



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE LA FORMACIÓN DE  
INCRUSTACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

**I.I. MARÍA GUADALUPE BELIN MORALES**

**TUTOR PRINCIPAL:**

M.I. MERCEDES ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS, Instituto Mexicano de Tecnología  
del Agua.

**COMITÉ TUTORAL:**

DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ, Facultad de Ingeniería campus Juriquilla.  
DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ, Facultad de Ingeniería.

MÉXICO, D. F.; OCTUBRE 2015

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Buitrón Méndez Germán  
Secretario: Dra. Silva Martínez Ana Elisa  
1<sup>er</sup> Vocal: Dra. Ramírez Zamora Rosa María  
2<sup>do</sup> Vocal: Dra. Gelover Santiago Silvia Lucila  
3<sup>er</sup> Vocal: M.I. Ramírez Camperos Mercedes Esperanza

## **Lugar donde se realizó la tesis:**

Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA).

## **TUTOR DE TESIS:**

M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos

---

**FIRMA**

## **DEDICATORIA**

A **Luis Arturo Lara Gutiérrez**, por ser quien me impulsó y motivó a iniciar este proyecto, por darme palabras de aliento en cada momento cuando sentía que no podía seguir adelante con esta responsabilidad, por creer siempre en mí, por todos sus consejos y motivaciones para crecer profesionalmente.

Le dedico este trabajo con todo mi amor, porque realmente se merece este reconocimiento, porque fue una etapa de mi vida, vivida con él.

Donde quiera que esté, le doy las gracias por esto y por todo lo que significó para mí.

**¡Gracias por todas tus enseñanzas!**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutora **M.I Esperanza Ramírez Camperos** por todo el tiempo que me dedicó, por todos los conocimientos que me adquirió, por todos sus consejos y las porras que siempre me dio. Por haber creído en mí y por ser un ser humano como pocos existen en este mundo.

A los miembros de mi jurado, **Dr. Germán Buitrón Méndez, Dra. Ana Elisa Silva Martínez, Dra. Silvia Lucila Gelover Santiago** y **Dra. Rosa María Ramírez Zamora**, por sus grandes aportaciones para enriquecer el trabajo realizado en la presente tesis.

Al **Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)**, en especial a la **Dra. Georgina Izquierdo Montalvo**, por todo su apoyo para la realización de los análisis de difracción de Rayos X. Muchísimas gracias por su tiempo y dedicación.

A mi amiga **M.I. María Cristina Nájera Flores**, por su apoyo incondicional, por los conocimientos que me transmitió como maestra y como amiga, por motivarme a continuar cada vez que sentía que ya no podía seguir adelante. Es una excelente amiga, siempre le estaré agradecida.

Al **M.I Iván Emmanuel Villegas Mendoza**, por el tiempo que me brindó para despejar todas las dudas que en su momento tuve para el desarrollo de este trabajo.

Al **IBT Ernesto Bahena Castro**, por el apoyo que me brindó, su tiempo, sus conocimientos, su paciencia y la disponibilidad para brindarme el material y equipo que necesité.

Al **M.I Javier de Jesús Canto Ríos**, por el apoyo que me brindó, siempre resolviendo mis dudas y dedicándome de su tiempo.

Al **Dr. Ariosto Aguilar Chávez**, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de mi etapa experimental en el laboratorio de Ingeniería Ambiental.

Al **personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**, que siempre fueron muy atentos y educados cuando necesité de su ayuda.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por haberme dado la oportunidad de subir un peldaño más en mi vida profesional.

Al **CONACYT**, por el apoyo financiero brindado durante dos años.

Al **Posgrado UNAM del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)**, por haberme recibido en sus instalaciones para la realización de este proyecto.

***A todos ustedes ¡MUCHÍSIMAS GRACIAS!***

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b><i>i</i></b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b><i>vi</i></b>
<b>RESUMEN</b>	<b><i>viii</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>ix</i></b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b><i>1</i></b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b><i>1</i></b>
<b>1.1 Justificación</b>	<b><i>2</i></b>
<b>1.2 Objetivos</b>	<b><i>3</i></b>
1.2.1 Objetivo general	<i>3</i>
1.2.2 Objetivos específicos	<i>4</i>
<b>1.3 Hipótesis</b>	<b><i>4</i></b>
<b>1.4 Alcances</b>	<b><i>4</i></b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b><i>5</i></b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b><i>5</i></b>
<b>2.1 Problemática</b>	<b><i>5</i></b>
2.1.1 Formación de agua dura	<i>6</i>
2.1.2 Mecanismo de formación de incrustación	<i>6</i>
2.1.3 Cinética de la precipitación	<i>10</i>
2.1.4 Tipos de incrustación	<i>11</i>
2.1.5 Corrosión y tipos de corrosión	<i>12</i>
2.1.6 Diferencias entre incrustación y corrosión	<i>14</i>
<b>2.2 Parámetros del agua relacionados con la formación de incrustación</b>	<b><i>15</i></b>
2.2.1 Dureza del agua	<i>15</i>
2.2.2 Alcalinidad o acidez	<i>17</i>
2.2.3 pH	<i>18</i>
2.2.4 Temperatura	<i>19</i>
<b>2.3 Índice de saturación de Langelier y de estabilidad de Ryznar</b>	<b><i>21</i></b>
2.3.1 Índice de saturación de Langelier	<i>21</i>
2.3.2 Índice de estabilidad de Ryznar	<i>23</i>
<b>2.4 Tratamientos utilizados para prevenir la incrustación</b>	<b><i>23</i></b>
2.4.1 Reactivos químicos utilizados para el ablandamiento del agua	<i>24</i>
2.4.2 Ablandamiento del agua con Cal-carbonato	<i>25</i>
2.4.3 Ablandamiento del agua con carbonato de sodio y cal	<i>26</i>
2.4.4. Ablandamiento con sosa caústica	<i>26</i>
2.4.5 Remoción con resinas de intercambio iónico	<i>26</i>
<b>2.5 Control de incrustación en sistemas y equipos industriales</b>	<b><i>28</i></b>
2.5.1 Sistemas de enfriamiento	<i>28</i>

2.5.2 Sistemas de generación de vapor	32
<b>2.6 Tecnología alternativa para prevenir la incrustación</b>	<b>33</b>
2.6.1 Campo magnético y conceptos básicos	33
2.6.2 Imanes permanentes	36
2.6.3 Unidades de medida del campo magnético	37
2.6.4 Investigaciones sobre el uso del campo magnético en la remoción de incrustación	37
2.6.5 Equipo utilizado	45
2.6.6 Aplicaciones generales	47
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>50</b>
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>50</b>
3.1 Selección de la muestra	50
3.2 Factores experimentales	51
3.3 Sistema experimental	51
3.4 Operación de los circuitos experimentales	54
3.4.1 Inicio de los Experimentos	55
3.4.2 Seguimiento de los experimentos	55
3.4.3 Desmontaje de los experimentos	58
3.5 Evaluación de los experimentos	58
3.5.1 Parámetros importantes del agua	58
3.5.2 Cambio en la estructura y el tamaño del cristal	60
3.5.3 Análisis de los testigos de Incrustación	61
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>63</b>
<b>4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>63</b>
4.1 Selección de la Muestra	63
4.2 Parámetros importantes del agua	64
4.2.1 Dureza Total	65
4.2.2 Dureza de Calcio	66
4.2.3 Dureza Carbonatada	67
4.2.4 Dureza No Carbonatada	67
4.2.5 pH	68
4.2.6 Conductividad	69
4.3 Cambio de la estructura y el tamaño del cristal	75
4.3.1 Pruebas cristaloópticas	76
4.3.2 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	80
4.3.3 Análisis de Difracción de Rayos X	89
4.4 Análisis de los testigos de Incrustación	91
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>95</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>95</b>
5.1 Conclusiones	95

5.2 Recomendaciones	96
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>101</b>
Anexo I. Técnica de Análisis Cristalóptico	101
Anexo II. Resultados de las pruebas cristalópticas de las aguas analizadas	103
Anexo III. Memorias de congreso	105

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ejemplo de incrustación en las tuberías (Foto propia).	7
Ilustración 2. Ejemplos de Calcita (a), Aragonita (b) y Vaterita (c), (Dobersek y Goricanec, 2014).	8
Ilustración 3. Ejemplos de Corrosión en las tuberías, a) ataque general, b) localizada y c) galvánica (Nalco, 2009).	14
Ilustración 4. Fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad (Guerra <i>et al.</i> , 2008).	17
Ilustración 5. Rangos de pH (Hernández, 2014).	19
Ilustración 6. Diseño de un sistema de enfriamiento de un solo paso (Nalco, 2009).	30
Ilustración 7. Diseño de un sistema de enfriamiento cerrado de recirculación (Nalco, 2009).	30
Ilustración 8. Diseño de un sistema de enfriamiento abierto de recirculación (Nalco, 2009).	32
Ilustración 9. Representación del campo magnético y los vectores F y v (Wikipedia®, 2015).	34
Ilustración 10. Imagen de partículas precipitadas sin y con campo magnético (Cefalas <i>et al.</i> , 2008).	41
Ilustración 11. Método intrusivo. Imanes colocados en contacto con el agua (CNEA, 2011).	46
Ilustración 12. Método no intrusivo. Imanes colocados en la parte exterior de la tubería (CNEA, 2011).	46
Ilustración 13. Ubicación de un dispositivo magnético en calderas (CNEA, 2011).	49
Ilustración 14. Metodología experimental.	50
Ilustración 15. Esquema de diseño del montaje de los experimentos (Foto propia).	52
Ilustración 16. Dispositivos Magnéticos utilizados en la experimentación.	53
Ilustración 17. Montaje de los circuitos para la experimentación.	54
Ilustración 18. Fotos de los cristales del agua inicial, en aumento de 20x y 40x.	76
Ilustración 19. Seguimiento de la forma cristalina del CaCO <sub>3</sub> en los circuitos a) Blanco, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con una velocidad de 0.43 m/s, un caudal de 300 mL/min y un tiempo de contacto de 0.20 s, en aumento de 40X.	77
Ilustración 20. Seguimiento de la forma cristalina del CaCO <sub>3</sub> en los circuitos a) Blanco, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con una velocidad de 0.80 m/s, un caudal de 550 mL/min y un tiempo de contacto de 0.11 s, en aumento de 40x.	79
Ilustración 21. Imágenes del análisis MEB del material depositado en las resistencias y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000X.	81

**Ilustración 22.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en el fondo de los recipientes y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000X. \_\_\_\_\_ 82

**Ilustración 23.** Imágenes del análisis MEB del sobrenadante y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000X. \_\_\_\_\_ 84

**Ilustración 24.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en las resistencias y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000X. \_\_\_\_\_ 85

**Ilustración 25.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en el fondo de los recipientes y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000X. \_\_\_\_\_ 87

**Ilustración 26.** Imágenes del análisis MEB del sobrenadante y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000X. \_\_\_\_\_ 88

**Ilustración 27.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito F1-Blanco, con velocidad de 0.43 m/s. \_\_\_\_\_ 89

**Ilustración 28.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito A-Baja con velocidad de 0.43 m/s. \_\_\_\_\_ 90

**Ilustración 29.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito B-Alta, con velocidad de 0.43 m/s. \_\_\_\_\_ 90

**Ilustración 30.** Fotos de los testigos de incrustación al final de la experimentación. \_\_\_\_\_ 93

## Índice de Tablas

**Tabla 1.** Clasificación del agua de acuerdo a su dureza. \_\_\_\_\_ 16

**Tabla 2.** Rangos de Alcalinidad. \_\_\_\_\_ 18

**Tabla 3.** Interpretación del valor del Índice de Saturación de Langelier. \_\_\_\_\_ 22

**Tabla 4.** Interpretación del Índice de Estabilidad de Ryznar. \_\_\_\_\_ 23

**Tabla 5.** Conceptos básicos del campo magnético. \_\_\_\_\_ 35

**Tabla 6.** Características de los imanes permanentes. \_\_\_\_\_ 36

**Tabla 7.** Cambio en la concentración de cristales de calcita y aragonita vs campo magnético aplicado. \_\_\_\_\_ 40

**Tabla 8.** Intensidades de campo magnético aplicadas en diferentes investigaciones. \_\_\_\_\_ 43

**Tabla 9.** Efecto de la intensidad magnética, el tiempo de premagnetización y la velocidad de crecimiento de aragonita. \_\_\_\_\_ 44

**Tabla 10.** Influencia de la velocidad de flujo sobre  $t_s$  y  $t_n$ . \_\_\_\_\_ 44

**Tabla 11.** Variables de entrada en las dos etapas experimentales. \_\_\_\_\_ 51

Tabla 12. Propiedades físicas de las mangueras TYGON® LFL. _____	53
Tabla 13. Parámetros de análisis para la etapa experimental. _____	56
Tabla 14. ANOVA para el diseño factorial. _____	59
Tabla 15. Resultados de la caracterización de aguas para seleccionar la muestra. _____	63
Tabla 16. Calidad del agua al inicio y final de la experimentación. _____	65
Tabla 17. Resultados del ANOVA para la Dureza de calcio. _____	71
Tabla 18. Resultados del ANOVA para la Dureza Carbonatada. _____	72
Tabla 19. Resultados del análisis de los testigos de incrustación. _____	92

## Índice de Gráficas

Gráfica 1. Solubilidad del carbonato de calcio en función del pH y la temperatura (Dobersek y Goricanec, 2014). _	20
Gráfica 2. Dureza total vs Tiempo con una dureza total inicial de 678 mg/L de CaCO <sub>3</sub> , utilizando dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	66
Gráfica 3. Dureza de calcio vs Tiempo con una dureza de calcio inicial de 583 mg/L de CaCO <sub>3</sub> , a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	66
Gráfica 4. Dureza Carbonatada vs Tiempo con una dureza carbonatada inicial de 279 mg/L de CaCO <sub>3</sub> , a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	67
Gráfica 5. Dureza No Carbonatada vs Tiempo con una dureza no carbonatada inicial de 431.5 mg/L de CaCO <sub>3</sub> a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	68
Gráfica 6. pH vs Tiempo con un pH inicial de 7.59 a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	69
Gráfica 7. Conductividad vs Tiempo con una conductividad inicial de 1,363 µs/cm a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D). _____	70
Gráfica 8. Diagrama de Pareto Estandarizado y gráfica de Interacción AB para la Dureza de Calcio. _____	72
Gráfica 9. Diagrama de Pareto Estandarizado y gráfica de Interacción AB para la Dureza Carbonatada. _____	73
Gráfica 10. pHs calculados vs tiempo. _____	74
Gráfica 11. Índice de Saturación de Langelier vs Tiempo. _____	74
Gráfica 12. Resultados de los testigos de incrustación fabricados con acero inoxidable. _____	92

**NOMENCLATURA**

A/C	Relación aragonita/calcita
A-Baja	Circuito con intensidad de 2,500 G con velocidad de 0.43 m/s
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alúmina
Al	Aluminio
ANOVA	Análisis de varianza
APHA	Asociación Americana de Salud Pública, Washington D.C.
B	Intensidad de Campo magnético
B-Alta	Circuito con intensidad de 5,000 G con velocidad de 0.43 m/s
Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal hidratada
Ca	Calcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
CaO	Cal viva u Óxido de calcio
C-Baja	Circuito con intensidad de 2,500 G con velocidad de 0.80 m/s
CE	Conductividad eléctrica
CGS	Sistema cegesimal de unidades
CIICAp	Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Cl	Cloro
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CNEA	Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Santiago de Cuba
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Carbonatos
D-Alta	Circuito con intensidad de 5,000 G con velocidad de 0.80 m/s
DT	Dureza total
EUA	Estados Unidos de América
F1-Blanco	Circuito sin campo magnético con velocidad de 0.43 m/s
F2-Blanco	Circuito sin campo magnético con velocidad de 0.80 m/s
Fe	Hierro
G	Gauss
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ácido carbónico
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorhídrico

HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bicarbonato
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ISL	Índice de saturación de Langelier
K	Constante de equilibrio
MEB	Microscopía electrónica de barrido
Mg	Magnesio
MHD	Magnetohidrodinámico
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de sodio (SOSA)
NaOH	Hidróxido de sodio
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitratos
°a	Grado americano de dureza de agua
°dH	Grado alemán de dureza de agua
°e	Grado inglés de dureza de agua
°f	Grado francés de dureza de agua
pH	Potencial de hidrógeno
pH <sub>s</sub>	pH de saturación
PVC	Cloruro de polivinilo
RSI	Índice de estabilidad de Ryznar
SDT	Sólidos disueltos totales
SI	Sistema Internacional de unidades
SiO <sub>2</sub>	Sílice
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfatos
SODA	Sulfato de sodio
SR	Solubilidad relativa
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
T	Tesla
TMA	Tratamiento magnético del agua
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de Morelos
VP	Velocidad de precipitación

## RESUMEN

Los problemas en las industrias derivados de las incrustaciones, principalmente en los sistemas de recirculación de agua, hacen necesario la implementación de nuevas tecnologías, basadas en procesos físicos mediante el uso de campo magnético. La investigación realizada en el presente trabajo, consistió en evaluar el efecto del campo magnético en un agua de pozo con alta dureza, simulando un circuito de enfriamiento y dar seguimiento a los cambios en la estructura cristalina del carbonato de calcio en el tiempo.

El experimento se realizó a escala laboratorio utilizando 6 circuitos de flujo continuo, 4 con campo magnético y 2 sin campo magnético (blancos) que operaron durante 60 días. El montaje de los experimentos, estuvo integrado por una bomba peristáltica para transportar el flujo y mantener una velocidad constante; una resistencia eléctrica para elevar la temperatura a 36°C y simular la temperatura de un circuito de enfriamiento; un recipiente de vidrio con un volumen útil de 9L; manguera tygon para la conducción del agua con una longitud total de 3.25 m; imanes de neodimio para obtener las intensidades de campo magnético colocados en el circuito de enfriamiento en posición ortogonal (campo magnético perpendicular al flujo del agua) y en atracción (polo norte- polo sur) y por último, se colocaron (sobre la manguera después de los imanes) dos testigos de incrustación uno de cobre y otro de acero inoxidable 304 con dimensiones de 3"x1/2"x1/16" cada uno, con el fin de determinar la cantidad de incrustación formada. Se operaron en dos etapas y las condiciones experimentales fueron: intensidades de campo magnético de 2,500 G (0.25 T) y 5,000 G (0.5 T), velocidad de flujo de 0.43 m/s y 0.80 m/s, caudal de 300 mL/min y 550 mL/min y tiempo de contacto de 0.20 s y 0.11 s. Los circuitos fueron alimentados con agua de pozo con alta dureza (678 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ). Durante los días de operación se monitorearon los cambios en las características del agua midiendo pH, conductividad, dureza total, dureza de calcio y alcalinidad. Se dio seguimiento a los cambios en la estructura del cristal del carbonato de calcio, mediante el análisis cristalóptico, la microscopia electrónica de barrido y la difracción de rayos X.

Los resultados de la calidad del agua, mostraron que el campo magnético no influyó en los cambios de los parámetros más importantes del agua. Los resultados obtenidos del análisis cristalóptico comprobaron que el campo magnético cambia la estructura cristalina del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de calcita a aragonita y que esta

transformación es mayor cuando se aumenta la intensidad de campo magnético. Los resultados de la microscopía electrónica de barrido mostraron una menor incrustación en los circuitos a los que se le aplicó un campo magnético comparado con el circuito sin campo magnético. Con los resultados de difracción de rayos X, se comprobó que la incrustación formada sobre la resistencia fue carbonato de calcio en su especie de calcita para el circuito sin campo magnético, mientras que en los circuitos con campo magnético se observó la presencia de aragonita como la especie dominante. Las pruebas para evaluar el grado de incrustación, mostraron que los testigos de acero inoxidable que estuvieron colocados en el agua sometida a tratamiento magnético se incrustaron en menor grado que los testigos que estuvieron sin tratamiento magnético.

### ABSTRACT

The industries problems arising from scale, mainly in water recirculation systems, make necessary the implementation of new technologies, based on physical processes through the use of magnetic field. The research carried out in the present work, consisted on evaluating the effect of the magnetic field in well water with high hardness, simulating a cooling circuit and to follow up with the changes in the crystal structure of the calcium carbonate, throughout time.

The experiment was carried out at laboratory scale, using six continuous flow circuits: four with magnetic field and another two without magnetic field (whites), which operated for sixty days. The experimental system, in which each circuit consisted of a peristaltic pump to transport the flow and maintain a constant speed, an electric resistance to raise the temperature to 36° C to simulate the temperature of a cooling circuit, a glass container with a useful volume of 9L, a Tygon pipe for water conduction with a total length of 3.25 m, Neodymium magnets to obtain the intensities of the magnetic field placed in the cooling circuit orthogonally (magnetic field perpendicular to the water flow), and attraction (pole north-south pole) and finally, were placed (on the pipe after the magnets) two blanks of embedding one of copper and another of 304 stainless steel with dimensions of 3"x1/2" x1/16" each, in order to determine the amount of formed scale. They were operated in two stages and the experimental conditions were: established using magnetic field strengths of 2,500 G (0.25 T) and 5,000 G (0.5 T); a flow rate of 0.43 m/s and 0.80 m/s; a flow of 300 mL/min and 550 mL/min; and a contact time of 0.20 s and 0.11 s. The circuits were fed

with high hardness well water (678 mg/L of  $\text{CaCO}_3$ ). During the operation days, changes in water characteristics, measuring pH, conductivity, total hardness, calcium hardness, and alkalinity. Follow-up was given to the changes in the crystal structure of the calcium carbonate, through the analysis crystalloptical, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction.

The results of the quality of the water showed that the magnetic field did not influence the changes of the most important parameters of water. The results obtained from the analysis crystalloptical proved that the magnetic field modifies the crystal structure of calcium carbonate, from calcite to aragonite and that this transformation is enhanced when the strength of the magnetic field is increased. The results of the scanning electron microscopy (SEM) showed less incrustation on the circuits to which a magnetic field was applied, compared to the circuit without a magnetic field. With the results of X-ray diffraction, it was found that the scaling formed on the resistance was calcium carbonate in your species of calcite for the circuit without magnetic field, while in the circuits with magnetic field was observed the presence of aragonite as the dominant species. Tests to evaluate the degree of scaling showed that the witnesses of stainless steel that were placed in the water subjected to magnetic treatment were embedded in a lesser degree than the blanks who were without magnetic treatment.

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

El carbonato de calcio es uno de los compuestos que causa mayores problemas de incrustación en los sistemas de conducción de agua. Este compuesto existe en forma natural en tres diferentes formas cristalinas: calcita, aragonita y vaterita. Su reducción es obligatoria en muchas fuentes de abastecimiento y en los sistemas de enfriamiento y de generación de vapor. Su tratamiento tradicional es por procesos químicos como son: el uso de inhibidores de incrustación y la remoción de dureza por medio de los procesos de cal-carbonato, intercambio iónico o el uso de tecnología con membranas (Coey y Cass, 2000). Sin embargo, estos presentan muchos inconvenientes como son: el suministro de reactivos químicos es muy costoso, la constante supervisión y mantenimientos que se deben de realizar para asegurar el acondicionamiento apropiado del agua. Los reactivos químicos pueden ser dañinos para los usuarios o para el medio ambiente cuando en los procesos se presentan derrames o descargas del fluido y pueden incurrir en caídas de presión indeseadas, incrementándose el consumo energético. Además, de las constantes interrupciones para la limpieza química de las instalaciones. Estas, por un lado encarecen el proceso debido a las necesarias paradas y, por otro lado, conllevan a la corrosión de las tuberías, causada por la adición de reactivos como el ácido clorhídrico (Del Toro y Berenguer, 2001).

Debido a los grandes inconvenientes que se presentan al utilizar tratamientos químicos, se han estudiado tecnologías basadas en métodos físicos para el tratamiento del agua de uso industrial o de consumo. Durante más de 100 años, países como Reino Unido, Rusia, Estados Unidos, Cuba y Japón, han realizados estudios utilizando el campo magnético como método anticrustante, con el fin de buscar nuevas tecnologías para remover o prevenir las incrustaciones. Las investigaciones sobre la aplicación de un campo magnético sobre la dureza carbonatada muestran un efecto sobre la estructura cristalina del carbonato de calcio, propiciando la nucleación de otras formas cristalinas diferente a la original, principalmente de calcita a aragonita, la cual no precipita en las paredes de las tuberías y equipos sino que permanece en la corriente del fluido y se deposita posteriormente formando una incrustación suave y de fácil remoción. También puede cambiar el tamaño de los cristales y su forma de agrupación, la porosidad y la densidad de los mismos (Cefalas *et al.*, 2008).

El uso del campo magnético en el tratamiento del agua, no es una tecnología realmente nueva, ya que data de los años 1300, cuando De Gersoise, un médico francés, encontró propiedades medicinales en el agua sometida al campo magnético. Actualmente el campo magnético se aplica al agua con diferentes propósitos y aplicaciones, por ejemplo: prevenir o retardar la formación de depósitos o incrustaciones, inactivar microorganismos patógenos, mejorar el tratamiento biológico del agua, degradar sustancias orgánicas o remover sustancias inorgánicas, etc. Se promueve también el uso del agua después de aplicar un campo magnético para mejorar el crecimiento y la calidad de los cultivos y también se estudia con éxito sus efectos en la salud humana y de los animales.

Este es un tratamiento de bajo costo; sin embargo, su uso ha sido cuestionado debido al poco entendimiento sobre los mecanismos que ayudan a prevenir o inhibir las incrustaciones y a la falta de parámetros de diseño que definan la forma en que se deben fabricar los dispositivos para su aplicación. El tratamiento del agua utilizando un campo magnético ocupa la atención de muchos investigadores, lo cual se aprecia por la gran cantidad de artículos científicos que se publican anualmente. En las décadas pasadas se cuestionaba mucho su aplicación al no tener claros sus efectos y los mecanismos que se llevan a cabo al interactuar el agua y el campo magnético. Actualmente la investigación ha demostrado que los mecanismos se explican por medio de la magnetohidrodinámica, la magnetoquímica y la mecánica cuántica (Cefalas *et al.* 2008).

El estudio del campo magnético es fascinante, vivimos en el planeta Tierra donde estamos rodeados de campos magnéticos naturales y artificiales con los cuales interaccionamos diariamente y que puede tener para nosotros muchos efectos positivos; pero también negativos.

## 1.1 Justificación

La dureza del agua es la principal causa de la formación de incrustaciones. En la industria, esto provoca muchos problemas en los sistemas de generación de vapor y torres de enfriamiento, debido a que se reduce el diámetro interno de las tuberías, lo cual afecta la transferencia de calor en los equipos de generación de vapor, se incrementan los costos de operación y mantenimiento, entre otros. Es por esto, la importancia del estudio de nuevas tecnologías que ayuden a reducir o prevenir la formación de incrustaciones en los sistemas de conducción del agua.

Como una alternativa para solucionar esta problemática se encuentra el uso del campo magnético, el cual cuenta con muchas ventajas como un método anticrustante, como son (Banejad y Abdosalehi, 2009):

- Evita la contaminación del medio ambiente, ya que no se necesita adicionar nada al agua.
- Reduce el consumo de energía, en el caso de los imanes permanentes porque ellos la entregan libremente.
- Ahorros en el consumo de agua.
- Elimina costos de compra de reactivos químicos.
- Reduce la necesidad del periodo de limpieza con ácidos.
- Aumenta la protección contra el sistema de corrosión.
- Alarga la vida útil de los equipos de fluido en movimiento.
- Elimina el costo de operación continua en comparación con un tratamiento químico.
- Los dispositivos magnéticos son de fácil instalación.

Sin embargo, a pesar de sus grandes ventajas y de los artículos publicados por muchos investigadores, aun no se cuenta con parámetros de diseño o de operación para utilizar esta tecnología. Además, la mayor parte de las investigaciones reportadas, se han realizado utilizando agua sintética en sus experimentos, lo que provoca que los resultados no sean reproducibles o representativos al llevar esta tecnología a escala real.

Este trabajo de investigación, utilizará un agua natural para la realización del mismo. Con el objetivo de observar y analizar los mecanismos que se llevan a cabo al utilizar el campo magnético sobre un agua con alta dureza y que sirva como base a futuras investigaciones.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estudiar el efecto del campo magnético sobre la formación de incrustación en los circuitos de agua utilizando imanes permanentes y agua de pozo con alta dureza.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del campo magnético sobre la dureza de carbonato de calcio y sus transformaciones cristalinas.
- Evaluar el efecto del campo magnético sobre la calidad de agua.
- Estimar la formación de incrustación utilizando testigos de incrustación.

### 1.3 Hipótesis

Aplicar una intensidad de campo magnético de 5,000 G, disminuye la formación de incrustación causada por el carbonato de calcio en los sistemas de conducción de agua.

### 1.4 Alcances

Usar un agua natural de pozo con alta dureza en todos los experimentos. Los experimentos de esta investigación solo se realizarán a nivel laboratorio. Se operarán seis circuitos en sistema continuó, simulando una torre de enfriamiento, debido a que es donde normalmente se generan problemas de incrustaciones.

El tratamiento que se le dará al agua, es utilizar el campo magnético como método anticrustante, usando imanes de neodimio con intensidades de 2,500 G (0.25 T) y 5,000 G (0.5 T).

La experimentación se dividirá en dos etapas, donde se variará la velocidad de flujo: 0.43 m/s en la primer etapa y 0.80 m/s en la segunda etapa, con la finalidad de conocer si la velocidad es un factor importante en la formación y/o disminución de la incrustación en los sistemas de conducción de agua.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Problemática

Es evidente que la tendencia del agua a formar incrustaciones en las paredes de las tuberías tiene consecuencias negativas, tanto para la economía como para el medio ambiente, además de provocar inconvenientes en el desarrollo de cualquier proceso, disminuyendo el rendimiento de su trabajo. El principal peligro de presencia de incrustación radica en las tuberías con alta temperatura, donde existe un sobrecalentamiento que conduce a su ruptura, por la inadecuada circulación del agua a través de las mismas.

Las incrustaciones en las superficies de transferencia de calor tienen una composición química, una estructura, una densidad y un coeficiente de conductividad térmica variado. En las calderas, por lo general, se forman sedimentos alcalinos como: los carbonatos formados principalmente por calcio y magnesio; los sulfatos compuestos fundamentalmente por calcio y magnesio; y los silicatos constituidos fundamentalmente por calcio (Viltre *et al.*, 1999).

En la operación de los sistemas de enfriamiento, la incrustación sobre la superficie de los equipos de intercambio de calor puede ocasionar dos fenómenos:

- **Cristalización** de una sal moderadamente soluble sobre la superficie de contacto como resultado de temperaturas elevadas (por ejemplo: sales con solubilidad inversa).
- **Precipitación** en el agua de una sal moderadamente soluble, como el carbonato de calcio y sedimentación del precipitado. Este precipitado se asienta en las líneas de las tuberías o sobre los intercambiadores de calor.

Las principales sales que precipitan son: carbonato de calcio, sulfato de calcio, silicato de magnesio, silicato de calcio, fosfato de calcio y óxidos o hidróxidos de fierro.

### 2.1.1 Formación de agua dura

De forma natural, al pasar el agua a su fase de vapor deja atrás todos los minerales que se encuentran en ella obteniéndose así la denominada agua blanda. Luego de condensarse, cae en forma de lluvia encontrando a su paso por la atmósfera al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con el cual reacciona para formar el ácido carbónico. Cuando el agua llega al suelo, comienza a fluir y al hacer contacto con la superficie de rocas calizas y dolomitas, se disuelven sales como carbonatos de calcio y magnesio, entre otras. En la misma medida que el agua continúa su curso por las capas del suelo, va incorporando cantidades adicionales de estos minerales haciéndose cada vez más dura, pero de forma más lenta debido a que su tensión superficial aumenta y, por lo tanto, disminuye su habilidad para disolverlos en su seno. La dureza que el agua alcance dependerá del tiempo al cual esté expuesta sobre la superficie de las rocas. Por lo tanto, el agua más dura se encontrará en pozos profundos y en reservorios (Del Toro y Berenguer, 2001).

La dureza se debe principalmente a la presencia de sales de calcio y magnesio, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos. También causan dureza en el agua el hierro, aluminio y manganeso, pero por lo regular estas sustancias se encuentran en cantidades muy bajas. Los carbonatos normalmente se encuentran en aguas sumamente alcalinas. Los nitratos están presentes usualmente en pequeñas cantidades y, en promedio, los sulfatos exceden a los cloruros. La dureza suele clasificarse en dureza carbonatada o temporal y en dureza no carbonatada o permanente.

### 2.1.2 Mecanismo de formación de incrustación

Al hacer fluir el agua por las tuberías de instalaciones intercambiadoras de calor y equipos de sistemas de conducción de agua, las condiciones ya son favorables para que los minerales se mantengan disueltos, sin embargo, debido a factores que causan su sobresaturación y posterior precipitación como: aumento de la presión, incremento en la temperatura y aumento del pH de la solución, hacen que los bicarbonatos de calcio que alguna vez fueron solubles se descompongan por la acción del calor, convirtiéndose en carbonatos insolubles, los cuales precipitan y se adhieren fuertemente a las paredes de la tubería. Posteriormente, se crea una capa aislante de difícil remoción, esto es, la formación de la incrustación. Aunque el  $\text{CaCO}_3$  forma la mayor parte de las incrustaciones, se requiere de otros componentes como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para que actúen como agentes de cementación y se retengan sobre las paredes (Del Toro y Berenguer, 2001).

La Ilustración 1, muestra un ejemplo claro de problemas de incrustación en las tuberías. Los depósitos incrustados generalmente se forman como resultado de la cristalización y precipitación de las sales presentes en el agua.



**Ilustración 1.** Ejemplo de incrustación en las tuberías (Foto propia).

Como se mencionó anteriormente, el carbonato de calcio es uno de los compuestos que causa mayores problemas de incrustación en los sistemas de conducción de agua. El cual existe de forma natural en tres diferentes estructuras cristalinas con la misma fórmula química ( $\text{CaCO}_3$ ), como se muestra en la Ilustración 2 (Dobersek y Goricanec, 2014):

- **Calcita.-** Tiene una estructura romboédrica-hexagonal es la forma más estable a condiciones normales y es también la forma más común encontrada en la naturaleza. Los cristales romboédricos tienen grandes áreas de conexión y es por eso que la capa que forman es más densa.
- **Aragonita.-** Es la que tiene menor simetría con estructura ortorómbica en forma de agujas con revestimientos menos densos.
- **Vaterita.-** Es la forma menos estable y casi nunca se presenta. Esta forma cristalina eventualmente sufre una transición de fase a aragonita o a calcita.



a)

b)

c)

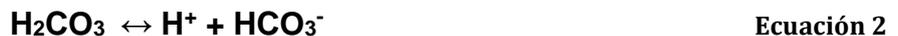
**Ilustración 2.** Ejemplos de Calcita (a), Aragonita (b) y Vaterita (c), (Dobersek y Goricanec, 2014).

El producto de solubilidad es aproximadamente a  $4.5 \times 10^{-9}$  y  $6.0 \times 10^{-9}$  para calcita y aragonita, respectivamente, a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, la sobresaturación relativa con respecto a la calcita o aragonita en la misma solución es diferente (Meng-Chun y Clifford, 2010).

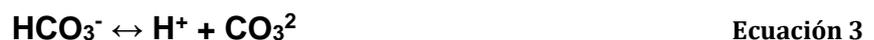
La formación del carbonato de calcio radica en que el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{CO}_3^{2-}$  siempre están presentes en el agua natural. Con el  $\text{CO}_2$  del aire disuelto en el agua, se forma el ácido carbónico:



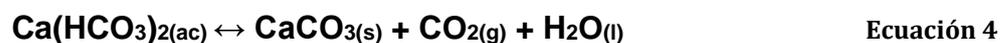
El ácido formado se disocia en dos pasos: primero, se libera un hidrógeno y se forma un ión bicarbonato:



Segundo, se libera el otro hidrógeno y se forma un ión carbonato:



Los iones del carbonato reaccionan con los iones de calcio y como el carbonato de calcio es muy poco soluble se precipita de acuerdo a la siguiente reacción de equilibrio:



Si en equilibrio se aumenta la concentración de  $\text{CO}_2$ , la reacción se desplazará hacia la izquierda, lo que significa que el  $\text{CaCO}_3$  se disolverá y el pH se incrementará. Mediante la adición de sustancias alcalinas al sistema, la concentración  $\text{H}^+$  se reducirá, lo que significa que la reacción se moverá hacia a la derecha, más iones de carbonatos serán formados y debido a esto más  $\text{CaCO}_3$  será precipitado. Cuando existen cambios de temperatura, la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  cambia. Dentro de un rango de pH menor a 9, la solubilidad del

$\text{CaCO}_3$  baja al aumentar la temperatura; y en un pH mayor a 9, la solubilidad aumenta al aumentar la temperatura (Dobersek y Goricanec, 2014).

Una vez que las condiciones son adecuadas para la precipitación, la formación de un depósito incrustante se lleva a cabo en varias etapas. Inicialmente los iones presentes en una solución se asocian como pares de iones disueltos para formar una molécula (estos iones son dependientes de la constante de equilibrio  $K$ ). Las moléculas se combinan en un enlace débil, pero con arreglo ordenado para formar una red que determina la forma del cristal. Un enlace más fuerte se produce al combinarse varios miles de moléculas formando el núcleo o semilla que actúa como sitio de crecimiento, a esta etapa se le conoce como **nucleación**. De acuerdo a la literatura, existen tres mecanismos de nucleación: nucleación homogénea, nucleación heterogénea y nucleación secundaria. La nucleación homogénea es el resultado únicamente del crecimiento de cristales en el seno de la solución, como un resultado del incremento en la solubilidad relativa. En la nucleación heterogénea se presenta la aparición de cristales y desarrollo de los mismos sobre paredes o superficies en contacto con el agua, donde los cationes funcionan como un átomo central y se coordinan con los aniones en solución. El crecimiento de los cristales está gobernado por la difusión de partículas a la superficie de un cristal en crecimiento y su incorporación en la estructura cristalina. Y la nucleación secundaria se refiere a la nucleación inducida por la presencia de cristales en el seno de la solución (Espinosa, 2001).

La **cristalización** es la formación de cristales sólidos precipitados en la solución. El proceso de cristalización consiste en dos pasos principales: nucleación y crecimiento del cristal. La nucleación es el paso donde las moléculas del soluto dispersas en el solvente comienzan a agruparse a escala nanométrica, que llegan a ser estables bajo las condiciones de operación actual. Estos grupos estables constituyen los núcleos, sin embargo, cuando los grupos no son estables se disuelven. Por lo tanto, las agrupaciones necesitan alcanzar un tamaño crítico con el fin de convertirse en un núcleo estable. Tal tamaño crítico es dictado por las condiciones de operación, principalmente, por la temperatura y sobresaturación. Es en la etapa de nucleación donde los átomos están organizados de manera definida y periódica, que definen la estructura del cristal. Por lo que el crecimiento del cristal es subsecuente al crecimiento de los núcleos que logran alcanzar el tamaño crítico de las agrupaciones.

La nucleación y crecimiento siguen ocurriendo simultáneamente mientras exista la sobresaturación. La sobresaturación es la fuerza motriz de la cristalización, por lo que, la velocidad de nucleación y crecimiento son accionados por la sobresaturación existente en la solución. Una vez que la sobresaturación se agota, el sistema sólido/líquido alcanza el equilibrio y la cristalización se completa a menos que se modifiquen las condiciones de operación (Zarga *et al.*, 2013).

La velocidad con que se depositan las partículas y su cohesión a las superficies es proporcional a la fuerza y al tipo de enlace químico entre las partículas y la superficie, los cuales dependen principalmente de la composición química de las partículas, del potencial electrocinético de los aglomerados en el punto de nucleación, del tipo y rugosidad de las superficies, de la presencia de modificadores del crecimiento del cristal y del tratamiento de la superficie. Por otra parte, la fuerza del enlace químico de las nanopartículas del cristal de estructura química similar depende de su simetría (grupo de puntos cristalográficos). La etapa inicial de la nucleación es crucial para manejar la reacción hacia una cierta dirección y formar la semilla del cristal, en la cual los productos de la incrustación podrán aglomerarse en forma cristalina (Espinosa, 2001).

### 2.1.3 Cinética de la precipitación

En un sistema químico saturado de carbonato de calcio pudiera no haber precipitado aunque la solubilidad relativa sea mayor que 1 ( $SR_{CaCO_3} > 1$ ). Esto se debe a que la SR solo indica el grado de saturación de la solución, pero no indica la velocidad de precipitación (VP) del mineral. Cuando se logra las condiciones termodinámicas para la precipitación ( $SR > 1$ ), todavía tiene que transcurrir un tiempo (tiempo de inducción) para que la precipitación comience. Este tiempo de inducción (cinética de la reacción de precipitación) depende de otros parámetros. Para sistemas sobresaturados ( $SR > 1$ ), la precipitación puede ocurrir por dos mecanismos: nucleación y crecimiento de cristales.

Cuando los niveles de saturación son mayores a 1, se da el mecanismo de nucleación para la precipitación del mineral. Esto es muy común que ocurra en sistemas de enfriamiento industriales. Cuando se presenta la nucleación, es difícil distinguir entre los tres mecanismos de nucleación (homogénea, heterogénea y secundaria), pero con la ecuación 5 se puede realizar una aproximación si se considera un solo mecanismo general de nucleación (Espinosa, 2001):

$$VP_N = K_T V (SR - 1)^n$$

Ecuación 5

donde:

$VP_N$ : es la velocidad de precipitación debido a cualquiera de los tres mecanismos de nucleación.

$K_T$ : es una constante dependiente de la temperatura

$V$ : es el volumen

$SR$ : es la solubilidad relativa

$n$ : es una constante

La velocidad de precipitación debida al crecimiento de cristales ( $VP_C$ ), se expresa como:

$$VP_C = K_T \alpha CV (SR - 1)$$

Ecuación 6

donde:

$VP_C$ : es la velocidad de precipitación debido al crecimiento de cristales.

$K_T$ : es una constante dependiente de la temperatura.

$\alpha$ : es el área del cristal.

$C$ : es la concentración de cristales.

$V$ : es el volumen.

$SR$ : es la solubilidad relativa.

#### 2.1.4 Tipos de incrustación

La composición de las incrustaciones es tan variada como la naturaleza de las aguas que las producen. Entre las más comunes se encuentran:

- **Carbonato de calcio.**- Es el principal constituyente de la piedra caliza, siendo bastante insoluble en agua. A elevadas temperaturas y presiones, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye. Produce un tipo de incrustación difícil de remover sobre las paredes de los equipos que están en contacto con el agua.
- **Cloruro de calcio.**- Se localiza en salmueras naturales, depósitos salinos, etc. Esta sal es altamente soluble en agua. En los sistemas de generación de vapor la presencia de cloruro de calcio es altamente corrosiva.

- **Sulfato de calcio.-** Se presenta en diferentes minerales debido a su baja solubilidad a temperaturas elevadas y a que produce una incrustación dura y adherente. No se pueden tolerar grandes cantidades de esta sal en los sistemas de enfriamiento y su presencia en las calderas debe ser nula.
- **Carbonato de magnesio.-** Se encuentra presente en el agua de mar en concentraciones de 1300 ppm. Los ríos contienen aproximadamente 4 ppm de magnesio. Los iones de calcio y magnesio forman precipitados de sales insolubles que causan incrustaciones en las tuberías.
- **Cloruro de magnesio.-** Se localiza en el agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos, etc. Se presenta en la naturaleza bajo la forma de diferentes minerales. Es bastante soluble en agua.
- **Sílice.-** En todos los suministros de agua naturales se encuentra presente en cantidades variables, dependiendo de la procedencia del agua. La sílice es una impureza perjudicial en las calderas de alta presión y en los sistemas de enfriamiento en donde presenta tendencia a depositarse. Las incrustaciones producidas son adherentes y muy duras, de aspectos vidriados y difíciles de remover. Su conductividad térmica es usualmente baja y produce fallas en las tuberías aun cuando haya una pequeña costra.
- **Sólidos suspendidos.-** Se refiere al material insoluble que puede estar suspendido en el agua y cuya naturaleza es heterogénea. Estas impurezas pueden ser de origen inorgánico como las arcillas, carbonato de calcio, sílice, hidróxido férrico, azufre, etc., pueden ser de naturaleza orgánica como algas, bacterias, materia vegetal finamente dividida como aceites. Todo este material produce una disminución de la claridad del agua que se denomina turbidez. Las aguas que contienen cantidades apreciables de sólidos en suspensión no se utilizan en las torres de enfriamiento, debido a que originan depósitos de lodos dentro del equipo y pueden favorecer que el agua produzca espuma e incruste, para ello se requiere la eliminación de esta materia en suspensión por medios físicos como sedimentación o filtración y por medios químicos como coagulación.

### 2.1.5 Corrosión y tipos de corrosión

La corrosión es un proceso electroquímico por el cual un metal vuelve a su estado de óxido natural. Por ejemplo, un acero suave (tipo de acero que es más suave que el

promedio debido a la menor proporción de carbono presente) es un metal usado comúnmente en sistemas de refrigeración de agua que es muy susceptible a la corrosión. La corrosión causa pérdida en el espesor del metal o incluso penetración de las paredes del tubo que puede causar fugas de fluidos. Tal corrosión es un proceso espontáneo que denota la existencia de un ánodo, un cátodo y un electrolito, siendo imprescindible la presencia de estos tres elementos para que la corrosión pueda existir. Los iones metálicos se disuelven en el electrolito (agua) en el ánodo. Las partículas cargadas eléctricamente (electrones) se quedan atrás. Estos electrones fluyen a través del metal a otros puntos (cátodos) donde se producen reacciones de electrones lentos. El resultado de esta actividad es la pérdida de metal y a menudo la formación de un depósito.

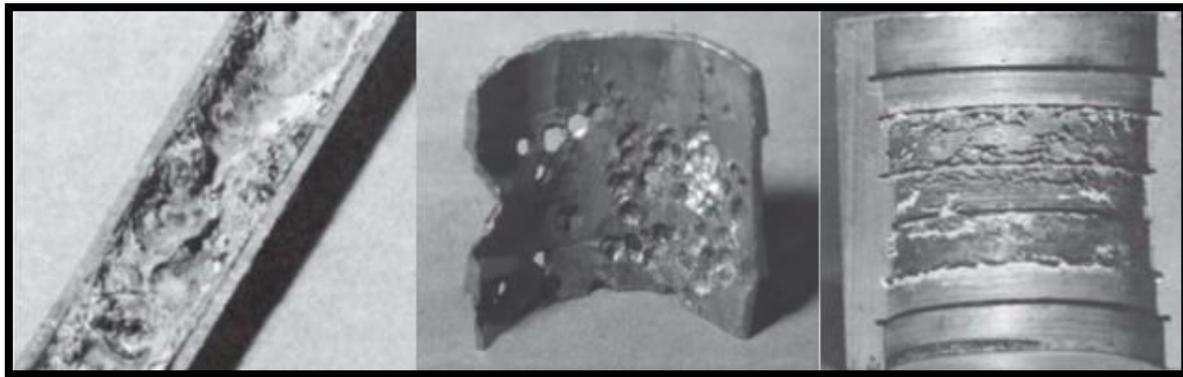
Por lo regular, los metales como el cobre, aleaciones de aluminio y el acero inoxidable se corroen más lentamente que el acero suave. Sin embargo, en algunas aguas, estos metales pueden estar sujetos a una corrosión severa localizada o un ataque de picaduras. Además, los gases disueltos, tales como sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) o amoníaco ( $NH_3$ ) son con frecuencia más destructivos a estos metales que al acero suave.

Existen diferentes tipos de corrosión; en la Ilustración 3, se muestran ejemplos de los tres tipos de corrosión más comunes como son:

- **Ataque general.-** Existe cuando la corrosión se distribuye uniformemente a lo largo de la superficie metálica. Una cantidad considerable de óxido de hierro es producida por un ataque generalizado que contribuye a problemas de ensuciamiento y reduce la eficiencia del sistema.
- **Localizada o picaduras.-** Existe cuando solo unas pequeñas áreas de metal se corroen. Las picaduras es la forma de corrosión más grave debido a la acción concentrada en un área pequeña y pueden perforar el metal en un corto periodo de tiempo.
- **Galvánica.-** Esta puede ocurrir cuando dos metales diferentes están en contacto. El metal más activo corroe rápidamente. Los ejemplos más comunes en los sistemas de agua son: el acero y latón; aluminio y acero; y el zinc y acero.

Los factores más importantes de las características del agua que pueden ocasionar corrosión son: el oxígeno y otros gases disueltos, los sólidos disueltos y suspendidos, la

alcalinidad o acidez (pH), la velocidad, la temperatura y la actividad microbiana (Nalco, 2009).



a)

b)

c)

**Ilustración 3.** Ejemplos de Corrosión en las tuberías, a) ataque general, b) localizada y c) galvánica (Nalco, 2009).

### 2.1.6 Diferencias entre incrustación y corrosión

La incrustación es la precipitación de material denso adherente sobre las superficies de las tuberías, generalmente formados por la cristalización y precipitación de las sales que contiene el agua. Mientras que la corrosión es la destrucción del metal por medio de una reacción electroquímica con el medio ambiente.

Los sistemas de distribución de agua para uso industrial y de consumo humano suelen sufrir importantes problemas de incrustación o corrosión interna y/o externa. La corrosión interna provoca el deterioro de la calidad del agua debido a los productos y contaminantes que se generan, disminuye el desempeño hidráulico y aumenta los costos de distribución y de mantenimiento de la red. En casos extremos, parte de la infraestructura queda inhabilitada temporalmente y por ende, se suspende el suministro. Los fenómenos de corrosión y de incrustación, están relacionados directamente con las características fisicoquímicas del agua, su velocidad y tiempo de retención hidráulica, así como del material con el que el agua está en contacto. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión. Concentraciones bajas de alcalinidad favorecen la solubilidad del  $\text{CO}_2$ , incrementando la agresividad de las aguas (Trujillo *et al.*, 2008).

En México, para reducir las posibilidades de incrustación y/o corrosión en los sistemas de distribución de agua, la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1994a, 1994b) recomienda

que los materiales mantengan una película de  $\text{CaCO}_3$ , asimismo, para evaluar la tendencia agresiva del agua, considera el uso de los siguientes índices: de saturación de Langelier, de estabilidad de Ryznar, de agresividad, de corrosión de Riddick, y de fuerza de conducción de Mc Cauley. De entre ellos, los índices de Langelier y Ryznar son los más utilizados.

## **2.2 Parámetros del agua relacionados con la formación de incrustación**

La incrustación se forma cuando los iones disueltos en el agua superan la solubilidad de un determinado mineral. Existen cuatro factores principales para determinar si un agua es o no incrustante, los cuales son: la dureza del agua, la alcalinidad o acidez, el pH y la temperatura. Algunas veces, la presencia de otros materiales disueltos (como sólidos disueltos totales) puede propiciar o no la formación de incrustaciones y/o corrosión mediante el aumento de la conductividad eléctrica del agua (Nalco, 2009).

### **2.2.1 Dureza del agua**

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor (NMX-AA-072-SCFI-2001). La dureza del agua puede clasificarse en dureza temporal (carbonatada) y dureza permanente (no carbonatada).

La dureza temporal se debe a los bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio, principalmente. Se caracteriza debido a que su ablandamiento se logra con la ebullición del agua. El carbonato de calcio es menos soluble en agua caliente que en agua fría, así que al hervir se precipitará el bicarbonato de calcio fuera de la solución, dejando el agua menos dura. Los carbonatos pueden precipitar cuando la concentración de ácido carbónico disminuye, con lo que la dureza temporal disminuye, y si el ácido carbónico aumenta puede aumentar la solubilidad de los carbonatos; como piedras calizas, con lo que la dureza temporal aumenta. Todo esto está en relación con el pH de equilibrio de la calcita y con la alcalinidad de los carbonatos.

La dureza permanente la forma la combinación de iones de calcio y magnesio con iones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). La dureza permanente no puede eliminarse al hervir el agua. Se elimina utilizando el método SODA (Sulfato de sodio).

El grado de dureza es una medida de la concentración total en peso, del contenido de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , expresada como equivalente de carbonato de calcio, debido a que es el principal causante de las incrustaciones y usualmente es medida en partes por millón o miligramos por litro. Existen diferentes grados de dureza para estimarla como: americanos, franceses, alemanes e ingleses que a continuación se mencionan con sus equivalencias en mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (Rodríguez, 2010):

- **Grado americano (°a):** Equivale a 17.2 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  de agua.
- **Grado francés (°f):** Equivale a 10.0 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  de agua.
- **Grado alemán (Deutsche Harte, °dH):** Equivale a 17.9 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  de agua.
- **Grado inglés (°e) o grado Clark:** Equivale a 14.3 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  de agua.

Existen diversas clasificaciones de dureza del agua. En la Tabla 1, se muestra una clasificación de dureza del agua con sus correspondientes valores en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Tabla 1. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza.

CLASIFICACIÓN	DUREZA (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )
BLANDAS	0 - 75
MODERADAMENTE DURA	75 - 150
DURA	150 - 300
MUY DURA	Mayor a 300
Fuente: (Kiely, 1999)	

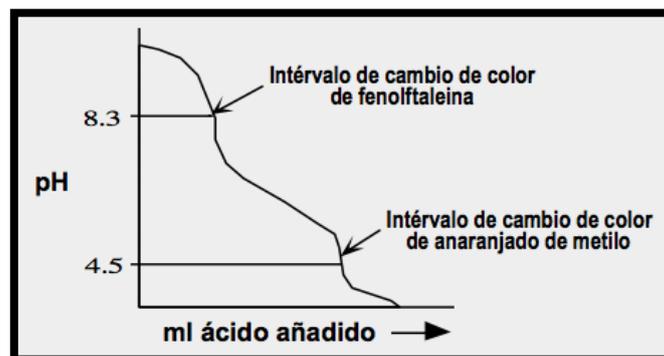
Los valores altos de dureza por lo general, se asocian con la tendencia del agua a formar incrustaciones. Existen programas químicos diseñados para evitar las incrustaciones, estos solo pueden funcionar cuando la dureza permanece dentro de los rangos especificados. Algunos programas de control de corrosión requieren de ciertos valores de dureza para que funcionen correctamente como inhibidores de la corrosión, por lo que es importante asegurarse de que los valores de dureza no sean demasiados bajos para estos programas.

### 2.2.2 Alcalinidad o acidez

La alcalinidad en el agua juega un papel clave, debido a que actúa como amortiguadora a los cambios de acidez o basicidad.

**La alcalinidad** es la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. La alcalinidad se expresa como alcalinidad a la fenolftaleína y la alcalinidad al anaranjado de metilo o alcalinidad total. Estas caracterizaciones se deben a los virajes o cambios de color de estos indicadores al llegar al punto final en la determinación por titulación con un ácido mineral fuerte ( $H_2SO_4$  o  $HCl$ ). La titulación para la determinación de la alcalinidad se hace en dos fases: en la primera fase se mide la alcalinidad a la fenolftaleína, titulando la muestra hasta un pH de 8.3 y en la segunda, se determina la alcalinidad al anaranjado de metilo o la alcalinidad total, titulando la muestra hasta un pH de 4.5. En la Ilustración 4, se representan estas fases en la titulación del agua para conocer las alcalinidades a la fenolftaleína y total. Puede observarse que a medida que se añade ácido, se produce una caída lenta del pH hasta llegar a 8.5 y a partir de aquí una caída rápida del pH, con una inflexión (no muy bien definida) alrededor del punto de pH 8.3. Es aquí donde los iones de carbonato se transforman a iones de bicarbonatos y el color de la fenolftaleína pasará del rosa al incoloro. Al ir añadiendo más ácido, el pH irá disminuyendo hasta alcanzar otro punto de inflexión en el entorno del pH de 4.5, donde los iones bicarbonatos se convierten en  $CO_2$ . El color del indicador anaranjado de metilo, pasará de amarillento al rosa pálido (Guerra *et al.*, 2008).

Cuando un agua superficial presenta alcalinidad a la fenolftaleína, es un indicio de que el agua está contaminada, ya que un agua natural no debe tener hidróxidos. Existen diferentes rangos de alcalinidad, la Tabla 2, muestra la clasificación de la alcalinidad en mg/L de  $CaCO_3$ .



**Ilustración 4.** Fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad (Guerra *et al.*, 2008).

Tabla 2. Rangos de Alcalinidad.

CLASIFICACIÓN	ALCALINIDAD (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )
BAJA	< 75
MEDIA	75 - 150
ALTA	> 150
Fuente: (Kemmer, 1989)	

**La acidez** de un agua es su capacidad de donar protones. La acidez total es la capacidad cuantitativa de una muestra de agua para reaccionar con una base fuerte de concentración perfectamente conocida hasta un pH de 8.3, incluye la acidez provocada por ácidos fuertes, débiles, sales ácidas y dióxido de carbono (método potenciométrico). Una medida de la acidez total del medio es la cantidad de base fuerte que es necesario añadir a una muestra para llevar el pH a un valor predeterminado coincidente con el vire de la fenolftaleína (método colorimétrico). Se refiere a la presencia de sustancias disociables en agua y que como producto de disociación generan el ión hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), como son los ácidos fuertes, ácidos débiles y de fuerza media; también la presencia de ciertos cationes metálicos como el Fe (III) y el Al (III) contribuyen a la acidez del medio (NMX-AA-036-SCFI-2001).

### 2.2.3 pH

El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución. El químico Danés Sorensen originalmente definió el pH como el logaritmo negativo de la concentración del ión hidrógeno de acuerdo a la ecuación 7. Los valores de pH están comprendidos en una escala de 0 a 14 (ver Ilustración 5), el valor medio es 7, el cual corresponde a una solución neutra; los valores que se encuentran por debajo de 7 indican las soluciones ácidas y valores por encima de 7 corresponde a las soluciones básicas o alcalinas. Debido a que el pH indica la medida de la concentración del ión hidronio en una solución, se puede afirmar entonces, que a mayor valor de pH, menor concentración de hidrógeno y menor acidez en la solución. Se debe tener presente que la concentración de iones de hidrogeno es una función logarítmica por lo que un valor de pH corresponde a una concentración de iones de hidrógeno más grande que la continua; es decir, un pH de 4 contiene diez veces más hidrógeno que una concentración con pH=5 y este a su vez tiene diez veces más que un pH=6 y así sucesivamente. La solución que contenga un gramo de iones de hidrógeno por litro será normal y tendrá un pH=0 (Gary, 1981).

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Ecuación 7

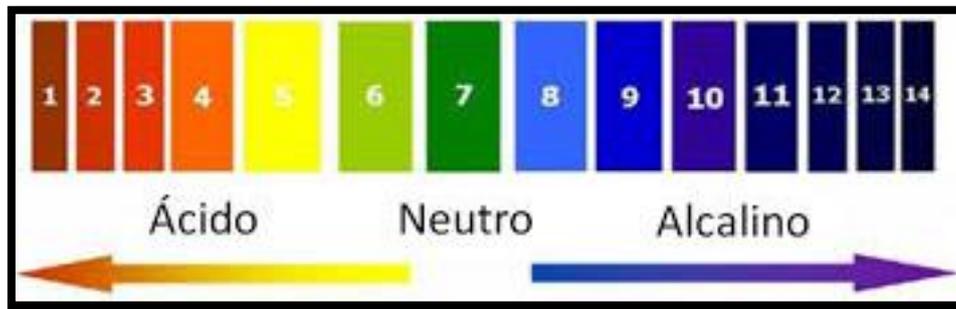


Ilustración 5. Rangos de pH (Hernández, 2014).

La alcalinidad y el pH están íntimamente relacionados, porque aumentos en el pH indican aumentos en la alcalinidad y viceversa. El control del pH es de vital importancia para la mayoría de los programas de tratamiento del agua de enfriamiento. En general, la corrosión de los metales aumenta cuando el pH es inferior a lo recomendado; la formación de incrustaciones puede empezar o aumentar cuando el pH es superior a lo recomendado; y un alto o bajo pH puede permitir el crecimiento y desarrollo de problemas microbianos. Al igual que con el pH, cuando la alcalinidad se encuentra por debajo de los valores recomendados, aumenta las posibilidades de corrosión; cuando la alcalinidad es superior a los rangos recomendados, aumenta las posibilidades de formación de incrustación (Nalco, 2009).

#### 2.2.4 Temperatura

La temperatura se define como la cantidad de calor que contiene un cuerpo, un objeto o el medio ambiente. La temperatura termodinámica, también denominada temperatura absoluta, es una de las magnitudes fundamentales que define el Sistema Internacional de Unidades (SI) y cuya unidad es el grado kelvin simbolizado como K. Esta unidad se utiliza tanto para expresar valores de temperatura termodinámica como intervalos de temperatura. Es usual expresar la temperatura con base en la escala Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), definida con relación a la temperatura termodinámica por:

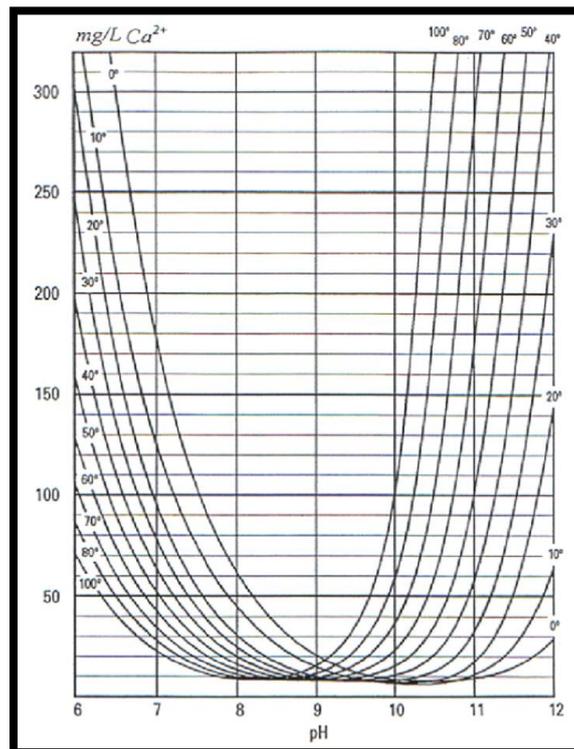
$$t (\text{Celsius}) = T (\text{kelvin}) - 273.15 \text{ K}$$

Ecuación 8

El grado Celsius es una unidad de temperatura de magnitud idéntica al grado Kelvin. Sobre la escala Celsius, la temperatura de fusión del agua pura a la presión de 101,325

kPa o 1 atmósfera, es igual a 0 °C y la ebullición del agua, a la misma presión es igual a 100 °C (NMX-AA-007-SCFI-2000).

Algunos minerales son más solubles a medida que aumenta la temperatura. A esto se le llama solubilidad directa o normal. Otros minerales son menos solubles a medida que aumenta la temperatura. A esto se le denomina solubilidad inversa (Nalco, 2009). En la Gráfica 1, se muestra un ejemplo de solubilidad directa e inversa del carbonato de calcio con respecto al pH y la temperatura.



**Gráfica 1.** Solubilidad del carbonato de calcio en función del pH y la temperatura (Dobersek y Goricanec, 2014).

Si cualquiera de estos factores cambia, también cambiarán las tendencias de la incrustación. La mayoría de las sales solubles, se vuelven más solubles a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, algunas sales, por ejemplo: el carbonato de calcio, se vuelven menos solubles a medida que se aumenta la temperatura. Por lo tanto, a menudo provocan depósitos cuando las temperaturas son altas. Un cambio en el pH o la alcalinidad pueden afectar en gran medida la formación de incrustaciones; por ejemplo: si se aumenta el pH o la alcalinidad, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye y finalmente precipita sobre las superficies de las tuberías. Algunos materiales como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) son menos solubles en bajas alcalinidades (Nalco, 2009).

Estos parámetros son la clave de la química del agua, que tienen un impacto directo en los cuatro principales problemas en los sistemas de enfriamiento del agua: la incrustación, la corrosión, el ensuciamiento y la contaminación microbiana.

### 2.3 Índice de saturación de Langelier y de estabilidad de Ryznar

Para poder establecer los programas de control y los tratamientos adecuados para combatir la incrustación o la corrosión del agua, es importante determinar no solo cualitativa, sino también cuantitativamente su tendencia agresiva. En México, se considera el uso de los siguientes índices: de saturación de Langelier, de estabilidad de Ryznar, de agresividad, de corrosión de Riddick, y de fuerza de conducción de Mc Cauley. De entre ellos, los índices de Langelier y Ryznar son los más utilizados. Estos modelos se consideran cualitativos, ya que solo indican el carácter agresivo o incrustante del agua, sin determinar cuánto. Dentro de los métodos cuantitativos se encuentran: Mojmir Mach y Legrand-Poirier, los cuales al tener un mayor sustento teórico proveen mejores resultados que los modelos cualitativos; sin embargo, debido a su complejidad y difícil aplicación, dichos modelos suelen ser poco utilizados (Trujillo *et al.*, 2008).

#### 2.3.1 Índice de saturación de Langelier

El profesor W. Langelier fue quien estimuló la aplicación del uso de la incrustación de carbonato de calcio para prevenir la corrosión y para el control de incrustación excesiva. Langelier en 1936, propuso el cálculo del índice de saturación, como medio para predecir el comportamiento corrosivo o incrustante de las aguas naturales. Otros investigadores habían realizado trabajos similares, pero habían utilizado métodos diferentes para calcular y expresar sus resultados. Es importante conocer el índice de saturación en el acondicionamiento del agua para producir una incrustación protectora de carbonato de calcio (Powell, 1979).

La tendencia del agua a formar incrustaciones de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se puede predeterminar conociendo el valor del índice de saturación de Langelier (ISL), el cual se calcula mediante la siguiente fórmula (Metcalf y Eddy, 2003):

$$\text{ISL} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Ecuación 9

donde:

pH: es la medida del pH inicial de la muestra.

pH<sub>s</sub>: es el pH de saturación del carbonato de calcio.

El pH de saturación (pH<sub>s</sub>) utilizado en la ecuación anterior, se puede calcular usando la expresión siguiente:

$$pH_s = -\log\left(\frac{K_{a2}\gamma_{Ca^{2+}}[Ca^{2+}]\gamma_{HCO_3^-}[HCO_3^-]}{K_{sp}}\right) \tag{Ecuación 10}$$

donde:

K<sub>a2</sub>: constante de equilibrio de disociación del bicarbonato.

γ<sub>Ca<sup>2+</sup></sub>: Coeficiente de actividad del calcio.

[Ca<sup>2+</sup>]: concentración molar del calcio.

γ<sub>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></sub>: Coeficiente de actividad del bicarbonato.

[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]: concentración molar del bicarbonato.

K<sub>sp</sub>: constante del producto de solubilidad de la disociación del carbonato de calcio.

En la Tabla 3, se muestra la interpretación del Índice de Saturación de Langelier.

**Tabla 3.** Interpretación del valor del Índice de Saturación de Langelier.

Interpretación del índice de saturación de Langelier	
Valor del índice (ISL)	Interpretación
-2 < ISL < -0.5	Corrosión severa
-0.5 < ISL < 0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL = 0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0 < ISL < 0.5	Formación leve de incrustaciones y corrosión
0.5 < ISL < 2	Formación de incrustaciones pero no corrosión
<b>Fuente:</b> (Carrier, 1965)	

Cabe señalar que el agua con baja saturación también se le conoce como corrosión, pero el uso del término corrosión es incorrecto, ya que el índice de ISL sólo se aplica a la presencia o ausencia de incrustación del carbonato de calcio. El valor deseado de ISL puede variar de +0.6 a +1 o mayor dependiendo de la presencia de sustancias inhibidoras (Powell, 1979).

### 2.3.2 Índice de estabilidad de Ryznar

Un índice alternativo, conocido como el Índice de Estabilidad fue propuesto por Ryznar (1944) y se utiliza en una serie de aplicaciones industriales. El índice de Estabilidad de Ryznar (RSI), se calcula mediante la siguiente expresión (Metcalf y Eddy, 2003):

$$RSI = 2pH_s - pH$$

Ecuación 11

En la Tabla 4, se muestra el criterio para la incrustación según el Índice de Ryznar.

**Tabla 4.** Interpretación del Índice de Estabilidad de Ryznar.

Interpretación del índice de Estabilidad de Ryznar	
Valor del índice (RSI)	Interpretación
4.0 – 5.0	Grave formación de incrustación
5.0 - 6.0	Formación de incrustación
6.0 – 7.0	Pequeña incrustación o corrosión
7.0 – 7.5	Corrosión significativa
7.5 – 9.0	Alta corrosión
>9	Corrosión intolerable
<b>Fuente:</b> (Carrier, 1965)	

En este trabajo solo se calculó el índice de saturación del Langelier para determinar cualitativamente la tendencia incrustante o corrosiva de un agua de pozo con alta dureza y poder establecer si se presentaron cambios en las características del agua con respecto al tiempo, durante el desarrollo de la experimentación.

### 2.4 Tratamientos utilizados para prevenir la incrustación

Las aguas naturales rara vez se encuentran en condiciones de ser utilizadas directamente en los procesos industriales, ya sea que se destinen a la generación de vapor, como medio de enfriamiento o si se consume directamente en algún proceso. El contenido de impurezas, aun siendo casi siempre muy pequeño en relación al volumen de agua, suele ser inadecuado o excesivo para poder emplear el agua directamente en la aplicación prevista.

Es esta la razón por la cual se tiene que tratar adecuadamente el agua antes de ser utilizada y su tratamiento dependerá del uso que se le quiera dar. El tratamiento primordial es el ablandamiento del agua para evitar principalmente, los problemas de incrustación.

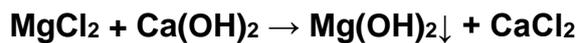
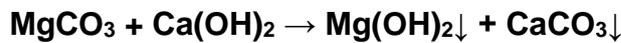
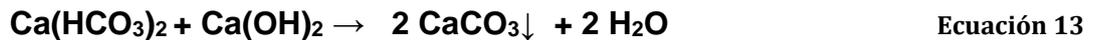
### 2.4.1 Reactivos químicos utilizados para el ablandamiento del agua

Entre los reactivos químicos más utilizados para el ablandamiento del agua o remoción de dureza, se encuentran los siguientes (Lora, 1975):

- **Dióxido de carbono.-** Es un gas claro e incoloro que se licúa a presión y solidifica al aplicar vacío. Este gas es muy caro, por lo cual, la mayoría que lo utiliza opta por obtenerlo recurriendo a la combustión in situ. El principal riesgo de su uso es que puede provocar asfixia y, por otra parte, los efectos altamente corrosivos que tiene sobre el hierro y el acero, debido a que en solución con el agua produce ácido carbónico.
- **Cal viva y cal hidratada.-** La cal viva (CaO), consiste en óxido de calcio asociado naturalmente con una cantidad menor de óxido de magnesio. La cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , es un polvo que se obtiene de la hidratación de la cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química. El traslado de la lechada de cal, se puede dificultar por los depósitos de carbonato de calcio en las paredes de la tubería o canal de transporte. Algunas veces las instalaciones están hechas con tuberías fijas, las cuales requieren de limpiezas periódicas con aplicación de grandes soluciones de cloro, mientras que otras veces se utilizan en las instalaciones las mangueras de caucho de gran diámetro, que se comprimen para desprender los depósitos que se hayan generado.
- **Carbonato de sodio (SOSA).-** La sosa ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), es un polvo blanco grisáceo que contiene menos del 98% de carbonato de sodio. Esta solución puede transportarse por tuberías o canales convencionales y sus riesgos de manipulación son fundamentalmente los mismos que cualquier otro polvo químico.
- **Cloruro de sodio.-** El cloruro sódico debe ser homogéneo, de forma granular seca, que tenga un color blanco grisáceo o rosado, pardo o blanco parduzco. Cuando se disuelve con agua destilada, debe tener una alcalinidad a la fenolftaleína de 0 y pH menor a 8. Se puede alimentar por medio de cualquier dispositivo de dosificación de productos químicos líquidos y debe transportarse por tuberías de caucho o bronce.

### 2.4.2 Ablandamiento del agua con Cal-carbonato

El ablandamiento con cal es el proceso de precipitación usado con mayor frecuencia, debido a que las aguas destinadas al consumo humano suelen contener un nivel de bicarbonatos suficiente para utilizar este método. Consiste en la reducción de la dureza por la adición de cal hidratada al agua para precipitar  $\text{CaCO}_3$  y/o  $\text{Mg(OH)}_2$ . Cuando a un agua se añade cal (hidróxido de calcio), tienen lugar las siguientes reacciones:



En las reacciones anteriores se puede observar que:

- El calcio será eliminado del agua en forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el magnesio en forma de hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ), ambos compuestos insolubles en agua.
- El anhídrido carbónico influye en la dosis de cal necesaria para el tratamiento, no porque afecte a la dureza, sino porque representa un consumo adicional de cal independientemente de la dureza.
- La tercera reacción formulada es doble, ya que el carbonato de magnesio no es suficientemente insoluble, siendo necesaria su transformación en hidróxido de magnesio.
- Como puede observarse en la cuarta reacción, mediante el tratamiento con cal se elimina únicamente la dureza temporal; es decir, dureza en forma de bicarbonatos, ya que la dureza de magnesio se transforma en dureza de calcio. Esto quiere decir que el ablandamiento con cal podrá ser aplicado a aquellas aguas que presenten un contenido suficiente de bicarbonatos.

Como la precipitación se efectúa sobre los cristales, éstos tienden a aumentar su volumen, con lo que aumenta la velocidad de sedimentación. Esto ocurre si la superficie

de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  se encuentra suficientemente limpia. Por ello, la presencia de sustancias orgánicas coloidales puede impedir la cristalización, siendo una de las razones por las que se realiza simultáneamente una coagulación-floculación.

Si el carbonato de calcio se encuentra solo, tiene tendencia a formar agrupaciones de cristales que sedimentan a gran velocidad, mientras que el hidróxido de magnesio, si se encuentra solo, forma flóculos muy ligeros (Espigares y Pérez, s.f.).

### 2.4.3 Ablandamiento del agua con carbonato de sodio y cal

Cuando es necesario eliminar dureza permanente del agua, las reacciones anteriormente formuladas con la cal no son suficientes, siendo necesario hacer un tratamiento con carbonato de sodio y cal. En este tratamiento, a las reacciones formuladas con la cal, previamente descritas, se añaden las siguientes:



Estas reacciones representan la eliminación de dureza permanente correspondiente a los sulfatos y cloruros, respectivamente. El tratamiento con carbonato de sodio no es muy efectivo, no se puede eliminar más de 4 °dH (aproximadamente 72 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ) en los casos más favorables (Espigares y Pérez, s.f.).

### 2.4.4. Ablandamiento con sosa caústica

Se puede considerar como una variante del proceso de ablandamiento con carbonato de sodio y cal. La reacción del proceso es la siguiente:



Se produce la precipitación del carbonato de calcio y la formación de carbonato de sodio, que reaccionará con la dureza permanente, de acuerdo con las reacciones formuladas en ecuaciones 16 y 17 (Espigares y Pérez, s.f.).

### 2.4.5 Remoción con resinas de intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido

por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas (positivas o negativas) a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas sintéticas. Una resina de intercambio iónico puede considerarse como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida, grupos iónicos libres. Estas cadenas se encuentran unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede limitar la movilidad de los iones participantes.

Las resinas de intercambio iónico están destinadas a varios usos, descalcificación, desnitratación y desionización. Dependiendo de la aplicación a la que se destinen existen diferentes tipos (Guerra *et al.*, 2008):

- **Resinas catiónicas de ácido fuerte.**- Intercambian los iones positivos (cationes) y funcionan a cualquier pH. Están destinadas a aplicaciones de homogenización y ablandamiento del agua, como primera columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los cationes del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente el ácido clorhídrico (HCl).
- **Resinas catiónicas de ácido débil.**- Tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Es habitual regenerarlas con el ácido de desecho procedente de las de ácido fuerte.
- **Resinas aniónicas de base fuerte.**- Intercambian iones negativos (aniones). Están destinadas a aplicaciones de homogenización y ablandamiento de agua, como segunda columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los aniones del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente hidróxido de sodio (NaOH).
- **Resinas aniónicas de base débil.**- Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos NaOH para su regeneración. No se puede utilizar a pH altos. Pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento.

El proceso de desionización del agua consiste en reducir la concentración de iones presentes en ella a niveles muy bajos, proceso que puede llevarse a cabo mediante intercambio iónico. En este proceso se emplea una resina catiónica de intercambio para eliminar los cationes (sodio, calcio, magnesio, etc.) y dos resinas aniónicas, una básica débil que absorberá los ácidos fuertes y otra básica fuerte para intercambiar los aniones (cloruro, sulfato, bicarbonato, etc.). Como la concentración de iones en el agua determina su capacidad de conducir la electricidad, la efectividad del proceso de ionización se determina midiendo los parámetros resistividad o conductividad.

## **2.5 Control de incrustación en sistemas y equipos industriales**

Los principales sistemas y equipos donde se debe tener control sobre las incrustaciones son en calentadores domésticos e industriales, intercambiadores de calor, humidificadores de vapor, en los condensadores de los sistemas de aire acondicionado, plantas de procesamiento de azúcar, sistemas de generación de vapor y torres de enfriamiento. Siendo los sistemas de enfriamiento y de generación de vapor, las instalaciones donde se debe tener mayor control de la incrustación.

La mayoría de los procesos de producción necesitan agua de refrigeración de eficaz y correcta operación. Las refinerías, fábricas de acero, plantas petroquímicas, plantas de fabricación de alimentos, edificios de gran altura, las plantas de procesamiento químico y las centrales eléctricas se basan en sistemas de enfriamiento para hacer su trabajo (Nalco, 2009).

### **2.5.1 Sistemas de enfriamiento**

El uso del agua para enfriamiento se ha puesto bajo una vigilancia más estricta desde el punto de vista ambiental, y como resultado, los patrones de uso del agua de enfriamiento están cambiando y continuarán haciéndolo. Estos cambios tanto en la operación como en el diseño de sistemas de enfriamiento, tienen un impacto fuerte en la química del agua, ya que influye en el potencial de corrosión, en la incrustación y en el ensuciamiento del sistema. Existen tres diseños básicos de sistemas de enfriamiento: de un solo paso, sistemas cerrados de recirculación y sistemas abiertos de recirculación (Kemmer y McCallion, 1989).

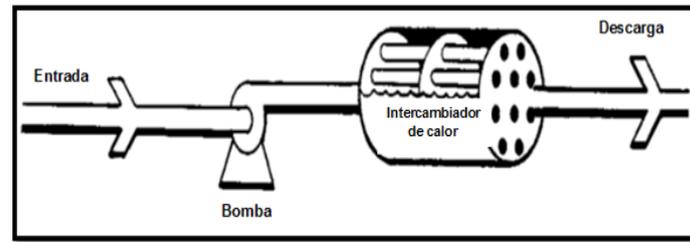
### **1.- Sistema de enfriamiento de un solo paso**

Se dice que es de un solo paso porque se toma el agua del abastecimiento de la planta, se utiliza para el sistema de enfriamiento y se regresa al cuerpo receptor de agua. Una característica de este proceso es que se usa una gran cantidad de agua para el enfriamiento. Es esta la razón por lo que estos sistemas son utilizados con menor frecuencia. En la Ilustración 6, se muestra el diseño de un sistema de enfriamiento de un solo paso.

Los principales problemas que se encuentran en el sistema de enfriamiento de un solo paso son: corrosión, incrustación y ensuciamiento causado por la sedimentación de sólidos suspendidos. Cuando se presenta la problemática de la incrustación se debe principalmente al carbonato de calcio que resulta del cambio en el índice de estabilidad del agua. También pueden presentarse incrustaciones por hierro y manganeso. Existen dos formas de prevenir las incrustaciones de carbonato de calcio sobre las superficies de transferencia de calor y en las líneas de distribución, las cuales son:

- **Interferir con los iones potencialmente incrustadores y prevenir el crecimiento de cristales.-** Para esto se utilizan los polifosfatos inorgánicos y los compuestos organofosforados. Algunas veces se usa ácido para ajustar el índice de estabilidad del agua, impidiendo la formación de  $\text{CaCO}_3$ , pero el ácido no controla las incrustaciones de hierro y manganeso. Por lo cual este método no resulta ser económico para tratar grandes volúmenes de sistemas de un solo paso.
- **Acondicionamiento de los núcleos de los cristales para evitar su crecimiento sobre las superficies de transferencia de calor y las líneas de transmisión.-** Para este proceso se utilizan varios compuestos tipo acrilato, fosfatados tanto orgánicos como inorgánicos, y compuestos orgánicos naturales.

Los productos químicos que más se utilizan para la remoción de material depositable, como las arenas, sedimentos, arcillas y productos de corrosión; se encuentran los agentes tensoactivos, acrilatos, polímeros de alto y bajo peso molecular (tanto aniónicos, catiónicos y no iónicos), agentes secuestrantes y compuestos organofosforados (Kemmer y Mc-Callion, 1989).

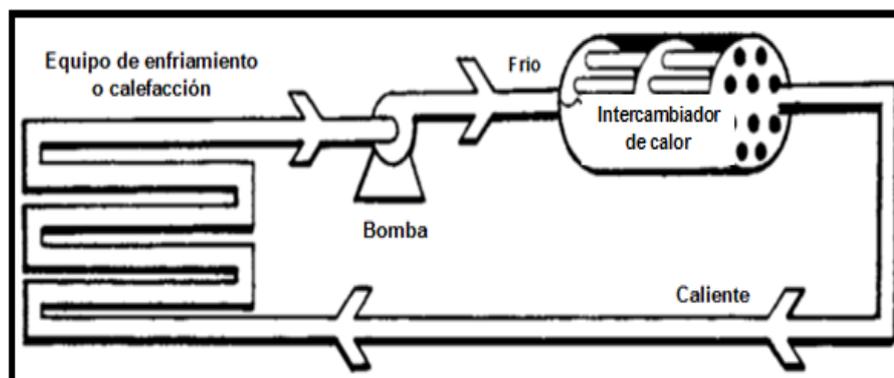


**Ilustración 6.** Diseño de un sistema de enfriamiento de un solo paso (Nalco, 2009).

## **2.- Sistema de enfriamiento cerrado con recirculación**

Es aquel en el que se recircula el agua en un circuito cerrado, por lo cual la evaporación, la exposición a la atmósfera o cualquier influencia que pudiera afectar la química del agua en el sistema, se desprecian. Este sistema requiere de altos niveles de tratamiento químico, pero debido a que las pérdidas de agua son despreciables, resulta ser muy económico. En la Ilustración 7, se muestra el diseño de un sistema de enfriamiento cerrado con recirculación.

En este tipo de sistema, la incrustación debería resultar un problema menor, debido a que el agua no se concentra por evaporación. Sin embargo, cuando se tiene que reemplazar agua, se forma incrustación adicional, de modo que con el tiempo, la incrustación se vuelve significativa. Debido a que el sistema no está expuesto a la atmósfera, casi no se encuentran ensuciamientos por sedimentos y las arenas son escasas. Sin embargo, se puede tener ensuciamiento por masas microbianas, cuando se utiliza una alta tasa de reemplazo o en las fugas del proceso, se puede encontrar crecimientos bacterianos. Esto se puede controlar con agentes de control biológico que sean compatibles con los tratamientos químicos y las condiciones de operación de los sistemas cerrados (Kemmer y Mc-Callion, 1989).



**Ilustración 7.** Diseño de un sistema de enfriamiento cerrado de recirculación (Nalco, 2009).

### **3.- Sistema de enfriamiento abierto de recirculación**

Estos son los sistemas que se utilizan con mayor frecuencia en las industrias. Consisten de bombas, intercambiadores de calor y una torre de enfriamiento. El agua se toma del estanque o de la laguna de una torre de enfriamiento, se pasa al equipo que requiera de enfriamiento en el proceso, después regresa para ser enfriada por evaporación parcial en la torre de enfriamiento y después se envía de nuevo a los aparatos que requieren de enfriamiento. Este proceso de reutilización se repite, reemplazando solo el agua que se pierde por la evaporación y la purgada del sistema para controlar las propiedades químicas del agua en recirculación (Kemmer y Mc-Callion, 1989). En la Ilustración 8, se muestra un diseño de sistema de enfriamiento abierto de recirculación.

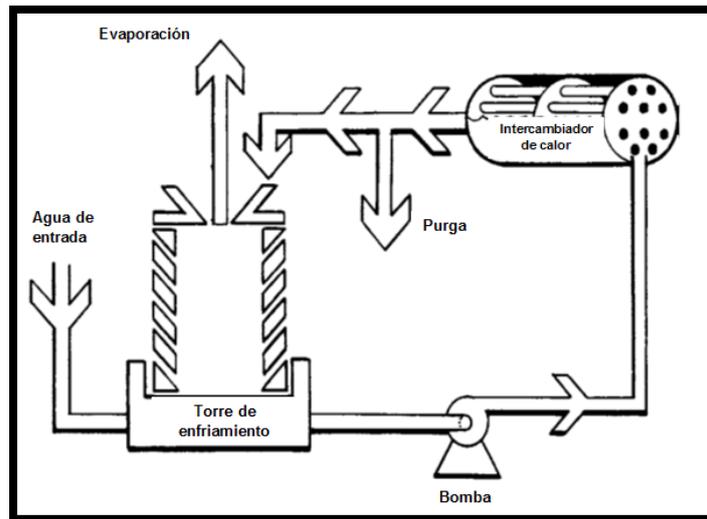
El principal medio para eliminar la incrustación en este tipo de sistemas es limitando los ciclos de concentración, mediante esta medida, se previene la supersaturación o se mantiene dentro de un rango efectivo. Dentro de los métodos de control de la incrustación actualmente llevados a cabo en los sistemas de enfriamiento abiertos con recirculación se encuentran: la purga, la adición de ácido y uso de inhibidores (Espinosa, 2001).

La purga remueve una porción del agua de circulación concentrada, la cual se reemplaza con agua fresca de repuesto. Esta medida baja la concentración de sólidos en el sistema. La purga puede ser continua o intermitente, aunque la continua es preferible y de hecho es la más empleada. La purga produce un balance entre sólidos disueltos que se introducen con el agua de repuesto y los sólidos disueltos que son removidos.

El ácido sulfúrico se usa comúnmente para tratar el agua en recirculación. Una cantidad suficiente de ácido se adiciona para reducir, no eliminar, la alcalinidad del agua. La alcalinidad se reduce lo suficientemente para llevar al sistema a condiciones de estabilidad y saturación de modo que no desarrollen potenciales de incrustación. Si el contenido de sulfatos del agua de repuesto es demasiado alto, se puede reemplazar el ácido sulfúrico por ácido clorhídrico para ajustar la alcalinidad y reducir la posibilidad de la precipitación del sulfato de calcio. Con suministros de alta dureza, se debe considerar un ablandamiento externo del agua de repuesto como un método alternativo de tratamiento.

Una amplia gama de inhibidores se emplea actualmente para combatir la incrustación, los cuales actúan como: agentes solubilizadores cuya función es aumentar la solubilidad de las sales formadas; y agentes modificadores del cristal en donde el inhibidor actúa

adsorbiéndose en la superficie del cristal para formar complejos. Una vez adsorbido, las moléculas del inhibidor pueden incorporarse al enrejado del cristal durante la reacción de crecimiento y alterar su morfología. Entre los inhibidores más utilizados se encuentran: los fosfatos, los fosfonatos, el ácido 1-hidroxi etiliden 1,1,difosfónico (HEDP), el ácido amino tri metilen fosfónico (AMP), los poliéter poliamino metilénfosfonatos (PAPEMP) y los polímeros (Espinosa, 2001).



**Ilustración 8.** Diseño de un sistema de enfriamiento abierto de recirculación (Nalco, 2009).

### 2.5.2 Sistemas de generación de vapor

Los depósitos de sólidos dentro de las calderas, bajo condiciones de producción de vapor, provocan la acumulación de lodos o formación de incrustaciones. Las incrustaciones son perjudiciales, ya que son malas conductoras de calor, causan reducción de eficiencia y comúnmente provocan que se quemen los tubos o las placas. La incrustación resultante de los depósitos de minerales en las calderas, se debe a las distintas sales que se encuentran presentes en el agua de alimentación.

Si se le aplica calor al agua que contiene bicarbonato de calcio, el bióxido de carbono se desprende de este compuesto, y como la solubilidad relativamente alta del bicarbonato de calcio se debe a este gas, el carbonato de calcio se precipita rápidamente tan pronto como este gas se elimina. El sulfato de calcio, debido a su insolubilidad a altas temperaturas, se precipita rápidamente, y a menos que se convierta a otra forma por tratamiento químico o removido del agua al formarse, causa una incrustación dura y densa que se adhiere a las superficies metálicas internas de las calderas.

El problema primordial de la formación de incrustaciones en las calderas se debe a la solubilidad de las sales a temperaturas elevadas. Aun cuando se dispone de muchos datos sobre el equilibrio de la solubilidad de sales en soluciones acuosas a temperaturas relativamente moderadas, hay carencias de datos para temperaturas elevadas (Powell, 1979).

Existen tres medios básicos para mantener los problemas en las calderas bajo control (Kemmer y Mc-Callion, 1989):

- **Tratamiento externo.-** Del agua de reemplazo, condensado o ambos, antes de que entre a la caldera, para reducir o eliminar sustancias químicas (como dureza o sílice), gases o sólidos. El programa de tratamiento de la caldera incluye el control de siete impurezas: sólidos suspendidos, dureza, alcalinidad, sílice, sólidos disueltos totales, materia orgánica y gases.
- **Tratamiento interno.-** Del agua de alimentación de la caldera, agua de la caldera, vapor, o condensado, con productos químicos correctivos. La formación de incrustaciones de una caldera se controla por alguno de los cuatro programas químicos: coagulación (carbonato), residuo de fosfato, quelatación o fosfato coordinado
- **Control de purga.-** Consiste en drenar una porción del agua de la caldera para reducir la concentración de productos químicos. La purga se considera un proceso de dilución de los sólidos del agua dentro de la caldera.

## 2.6 Tecnología alternativa para prevenir la incrustación

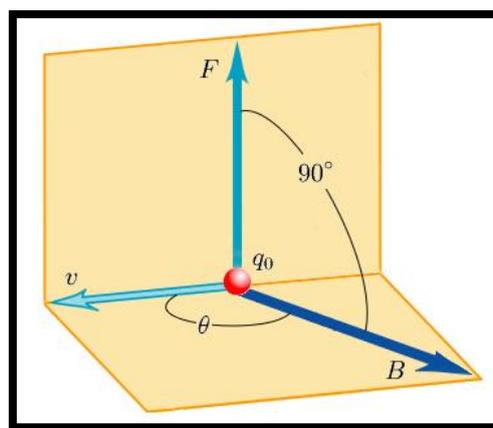
Como ya se ha mencionado anteriormente, el tratamiento tradicional para combatir los problemas de incrustaciones en las industrias, se ha realiza utilizando métodos químicos. Sin embargo, debido a los grandes inconvenientes que estos presentan, se han estudiado nuevas tecnologías basadas en métodos físicos, como lo es, el uso del campo magnético como un método anticrustante del agua.

### 2.6.1 Campo magnético y conceptos básicos

El campo magnético es la deformación del campo eléctrico de una partícula en movimiento. En la teoría moderna se acepta que el magnetismo es el resultado del movimiento de los electrones en los átomos de la sustancia. De acuerdo a la teoría

clásica, los átomos individuales de una sustancia magnética son diminutos imanes con polos norte y sur. La polaridad magnética de los átomos se basa principalmente en el espín de los electrones y se debe solo en parte a sus movimientos orbitales alrededor del núcleo. Los átomos en un material magnético están agrupados en microscópicas regiones magnéticas a las cuales se les llama dominios. Todos los átomos dentro de un dominio están polarizados magnéticamente a lo largo de un eje cristalino. En un material no magnetizado, estos dominios se orientan al azar. Si un gran número de dominios se orientan en la misma dirección, el material mostrará fuertes propiedades magnéticas (Tippens, 1996).

El campo magnético para cargas que se mueven a velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz, puede representarse por un campo vectorial. Sea una carga eléctrica de prueba  $q_0$  en un punto  $P$  de una región del espacio moviéndose a una cierta velocidad arbitraria  $v$  respecto a un cierto observador que no detecte campo eléctrico. Si el observador detecta una deflexión de la trayectoria de la partícula entonces en esa región existe un campo magnético. El valor o intensidad de dicho campo magnético puede medirse mediante el llamado vector de inducción magnética  $B$ , a veces llamado simplemente "campo magnético", que estará relacionado con la fuerza  $F$  y la velocidad  $v$  medida por dicho observador en el punto  $P$ . Si se varía la dirección de  $v$  por  $P$ , sin cambiar su magnitud, se encuentra, en general, que la magnitud de  $F$  varía, si se conserva perpendicular a  $v$  (Wikipedia®, 2015). En la Ilustración 9, se muestra la representación del campo magnético y los vectores  $F$  y  $v$ .



**Ilustración 9.** Representación del campo magnético y los vectores  $F$  y  $v$  (Wikipedia®, 2015).

En la Tabla 5, se muestran algunos conceptos básicos relacionados con la teoría del campo magnético y sus aplicaciones.

**Tabla 5.** Conceptos básicos del campo magnético.

CONCEPTO	DEFINICIÓN
<b>Campo coercitivo</b>	Campo de sentido contrario para anular un campo magnético remanente.
<b>Campo magnético</b>	<p>El campo magnético es una región de espacio en la cual una carga eléctrica puntual de valor <math>q</math>, que se desplaza a una velocidad, sufre los efectos de una fuerza que es proporcional tanto a la velocidad <math>v</math> como al campo <math>B</math>. Así, dicha carga percibirá una fuerza descrita con la siguiente igualdad:</p> $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ <p><math>F</math>, Fuerza magnética. Vector.  <math>qv</math>, Carga del cuerpo en movimiento ( carga eléctrica).  <math>B</math>, Inducción magnética (Vector).</p>
<b>Curva de histéresis</b>	Curva de magnetización de un material.
<b>Densidad de flujo o intensidad de campo magnético (B)</b>	<p>Es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo, y también en la física moderna, recibe el nombre de intensidad de campo magnético, ya que es el campo real:</p> $B = \frac{F}{qv \sin \theta}$
<b>Electroimán</b>	Tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente.
<b>Fuerza</b>	Es la magnitud vectorial por la cual un cuerpo puede deformarse, modificar su velocidad o bien ponerse en movimiento superando un estado de inercia e inmovilidad.
<b>Fuerza de campo coercitiva</b>	Es la intensidad de campo magnético adverso exterior que habría que aplicar a un imán para desmagnetizarlo totalmente.
<b>Fuerza de Lorentz</b>	Es la fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica.
<b>Histéresis</b>	Es el retraso de la magnetización con respecto a la intensidad magnética.
<b>Imán</b>	Objeto o material rodeado por un campo magnético y que tiene la propiedad natural o inducida de ejercer una fuerza magnética (por ejemplo, atraer el hierro o el acero).
<b>Imanes permanentes</b>	Es aquel material o cuerpo que conserva su magnetismo después de la magnetización. Es decir, puede producir un campo magnético exterior y atraer el hierro.
<b>Magnetización</b>	Es la aplicación de un campo magnético a un cuerpo y se define como la densidad de momentos bipolares magnéticos.
<b>Material diamagnético</b>	Material débilmente magnético. Si se sitúa una barra magnética cerca de él, esta lo repele. Permeabilidad magnética relativa $<1$ . Ejemplo: Bismuto (Bi), Plata (Ag), plomo (Pb), agua.
<b>Material ferromagnético</b>	Magnético por excelencia o fuertemente magnético. Atraído por la barra magnética. Permeabilidad magnética relativa $>1$ . Ejemplo: hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), acero suave.
<b>Material paramagnético</b>	Presenta un magnetismo significativo. Atraído por la barra magnética. Permeabilidad magnética relativa $\approx 1$ . Ejemplo: aire, aluminio (Al), paladio (Pd).
<b>Permeabilidad relativa</b>	<p>Es la permeabilidad del material con respecto a la correspondiente al vacío:</p> $\mu_r = \mu / \mu_0$ <p><math>\mu_r</math>, Permeabilidad relativa (1)  <math>\mu</math>, permeabilidad de una sustancia o medio (<math>H \ m^{-1}</math>, <math>N \ A^{-2}</math>)  <math>\mu_0</math>, permeabilidad del vacío.</p>
<b>Permeabilidad magnética</b>	Es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí, los campos magnéticos.
<b>Polos magnéticos</b>	Regiones donde se concentran las fuerzas de un imán.
<b>Temperatura de Curie</b>	Es la temperatura por encima de la cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetismo, comportándose como un material puramente paramagnético.
<b>Temperatura de trabajo</b>	Temperatura máxima a la que podemos exponer el imán sin que pierda magnetismo.
<b>Vector</b>	Es una magnitud definida por una longitud, orientación y sentido.
<b>Fuentes:</b> (Tippens, 1996; Gilard, 2011; Wikipedia®, 2015)	

### 2.6.2 Imanes permanentes

En el desarrollo de este trabajo, se utilizaron imanes permanentes con el fin de aplicar un campo magnético al agua. Actualmente existen varios tipos de imanes permanentes que se comercializan, dentro de los más importantes se encuentran: Aleaciones de Neodimio, Hierro y Boro (NdFeB); Aleaciones de Samario y Cobalto (SmCo); Aleaciones Alnico; y Ferritas Cerámicas. La Tabla 6, muestra las principales características de algunos tipos de imanes permanentes.

**Tabla 6.** Características de los imanes permanentes.

TIPOS DE IMANES	COMPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS
<b>Imanes de tierras raras</b> 	<b>Aleaciones de Neodimio, Hierro y Boro (NdFeB)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo relativamente muy alto.</li> <li>▪ A temperatura ambiente exhiben las más altas propiedades de todos los materiales magnéticos.</li> <li>▪ La densidad energética de las aleaciones de Nd es mayor que las aleaciones de Sm.</li> <li>▪ Son la mejor elección para las aplicaciones en que la temperatura es estable y ligeramente por encima de la temperatura ambiente.</li> <li>▪ Temperatura máxima 150°C</li> <li>▪ Intensidad magnética: 15,000 - 6,000 G.</li> </ul>
	<b>Aleaciones de Samario y Cobalto (SmCo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo relativamente alto.</li> <li>▪ La estabilidad térmica de las aleaciones de Sm es mayor que las de Nd.</li> <li>▪ Son la mejor elección para las aplicaciones en que la temperatura puede variar significativamente o el imán puede estar sometido a una temperatura ambiente elevada.</li> <li>▪ Temperatura máxima 300°C.</li> <li>▪ Intensidad magnética: 10,000 G.</li> </ul>
<b>Alnico</b> 	<b>Compuesto por: 8% Al, 14% Ni, 24% Co, 51% Fe y 3% Cu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo relativamente moderado.</li> <li>▪ Tienen el mejor comportamiento a temperaturas elevadas.</li> <li>▪ Temperatura máxima 540°C.</li> <li>▪ Intensidad magnética: 10,000 G.</li> </ul>
<b>Ferritas Cerámicas</b> 	<b>Compuestas por: BaFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o SrFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo relativamente bajo.</li> <li>▪ Imanes flexibles e imanes plásticos.</li> <li>▪ Polvo de ferrita mezclado con una goma elástica o con un termoplástico.</li> <li>▪ Menor proporción de material magnético dentro del volumen total.</li> <li>▪ Propiedades magnéticas inferiores.</li> <li>▪ Temperatura máxima: Cerámico 300°C y flexible 100°C.</li> <li>▪ Intensidad magnética: Cerámica 3,600 G y flexibles 1,300 G.</li> </ul>

**Fuente:** (Gilard, 2011)

Estos imanes se fabrican con diferentes aleaciones y grados de composición. Dependiendo de las características de cada aleación, el imán tendrá diferentes características como son: costo, intensidad magnética, temperatura de trabajo, etc. Además cada uno de estos materiales tiene su punto de operación, curva de magnetización y desmagnetización, temperatura de Curie y condiciones de trabajo, información que debe proporcionar el fabricante. La selección del tipo de imán a utilizar depende principalmente del uso que se le quiera dar.

### 2.6.3 Unidades de medida del campo magnético

La unidad del campo magnético (B) en el Sistema Internacional es el tesla (T). Un tesla se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (Newton) sobre una carga de 1 C (Culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de campo.

El tesla es una unidad muy grande, por lo que es de mayor uso el Gauss (G) como unidad de campo magnético, aunque no pertenece al Sistema Internacional sino al sistema CGS, tiene un valor más acorde con el orden de magnitud de los campos magnéticos que habitualmente se manejan. En algunas ocasiones también se utilizan las unidades de Weber (Wb). Un Tesla es igual a  $1 \text{ Wb/m}^2$ , o a voltio segundo por metro cuadrado ( $\text{Vs/m}^2$ ), o a 10,000 G. Solo como dato interesante; la magnitud del campo magnético terrestre en la superficie de la Tierra es de alrededor de 0.5 G (Wikipedia®, 2015).

### 2.6.4 Investigaciones sobre el uso del campo magnético en la remoción de incrustación

Los posibles mecanismos para explicar el fenómeno del campo magnético han sido discutidos por diversos autores. Coinciden sobre el hecho de que tratamientos magnéticos conducen a la formación de partículas de carbonato de calcio en la mayor parte del agua, que no precipita sobre las paredes de las tuberías de distribución y otros equipos. Estas partículas son arrastradas por el flujo de agua y pueden eliminarse por precipitación o filtración, dando como resultado un lodo de fácil remoción. Desde el punto de vista microscópico, han mostrado que el campo magnético puede influir considerablemente en el potencial zeta y la distribución del tamaño de las partículas formadas en la solución. Diversos autores consideran los procesos magnetohidrodinámicos (MHD) para explicar la acción del dispositivo magnético sobre la incrustación. Los procesos electrocinéticos

también se utilizan para explicar la eficiencia del tratamiento electrostático del agua sobre las incrustaciones. Otros lo relacionan con las fuerzas de van der Waals, porque se pueden cambiar por la aplicación de un campo magnético. Debido que las moléculas del agua son diamagnéticas, un alto gradiente de campo magnético genera una fuerte fuerza de atracción entre los iones y las moléculas del agua, lo que mejora la eficiencia del tratamiento magnético. También sugieren que el campo magnético es capaz de cambiar la orientación del espín de los protones y perturbar fenómenos de deshidratación para impedir la transferencia del protón a una molécula de agua (Gabrielli *et al.*, 2001).

De manera general, las conclusiones de la influencia del campo magnético en la formación de incrustación, se pueden resumir en lo siguiente:

1. El campo magnético favorece el crecimiento de aragonita más que la calcita o vaterita.
2. Intensificación del campo magnético
3. El tratamiento magnético aumenta la cantidad de carbonato de calcio precipitado.
4. El tratamiento magnético modifica la relación entre nucleación homogénea y heterogénea.
5. Otros factores que influyen en el tratamiento magnético del agua son: diamagnetismo, material de la tubería, intensidad de campo magnético, influencia de la velocidad del flujo y el pH.

### **1.- El campo magnético favorece el crecimiento de aragonita más que la calcita o vaterita**

Cefalas *et al.*, 2008, explicó que la presencia de un campo magnético en la interfase líquido/sólido favorece la transformación de los cristales de calcita a aragonita debido a la diferencia entre los estados electrónicos de las dos formas cristalinas. Los cálculos del estado electrónico de la calcita y de la aragonita dieron como resultado que el estado electrónico de la aragonita es 28 eV mayor que el de la calcita; es decir, se requieren 28 eV para pasar del estado electrónico de la calcita a la aragonita, esta energía la puede proporcionar un campo magnético de 45 T para desplazar una distancia de 0.5 nm entre los iones de calcio y carbonato. Por lo tanto, la energía cinética que se requiere para hacer la transformación la suministra el campo magnético externo y el flujo turbulento y lo describió cuantitativamente a través de las ecuaciones de Navier-Stokes y Maxwell.

Meng-Chun y Clifford 2010, encontraron que los cristales de aragonita crecen más rápido en aguas sobresaturadas con carbonato de calcio y en presencia de un campo magnético a menores valores de pH. En sus experimentos con un campo magnético de 0.18 T, un periodo de pre-magnetización de 20 horas y una solución sobresaturada de carbonato de calcio; encontraron que la velocidad de crecimiento de aragonita es mayor a pH de 8.3 y que esta velocidad de crecimiento disminuye en la medida en que el pH se aumenta. Con respecto a la calcita, encontraron que sin la aplicación de un campo magnético la calcita creció rápidamente en un rango de pH de 9.5 y 10.5 y cuando la solución sobresaturada fue pre-magnetizada durante 20 horas, la velocidad de crecimiento de la calcita fue baja en cualquier rango de pH.

Higashitani *et al.*, 1993, observaron que se aceleraba la formación de cristales del tipo aragonita en la medida que aumentaba la inducción del campo magnético en una solución de cloruro de calcio y carbonato de sodio que se utilizó para formar el carbonato de calcio. El experimento se realizó a una temperatura de 30°C. Al realizar el experimento sin campo magnético los cristales formados fueron de tipo calcita.

Coey y Cass, 2000, reportaron un aumento de la proporción de cristales de tipo aragonita respecto a los de calcita (A/C). El experimento se realizó con un campo B (campo magnético) de 0.1 T, la velocidad del flujo varió entre 0.4 y 1.2 m/s. La mayor relación A/C se observó cerca de las 40 h después del tratamiento magnético y se mantuvo por cerca de 200 horas (memoria magnética).

## **2.- Intensificación del campo magnético**

De acuerdo al modelo de amplificación de MASER un campo magnético que fluctúa a una frecuencia determinada puede amplificarse a altos valores absorbiendo la energía de un campo magnético constante externo. El acoplamiento y la transferencia de energía se realizan a través del momento angular de las tres entidades: el campo magnético, las moléculas del agua y régimen de flujo. La ganancia es alta cuando el campo magnético está en resonancia con la frecuencia rotacional de los rotores moleculares y/o la baja frecuencia del flujo turbulento. Kobe *et al.*, 2002 y Kobe *et al.*, 2003, reportaron que la concentración de aragonita se incrementa constantemente cuando la ganancia es tan alta como 0.4 T, al encontrar en sus experimentos, que la concentración de aragonita fue mayor al 80% al utilizar una intensidad de 0.6 T.

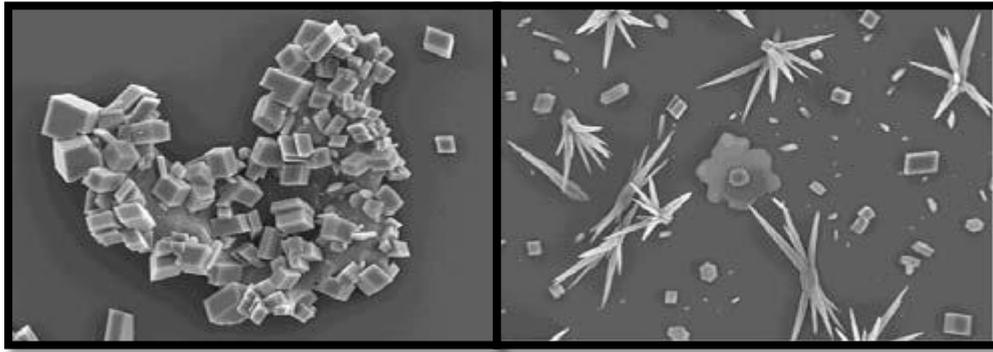
Cefalas *et al.*, 2008, obtuvo una precipitación del 90% del carbonato de calcio soluble en forma de aragonita/vaterita, al aplicar un campo magnético de 1.2 T a un flujo de agua sobre una tubería de acero inoxidable 316. A partir de estos resultados experimentales propuso un modelo para comprobar que el campo magnético incrementa en forma local el potencial termodinámico en la interfase favoreciendo la formación de aragonita en lugar de calcita, debido a que el estado electrónico de crecimiento libre de la aragonita es más alto que el de la calcita. Propuso un modelo de mecánica cuántica que predice que las fluctuaciones del campo magnético dentro del líquido pueden amplificarse por el intercambio de energía con un campo magnético externo  $\mathbf{B}_0$ , a través de la interacción del momento angular  $\mathbf{J}$  de los rotores moleculares con el momento angular macroscópico del flujo turbulento. El sistema rotor + campo  $\mathbf{B}_0$  se modela como una cavidad resonante con un mecanismo de pérdidas en la que se introduce una pequeña señal fluctuante. En un campo  $\mathbf{B}_0$  el momento angular  $\mathbf{J}$  precesa a la frecuencia:  $f_0 = \lambda \mathbf{B}_0$ . Cuando  $f_0$  coincide con la frecuencia  $f$  de un modo de oscilación del campo magnético aleatorio (con la frecuencia del fotón de una transición entre dos niveles de energía rotacionales de la molécula) tiene lugar la amplificación resonante de este modo.

En otras palabras, la ganancia es más alta cuando el campo magnético está en resonancia con la frecuencia rotacional de los rotores moleculares y/o la baja frecuencia del flujo turbulento. Y la concentración de aragonita se incrementa con la intensidad del campo magnético. Al contrario de la calcita, la aragonita se une débilmente a la superficie de la tubería donde se transporta el fluido. La Tabla 7, muestra la relación del campo magnético aplicado y su dependencia en la formación de aragonita y vaterita. En el experimento usaron una solución que contenía 90.2 % de calcita. La Ilustración 10, comprueba la precipitación de calcita (incrustante) sin aplicación de campo magnético y de aragonita/ vaterita (no incrustante) en presencia de campo magnético (Cefalas, 2008).

**Tabla 7.** Cambio en la concentración de cristales de calcita y aragonita vs campo magnético aplicado.

CAMPO MAGNÉTICO APLICADO (T)	CALCITA (%)	ARAGONITA + VATERITA (%)
0	90.2	9.8
0.6	17.5	82.5
1.2	6.5	93.5

Fuente: (Cefalas *et al.*, 2008)



**Ilustración 10.** Imagen de partículas precipitadas sin y con campo magnético (Cefalas *et al.*, 2008).

### **3.- El tratamiento magnético aumenta la cantidad de carbonato de calcio precipitado**

Este efecto depende del pH de la solución, de la velocidad de flujo y de la duración del tratamiento. El tiempo que dure el agua bajo el tratamiento magnético influye en la precipitación. Mayor tiempo, mayor precipitación (Alimi *et al.*, 2006; Cefalas *et al.*, 2008).

Gabrielli *et al.*, 2001, midieron la concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$ , utilizando métodos electroquímicos a la salida de un dispositivo magnetizador, usando electrodos selectivos al  $\text{Ca}^{2+}$  y encontraron que a velocidades entre 0.074 m/s y 1.8 m/s y un campo magnético constante de 0.16 T, hubo una reducción en la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  entre un 15% y 25%. Una velocidad de 0.074 m/s indujo una precipitación de 15% de calcio y una velocidad de 1.8 m/s indujo una precipitación de 25%. A velocidades superiores prácticamente no hubo más reducción. Dedujeron que existe una correlación entre el aumento de velocidad y la precipitación de calcio. Estos resultados corroboran la promoción de la cristalización del  $\text{CaCO}_3$  por el TMA (Tratamiento magnético del agua).

### **4.- El tratamiento magnético modifica la relación entre nucleación homogénea y heterogénea**

Alimi *et al.*, 2006; Alimi *et al.*, 2007; Alimi *et al.*, 2009; estudiaron la influencia del campo magnético sobre la precipitación homogénea y heterogénea. Encontraron que la nucleación homogénea se favorece al incrementar el pH del agua, la velocidad de flujo de la solución, así como su tiempo de residencia; es decir, el tratamiento favorece la nucleación en la solución más que en la pared de las tuberías. Concluyeron que este efecto es más pronunciado para la nucleación homogénea y que no es necesaria la presencia de partículas de  $\text{CaCO}_3$  en el agua tratada, debido a que se supone que las asociaciones iónicas que están presentes, incluso en soluciones no saturadas; están

involucradas en un proceso complejo que conduce a la formación final de los cristales del carbonato de calcio, que se ven afectados por fenómenos MHD y electrocinéticos especialmente a lo largo de las paredes o por los cambios inducidos magnéticamente en su capa de hidratación.

#### **5.- Otros factores que influyen en el tratamiento magnético del agua son:**

- ***Diamagnetismo***

La mayoría de los sólidos que forman las incrustaciones son diamagnéticos; por ejemplo, el carbonato y el sulfato de calcio. Las sustancias diamagnéticas no poseen un momento magnético permanente; es decir, que puede perder su polaridad ante variaciones de la temperatura y presión. Cuando ellas no se someten al campo magnético se agrupan en grandes flóculos que precipitan formando incrustaciones. Si estas sustancias se someten al campo magnético, adquieren la polaridad del campo y por lo tanto se repelen y se mantienen suspendidas en el fluido. Como resultado de esta interacción se elimina la formación de incrustación y también la ya existente (Del Toro y Berenguer, 2001).

- ***Material de la tubería***

Gabrielli *et al.*, 2001, estudiaron la influencia de la naturaleza del material de las tuberías, aplicaron el tratamiento magnético utilizando diferentes tuberías: acero inoxidable, cobre y dos tipos de cloruro de polivinilo (PVC), uno transparente y flexible; y el otro rígido y opaco del tipo de PVC usado en trabajos de plomería. Después de cinco ciclos de operación, obtuvieron reducción del contenido del ion  $\text{Ca}^{2+}$  de un 28% para el acero y el cobre, mientras que para el PVC rígido fue del 18% y prácticamente cero para el PVC flexible. Observaron que al aumentar el tiempo de tratamiento no aumentó mucho la eficiencia del campo magnético. Tan solo mejoró un 5% al aumentar el número de ciclos de 5 a 150.

Alimi *et al.*, 2009, realizaron experimentos utilizando tuberías de teflón, tygon, PVC, cobre y acero inoxidable, y observaron que el campo magnético influye en la nucleación homogénea y en la precipitación total en las tuberías de materiales no conductores. Con la tubería de tygon lograron obtener mayor tasa de precipitación homogénea. También la rugosidad de la tubería influye en la nucleación del carbonato de calcio en presencia del campo magnético.

Explican el fenómeno a partir de la existencia de potenciales de flujo en la tubería que dependen de la velocidad y de la perturbación del perfil de flujo al aplicar el campo magnético. El efecto combinado podría hacer variar la distribución de carga en las cercanías de las superficies de contacto, alterando el equilibrio iónico local en las paredes y generando núcleos por precipitación. La aparición de núcleos sólidos en las paredes formaría semillas que facilitarían el crecimiento posterior de las partículas del carbonato. Como el potencial de flujo depende tanto de la velocidad como del material de la tubería, esto podría explicar las diferencias que se observan cuando el material de la tubería varía.

- **Intensidad de campo magnético**

En la información analizada no se encuentra una recomendación para seleccionar la intensidad de campo magnético que se debe aplicar al agua en función de alguna característica; como por ejemplo, el contenido de dureza. En la Tabla 8, se muestran algunas intensidades magnéticas aplicadas en algunas investigaciones que se revisaron.

**Tabla 8.** Intensidades de campo magnético aplicadas en diferentes investigaciones.

INVESTIGACIÓN	INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO	COMENTARIO
Gabrielli <i>et al.</i> , 2001	1,600 G.	Observaron remoción de calcio.
Cefalas <i>et al.</i> , 2008	6,000 y 12,000 G.	82% y 93.5% de formación de aragonita.
Clifford <i>et al.</i> , 2008	356 G.	La aragonita se incrementó en 24 horas.
Meng-Chun y Clifford, 2010	212 y 1,800 G.	Observaron crecimiento de aragonita.

Se puede apreciar que desde bajas intensidades magnéticas hay un efecto en la cristalización del carbonato de calcio. Por ejemplo: Clifford *et al.*, 2008, con intensidades magnéticas muy bajas (356 G) observaron crecimiento de aragonita. Al incrementar el campo magnético a valores mayores de 1,000 G, observaron una mejor respuesta. Gabrielli *et al.*, 2001, observaron un incremento en la remoción de calcio al utilizar una intensidad magnética de 1,600 G y la eficiencia se incrementó al aumentar el tiempo de contacto o número de ciclos. Meng-Chun y Clifford, 2010, observaron que la velocidad de

crecimiento de aragonita fue mayor en la medida que incrementaron el campo magnético. También observaron que el tiempo de premagnetización (tiempo de contacto del agua con el campo magnético antes de la cristalización) influye en la velocidad de crecimiento (ver Tabla 9). Cefalas *et al.*, 2008, al utilizar mayores intensidades de campo magnético entre 6,000 y 12,000 G observaron una precipitación del 82 y 93.5% del carbonato de calcio y mayor formación de aragonita.

Por lo tanto, se puede observar que una mayor intensidad magnética favorece la formación de aragonita y mayor precipitación del carbonato de calcio.

**Tabla 9.** Efecto de la intensidad magnética, el tiempo de premagnetización y la velocidad de crecimiento de aragonita.

INTENSIDAD EFECTIVA	TIEMPO DE PREMAGNETIZACIÓN (h)	VELOCIDAD DE CRECIMIENTO ( $10^{-10}$ m/s)
1,800 G.	1.5	0.918
	10	0.958
	20	0.975
212 G.	1.5	0.521
	20	0.802
	30	0.838
Condiciones de operación: de actividad iónica) pH=9 T=298.15 °K		Ca <sup>+2</sup> /CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> =5.54 (radio
Fuente: (Meng-Chun y Clifford, 2010)		

- **Influencia de la velocidad de flujo**

Otro factor importante a considerar es la velocidad de flujo. Gabrielli *et al.*, 2001, también estudiaron diferentes velocidades de flujo. En la Tabla 10, se muestra la influencia de la velocidad de flujo, con respecto al tiempo para formar incrustación y al tiempo de nucleación, con y sin tratamiento magnético. Se observa que la formación de incrustación es más rápida cuando no se aplica campo magnético.

**Tabla 10.** Influencia de la velocidad de flujo sobre  $t_s$  y  $t_n$ .

	SIN TRATAMIENTO	V= 0.074 m/s	V=0.885 m/s
Tiempo para formar incrustación " $t_s$ " (min)	75	180	225
Tiempo de nucleación " $t_n$ " (min)	5	30	50
Fuente: (Gabrielli <i>et al.</i> , 2001)			

El Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Santiago de Cuba, recomienda que la velocidad de trabajo sea entre 0.6 y 2.5 m/s y un tiempo de contacto de por lo menos 0.2 segundos (CNEA, 2011).

- **pH**

Los cambios de pH en un sistema expuesto a campo magnético han sido reportados en varias investigaciones y la tendencia no está todavía muy clara. Algunos trabajos reportan reducción en el pH después de aplicar el campo magnético.

Parsons 1999, observó una reducción del pH de 9.2 a 8.5 después de la aplicación del campo magnético a una solución de hidróxido de calcio. Observó que este cambio dependía de la intensidad del campo magnético. Al medir el pH sobre la superficie de un equipo de tratamiento magnético intrusivo, observó al inicio del experimento una reducción del pH de 7.0 a 6.5 y posteriormente un incremento gradual con el tiempo hasta valores de pH de 7.5 a 8.0. Al comparar estos resultados con los obtenidos de un blanco, observó que en este sistema no hubo cambios en el pH. De estas observaciones, propuso que los cambios en el pH se deben a reacciones electroquímicas que resultan de las corrientes eléctricas generadas por la fuerza de Lorentz y lo relacionó con una reducción en la incrustación.

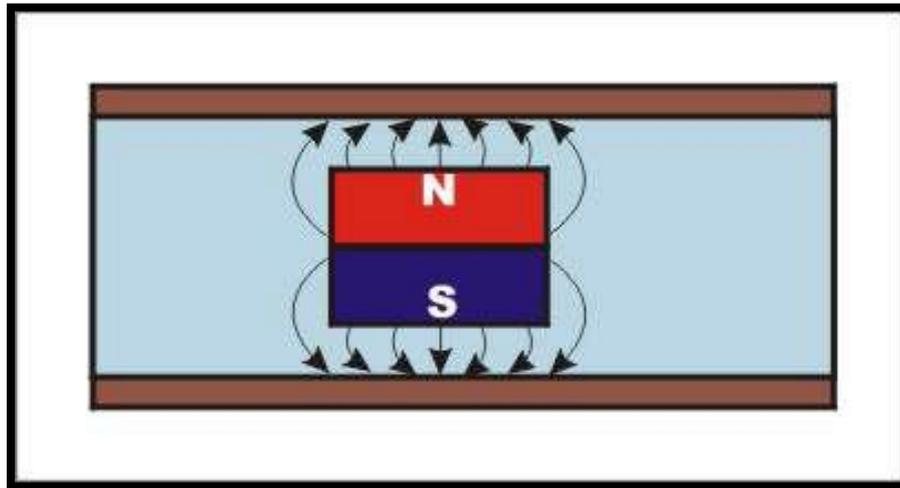
Alimi *et al.*, 2006, reportaron que la nucleación homogénea se incrementa al aplicar un campo magnético y ésta mejora con el incremento del pH, la velocidad de flujo y el tiempo de residencia.

Saksono *et al.*, 2009, estudiaron la influencia del pH en agua sintética con una dureza de 160 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , un pH inicial de 6.4, utilizaron imanes permanentes de neodimio con una intensidad de 5,200 G, en un sistema cerrado de fluido dinámico en recirculación, y encontraron que “la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  bajo tratamiento magnético es más alta que en tratamiento no magnético en un rango de pH de 6.4 – 8.5”. Es ampliamente conocido que el pH influye en la saturación y precipitación del  $\text{CaCO}_3$  en la solución.

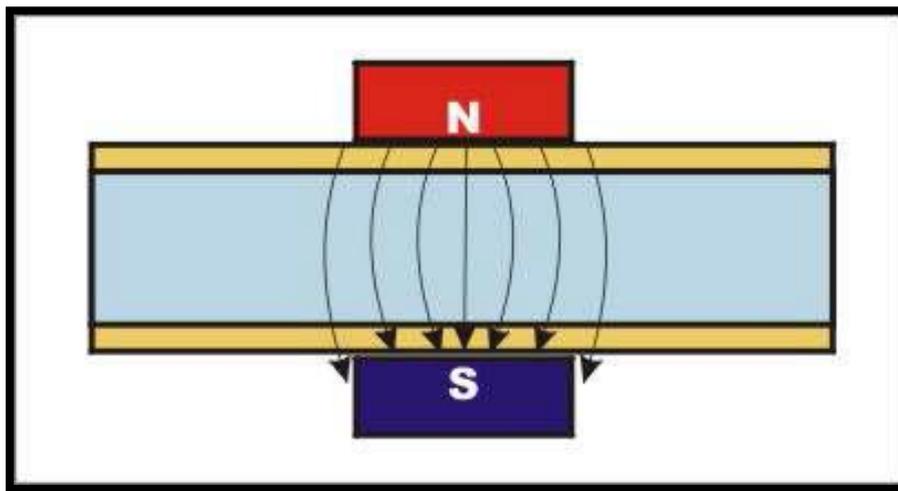
### **2.6.5 Equipo utilizado**

En el mercado existen muchos equipos para la aplicación del campo magnético al agua. Se disponen de diferentes configuraciones y numerosas marcas. Algunos usan electroimanes y otros usan imanes permanentes en diferentes configuraciones y diversas

orientaciones del campo magnético. Algunos son intrusivos (se colocan dentro de la tubería en contacto directo con el agua) y otros no intrusivos (se colocan fuera de la tubería). En la Ilustración 11 e Ilustración 12, se puede observar un ejemplo de método intrusivo y no intrusivo, respectivamente.



**Ilustración 11.** Método intrusivo. Imanes colocados en contacto con el agua (CNEA, 2011).



**Ilustración 12.** Método no intrusivo. Imanes colocados en la parte exterior de la tubería (CNEA, 2011).

Las especificaciones sobre su uso las determinan los diferentes fabricantes. Algunos fabricantes como: Polar International recomiendan que el equipo opere con una velocidad de 1.5 a 3.0 m/s para que se tenga un flujo turbulento durante el contacto con el equipo. Otros fabricantes como: Conditionnement Electromagnetique Par Induction, dicen que un flujo turbulento después de aplicar el campo magnético causa perturbaciones o inactiva el tratamiento (Baker y Judd, 1996).

### 2.6.6 Aplicaciones generales

Existe una gran variedad de dispositivos conformados por imanes permanentes o electroimanes, que se encuentran en el mercado con costos relativamente altos. Estos presentan diferentes configuraciones, diferentes intensidades de campo magnético y están diseñados para diferentes diámetros de tubería, pero su uso ha causado muchas controversias debido al poco entendimiento que se tiene sobre los mecanismos y parámetros de diseño de los dispositivos magnéticos por parte de los proveedores.

Sin embargo, existen investigaciones donde se han reportados resultados positivos al utilizar dispositivos magnéticos. Los mejores resultados con el uso de esta tecnología han sido reportados en los sistemas de recirculación continua del agua. La corporación CEPI, de Bélgica, que ha vendido más de 700,000 unidades por el mundo, estima que el 70% de sus ventas ha sido para circuitos de enfriamiento industrial. La planta termoeléctrica de Vinnitsa, Ucrania, utiliza agua tratada magnéticamente para prevenir la incrustación de los sistemas de enfriamiento de las turbinas y los condensadores. Y reportaron que en 2 meses de operación sin tratamiento magnético, la incrustación salina formó una capa de espesor de 1.5 a 2 mm sobre las paredes del intercambiador de calor y con el empleo de los acondicionadores o dispositivos magnéticos, se redujo la cantidad de lodo y se incrementó el tiempo de operación (sin paradas por limpieza) hasta 6 meses. Otro ejemplo claro, se reportó en una torre de enfriamiento de la Big Three Industries, situada en Bayport, Texas, EUA. La torre con un volumen de 70,000 galones y un régimen de circulación de 5,000 gal/min, operó por 18 meses sin tratamiento químico, solo con el dispositivo magnético. Durante este mismo periodo, el agua se concentró con un exceso de 50 ciclos y se observó un lodo fino de material suave acumulado en la base de la torre a 3" de profundidad (Del Toro y Berenguer, 2001).

Actualmente, el uso del campo magnético tiene diversas aplicaciones, por ejemplo: los imanes se utilizan como componentes de diversos productos útiles para la Industria, la Salud, etc. Algunos de ellos son trampas para atrapar metales, suavizadores de agua, economizadores de combustible (gasolina, gas y diesel), productos para la salud (**Magnetoterapia**), así mismo se usan los imanes en bocinas, puertas de refrigeradores, para el cierre de mobiliario, altavoces, parlantes, aros para auriculares, brújulas, cierres para heladeras, llaves codificadas, bandas magnéticas de tarjetas de crédito o débito,

grúas magnéticas, motores, generadores, detectores de metales, transbordadores espaciales, así como también se usan en las industrias.

En la **Ganadería** se han utilizado para ionizar el agua que bebe el ganado; el agua adquiere propiedades benéficas para la salud del ganado, entre otras, disminuye el stress de los animales, mejora la digestión y aprovechamiento de los alimentos, beben más agua y aumenta la masa corporal.

Los imanes en la **Agricultura** se utilizan para *ionizar* el agua con la que se riegan los cultivos, los campos magnéticos rompen la tensión superficial del agua permitiendo que por la propiedad de capilaridad se nutra aún mejor la planta y requiera menos fertilizantes y menores cantidades de agua.

En la **Industria Automotriz** se utilizan como dispositivos anticontaminantes y optimizadores de combustible y se instalan en el motor, en la línea de combustible, ya sea gasolina, gas o diesel.

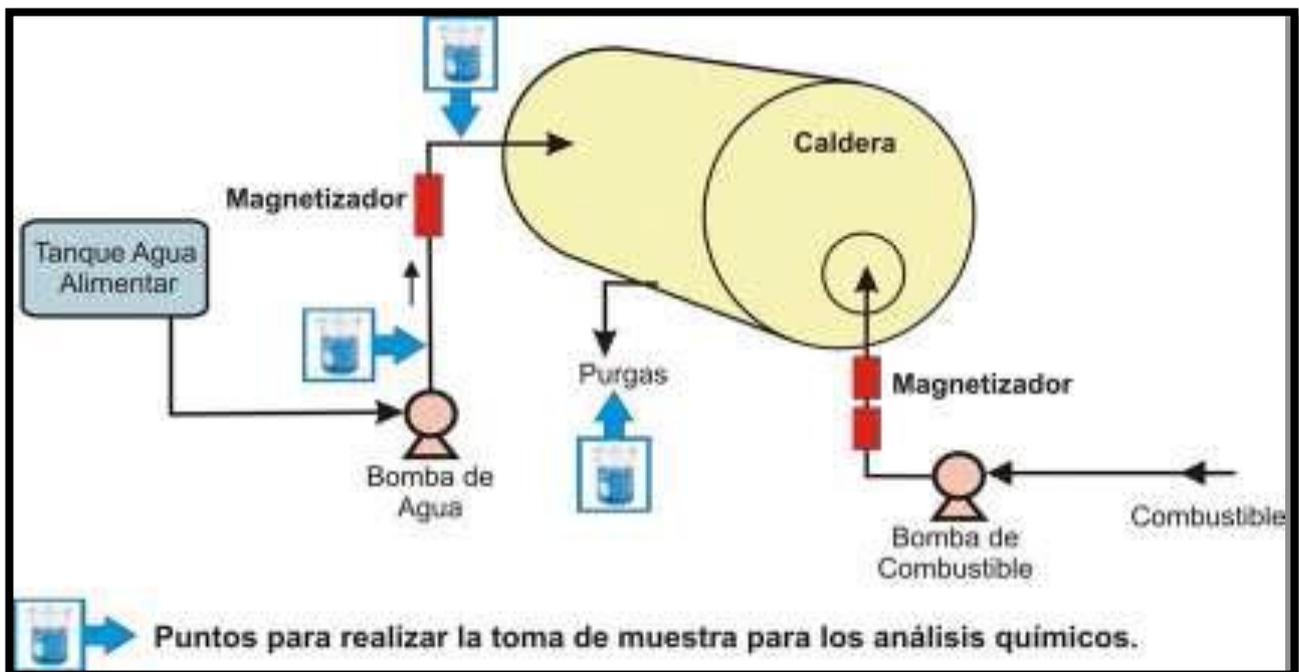
Los imanes en la **Salud** se utilizan para aliviar y/o mejorar la salud, éstos se colocan en puntos estratégicos como la acupuntura. Cada campo magnético interactúa con el cuerpo y actúa a nivel celular, glandular, tejidos, músculos y órganos. Los campos magnéticos tienen la propiedad de *desinflamar*, *mitigar el dolor* y mejorar la *circulación sanguínea*. Se utilizan para el tratamiento de una gran cantidad de padecimientos.

En la **Industria** se utilizan como *Trampas Magnéticas* para atrapar partículas metálicas ferrosas, estos dispositivos pueden ser las rejillas, las placas y las barras magnéticas; y existe una gran variedad de tamaños y formas de estos dispositivos magnéticos.

También son utilizados en las *instalaciones hidráulicas* que conducen cualquier tipo de fluido, ya sea líquido o gaseoso. Los campos magnéticos *ionizan* el fluido, en el caso del agua actúan bajando la dureza y la incrustación de sarro permitiendo hacer más eficiente el sistema hidráulico optimizando el trabajo, el combustible y disminuyendo el paro de los equipos por mantenimiento, entre otros beneficios. También se pueden utilizar a nivel residencial y comercial.

La literatura y el internet contienen mucha información acerca de equipos comerciales y sus aplicaciones. Los principales usos de estos equipos son: la eliminación de

incrustación en sistemas de calentamiento y de recirculación. También se usan en calentadores domésticos e industriales, intercambiadores de calor, humidificadores de vapor, en los condensadores de los sistemas de aire acondicionado, plantas de procesamiento de azúcar, sistemas de generación de vapor y torres de enfriamiento. (Tye, 1993; Corney, 1991). La Ilustración 13, muestra un ejemplo de ubicación correcta de un dispositivo de campo magnético (CNEA, 2011).



**Ilustración 13.** Ubicación de un dispositivo magnético en calderas (CNEA, 2011).

### CAPÍTULO III

#### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo, se describe la parte experimental de este trabajo de investigación. En la Ilustración 14, se muestra un esquema de la secuencia de actividades que comprende la metodología experimental.



Ilustración 14. Metodología experimental.

#### 3.1 Selección de la muestra

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, se seleccionó un agua con alta dureza (principalmente con alta presencia de carbonato de calcio) y que la forma cristalina del carbonato de calcio fuera calcita. Para ello, se muestrearon pozos de diferentes puntos del estado de Morelos que se caracterizan por tener alta dureza. Para la caracterización del agua se realizaron los análisis de dureza total, dureza de calcio, alcalinidad, pH, conductividad, temperatura, color, turbiedad, cloruros, sulfatos y hierro. Una vez cumplido el primer requisito, es decir, que fuera un agua con alta dureza, se procedió a realizar el análisis cristaloóptico (ver Anexo I) para determinar la forma

cristalina del carbonato de calcio, la cual, debe estar presente en forma de calcita, debido a que es la principal causante de problemas de incrustación. Con esta evaluación previa se seleccionó el agua utilizada en este experimento.

### 3.2 Factores experimentales

Tomando como base la revisión de la literatura (Cefalas *et al.*, 2008; Alimi *et al.*, 2006; Gabrielli *et al.*, 2001), se planteó la realización del trabajo experimental con el fin de cumplir los objetivos de la investigación. En la Tabla 11, se muestran las variables de entrada para los experimentos, donde se evaluaron dos intensidades de campo magnético y dos velocidades de flujo.

El trabajo experimental, consistió de un total de 6 experimentos; de los cuales 4 fueron con aplicación de campo magnético y 2 fueron utilizados como blancos (sin aplicación de campo magnético). Los experimentos se realizaron en dos etapas, con una duración de 60 días cada una.

**Tabla 11.** Variables de entrada en las dos etapas experimentales.

	ETAPA I			ETAPA II		
	F1-BLANCO	A-BAJA	B-ALTA	F2-BLANCO	C-BAJA	D-ALTA
Campo Magnético	0 G	2,500 G	5,000 G	0 G	2,500 G	5,000 G
Velocidad de flujo	0.43 m/s			0.80 m/s		
Caudal	300 mL/min			550 mL/min		
Tiempo de contacto	0.20 s			0.11 s		

Se estableció desde el inicio de esta investigación, no reponer en el circuito el agua que se perdiera por efectos de la evaporación, para propiciar la formación de la incrustación y estudiar sus efectos.

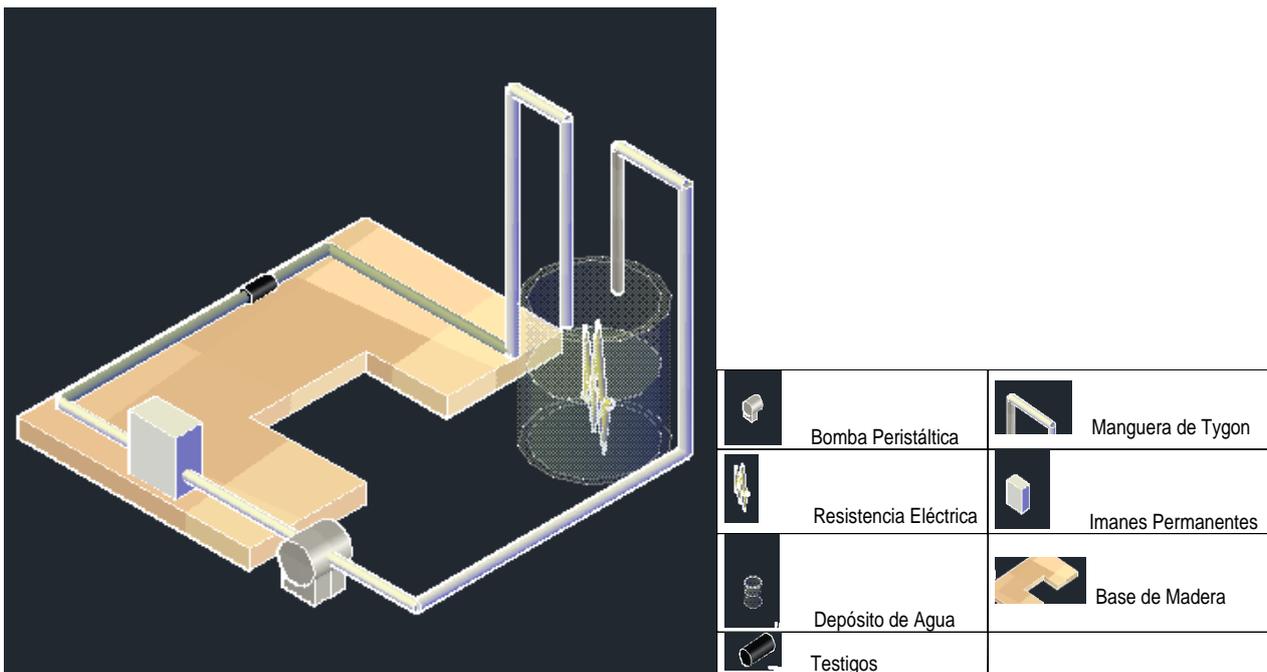
### 3.3 Sistema experimental

En la Ilustración 15, se muestra un esquema del montaje de los circuitos experimentales, los cuales estuvieron integrados por los siguientes componentes:

- 1. Bomba peristáltica.**- Las bombas peristálticas ofrecen la ventaja de tener un dispositivo de velocidad variable que permite hacer una calibración precisa del

flujo, cuenta con un cabezal que permite transportar de manera eficiente fluidos sin poner en riesgo cualquier parte de la propia bomba.

2. **Resistencia eléctrica.**- Para elevar la temperatura a 36°C, y simular la temperatura de un circuito de enfriamiento.
3. **Recipiente de vidrio.**- Utilizado como depósito principal del sistema de enfriamiento.
4. **Mangueras de plástico de tygon.**- Se utilizaron para conducir el agua en el circuito. Esta manguera tenía una longitud de 3.25 m. En la Tabla 12, se muestran las propiedades físicas de la manguera tygon.
5. **Imanes permanentes.**- Se utilizaron imanes de neodimio para obtener la intensidad de campo magnético requerida.
6. **Testigos (o cupones) de incrustación.**- Se utilizaron para observar el efecto del agua en estudio sobre la formación de incrustación. Se colocaron sobre la manguera después de los imanes.



**Ilustración 15.** Esquema de diseño del montaje de los experimentos (Foto propia).

Para la inducción magnética se utilizaron imanes de neodimio los cuales se colocaron en el circuito de enfriamiento en posición ortogonal (campo magnético perpendicular al flujo del agua) y en atracción (polo norte- polo sur). La intensidad de campo magnético se midió con un Gauss meter marca Lake Shore, modelo 410.

**Tabla 12.** Propiedades físicas de las mangueras TYGON ® LFL.

PROPIEDADES	MÉTODO ASTM	VALOR O RANGO
Dureza durómetro, orilla A, 15 sec.	D2240-91	56
Color	-----	Claro
Resistencia a la atracción psi (Mpa)	D412-92	1,550 (10.7)
Alargamiento de rotura, %	D412-92	380
Resistencia al Desgarro lb-f/inch (kN/m)	D1004-93	122 (21)
Peso específico	D792-91	1.16
Absorción de agua,%	D570-81	0.18
Conjunto de compresión desviación constante, % a 70°C por 22 horas	D395-89 Método B	64
Temperatura de fragilidad por impacto, °F (°C)	D746-79	-65 (-54)
Temperatura Máxima de funcionamiento recomendada, °F (°C)	-----	165 (74)
Temperatura baja de flexibilidad, °F (°C)	D380-87	-94 (-70)
Rigidez dieléctrica, v/mil (kV/mm)	D149-93	414 (16.3)
Módulo de Tracción A 100% psi (MPa) A 200% psi (MPa)	D412-92	600 (4.1) 900 (6.2)
Tracción Set,%	D412-92	44
A menos que se indique lo contrario, se llevaron a cabo todas las pruebas a temperatura ambiente (73°F). Los valores mostrados se determinaron en 0.075 "tira extruida de espesor o placas ASTM 0.075" de espesor moldeados o botones moldeados de durómetro ASTM.		
<b>Fuente:</b> (Saint-Gobain Performance Plastics, 2003)		

En la Ilustración 16, se muestran los dispositivos magnéticos que se utilizaron para la experimentación, 16a) Intensidad de campo magnético de 2,500 G y 16b) Intensidad de campo magnético de 5,000 G.



a)

b)

**Ilustración 16.** Dispositivos Magnéticos utilizados en la experimentación.

En cada uno de los circuitos, se colocaron dos testigos de incrustación uno de cobre y otro de acero inoxidable 304 con dimensiones de 3"x1/2"x1/16" cada uno; con el fin de determinar la cantidad de incrustación formada sobre los mismos, durante la conducción de agua por el circuito de enfriamiento. Los circuitos operaron con una temperatura de 36°C, simulando la temperatura del agua de recirculación de un circuito de enfriamiento.

Antes del montaje y después del desmontaje de los experimentos se pesaron los recipientes, las resistencias, las mangueras y los testigos de incrustación, para obtener el peso inicial y final para determinar la cantidad de carbonato de calcio que se incrustó o depositó.

### 3.4 Operación de los circuitos experimentales

En la primera etapa experimental se operaron y monitorearon tres circuitos, con una velocidad de 0.43 m/s, un tiempo de contacto de 0.20 s, un caudal de 300 mL/min, con intensidades de campo magnético de 0 G, de 2,500 G y 5,000 G. En la Ilustración 17, se muestra el montaje de los circuitos experimentales.

a) Circuito 0 G (Blanco)



b) Circuito 2,500 G



c) Circuito 5,000 G

**Ilustración 17.** Montaje de los circuitos para la experimentación.

En la segunda etapa experimental también se operaron y monitorearon tres circuitos, con una velocidad de 0.80 m/s, un tiempo de contacto de 0.11 s, un caudal de 550 mL/min cada uno y las mismas intensidades de campo magnético utilizadas en la primera etapa. El montaje fue el mismo que se muestra en la Ilustración 17, tres circuitos en sistema continuo.

### 3.4.1 Inicio de los Experimentos

Una vez realizados los análisis fisicoquímicos y cristaloópticos del agua seleccionada para el estudio, se procedió a colocar 9 L de agua en el recipiente de vidrio de 9.5 L de capacidad. Posteriormente, el agua se bombeó a través del circuito pasando por el dispositivo magnético, los testigos de incrustación y retornando nuevamente al recipiente de vidrio.

Para el calentamiento del agua se utilizó una resistencia eléctrica modelo SGH 180 de la marca Sunny, que se colocó dentro de cada recipiente de vidrio, con la finalidad de mantener la temperatura en el circuito a 36 °C.

Al inicio de operación, se tomaron muestras de 450 mL a los 30 min, 1 hora, 2 horas, 5 horas y 24 horas después del arranque para la realización de los análisis fisicoquímicos y cristaloópticos, para observar si hay un efecto en los parámetros de control y transformaciones en el cristal al entrar el agua en contacto con un campo magnético. Después del primer día de operación, solo se tomaron los mililitros necesarios para los análisis de control correspondientes y el agua que se tomaba se reponía con agua cruda.

### 3.4.2 Seguimiento de los experimentos

Durante los 60 días de operación de cada etapa experimental, se dio seguimiento a los cambios en las características del agua y la transformación de los cristales del carbonato de calcio, por medio de diferentes técnicas analíticas. En la Tabla 13, se muestran los parámetros que se midieron, la frecuencia, la técnica analítica y el equipo utilizado; así como la norma a la que hace referencia.

**Tabla 13.** Parámetros de análisis para la etapa experimental.

PARÁMETRO:	FRECUENCIA:	TÉCNICA ANÁLITICA	EQUIPO	REFERENCIA:
Caudal (mL/min)	Dos veces al día	Volumen/tiempo	Probeta y Cronómetro	Ley Federal sobre Metrología y Normalización
Turbiedad (NTU)	Diario	Medición directa con un Turbidímetro	2100P Turbidímetro	NMX-AA-038-SCFI-2001
Color (Unidades PtCo)	Diario	Método estándar HACH #8025	DR/2400	NMX-AA-017-SCFI-1980
Cloruros(mg/L de Cl <sup>-</sup> )	1 cada mes	Método estándar HACH # 8113	DR/2400	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos(mg/L de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	1 cada mes	Método estándar HACH # 8051	DR/2400	NMX-AA-074-SCFI-1981
Hierro (mg/L de Fe)	1 cada mes	Método estándar HACH # 8008	DR/2400	NMX-AA-129-SCFI-2006
T (°C)	Diario	Medición directa con termómetro	Termómetro	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad (µS/cm)	Diario	Conductímetro	Multi 3500i marca WTW	NMX-AA-093-SCFI-2000
pH	Diario	Medición directa con Multiparámetro	Multi 3500i marca WTW	NMX-AA-008-SCFI-2011
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	2 veces por semana	Método estándar HACH # 8213	Digital Titrator Model 16900	NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza de calcio (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	2 veces por semana	Método estándar HACH #8204	Digital Titrator Model 16900	NMX-AA-072-SCFI-2001
Alcalinidad total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	2 veces por semana	Método estándar HACH # 8203	Digital Titrator Model 16900	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sólidos Disueltos	1 vez por semana	Sólidos Disueltos Totales, Volátiles y fijos.	-----	APHA-AWWA-WEF-2005
Análisis cristal óptico	1 vez por semana	Método cristaloóptico para la evaluación del efecto del tratamiento magnético a las aguas industriales	Microscopio OLYMPUS modelo BX60F-3	Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA)
Análisis cupones de incrustación	Principio y final de cada experimento	Método estándar G1-90	-----	ASTM International
Difracción de rayos X	Principio y final de cada experimento	Técnica de polvos	Difractómetro de polvos, marca Itai Structures, modelo APD 2000 PRO	
Microscopía Electrónica de barrido	Principio y final de cada experimento		Microscopio electrónico de barrido	

La medición del caudal se realizó dos veces al día, una por la mañana y otra por la tarde usando un cronómetro y una probeta para mantener constante el caudal durante los 60 días de operación y por consiguiente, la velocidad que se necesitaba en cada etapa. Cuando la medición no era la requerida, se procedía a calibrar las bombas.

La concentración de cloruros, hierro, sulfatos y color se determinaron colorimétricamente con un espectrofotómetro DR/2400, usando los métodos de HACH # 8113, 8008, 8051 y 8025, respectivamente. Las mediciones se realizaron cada mes para el caso de los cloruros, hierro y sulfatos, y todos los días para la determinación del color.

La turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. La medición se realizó todos los días con un equipo 2100P Turbidimeter previamente calibrado.

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas o incrustantes de un medio líquido.

La conductividad eléctrica (CE) es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

El valor de CE medido, a veces se utiliza como una medida sustituta de la concentración total de sólidos disueltos. La conductividad y pH se midieron todos los días, con un multiparámetro modelo Multi 3500i marca WTW, previamente calibrado.

La temperatura se midió todos los días directamente con un termómetro marca Taylor, SAMA CT15. Además se corroboró con la temperatura medida por el multiparámetro.

La concentración de dureza total, dureza de calcio y alcalinidad se midieron dos veces por semana, mediante titulación con un aparato Digital Titrator Model 16900, usando los métodos HACH # 8213, 8204 y 8203, respectivamente.

Los sólidos disueltos totales son sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua y que no son retenidas en el material filtrante. La medición de los sólidos se realizó una vez por semana, mediante la técnica de Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2005). Esta técnica describe el procedimiento para determinar sólidos en muestras de agua por el método gravimétrico.

### 3.4.3 Desmontaje de los experimentos

Después de los 60 días de operación, se procedió a desmontar los circuitos. Se tomaron 450 mL de agua para realizar los análisis fisicoquímicos del agua, antes mencionados, tanto del agua cruda como del agua de los tres circuitos, para hacer una comparación con los datos iniciales y conocer si hubo un cambio con respecto al tiempo en las características iniciales del agua.

El agua restante se utilizó para evaporarla y obtener las muestras para realizar la Difracción de Rayos X y la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se recolectó el polvo depositado sobre las resistencias y el fondo de los recipientes de los circuitos para realizar, posteriormente, el análisis de Difracción de Rayos X y MEB.

### 3.5 Evaluación de los experimentos

#### 3.5.1 Parámetros importantes del agua

Se graficaron los parámetros más importantes del agua como son: dureza total, dureza de calcio, dureza carbonatada, dureza no carbonatada, pH y conductividad; medidos durante el desarrollo experimental con respecto al tiempo para conocer su comportamiento y determinar si fueron afectados por la aplicación del campo magnético.

Como una manera de realizar un análisis completo de los resultados obtenidos en los parámetros del agua, se realizó un Diseño Factorial Multinivel, utilizando el programa STATGRAPHICS.

### DISEÑO FACTORIAL MULTINIVEL

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes que frecuentemente tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor.

Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, etc.), o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.). Para estudiar la manera en la que influye cada factor sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se

realizan los experimentos aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar. En este caso, se manejaron dos factores, A y B, siendo **A:Velocidad** y **B:Intensidad**; el factor A con dos niveles: 0.43 y 0.80 m/s; y el factor B con tres niveles: 0 G; 2,500 G y 5,000 G.

El modelo estadístico de efectos para este tipo de diseño está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \tag{Ecuación 19}$$

$$i=1,2,\dots,a; j=1,2,\dots,b; k=1,2,\dots,n.$$

donde:

$\mu$ : es la media general.

$\alpha_i$ : es el efecto debido al i-ésimo nivel del factor A.

$\beta_j$ : es el efecto del j-ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ : representa el efecto de interacción en la combinación ij.

$\epsilon_{ijk}$ : es el error aleatorio que, se supone, sigue una distribución normal con media cero y varianza constante y son independientes entre sí.

Hay que recordar que las sumas de cuadrados divididas entre sus correspondientes grados de libertad se llaman cuadrados medios (CM). Al dividir estos entre el cuadrado medio del error ( $CM_E$ ) se obtienen estadísticos de prueba con distribución F. En la Tabla 14, se muestra esta información sintetizada.

**Tabla 14.** ANOVA para el diseño factorial.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Prueba F	Valor-P
Efecto A	$SC_A$	$a - 1$	$CM_A$	$CM_A / CM_E$	$P(F > F^{A_0})$
Efecto B	$SC_B$	$b - 1$	$CM_B$	$CM_B / CM_E$	$P(F > F^{B_0})$
Efecto AB	$SC_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$CM_{AB}$	$CM_{AB} / CM_E$	$P(F > F^{AB_0})$
Error	$SC_E$	$ab(n-1)$	$CM_E$		
Total	$SC_T$	$abn - 1$			

Si el valor-p es menor que el nivel de significancia  $\alpha$  prefijado, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el correspondiente efecto está activo o influye en la variable de respuesta.

También se pueden hacer gráficos que ayuden a interpretar o conocer las condiciones óptimas para minimizar los procesos. Por ejemplo: los diagramas de Pareto y la gráfica de Interacción.

El **diagrama de Pareto** sirve para visualizar los efectos o factores que tienen una influencia significativa sobre la variable respuesta. Otra alternativa es obtener el diagrama de Pareto estandarizado, en el cual se representan los efectos divididos entre su error estándar.

Se dice que dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentra el otro; y para esto sirve la **gráfica de Interacción** (Gutiérrez y De la Vara, 2012).

### 3.5.2 Cambio en la estructura y el tamaño del cristal

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se conoce que el campo magnético provoca un efecto sobre la estructura cristalina del carbonato de calcio, propiciando la nucleación de otras formas de carbonato de calcio diferente a la original, principalmente de calcita a aragonita. También puede cambiar el tamaño de los cristales y su forma de agrupación, la porosidad y la densidad de los mismos.

Para observar y comprobar estos cambios se utilizaron el análisis cristaloóptico, la difracción de rayos X y la microscopía electrónica de barrido.

El análisis cristaloóptico permitió determinar la estructura y el tamaño de los cristales presentes en la muestra. Se realizó una vez por semana, de acuerdo al Método cristaloóptico para la evaluación del efecto del tratamiento magnético a las aguas industriales, desarrollado por el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA, 2010), Santiago de Cuba (Anexo I). El análisis se realizó utilizando un microscopio modelo BX60F-3, marca OLYMPUS.

La microscopía electrónica produce imágenes de alta resolución, de forma que las características más ínfimas de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación. Este análisis se realizó al agua cruda y al final de la experimentación analizando tres puntos: el material depositado en las resistencias, el material depositado en el fondo de los recipientes y el sobrenadante a los 60 días de operación. Se obtuvo la composición elemental de los cristales presentes utilizando la técnica de rayos X integrada en el

microscopio electrónico de barrido marca Leo 1450VP. Este análisis se realizó en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), en el departamento de microscopía del CIICAp a cargo del Dr. Rene Guardián Tapia.

La difracción de rayos X permite la identificación de fases cristalinas presentes en una muestra. Este análisis se realizó al agua cruda y al final de la experimentación, igualmente analizando los tres puntos mencionados anteriormente, mediante la técnica de difracción de polvos, utilizando un difractómetro marca Itai Structures, modelo APD 2000 PRO, con radiación filtrada de Cu. Este análisis se realizó en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en el departamento de Geotermia a cargo de la Dra. Georgina Izquierdo Montalvo.

### 3.5.3 Análisis de los testigos de Incrustación

Los depósitos formados a partir del agua pueden clasificarse como incrustaciones, depósitos sedimentarios (lodos), productos de corrosión, o depósitos biológicos. La composición general de un depósito o una parte de un depósito puede ser determinada por análisis químico o espectrográfico; los constituyentes realmente presentes como sustancias químicas pueden ser identificados por microscopía o difracción de rayos X.

La incrustación es un depósito que por lo general puede mantener su forma física cuando se utilizan medios mecánicos para quitarlo de la superficie sobre la que se deposita, la incrustación que puede o no adherirse a la superficie subyacente, es generalmente cristalina y densa. Los depósitos sedimentarios formados con el agua pueden incluir todos los sólidos en suspensión transportados por el agua y elementos traza que estaban en solución en el agua. Un depósito de corrosión es resultado de la acción del agua, tal como el óxido, que por lo general se compone de material insoluble depositado sobre o cerca del área corroída. Los depósitos biológicos pueden estar compuestos por organismos microscópicos, o de tipos macroscópicos (ASTM D887-08).

Los testigos o cupones de incrustación y/o corrosión son el método estándar para la medición de la velocidad de incrustación y/o corrosión en los sistemas de enfriamiento. Estas pequeñas muestras de metal están expuestas al agua de refrigeración durante un periodo determinado (por lo general, de 30 a 120 días), después se retiran del sistema y se pesan. El aumento o pérdida de peso se correlaciona con la velocidad de incrustación y/o corrosión en g/día/cm<sup>2</sup>.

Los testigos fueron colocados sobre los circuitos al inicio de los experimentos y desmontados al final de cada etapa para su posterior análisis. El análisis se realizó de acuerdo a la ASTM G1-90 (Práctica estándar para la preparación, limpieza y evaluación de muestras de pruebas de corrosión), la cual consiste en tres lavados generales:

- **Limpieza química.-** Es el proceso de remoción de todos los productos de corrosión e incrustación adheridos al testigo durante el tiempo de exposición. Dependiendo del material del que esté construido el testigo, es la solución química que se utiliza para realizar la limpieza (Consultar anexo 1 de la ASTM G1-90). En este caso se utilizó una solución de ácido clorhídrico concentrado para la limpieza química de los testigos de cobre, dejándolos durante un tiempo de 1 a 3 minutos a una temperatura de 25<sup>0</sup>C; y una solución de ácido nítrico concentrado para la limpieza química de los testigos de acero inoxidable, dejándolos durante 20 minutos a una temperatura de 60<sup>0</sup>C.
- **Limpieza electrolítica.-** También puede ser utilizada para la eliminación de productos de corrosión e incrustación. Para realizar este lavado, los testigos se sumergieron durante 1 min en una solución de bicarbonato de sodio al 10%.
- **Limpieza mecánica.-** Los procedimientos mecánicos pueden incluir raspado, lavado, cepillado y limpieza ultrasónica. Estos métodos se utilizan a menudo para eliminar los productos de corrosión fuertemente incrustados. Los testigos se lavaron con un cepillo de cerdas suaves y detergente, posteriormente, se enjuagaron con agua a corriente.

Una vez realizados los tres lavados, se dejaron los testigos durante un minuto en acetona, después se secaron con papel absorbente y se dejaron por 4 h en un desecador. Después de que transcurrió el tiempo, los testigos fueron pesados para obtener el peso final y calcular la incrustación mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{\text{Peso Final} - \text{Peso Inicial}}{\text{Área del testigo} \times \text{Días de exposición}} \quad \text{Ecuación 20}$$

donde:

I = Incrustación en g/día/cm<sup>2</sup>

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Selección de la Muestra

Se analizaron ocho pozos de agua de diferentes puntos del estado de Morelos, con el objeto de conocer el grado y tipo de dureza que presentan. En la Tabla 15, se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 15.** Resultados de la caracterización de aguas para seleccionar la muestra.

Parámetros	Agua de Temixco	Agua de Xochitepec	Agua de Tlayacapan	Agua de 4 pozos de Xochitepec				Agua de Zacatepec
				Pozo C	Pozo A	Pozo E	Pozo Arroyos	
Color (unidades ptCo)	22	0	50.6	2	0	26	10	<b>0</b>
Turbiedad (NTU)	3.46	1	1.86	0.3	0.3	2.75	0.3	<b>0.55</b>
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	25	25	<b>25</b>
Conductividad (µS/cm)	1110	530	470	2100	1330	1440	1180	<b>1420</b>
SDT (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	570	270	240	1050	670	720	590	<b>710</b>
pH	7.85	7.85	5.74	7.12	7.48	6.84	7.02	<b>7.35</b>
Dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	620	232	196	710	678	642	458	<b>694</b>
Dureza de calcio (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	538	162	154	488	496	540	388	<b>546</b>
Alcalinidad (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	304	188	156	----	302	350	----	<b>298</b>
Cloruros (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	11.6	12.5	4.25	59	15.4	10.2	11.5	<b>9.2</b>
Sulfatos (mg/L de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	387	46	40	390	340	390	310	<b>480</b>
Hierro (mg/L de Fe)	0.04	0.04	0.1	0.07	0.02	0.26	0.04	<b>0.04</b>

Como se puede observar, el agua de Temixco, y los cuatro pozos de Xochitepec, cumplen con el requisito de alta dureza, pero al realizarle el análisis cristaloóptico, se observó que el carbonato de calcio, en la mayoría de los casos, se desarrollaba en su forma cristalina de aragonita (en el Anexo II se presentan los resultados del análisis cristaloóptico).

El agua seleccionada fue la un pozo la de la colonia Antonio Chiverías del Municipio de Zacatepec, Morelos; debido a que tuvo una alta dureza (694 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), y con el análisis cristaloóptico se encontró que el carbonato de calcio, estaba presente en forma de calcita al 100%.

Después de haber encontrado el agua para la experimentación, se procedió a la recolección de la misma, se transportaron al laboratorio 200 L de agua en dos recipientes de 100 L, después se vaciaron a garrafones de 20 L y se guardaron en un cuarto frío a 4 °C para preservar las características del agua durante los 4 meses de experimentación.

#### 4.2 Parámetros importantes del agua

Los resultados obtenidos durante el monitoreo de las dos etapas, permitieron hacer un análisis de los parámetros más importantes en función del tiempo de prueba. En la Tabla 16, se muestra la calidad del agua al inicio y final de la experimentación. Se observó que los parámetros donde hubo un cambio significativo en función del tiempo fueron: dureza total, dureza de calcio, dureza carbonatada, dureza no carbonatada debida principalmente a cloruros y sulfatos, el pH, la conductividad y los SDT.

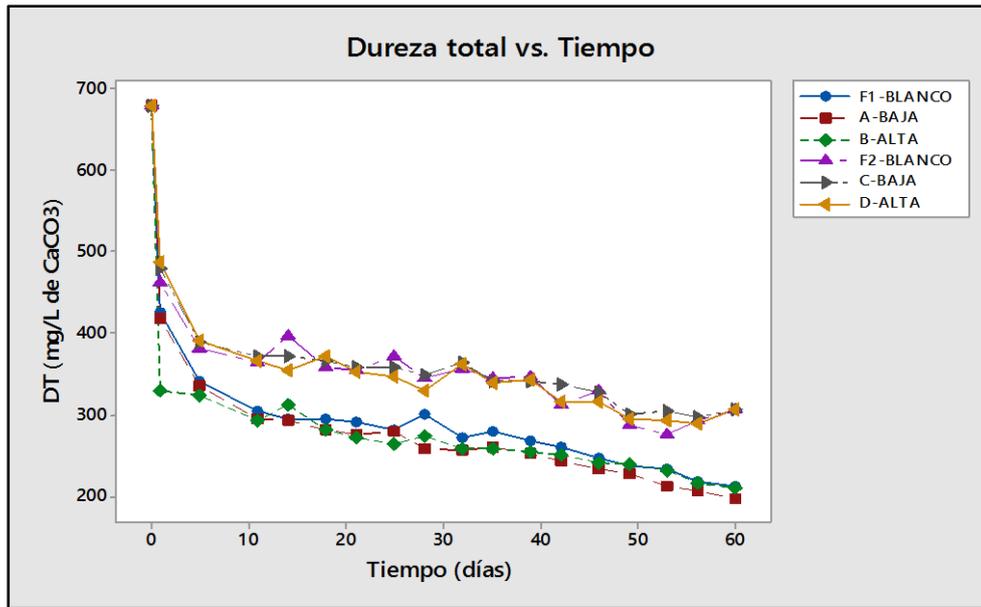
Es importante resaltar que se asignaron letras a los circuitos para diferenciarlos de las dos etapas experimentales, se nombró **F1-Blanco** al circuito sin campo magnético, **A-Baja** al circuito con intensidad de campo magnético de 2,500 G y **B-Alta** al circuito con intensidad de campo magnético de 5,000 G, cuando se utilizó la velocidad de 0.43 m/s (Etapa I) y se nombraron **F2-Blanco** al circuito sin campo magnético, **C-Baja** al circuito con intensidad de campo magnético de 2,500 G y **D-Alta** al circuito con intensidad de campo magnético de 5,000 G, cuando se utilizó la velocidad de 0.80 m/s. De esta manera se identificaron los seis circuitos y se nombrarán así de aquí en adelante.

**Tabla 16.** Calidad del agua al inicio y final de la experimentación.

Parámetros	Agua Cruda	Etapa I (velocidad 0.43 m/s)			Etapa II (velocidad 0.80 m/s)		
		F1-BLANCO	A-BAJA (2,500 G)	B-ALTA (5,000 G)	F2-BLANCO	C-BAJA (2,500 G)	D-ALTA (5,000 G)
Turbiedad (NTU)	0.32	0.76	0.73	0.57	0.83	0.55	0.95
Temperatura (°C)	25	36.7	37.3	37.2	37	36	37
Conductividad (µs/cm)	<b>1363</b>	<b>423</b>	<b>381</b>	<b>408</b>	<b>556</b>	<b>606</b>	<b>606</b>
pH	<b>7.59</b>	<b>8.12</b>	<b>8.09</b>	<b>8.08</b>	<b>8.06</b>	<b>8.09</b>	<b>8.07</b>
Dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	<b>678</b>	<b>212</b>	<b>197</b>	<b>209</b>	<b>306</b>	<b>307</b>	<b>307</b>
Dureza de calcio (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	<b>583</b>	<b>144</b>	<b>133</b>	<b>138</b>	<b>191</b>	<b>196</b>	<b>199</b>
Alcalinidad (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	<b>279</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>58</b>	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
Cloruros (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	10.5	10.3	10.6	11.1	11.0	9.2	9.8
Sulfatos (mg/L de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	<b>421</b>	<b>203.7</b>	<b>176.4</b>	<b>175.9</b>	<b>274</b>	<b>292.8</b>	<b>368.2</b>
Hierro (mg/L de Fe)	0.04	0.02	0.02	0.03	0.19	0.23	0.22
Sólidos disueltos totales (mg/L)	<b>682</b>	<b>212</b>	<b>191</b>	<b>204</b>	<b>278</b>	<b>303</b>	<b>303</b>
Índice de Saturación de Langelier	<b>1.19</b>	<b>0.37</b>	<b>0.38</b>	<b>0.37</b>	<b>0.61</b>	<b>0.62</b>	<b>0.58</b>

#### 4.2.1 Dureza Total

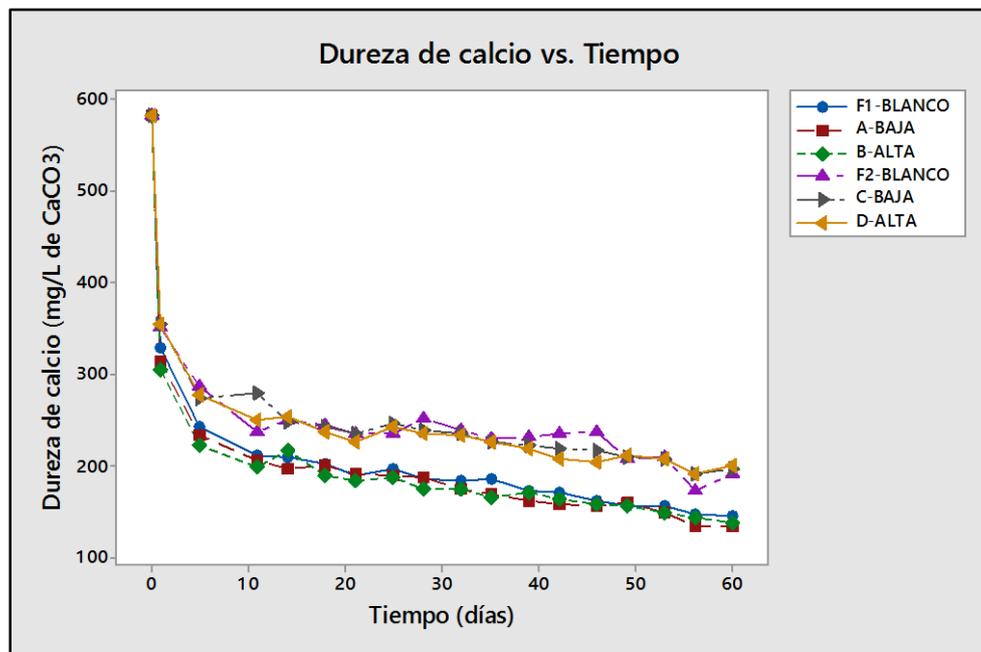
El comportamiento de la dureza total con respecto al tiempo mostró una disminución considerable en los seis circuitos. En la Gráfica 2, se aprecia que a partir del día 5 de operación, se alcanzó una disminución considerable en los seis circuitos, aproximadamente del 50.8% en los circuitos operados en la primera etapa y 42.8% en los circuitos operados en la segunda etapa. Posteriormente continuó disminuyendo paulatinamente hasta llegar a una disminución del 68.7%, 70.9% y 69.1% para los circuitos F1-Blanco, A-Baja y B-Alta, respectivamente; y disminución del 54.8% para el circuito F2-Blanco y 54.7% para los circuitos C-Baja y D-Alta a los 60 días de operación.



**Gráfica 2.** Dureza total vs Tiempo con una dureza total inicial de 678 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , utilizando dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

#### 4.2.2 Dureza de Calcio

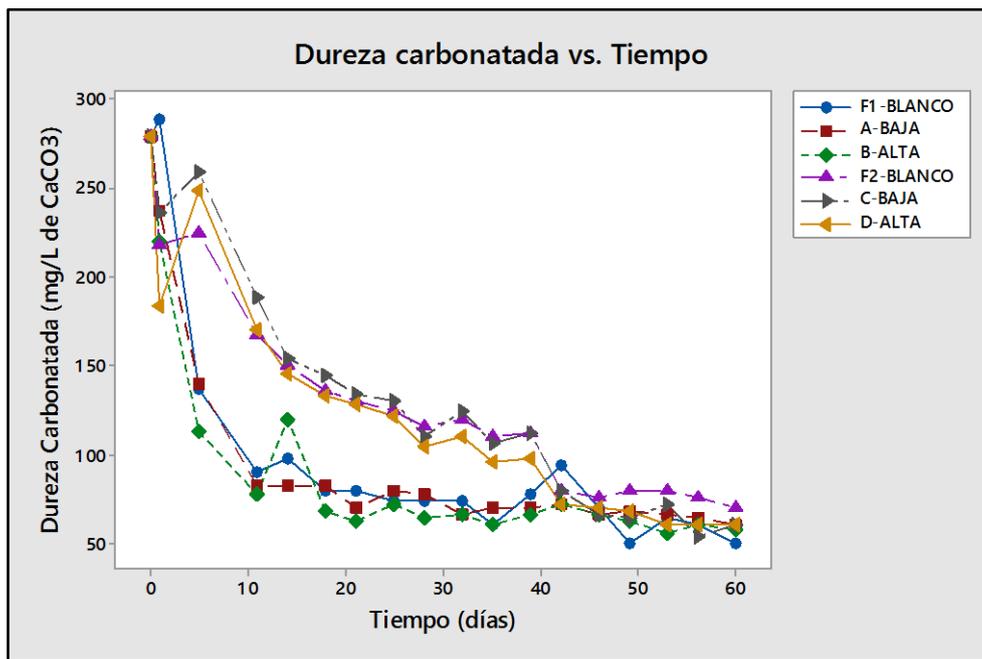
Los resultados de la dureza de calcio se muestran en la Gráfica 3. Se observa un comportamiento similar a la dureza total, se obtuvo una disminución del 75.3%, 77.2% y 76.3% para los circuitos F1-Blanco, A-Baja y B-Alta, respectivamente; y una disminución del 67.2%, 66.4% y 65.9% para los circuitos F2-Blanco, C-Baja y D-Alta, respectivamente.



**Gráfica 3.** Dureza de calcio vs Tiempo con una dureza de calcio inicial de 583 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

### 4.2.3 Dureza Carbonatada

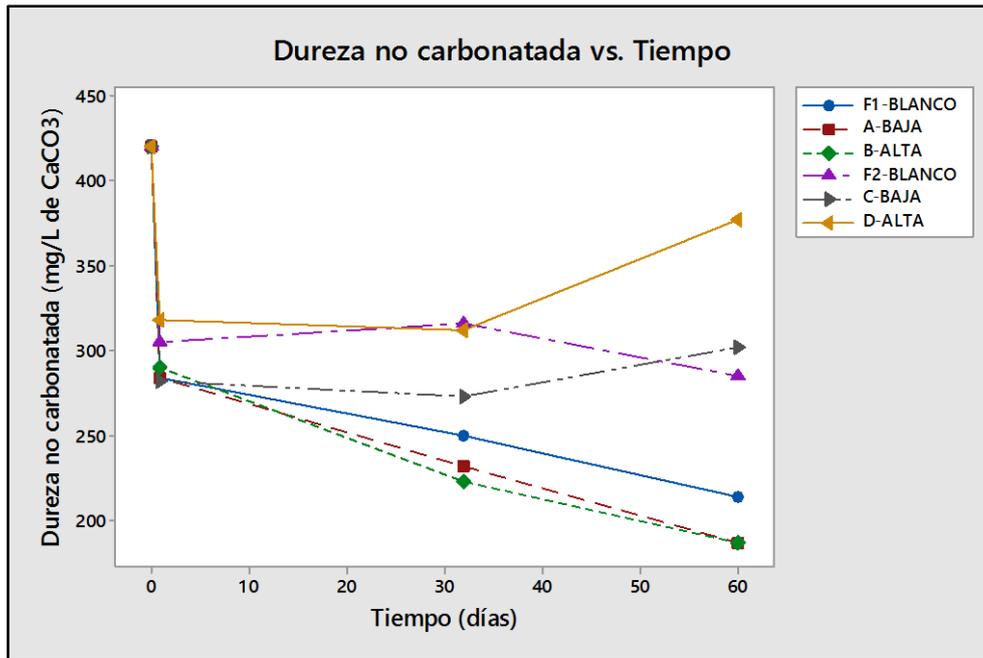
Los resultados de la dureza carbonatada se muestran en la Gráfica 4. Se observa que a partir del día 5 de operación se obtuvo una disminución del 53.4% en los circuitos operados en la primera etapa y una disminución del 12.5% en los circuitos operados en la segunda etapa. A los 60 días de operación se alcanzó una disminución del 82.1%, 78.5% y 79.2% en los circuitos F1-Blanco, A-Baja y B-Alta respectivamente; y una disminución de 74.9%, en el circuito F2-Blanco y 78.5% en los circuitos C-Baja y D-Alta.



**Gráfica 4.** Dureza Carbonatada vs Tiempo con una dureza carbonatada inicial de 279 mg/L de CaCO<sub>3</sub>, a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

### 4.2.4 Dureza No Carbonatada

En la Gráfica 5, se muestran los resultados de la dureza no carbonatada, donde se observa una disminución del 50.4% en el circuito F1-Blanco y 56.7% en los circuitos A-Baja y B-Alta; y una disminución del 33.9%, 30.0% y 12.4% en los circuitos F2-Blanco, C-Baja y D-Alta, respectivamente. Esta disminución se debe a la posible precipitación de los sulfatos, principalmente.

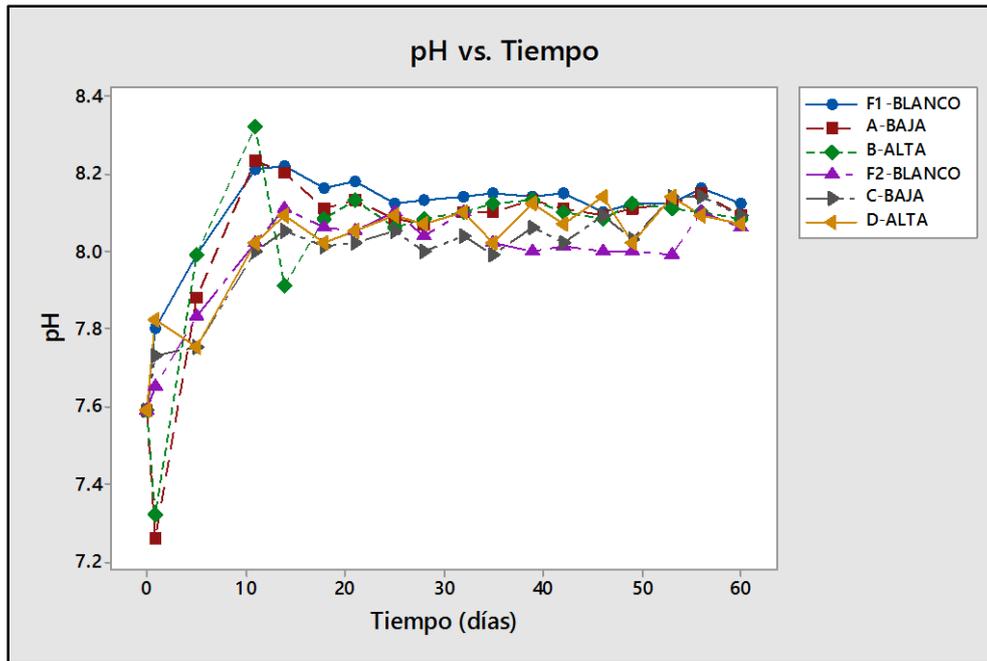


**Gráfica 5.** Dureza No Carbonatada vs Tiempo con una dureza no carbonatada inicial de 431.5 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

#### 4.2.5 pH

El pH aumentó en los 6 circuitos de manera muy similar, como se observa en la Gráfica 6. El agua cruda tenía un pH de 7.59 y durante el día 5 de operación se observó un ligero aumento a 7.95 en los circuitos operados en la primera etapa y de 7.77 en los circuitos operados en la segunda etapa. A los 11 días de operación, se obtuvo un pH de 8.25 en la primera etapa y de 8.01 en la segunda etapa. A los 60 días de operación se alcanzó un pH promedio de 8.08 en los seis circuitos.

Este cambio en el pH fue provocado por la liberación de  $\text{CO}_2$ , al momento de mantener el agua en recirculación durante los 60 días de operación y por el cambio de la temperatura del agua inicial (como se mencionó anteriormente se cambió la temperatura de 25 °C a 36 °C).

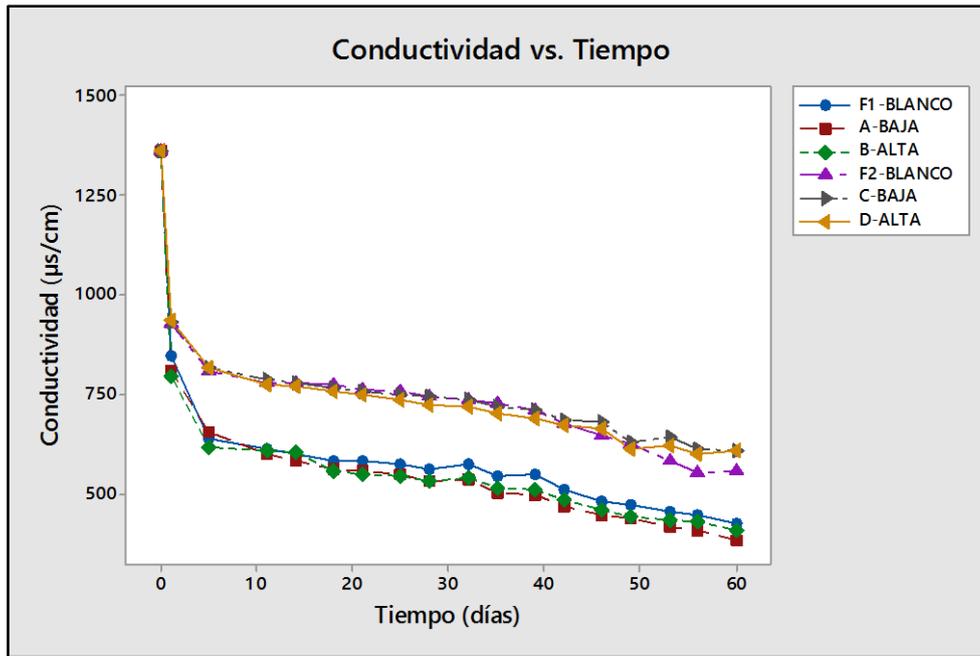


**Gráfica 6.** pH vs Tiempo con un pH inicial de 7.59 a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

#### 4.2.6 Conductividad

Los resultados de la conductividad se muestran en la Gráfica 7, donde se aprecia un comportamiento similar a la dureza total; es decir, durante los primeros 5 días de operación se logró una disminución del 53.4% en los circuitos operados en la primera etapa y 40.2% en los circuitos operados en la segunda etapa. Posteriormente continuó disminuyendo paulatinamente hasta obtener una disminución del 68.9%, 72.0% y 70.0% en los circuitos F1-Blanco, A-Baja y B-Alta, respectivamente; y una disminución del 59.2% en el circuito F2-Blanco y 55.3% en los circuitos C-Baja y D-Alta.

Szczes *et al.*, 2011, encontraron que el campo magnético tiene un efecto en la conductividad del agua y su tasa de evaporación, cuyo efecto puede ser interpretado por los enlaces de hidrógeno de bases fuertes y la perturbación de la interfase gas/líquido; y concluyeron que la variación de la conductividad es inversamente proporcional a la intensidad de campo magnético y la velocidad de flujo; y que la tasa de evaporación aumenta con intensidades altas de campo magnético y es proporcional a la velocidad de flujo. Sin embargo, la disminución observada en la conductividad en este estudio, se atribuye a la precipitación de los iones presentes en la solución.



**Gráfica 7.** Conductividad vs Tiempo con una conductividad inicial de 1,363  $\mu\text{s}/\text{cm}$  a dos velocidades diferentes: 0.43 m/s (F1, A y B) y 0.80 m/s (F2, C y D).

La disminución obtenida en los parámetros importantes del agua fue muy similar en los circuitos con y sin campo magnético, por lo que se deduce que los cambios en la calidad del agua, no fueron provocados por la aplicación de campo magnético. Estos cambios se originaron debido a que la temperatura del agua inicialmente era de 25 °C y se elevó a 36 °C cuando se iniciaron las etapas experimentales y posteriormente, se mantuvo constante. Por otra parte, los recipientes de vidrio que contenían el agua se mantuvieron abiertos y el agua estuvo en recirculación, lo que propició la liberación de  $\text{CO}_2$  y al disminuir la concentración de  $\text{CO}_2$ , provocó un aumento en el pH ocasionando que el  $\text{CaCO}_3$  se precipitara de forma natural en los seis circuitos.

La mayoría de las sales llegan hacer más solubles cuando se aumenta la temperatura. Sin embargo, el carbonato de calcio se vuelve menos soluble a medida que se aumenta la temperatura. Un cambio en el pH o la alcalinidad pueden afectar gravemente la formación de incrustaciones. Por ejemplo, si se aumenta el pH o la alcalinidad, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye y finalmente precipita sobre la superficie de las tuberías (Nalco, 2009).

Para corroborar los resultados obtenidos, se utilizó el programa STATGRAPHICS para analizar los resultados mediante un Diseño Factorial Multinivel, considerando como factores, **A:Velocidad** con dos niveles (bajo=0.43 m/s y alto=0.80 m/s) y **B:Intensidad** de

campo magnético con tres niveles (bajo=0 G, medio=2,500 G y alto=5,000 G). Como variables de respuesta se analizaron los seis parámetros del agua más importantes: dureza total, dureza de calcio, dureza carbonatada, dureza no carbonatada, pH y conductividad.

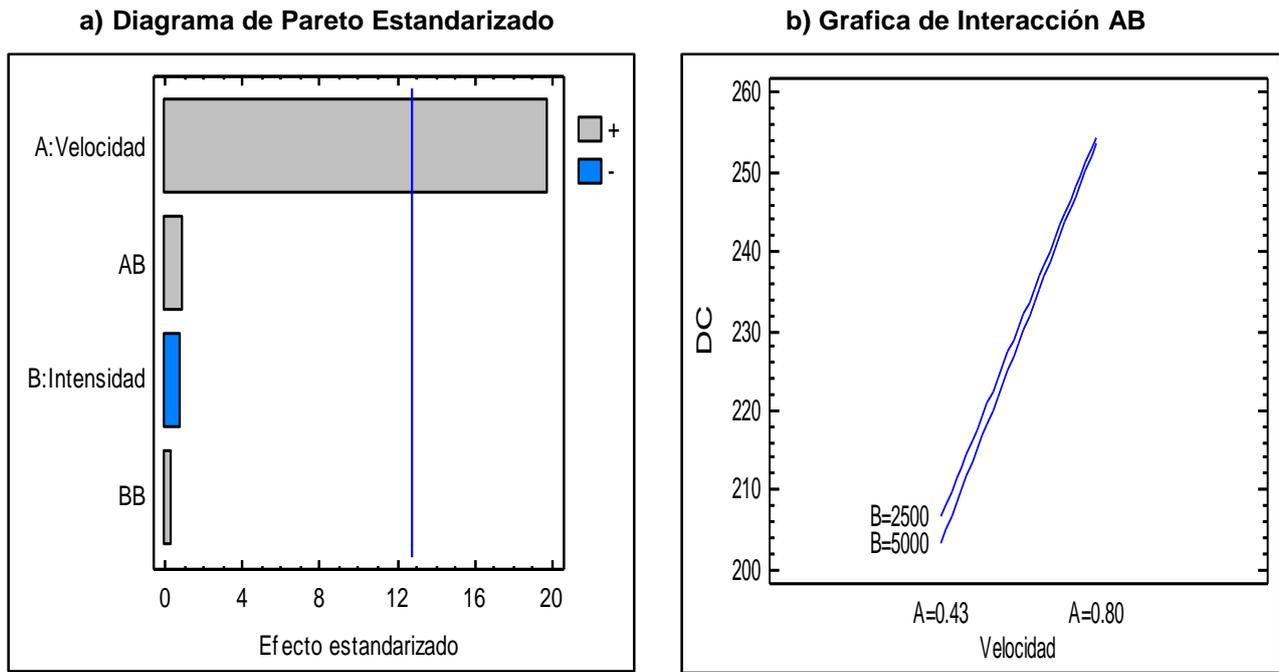
Los resultados del análisis del Diseño Factorial Multinivel, mostraron que el factor **A**, tuvo mayor influencia sobre todas las variables de respuesta. Sin embargo, los parámetros que mostraron mayor influencia fueron la dureza de calcio y la dureza carbonatada. La Tabla 17, muestra los resultados del ANOVA para la dureza de calcio.

**Tabla 17.** Resultados del ANOVA para la Dureza de calcio.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad	2646.07	1	2646.07	392.01	0.0321
B:Intensidad	4.0	1	4.0	0.59	0.5823
AB	6.25	1	6.25	0.93	0.5122
BB	0.75	1	0.75	0.11	0.7952
Error total	6.75	1	6.75		
Total (corr.)	3500.0	5			

Con la tabla ANOVA se concluye que el factor A:Velocidad influye directamente en la variación de la dureza de calcio con un valor-P de **0.0321**, indicando que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95%.

La Gráfica 8a, muestra el diagrama de Pareto Estandarizado, que ayuda a visualizar cuál factor tiene un mayor impacto sobre la variable de respuesta. En este caso, se observa que la velocidad es el factor con mayor impacto sobre la dureza de calcio. La Gráfica 8b, muestra la interacción AB (Velocidad/Intensidad), la cual ayuda a establecer las mejores condiciones de trabajo para optimizar el proceso. En este caso, se puede establecer que las mejores condiciones para obtener una mayor precipitación del carbonato de calcio son: manejar una velocidad de 0.43 m/s y una intensidad de campo magnético de 5,000 G, aunque no se observa una diferencia “significativa” entre las intensidades de campo magnético utilizadas.



**Gráfica 8.** Diagrama de Pareto Estandarizado y gráfica de Interacción AB para la Dureza de Calcio.

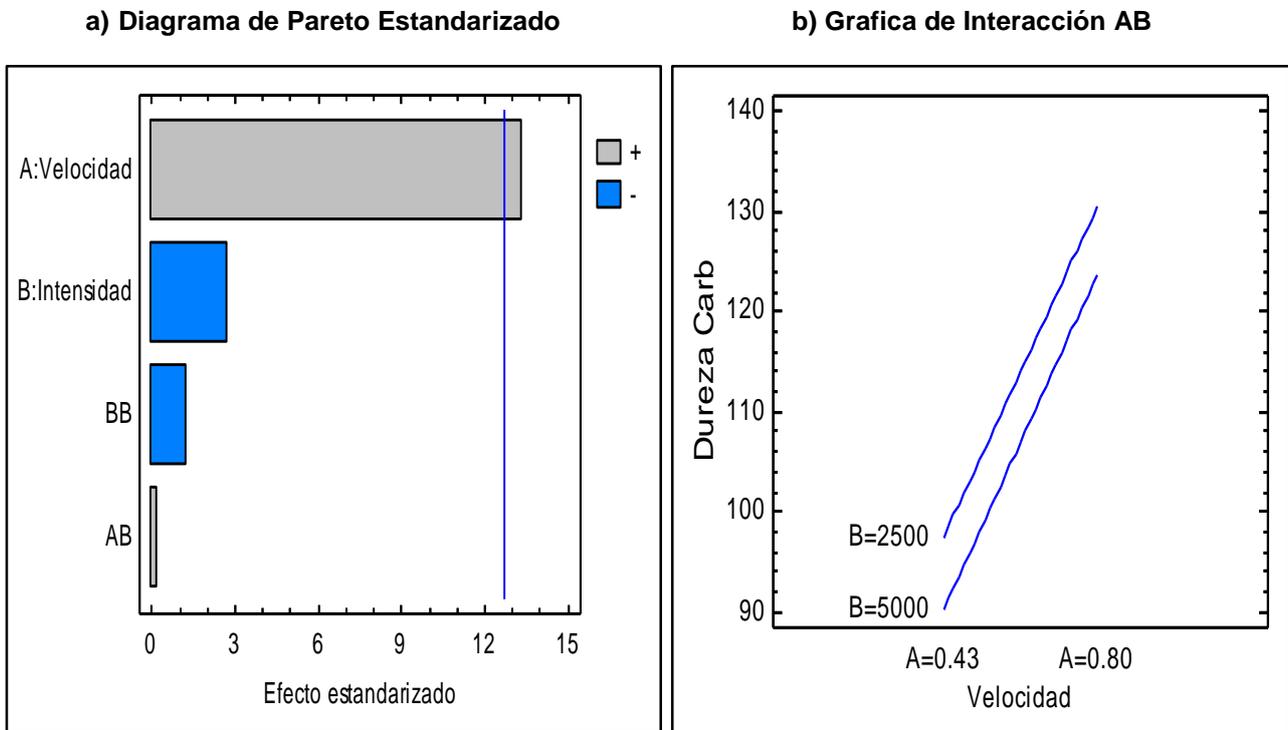
La Tabla 18, muestra los resultados del ANOVA para la dureza carbonatada, donde de igual manera se observa que el factor que influye directamente en la variación de la dureza carbonatada es el factor A:Velocidad con un valor-P de **0.0475** con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 18.** Resultados del ANOVA para la Dureza Carbonatada.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad	1206.07	1	1206.07	178.68	0.0475
B:Intensidad	49.0	1	49.0	7.26	0.2263
AB	0.25	1	0.25	0.04	0.8790
BB	10.0833	1	10.0833	1.49	0.4365
Error total	6.75	1	6.75		
Total (corr.)	1722.83	5			

La Gráfica 9a, muestra el diagrama de Pareto Estandarizado para la dureza carbonatada. Se observa nuevamente, que la velocidad sigue siendo el factor con mayor impacto. Sin embargo, aquí se encontró que la influencia del campo magnético es un poco más grande en comparación con la dureza de calcio. Por lo que, para la dureza carbonatada si es importante definir cuál intensidad de campo magnético se debe utilizar, para esto sirve la gráfica de interacciones. La Gráfica 9b, muestra la interacción AB (Velocidad/Intensidad), la cual indica que para obtener mayor precipitación del carbonato de calcio, se debe trabajar con la velocidad de 0.43 m/s y una intensidad de campo magnético de 5,000 G.

Por lo que se concluye, que específicamente en la remoción de dureza carbonata hay una diferencia para la intensidad de campo magnético, la cual estadísticamente es “no significativa”.



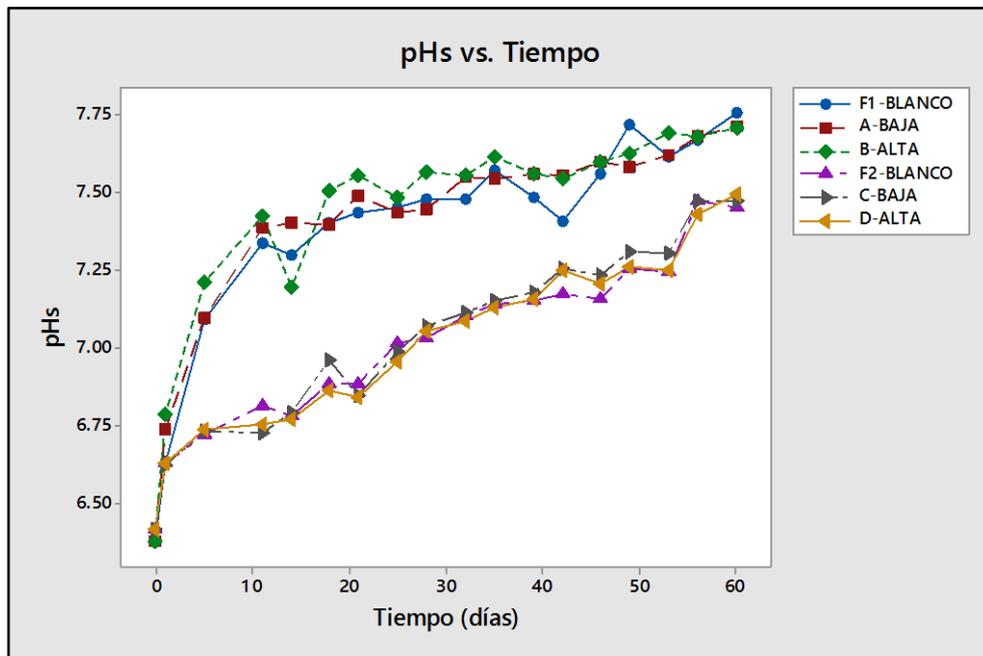
Gráfica 9. Diagrama de Pareto Estandarizado y gráfica de Interacción AB para la Dureza Carbonatada.

Como algo adicional a lo explicado anteriormente, se realizó el cálculo de los  $\text{pH}_s$  de saturación y del índice de saturación de Langelier mediante las ecuaciones 9 y 10, como una medida de control para determinar el comportamiento corrosivo o incrustante del agua utilizada. En las gráficas 10 y 11, se muestran los resultados de los  $\text{pH}_s$  y el ISL.

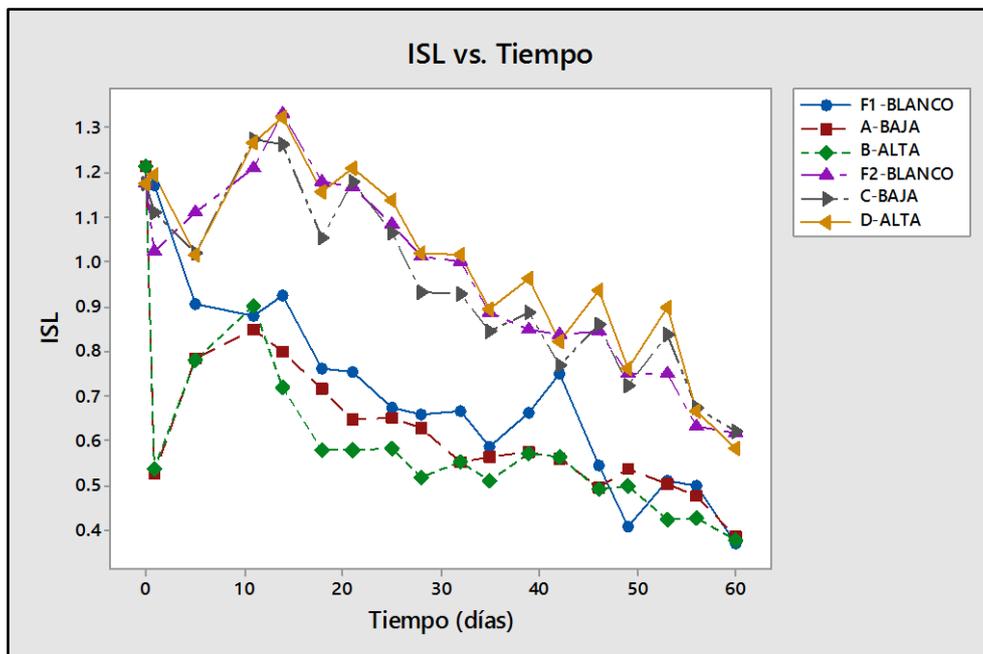
La Gráfica 10, muestra los valores de los  $\text{pH}_s$  donde se puede observar que el  $\text{pH}$  de saturación del  $\text{CaCO}_3$  se alcanzó a los 5 días y comenzó a precipitar, lo cual coincide con la reducción de la dureza total mostrada en la Gráfica 2, donde a partir de ese día hubo una disminución del 50.8% en los circuitos operados en la primera etapa y 42.8% en los circuitos operados en la segunda etapa.

Los valores del índice de saturación del Langelier (ISL) se muestran en la Gráfica 11. Al inicio de los experimentos el ISL fue de **1.19**, lo cual indica que se trataba de un agua formadora de incrustaciones. Cuando se comenzó la etapa experimental y el  $\text{CaCO}_3$  comenzó a precipitar, el ISL fue disminuyendo conforme a los días de operación, llegando a un valor aproximadamente de **0.37** en los circuitos operados con una velocidad

de 0.43 m/s y de **0.60** en los circuitos operados con una velocidad de 0.80 m/s; lo cual indica que disminuyó el potencial para formar incrustación, siendo más notable en los circuitos operados con una velocidad de 0.43 m/s.



Gráfica 10. pHs calculados vs tiempo.



Gráfica 11. Índice de Saturación de Langelier vs Tiempo.

Por todo lo anteriormente explicado, se concluye de forma general, que los cambios en los parámetros fisicoquímicos del agua no fueron producidos por la aplicación del campo magnético, sino que los cambios se atribuyen a las reacciones químicas que se produjeron durante el tiempo de operación.

Sin embargo, en la literatura consultada, algunos autores como: Saksono *et al.*, 2009, encontraron que la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  bajo tratamiento magnético es más alta que en tratamiento no magnético en un rango de pH de 6.4 – 8.5. Estos resultados difieren con los encontrados en esta investigación y las diferencias pueden radicar en que ellos utilizaron agua sintética en sus experimentos y al utilizar un agua natural de pozo sus características de composición son diferentes y cada agua tiene una composición distinta, por lo que en algunas aguas se pudieran observar cambios en su composición al utilizar un campo magnético y en otras aguas no.

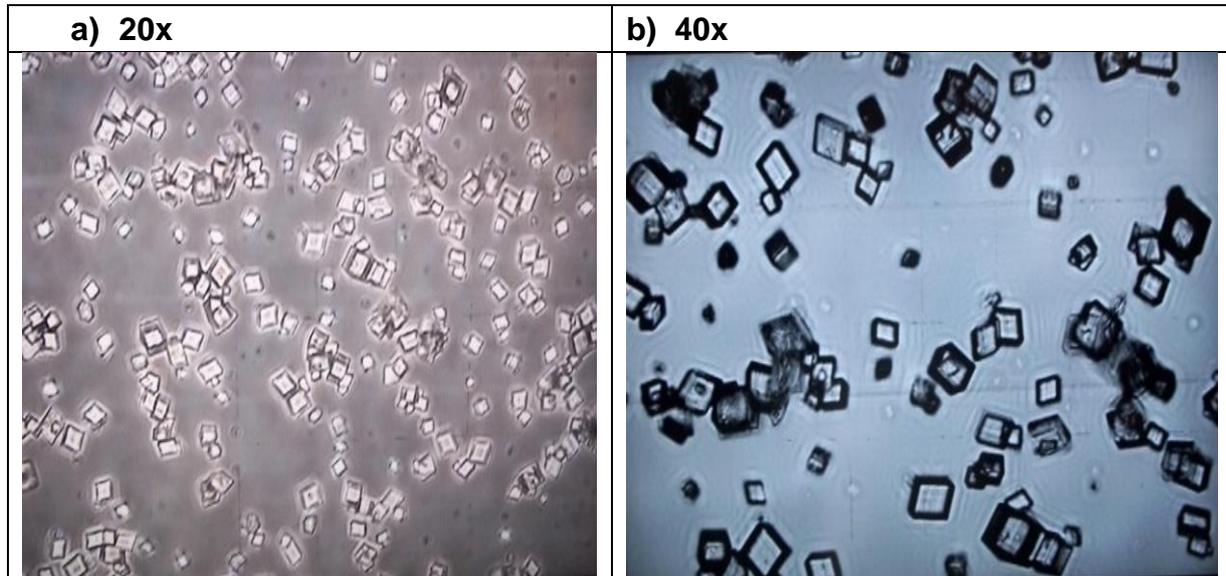
Es muy importante resaltar, que el campo magnético no es una tecnología para remover dureza del agua, sino que influye directamente sobre la formación de los cristales, principalmente del carbonato de calcio. Pueden observarse diferentes mecanismos; una transformación de los cristales de calcita a aragonita; puede afectar el tamaño del cristal propiciando su crecimiento en el seno de la solución y su posterior precipitación en forma de una incrustación de fácil remoción; e inclusive puede provocar el rompimiento o aglomeración del cristal propiciando que la incrustación formada sobre las paredes de las tuberías se disminuya o sea menos densa.

### **4.3 Cambio de la estructura y el tamaño del cristal**

Uno de los requisitos que se consideraron al seleccionar el agua para la realización de este estudio, fue que el cristal del carbonato de calcio estuviera desarrollado en forma de calcita, utilizando el análisis cristaloóptico para su identificación. En la Ilustración 18, se muestra los resultados del análisis cristaloóptico realizado al agua seleccionada para la experimentación, donde se aprecia claramente que el carbonato de calcio está presente, por su estructura romboédrica-hexagonal, en forma de calcita al 100%.

Como se mencionó anteriormente, se tiene el conocimiento de que el campo magnético provoca un efecto sobre la estructura cristalina del carbonato de calcio, propiciando la nucleación de otras formas cristalinas diferentes a la original, principalmente de calcita a

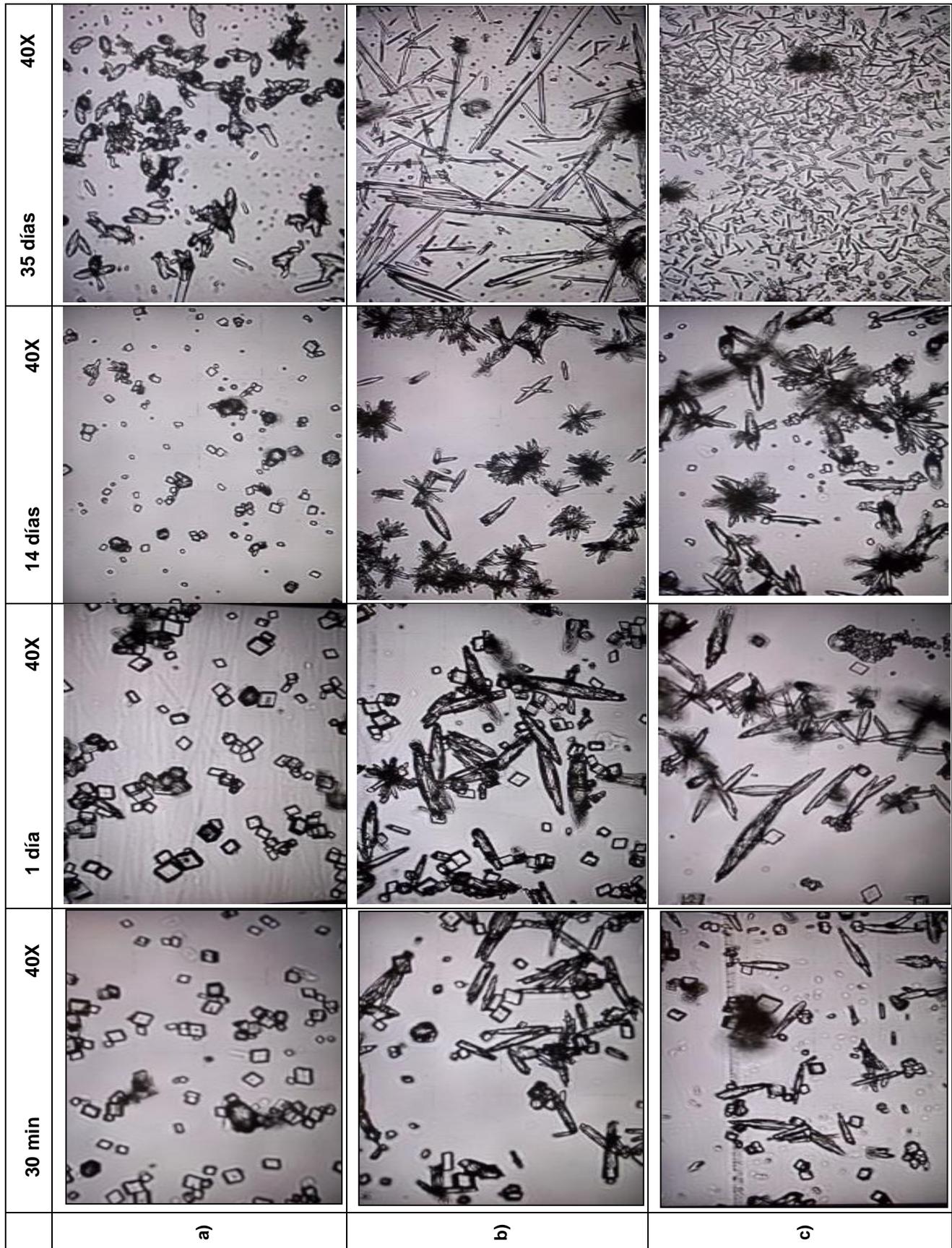
aragonita. Fue por esta razón el motivo de este requisito, con la intención de comprobar si existe un cambio en el cristal provocado por la aplicación del campo magnético.



**Ilustración 18.** Fotos de los cristales del agua inicial, en aumento de 20x y 40x.

#### 4.3.1 Pruebas cristaloópticas

En la Ilustración 19, se muestran las fotos cristaloópticas de los experimentos a los 30 min, 1 día, 14 y 35 días de operación, donde a) muestra el circuito F1-Blanco, b) circuito A-Baja y c) circuito B-Alta, utilizando una velocidad de 0.43 m/s. Se observa en los circuitos con aplicación de campo magnético, un cambio en el cristal de calcita a aragonita (forma ortorrómbica), siendo más notable este cambio en el circuito con intensidad alta. También se observa un cambio mayor conforme transcurrieron los días de operación, determinando a los 14 días aragonitas aglomeradas y prácticamente ningún cristal de calcita. Mientras que en el circuito F1-Blanco no se observan cambios en la forma cristalina del agua inicial (calcita). Sin embargo, después de los 35 días de operación se observaron otros cristales diferentes a la calcita y aragonita. Por su apariencia y de acuerdo a las investigaciones de Zarga *et al.* 2013, se observaron cristales de sulfatos y cristales de carbonato de calcio amorfo en el sobrenadante de los tres circuitos, esto ocurrió debido a la reducción de un 79.9% de la dureza carbonatada, permaneciendo en solución la dureza no carbonatada. Esta disminución ocurrió por la precipitación del carbonato de calcio, como se explicó anteriormente.



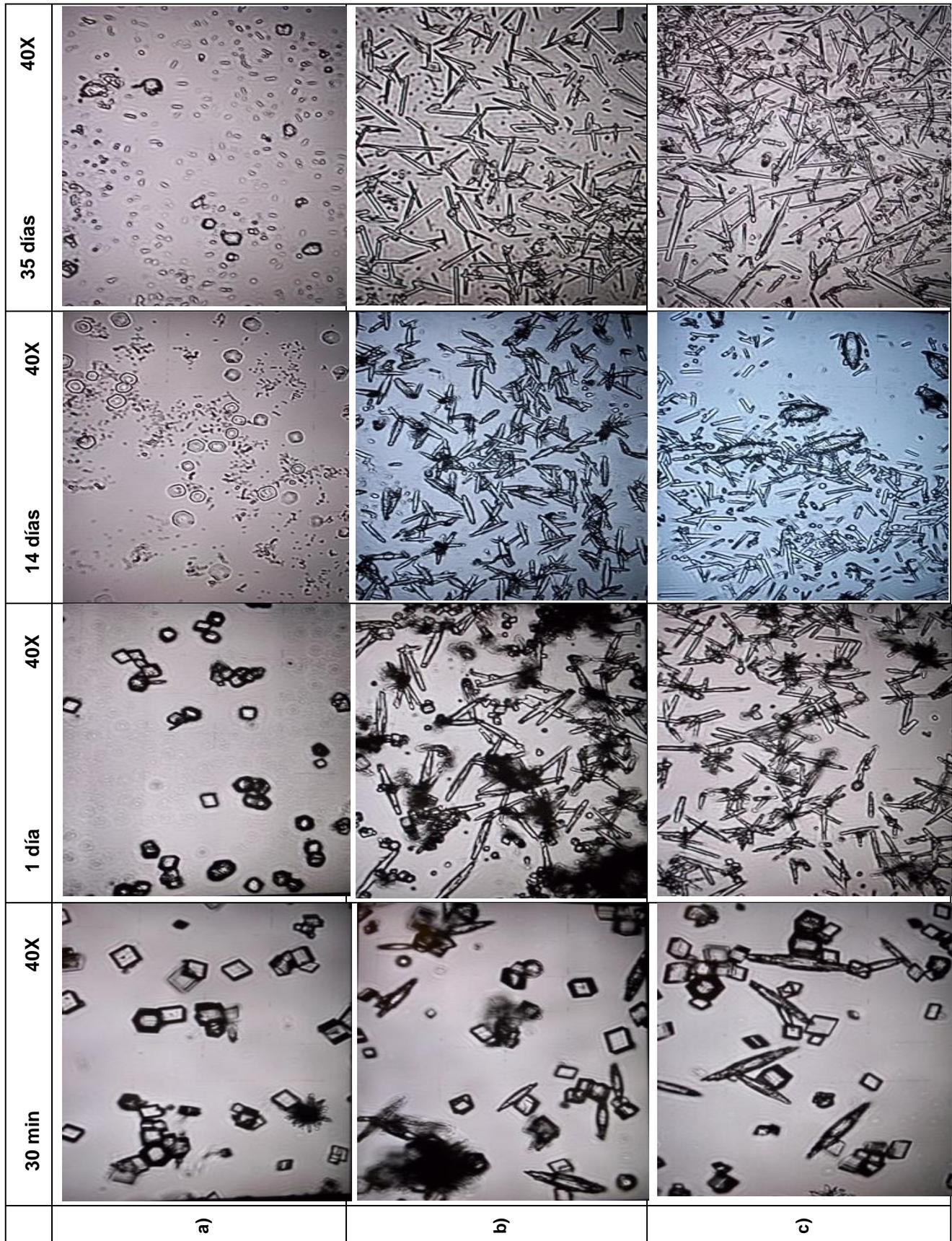
**Ilustración 19.** Seguimiento de la forma cristalina del  $\text{CaCO}_3$  en los circuitos a) Blanco, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con una velocidad de 0.43 m/s, un caudal de 300 mL/min y un tiempo de contacto de 0.20 s, en aumento de 40x.

De igual manera en la Ilustración 20, se muestra el seguimiento de las transformaciones de los cristales a los 30 min, 1 día, 14 y 35 días de los circuitos utilizando una velocidad de 0.80 m/s, donde a) muestra el circuito F2-Blanco, b) circuito C-Baja y c) circuito D-Alta. En el circuito F2-Blanco se observa la presencia del mismo tipo de cristal a los 30 min y 1 h, mientras que para los días 14 y 35 ya no se apreció la forma del cristal que estaba presente, como se mencionó anteriormente, posiblemente sea carbonato de calcio amorfo. Por otra parte, en los circuitos con campo magnético C-Baja y D-Alta, se observa un cambio en los cristales desde los 30 minutos de operación y el cambio fue más notable conforme transcurrió el tiempo. A los 35 días se observaron solamente aragonitas de mayor tamaño y algunas aglomeraciones de las mismas.

Con estos resultados se comprobó que al aplicar un campo magnético se cambia la estructura cristalina del carbonato de calcio de calcita a aragonita, propiciando que los problemas de incrustación en los sistemas de enfriamiento se reduzcan. La aragonita puede ser el resultado de la transformación de núcleos metaestables de vaterita, presenta una morfología característica en forma de aguja con una bastante débil adhesión al sustrato. Por el contrario, la calcita es el polimorfo más estable del carbonato de calcio a temperatura ambiente, forma capas densas y tenaces, que son difíciles de remover mecánicamente.

Meng-Chun y Clifford, 2010, realizaron experimentos donde estudiaron el crecimiento de aragonita, usando dos dispositivos de imanes permanentes con intensidades de 212.6 G y 1,800 G; reportaron que existen mayores tasas de crecimiento de aragonita con presencia de campo magnético a pH menores de 8.5 y mayores tasas de crecimiento de calcita con tratamiento magnético a pH de 8.5 a 9.5. Sus resultados son corroborados con los encontrados en este trabajo, ya que se pudo observar el crecimiento de aragonitas en un rango de pH de 8.08.

En la literatura consultada, Banejad H. y Abdosalehi E., 2009, reportan que la producción de agua magnética tiene la habilidad de lograr reducción de incrustación hasta de un 51%. La reducción o aumento en la eficiencia del campo magnético puede verse afectada por diversos factores, tales como: la intensidad aplicada de campo magnético, la configuración de los imanes (en atracción o repulsión), el caudal de entrada y la dureza inicial del agua.



**Ilustración 20.** Seguimiento de la forma cristalina del  $\text{CaCO}_3$  en los circuitos a) Blanco, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con una velocidad de 0.80 m/s, un caudal de 550 mL/min y un tiempo de contacto de 0.11 s, en aumento de 40x.

### 4.3.2 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

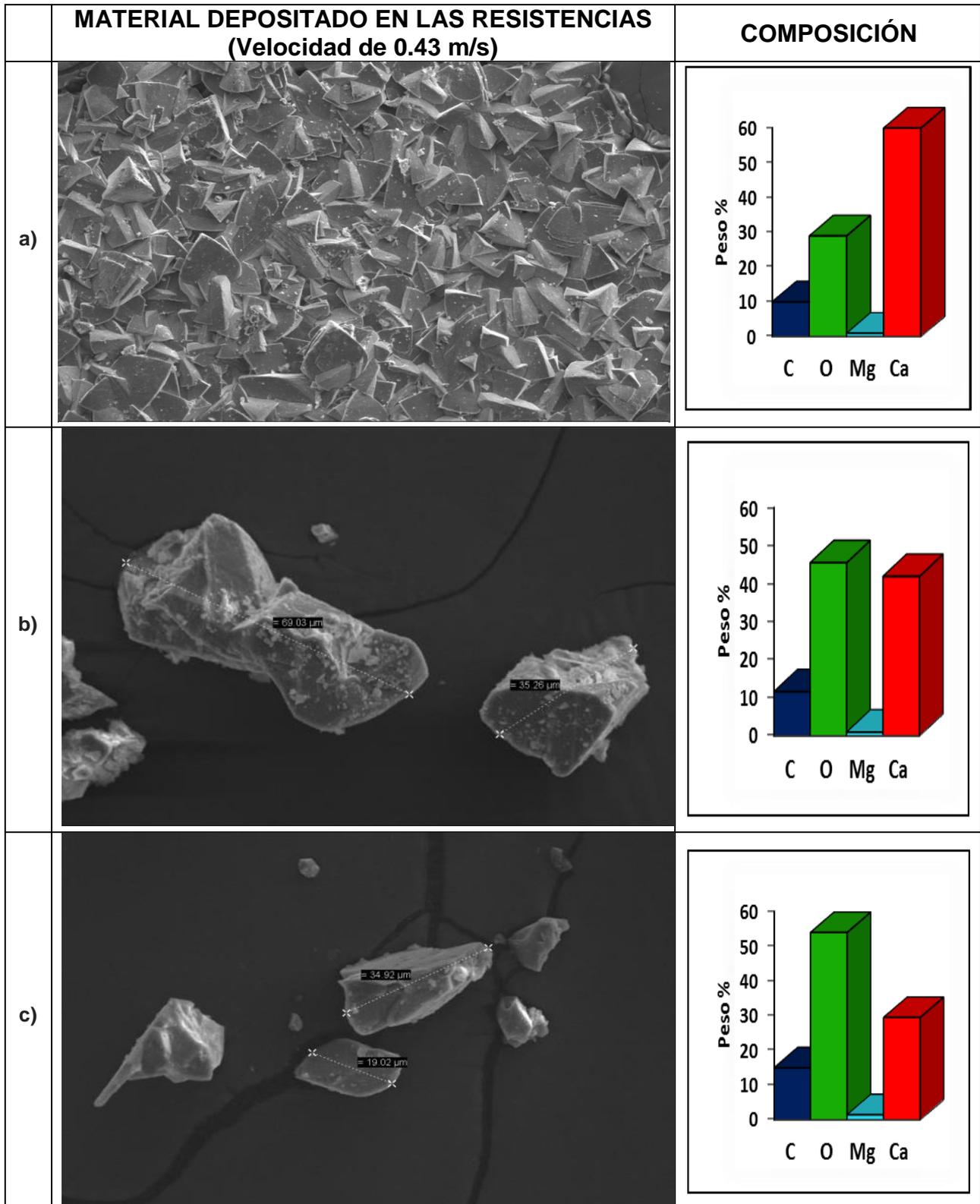
Para los análisis de MEB, se analizaron tres puntos en cada circuito; la incrustación en la resistencia, el depósito en el fondo del recipiente y el sobrenadante del agua al final de la experimentación. Los resultados se muestran a continuación para las dos velocidades utilizadas en la experimentación (0.43 y 0.80 m/s), donde a) muestra los circuitos sin campo magnético (Blancos), b) muestra los circuitos con intensidad de campo magnético baja (2,500 G) y c) los circuitos con intensidad de campo magnético alta (5,000 G).

- **Velocidad 0.43 m/s**

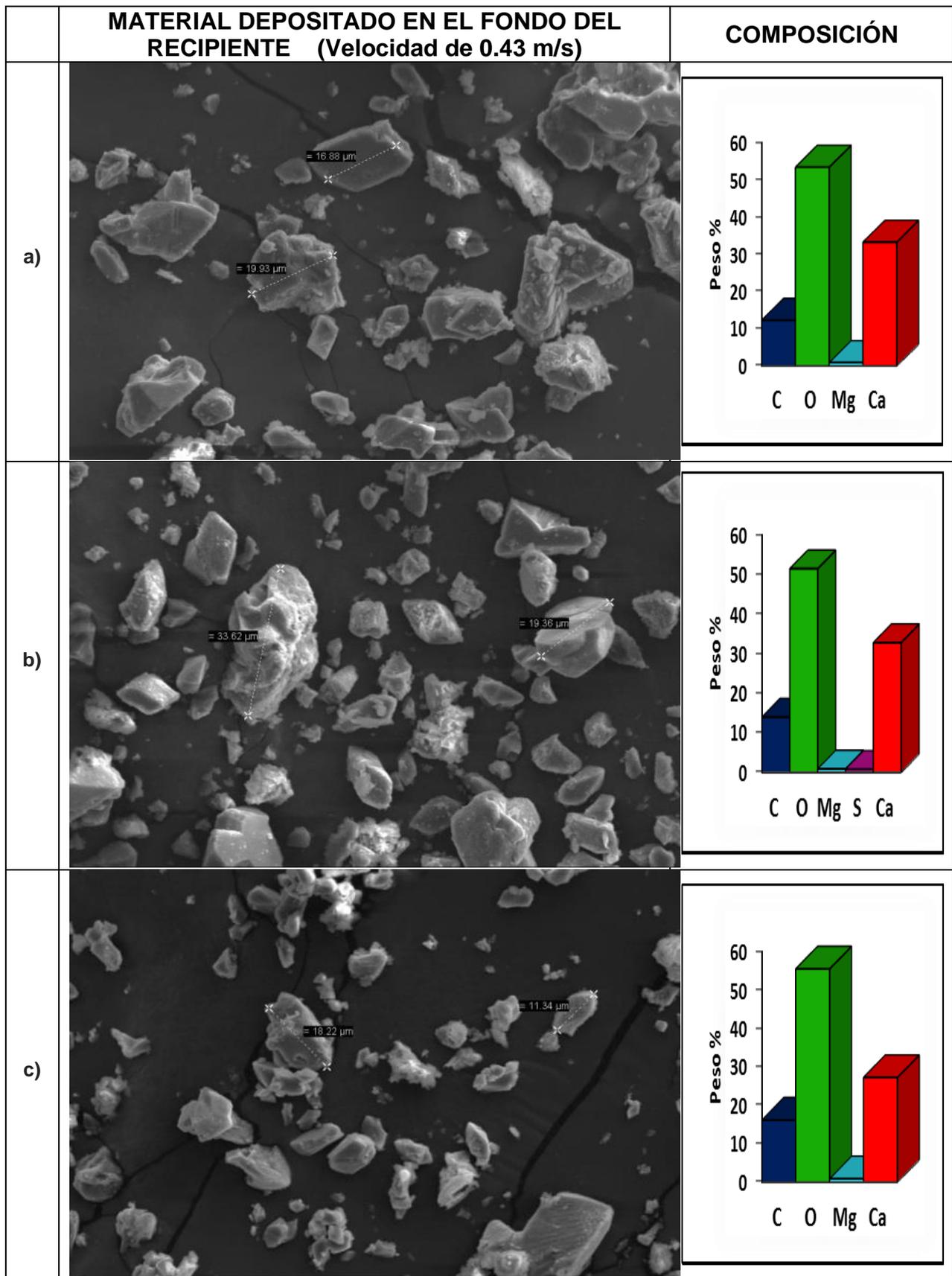
El material depositado en las resistencias (Ilustración 21), mostró ser carbonato de calcio, siendo más densa la incrustación en el circuito F1-Blanco (21a), con un tamaño promedio del cristal de 14.2  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: calcio 60.0%, oxígeno 29.0%, carbono 10.0%, y magnesio 1.0%. En el circuito A-Baja (21b), se observa una menor incrustación y crecimiento del cristal a un tamaño promedio de 36.8  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 45.5%, calcio 41.9%, carbono 11.6% y magnesio 1.0%. En el circuito B-Alta (21c), se observa una incrustación menor, con un tamaño promedio del cristal alrededor de 18.7  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 54.0%, calcio 29.5%, carbono 15.0% y magnesio 1.5%. Se observó una disminución del ión calcio en los circuitos con campo magnético, obteniendo una disminución hasta del 29.5% en el circuito con campo magnético de 5,000 G, lo cual indicó que la incrustación disminuye conforme se aumenta la intensidad de campo magnético.

Los depósitos en el fondo del recipiente (Ilustración 22) corresponden a carbonato de calcio en los tres circuitos. La composición elemental del circuito F1-Blanco (22a) fue de: oxígeno 53.5%, calcio 33.3%, carbono 12.3% y magnesio 0.9%; y un tamaño promedio del cristal de 16.9  $\mu\text{m}$ . El circuito A-Baja (22b) muestra un tamaño promedio del cristal de 14.7  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 51.5%, calcio 32.8%, carbono 14%, magnesio 0.9% y azufre 0.8%. En el circuito B-Alta (22c), se observa un depósito menor, con una composición elemental de: oxígeno 55.6%, calcio 27.3%, carbono 16.2%, y magnesio 0.9% y el tamaño promedio del cristal fue de alrededor de 12.8  $\mu\text{m}$ . El depósito formado en el fondo del recipiente fue el mismo en los tres circuitos, esto se pudo confirmar mediante el porcentaje del ión calcio, la diferencia entre el circuito sin campo magnético y los circuitos con campo magnético radicó en la disminución del tamaño del

crystal. Se observaron cristales de menor tamaño en el circuito con campo magnético de 5,000 G.



**Ilustración 21.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en las resistencias y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000x.

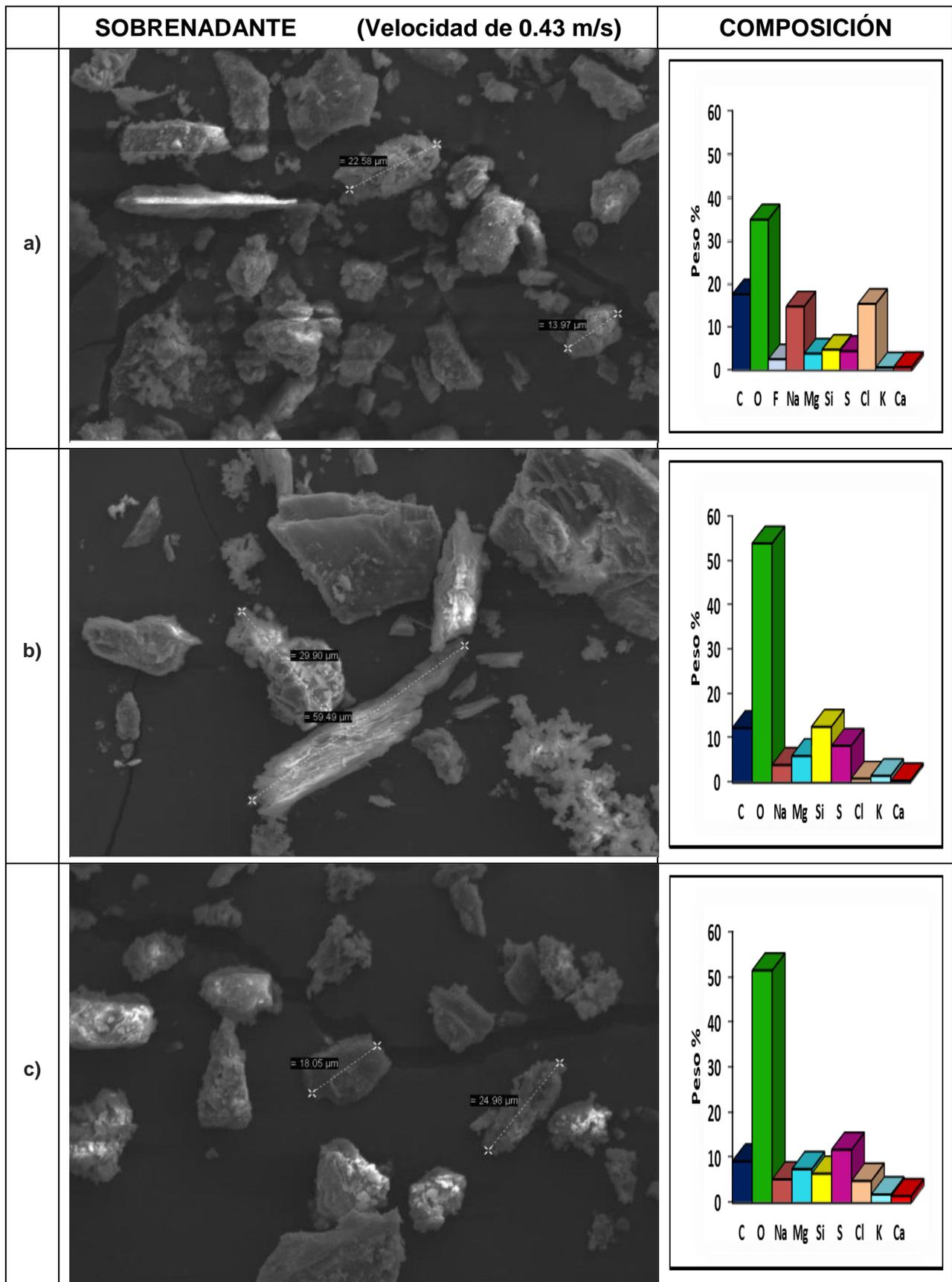


**Ilustración 22.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en el fondo de los recipientes y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000x.

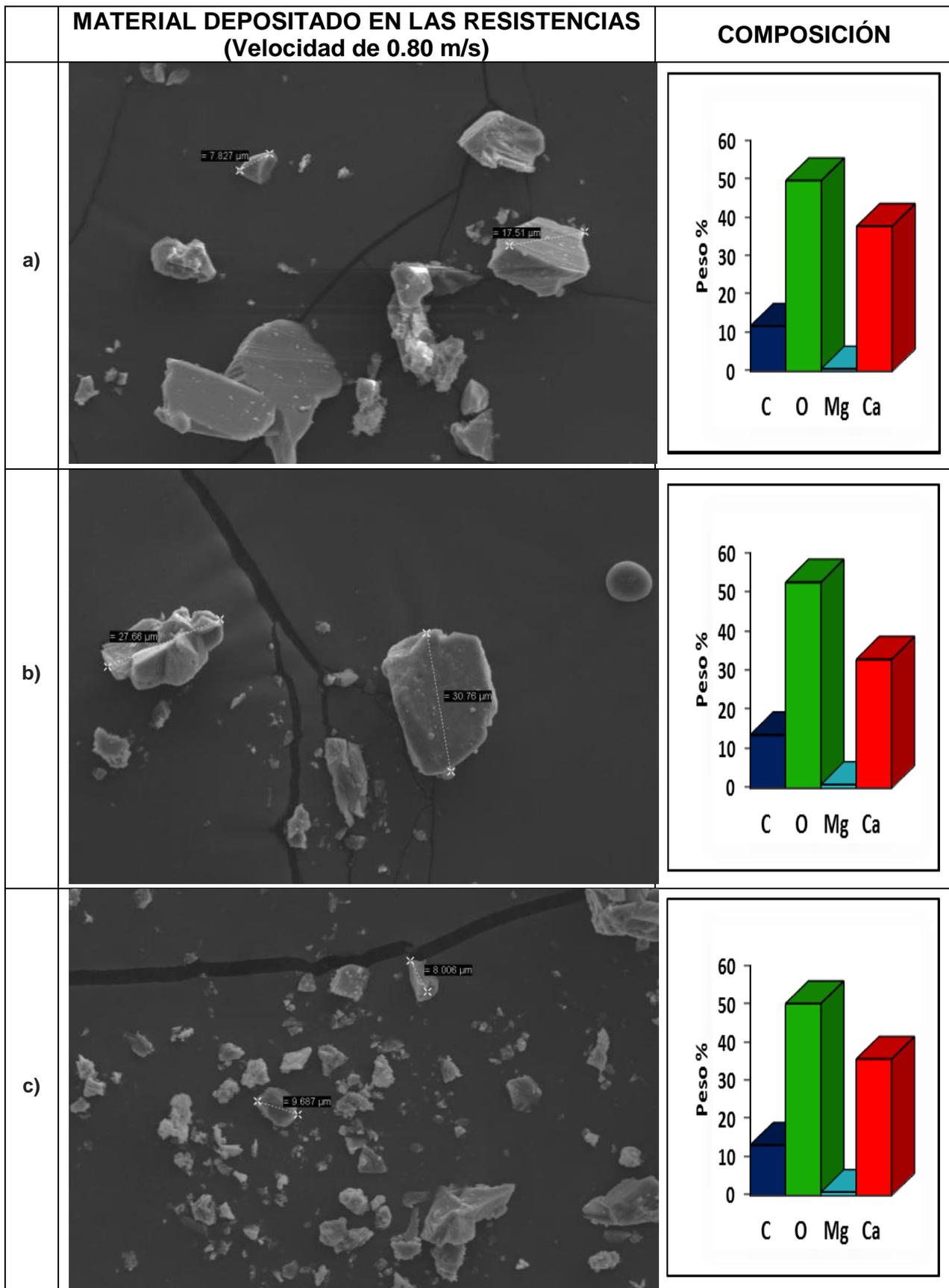
Los resultados del sobrenadante (Ilustración 23), mostraron que permaneció en solución la dureza no carbonata. Se observan en los tres circuitos cristales diferentes al carbonato de calcio, cuya forma cristalina y composición elemental comprueba la presencia de sulfatos como compuesto principal. El circuito F1-Blanco (23a) tuvo una composición elemental de: oxígeno 34.9%, carbono 17.6%, cloro 15.4%, sodio 14.8%, silicio 4.8%, azufre 4.5%, magnesio 3.9%, flúor 2.6%, calcio 0.8%, y potasio 0.7%; con un tamaño promedio del cristal de 23.1  $\mu\text{m}$ . El circuito A-Baja (23b) muestra un tamaño promedio del cristal de 26.4  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 53.9%, silicio 12.6%, carbono 12.3%, azufre 8.3%, magnesio 6.0%, sodio 4.0%, potasio 1.5%, cloro 0.9% y calcio 0.5%. El circuito B-Alta (23c), se observa una composición elemental de: oxígeno 51.5%, azufre 11.8%, carbono 9.2%, magnesio 7.5%, silicio 6.5%, sodio 5.2%, cloro 4.9%, potasio 1.9%, y calcio 1.5% y un tamaño promedio de cristal de alrededor de 18.0  $\mu\text{m}$ . Esto indicó que se precipitó el 80% del carbonato de calcio, quedando en solución compuestos de dureza no carbonatada.

- **Velocidad 0.80 m/s**

El material depositado sobre las resistencias (Ilustración 24) en los circuitos con velocidad de 0.80 m/s, mostró ser carbonato de calcio. En el circuito F2-Blanco (24a), se observan cristales de carbonato de calcio con un tamaño promedio de 18.5  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 49.7%, calcio 37.8%, carbono 11.8% y magnesio 0.7%. En el circuito C-Baja (24b), se observa una menor incrustación y disminución del cristal a un tamaño promedio de 15.9  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 52.6%, calcio 32.9%, carbono 13.6% y magnesio 0.9%. En el circuito D-Alta (24c), se observa una incrustación con cristales de menor tamaño en promedio de alrededor de 9.7  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 50.2%, calcio 35.7%, carbono 13.2% y magnesio 0.9%. De igual manera que en la primera etapa, se observó una disminución del ión calcio en los circuitos con campo magnético, solo que esta vez, la mayor disminución (5.1%) se observó en el circuito con intensidad de campo magnético baja. También se observó disminución en el tamaño del cristal en los circuitos con campo magnético.



**Ilustración 23.** Imágenes del análisis MEB del sobrenadante y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.43 m/s, en aumento de 2000x.

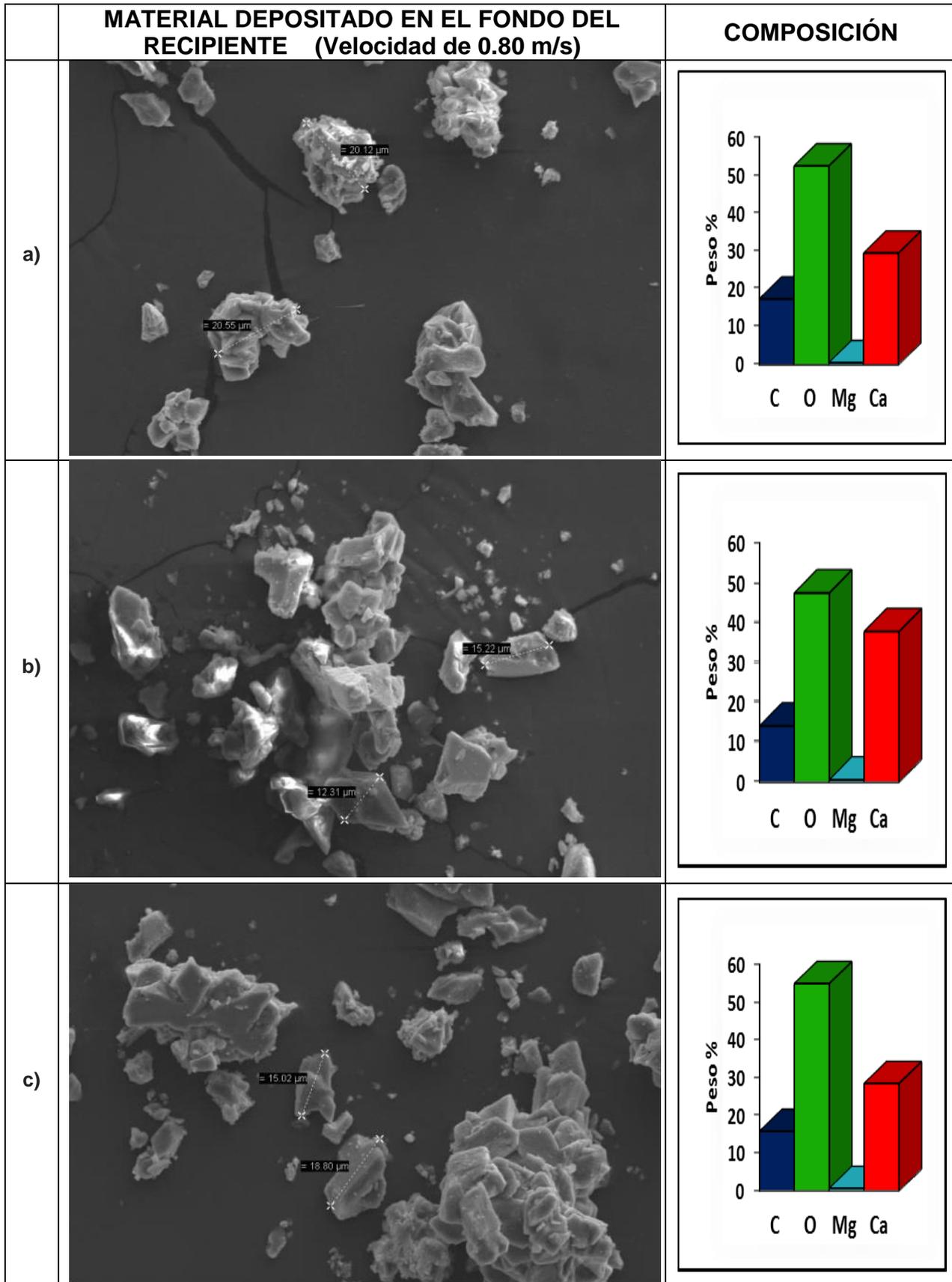


**Ilustración 24.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en las resistencias y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000x.

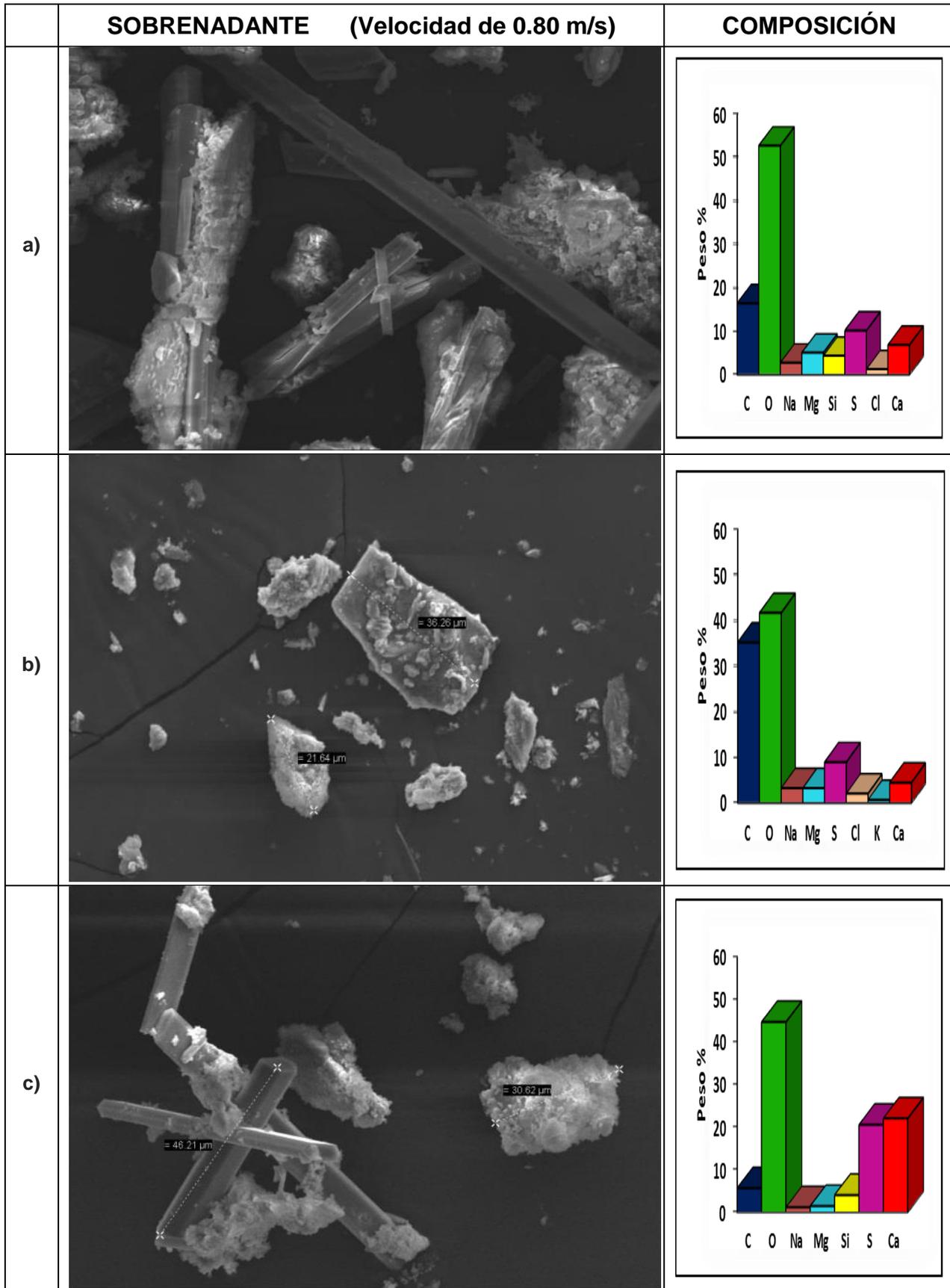
Los resultados del material depositado en el fondo de los recipientes (Ilustración 25) mostraron aglomeraciones de cristales de carbonato de calcio en los tres circuitos, siendo más notoria en los circuitos con campo magnético. El circuito F2-Blanco (25a) tuvo una composición elemental de: oxígeno 52.5%, calcio 29.5%, carbono 17.4% y magnesio 0.6%; y un tamaño promedio del cristal de 16.8  $\mu\text{m}$ . El circuito C-Baja (25b) muestra un tamaño promedio de cristal de 11.2  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 47.5%, calcio 37.8%, carbono 14.1%, y magnesio 0.6%. En el circuito D-Alta (25c), se observa cristales más aglomerados con un tamaño promedio alrededor de 14.6  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 55.0%, calcio 28.5%, carbono 15.8%, y magnesio 0.7%. La diferencia en el depósito formado en el circuito sin campo magnético y los circuitos con campo magnético radicó en la disminución del tamaño del cristal y las aglomeraciones de los mismos.

Los resultados del sobrenadante (Ilustración 26), mostraron que permaneció en solución la dureza no carbonata. Se observa la presencia de cristales de sulfatos. El circuito F2-Blanco (26a) tuvo una composición elemental de: oxígeno 52.8%, carbono 16.5%, azufre 10.2%, calcio 6.9%, magnesio 5.1%, silicio 4.4%, sodio 2.8%, y cloro 1.3%; con un tamaño promedio de cristal de 47.6  $\mu\text{m}$ . El circuito C-Baja (26b) muestra cristales con un tamaño promedio de 19.2  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 41.8%, carbono 35.3%, azufre 9.0%, calcio 4.5%, magnesio 3.3%, sodio 3.3%, cloro 2.1% y potasio 0.7%. En el circuito D-Alta (26c), se observan cristales de sulfato de calcio principalmente, con un tamaño promedio alrededor de 37.2  $\mu\text{m}$  y una composición elemental de: oxígeno 44.8%, calcio 22.1%, azufre 20.6%, carbono 5.7%, silicio 4.1%, magnesio 1.5% y sodio 1.2%. Esto indicó que al igual que en la primera etapa, se precipitó el 77% del carbonato de calcio, quedando en solución la dureza no carbonatada en forma de sulfatos, principalmente.

En general, los resultados arrojados por el análisis de MEB, mostraron que parte del carbonato de calcio precipitado de forma natural, se incrustó sobre las resistencias; otra parte se depositó en el fondo del recipiente y las mangueras; y un porcentaje de aproximadamente del 20% permaneció disuelto en la solución. También se observó disminución del ión calcio, disminución en el tamaño de los cristales y aglomeraciones de los mismos en los circuitos con campo magnético.



**Ilustración 25.** Imágenes del análisis MEB del material depositado en el fondo de los recipientes y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000x.

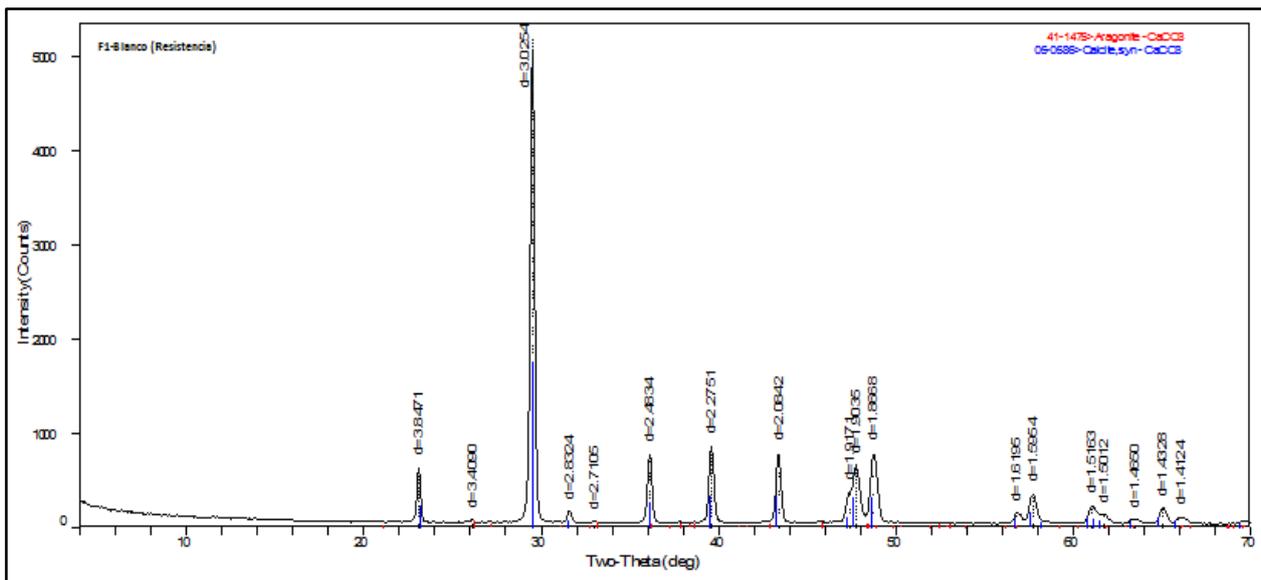


**Ilustración 26.** Imágenes del análisis MEB del sobrenadante y la composición elemental de los circuitos a) Sin campo magnético, b) intensidad de 2,500 G y c) intensidad de 5,000 G; con velocidad de 0.80 m/s, en aumento de 2000x.

De acuerdo al análisis elemental se muestra que el magnesio permaneció disuelto en la solución con una concentración de aproximadamente 4%. En cambio su presencia en las incrustaciones y depósitos es menor del 1%. Bajo las condiciones de los experimentos no se excedió el límite de solubilidad del carbonato de magnesio y solo pequeñas fracciones pasaron a formar parte de los cristales precipitados.

#### 4.3.3 Análisis de Difracción de Rayos X

Los resultados de la difracción de rayos X se muestran en las ilustraciones 27, 28 y 29. La Ilustración 27, muestra el difractograma de los cristales formados en la resistencia del circuito F1-Blanco, donde se identificó calcita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 05-0586) y trazas de aragonita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 41-1475). El porcentaje en peso de calcita y aragonita calculado por el método Reference Intensity Ratio (RIR) fue: calcita del **99.9%** y aragonita del **0.1%**. Con este análisis se comprueba que la incrustación que se formó sobre la resistencia del circuito sin tratamiento magnético fue calcita.

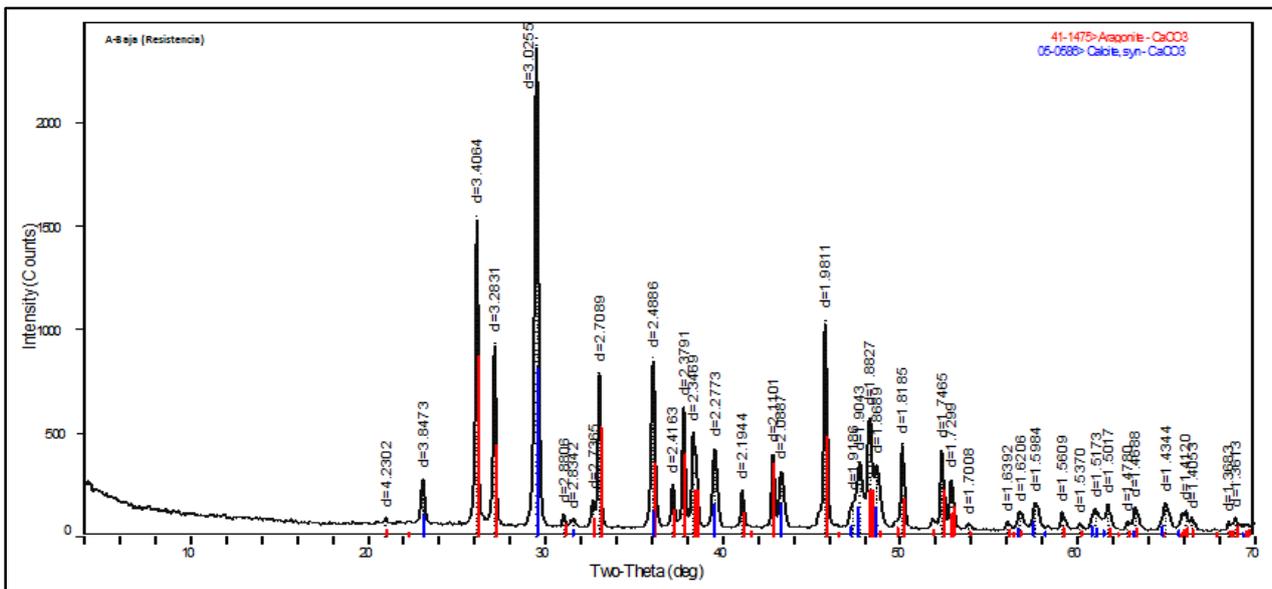


**Ilustración 27.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito F1-Blanco, con velocidad de 0.43 m/s.

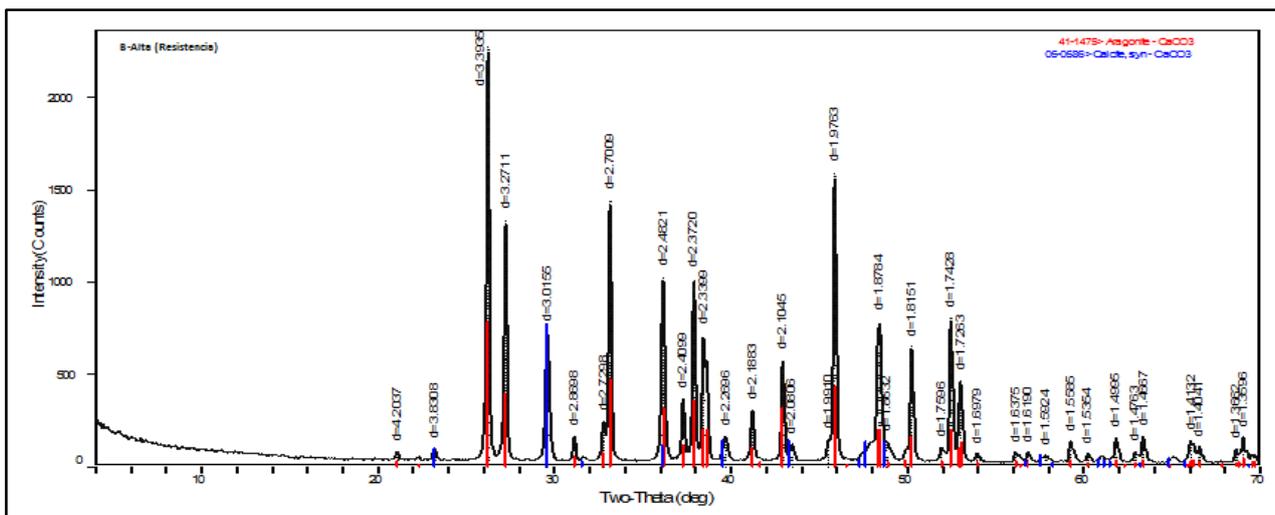
La Ilustración 28, muestra el difractograma de la incrustación formada sobre la resistencia del circuito A-Baja, donde se observa que el pico predominante es la calcita, pero también existen picos que muestran la presencia de aragonita. Se identificó calcita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 05-0586) y aragonita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 41-1475). El porcentaje en peso de calcita y aragonita calculado por el método Reference Intensity Ratio (RIR) fue: calcita del **29.9%** y aragonita

del **70.1%**. Se comprueba un cambio de calcita a aragonita en el circuito con tratamiento magnético de 2,500 G.

La Ilustración 29, muestra el difractograma de la incrustación formada sobre la resistencia del circuito B-Alta, donde se confirma que la incrustación está conformada principalmente de aragonita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 41-1475) y calcita ( $\text{CaCO}_3$  PDF 05-0586). El porcentaje en peso de calcita y aragonita calculado por el método Reference Intensity Ratio (RIR) fue: calcita del **17.7%** y aragonita del **82.3%**. Se comprueba que el cambio de calcita a aragonita fue mayor cuando se aumentó la intensidad de campo magnético a 5,000 G.



**Ilustración 28.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito A-Baja con velocidad de 0.43 m/s.



**Ilustración 29.** Espectro de difracción de rayos X de la incrustación formada en la resistencia del circuito B-Alta, con velocidad de 0.43 m/s.

Estos resultados coinciden con los reportados por Cefalas *et al.*, 2008, donde en sus experimentos encontraron que los cristales de  $\text{CaCO}_3$  bajo un campo magnético cero (es decir, sin campo magnético) se precipita en la interfase sólida/líquida como aglomeraciones homogéneas de calcita y al aplicar un campo magnético de 1.2 T, las aglomeraciones fueron separadas y se exhibieron estructuras en forma de agujas (aragonita) y la concentración de estas fue superior al 90% e incrementó de manera constante con la intensidad de campo magnético.

En la literatura, se han propuestos diversos mecanismos para explicar los efectos del campo magnético en la precipitación y/o transformación del  $\text{CaCO}_3$ . Alimi, *et al.*, 2006, consideraron dos enfoques diferentes: los fenómenos magnetohidrodinámicos (MHD) y los efectos de hidratación. Concluyeron que los fenómenos MHD dependen de la velocidad de flujo del agua tratada. Ellos obtuvieron que después de aplicar un tratamiento magnético, se promueve la forma cristalina de calcita. A  $\text{pH} = 6$  encontraron que una parte del precipitado fueron cristales de vaterita, que después se transformaron a aragonitas y otra parte permaneció como calcita, con un tamaño de cristal promedio de 10  $\mu\text{m}$  después de 90 minutos de la prueba de precipitación. Al tratar una agua con mayor dureza, solo observaron cristales de calcita con un tamaño de cristal de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$ . Estos resultados varían con los encontrados en el presente experimento, ya que se comprobó que al aplicar un campo magnético se promovió la formación de aragonita en vez de calcita. La diferencia puede radicar, en que Alimi *et al.*, 2006, realizaron una prueba de precipitación después de haber tratado el agua magnéticamente, lo cual consistió en elevar la temperatura a 30  $^{\circ}\text{C}$  y adicionar  $\text{NaOH}$  para elevar el  $\text{pH}$  y provocar la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , lo que pudo propiciar un cambio en la nucleación de los cristales ya formados.

#### 4.4 Análisis de los testigos de Incrustación

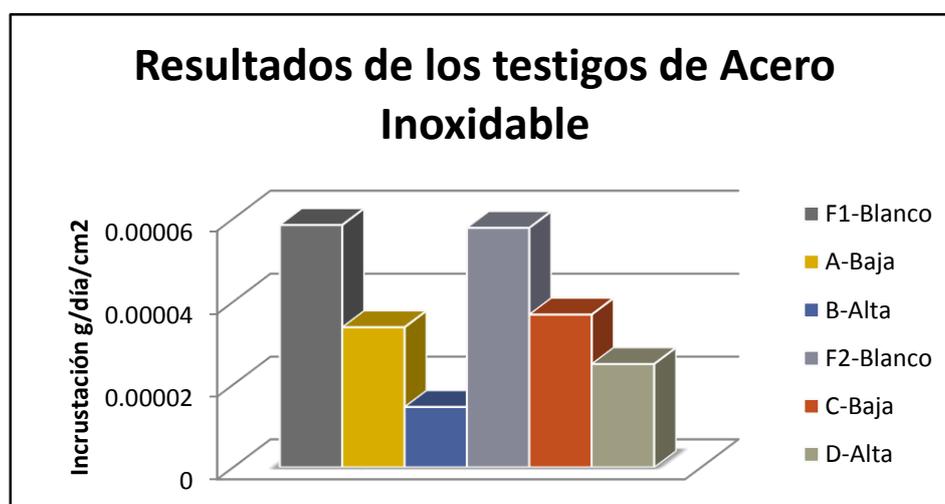
Las pruebas para evaluar el grado de incrustación, mostraron que los testigos de acero inoxidable que estuvieron colocados en el agua sometida a tratamiento magnético se incrustaron en menor grado, en comparación con los testigos que estuvieron sin tratamiento magnético. La Tabla 19, muestra los resultados del análisis de los testigos de incrustación fabricados con acero inoxidable. La incrustación formada se calculó mediante la ecuación 20, se observó un ligero aumento de peso en los seis circuitos, siendo más notable en los circuitos operados con la velocidad baja (0.43 m/s), obteniendo un aumento

del 0.72%, 0.42%, y 0.18% para F1-Blanco, A-Baja y B-Alta, respectivamente y un aumento del 0.76%, 0.48%, y 0.33% para F2-Blanco, C-Baja y D-Alta, respectivamente. Mientras que los testigos de incrustación fabricados de cobre, mostraron una ligera reducción en peso en los seis circuitos, esta diferencia en la pérdida de peso puede ser un indicativo de tendencia a la corrosión, o bien, no es recomendable el uso de testigos fabricados con este metal para medir la incrustación.

**Tabla 19.** Resultados del análisis de los testigos de incrustación.

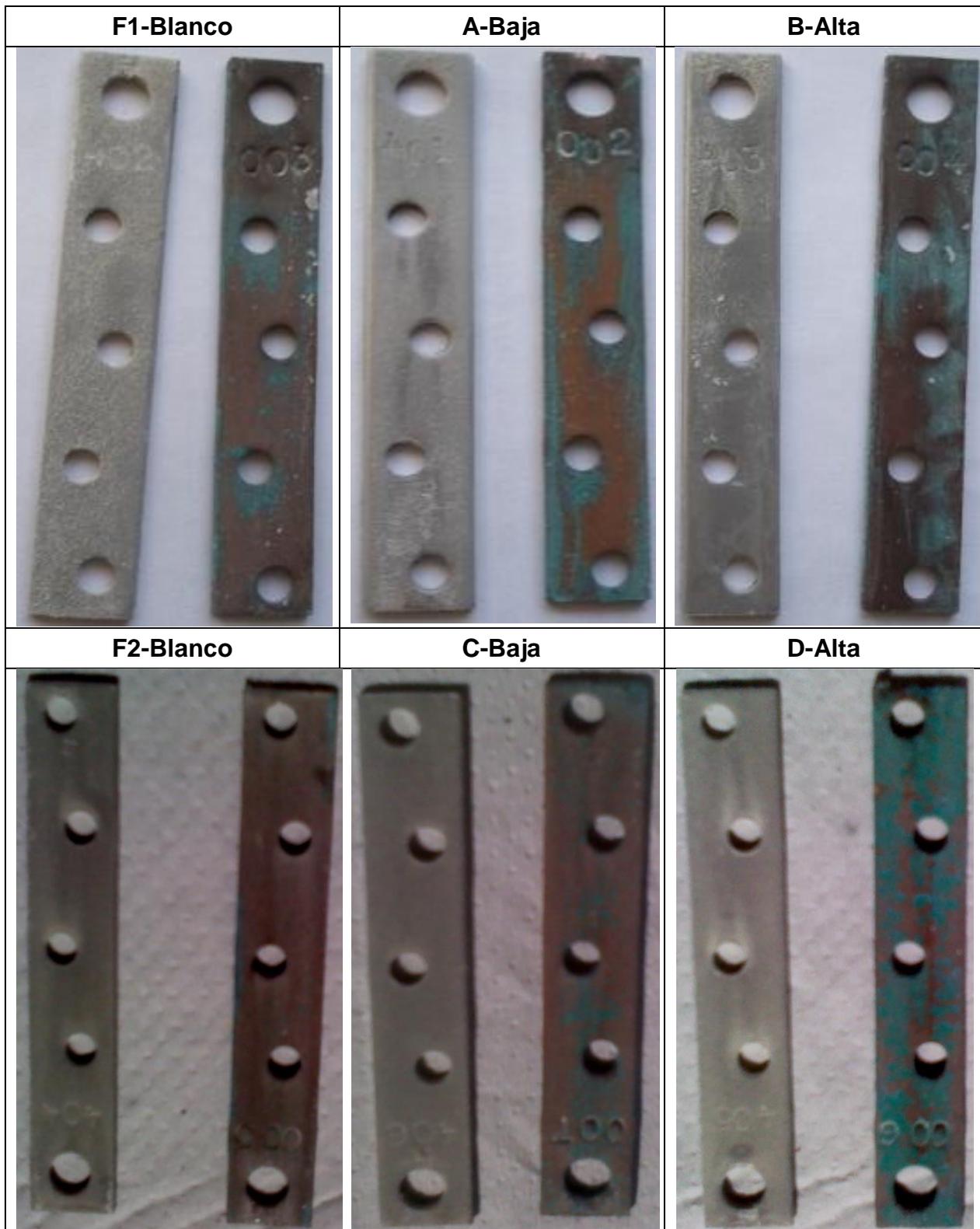
	Testigo de acero Inoxidable					
	F1-Blanco	A-Baja	B-Alta	F2-Blanco	C-Baja	D-Alta
<b>Peso Inicial (g)</b>	10.5348	10.4529	10.5217	9.8611	9.9154	9.882
<b>Peso Final (g)</b>	10.6113	10.4972	10.5408	9.9367	9.9637	9.9147
<b>Diferencia de peso (g)</b>	0.0765	0.0443	0.0191	0.0756	0.0483	0.0327
<b>Tiempo de instalación (días)</b>	60			60		
<b>Área del Testigo (cm<sup>2</sup>)</b>	21.79			21.79		
<b>Incrustación (I) en g/día/cm<sup>2</sup></b>	5.85131E-05	3.3884E-05	1.46091E-05	5.78247E-05	3.69436E-05	2.50115E-05

En la Gráfica 12, se muestran los valores de la incrustación formada en los seis circuitos, donde se observa más incrustación en los circuitos sin campo magnético comparado con los circuitos bajo tratamiento magnético.



**Gráfica 12.** Resultados de los testigos de incrustación fabricados con acero inoxidable.

En la Ilustración 30, se muestran las fotos de los testigos de acero inoxidable y cobre de los seis circuitos, donde se aprecia una ligera incrustación en los testigos de acero inoxidable y una ligera corrosión en los testigos de cobre.



**Ilustración 30.** Fotos de los testigos de incrustación al final de la experimentación.

De manera general, los resultados encontrados en esta investigación fueron los esperados, ya que se comprobó que la tecnología del campo magnético es una alternativa con grandes ventajas para la reducción y/o control de los problemas de incrustación, tanto en las industrias, como en uso doméstico. Sin embargo, es importante resaltar que es necesario continuar con esta línea de investigación, debido a que como se mencionó anteriormente, las características de la composición química de las aguas naturales, varían de una a otra. Por lo que se requiere de más estudios analizando otras aguas.

Es necesario hacer una caracterización del agua lo más completa posible, para poder conocer los compuestos que contiene la misma, principalmente las sales que están presentes, para poder realizar un estudio más profundo sobre que otros parámetros tiene influencia el campo magnético y conocer con más detalle las reacciones químicas que se dan de forma natural. Por ejemplo, en el agua utilizada no se contempló el análisis para determinar cuanta sílice estaba presente, sin embargo, el análisis MEB arrojó aproximadamente un 10% de sílice presente en el agua al final de la experimentación, pero se desconoce qué cantidad estaba presente al inicio, por lo que no se logró definir si influyó el campo magnético sobre esta sal.

Con el agua utilizada en este estudio, el carbonato de calcio se precipitó debido a las condiciones naturales en las que operaron los circuitos, sin embargo, se comprobó que la cantidad de carbonato de calcio que se precipite no influye totalmente en la formación de incrustación, lo que importa es el efecto del campo magnético ya sea por el cambio del cristal, disminución de la densidad, reducción del tamaño del cristal, etc., ya que de esto depende que la incrustación disminuya o sea menos densa y de fácil remoción.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

##### CONCLUSIÓN GENERAL

▪ Se encontró que existe un efecto del campo magnético sobre la formación de incrustación en los circuitos de agua, utilizando imanes permanentes con intensidades de 2,500 G y 5,000 G y un agua de pozo con alta dureza (678 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ). Este efecto se reflejó en la transformación de la estructura cristalina del carbonato de calcio de calcita a aragonita, propiciando que los problemas de incrustación en los sistemas de enfriamiento se reduzcan. La intensidad de campo magnético más efectiva fue la de 5,000 G.

##### CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- Se encontraron cambios en la estructura cristalina del carbonato de calcio debido al efecto del campo magnético, los cuales se comprobaron por diferentes técnicas:
  - Los análisis cristaloópticos mostraron que el campo magnético cambia la estructura cristalina del carbonato de calcio de calcita a aragonita y que esta transformación es mayor cuando se aumenta la intensidad de campo magnético.
  - La microscopía electrónica de barrido, mostró una disminución del ión calcio en la incrustación formada sobre las resistencias de los circuitos con campo magnético, siendo mayor la disminución en el circuito con campo magnético de 5,000 G, por lo tanto, se corroboró que la incrustación disminuye conforme se aumenta la intensidad de campo magnético.
  - Los resultados de la difracción de rayos X, comprobaron el cambio de fase del carbonato de calcio de calcita a aragonita entre un 70% y 82% en la incrustación formada sobre las resistencias de los circuitos con campo magnético, mientras que el circuito sin tratamiento se observó solamente la presencia de calcita.
  
- Con respecto a la calidad del agua, cabe especificar que para esta agua en particular, no se encontraron cambios significativos derivados de la aplicación del

campo magnético. Los cambios fueron originados por la precipitación del carbonato de calcio, propiciados principalmente por el aumento de la temperatura y la recirculación constante del agua durante los 60 días de operación. Por lo que se concluye, que el campo magnético solo afecta la configuración electrónica del carbonato de calcio.

- El estudio de los testigos de incrustación arrojó que se pueden utilizar como una medida de control de las incrustaciones, sin embargo, los testigos que mostraron más eficiencia fueron los testigos de acero inoxidable 304. Se formó incrustación en los testigos de acero inoxidable, resultando mayor en el testigo de los circuitos sin tratamiento magnético.

## 5.2 Recomendaciones

Se sugiere continuar realizando estudios en esta línea de investigación, ya que no existen muchos estudios realizados con agua natural y cada agua tiene una composición diferente.

Probar con tuberías de diferentes materiales y diferentes diámetros, ya que se tiene conocimiento de que es un parámetro que influye sobre la eficiencia del campo magnético.

Realizar análisis físicos-químicos más completos al agua a estudiar, para conocer con exactitud la composición de la misma, que ayude a entender los mecanismos que se llevan a cabo al aplicar campo magnético con más claridad y ver si el campo magnético actúa sobre alguna otra sal o sólo sobre el carbonato de calcio.

Se recomienda llevar el estudio de esta tecnología, a escala real para tener un conocimiento más amplio sobre los parámetros que influyen sobre la eficiencia del campo magnético.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Alimi, F., Tlili, M., Ben Amor, M. y Gabrielli C. (2007). Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination*, 206, 163-168.
- Alimi, F., Tlili, M., Ben Amor, M., Maurin, G. y Gabrielli C. (2009). Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 1327-1332.
- Alimi, F., Tlili, M., Gabrielli, C., Maurin, G. y Ben Amor, M. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research*, 40, 1941-1950.
- APHA, AWWA y WEF. (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21 th Edition). New York.
- ASTM-D887-08. Standard practices for sampling water-formed deposits. Copyright ASTM International.
- ASTM-G1-90. Standard practice for preparing cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Copyright ASTM International.
- Baker, J.S. y Judd, S.J. (1996). Magnetic amelioration of scale formation. *Water Research*, 30, 2247-260.
- Banejad, H. y Abdosalehi, E. (2009). *The effect of magnetic field don water hardness reducing*. Trabajo presentado en Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt. 117-127.
- Carrier Air Conditioning Company. (1965). Handbook of air conditioning system design. New York: McGraw-Hill Books.
- Cefalas, A.C., Kobe, S., Dražić, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J. y Meden, A. (2008). Nanocrystallization of CaCO<sub>3</sub> at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science*, 254, 6715-6724.
- Clifford, Y.T., Chi-Kao, W. y Meng-Chun, C. (2008). Effects of magnetic field on the crystallization of CaCO<sub>3</sub> using permanent magnets. *Chemical Engineering Science*, 63, 5606-5612.
- CNA. (1994a). *Rehabilitación de pozos (Libro III)*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CNA. (1994b). *Protección catódica y recubrimientos anticorrosivos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Libro V)*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CNEA, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (2011). El tratamiento magnético del agua como método anti-incrustante. Dirección de Información Científico-Técnica, ISPJAM, Santiago de Cuba. (Comunicación personal).
- CNEA, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. (2010). Método Cristaloóptico para la evaluación del efecto del tratamiento magnético a las aguas industriales. Dirección de Información Científico-Técnica, ISPJAM, Santiago de Cuba. (Comunicación personal).
- Coey, J. y Cass, S. (2000). Magnetic Water Treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 209, 71-74.

- Corney, J. (1991). MFC (magnetic fluid conditioner) open chapter in well treating. Am. Oil and Dean, S.W. Electrochemical methods of corrosion testing. NACE-Symposium Electrochemical Techniques for corrosion. Houston, Texas.
- Del Toro, R. y Berenguer, A. (2001). Actualidad internacional del tratamiento magnético para el control de incrustaciones. *Revisión Tecnología Química*, 21(2), 16-25.
- Dobersek, D. y Goricanec, D. (2014). An experimentally evaluated magnetic device's efficiency for water-scale reduction on electric heaters. *Energy*, 77, 271-278.
- Espigares, M. y Pérez, J.A. (s.f). Precipitación química. En: *Ablandamiento del agua*. Consultado el 13 de abril de 2015. Disponible en: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/ablandamiento.pdf>.
- Espinosa, M. (2001). *Evaluación de la eficiencia de inhibidores de incrustación de CaCO<sub>3</sub> en presencia de sílice, en aguas de enfriamiento*. México: UNAM, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Campus Morelos. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental.
- Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G. y Keddam M. (2001). Magnetic water treatment for scale prevention. *Wat. Res.*, 35(13), 3249-3259.
- Gary, D. (1981). *Química Analítica*. México: Limusa.
- Gilard, F. (2011). *Memorias del Curso Tratamiento magnético del Agua*. Santiago de Cuba: Centro Nacional de electromagnetismo aplicado.
- Guerra, F.J., Struck, A. y Villalobos, S.A. (2008). Practica 6: Ablandamiento por intercambio iónico. En: *Universidad Iberoamericana Ciudad de México*. Consultado el 13 de abril de 2015. Disponible en: [http://fjartnmusic.com/Personal/8o\\_Semestre\\_files/LIAPreP6.pdf](http://fjartnmusic.com/Personal/8o_Semestre_files/LIAPreP6.pdf).
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3<sup>ra</sup> edición). México: McGraw-Hill.
- Hernández, A. (2014). Como influye el pH en salud humana. En: *Powered by Blogger*. Consultado el 13 de abril de 2015. Disponible en: <http://phenserhumano.blogspot.mx/>.
- Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K. y Hatade, S. (1993). Effects of magnetic field on formation of CaCO<sub>3</sub>. Particles. *J. Coll. Int. Sci.* 156, 125-131.
- Kemmer, F. y McCallion, J. (1989). *Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones (Tomo III)*. Nalco Chemical Company: McGraw-Hill.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A.U.
- Kobe, S., Dražić, G., Cefalas, A.C., Sarantopoulou, E. y Stražišar J. (2002). Nucleation and crystallization of CaCO<sub>3</sub> in applied magnetic fields. *Materials Science and Engineering*, 5, 243.
- Kobe, S., Dražić, G., McGuines, P.J., Meden, T., Sarantopoulou, E., Kollia, Z. y Cefalas A.C. (2003). Control over nanocrystallization in turbulent flow in the presence of magnetic fields, *Materials Science and Engineering*, 23, 811.
- Ley federal sobre metrología y normalización. (2014). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Secretaria General. Secretaria de Servicios Parlamentarios.

- Lora, F. (1975). *Control de calidad y tratamiento del agua*. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local.
- Meng-Chun, C. y Clifford, Y.T. (2010). Effect of the magnetic field on the growth rate of aragonite and the precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Chemical Engineering Journal*, 164, 1-9.
- Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse (4<sup>th</sup> edición)*. New York: McGraw-Hill.
- Nalco. (2009). Cooling Water Treatment. *Bulletin B-34*, 1-28.
- NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua – Determinación del pH – Método de prueba.
- NMX-AA-017-SCFI-1980. Análisis de agua – Determinación de color – Método de prueba.
- NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- NMX-AA-074-SCFI-1981. Análisis de agua – Determinación del ión sulfato – Método de prueba.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la conductividad electrolítica – Método de prueba.
- NMX-AA-129-SCFI-2006. Potabilización del agua para uso y consumo humano – Cloruro férrico – Especificaciones y métodos de prueba.
- Parsons, S.A. (1999). Overall of recent magnetic treatment research at Cranfield University, 3rdSymposium, Cranfield University, UK.
- Powell, T.S. (1979). *Acondicionamiento de aguas para la industria*. México: Limusa.
- Rodríguez, S. (2010). La dureza del agua. En: *Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional*. Consultado el 09 de abril de 2015. Disponible en [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza\\_agua.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf).
- Saint-Gobain Performance Plastics (2003). TYGON® LFL Long Flex Life Pump Tubing. En: *Biopharmaceutical products*. Consultado el 07 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.tygons3tubing.com/Tygon-LFL-Pump-Tubing.pdf>.
- Saksono, N., Yuliusman, Bismo, S., Soemantojo, R.W. y Manaf, A. (2009). Effects of pH on calcium carbonate precipitation under magnetic field. *Makara, Teknologi*, 13(2), 79-85.

- Szcze's, A., Chibowski, E., Holysz, L. y Rafalski, P. (2011). Effects of static magnetic field on water at kinetic condition, *Chemical Engineering and Processing*, 50, 124-127.
- Tai, C.T., Meng-Chun, C., Shieh, R.H. y Chen, T.G. (2008). Efecto magnético en la rapidez de Crecimiento de calcita en un ambiente de exposición constante. *Journal of crystal growth*, 3690- 3698.
- Tippens, P. (1996). *Física* (3<sup>ra</sup> edición). México: McGraw-Hill.
- Trujillo, E., Martínez, V. y Flores, N. (2008). Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono. *Información Tecnológica*, 19(6), 89-101.
- Tye, A. (1993). The magnetic treatment of water to prevent scaling. *Resource* 1, 25-26.
- Viltre, R., Vega, E. y Mesa, J.M. (1999). Efecto del tratamiento magnético del agua sobre la solubilidad del carbonato de calcio y magnesio presentes en una muestra de incrustación a diferentes temperaturas. *Tecnología química*, 19(2), 54-59.
- Wikipedia® (2015). Campo magnético. En: *Wikipedia La enciclopedia libre*. Consultado el 19 de abril de 2015. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Campo\\_magn%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico).
- Zarga, Y., Ben Boubaker, H., Ghaffour, N. y Elfil, H. (2013). Study of calcium carbonate and sulfate co-precipitation. *Chemical Engineering Science*, 96, 33-41.

## ANEXOS

### Anexo I. Técnica de Análisis Cristalóptico

La acción del campo magnético se concentra específicamente en los cristales de carbonato de calcio, los cuales constituyen la mayor proporción entre las impurezas presentes en las aguas modificando su forma y sus dimensiones.

El método en cuestión está basado en la comparación de las dimensiones de los cristales de las sales disueltas en el agua tratada y no tratada magnéticamente. Esta metodología fue introducida a finales de mayo de 1992 por el Grupo Provincial de Magnetismo de Santiago de Cuba para la evaluación masiva de los magnetizadores instalados.

La metodología para la obtención de los cristales es:

1. Tomar simultáneamente una muestra de 1 L de agua tratada magnéticamente (en lo sucesivo muestra) y 1 L de agua sin tratar (referencia), tomada antes del magnetizador.
2. Enjuagar dos vasos de precipitados de vidrio de 200 mL, con agua muestra y referencia, colocarles en el interior de cada vaso un portaobjeto de dimensiones 75 x 25 x 0.8 mm, de forma tal que se mantenga en posición inclinada. Esta posición garantiza la eliminación de las deposiciones de lodos y materia orgánica formadas durante la ebullición por medio de las corrientes convectivas.
3. Añadir agua muestra y referencia a cada vaso hasta que el nivel de agua sobrepase el borde superior de los portaobjetos en unos 2 a 3 cm.
4. Colocar ambos vasos simultáneamente en una hornilla eléctrica previamente encendida y calentarlos hasta que el agua contenida en ellos comience a ebullicir.
5. Mantenerlos en esta condición un tiempo suficiente para que se depositen cristales en la superficie de los portaobjetos. Este tiempo será en función de la dureza total del agua utilizada y puede determinarse aproximadamente acorde con la siguiente tabla:

Dureza total en mg/L como CaCO <sub>3</sub>	Tiempo de ebullición recomendado, min
Menor que 50	50 a 60
50 a 100	40 a 50
150 a 300	30 a 40
Mayor que 300	20 a 30

Si durante el ensayo la superficie del agua en los vasos se aproxima al portaobjeto, debe añadirse simultáneamente a cada vaso la misma cantidad de agua correspondiente y repetir esta operación tantas veces como sea necesario hasta alcanzar el tiempo de ebullición recomendado. Debe tenerse cuidado para no “barrer” los cristales depositados con el agua que se añade.

6. Concluido el tiempo de ebullición se retiran simultáneamente ambos vasos de la hornilla y se extraen los portaobjetos, los cuales deben secarse con papel de filtro por el lado que ocupaba la posición inferior y dejarse secar con el aire el lado superior.

Es sumamente importante que la metodología descrita se realice para la muestra y la referencia con las mismas condiciones e inmediatamente después de obtener el agua tratada magnéticamente.

7. Una vez secos los portaobjetos se rotulan para diferenciar las muestras de las referencias y se conservan cuidadosamente en un lugar seco y libre de polvo.

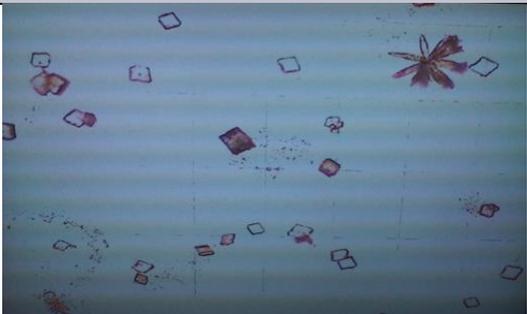
Concluida esta etapa toda la información relacionada con el efecto del tratamiento magnético se encuentra “grabada” en los portaobjetos y solo resta observarlos al microscopio con aumentos entre 10x y 100x.

## Anexo II. Resultados de las pruebas cristaloópticas de las aguas analizadas

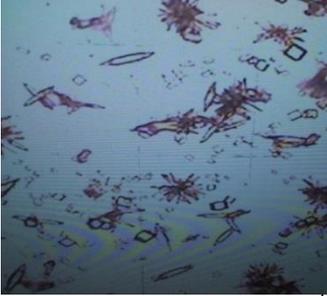
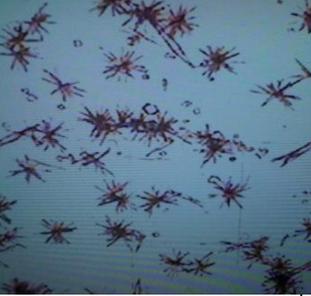
Se analizó agua de la red de abastecimiento de una vivienda en Temixco, se le realizó los análisis de dureza total, dureza de calcio y alcalinidad; los resultados fueron favorables debido a que resultó ser un agua muy dura (620 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ). Se realizó una prueba montando un circuito provisional, el cual operó con una velocidad de 0.30 m/s, una intensidad magnética de 2,200 G a una temperatura de 25 °C, durante un tiempo de 3 h. Después se le realizaron los análisis cristaloóptico (cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla), donde se pudo observar que el carbonato de calcio estaba presente en su forma cristalina de aragonita, motivo por el cual se tuvo que descartar.

Agua de Temixco	
	
<b>Sin Imán</b>	<b>Con Imán</b>
Se observa la presencia del carbonato de calcio en su forma cristalina de aragonita y muy poca calcita pequeña.	Se observa cristales de aragonita aglomeradas y de tamaño más grandes.

Se continuó con la búsqueda del agua, muestreando en la red de abastecimiento de Xochitepec y de Tlayacapan, Morelos; cuyos resultados de Dureza Total fueron: 232 y 196 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente. Por lo que fueron descartadas totalmente.

Agua Xochitepec	Agua Tlayacapan
	
Se encontró casi en su totalidad calcita y pocos cristales de aragonita.	Se encontró cristales de calcita de gran tamaño y pocos cristales de aragonita.

Después se muestrearon 4 pozos de agua de Xochitepec; Pozo C, Pozo A, Pozo E y Pozo Arroyos, cuyos resultados de Dureza Total fueron: 710, 678, 642 y 458 mg/L, respectivamente. Las 4 muestras cumplieron con el requisito de ser agua dura, por lo que se procedió a realizar el análisis cristaloóptico, cuyos resultados fueron en general los mismos, la forma cristalina del carbonato de calcio fue aragonita, por lo que tuvieron que descartarse. Los resultados del cristaloóptico se muestran a continuación:

<b>Agua de Xochitepec</b>			
			
<b>Pozo C</b>	<b>Pozo A</b>	<b>Pozo E</b>	<b>Pozo Arroyos</b>
Se observó la presencia del carbonato de calcio en su forma cristalina de aragonita y muy poca calcita.	Se observó la presencia de aragonita suelta y aglomerada.	Se observó aragonita grandes y muy poca calcita pequeña.	Se observó la presencia de aragonita pequeña y aglomerada.

### Anexo III. Memorias de congreso

Proceedings 4th IWA Mexico YWP Conference. Guanajuato, Mexico, 27-29 April 2015

#### Effect of a magnet field on the cristal structure of calcium carbonate

M. G. BELIN\*, M.E. RAMIREZ\*\*, G. BUITRON\*\*\*, A. E. SILVA\*\*\*\*

\*Environmental Engineering Graduate, National University of Mexico Campus Morelos, Paseo Cuahunahuac 8532, Jiutepec, Morelos, 65550, Mexico.

\*\*Mexican Institute of Water Technology, Paseo Cuahunahuac 8532, Jiutepec, 65550, Mexico.

\*\*\*Institute of Engineering, National University of Mexico Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Queretaro, 76230, Mexico.

\*\*\*\*Faculty of Engineering, National University of Mexico, 04510 Mexico D.F., Mexico.

#### Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect of applying a magnetic field to well water with high hardness, as well as to monitor the changes of the cristal structure of calcium carbonate throughout time. The experiment was conducted at laboratory scale, using three continuous-flow circuits: two with a magnetic field of 0.25 and 0.5 Tesla (T) and one without a magnetic field (white), which operated for sixty days under a flow rate of 0.43 m/s, a contact time of 0.20 s, and a flow of 300 mL/min. The results of the quality of the water showed that the magnetic field did not influence the changes of the most important parameters of water. The results obtained from the analysis of optical microscopy proved that the magnetic field modifies the crystal structure of calcium carbonate, from calcite to aragonite and that this transformation is enhanced when the strength of the magnetic field is increased. The results of the scanning electron microscopy (SEM) showed less incrustation on the circuits to which a magnetic field was applied, compared to the circuit without a magnetic field.