

## EFECTO DE CAMPO MAGNÉTICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DURAS

Mery Zavaleta, Aníbal Valera, Enrique Rivas\*, Atilio Mendoza\*\*, Soledad Tinoco\*\*

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias

\*Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Glew Wataghim

\*\*Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ing. de Minas y Metalurgia

### RESUMEN

*El efecto del campo magnético sobre aguas duras ha sido reconocido por cerca de 100 años, no obstante, el mecanismo del mismo es aún desconocido. Una de las principales aplicaciones es la de suprimir las incrustaciones dentro de calderos, intercambiadores de calor y ductos de transmisión. En este artículo, reportamos una serie de experimentos de Laboratorio concernientes al efecto positivo del tratamiento magnético de aguas duras. Los principales métodos de diagnóstico empleados fueron: Observaciones del factor de turbiedad (Efecto Tyndall), Observaciones cristalográficas bajo luz polarizada, estructural (espectros Debye-Scherrer) y análisis químico.*

### ABSTRACT

*Magnetic Water treatment is known for over a century, even though, actually no one knows exactly how it works. One of the main applications is to suppress water-scale deposition on the inner surface of boilers, heat exchangers and pipelines. In this paper we report some experiments concerning the effectivity of the magnetic treatment in the reduction of water scale deposition. The applied diagnostic methods were: Observation of the turbidity factor (Tyndall effect), Crystallographic observations under polarized light, structural measurements (Debye-Scherrer spectra) and chemical composition.*

### INTRODUCCION

El agua es considerado el solvente universal, debido a la propiedad de disolver en mayor o menor grado, cualquier sustancia inorgánica y muchas sustancias orgánicas con las que llega a tener contacto. Esto debido esencialmente al "momento dipolar" de su molécula, que le permite separar las partículas formando iones, que se mantienen luego en la solución.

En general, el agua puede provenir de dos tipos de fuentes: subterráneas y superficiales. Las aguas subterráneas tienen mayor cantidad de sólidos disueltos, menos materia suspendida que las aguas superficiales, las cuales son afectadas directamente por la lluvia y la erosión del suelo, resultando así, el agua

subterránea usualmente mas dura que el agua superficial de lluvia.

El agua es muy reactiva con las sales de calcio y magnesio, constituyendo los minerales responsables de la dureza del agua. A medida que el agua dura circula por un recipiente (Tubería, caldera, etc.) los iones disueltos son atraídos a la superficie del recipiente formándose cristales (incrustaciones) que tienen efectos negativos como por ejemplo el de impedir la circulación o el de ser aislantes térmicos, favoreciendo este proceso la temperatura alta del agua.

A nivel industrial, la dureza del agua constituye un problema muy agudo, que limita el funcionamiento de muchos equipos. El mayor constituyente de las

incrustaciones usuales es el carbonato de calcio :  $\text{CaCO}_3$  .que cristaliza en la forma de calcita (policristalino). Estas incrustaciones se denominan usualmente "caliche" o "sarro" y se caracterizan por la dureza de ligamiento al recipiente afectado.

Los métodos tradicionales para el ablandamiento del agua son el intercambio iónico y el tratamiento químico. En el primer método se reemplaza los minerales que forman incrustaciones (calcio, magnesio), por iones que no forman incrustaciones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ). El método iónico requiere de paradas continuas del equipo e ingentes insumos de  $\text{NaCl}$ , agua y energía eléctrica para la regeneración del medio de intercambio iónico, además de un control permanente para asegurar que el agua a la salida del sistema se mantenga blanda.

El método químico requiere un análisis preciso de los minerales del agua que forma las incrustaciones, seguidas por la dosificación de los productos químicos necesarios para precipitarlos en forma de un lodo no dañino. Los productos químicos típicos son mezclas de hidróxido y aluminato de sodio, compuestos complejos, quelatos, etc. Todos ellos, sin embargo, comparten el mismo inconveniente: que se requiere constante análisis químico del agua, que el dosaje debe realizarse exactamente, que los productos químicos son caros, que contaminan el medio ambiente y que en algunos casos no son saludables para los usuarios.

En los últimos años, no obstante, ha surgido una nueva técnica: el tratamiento magnético del agua, por medio del cual se hace pasar el agua dura por un campo magnético alto (del orden de 500 Gauss) a una velocidad media del orden de algunos litros por minuto, luego de lo cual el agua adquiere una propiedad singular: **no produce incrustaciones**. Un caldero, en el cual se introduce agua dura tratada magnéticamente, va a producir una "arenilla" suelta, que se va a sedimentar en el fondo del recipiente sin adherirse a las paredes, pudiendo ser purgada fácilmente.

La observación del efecto de campos magnéticos en el tratamiento magnético de agua es conocido desde el siglo XIX, no obstante la actualización de esta Téc-

nica se acredita a Theo Vermeiren /Ref. 2/ , quien en 1953 presento una patente (US Patent 2652925). A nivel mundial, la nueva tecnología de Magnetos de alta intensidad, esta posibilitando una cierta difusión comercial de la técnica. No obstante, existir el efecto bajo ciertas condiciones explícitas /Ref. 3/, no existe aun una teoría coherente que explique el efecto y sus limitaciones.

**Esta situación teórica y la importancia tecnológica del tema nos ha motivado a estudiarlo.**

### FUNDAMENTO TEORICO

El mecanismo por el cual el tratamiento magnético afecta las propiedades del agua dura no ha podido hasta la fecha ser explicado satisfactoriamente, existiendo si ciertos criterios, que tratan de explicar de un modo cualitativo el proceso /Ref 4/

Experimentos efectuados en torno a este fenómeno, indican una clara dependencia de la intensidad de campo magnético aplicado y la velocidad del fluido , motivo por el cual se presume que la fuerza de Lorentz juega un papel importante en el, sin poder responderse aún, si el efecto implica un reforzamiento del poder de atracción mutuo de los iones diluidos o si el campo magnético actúa sobre las moléculas de agua, rompiéndose el fuerte encapsulamiento de los iones.

El desconocimiento de la estructura del agua es quizás uno de los mayores escollos en el entendimiento del efecto magnético, existiendo al respecto solo hipótesis parciales, por ejemplo /Ref. 5/ : las moléculas de agua al rodear las impurezas (iones) forman una envoltura o cluster alrededor de estas, encasillándolas, las que al chocar con las paredes del recipiente se rompen, liberando la impureza, propiciándose así la localización de un germen de cristalización, que dan origen a las incrustaciones. De otro lado, el efecto del campo magnético se supone es de romper directamente en la solución el enclaustramiento de las impurezas, propiciando así que en la misma solución se liberen los gérmenes activos, produciéndose así microcristales no ligados al recipiente (arenilla fina), que se va a depositar en el fondo del recipiente.

Mas aun a diferencia de la estructura cristalina predominante en las incrustaciones convencionales, que en el caso de carbonato de calcio se van a formar de manera natural en la estructura de calcita, en el caso de tratarse magnéticamente el agua se produce predominantemente microcristales de la estructura de aragonita.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL

### A) Equipo empleado en el tratamiento Magnético

En el diagrama esquemático de la figura 1 se indica el procedimiento seguido en producir agua tratada magnéticamente: Una tubería de plástico se acondiciona dentro de un magneto permanente, que ejerce un campo magnético  $B$  (300 Gauss) perpendicular a la dirección del flujo de agua. La velocidad promedio del agua por la tubería es del orden de un metro por segundo. El agua empleada fué agua corriente del Laboratorio, que mostraba en ciertas fechas una gran dureza. Con el objeto de obtener el efecto neto del campo magnético se realizaron en todos los caso medidas comparativas, teniendo como referencia siempre una muestra no tratada magnéticamente

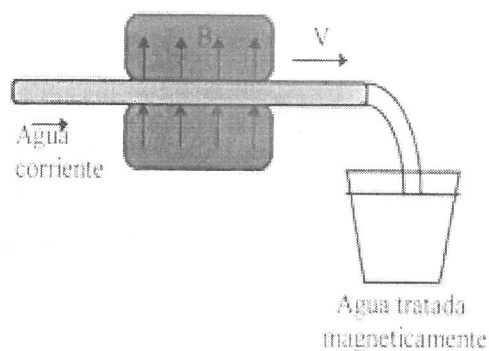


Figura 1: Disposición experimental empleado en el proceso de tratamiento magnético de agua.  $B$ : campo magnético,  $v$ : velocidad del fluido.

### B) Análisis de microcristalización mediante el efecto Tyndall.

El efecto más impresionante de la aplicación del campo magnético sobre aguas duras es la formación casi inmediata de microcristales, que dependiendo de las condiciones experimentales, se mantienen en suspensión y/o se van acumulando gradualmente en el fondo

del recipiente, los que a la incidencia de luz se manifiestan con una fuerte dispersión (Efecto Tyndall).

El efecto de dispersión microcristalina es una medida del grado de cristalización producida en la solución, inicialmente iónica. Una medición directa de este efecto se realizó mediante el montaje que se describe en la figura 2, el que permite medir la transparencia de la solución o respectivamente su grado de turbiedad ( $I - T$ ,  $T$ : coeficiente de transmisión).

Un rayo Láser (633 nm, 5 mW) atraviesa un recipiente Pyrex (12 cm ancho) con la solución a analizar, luego de lo cual incide finalmente sobre un detector fotovoltaico. El recipiente Pyrex se encuentra sobre una plancha calefactora.

En la figura 3 se muestra el resultado obtenido con agua tratada magnéticamente (Agua Magnética) en la medición del factor de turbiedad, en función del tiempo de observación

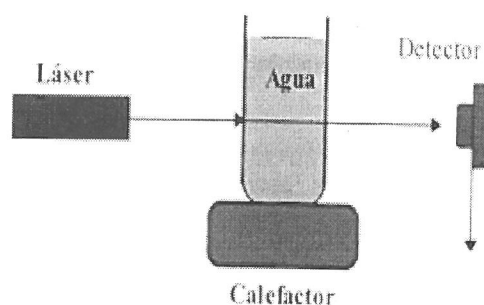


Figura 2: Arreglo experimental para medir el grado de turbiedad de una solución.

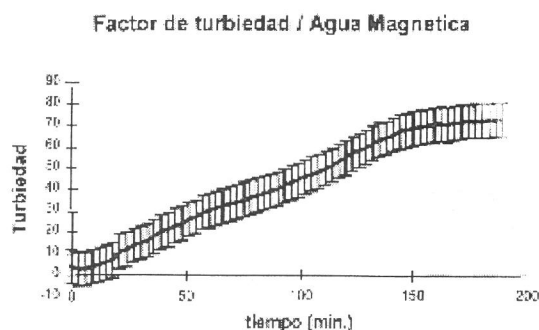
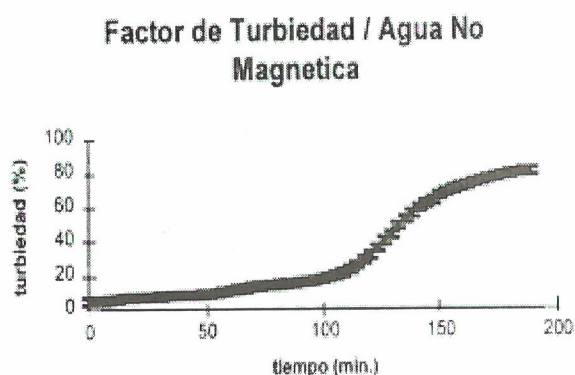


Figura 3: Variación del factor de turbiedad obtenida en una muestra de agua tratada magnéticamente.

Como es de observar de la figura 3, la respuesta del agua tratada magnéticamente en la formación de microcristales es casi inmediata, estabilizándose recién en el lapso de 3 horas. Los datos individuales se encuentran esparcidos alrededor de la curva promedio (curva sólida) en un rango de cerca del 10%. Esto se debe a la convección continua de los centros de dispersión que se cruzan en el camino. En este proceso las paredes del recipiente permanecen limpias (transparentes).

En la figura 4 se muestra la variación del factor de turbiedad obtenido para una muestra de agua sin tratar magnéticamente, medido bajo las mismas condiciones experimentales del "caso magnético". En este caso se observa que el efecto de turbiedad se manifiesta de manera efectiva recién a aproximadamente 2 horas de iniciado el experimento. Mas aun, el efecto de turbiedad se debe a una lenta opacidad de las paredes del recipiente, la que empieza a tomar un aspecto blanquecino, debido a las incrustaciones producidas. La cantidad mínima de microcristales producidas se deja notar en el rango de desviación de los datos alrededor de la curva promedio, que en este caso se reduce a menos de 5%, lo que indica que la turbiedad se debe mayormente a partículas fijas (adheridas a la pared).



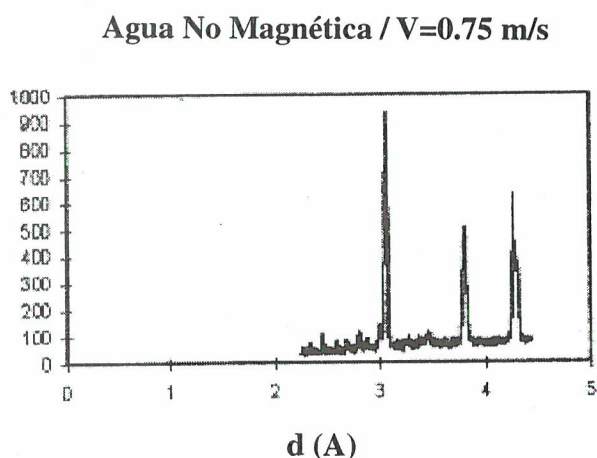
**Figura 4:** Variación del factor de turbiedad obtenida en una muestra de agua sin tratamiento magnético.

Cabe anotar la influencia de la temperatura en el proceso de cristalización en general. En ambos casos experimentales descritos la temperatura se elevó lentamente desde 35°C hasta aproximadamente 75°C en el lapso de 2 horas, manteniéndose luego estable.

### C) Análisis de Rayos X

Los análisis de rayos X muestran en primer lugar una composición irregular de las muestras de agua empleadas (Agua de caño / UNI), variando éstas de fecha en fecha. El procedimiento usado para obtener muestras sólidas es evaporar un litro de agua en el lapso de 2 horas y luego recoger con un pincel el material sólido residual.

En la figura 5 se muestra el espectro de difracción de rayos X obtenida para una muestra no tratada magnéticamente (Residuo : 274 mg / 14.01.98). Los picos de difracción ocurrentes muestran la formación preferente de microcristales de: Sulfato de Calcio dihidratado (Yeso), en una pequeña proporción sulfato de Calcio monohidratado y trazas de Carbonato de calcio en la forma de Calcita.



**Figura 5:** Espectro de Difracción de muestras sólidas producidas en agua sin tratamiento magnético (14.01.98). E. Rivas /Uni. Campinas/

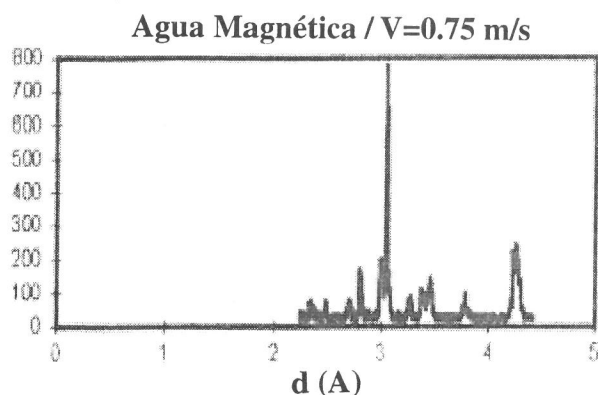


Figura 6: Espectro de Difracción de muestras sólidas producidas en agua con tratamiento magnético (14.01.98). E. Rivas /Uni. Campinas/

El análisis correspondiente de rayos X en las muestras resultantes (Residuo : 407 mg) del tratamiento magnético ( $V = 0.75$  m/s) se muestra en la figura 6. Las líneas de difracción ocurrientes denotan nuevamente la presencia de microcristales de Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de igual modo se detecta  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  en una mayor proporción que en el caso no magnético y en una proporción significativa Carbonato de Calcio en la forma de Aragonita.

De donde se puede concluir que el efecto del campo magnético fué el de inducir otros tipos de

microcristalización, los que como se demostró anteriormente, se originan en la solución misma y no en las paredes del recipiente, como si ocurre con agua no tratada magnéticamente.

En general el tipo de microcristales generados a partir del campo magnético, va a depender fuertemente de las constituyentes originales del agua dura y de los parámetros del tratamiento magnético.

#### D) Análisis de Adherencia

Dos muestras de agua de 1 Lt. cada una, una de ellas sometida a tratamiento magnético por el lapso de 15 minutos, son sometidas a calentamiento y evaporadas por completo en un recipiente Pyrex, produciéndose así dos tipos de cristalización, uno que se adhiere a la pared del vidrio (en la muestra no tratada) y otro que se encuentra suspendido en el líquido mismo y que al consumirse el agua se deposita en el piso del recipiente.

Este último residuo es recolectado con un pincel y pesado. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 1.

Las muestras tratadas magnéticamente presentan en

Tabla 1 : Residuos Sólidos precipitados (no adheridos)

Muestra	Final/Mag	Final/No Mag	Tratamiento	Tiempo	Velocidad
01	384 mg	194 mg	100 C	47.5 h	0.75 m/s
02	574 mg	224 mg	100/80 C	1.7 / 72 h	0.75
03	407 mg	275 mg	80 C	117 h	0.75
04	380 mg	322 mg	100	22 h	0.75
05	443 mg	332 mg	100/100	2.25/12h	0.75
06	301 mg	250 mg	100	24 h	0.75
07	364 mg	261 mg	100	49 h	0.75
08	337.7 mg	228.56 mg	80	117 h	3.00
09	335.3 mg	228.61 mg	80	117 h	3.00
10	276.8 mg	130.98 mg	100	8 h	3.00

\* Las muestras son calentadas en distintos grados (Tratamiento) durante cierto lapso de tiempo (Tiempo) hasta que se consuma el agua.

todos los casos un mayor contenido de residuos sólidos que no se adhieren al recipiente. Como la dureza promedio es una constante del orden de 500 ppm. se comprueba que los residuos sólidos del agua no tratada magnéticamente se adhiere preferentemente a las paredes del recipiente, mientras que los sólidos residuales del agua tratada magnéticamente se depositan en el recipiente mayormente como un polvillo al evaporarse el agua por completo. Las mayores diferencias se observan para evaporaciones lentas del orden 100 horas.

Dependiendo de las condiciones experimentales, se puede lograr cerca de un 100% de efectividad en la acción del campo magnético sobre el agua dura, reduciendo las componentes sólidas a un fino polvillo "no incrustado".

#### E) Análisis de dureza y solución iónica

Tomando como base 2 litros de agua (Agua corriente / UNI), de los cuales 1Lt se toma como referencia (No Magnética) y el otro litro se trata magnéticamente (Mag) en las condiciones experimentales : 15 minutos,  $v = 0.75$  m/s, ambos sin tratamiento térmico son analizados químicamente, mostrándose en la Tabla 2 el análisis respectivo. La dureza total no es afectada por el campo magnético. En el caso de aplicarse el campo magnético a fluidos de baja velocidad el único efecto notorio es la relativa baja concentración de iones  $\text{SO}_4^{2-}$ .

El efecto del campo magnético, en agua tratada térmicamente no produce una mayor diferencia con respecto al agua no tratada magnéticamente, en lo que respecta al efecto total. En la tabla 3 se muestra los resultados químicos obtenidos en muestras que partiendo de un litro se mantuvieron hirviendo (100° C) por tres horas, reduciéndose el líquido a cerca de 1/4 de litro. En este lapso de tiempo se puede considerar que el efecto de cristalización fué casi total.

**Tabla 2:** Análisis de dureza comparativa sin tratamiento térmico.

Parámetros	Muestra / No Mag.	Muestra / Mag.
pH	7.6	7.6
Conductividad/mmhos/cm	1160	1170
Iones $\text{SO}_4^{2-}$ / mg/Lt	172	157
Iones $\text{CO}_3^{2-}$ / mg/Lt	17.9	17.9
Iones $\text{HCO}_3^-$ /mg/Lt	97.6	97.6
Iones $\text{Cl}^-$ / mg/Lt	53	54.4
Dureza total $\text{CaCO}_3$ / mg/Lt	580.5	576.7

**Tabla 3:** Análisis de dureza comparativa con tratamiento térmico

Parámetros	Muestra / No Mag.	Muestra / Mag.
pH	7,7	7.6
Conductividad/mmhos/cm	1210	1190
Iones $\text{SO}_4^{2-}$ / mg/Lt	464,7	384,6
Iones $\text{CO}_3^{2-}$ / mg/Lt	3,5	3,5
Iones $\text{HCO}_3^-$ /mg/Lt	24,5	21,1
Iones $\text{Cl}^-$ / mg/Lt	154,4	150,3
Dureza total $\text{CaCO}_3$ / mg/Lt	442,8	435,3

El efecto del tratamiento térmico, sin tener en cuenta el efecto del campo magnético, es de aumentar la concentración de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ , disminuyendo a la vez las concentraciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , favoreciendo así la formación de Carbonatos.

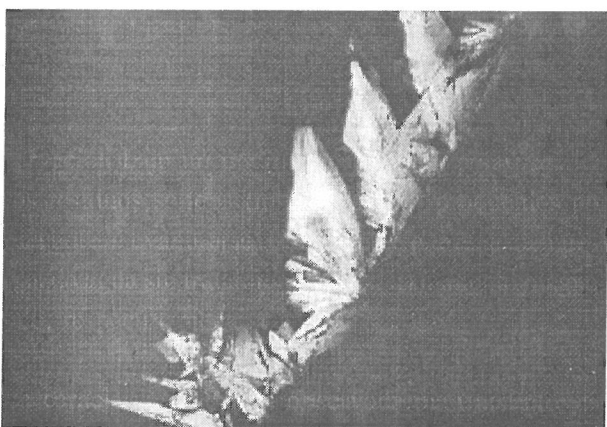
#### F) Observaciones cristalográficas con luz polarizada

##### F.1 Experiencias con agua corriente

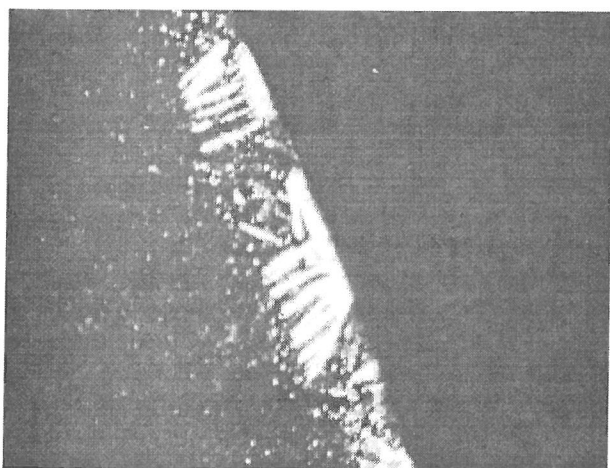
El Método de observación Cristalográfica con luz polarizada es hasta ahora, un buen indicador visual del efecto magnético en las propiedades de cristalización de las impurezas del agua. Los resultados a exponer se obtuvieron para una velocidad del flujo del orden de 3 m/s .El procedimiento seguido se basó en la ob-

servación bajo un microscopio de luz polarizada de los residuos sólidos (microcristales) producidos por una gota al evaporarse. Las gotas se extraían de muestras de agua sin tratamiento y con tratamiento magnético, respectivamente.

La característica básica observada para distintos tipos de agua (distintas fuentes) fue el siguiente: en el caso de agua "corriente" no tratada magnéticamente la formación de centros de cristalización se efectuó a partir de los bordes de la gota, produciéndose así formaciones cristalográficas policristalinas de gran tamaño, adheridos fuertemente al sustrato (vidrio) (Crecimiento monolítico / Figura 7).



**Figura 7.** : Toma microscópica ( Luz polarizada) de microcristales que crecen al borde de una gota de agua "corriente" **no tratada magnéticamente**.



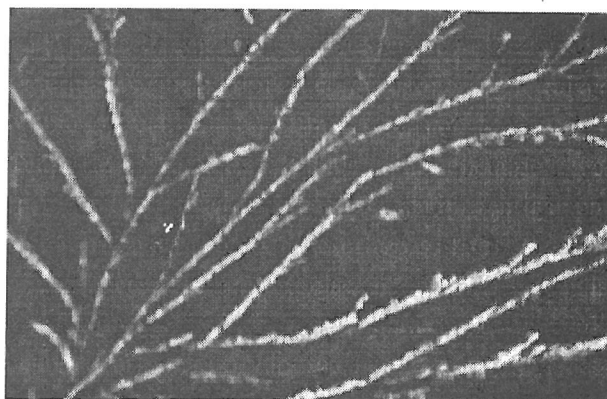
**Figura 8.** : Toma microscópica ( Luz polarizada) de microcristales que se agrupan al borde de una gota de agua **tratada magnéticamente**.

En el caso de agua "corriente" tratada magnéticamente el proceso de cristalización es diferente, los microcristales se van a formar en la misma solución, agrupándose luego por convección en los linderos de la gota. Los microcristales individuales se agrupan así de manera suelta, en forma de palitos, sin adhesión al sustrato o enlace entre ellas (monocristales cilíndricos / Figura 8), los cuales al secarse completamente la gota, pueden ser removidos fácilmente con un pincel.

## F.2 Experiencias con soluciones acuosas puras

En general, la Cristalización resultante va depender tanto de la composición de las Impurezas contenidas en la respectiva muestra de agua, como del tratamiento térmico a que es sometida. Actualmente un trabajo en curso, realizada en el marco de una Maestría en Física (Mery Zavaleta), analiza la influencia del efecto magnético en soluciones acuosas puras, así por ejemplo, como avance de ese trabajo /Ref 7/, en la figura 9 se presenta, el resultado de la microcristalización de iones de carbonato de calcio en agua destilada, con tratamiento magnético (Muestra MZM101) y para efectos de comparación en la figura 10 el resultado equivalente obtenido en agua no tratada magnéticamente (MZ101).

Como es de observar, en el caso magnético la tendencia es formar redes filiformes independientes (suspendidas), a diferencia de la estructura que crece en el caso no magnético, aglomerados cuasiplanos que se adhieren fuertemente al sustrato.



**Figura 9.** : Toma microscópica ( Luz polarizada) de microcristales de Carbonato de calcio formados en agua destilada **tratada magnéticamente** /Ref 7/



*Figura 10: Toma microscópica (Luz polarizada) de microcristales de Carbonato de calcio formados en agua destilada sin tratamiento magnético [Ref 7].*

### CONCLUSIONES

En este trabajo se demuestra, primeramente, la efectividad del tratamiento magnético en la prevención de incrustaciones y del otro lado, se ponen en practica técnicas experimentales que cuantifican el efecto, permitiendo optimizarlo.

Las observaciones del factor de turbiedad en agua tratada magnéticamente coinciden a las reportadas en la referencia /6/ por Wang et al. Las observaciones cristalográficas con el microscopio de Luz polarizada coinciden en gran medida con las mediciones efectuadas por Kronenberg /5/.

En la Literatura se reporta tanto experiencias positivas, como resultados negativos de aplicación de esta técnica, lo cual se debe, mayormente, a las condiciones específicas en que se debe realizar el tratamiento magnético, las que dependen críticamente del campo aplicado. Esta condiciones optimas de operación deberían ser especificadas claramente por el fabricante de equipos de esta tecnología, lo que en la practica no se cumple, por lo que el usuario de esta tecnología debería tener este hecho presente.

De otro lado, en la literatura actual se reporta cada vez en mayor grado, diversas aplicaciones novedosas

del tratamiento magnético en múltiples campos, por ejemplo: agricultura, medicina, veterinaria; lo cual es un indicador del futuro prometedor de esta tecnología.

### RECONOCIMIENTO

Este trabajo fué llevado a cabo gracias a la colaboración de la Empresa **SELAGA**, que puso a disposición del Laboratorio, diversos dispositivos Magnéticos para su respectiva evaluación.

### REFERENCIAS

- /1/ **Eaton, Andrew. Clesceri, Leonore. Greenberg, Arnold** "Standard Methods for the examination of Water and Wastewater" American Public Health Association. Ed. Manayin, M.A. Franson, H. 19 th ed. N.Y. 1995
- /2/ **Vermeiren, Theo.** "Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention". Corrosion Technol, Julio, 215-219, 1958.
- /3/ **Gehr, Ronald et al.** "Reduction of soluble mineral concentrations in CaSO<sub>4</sub> saturated water using a magnetic field" Wat. Res. Vol. 29, No. 3, pp. 933-940, 1995
- /4/ **Baker, John and Judd, Simon.** "Magnetic amelioration of scale formation" Wat. Res. Vol 30, No. 2, pp. 247-260, 1996
- /5/ **Kronenberg, Klaus.** "Experimental evidence for effects of magnetic fields on moving water" IEEE Trans. Magn. Mag-21, 2059-2061, 1985
- /6/ **Wang, Y. et al.** "Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field" Wat. Res. Vol 31, No. 2, pp. 346-350, 1997
- /7/ **Zavaleta, Mery.** "Efectos de Cristalización inducidos por el tratamiento magnético de agua" Reporte Interno, Lab. de Optica / UNI, Abril 1998