinar iones calcio y magnesio en una muestra de incrustación**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Procedimiento de pérdida por calcinación para determinar los carbonatos**



Fuente: elaboración propia.

3.6.1. Preparación de soluciones a utilizar

- Solución de ácido clorhídrico (HCl) 0,1M (200 mL): se agregan 1,65 mL de HCl a un matraz de 200 mL hasta aforar.
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M (200 mL): se disuelven 8 gramos de NaOH en un beacker y posteriormente se agrega dicha solución a un matraz de 200 mL hasta aforar.
- Solución de EDTA 0,01 M (1 000 mL): pesar y agregar 3,8 g de $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en un matraz de un litro, luego agregar entre 600 y 800 mL de agua destilada, mezclar por 15 minutos, después de disolver todo aforar hasta 1 000 mL.
- Solución buffer amoniacal, pH = 10 (100 mL): diluir 57 mL de NH_3 concentrado y 7 g de NH_4Cl en agua destilada, aforando hasta 100 mL.

3.6.2. Identificación de mezclas hidróxido/carbonatos mediante los volúmenes encontrados

Componentes en la muestra	Relaciones entre V_f y V_{vbc} en la valoración de un volumen igual de muestra
NaOH	$V_f = V_{vbc}$
Na_2CO_3	$V_f = \frac{1}{2} V_{vbc}$
NaHCO_3	$V_f = 0, V_{vbc} > 0$
NaOH, Na_2CO_3	$V_f > \frac{1}{2} V_{vbc}$
$\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3$	$V_f < \frac{1}{2} V_{vbc}$

Fuente: SKOOG, Douglas; WEST, Donald. *Fundamentos de química analítica*. p. 391.

3.7. Determinación de las corridas a realizar

Se determina la cantidad de corridas a realizar, con un nivel de confianza de 95 %, una confiabilidad de 1,96, un nivel de significancia de 5 % y un error estimado de 21 %.

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

- Z = confiabilidad
- P = nivel de confianza
- Q = nivel de fracaso
- E = error estimado

Se determina el número de corridas:

$$N = \frac{(1,96)^2(0,95)(0,05)}{(0,21)^2} = 4,14$$

$N \approx 4$ corridas

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabla VI. **Concentraciones promedio de hidróxido/carbonato medidas según registros mensuales previo a agregar gas cloro (Cl₂)**

Mes	Concentración NaOH (mol/L)				Concentración Na ₂ CO ₃ (mol/L)			
	Análisis en fábrica		Promedio		Análisis en fábrica		Promedio	
Enero								
Febrero								

Continuación de la tabla VI.

Marzo										
Abril										
Mayo										
Junio										
Julio										

Fuente: elaboración propia

Tabla VII. **Volúmenes determinados en la valoración complejométrica del agua de producción**

Muestras de agua de tuberías	V _{NET} (mL)	V _{AAC} (mL)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
Promedio					
Muestras de agua de contenedores	V _{NET} (mL)	V _{AAC} (mL)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
Promedio					

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Volúmenes desplazados en análisis de Winkler**

No. de análisis	V _f (mL)	V _{NM} (mL)

Continuación de la tabla VIII.

Promedio		
-----------------	--	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Solubilidad de las incrustaciones a distintas temperaturas analizadas**

Solubilidad (g/100mL)	Temperatura (°C)
	35
	47
	83
	88

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Porcentaje de pérdida por calcinación**

Corrida	% de pérdida	%CaCO₃
1		
2		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Porcentajes de iones calcio en las incrustaciones**

Corrida	%CaO	%Ca
1		
2		
3		
4		

Fuente: elaboración propia

Tabla XII. **Porcentajes de iones magnesio en las incrustaciones**

Corrida	%MgO	%Mg
1		
2		
3		
-	-	-

Fuente: elaboración propia.

3.9. Metodología y cálculos

3.9.1. Determinar la concentración de NaOH y Na₂CO₃ al inicio de la producción

$$C_B = \frac{m_B}{V_P}$$

Donde:

- C_B = concentración de NaOH/Na₂CO₃ (mol/L)
- m_B = masa de compuesto (mol)
- V_P = volumen de cada lote de producción (3936,40 L)

Nota: la masa del compuesto se obtiene de la siguiente manera:

$$m_B = \frac{\%c \times m_t}{PM}$$

Donde:

- $\%c$ = porcentaje de NaOH/Na₂CO₃ según proveedor

- m_t = masa total del lote (g)
- PM = peso molecular del compuesto (g/mol)

3.9.2. Determinar dureza total

$$C_{CaCO_3} = V_{NET} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1000 \times 100,09$$

Donde:

- C_{CaCO_3} = concentración de carbonato de calcio (mg/L)
- V_{NET} = volumen de EDTA con indicador negro de eriocromo T (mL)
- C_{EDTA} = concentración de EDTA (mol/L)
- $V_{alícuota}$ = volumen de alícuota de agua de producción (mL)
- 1000 = factor (mmol/mol)
- 100,09 = peso molecular $CaCO_3$ (mg/mmol)

3.9.3. Determinar la dureza total cálcica

$$C_{Ca^{+2}} = V_{ACC} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1000 \times 40,08$$

Donde:

- $C_{Ca^{+2}}$ = concentración de iones calcio (mg/L)
- V_{ACC} = volumen de EDTA con indicador de calcón (mL)
- C_{EDTA} = concentración de EDTA (mol/L)
- $V_{alícuota}$ = volumen de alícuota de agua de producción (mL)
- 1 000 = factor (mmol/mol)
- 40,08 = peso molecular de Ca (mg/mmol)

3.9.4. Determinar la dureza magnésica

$$C_{Mg^{+2}} = 24,31 \left((V_{NET} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1000) - (V_{ACC} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1000) \right)$$

Donde:

- $C_{Mg^{+2}}$ = concentración de iones de magnesio (mg/L)
- 24,31 = peso molecular de Mg (mg/mmol)

3.9.5. Determinar la solubilidad de la incrustación

$$S = \frac{m_i}{100 \text{ mL } H_2O}$$

Donde:

- S = solubilidad (g/100 mL)
- m_i = masa incrustación (g)

3.9.6. Calcular % de $CaCO_3$ a partir del valor de pérdida por calcinación proporcionado por el análisis de las incrustaciones en el laboratorio LAFIQ

$$\% CaCO_3 = LOI \times 2,274 \times 100$$

Donde:

- LOI = pérdida por ignición (g de CO_2 formados)

- 2,274 = factor (100,089 g/mol CaCO₃/ 44,011 g/mol CO₂)

3.9.7. Calcular el Kps experimental de CaCO₃

$$K_{ps} = [Ca^{+2}][CO_3^{-2}]$$

Donde:

- [Ca⁺²] = concentración de iones calcio (mol/L)
- [CO₃⁻²] = concentración de iones carbonatos (mol/L)

3.10. Análisis estadístico

$$\tilde{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i}{n}$$

Donde:

- \tilde{x} = valor promedio
- x_i = valor por corrida i
- n = número de corridas

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$$

Donde:

- σ = Desviación estándar
- \bar{x} = promedio de corridas realizadas

- x_i = valor por cada corrida realizada
- n = número de corridas realizadas

3.11. Plan de análisis de resultados

3.11.1. Métodos utilizados según el tipo de variables

- Método de Winkler para analizar mezclas de carbonatos/hidróxidos.
- Método de análisis de dureza total del agua de producción mediante complejometría.
- Digestión ácida para poder analizar la muestra de las tuberías.
- Análisis de incrustaciones por medio de la calcinación de la muestra de material sólido.
- Análisis de la solubilidad de las incrustaciones respecto de cambios de temperatura.

3.11.2. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Visio: *software* que permite la realización de diagramas de flujo de los procedimientos requeridos para el análisis de las incrustaciones en las tuberías de producción de hipoclorito de sodio (NaClO).
- Microsoft Excel: hoja de cálculo que permite realizar las operaciones mediante fórmulas, además, de las gráficas que permiten describir los comportamientos o tendencias en la investigación.
- Microsoft Word: procesador de texto que permite redactar el contenido del trabajo de graduación.

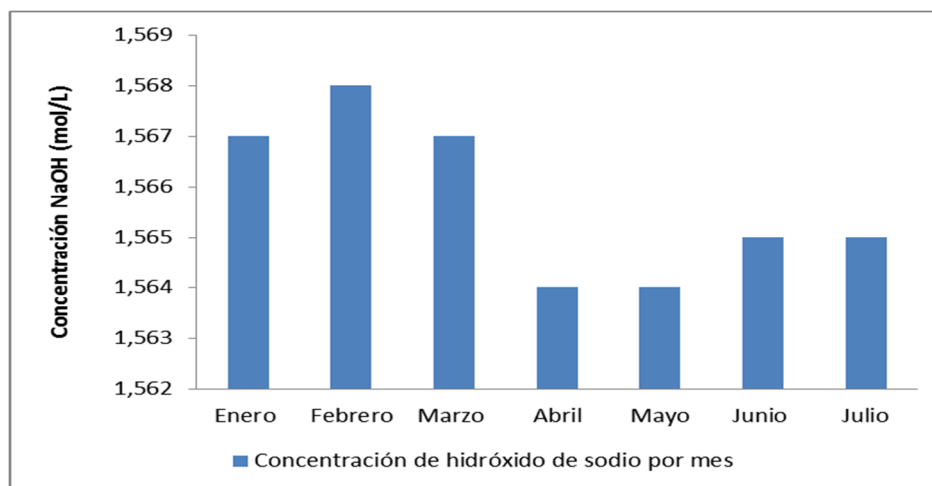
4. RESULTADOS

Tabla XIII. **Concentraciones promedio de hidróxido/carbonato medidas según registros mensuales previo a agregar gas cloro (Cl₂)**

Mes	Concentración NaOH (mol/L)					Concentración Na ₂ CO ₃ (mol/L)				
	Análisis en fábrica				Promedio	Análisis en fábrica				Promedio
Enero	1,567	1,568	1,568	1,566	1,567	0,001	0,002	0,001	0,002	0,0015
Febrero	1,569	1,569	1,568	1,566	1,568	0,002	0,001	0,002	0,002	0,0017
Marzo	1,566	1,569	1,569	1,565	1,567	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0020
Abril	1,565	1,564	1,564	1,565	1,564	0,001	0,002	0,001	0,002	0,0015
Mayo	---	1,563	1,565	1,564	1,564	----	0,001	0,001	0,002	0,0014
Junio	---	1,562	1,565	1,568	1,565	---	0,002	0,001	0,001	0,0014
Julio	1,565	1,565	1,565	1,564	1,565	0,002	0,002	0,001	0,001	0,0014

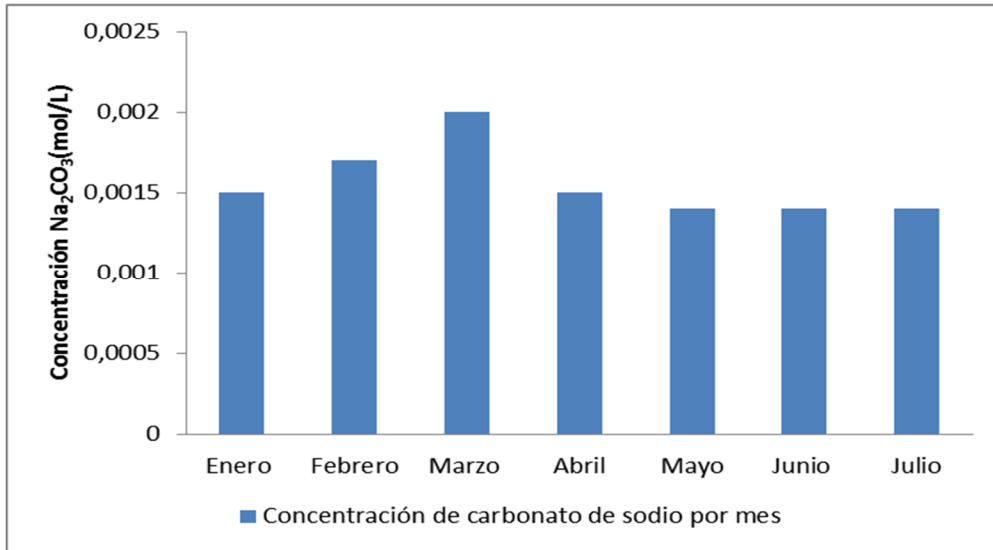
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Concentraciones de NaOH previo a agregar el gas cloro (Cl₂)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Concentraciones de Na₂CO₃ previo a agregar el gas cloro (Cl₂)**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Concentraciones de Ca⁺² y Mg⁺² en el agua de producción**

Corrida (tuberías)	V _{NET} (mL)	V _{ACC} (mL)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
1	6	3,1	24,85	14,10	120,11
2	6	2,8	22,45	15,56	120,11
3	5,9	2,5	20,04	16,53	118,11
4	5,9	2,9	23,25	14,59	118,11
Promedio			22,65	15,19	119,11
Corrida (contenedores)	V _{NET} (mL)	V _{ACC} (mL)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
1	5,7	2,9	23,25	13,61	114,10
2	5,5	2,9	23,25	12,64	110,10
3	5,6	2,9	23,25	13,13	112,10
4	5,6	2,8	22,45	13,61	112,10
Promedio			23,05	13,25	112,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Volúmenes analizados, método de Winkler**

Corrida	V _f (mL)	V _{NM} (mL)
1	4,60	6,00
2	5,50	8,10
3	7,50	11,00
4	4,90	9,50
Promedio	5,63	8,65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Concentraciones promedio de hidróxido de sodio y carbonato de sodio en el blanqueador**

Corrida	[NaOH] (mol/L)	[Na ₂ CO ₃] (mol/L)
1	0,035	0,025
2	0,053	0,028
3	0,075	0,035
4	0,049	0,046
Promedio	0,053	0,034

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Porcentajes de óxido de calcio y óxido de magnesio en las incrustaciones**

Compuesto - Ion	Porcentaje (%)
CaO	50,60
Ca ⁺²	36,17
MgO	4,70
Mg ⁺²	2,84

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Porcentajes de pérdida por ignición**

% de CO ₂	% CaCO ₃
38,30	87,09

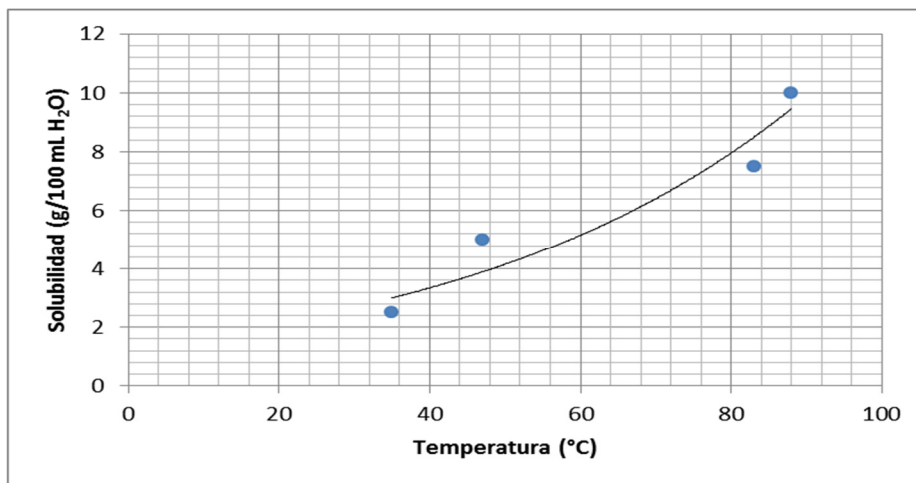
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Comparación de Kps experimental y teórico del carbonato de calcio, CaCO₃**

Kps teórico	2,9 X10 ⁻⁹
Qps experimental	0,39

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de las incrustaciones**



Fuente: elaboración propia.

Ecuación resultante de la gráfica en la Fig. 7: $S = 1,4051e^{0,0217(T)}$ con $R^2 = 0,894$.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La tabla XIII muestra los valores de las concentraciones tanto de hidróxido de sodio como de carbonato de sodio; dichas concentraciones se establecieron mediante los porcentajes de estos compuestos en los registros del proveedor de hidróxido de sodio; al multiplicar el peso de cada saco (25 kg) por el porcentaje se obtuvo la masa de cada compuesto; esta cantidad de compuestos se disolvió en un volumen de agua $V = 3936,40$ L /día. La concentración de NaOH fue alta en febrero con un valor de $C_{\text{NaOH}} = 1,57$ M y fue baja en los meses de abril y mayo con un valor de $C_{\text{NaOH}} = 1,56$ M; en tanto que la concentración del Na_2CO_3 fue alta en el mes de marzo con una $C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 1,56$ M y la concentración más baja fue reportada en los meses de mayo hasta julio con un valor de $C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 1,56$ M; dichos valores se pueden visualizar en las figuras 10 y 11, estas mediciones permiten evaluar los compuestos que se agregan a la mezcla para producir hipoclorito de sodio previo a inyectar el gas cloro (Cl_2), y al existir una mezcla de Na_2CO_3 y NaOH de concentraciones similares se creó un sistema o proceso de ablandamiento que se desarrolla en cada lote de producción.

Antes de inyectar el gas cloro, la existencia de hidróxido de sodio (NaOH) y carbonato de sodio Na_2CO_3 que mediante la agitación provocan un proceso de ablandamiento que gradualmente precipitó iones de metales calcio y magnesio.

Los iones metálicos se precipitan mediante reacciones de ablandamiento y variaciones de pH en el caso del carbonato de calcio CaCO_3 ; en la tabla XIV se presentan los valores de las concentraciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} en el agua de producción tanto de los contenedores como del agua que fluye en las tuberías;

una titulación complejométrica con EDTA para determinar la dureza cálcica y magnésica sirvió para analizar las muestras de agua en los contenedores como en las tuberías; el agua de mezcla de los contenedores presentó los valores promedio, $[\text{CaCO}_3] = 112,10 \text{ mg/L}$; mientras que en el fluido que circula por las tuberías la concentración promedio es $[\text{CaCO}_3] = 119,11 \text{ mg/L}$; esto demuestra un aumento de la dureza total mientras el fluido circula por las tuberías de pre-producción, estos valores expresados en ppm demuestran que el agua de proceso es moderadamente dura.

Mientras el fluido circula por las tuberías la concentración de carbonato aumenta; además, existe un leve aumento de las concentraciones de iones de Mg^{+2} , según la tabla XIV; en los contenedores el valor promedio de la concentración de Mg^{+2} es $[\text{Mg}^{+2}] = 13,25 \text{ mg/L}$ y en las tuberías $[\text{Mg}^{+2}] = 15,19 \text{ mg/L}$, esto refleja que los métodos mecánicos de limpieza (raspado) no eliminan totalmente las incrustaciones de las tuberías y eso provoca el aumento de estos iones metálicos; regularmente, los compuestos disueltos que provocan la dureza del agua (Mg^{+2} y Ca^{+2}) se encuentran como bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y bicarbonato de magnesio $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ y en determinados casos como precipitados de CaCO_3 que modifican su solubilidad ante cambios de pH y temperatura.

En la tabla XV se muestran los valores de volumen al analizar las muestras de producto terminado, mediante el método de Winkler, dado que el promedio de valores son volumen de HCl desplazado con indicador fenolftaleína, $V_F = 5,63 \text{ mL}$, y volumen de HCl desplazado con indicador naranja de metilo, $V_{NM} = 8,65 \text{ mL}$, que permite establecer que existe una mezcla NaOH y Na_2CO_3 y mediante estos valores se determinaron las concentraciones $[\text{NaOH}] = 0,053 \text{ M}$ y $[\text{Na}_2\text{CO}_3] = 0,034 \text{ M}$, en la tabla XVII; esto permite establecer que los compuestos básicos para un ablandamiento están presentes

en el blanqueador, como producto terminado, por lo tanto, precipitarán compuestos de calcio y magnesio.

El proceso de ablandamiento al ocurrir durante el proceso de producción de blanqueador provoca la precipitación de los compuestos insolubles y ocurre el proceso de nucleación que permite el desarrollo de los cristales de tales compuestos de magnesio y calcio hasta formar las aglomeraciones de incrustaciones que obstruyen las tuberías.

Se analizaron los porcentajes de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} en las incrustaciones extraídas de las tuberías; se presentan en la tabla XVI, cuyos valores determinados mediante volumetría son % m/m $\text{Ca}^{+2} = 36,17$ y % m/m $\text{Mg}^{+2} = 2,84$, obtenidos de la tabla XVII. Los porcentajes de iones calcio y magnesio se determinaron mediante factores estequiométricos a partir de los porcentajes de óxido de calcio % m/m $\text{CaO} = 50,60$ y óxido de magnesio, % m/m $\text{MgO} = 4,70$, el análisis previo de los compuestos de calcio y magnesio como óxidos requirió de un ataque ácido previo; cuantificar los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} en las incrustaciones demuestra que se desarrolla un proceso de ablandamiento que precipita gradualmente estos iones.

En la tabla XVIII, cuyo procedimiento se detalla en la figura 14 de la sección 3.6, la característica más importante de la calcinación es la temperatura y en dependencia de la temperatura se calcina de manera selectiva un compuesto, la muestra se calentó en la mufla a $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ descomponiendo el carbonato de calcio, CaCO_3 , en óxido de calcio, CaO y dióxido de carbono, CO_2 , el porcentaje de pérdida es % m/m $\text{CO}_2 = 38,30$, permitió encontrar el porcentaje de carbonato de calcio, CaCO_3 , cuyo valor es % m/m $\text{CaCO}_3 = 87,09$; valor que implica que las incrustaciones presentes en las tuberías de la producción de blanqueador de hipoclorito de sodio son en mayor porcentaje

carbonato de sodio, que al descomponerse mediante un ataque ácido se puede cuantificar como óxido de calcio u otros compuestos de calcio.

En la figura 17 de los resultados se observa el comportamiento de la solubilidad de las incrustaciones ante cambios de temperatura, se puede verificar que la cantidad de material incrustante disuelto en agua aumenta al aumentar la temperatura, compuestos como el carbonato de calcio precipitan a temperaturas altas; sin embargo, el K_{ps} experimental con valor de 0,39 es mayor que su K_{ps} teórico con un valor de $2,90 \times 10^{-9}$ por lo que el carbonato de calcio, CaCO_3 , precipita debido al pH de la solución de hipoclorito de sodio con un promedio de 10,48 (pH alcalino), la comparación de K_{ps} se muestra en la tabla XIX.

CONCLUSIONES

1. El origen de las incrustaciones proviene de la dureza total del agua de producción que contiene iones calcio, Ca^{+2} en una concentración de 22,65 ppm, además de iones magnesio, Mg^{+2} en una concentración de 15,19 ppm, equivalentes a una concentración de carbonato de calcio, CaCO_3 , igual a 119,11 ppm al salir de las tuberías de agua de producción.
2. La composición de las incrustaciones representa en porcentajes 50,60 % de óxido de calcio, CaO , y 4,70 % de óxido de magnesio, MgO ; simultáneamente, en un ensayo de pérdida por ignición, las incrustaciones representan 87,09 % cuantificados como CaCO_3 , todos los porcentajes son m/m; además, la existencia de concentraciones de $[\text{NaOH}] = 0,053 \text{ M}$ y $[\text{Na}_2\text{CO}_3] = 0,034$ en el blanqueador crea un medio de ablandamiento.
3. El compuesto en mayor proporción en las incrustaciones, carbonato de calcio, CaCO_3 precipita en las tuberías de producción al tener un Q_{ps} experimental con un valor de 0,39 mayor al K_{ps} teórico con un valor de $2,90 \times 10^{-09}$, el Q_{ps} experimental se determinó a un pH de 10,48 promedio.
4. Las incrustaciones de las tuberías de producción se caracterizaron mediante una curva de solubilidad que indica que dichas incrustaciones se disuelven al aumentar la temperatura y se modelan con la siguiente ecuación logarítmica: $S = 1,4051e^{0,0217(T)}$.

5. El análisis de dureza del agua que circula por todo el sistema de producción es moderadamente dura con un rango de dureza comprendido entre [50 – 150] ppm de CaCO_3 ; es la concentración de este compuesto más alta en las tuberías que conducen el agua para dilución del producto 119,11 ppm de CaCO_3 en comparación a la dureza medida en el depósito de distribución de agua con una concentración de 112,10 ppm.

RECOMENDACIONES

1. Para ampliar los datos proporcionados sobre el contenido de los compuestos en las incrustaciones se debe hacer uso de espectroscopia de adsorción atómica que determinaría los % de los compuestos en las muestras de incrustaciones.
2. Antes de la fabricación de cada lote de hipoclorito de sodio ($\text{NaOCl}_{(ac)}$), es conveniente realizar un proceso de ablandamiento del agua de producción por medio de cal-carbonato u otro proceso de intercambio iónico.
3. Realizar una eliminación periódica de los residuos de compuestos de los contenedores para evitar que dichos precipitados fluyan hacia las tuberías e inicien procesos de cristalización dentro de estas.
4. Realizar un enchaquetado a la tubería para provocar que los compuestos permanezcan en disolución durante el proceso de fabricación del blanqueador.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Ácido clorhídrico*. [En línea]. <http://www.ecured.cu/Ácido_clorhídrico> [Consulta 13 de marzo de 2016].
2. *Calcinación. Experimento N°2 - Proceso de calcinación*. [En línea] <<https://es.scribd.com/doc/143960400/Experimento-2-Calcinacion>> [Consulta: 27 de agosto de 2016].
3. *Ensayo. Pérdida por ignición. Loss on ignition*. [En línea] <<http://www.chrono.qub.ac.uk/inqua/news18/n18-ljm1.htm>> [Consulta: 27 de agosto de 2016].
4. GODÍNEZ MIRANDA, Ivonne Susseth. *Automatización de la alimentación y purga de un ablandador del tipo cal-intercambio iónico a elevadas temperaturas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 74 p.
5. HARRIS, Daniel. *Análisis químico cuantitativo*. 3era. ed. México: Grupo Editorial Iberoamericana S.A., 1992. 886 p.
6. *Hoja de datos de seguridad, cloro*. [En línea]. <<http://www.gtm.net/images/industrial/c/COLORO%20GAS.pdf>> [Consulta 13 de marzo de 2016].

7. *Hoja de seguridad II, hidróxido de sodio.* [En línea]. <<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/2hsnaoh.pdf>> [Consulta: 13 de marzo de 2016].
8. *Hoja informativa sobre sustancias peligrosas. Hidróxido de amonio.* [En línea] < <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0103sp.pdf>> [Consulta: 16 de abril de 2016].
9. *Los colores y química de los indicadores de pH. The colours & chemistry of pH indicators.* [En línea] <<http://www.compoundchem.com/2014/04/04/the-colours-chemistry-of-ph-indicators/>> [Consulta: 16 de abril de 2016].
10. MARCILLA GOMIS, A. *Introducción a las operaciones de separación: cálculo por etapas de equilibrio.* España: Publicaciones Universidad de Alicante, 1998. 341 p.
11. MORALES LINARES, Mario José. *Evaluación comparativa técnica y económica de los métodos de limpieza hidrocinética y limpieza química para evaporadores tipo Roberts en ingenios azucareros.* Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 90 p.
12. *Nucleación.* [En línea] <<https://cv3.sim.ucm.es/wiki/site/curriculo-3313-1/Nucleaci%C3%B3n@2.html>> [Consulta: 03 de marzo de 2016].
13. RIGOLA LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales.* Barcelona: MARCOMBO editores, 1990. [En línea]

<<https://books.google.com.gt/books?id=fQcXUq9WFC8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>> ISBN: 84-267-0740-8
[Consulta: 30 de junio de 2015].

14. SKOOG, Douglas; WEST, Donald. *Fundamentos de química analítica*. 9na. ed. México: Cengage Learning Editores S.A., 2015. 958 p.
15. Universidad de las Américas Puebla México (UDLAP). *Precipitación con cal-carbonato*. [En línea]
<http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf> [Consulta: 18 de abril de 2016].
16. *Volumetría de formación de complejos*. [En línea].
<http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/20428/mod_resource/content/1/9%20Volumetr%C3%ADa%20por%20formaci%C3%B3n%20de%20complejo.pdf> [Consulta: 16 de abril de 2016].

APÉNDICES

Apéndice 1. Muestra de cálculo

- Cálculo de la concentración de NaOH/Na₂CO₃:

$$C_B = \frac{m_B}{V_P}$$

Donde:

- C_B = concentración de NaOH/Na₂CO₃ (mol/L)
- m_B = masa de compuesto (mol)
- V_P = volumen de cada lote de producción (3 936,40 L)

Ejemplo:

Para la muestra 1 del mes de enero en la tabla de los datos calculados en el apéndice 2 se tiene:

$$C_B = \frac{0,99 \times \frac{250\,000\,g}{40,00\, \frac{g}{mol}}}{3\,936,40\,L} = 1,57\, \frac{mol}{L}$$

- Cálculo de la concentración de CaCO₃ en el agua de producción

$$C_{CaCO_3} = V_{NET} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1\,000 \times 100,09$$

Continuación del apéndice 1.

Donde:

- C_{CaCO_3} = concentración de carbonato de calcio (mg/L)
- V_{NET} = volumen de EDTA con indicador negro de Eriocromo T (mL)
- C_{EDTA} = concentración de EDTA (mol/L)
- $V_{alícuota}$ = volumen de alícuota de agua de producción (mL)
- 1 000 = factor (mmol/mol)
- 100,09 = peso molecular $CaCO_3$ (mg/mmol)

Ejemplo:

Para la muestra 1 de los volúmenes que se encuentran en la tabla de los datos calculados en el apéndice 3 se tiene:

$$C_{CaCO_3} = 6 \text{ mL} \times \frac{0,01 \text{ mol}}{50 \text{ mL}} \times 1\,000 \frac{\text{mmol}}{\text{mol}} \times 100,09 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} = 120,11 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

- Cálculo de la concentración de iones Ca^{+2} en el agua de producción

$$C_{Ca^{+2}} = V_{ACC} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1\,000 \times 40,08$$

Donde:

- $C_{Ca^{+2}}$ = concentración de iones calcio (mg/L)
- V_{ACC} = volumen de EDTA con indicador de calcón (mL)
- C_{EDTA} = concentración de EDTA (mol/L)

Continuación del apéndice 1.

- $V_{alícuota}$ = volumen de alícuota de agua de producción (mL)
- 1 000 = factor (mmol/mol)
- 40,08 = peso molecular Ca (mg/mmol)

Ejemplo:

Para la muestra 1 de los volúmenes que se encuentran en la tabla de los datos calculados en el apéndice 3 se tiene:

$$C_{Ca^{+2}} = 3,1 \text{ mL} \times \frac{0,01 \text{ mol}}{50 \text{ mL}} \times 1\,000 \frac{\text{mmol}}{\text{mol}} \times 40,08 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} = 24,85 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

- Cálculo de la concentración de iones Mg^{+2} en el agua de producción

$$C_{Mg^{+2}} = 24,31 \left((V_{NET} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1\,000) - (V_{ACC} \times \frac{C_{EDTA}}{V_{alícuota}} \times 1\,000) \right)$$

Donde:

- $C_{Mg^{+2}}$ = concentración de iones de magnesio (mg/L)
- 24,31 = peso molecular de Mg (mg/mmol)

Ejemplo:

Para la muestra 1 de los volúmenes que se encuentran en la tabla en el apéndice 3 se tiene:

Continuación del apéndice 1.

$$C_{Mg^{+2}} = 24,31 \frac{mg}{mmol} \times 1000 \frac{mmol}{mol} \left(\left(1,20 \frac{mol}{L} \right) - \left(0,62 \frac{mol}{L} \right) \right) = 14,10 \frac{mg}{L}$$

- Análisis de volúmenes mediante el método de Winkler

Existe mezcla NaOH/Na₂CO₃ si:

$$V_f > \frac{1}{2} V_{NM}$$

Ejemplo:

Según datos corrida 1, tabla en el apéndice 4:

$$4,6 \text{ mL} > \frac{1}{2} (7,00 \text{ mL})$$

Lo que implica una mezcla de NaOH/Na₂CO₃ en el producto terminado hipoclorito de sodio.

- Cálculos de la solubilidad

$$S = \frac{m_i}{100 \text{ mL } H_2O}$$

Donde:

- S = solubilidad (g/100 mL)
- m_i = masa incrustación (g)

Continuación del apéndice 1.

- 100 mL H_2O = volumen de agua utilizado

Ejemplo:

Según valor 1 a $T = 35\text{ }^\circ\text{C}$ de la tabla en el apéndice 6:

$$S = \frac{2.5\text{ g}}{100\text{ mL } H_2O} = 2,5 \frac{\text{g}}{100\text{ mL } H_2O}$$

- Calcular % de $CaCO_3$ a partir del valor de pérdida por calcinación proporcionado por el análisis de las incrustaciones en el laboratorio LAFIQ

$$\% CaCO_3 = LOI \times 2,274 \times 100$$

Donde:

- LOI = pérdida por ignición (g de CO_2 formados)
- 2,274 = factor (100,089 g/mol $CaCO_3$ / 44,011 g/mol CO_2)

Ejemplo:

LOI = 0.383

$$\% CaCO_3 = 0.383 \times 2.274 \times 100 = \mathbf{87,09\%}$$

Según tabla en el apéndice 9.

- Calcular el K_{ps} experimental de $CaCO_3$

Continuación del apéndice 1.

$$Kps = [Ca^{+2}][CO_3^{-2}]$$

Donde:

- $[Ca^{+2}]$ = concentración de iones calcio (mol/L)
- $[CO_3^{-2}]$ = concentración de iones carbonatos (mol/L)
- $K_1 = 4,44 \times 10^{-7}$
- $K_2 = 4,69 \times 10^{-11}$
- $[H^+] = 10^{-pH}$

Ejemplo:

$$[Ca^{+2}] = 0,565 \text{ mol/L}$$

$$[CO_3^{-2}] = \alpha_2 \times [C_{T_{CO_3}}]$$

$$\alpha_2 = \frac{K_1 K_2}{[H^+]^2 + [H^+] K_1 + K_1 K_2}$$

$$Kps = \left(0,565 \frac{\text{mol}}{\text{L}}\right) \left(1,19 \frac{\text{mol}}{\text{L}}\right) (0,597) = 0,401$$

Según valores de concentración de iones en el Apéndice 3 se tiene:

- Promedio

$$\tilde{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i}{n}$$

Donde:

Continuación del apéndice 1.

- \tilde{x} = valor promedio
- x_i = valor por corrida i
- n = número de corridas

Ejemplo:

Según valores de ppm Mg^{+2} en el apéndice 3 se tiene:

$$\tilde{x} = \frac{14,100 + 12,641 + 16,531 + 13,614}{4} = 14,221$$

- Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^i (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}$$

Donde:

- σ , desviación estándar
- \bar{x} , promedio de corridas realizadas
- x_i , valor por cada corrida realizada
- n , número de corridas realizadas

Ejemplo:

Según valores de ppm Mg^{+2} en el apéndice 3 se tiene:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(14,221 - 14,100)^2 + (14,221 - 12,641)^2 + (14,221 - 16,513)^2 + (14,221 - 13,614)^2}{4 - 1}}$$
$$\sigma = 1,655$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2.

Datos originales obtenidos en la fábrica

Mes	% NaOH	% Na ₂ CO ₃	[NaOH] (mol/L)	[Na ₂ CO ₃] (mol/L)	Prom, [NaOH] (mol/L)	Prom, [Na ₂ CO ₃] (mol/L)
Enero	98,71	0,24	1,57	0,001	1,57	0,0015
	98,73	0,26	1,57	0,002		
	98,76	0,22	1,57	0,001		
	98,65	0,32	1,57	0,002		
Febrero	98,76	0,26	1,57	0,002	1,57	0,0017
	98,84	0,22	1,57	0,001		
	98,76	0,31	1,57	0,002		
	98,65	0,32	1,57	0,002		
Marzo	98,65	0,32	1,57	0,002	1,57	0,0020
	98,82	0,35	1,57	0,002		
	98,82	0,35	1,57	0,002		
	98,56	0,28	1,56	0,002		
Abril	98,58	0,21	1,57	0,001	1,56	0,0015
	98,49	0,29	1,56	0,002		
	98,5	0,21	1,56	0,001		
	98,54	0,26	1,56	0,002		
Mayo	98,46	0,21	1,56	0,001	1,56	0,0014
	98,53	0,24	1,56	0,001		
	98,52	0,26	1,56	0,002		
Junio	98,4	0,27	1,56	0,002	1,57	0,0014
	98,57	0,21	1,57	0,001		
	98,72	0,24	1,57	0,001		
Julio	98,56	0,26	1,56	0,002	1,57	0,0014
	98,57	0,27	1,57	0,002		
	98,53	0,19	1,56	0,001		
	98,51	0,24	1,56	0,001		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Volúmenes determinados en la valoración complejométrica del agua de producción**

# Corrida tuberías	V _{NET} (mL)	V _{ACC} (mL)	[CaCO ₃] (mol/L)	[Ca ⁺⁺] (mol/L)	[Mg ⁺⁺] (mol/L)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
1	6	3,1	1,20	0,62	0,58	24,85	14,10	120,11
2	6	2,8	1,20	0,56	0,64	22,45	15,56	120,11
3	5,9	2,5	1,18	0,50	0,68	20,04	16,53	118,11
4	5,9	2,9	1,18	0,58	0,60	23,25	14,59	118,11
Promedio						22,65	15,19	119,11
Desviación						2,00	1,08	1,16
# Corrida contenedores	V _{NET} (mL)	V _{ACC} (mL)	[CaCO ₃] (mol/L)	[Ca ⁺⁺] (mol/L)	[Mg ⁺⁺] (mol/L)	[Ca ⁺²] (mg/L)	[Mg ⁺²] (mg/L)	[CaCO ₃] (mg/L)
5	5,7	2,9	1,14	0,58	0,56	23,25	13,61	114,10
6	5,5	2,9	1,10	0,58	0,52	23,25	12,64	110,01
7	5,6	2,9	1,12	0,58	0,54	23,25	13,13	112,10
8	5,6	2,8	1,12	0,56	0,56	22,45	13,61	112,10
Promedio						23,05	13,25	112,10
Desviación						0,40	0,47	1,64

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Volúmenes encontrados mediante método de Winkler para determinar la mezcla hidróxido/carbonato**

Corrida	V _f (mL)	V _{NM} (mL)
1	4,60	6,00
2	5,50	8,10
3	7,50	11,00
4	4,90	9,50

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Concentraciones de hidróxido de sodio y carbonato de sodio en el producto terminado**

Corrida	[NaOH] (mol/L)	[Na ₂ CO ₃] (mol/L)
1	0,035	0,025
2	0,053	0,028
3	0,075	0,035
4	0,049	0,046

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Determinación de la solubilidad**

Masa (g)	Temperatura (°C)
2,50	35
5,00	47
7,50	83
1,00	88

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Porcentajes óxido de calcio-porcentaje de iones calcio**

Corrida	% CaO	% Ca ⁺²
1	50,75	36,27
2	47,45	33,87
3	52,71	37,68
4	51,64	36,87

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Porcentajes óxido de magnesio - porcentaje de iones magnesio**

Corrida	% MgO	% Mg ⁺²
1	4,49	2,70
2	3,82	2,30
3	5,82	3,50
--	--	--

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Porcentaje de pérdida por ignición**

Corrida	% de pérdida (% m/m CO ₂)
1	36,76
2	39,80

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Variación de Kps de CaCO₃ según el pH de una solución estabilizada de hipoclorito de sodio (NaOCl)**

Corrida	pH	Kps
1	10,5	0,40
2	10,5	0,40
3	10,4	0,36
4	10,5	0,40
Promedio	10,48	0,39

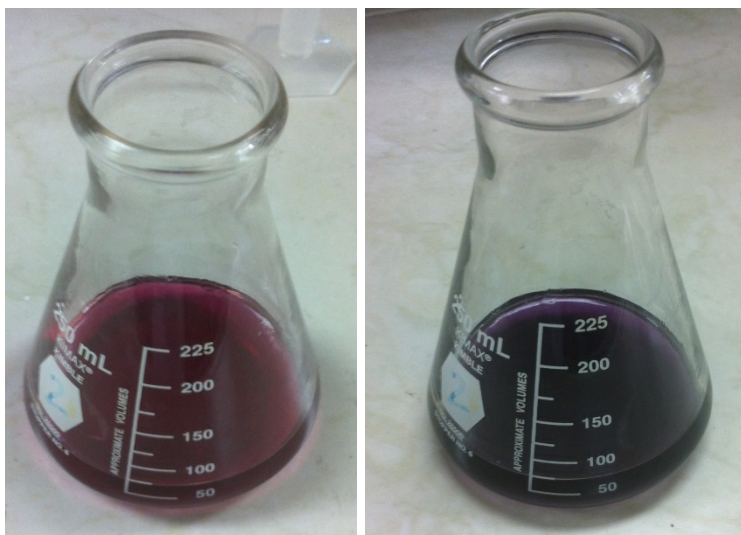
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Titulación complejométrica con indicador eriocromo T**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Titulación complejométrica con indicador calcón™**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Titulación neutralización ácido/base**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Calcinación de muestra en la mufla**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Muestras analizadas luego de digestión ácida para determinar iones Ca^{+2} y Mg^{+2}**

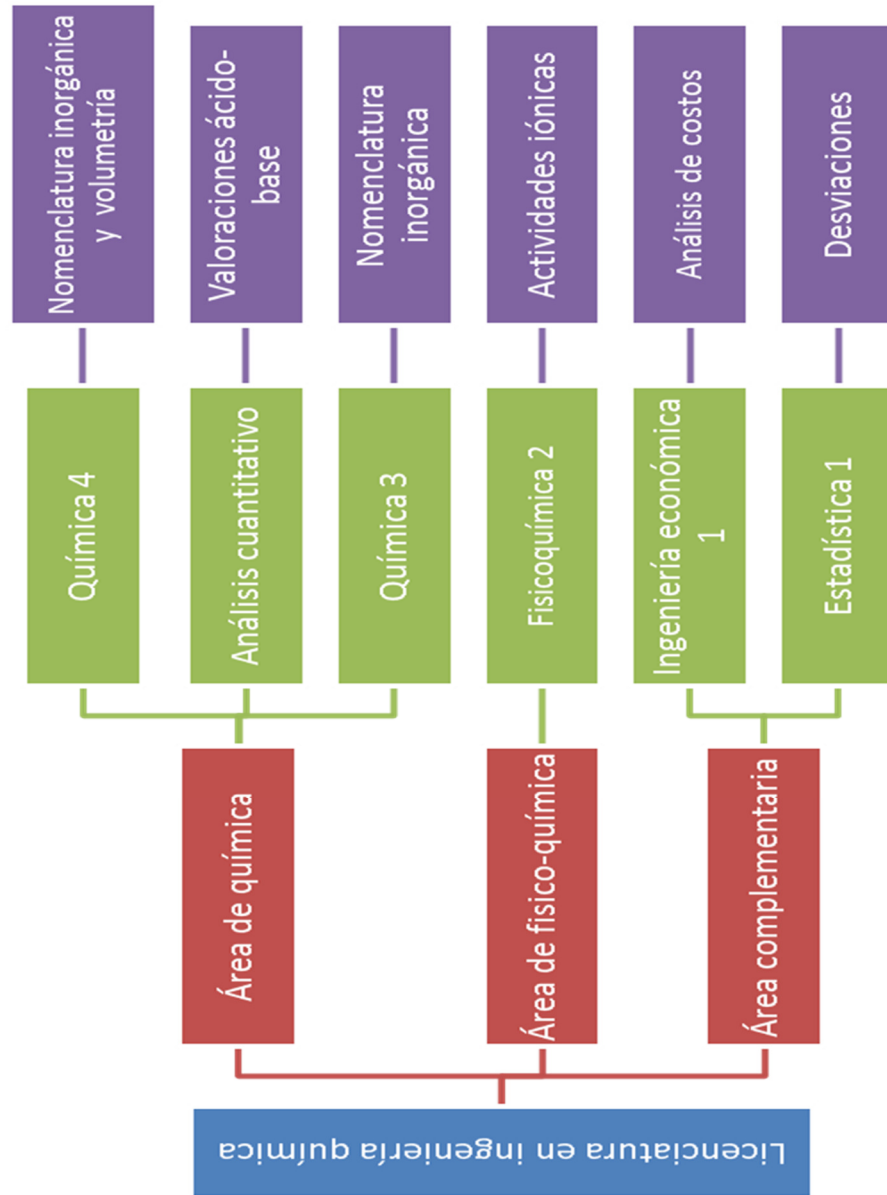


Fuente: elaboración propia.

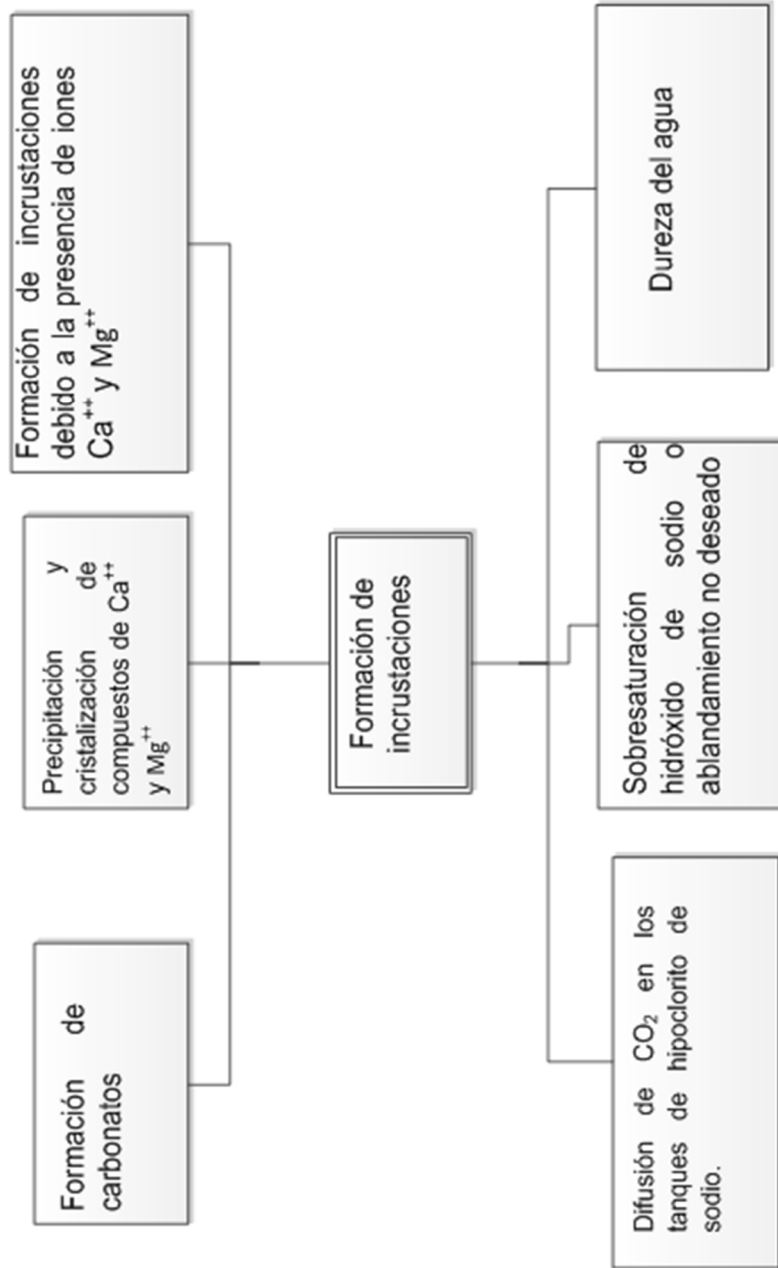
Apéndice 16. **Muestras de material incrustante calcinadas**



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Constantes de solubilidad de los compuestos formados y precipitados a 25 °C

Compuesto	Kps
Mg(OH) ₂	1,80 X10 ⁻¹¹
CaCO ₃	2,90 X10 ⁻⁹

Fuente: *Constantes de solubilidad*. <http://bilbo.chm.uri.edu/CHM112/index.html>. Consulta: 14 de abril de 2016.

Anexo 2. Solubilidad de algunas sales

Anión Cación	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁺	CO ₃ ⁻	OH ⁻
H ⁺	Sol	Sol	Sol	CO ₂	CO ₂	H ₂ O
Na ⁺	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol
K ⁺	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol
Ca ⁺⁺	Sol	Sol	Muy poco	Poco	Insol	Muy poco
Mg ⁺⁺	Sol	Sol	Sol	Sol	Muy poco	Insol
Fe ⁺⁺	Sol	Sol	Sol	Poco	Muy poco	Muy poco
Fe ⁺³	Sol	Sol	Sol	Insol	Insol	Insol
Al ⁺³	Sol	Sol	Sol	—	—	Insol

Fuente: *Tratamiento de aguas industriales*.

<https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q=sales%20&f=false>. Consulta: 12 de marzo de 2016.

Anexo 3.

Solubilidad del carbonato de calcio

<i>Temp °C</i>	<i>CO₃Ca mg/l</i>
183	25
225	14
260	11
335	8

Fuente: *Tratamiento de aguas industriales.*

<https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q=sales%20&f=false>. Consulta: 12 de marzo de 2016.