

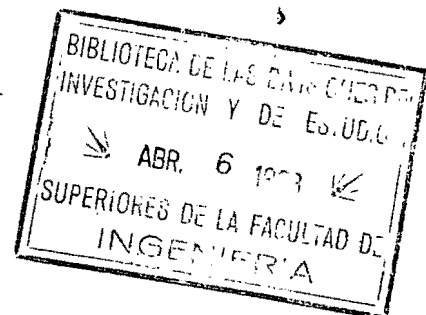
0467



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

NEUTRALIZACION Y PRECIPITACION DE COLOIDES DE COLOR,  
DE LAS AGUAS DE LA PRESA "EL JIHUITE"

DE TEPATITLAN, JAL.



Tesis en opción al grado de  
MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL  
(Ingeniería Sanitaria)

PRESENTADA POR EL

ING. GASTON MENDOZA GAMEZ

MEXICO, D.F.,

1968



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS  
SUPERIORES

OF. 985/67-73 CU

Ing. Gastón Mendoza Gámez  
P r e s e n t e

En atención a su solicitud relativa, me es gra-  
to transcribir a usted el tema, que ratificado por esta  
Dirección propone el Ing. Francisco Montejano Uranga  
para que lo desarrolle como tesis en su exámen para -  
maestro en Ingeniería Civil (Ingeniería Sanitaria).

Título de la Tesis:

"NEUTRALIZACION Y PRECIPITACION DE COLOIDES DE  
COLOR, DE LAS AGUAS DE LA PRESA "EL JIHUITE"  
DE TEPATITLAN, JALISCO"

Al mismo tiempo hago de su conocimiento que deberán en-  
tregarse 3 copias de la tesis a la Secretaría de esta -  
División.

Acentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D. F., 10. diciembre, 1967  
JEFE DE LA DIVISION

DR. JUAN CASTILLÁS G. DE L.

- P R O L O G O -

El presente trabajo tiene por objeto hacer resaltar la importancia que tiene el planteamiento de pruebas de coagulación de aguas que se van a destinar a un abastecimiento

y que, por su naturaleza requieran de un proceso de potabilización.

Estas pruebas denominadas "de jarras", son una herramienta de valor inestimable para establecer racionalmente el tipo y diseño de las unidades de una planta potabilizadora.

Se ejemplifica con las aguas superficiales de la Presa "El Jihuite" que abastecen a la población de Tepatitlán, Jal., y que tienen características en sus contenidos de color y hierro principalmente, que las hace indeseables para su consumo. Aunque se tiene instalada y operando una planta potabilizadora en dicha población, el autor llevó a cabo este trabajo con miras de establecer también cierta secuela en los estudios de coagulación de aguas difíciles de tratar.

Se hicieron 180 pruebas de coagulación con porciones de 1 litro, de muestras tomadas entre los meses de septiembre y noviembre de 1967, realizándose como complemento, a ocho de los mejores resultados, pruebas de su agresividad al carbonato de

calcio y a la cal hidratada, con análisis teórico y práctico de las medidas correctivas.

Cabe mencionar que estos estudios de coagulación conviene refinarlos con fines de investigación más exhaustiva, ampliando el plan de pruebas y efectuando estudios de electroforesis para determinar la movilidad de las partículas coloidales que originan el color y turbiedad de las aguas naturales.

Se quiere dejar constancia de que este trabajo fue posible gracias a la amplia colaboración de la División de Estudios Superiores, del Departamento de Ingeniería Sanitaria y de la Gerencia de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en el estado de Jalisco; y en particular a la valiosa dirección del M en C Francisco Montejano Uranga.

Enero de 1968

México, D.F.

## I.- INTRODUCCION

### 1.- La necesidad de estudios de coagulación como base del proyecto y operación de las plantas potabilizadoras.

Teniéndose en la actualidad enfocado el problema "abastecimiento de agua potable" con miras de solucionar un aspecto otrora largamente descuidado, es de suma importancia para el ingeniero sanitario, practicar ciertas disciplinas que forman parte de la solución racional que se le dé a este problema.

Ideal sería contar en todos los casos con aguas de calidad satisfactoria para un abastecimiento, en que se financiarían las obras de captación, conducción, regularización y distribución, que aunque requieran de una fuerte inversión, los costos de operación y mantenimiento no son, por lo general, tan altos como aquellos requeridos cuando hay necesidad de potabilizar las aguas. Como esto último sucede con frecuencia, es elemental que en cada caso particular, se estudie exhaustivamente el tratamiento óptimo que deba darse a las aguas, con fines de proyectar, construir y operar una planta, que satisfaga desde los puntos de vista sanitario y económico el problema.

En el mejor de los casos habrá necesidad solamente de desinfectar las aguas, pero en una gran mayoría requerirán de un tratamiento más completo.

En todos los países se busca solucionar los abastecimientos a base principalmente de los recursos de aguas superficiales, los que tienen características, en cuanto a su calidad física y bacteriológica, objetables para el consumo, por lo que siempre se deberán potabilizar. Salvo casos particulares en que los valores de turbiedad y color se mantienen bajo ciertos límites, que hacen factible el tratamiento por medio de filtros lentos de arena, se requerirá en la mayoría de los casos, de un proceso de clarificación por medio de coagulantes, seguido de filtración rápida y desinfección.

Cuando esto último sea el caso, es necesario planear con antelación una serie de pruebas de coagulación con miras a obtener resultados óptimos en cuanto a tipos, dosis y orden de aplicación de los productos químicos requeridos y el pH de tratamiento, que serán base para iniciar un anteproyecto de planta potabilizadora. Asimismo, estas pruebas serán muy valiosas para mejorar la eficiencia de una planta en operación, lo que redundará en una economía del proceso.

En este trabajo se realizan una serie de pruebas de coagulación con fin de fijar el proceso para neutralizar y precipitar los coloides de color de un agua.

## II.- GENERALIDADES SOBRE COAGULACION

### 1.- El color en las aguas. Naturaleza. Tratamiento

El color orgánico es un constituyente común de la mayoría de las aguas naturales, principalmente en aguas superficiales blandas, de baja alcalinidad y por tanto, de baja capacidad amortiguadora.

Las sustancias que causan el color en las aguas no son dañinas ni tóxicas a los consumidores, pero por razones estéticas y psicológicas el color debe reducirse; por otra parte se consideran otros aspectos negativos como la interferencia a la cloración, con la posibilidad de inducirse el desarrollo de bacterias al actuar las sustancias como nutrientes; y a que en la mayoría de los casos, éstas aguas tienden a mantener el hierro y el manganeso en solución.

Las normas de calidad de agua potable recomiendan una concentración máxima de 20 en la escala platino-cobalto.

#### Naturaleza

En la actualidad aún no se define completamente la estructura química de las sustancias que originan el color. Se acepta que las sustancias son de naturaleza coloidal y con carga de superficie negativa, como señalaron Gouy y Stern en su teoría de

la doble capa difusa (17). El origen orgánico lo supuso Behrman (5) cuando la DBO de un agua natural cuyo color se había removido previamente por coagulación, era significativamente menor que antes de la remoción.

En 1957 Shapiro (10) hizo un estudio cromatográfico en muestras de nueve lagos en los E. U., concluyendo que el color orgánico se debía principalmente a ácidos alifáticos de cadena hidróxido dicarboxílica de un peso molecular promedio de 456 y un peso equivalente de 228, y que no contenían estructuras fenólicas. Por otra parte Black y Christman (10) señalan que el color es debido a ácidos aromáticos polihidróxidos metoxicarboxílicos. Packham y Christman (10) en sus investigaciones de los componentes orgánicos de color han registrado fracciones de ácidos fúlvico, himatomelánico y húmico, teniendo el primero un contenido de 75 a 85% por peso.

Esta diversidad de teorías hace más complejo el establecimiento de un proceso de tratamiento partiendo de la estructura química de los coloides, por lo que a la fecha el proceso más indicado en cada caso se determina por medio de pruebas de coagulación, con base a las experiencias de muchos años.

#### Tratamiento

El proceso establecido y que ha probado su bondad es la -



coagulación con sales de aluminio o hierro a fin de reducir el potencial zeta de los coloides hidrofóbicos que varía de -15 a -25 mv, a un valor de  $\pm 5$  mv que permita actuar a las fuerzas de Van der Waals para producir coalescencia de las partículas y su remoción por sedimentación. El pH de tratamiento es variable en cada caso, y dependerá de la concentración de otros constituyentes. Por lo general, se han obtenido buenos resultados coagulando a un pH entre 5.2 y 5.7, aunque se han coagulado aguas con sulfato férrico a pH de 4.0. En presencia de hierro el pH óptimo aumenta en algunos casos.

Como la mayoría de las aguas son blandas se puede producir la neutralización de cargas a pH cercano al óptimo, sin alcalinizar las aguas, dejando la acción al poder de los iones trivalentes de aluminio o hierro.

Las aguas coloreadas en presencia de turbiedad no se pueden coagular a pH bajos, debido a que las arcillas coloidales para neutralizar su carga, se deben llevar a un pH de 7.5 aproximadamente.

Aquellas aguas superficiales con cierta dureza cálcica han mostrado una tendencia a la autopurificación, debido a la acción del ión divalente Ca sobre la doble capa del coloide.

En las pruebas de coagulación se deben controlar dos conceptos: la dosis de productos químicos y el pH de óptima coagulación. Para cada agua, se tendrá un pH óptimo que estará afectado por el pH de neutralización de las partículas y por el pH de mejor coagulación del producto químico empleado.

Las recientes investigaciones vienen probando, que aunque los resultados de coagulación proporcionan datos para fijar el tipo de tratamiento, las dosis de productos químicos y el pH de coagulaciones, es necesario desarrollar mejores métodos de control en la dosificación de productos, y así ampliar la eficiencia en el uso de los mismos. En estos trabajos continuos se recomienda determinar los cambios del potencial zeta a los efectos de los coagulantes.

El potencial zeta de los coloides se determina por la velocidad a la cual atraviesan un campo eléctrico con un voltaje específico. Esta velocidad se conoce como "movilidad electroforética" y puede determinarse por observación con un microscopio en una celda de electroforesis. La movilidad se expresa por la ecuación:

$$\Omega = \frac{d X}{t I R_s} \quad , \text{ en donde:}$$

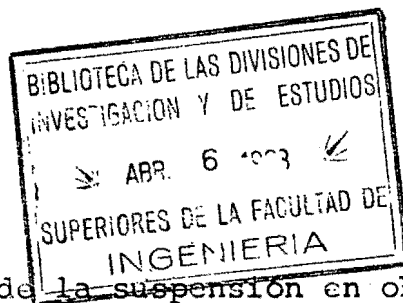
$d$  = distancia del campo delimitado, a una amplificación cada

$X$  = sección transversal de la celda, en  $\text{cm}^2$

$t$  = tiempo, en seg

$I$  = corriente, en amperes

$R_s$  = resistencia específica de la suspensión en ohm/cm



Los resultados experimentales se expresan en velocidad por unidad de potencia del campo, micrones/seg/volt/cm, dándose los signos (+) y (-) según la migración de partículas.

Como el potencial zeta es proporcional a la movilidad electroforética y no teniéndose cambios importantes en la viscosidad y la constante dieléctrica, se puede dar un valor aproximado para el potencial zeta, expresado en milivolts, multiplicando el valor de la movilidad por 13.

Resultados de experiencias con diversas aguas:

La remoción de color por coagulación con sulfato de aluminio se efectúa mejor con un potencial neutro ( 5 )

La remoción de color por coagulación con sulfato férrico se efectúa mejor con un potencial ligeramente positivo ( 3 )

La remoción de turbiedad en la mayoría de los casos, se efectúa mejor con la regresión del potencial zeta a valores negativos ( 6 ).

## 2.- Mecanismos de coagulación. Coagulación electrocinética y ortocinética. Características de los coagulantes. Especificaciones.

Aceptada la teoría física de la doble capa eléctrica de los coloides producida por su capacidad selectiva y de adsorción de -

iones sobre su superficie, los investigadores se han preocupado por esclarecer la forma en que actúa el coagulante agregado sobre la doble capa para desestabilizar la carga, producir coalescencia, y por ende precipitación.

Miller ( 5 ) asentó en sus estudios que la clarificación de aguas coloreadas se debía directamente a la acción trivalente de los iones de aluminio sobre la carga negativa del coloi- de, para neutralizarla y provocar su aglomeración. Señalaba que la hidrólisis del aluminio no tenía efecto en la desestabilización y que por el contrario era antagónico a la formación del flóculo de color.

Esta teoría se ha superado en la actualidad con la investigación tan amplia en este campo, estableciéndose que los hidratos de aluminio y hierro tienen acción predominante en la coagulación.

En coagulación de aguas coloreadas con valores bajos de alcalinidad 20 a 40 ppm, se han tenido óptimas remociones a pH 5.5 a 6.0, o sea que ha actuado primordialmente el sol hidrato del metal, mientras que aguas coloreadas, coaguladas a pH francamente ácido la coagulación ha sido pobre, temiéndose una acción baja de los iones trivalentes de aluminio o hierro.

Aguas coloreadas con hierro en solución coagulan mejor a pH cercano al neutro, temiéndose acción hidrolítica en la coagulación.

Langelier ( 14 ) comprobó en sus experiencias con aguas turbias preparadas con arcillas de diferente capacidad de intercambio, que podrían tenerse tanto la acción hidrolítica del coagulante como la acción de permutación de los iones trivalentes sobre la carga de los coloides, o sea, que en presencia de alcalinidad, pH mayor de 4.5, había una acción predominante del metal hidratado, y en las pruebas en que el valor del pH era tal que el sol no se producía, se tenía acción de permutación.

En sus pruebas comprobó que después de una zona de buena coagulación venía una zona de pobre coagulación al aumentar la dosis, retornándose a una zona de buena coagulación, al continuar incrementando las dosis y el pH.

Esto demostraba que las aguas turbias podrían tener un comportamiento hacia las dos acciones.

En estos estudios en que se empleaba exceso de coagulante, el aluminio que no entraba en las reacciones se neutralizaba con el exceso de aniones del mismo coagulante. En la actualidad se emplea mucho para esta neutralización los co-coagulantes como la sílice activada o los polielectrolitos aniónicos.

Más recientemente, Black y Hannah ( 6 ) en estudios de aguas turbias preparadas con arcillas como la Kaolinita 4, tierra de Fuller y Montmorilonita 23, y variando las dosis de sulfato de -

aluminio y el pH, encontraron que la mejor remoción de turbiedad ocurría entre pH 7.5 y 8.75, en una zona de movilidad de partículas con carga negativa, y no en el punto isoeléctrico de los coloides, constatando también una zona de pobre coagulación antes de la regresión de carga positiva a negativa. A valores mayores de 8.75 la coagulación vuelve a ser pobre por la característica anfotérica del hidróxido de aluminio. A pH 4.5 a 5.0, en que no se forma el hidrato de aluminio, la acción del ión trivalente neutraliza el coloide, removiéndose la turbiedad a valores no tan buenos como los que se tienen a pH 7.5 a 8.75.

#### Coagulación electrocinética y ortocinética

Basándose en tantas experiencias se puede resumir, que al agregar una sal de aluminio o hierro a un agua coloreada, cuya alcalinidad natural o agregada, es suficiente para producir un pH en que se tenga la hidrólisis de dichas sales; estos hidratos cargados positivamente reducirán o neutralizarán la carga negativa de las partículas coloidales, produciéndose lo que se denomina coagulación electrocinética o primaria. Esta coagulación se optimiza, al agregar y distribuir uniformemente el coagulante en toda la masa de agua en forma instantánea, para lo cual se requiere un exceso de la sal y una mezcla rápida en un tanque con el menor volumen posible.

La coagulación secundaria u ortocinética, tiene lugar cuando estos micelios primarios se van aglomerando, con o sin ayuda de co-coagulantes, para formar el "flóculo".

Este se promueve poniendo en contacto los núcleos por medio de agitación lenta. A medida que los flóculos crecen y estén propensos a efectos cortantes es recomendable que la razón de agitación de los micelios decrezca gradualmente (12).

Por el contrario, en la coagulación de aguas turbias se tienen dos tipos de interacción simultánea.

La primera es la adsorción de los iones trivalentes en la estructura de las arcillas por permutación, resultando una reducción del potencial zeta negativo. La segunda interacción consiste en una ulterior reducción del potencial zeta por los hidratos positivos del coagulante. El resultado es una zona de pobre coagulación electrocinética en la gama ácida (coloides ligeramente negativos). Al aumentar las dosis de coagulantes a valores mayores que la capacidad de intercambio de las arcillas, el potencial zeta regresa de negativo a positivo en una gama amplia de pH, de acuerdo a lo experimentado por Langelier y Black, con un resultado pobre en coagulación. A medida que el pH se incrementa, las partículas se vuelven más negativas, y los hidratos metálicos actúan como aglomerante de las partículas finas, produciéndose la coagulación orto-

cinética. O sea, que la coagulación ortocinética es predominante en la remoción de turbiedad, y la coagulación electrocinética en la remoción de color.

Aún con estas experiencias, se debe ensayar con cada agua en particular, cuál de las acciones es la predominante, y dentro de ellas ver si actúa mejor el ión trivalente metálico, o el hidrato formado con la alcalinidad natural o agregada.

### Coagulantes

Las sales de aluminio y hierro en solución requieren una zona de pH dentro de la cual los hidratos formados sean insolubles. Dentro de la zona existe un punto llamado iso-eléctrico en donde se tiene la más baja velocidad o carga del hidrato.

En la mayoría de las aguas este punto isoeléctrico no coincide con el punto isoeléctrico de los coloides, como ya se vió al principio de este apartado, teniéndose para las sales de aluminio un pH de 5.0 a 7.0 aproximadamente, para una óptima insolubilidad del hidróxido de aluminio, lo que hace limitativo su empleo para aquellas aguas, en que el pH de coagulación caiga en estos valores. Por el contrario, para las sales de hierro, se tienen gamas de pH diferentes, por ejemplo, para las sales ferrosas, el pH de óptima insolubilidad del hidróxido es entre 8.5 y 11.0; requiriéndose agregar cal para alcanzarlo, teniéndose una reacción



con el oxígeno disuelto del agua para formar el hidróxido férrico que es insoluble.

Las sales férricas, producen directamente el hidróxido férrico sin necesidad de oxidación. La zona de pH de óptima insolubilidad es entre 3.5 y 13, existiendo una zona entre 6.5 y 8.5 en que la precipitación se efectúa en forma más lenta y a veces incompleta.

Comercialmente es más difundido el sulfato de aluminio y es de la preferencia de la mayoría de los ingenieros que trabajan en este campo; sin embargo, vuelve a insistirse, será necesario en cada caso seleccionar mediante pruebas de coagulación, el tipo de coagulante por emplear.

#### Especificaciones de los coagulantes

Se dan las especificaciones de los coagulantes más empleados.

#### Sulfato de aluminio

La sal comercial corresponde a la fórmula:  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ . Se produce en forma sólida o líquida. El tipo sólido suministrado en terrones debe tener una granulometría comprendida entre 13 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) y 75 mm (3" ) y el suministrado en granos no menos de un 90% debe pasar por la malla No. 10 y el 100% debe pasar la malla No. 4 según Normas del National Bureau of Standards.

El tipo sólido debe contener no menos del 17% de alúmina soluble y disponible ( $Al_2O_3$ ), y no debe contener materia insoluble en más de 0.5%.

El tipo líquido debe contener no menos del 8% de alúmina y no más de 0.2% de materia insoluble.

### Sulfato férrico

La sal comercial corresponde a la fórmula:  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 3H_2O$ . Se produce en forma granular, forma anhidra, con un contenido entre 90 y 94% de  $Fe_2(SO_4)_3$  y no menos del 60% para la forma cristalina. El contenido de ión férrico debe ser entre 25 y 26%.

La sal seca es muy higroscópica, requiriendo almacenarse en bolsas de papel herméticas, particularmente en atmósferas húmedas.

### 3.- Co-coagulantes. Comportamiento

Se denominan co-coagulantes a todas aquellas sustancias que ayudan en el proceso de coagulación, actuando en tres formas:

- a) Acelerando la reacción, realizándose la coagulación en un tiempo corto.
- b) Haciendo más pesado el flóculo precipitado, mejorando su remoción.
- c) Precipitando directamente los coloides al crear una liga entre ellos (precipitación mutua).

Los co-coagulantes pueden actuar en una o más de las formas.

Como ejemplos de sustancias co-coagulantes se tienen:

Lodos precipitados que se recirculan, método empleado ampliamente en procesos de ablandamiento por cal-carbonato de sodio. El lodo actúa principalmente como un catalizador, produciéndose flóculos grandes.

La bentonita o arcilla coloidal que proporciona peso al flóculo de la coagulación en las épocas de estiaje en que las aguas por su baja concentración coloidal son difíciles de coagular, influyendo la capacidad de permutación de las arcillas.

El silicato de sodio activado con ácido sulfúrico, sulfato de amonio, bicarbonato de sodio, anhídrido carbónico o cloro, es uno de los co-coagulantes más generalizados.

El Ing. Baylis empleó por primera vez el silicato activado con ácido sulfúrico en la planta del Distrito Sur de Chicago, a fin de producir un flóculo más pesado y durable que sedimentara y evitara con esto, el paso de materia floculenta a través de los lechos filtrantes, como se provocaba antes de emplearla.

En la mayoría de las aguas poco mineralizadas se puede utilizar, ayudando a crear un flóculo pesado con las partículas neutralizadas.

El gel de sílice tiene su punto isoeléctrico a un pH entre 3 y 4, ionizándose a valores de pH neutro, en donde tiene una -

carga fuertemente negativa. En esta condición atrae al sol del coagulante que tiene un punto isoeléctrico más alto, produciéndose la coalescencia.

En algunas de las plantas en donde se ha empleado la sílice, se ha comprobado un ahorro del coagulante y del producto químico empleado para producir alcalinidad o para estabilizar las aguas coaguladas v.g. cal hidratada y bicarbonato de sodio.

En tres plantas potabilizadoras de México se viene empleando la sílice activada con cloro. Esta activación es ventajosa ya que se aprovecha una instalación que cualquier planta tiene con fines de desinfección.

Los polielectrolitos son sustancias orgánicas sintéticas, por lo general polímeros con grandes pesos moleculares variando hasta 25 000. Tienen características semejantes a las de los simples electrolitos en lo referente a cargas eléctricas o grupos ionizables. Se utilizan en la coagulación ya sea solos o como un co-coagulante para mejorar el proceso.

Los polielectrolitos se dividen en: catiónicos, no-iónicos y aniónicos. Los primeros adsorben las partículas coloidales negativas por su atracción electrostática; los segundos adsorben y flocculan al producirse una cadena por medio del hidrógeno entre las superficies sólidas y los grupos polares de los polímeros; en los terceros la repulsión electrostática tiene un papel

principal en la acción de floculación, teniéndose tres posibles mecanismos para la coagulación; (a) desplazamiento de los grupos aniónicos de las partículas coloidales por grupos aniónicos del polímero; (b) enlace entre el sólido y el polímero por medio de hidrógeno; y (c) la creación de enlaces electrostáticos entre el coloide y el polímero por medio de cationes polivalentes.

Los polímeros se deben aplicar aproximadamente tres minutos después de agregado el coagulante. El propósito de este intervalo es permitir primero la formación de microflóculos, para que el polímero pueda ligarse a ellos.

#### 4.- Estabilización de las aguas clarificadas

De acuerdo a lo establecido en el apartado (2), las aguas después de clarificadas quedan con valores bajos o nulos de alcalinidad; existiendo un desequilibrio químico entre las concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}^+$  y  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , propiciado principalmente por exceso de  $\text{CO}_2$ .

La estabilización química se realiza con miras de ajustar el pH y la alcalinidad de un agua a un valor tal, que no deposite ni disuelva  $\text{CaCO}_3$ .

Langelier desarrolló unas ecuaciones de las cuales obtuvo la expresión del pH en equilibrio con  $\text{CaCO}_3$ :

$$\text{pH}_s = \log \frac{Ks'}{K_2'} - \log [\text{Ca}^{++}] - \log [\text{Alc}] + 6.301 + 2.5 S \quad (1)$$

en donde:

$\text{pH}_s$  = pH de saturación

$Ks'$  = producto de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , (Ver Fig. 3)

$K_2'$  = segunda constante de disociación del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (Ver Fig. 2)

$S$  = corrección por salinidad del agua,  $S = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}}$

$\mu$  = concentración iónica,  $\mu = 0.5 \sum_{i=1}^i C_i Z_i^2$  (Ver fig. 4)

$C_i$  = concentración molar de cada ión

$Z_i$  = magnitud de la carga del ión

6.301 = sumando obtenido al considerar los valores de los iones en miliequivalentes por litro.

Los paréntesis rectangulares significan concentraciones, teniéndose:

Actividad de un ión = concentración del ión x coef. de actividad (f)

$$\text{siendo } \log f_i = - 0.5 Z_i^2 S \quad (\text{Ver fig. 5})$$

Esta ecuación es válida para  $\text{pH} < 9$ , y nos dice que es el pH que tendría el agua si estuviera en equilibrio con el contenido de  $\text{Ca}^{++}$  y alcalinidad. En el caso de un agua agresiva cuyo pH de equilibrio se quiera alcanzar mediante el contacto con  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ , no puede usarse esta ecuación, debido a que las concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$  y alcalinidad y la concentración iónica no se mantienen constan

tes, y los valores que tendrían al alcanzarse el pH de equilibrio, no pueden determinarse previamente.

La ecuación es aplicable para encontrar el pH que alcanzaría un agua al eliminar el bióxido de carbono en exceso por aeración, proceso en que se mantienen constantes las concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$  y alcalinidad y la concentración iónica.

$$[\text{CO}_2]_{\text{exc}} = \frac{[\text{Alc}]}{2K_1'} \left( [\text{H}] - \frac{2K_2' [\text{Alc}] [\text{Ca}^{++}]}{4 \times 10^6 K_3'} \right) \text{-----} (2)$$

en donde  $K_1'$  = Primera constante de disociación del  $\text{H}_2\text{CO}_3$   
(Ver fig. 1)

La ecuación de Langelier es ampliamente utilizada para medir el grado de estabilidad de un agua, que se denomina índice de saturación, y que es igual a la diferencia entre el pH medido del agua y el  $\text{pH}_s$  calculado.

Para un valor del índice igual a cero, el agua está en equilibrio; para un valor positivo, el agua está sobresaturada de  $\text{CaCO}_3$  tendiendo a depositar éste; para un valor negativo, el agua tiene exceso de  $\text{CO}_2$  y tenderá a disolver  $\text{CaCO}_3$ .

A partir de las ecuaciones del estado de equilibrio del agua, el Ing. Mojmir Mach (15), resolvió el problema de la cuantificación de las concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$  y alcalinidad y la concentración iónica, requeridas para alcanzar el pH de equilibrio de un agua agresiva al ponerla en contacto con  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Ecuaciones:

$$\text{Para } \text{pH} > 5: [\text{Ca}^{++}] = \frac{(\mu - A) + \sqrt{(\mu - A)^2 - 12 \cdot K_3' s}}{6} \text{-----} (3)$$

$$\text{Para pH} < 9: [\text{Ca}^{++}] = \frac{1}{3} (\mu - A) \text{ ----- (3)}$$

$$\text{siendo } A = 3 [\text{cat}^{++}] + [\text{cat}^+] + [\text{An}^-]$$

$$[\text{CO}_3^{=}] = \frac{1}{2} \left[ (\mu - A) - \sqrt{(\mu - A)^2 - 12 K'_s} \right] \text{ ----- (4)}$$

$$\text{Para pH} > 5: [\text{HCO}_3^-] = \frac{1}{3} \left[ C - 2\mu + 4\sqrt{(\mu - A)^2 - 12 K'_s} \right] \text{ ----- (5)}$$

$$\text{Para pH} < 9: [\text{HCO}_3^-] = \frac{2}{3} (\mu - D) \text{ ----- (5')}$$

$$\text{en donde: } C = 12 [\text{cat}^{++}] + 5 [\text{cat}^+] - 4 [\text{An}^-] - 3 [\text{An}^-]$$

$$D = 4 [\text{An}^-] - \frac{1}{2} [\text{cat}^+] + \frac{3}{2} [\text{An}^-]$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \frac{4K'_2}{27K'_iK'_s} (\mu - A) (\mu - D)^2 \text{ ----- (6)}$$

$$\text{pH}_s = \log \frac{K'_s}{K'_2} - \log (\mu - A) - \log (\mu - D) + 2.5S \text{ ----- (7)}$$

Para un agua en equilibrio al ponerse en contacto con  $\text{CaCO}_3$ :

$$\frac{1}{2} [\text{HCO}_3^-] + [\text{H}_2\text{CO}_3] = \text{constante} \text{ ----- (8)}$$

Para un agua en equilibrio al ponerse en contacto con  $\text{Ca(OH)}_2$ :

$$[\text{CO}_3^{=}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{H}_2\text{CO}_3] = \text{constante} \text{ ----- (9)}$$

Para  $\text{pH} < 9$ , la curva de equilibrio es:

$$Y = \frac{1}{3} (\mu - D) + \frac{4K'_2}{27K'_iK'_s} (\mu - A) (\mu - D)^2 \text{ ----- (10)}$$

Estas ecuaciones nos permiten, a partir de los resultados obtenidos después de la clarificación, calcular las cantidades de  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Ca(OH)}_2$  necesarias para estabilizar químicamente al agua.



Normalmente la estabilización de aguas clarificadas se lleva a cabo con cal hidratada o cal viva, reactivos relativamente económicos, aumentando a la vez la alcalinidad y el contenido de calcio, necesarios dentro de los constituyentes de un agua potable.

Como protección adicional se viene utilizando en muchas plantas un polifosfato, generalmente exametofosfato de sodio  $\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6$ , que se dosifica ya sea antes de los filtros o a la salida de la planta. Este polifosfato evita incrustaciones al formar iones complejos con los iones calcio en exceso; y por otra, en caso de requerirse, actúa como un inhibidor previniendo corrosiones, al formar una película sobre las partes metálicas que toca, interrumpiendo así la serie de reacciones catalíticas que producen la corrosión.

III.- NEUTRALIZACION Y PRECIPITACION DE COLOIDES DE COLOR. APLICACION: AGUAS DE LA PRESA "EL JIHUITE" DE TEPATITLAN, JAL.

1.- Datos del sistema de agua de Tepatitlán, Jal. Calidad de las aguas.

Fuente de abastecimiento: Aguas superficiales de la presa "El Jihuite", localizado en el arroyo del mismo nombre a 9 Km aguas arriba de la población, con capacidad para aprovechamiento de 4.2 millones de m<sup>3</sup>, y una extracción máxima hasta ----- 120 lps.

La geología del vaso está constituida por roca ígnea formada por corrientes basálticas de color gris oscuro, que presentan fracturas verticales selladas por materiales piroplásticos arcillo arenoso de coloración rojiza.

La obra de toma está constituida por tres alimentaciones localizadas a diferente nivel, tres metros entre cada una, con capacidad de 120 lps.

Calidad de las aguas. (Ver Anexo No. 1)

Conducción: Tubería de asbesto-cemento de 400 y 300 mm  $\phi$ , longitud de 6780 m. Capacidad de 125 lps.

Planta potabilizadora: Situada a 1.5 Km al NW de la población, con capacidad actual de 80 lps, previéndose una capacidad futura de 160 lps.

Almacenamiento: Dos tanques superficiales de mampostería, de 1000 m<sup>3</sup> cada uno. Un tanque se localiza en la planta potabilizadora y alimenta a la zona alta de la población, el otro localizado a 1200 m al sur de la planta, que alimenta a la zona baja.

Distribución: Red constituida por 32.5 Km de tubería de asbesto-cemento con diámetros de 300, 250, 200, 100 y 75 mm. Dividida en una zona alta y una zona baja.

## 2.- Estudio de la neutralización y precipitación de los coloides de color.

### 2.1.- Planteamiento

El primer propósito de este trabajo es el de determinar mediante pruebas, cuál es el proceso más adecuado para potabilizar las aguas de la presa "El Jihuite", destacando de él las dosis óptimas de productos químicos y el pH más favorable para el tratamiento. En segundo lugar, se quiere dejar establecida, con fines académicos, una secuela tentativa a seguir en este tipo de pruebas.

Los análisis de las aguas nos indican que se trata de un agua altamente coloreada y baja turbiedad poco mineralizada, de baja capacidad amortiguadora; y con alto contenido de hierro.

## ANEXO I

Análisis fisico-químico promedio de muestras tomadas entre los meses de septiembre y noviembre de 1967

Turbiedad	-----	90 unidades
Color	-----	450 unidades
pH	-----	7.1
Sólidos totales	-----	274 ppm
Ca <sup>++</sup>	-----	7.2 ppm
Mg <sup>++</sup>	-----	5.8 ppm
HCO <sub>3</sub>	-----	49 ppm
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	-----	12 ppm
Cl	-----	8 ppm
Fe <sup>++</sup>	-----	2.4 ppm
Alcalinidad total como CaCO <sub>3</sub>	-----	40 ppm
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	-----	42 ppm
Nitrógeno amoniacal como N	-----	2 ppm
D.B.O <sub>5</sub>	-----	0.8 ppm
Conductancia específica	-----	130 $\mu\Omega/cm$

Esta calidad presupone plantear una serie de pruebas a fin de establecer el comportamiento de los coloides de color y de los iones ferrosos, a la coagulación con diferentes productos con o sin ayuda de co-coagulantes, estableciendo a la vez el pH de mejor coagulación. El tener tanto color como hierro, origina que el proceso no se podrá llevar a un pH francamente ácido requerido para la eliminación de color, como se señaló en los apartados (II.1) y (II.2); ya que la precipitación del hierro se hace normalmente dentro de una gama mucho más amplia, requiriéndose entonces de las pruebas para determinar dicho pH.

Asímismo, en las diferentes pruebas se constatará el tipo de acción predominante de la coagulación electrocinética sea por permutación o por hidrólisis del metal del coagulante.

Seleccionadas las mejores pruebas, se valorará, de cada una de ellas, su agresividad al contacto con  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Ca(OH)}_2$ ; eligiéndose a partir de esto el proceso más adecuado.

Estos resultados serán base para establecer el tipo de unidades de tratamiento, así como el costo de potabilización en lo que concierne a consumos de productos químicos.

## 2.2.- Coagulantes, co-coagulantes, productos químicos y equipo de laboratorio empleado.

Para llevar al cabo las pruebas, se utilizaron los productos

químicos y los equipos del laboratorio del Departamento de Ingeniería Sanitaria de la División de Estudios Superiores; contándose se con una muestra del polielectrolito "Ionac Wisprofloc-20" de Pfaulder Permutit de México.

Coagulantes:

Sulfato de aluminio. Grado reactivo con fórmula química:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ . Se preparó una solución al 1%, en que cada ml es equivalente a 10 mg de sulfato de aluminio.

Sulfato férrico. Grado reactivo con fórmula química  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ . Se preparó una solución al 1%, en que cada ml es equivalente a 10 mg de sulfato férrico.

Co-coagulantes:

Sílice activada. Solución preparada según técnica del Ing. Baylis, en que cada ml es equivalente a 5 mg de sílice.

Polielectrolito. Ionac Wisprofloc-20, polímero orgánico complejo en forma de polvo. Se preparó una solución patrón al 1%, haciéndose una dilución para tener una concentración al 0.1% para aplicación, en que cada ml es equivalente a 1 mg de polielectrolito.

Productos químicos:

Hipoclorito de calcio. Solución preparada con HTH con 70% de cloro valorable. La solución se preparó con una concentración

de 0.5%, en que cada ml es equivalente a 5 mg de cloro.

Cal hidratada. Sustancia con un 45% de Ca O. Se preparó una suspensión saturada (20%) para ajuste del pH, y una suspensión al 1%, en que cada ml es equivalente a 10 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$ , para emplearla como coagulante y como estabilizante.

Acido clorhídrico. Solución 0.1 N para ajuste del pH

Carbonato de calcio. Químicamente puro, en polvo

Equipo:

Para las pruebas de coagulación: Dos agitadores mecánicos de seis ejes cada uno, Marca Phipps & Bird.

Para determinar pH: Potenciómetro Beckman modelo Zeromatic II:

Para determinar turbiedad: Turbidímetro Hellige con bulbo A.

Para determinar color: Hellige Aqua Tester con disco 0-70 ppm.

Para determinar hierro: Fotocolorímetro Klett Summerson Modelo 900-3 equipado con filtro verde 510  $m\mu$ , que se calibró con patrones de hierro preparados según método de la Fenantrolina obteniéndose la curva estándar (fig 6).

El ajuste de la curva se hizo por el método de "Mínimos Cuadrados".

No. muestra	Absorbancia lectura	Concent. Fe p.p.m	
1	52.50	0.1	
2	54.00	0.2	
3	78.00	0.3	
4	96.50	0.4	
5	116.00	0.5	
6	134.50	0.6	
7	164.00	0.7	
8	160.00	0.8	
9	169.00	0.9	
10	200.00	1.0	

$$m = - \frac{\sum Y_0 (\bar{X} - x)}{\sum (\bar{X} - x)^2}$$

$$\bar{Y}_0 - Y = m(\bar{X} - x)$$

$$\bar{X} = 0.55$$

$$\bar{Y}_0 = 122.45$$

$\bar{x} - x$	$(\bar{x} - x)^2$	$Y_0$	$Y_0(\bar{x} - x)$	$Y$
+ 0.45	0.2025	52.50	+23.60	46.75
+ 0.35	0.1225	54.00	+18.90	63.55
+ 0.25	0.0625	78.00	+19.50	80.35
+ 0.15	0.0225	96.50	+14.50	97.15
+ 0.05	0.0025	116.00	+ 5.80	113.95
- 0.05	0.0025	134.50	- 6.73	130.75
- 0.15	0.0225	164.00	-24.60	147.55
- 0.25	0.0625	160.00	-40.00	164.35
- 0.35	0.1225	169.00	-59.20	181.15
- 0.45	0.2025	200.00	-90.00	197.95
Sumas:	0.8250		-138.23	

### 2.3.- Programa de pruebas

Se utilizaron dos agitadores mecánicos en cada una de las pruebas, con recipientes de 1500 ml de capacidad. Se usaron muestras de 1 litro. El total de pruebas de coagulación fué de 180.

El criterio para llevar al cabo las pruebas se normó de la siguiente



te manera:

Las muestras se agitaron a 100 rpm durante 3 minutos mientras se hacía la dosificación de productos, habiéndose establecido algunas variantes en las siguientes pruebas.

Prueba B. Mezcla rápida a 100 rpm durante 6 minutos

Pruebas E, F y O. Mezcla rápida a 100 rpm durante 5 minutos al dosificar cloro; al término, dosificación del coagulante continuando la agitación durante 3 minutos.

Pruebas K, L, M y N. Mezcla rápida a 100 rpm durante 3 minutos al dosificar el coagulante; al término, dosificación del coagulante continuando la agitación durante 3 minutos.

Después de la mezcla rápida, se promovió en todas las pruebas la coagulación ortocinética, con agitación a 20 rpm durante 20 minutos, excepto la prueba B, a la que se le dió un tiempo de 30 minutos.

Al finalizar el periodo de floculación, se observaron los flóculos formados y se calificaron, permitiéndose su sedimentación en un tiempo mínimo de 30 minutos y un máximo de 60. Se consideró que en este tiempo se tenía la máxima eficiencia del proceso, constatándose esto en la mayoría de las pruebas.

Después del periodo de sedimentación, se decantaron todas aquellas muestras que se calificaron visualmente como aceptables,

y se filtraron en papel Whatman No. 42, después de lo cual se hicieron las determinaciones de pH, turbiedad, color, hierro, alcalinidad y dureza a los mejores resultados.

El programa de pruebas se llevó al cabo en la siguiente forma:

Por las características predominantes de color y hierro en las aguas crudas, se vió como una posibilidad, que el color fuese provocado por mineral hierro a partir del sulfato de hierro (caparrosa), el cual siendo propiamente un coagulante, podría reaccionar con alcalinidad agregada y formar el hidrato insoluble. Con esta hipótesis se dosificó cal hidratada en dosis crecientes (Tabla A, Gráfica 1), obteniéndose resultados que no concordaron con lo previsto. Se consideró que ampliando los tiempos de mezcla, floculación y sedimentación, y para las mismas dosis de cal hidratada, mejorarían los resultados, lo que no aconteció. (Tabla B, Gráfica 2).

Con base en los aspectos teóricos y de investigación que se trataron en el capítulo II de este trabajo, los ensayos posteriores, se plantearon de la siguiente manera:

- Verificación de la sensibilidad del agua a dosis crecientes de coagulantes, con pH natural (Tablas C y D, Gráficas 3 y 4).
- Con fines de mejorar la coagulación, oxidando la materia orgánica y parte del hierro, se dosificó cloro en forma de hipoclorito de calcio, con dosis crecientes de coagulantes y a pH natural (Tabla E, Gráficas 5 y 6).

- A dosis de coagulantes inmediatas inferiores a las óptimas, se dosificó cloro en dosis crecientes, con pH natural (Tabla F, Gráficas 7 y 8).
- De acuerdo a los resultados de los ensayos "C y D", se seleccionaron las dosis de coagulantes inmediatas inferiores a las óptimas, y se varió el pH en las distintas pruebas, desde valores ácidos hasta valores básicos. Los ajustes de pH se hicieron con solución 0.1 N de HCl y con una suspensión saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Tablas G y H, Gráficas 9 y 10).
- A pH cercanos a los óptimos, según resultados de los ensayos "G y H", se aplicaron los coagulantes con dosis crecientes. (Tablas I y J, Gráficas 11 y 12).
- Verificación de la sensibilidad del agua a dosis creciente de sílice activada, con dosis de coagulantes inmediatas inferiores a las óptimas (Ensayos C y D), con pH natural. (Tabla K, Gráficas 13 y 14).
- Verificación de la sensibilidad del agua a dosis creciente de sílice activada, con dosis de coagulantes inmediatos inferiores a las óptimas (Ensayos I y J) y con ajustes del pH. (Tabla L, Gráficas 15 y 16).
- Verificación de la sensibilidad del agua a dosis creciente del polielectrolito catiónico, con dosis de coagulantes inmediatas inferiores a las óptimas (Ensayos C y D), con pH natural. (Tabla M, Gráficas 17 y 18).
- A dosis óptimas del polielectrolito según resultados del ensayo M, se aplicaron los coagulantes en dosis crecientes (Tabla N, Gráficas 19 y 20).
- Con dosis óptima de cloro (Ensayo F) y con dosis de coagulantes inmediatas inferiores a las óptimas (Ensayos C y D), se recircularon lodos previamente formados, aplicándose en dosis crecientes al iniciar la etapa de floculación de las pruebas. Estos ensayos se hicieron con el pH natural (Tabla O, Gráficas 21 y 22).

- Se repitieron los ensayos de los ocho mejores resultados del total de 180 pruebas, para hacer un análisis químico completo, con fines de estudiar el grado de agresividad de las aguas tratadas.

#### 2.4 Resultados. Tablas y Gráficas. Interpretación de resultados.

Los resultados de las pruebas se dan en las Tablas y Gráficas de las páginas 46 a 83.

Notaciones:

\* Las cifras de dosificación y de las determinaciones fisico-químicas, se expresan en mg/l, y las cifras de recirculación de los cos, en porciento del volumen de muestra. Las cifras de alcalinidad y dureza se expresan como  $\text{CaCO}_3$

\* Significado de las abreviaturas:

T = Turbiedad remanente

C = Color remanente

Fe = Hierro remanente

AF/AM = Alcalinidad a la fenolftaleína y al anaranjado de metilo

DT/DCa = Dureza total y dureza cálcica

pH y pH<sub>f</sub> = pH después del tratamiento

pH<sub>i</sub> = pH antes del tratamiento

C.R = Cloro residual total

floc = Flóculo

S.T. = Sólidos totales

## \* Calificación de los flóculos:

Nulo - - - - - 0

Fino - - - - - f

Regular - - - - - r

Bueno - - - - - b

Muy bueno - - - mb

ResultadosTabla A, Gráfica 1, Pruebas 1-12

Solo en las pruebas 10, 11 y 12, con dosis de cal hidratada de 100, 110 y 120 ppm respectivamente, se apreciaron flóculos calificados como regulares, teniéndose una remoción pobre de turbiedad y color, quedando las muestras con valores de pH muy altos.

Tabla B, Gráfica 2, Pruebas 13-24

Con las mismas dosis crecientes de cal hidratada, pero aumentando los tiempos de mezcla, floculación y sedimentación, se apreció floculación fina en las pruebas 9, 10, 11 y 12. La remoción de color fué deficiente, aunque en las pruebas 10 y 11 se obtuvieron buenas eficiencias en la remoción de hierro, con ligero aumento en la prueba 12. La remoción de turbiedad se considera deficiente ya que las muestras tratadas se filtraron. Los valores de pH son altos.

Tabla C, Gráfica 3, Pruebas 25-36

Se apreciaron buenos flóculos en la mayoría de las pruebas, teniéndose buena remoción de color con dosis de 30 y 40 ppm de sulfato de aluminio, aumentando los valores a mayores dosis. En esa gama de dosificación se eliminó el hierro casi totalmente, teniéndose buena remoción en la turbiedad. Esta óptima coagulación se logró a un pH de 6.8 aproximadamente.

Tabla D, Gráfica 4, Pruebas 37-48

Se apreciaron buenos flóculos en tres de las pruebas, y muy buenos en las pruebas con más alta dosificación de sulfato férrico. La óptima remoción de color (reducción total), se obtuvo en la gama de dosificación de 50 a 90 ppm, correspondiendo la óptima remoción de hierro y turbiedad la gama de 60 a 90 ppm. El pH de óptima coagulación fué entre 5.0 y 6.4.

Tabla E, Gráfica 5, Pruebas 49-54

Se ensayó con una dosis de cloro alta y constante para determinar si mejoraba la coagulación de las aguas. La gama de dosificación de sulfato de aluminio se ajustó con base al resultado C. Los flóculos fueron buenos para las dosis de 30 y 40 ppm, obteniéndose una muy buena remoción de color, hierro y turbiedad en todas las pruebas, exceptuando la 49 con dosis de 20 ppm. La gama de pH óptimo fué de 5.7 a 6.7.

Tabla E, Gráfica 6, Pruebas 55-60

Con la misma dosis de cloro se dosificó sulfato férrico en una gama basada en los resultados del ensayo D. Se apreciaron flóculos diferentes en cada prueba, teniéndose la mejor remoción de color, turbiedad y hierro en las pruebas 57 a 60, con dosis de 50, 60, 70 y 80 ppm. El pH óptimo quedó entre 6.4 y 6.8.

Tabla F, Gráfica 7, Pruebas 61-66

Se eligió como dosis inmediata inferior a la óptima 30 ppm de sulfato de aluminio (ensayo C), preclorándose con dosis altas crecientes a fin de obtener un residuo de cloro. El flóculo fue bueno en todas las pruebas, teniéndose una remoción total del color en cada una de ellas, con buena remoción de turbiedad. El hierro se redujo considerablemente en todas las pruebas excepto en la No. 61 con dosis de 4 ppm de cloro. El residuo de cloro fue aceptable, no menor de 0.4 ppm con un valor máximo de 2.0 ppm. Sensiblemente el pH fue constante en todas las pruebas: 6.4

Tabla F, Gráfica 8, Pruebas 67-72

Se eligió como dosis inmediata inferior a la óptima 50 ppm de sulfato férrico (ensayo D), preclorándose con dosis altas. El flóculo se calificó como muy bueno, con remoción total del color en todas las pruebas y una buena remoción de hierro y turbiedad, también en todas las pruebas. El residuo de cloro tuvo valores semejantes a

los de las pruebas 61-66. El pH óptimo fué sensiblemente constante en todas las pruebas: 6.4.

Tabla G, Gráfica 9, Pruebas 73-84

Con la dosis de 30 ppm de sulfato de aluminio (ensayo C) y variando el pH de inicio de las pruebas desde un valor de 3.6 a 12.3, se obtuvieron flóculos que no alcanzaron el calificativo de buenos, considerándose pobre la formación en las pruebas de la gama más ácida. La mejor remoción de color y hierro se obtuvo en una gama entre 5.5 y 7.0, teniéndose una regresión tanto del color como del hierro a un pH entre 8.0 y 10.0, con regresión a buenos valores de remoción a un pH mayor de 11.0. A fin de ajustar mejor la curva, se realizaron otras tres pruebas a un pH ácido, constatándose una regular remoción de color y una buena remoción de hierro a un pH menor de 5.5. Excepto en la prueba 82, en todas las demás se obtuvo una eficiente reducción en la turbiedad. Los pH finales no se desviaron mucho de los iniciales, teniéndose un valor francamente agresivo en la zona de buena coagulación.

Tabla H, Gráfica 10, Pruebas 85-96

Con la dosis de 50 ppm de sulfato férrico (ensayo D) y variando el pH inicial desde 3.9 a 11.1, se obtuvo una pobre creación de flóculos en la zona muy ácida ( $\text{pH} < 6.0$ ) y por lo tanto una pobre reducción en color, hierro y turbiedad. La zona de mejor remoción se



tuvo a un pH entre 7.0 y 8.5, teniéndose un aumento en los valores de color a pH mayor de 9.0. La remoción de hierro y turbiedad continuó siendo buena en esta última zona. Los pH finales de la zona de buena coagulación son ligeramente ácidos.

Tabla I, Gráfica 11, Pruebas 97-108

Dentro de la zona óptima de pH del ensayo G, se eligió el valor aproximado de 6.3 para ajustarlo en estas pruebas, aplicando dosis crecientes de sulfato de aluminio.

La formación de flóculos en general tuvo un calificativo entre "fino" y "regular", teniéndose muy buena remoción de hierro en todas las pruebas. El color se removió bastante bien en las pruebas 98 y 99, teniéndose casi nula eliminación a la dosis de 10 ppm, y con valores remanentes entre 5 y 10 unidades a dosis mayores de 25 ppm. Exceptuando las pruebas 97 y 106 con dosis de 10 y 60 ppm, en todas las demás la turbiedad remanente fué insignificante. Los pH finales fueron francamente ácidos.

Tabla J, Gráfica 12, Pruebas 109-120

Con base al ensayo H en que la gama de pH de óptima coagulación se encuentra entre 7.0 y 8.5, se eligió el valor de 7.5 para ajustarlo en estas pruebas, con aplicación de sulfato férrico en dosis creciente. A dosis menores de 35 ppm no se formaron flóculos, te-

niéndose una buena remoción de color y hierro a dosis mayores de 40 ppm, haciéndose las curvas asintóticas. La eliminación de turbiedad fué buena a dosis mayores de 35 ppm. Los pH finales en la zona inicial de buena coagulación son ligeramente ácidos.

Tabla K, Gráfica 13, Pruebas 121-126

Con dosificación óptima de sulfato de aluminio: 30 ppm (ensayo C), se aplicaron dosis crecientes de sílice activada, no mejorándose la calificación anteriormente dada a los flóculos, aunque la remoción de hierro fué muy buena, con un color remanente de cinco unidades en todas las pruebas, exceptuando la 121 que con dosis de 1 ppm de sílice, redujo aún más este valor. La turbiedad se eliminó casi totalmente en todas las pruebas. Las pruebas se realizaron con el pH natural de las aguas, habiéndose obtenido ligeras desviaciones en los pH finales. La mejor prueba, la 121, tuvo un pH final de 6.3.

Tabla K, Gráfica 14, Pruebas 127-132

Se ensayó con las mismas dosis crecientes de sílice activada, aplicando sulfato férrico con dosis constante óptima de 50 ppm, según ensayo D, con el pH natural de las muestras.

En este caso también, el co-coagulante no mejoró la calidad de los flóculos, aunque la remoción de hierro y color fué excelen-

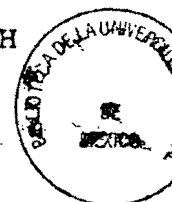
te en todas las pruebas. Asimismo, la remoción de turbiedad fué muy buena, con valores ligeramente mayores a la unidad en las pruebas 129 y 130. Se obtuvieron pH finales que no se desvian mucho del pH de inicio de las pruebas.

Tabla L, Gráfica 15, Pruebas 133-133

Este ensayo se hizo para verificar si se tenía un ahorro en el coagulante, sulfato de aluminio, utilizando sílice activada, a un pH de 6.3. Se aplicó la dosis de sulfato de aluminio de 15 ppm, inmediata inferior a la óptima, obtenida en el ensayo I, pruebas 97-103; con dosis crecientes de sílice activada, excepto en la prueba 133, en donde no se aplicó el co-coagulante, con miras de comparar resultados. En la totalidad de las pruebas el flóculo fue fino, pero la eficiencia en la remoción de color, hierro y turbiedad fué muy alta. Los pH finales fueron sensiblemente iguales al pH inicial.

Tabla L, Gráfica 16, Pruebas 139-144

Con el mismo criterio que el ensayo anterior y a pH 7.5, se dosificó sílice en dosis creciente, exceptuando en la prueba 139; y sulfato férrico en dosis de 40 ppm, inmediata inferior a la óptima, obtenida en el ensayo J, pruebas 109-120. Los flóculos formados se calificaron de regulares, teniéndose una muy buena remoción de color y hierro en las pruebas 139 y 140, sin sílice y con 0.5 ppm, respectiva-



DEPFI

mente. En las demás pruebas el hierro se eliminó casi totalmente, teniéndose regresión del color a valores entre 5 y 10. La remoción de turbiedad fué buena en todas las pruebas. Los pH finales fueron ligeramente ácidos.

Tabla M, Gráfica 17, Pruebas 145-150

Con la dosis óptima de sulfato de aluminio (ensayo C), se aplicaron dosis variables del polielectrolito catiónico, para determinar la sensibilidad del agua a este co-coagulante. En todas las pruebas se obtuvieron buenos flóculos, excepto en la 145, en donde no se aplicó el co-coagulante. La remoción de hierro fué buena en todas las pruebas, con remoción de color aceptable pero con valores remanentes de 5 unidades y uno de 10.

La turbiedad se eliminó considerablemente. Las pruebas se hicieron con el pH natural, no reduciéndose los valores de los pH finales.

Tabla M, Gráfica 18, Pruebas 151-156

En base al ensayo D, se aplicó dosis óptima constante de sulfato férrico, y dosis creciente del polielectrolito, con pH natural. Los flóculos resultantes fueron en la mayoría muy buenos, excepto en la prueba 151 en donde no se dosificó el co-coagulante. La eliminación de hierro fué muy buena, exceptuando en la prueba 156 con dosis de 5 ppm del co-coagulante. El color remanente fué de 5 unida-

des, con un valor de 10 en la prueba 156. La eficiencia en la remoción de turbiedad fué buena en general. Los pH finales fueron ligeramente ácidos y constantes: 6.5.

Tabla N, Gráfica 19, Pruebas 157-162

En base al ensayo M, pruebas 145-150, se eligió como dosis óptima del polielectrolito 1 ppm, aplicándose sulfato de aluminio en dosis crecientes a pH natural. A dosis menores de 25 ppm no se crearon flóculos, calificándose de regulares los de las muestras 160 a 162, con remoción buena en color, hierro y turbiedad. Los pH finales fueron sensiblemente iguales al pH de inicio de las pruebas, exceptuando el de una prueba 160, que con un valor de 7.9 hace suponer en algún error de manipulación.

Tabla N, Gráfica 20, Pruebas 163-168

Con el mismo criterio anterior, se aplicaron dosis crecientes de sulfato férrico con 1 ppm del polielectrolito. El flóculo fué nulo en las pruebas 163 y 164, y fino en la 165; teniendo solo buena remoción de color en las pruebas 167 y 168 con buenos flóculos, aunque el hierro y la turbiedad se removieron en las 166, 167 y 168.

Los pH finales fueron ligeramente ácidos.

Tabla O, Gráficas 21, Pruebas 169-174

Con base en los ensayos F, pruebas 61-66, se aplicaron cloro y

sulfato de aluminio en dosis de 5 y 30 ppm respectivamente, con recirculación de lodos variable (% del volumen tratado), en la etapa de floculación, notándose una mejoría en la formación de flóculos, calificándolos de buenos. La remoción de color fué excelente, ya que se redujo totalmente en cada una de las pruebas; - siendo la remoción de hierro y turbiedad muy buena. La característica primordial en estas pruebas fué la rápida sedimentación de los flóculos, considerándose que a los 10 minutos ya se habían removido todos los precipitantes. El residuo de cloro es aceptable en estos procesos, teniéndose pH finales neutros en todos los casos.

#### Tabla 0.- Gráfica 22. Pruebas 175-180

Con el mismo criterio anterior, se aplicaron cloro y sulfato férrico en dosis de 5 y 50 ppm respectivamente, recirculándose los lodos. La formación de flóculos fué muy buena, con una remoción excelente del color, y muy buena remoción de hierro y turbiedad. La sedimentación fué también muy rápida. El residuo de cloro fué aceptable, y los pH finales fueron ligeramente ácidos.

#### Interpretación de resultados

\* De acuerdo a las pruebas A y B es obvio que el sulfato férrico no dá origen al ión hierro presente en el agua, requiriendo para su precipitación un pH cercano al punto isoeléctrico de los coloides de color.

\* La zona de buena coagulación con sulfato de aluminio fué más baja que la zona correspondiente al sulfato férrico, teniendo mejor formación de flóculos con la sal de hierro.

\* A igualdad de dosis de los dos coagulantes, fué mejor la precipitación de coloides y el ión hierro con sulfato de aluminio.

\* La coagulación electrocinética en la prueba C se efectuó tanto por acción hidrolítica como por permutación, con una zona de regresión del color entre pH 5.6 y 4.5, removiéndose otra vez el color a un pH ácido de 4.3 con dosis francamente antieconómicas. El pH de óptima coagulación indica que el proceso en esa zona, se llevó al cabo por acción hidrolítica, requiriendo de estabilización química el agua tratada.

\* La coagulación electrocinética en la prueba D se efectuó tanto por acción hidrolítica como por permutación, con una alta eficiencia en ambos casos. El pH de óptima coagulación nos señala que el proceso en esa zona tuvo lugar por acción hidrolítica, requiriendo el agua tratada estabilización química.

\* Las variaciones del pH para dosis constantes de coagulante no mejoran los resultados de los ensayos C y D, comprobándose que los óptimos resultados se tienen por acción hidrolítica (ensayos G y H). En estos casos también se requieren estabilizar las aguas.

\* Los ajustes de pH para dosis variables no mejoran los resultados anteriores, indicándonos que la coagulación con sulfato de aluminio no puede hacerse con dosis menores de 15 ppm, y con sulfato férrico se requiere por lo menos 40 ppm, con ajustes de pH de 6.3 y 7.5, respectivamente, lo que haría necesario en cada caso, recarbonatar las aguas, y alcalinizarlas con cal hidratada. A dosis altas de sulfato tienen lugar la acción hidrolítica y la acción de permutación, mientras que a dosis altas de sulfato férrico el proceso solo se lleva por acción hidrolítica (ensayos I y J).

\* La precloración mejoró considerablemente el proceso de coagulación para las dosis de productos consideradas como mejores: 30 ppm para sulfato de aluminio y 50 ppm para sulfato férrico. Se señala anticipadamente la conveniencia de preclorar el agua cruda. (Ensayo F).

\* La dosificación de sílice activada no mejoró los resultados obtenidos con solo los coagulantes, siendo los pH finales índices de que con ambos coagulantes, la acción hidrolítica fué predominante.

\* La dosificación del polielectrolito catiónico no mejoró la coagulación, teniéndose acción hidrolítica en la coagulación de todas las muestras. A dosis óptima del polielectrolito no es factible dosificar menos de 25 ppm de sulfato de aluminio y menos de 40 ppm de sulfato férrico.

\* La recirculación de lodos mejoró ampliamente el proceso de neutralización y precipitación de coloides y hierro, teniéndose como



resultado una rápida sedimentación, que mejorará indudablemente la eficiencia del proceso de filtración. En estos ensayos el residuo de cloro es índice de que se obtuvo una buena coagulación.

### R e s u m e n

Aún con la limitación de pruebas, se considera que los resultados son lo bastante ilustrativos para establecer que el proceso de coagulación debe llevarse al cabo con el pH natural de las aguas crudas, y que mejorará la eficiencia del proceso ya sea por precloración, adición de co-coagulantes y/o recirculación de lodos. Las etapas complementarias quedarán definidas al hacer una valoración de la agresividad de las aguas tratadas de aquellas muestras con mejores resultados.

A. - Sensibilidad del agua a dosis variable de cal hidratada. - pH natural

Prueba	Dosis	Floculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/Dca	pH
1	10	o						
2	20	o						
3	30	o						
4	40	o						
5	50	o						
6	60	o						
7	70	o						
8	80	f						
9	90	f						
10	100	r	8	70				10.7
11	110	r	7	50				10.9
12	120	r	7	60				10.9

B.- Sensibilidad del agua a dosis variable de cal hidratada, aumentando los tiempos de mezcla, floculación y sedimentación.- pH natural

---

Prueba	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
13	10	0						
14	20	0						
15	30	0						
16	40	0						
17	50	0						
18	60	0						
19	70	0						
20	80	0						
21	90	f	8.5	100	0.6	32/72	36/48	8.75
22	100	f	1.9	30	0.05	56/44	116/36	9.00
23	110	f	5.3	70	0.05	52/68	116/30	9.00
24	120	f	1.9	30	0.10	52/52	92/80	9.10

---

C.- Sensibilidad del agua a dosis variable de sulfato de aluminio.- pH natural

Prueba	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
25	10	0	-	-	-	-	-	-
26	20	f	2.3	20	<0.05	0/24	38/16	6.9
27	30	r	0.5	5	<0.05	0/20	38/14	6.9
28	40	b	1.5	5	<0.05	0/16	36/12	6.8
29	50	b	4.5	20	<0.16	0/10	38/12	5.6
30	60	b	5.0	20	<0.05	0/16	36/14	4.9
31	70	b	4.6	20	<0.05	0/2	36/16	4.5
32	80	b	3.2	20	<0.05	0/2	38/16	4.5
33	90	b	3.4	20	<0.05	0/0	36/14	4.3
34	100	b	3.2	15	<0.05	0/0	36/14	4.3
35	110	b	1.9	15	<0.05	0/0	34/14	4.3
36	120	b	1.2	10	<0.05	0/0	36/12	4.3

D.- Sensibilidad del agua a dosis variables de sulfato férrico.- pH natural

Prueba	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
37	10	0						
38	20	0						
39	30	0						
40	40	0						
41	50	b	0.80	0	0.21	0/20	34/20	7.0
42	60	b	0.30	0	< 0.05	0/14	34/16	6.6
43	70	b	0.25	0	< 0.05	0/8	36/16	5.5
44	80	mb	0.25	0	< 0.05	0/2	36/16	4.5
45	90	mb	0.25	0	< 0.05	0/0	38/16	4.1
46	100	mb	0.25	< 5	0.12	0/0	36/14	4.0
47	110	mb	0.20	< 5	< 0.05	0/0	36/16	3.8
48	120	mb	0.15	< 5	0.38	0/0	36/16	3.8

E.- Precloración con dosis constante y coagulación con dosis variable de sulfato de aluminio y sulfato férrico.- pH natural

D o s i f i c a c i ó n

Prueba	Cloro	S. aluminio	S. férrico	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
49	7	20		r	2.45	15	0.13	0/16	34/20	7.1
50	7	30		b	0.80	< 5	< 0.05	0/12	36/22	6.7
51	7	40		b	0.50	< 5	< 0.05	0/8	38/22	6.3
52	7	50		r	0.50	< 5	< 0.05	0/4	38/24	5.2
53	7	60		r	0.50	< 5	< 0.05	0/4	36/24	4.8
54	7	70		r	0.80	< 5	< 0.05	0/2	36/22	4.6
55	7		30	o	50	480	1.42			7.0
56	7		40	f	16	120	0.80			6.8
57	7		50	b	0.85	< 5	< 0.05	0/12	36/24	6.5
58	7		60	mb	0.35	0	< 0.05	0/8	38/24	6.2
59	7		70	b	0.45	0	< 0.05	0/4	36/22	5.8
60	7		80	r	0.50	0	< 0.05	0/2	38/24	4.2

F.- Precloración con dosis variable y coagulación con dosis constantes de sulfato de aluminio y sulfato férrico.- pH natural

D o s i f i c a c i ó n

Prueba	Cloro	S. alum.	S. férrico	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH	C.R
61	4	30		b	0.38	0	0.13	0/16	36/22	6.4	0.4
62	5	30		b	0.31	0	<0.05	0/16	36/20	6.4	0.6
63	6	30		b	0.31	0	0.05	0/14	38/22	6.4	0.8
64	7	30		b	0.18	0	0.05	0/14	38/24	6.3	0.8
65	8	30		b	0.27	0	<0.05	0/14	40/22	6.3	1.0
66	9	30		b	0.27	0	<0.05	0/14	40/24	6.4	2.0
67	4		50	mb	0.41	0	0.05	0/16	36/20	6.6	0.5
68	5		50	mb	0.35	0	<0.05	0/16	36/22	6.4	0.7
69	6		50	mb	0.31	0	<0.05	0/16	38/22	6.4	0.9
70	7		50	mb	0.20	0	<0.05	0/16	40/22	6.4	0.7
71	8		50	mb	0.39	0	<0.05	0/16	40/24	6.4	2.0
72	9		50	mb	0.27	0	<0.05	0/14	40/22	6.5	2.0

G.- A pH variable, dosificación constante de sulfato de aluminio

Prueba	pH <sub>i</sub>	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/Dca	pH <sub>f</sub>
73	3.6	30	mf	0.34	10	<0.05	0/0	30/12	3.6
74	4.0	30	mf	0.27	5	<0.05	0/0	34/14	4.0
75	4.6	30	mf	0.23	5	<0.05	0/2	38/16	4.5
76	5.1	30	f	0.23	5	<0.05	0/2	38/16	4.6
77	5.5	30	f	0.23	5	<0.05	0/2	40/14	4.6
78	6.0	30	f	0.23	<5	<0.05	0/2	40/16	4.8
79	6.5	30	f	0.09	<5	<0.05	0/4	36/16	5.0
80	8.0	30	r	0.20	5	0.13	0/16	40/22	6.9
81	9.5	30	o	0.31	15	0.43	38/32	44/24	7.4
82	10.0	30	o	4.70	20	0.67	44/36	44/22	7.3
83	11.3	30	r	0.23	<5	<0.05	52/20	80/68	11.0
84	12.3	30	r	0.43	5	<0.05	232/28	240/240	12.0



H.- A pH variable, dosificación constante de sulfato férrico

Prueba	pH <sub>i</sub>	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH <sub>f</sub>
85	3.9	50	f	3.50	50	1.64			3.5
86	4.3	50	f	4.70	50	1.28			3.5
87	4.8	50	f	2.70	30	1.28			3.5
88	5.1	50	f	3.30	20	1.26			3.5
89	5.6	50	r	0.20	10	0.78			3.6
90	6.0	50	r	0.56	5	0.11	0/6	32/12	4.8
91	6.4	50	b	0.42	5	0.14	0/4	34/12	4.6
92	7.3	50	b	0.20	< 5	< 0.05	0/16	40/16	6.9
93	8.5	50	r	0.38	5	< 0.05	0/16	42/16	6.9
94	9.4	50	mf	1.80	20	0.18	34/30	46/24	7.1
95	10.3	50	r	0.65	10	< 0.05	46/38	85/68	9.7
96	11.1	50	b	0.25	5	< 0.05	52/23	92/73	10.6

I.- A pH constante = 6.3, dosificación variable de sulfato de aluminio

Prueba	Dosis	Flóculo	T	C	Fe	AF/AM	DT/Dca	pH <sub>f</sub>
97	10	0	12	120	0.43	0/10	30/10	6.0
98	15	f	0.47	<5	<0.05	0/6	32/12	5.4
99	20	f	0.27	<5	<0.05	0/4	34/16	4.8
100	25	f	0.31	5	<0.05	0/4	34/16	4.8
101	30	f	0.43	5	<0.05	0/4	36/16	4.7
102	35	f	0.52	5	<0.05	0/4	36/14	4.7
103	40	r	0.47	5	<0.05	0/2	36/16	4.6
104	45	r	0.65	5	<0.05	0/2	34/14	4.6
105	50	r	0.47	5	<0.05	0/2	34/14	4.6
106	60	r	6.40	10	<0.05	0/4	34/12	4.3
107	70	r	0.56	5	<0.05	0/2	36/16	4.5
108	80	r	0.31	5	0.62	0/2	36/14	4.5

J.- A pH constante = 7.5, dosificación variable de sulfato férrico

Prueba	Dosis	Flóculc	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH <sub>f</sub>
109	10	o	26	350	1.15			7.3
110	20	o	29	325	0.97			7.1
111	30	o	6	90	0.61			7.0
112	35	r	2.80	20	0.16			6.9
113	40	r	1.10	5	<0.05	0/2	38/18	6.8
114	45	r	0.60	<5	<0.05	0/1	36/16	6.7
115	50	b	0.60	5	<0.05	0/14	38/16	6.5
116	55	b	0.23	5	<0.05	0/12	36/14	6.3
117	60	b	0.39	<5	<0.05	0/12	36/16	6.3
118	70	r	0.52	<5	<0.05	0/12	38/18	6.1
119	80	r	0.40	<5	<0.05	0/8	38/18	5.6
120	90	r	0.47	<5	<0.05	0/4	36/16	4.8

K.- Aplicación de cocoagulantes.- Sensibilidad del agua a dosis variable de sílice activada, coagulación con dosis constantes de sulfato de aluminio y sulfato férrico.- pH natural.

Prueba	D o s i f i c a c i ó n			floc	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
	Sílice act.	S. alum.	S. férrico							
121	1	30		r	0.34	<5	<0.05	0/14	34/12	6.3
122	2	30		r	0.27	5	<0.05	0/16	36/14	6.6
123	3	30		r	0.32	5	<0.05	0/16	36/12	6.7
124	4	30		r	0.16	5	<0.05	0/20	36/16	6.8
125	5	30		r	0.51	5	0.05	0/24	33/16	6.9
126	6	30		r	0.55	5	0.05	0/24	33/14	7.0
127	1		50	r	0.78	<5	<0.05	0/24	36/16	7.0
128	2		50	r	0.65	<5	<0.05	0/20	36/16	6.8
129	3		50	r	1.24	<5	<0.05	0/20	34/12	6.8
130	4		50	r	1.10	<5	<0.05	0/24	33/16	7.0
131	5		50	r	0.60	<5	<0.05	0/20	36/14	6.8
132	6		50	r	0.54	<5	<0.05	0/24	34/12	6.9

L.- Aplicación de co-coagulantes.- Sensibilidad del agua a dosis variable de sílice activa, coagulación con dosis constantes de sulfato de aluminio y sulfato férrico, ajustando el pH inicial.

Prueba	D o s i f i c a c i ó n				floc	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pHf
	pH <sub>i</sub>	Sílice act.	S. alum.	S. férr.							
133	6.3	0	15		f	0.84	<5	<0.05	0/16	32/14	6.3
134	6.3	0.5	15		f	0.65	<5	<0.05	0/16	34/14	6.3
135	6.3	1.0	15		f	0.56	<5	<0.05	0/16	34/16	6.3
136	6.3	1.5	15		f	0.43	<5	<0.05	0/16	32/14	6.3
137	6.3	2.0	15		f	0.39	<5	<0.05	0/16	34/14	6.3
138	6.3	2.5	15		f	0.43	<5	<0.05	0/14	34/12	6.2
139	7.5	0		40	r	0.79	<5	<0.05	0/20	38/14	6.8
140	7.5	0.5		40	r	0.79	<5	<0.05	0/24	36/14	6.8
141	7.5	1.0		40	r	1.15	5	<0.05	0/24	42/13	6.9
142	7.5	1.5		40	r	0.69	10	<0.05	0/30	42/20	7.0
143	7.5	2.0		40	r	0.94	10	<0.05	0/28	42/20	7.0
144	7.5	2.5		40	r	0.52	5	<0.05	0/28	40/13	7.0

M.- Aplicación de co-coagulantes.- Sensibilidad del agua a dosis variable del polielectro-  
lito catiónico, coagulación con dosis constantes de sulfato de aluminio y sulfato fé-  
rrico.- pH natural.

Prueba	D o s i f i c a c i ó n			Floc	T	C	Fe	AF/AM	DT/Dca	pH
	polielect.	S. alum.	S. ferr.							
145	0	30		f	0.60	5	0.05	0/32	36/14	7.2
146	1	30		b	0.43	5	0.05	0/24	33/20	7.1
147	2	30		b	0.89	5	0.05	0/28	32/20	7.1
148	3	30		b	0.85	5	<0.05	0/24	34/20	7.1
149	4	30		b	0.89	5	<0.05	0/24	34/18	7.1
150	5	30		b	1.80	10	<0.05	0/26	34/20	7.1
151	0		50	r	0.47	5	<0.05	0/12	30/20	6.6
152	1		50	b	0.24	5	<0.05	0/12	28/20	6.6
153	2		50	mb	0.47	5	<0.05	0/12	32/20	6.5
154	3		50	mb	0.20	5	<0.05	0/12	32/20	6.5
155	4		50	mb	0.65	5	<0.05	0/12	30/20	6.5
156	5		50	mb	1.20	10	0.14	0/12	30/20	6.5

N.- Aplicación de co-coagulantes.- Dosis constante del polielectrolito catiónico, coagulación con dosis variables de sulfato de aluminio y sulfato férrico.- pH natural.

Prueba	D o s i f i c a c i ó n			floc	T	C	Fe	AF/AM	DT/DCa	pH
	Polielect.	s. alum.	s. férr.							
157	1	10		0						
158	1	15		0						
159	1	20		0						
160	1	25		r	0.35	5	<0.05	0/32	32/66	7.8
161	1	30		r	0.56	5	<0.05	0/26	36/16	7.1
162	1	40		r	0.51	5	<0.05	0/22	40/16	6.9
163	1		10	0						
164	1		20	0						
165	1		30	f						
166	1		40	b	0.65	10	<0.05	0/22	40/16	7.0
167	1		50	b	0.51	5	<0.05	0/16	40/16	6.6
168	1		60	b	0.65	5	<0.05	0/12	40/16	6.3

0.- Pre-cloración con dosis constante, coagulación con dosis constantes de sulfato de aluminio y sulfato férrico, recirculando lodos en dosis variable.- Lodos formados previamente en las pruebas Nos. 169 y 175.- pH natural.

Prueba	D o s i f i c a c i ó n			Recir. lodos	floc	T	C	Fe	AF/AM	DT/LCa	pH	C.R.
	Cloro	S. alum.	S. ferr.									
169	5	30		0	f							
170	5	30		0.2	b	0.51	0	<0.05	0/28	36/14	7.0	1.0
171	5	30		0.4	b	0.60	C	<0.05	0/28	36/14	7.0	1.0
172	5	30		0.6	b	0.51	0	<0.05	0/28	36/14	7.0	1.0
173	5	30		0.8	b	0.60	0	<0.05	0/28	36/14	7.0	1.0
174	5	30		1.0	b	0.35	0	<0.05	0/28	36/14	7.0	1.0
175	5		50	0	b							
176	5		50	0.2	mb	0.27	0	<0.05	0/16	36/14	6.7	1.2
177	5		50	0.4	mb	0.51	0	<0.05	0/16	34/14	6.6	1.2
178	5		50	0.6	mb	0.42	0	<0.05	0/16	36/14	6.8	1.2
179	5		50	0.8	mb	0.47	0	<0.05	0/16	34/14	6.6	1.2
180	5		50	1.0	mb	0.10	0	<0.05	0/14	32/12	6.5	1.2



Estudio de la agresividad de las aguas tratadas.- Análisis químico de las pruebas consideradas con mejores resultados de coagulación.- Resultados en p.p.m.

Prueba	temp.	S.T.	pH	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>
Agua cruda	17°	274	7.1	7.2	5.8	49.0	12	8
C-28	17°	93	6.8	4.8	5.8	24.4	18	8
D-42	17°	118	6.2	4.8	5.3	12.2	40	8
K-121	17°	83	7.1	5.6	5.8	31.7	20	8
K-127	17°	95	6.7	4.8	5.3	19.5	32	8
M-146	17°	80	7.0	5.6	5.3	29.3	18	8
M-152	17°	108	6.6	4.8	5.3	19.5	38	8
O-172	17°	91	7.0	5.6	5.3	34.2	22	8
O-178	17°	102	6.8	5.6	5.3	19.5	38	8

Gráfica Nº 1

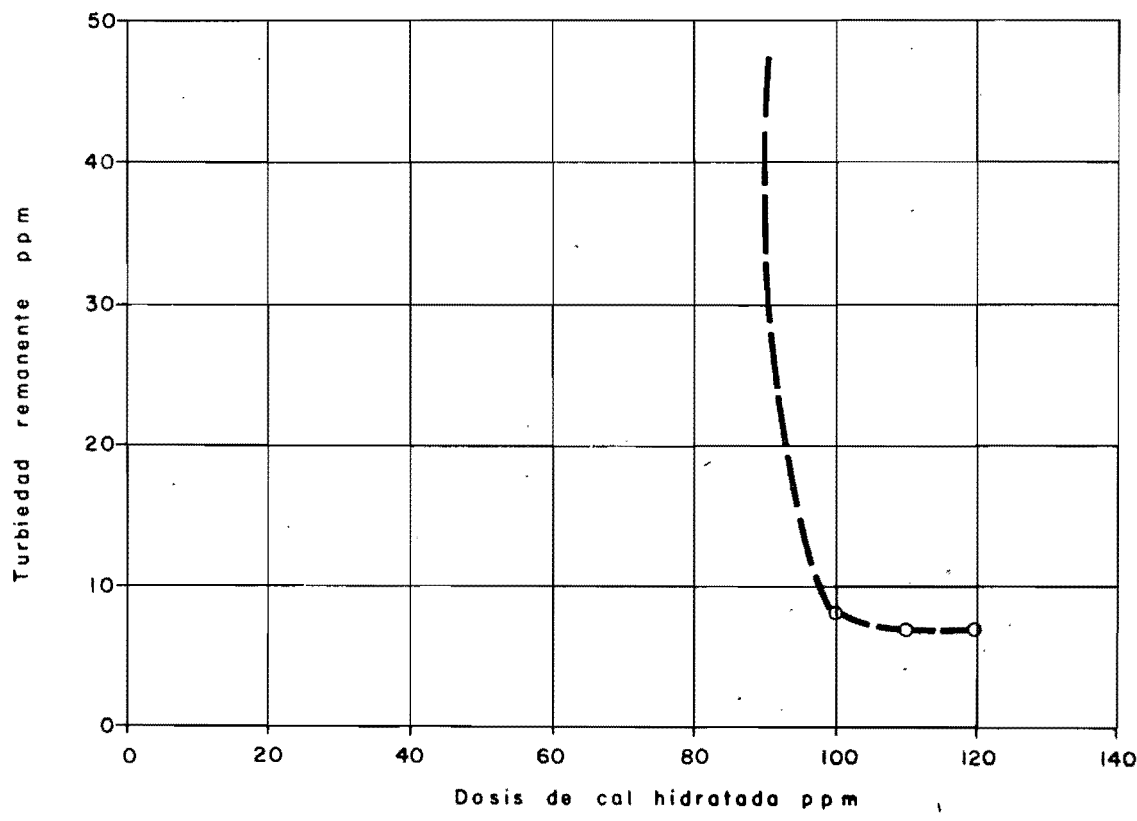
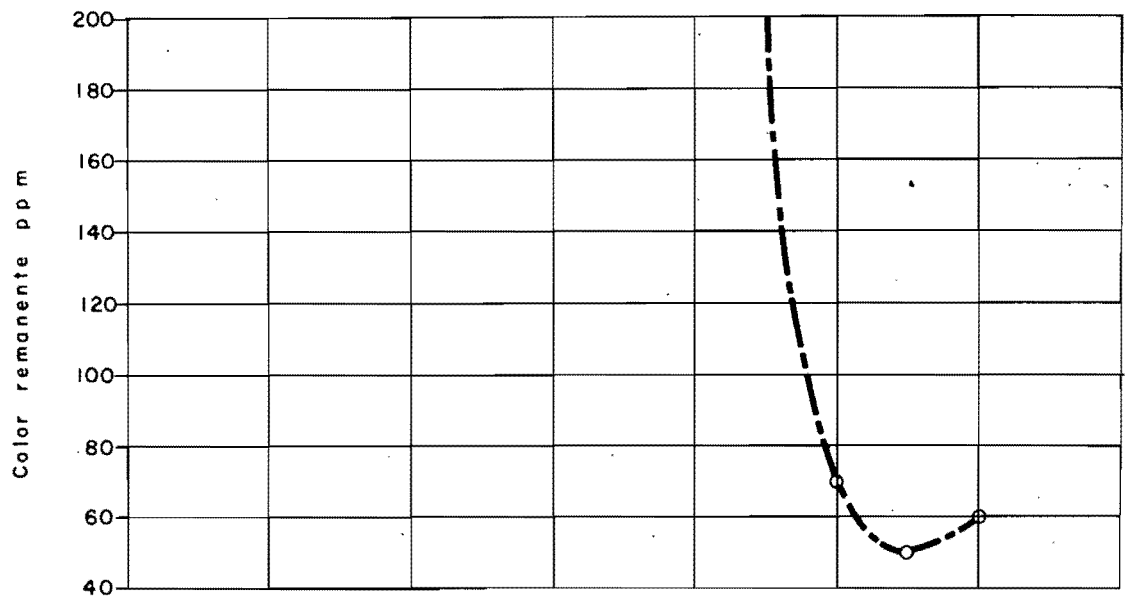
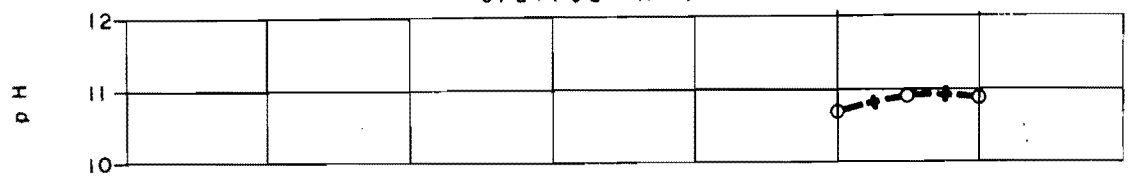
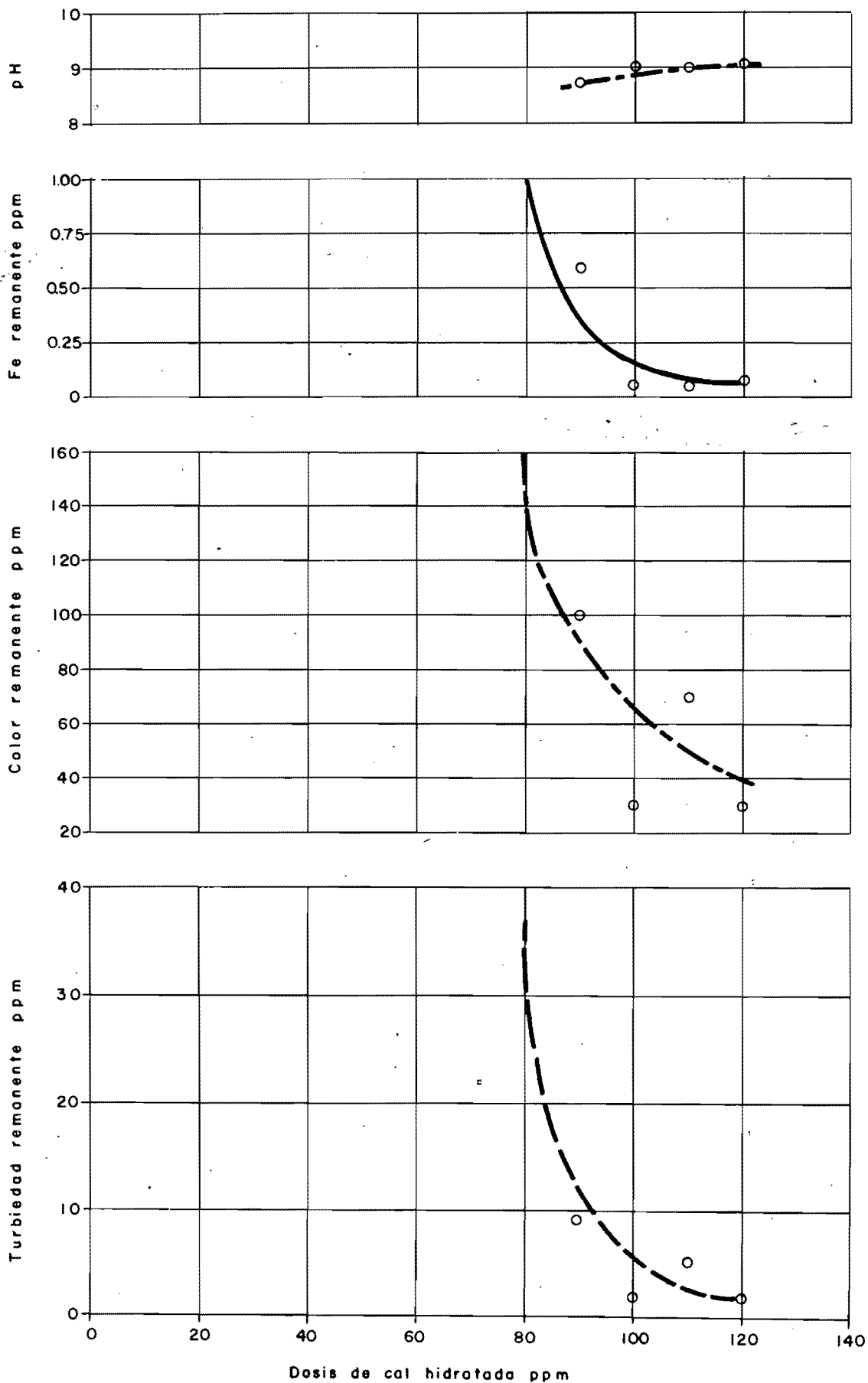
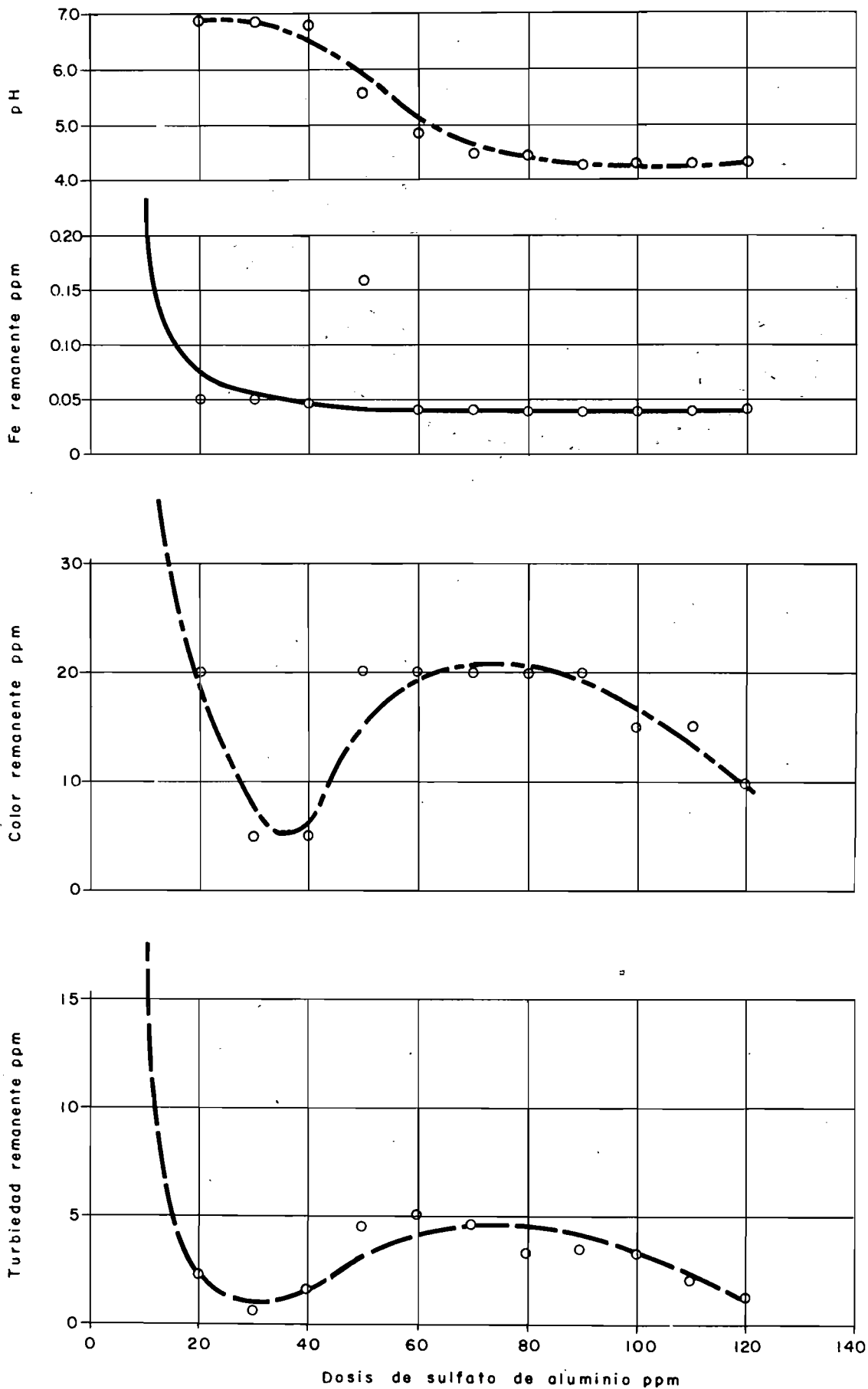


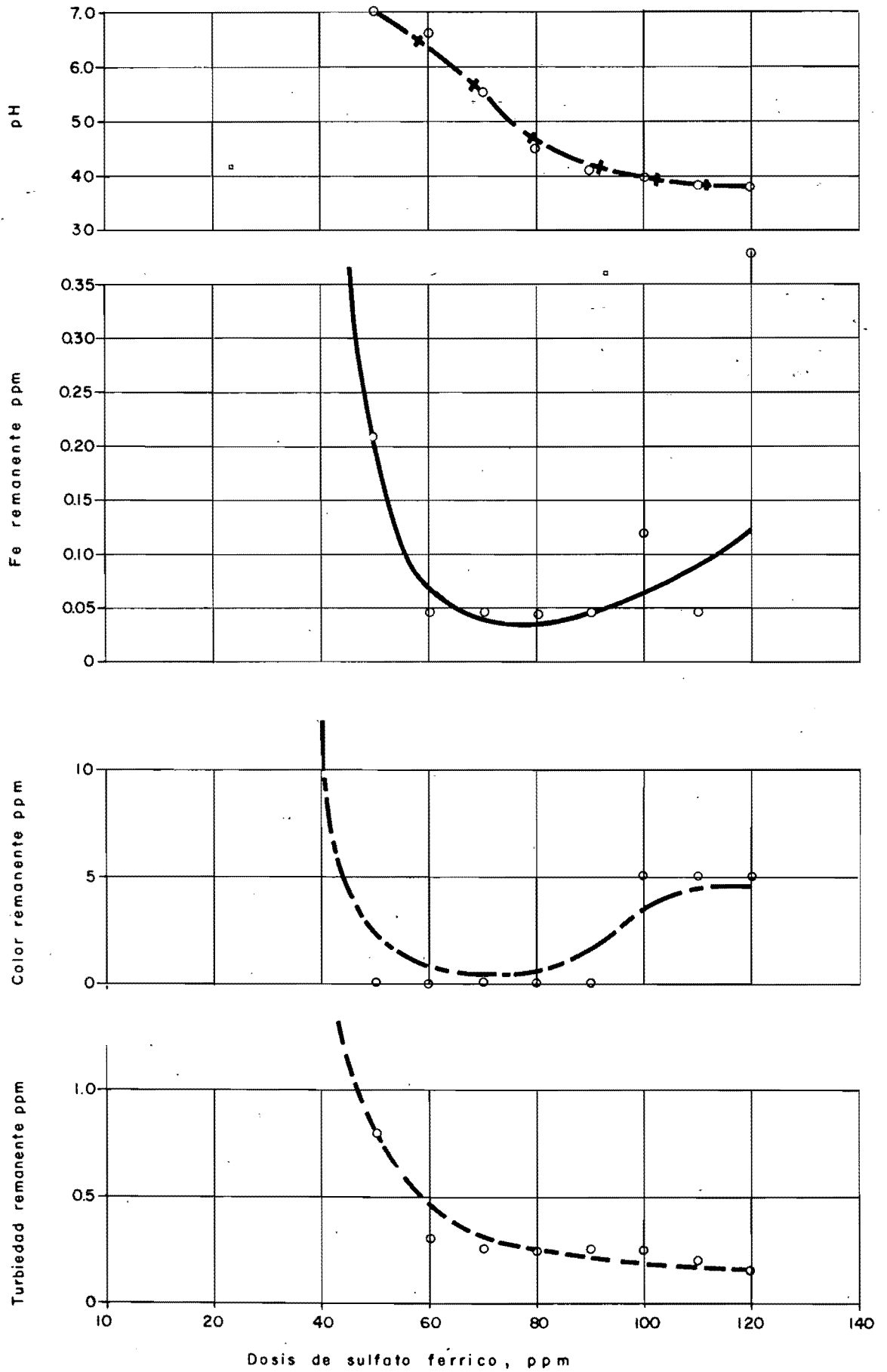
Gráfico Nº 2



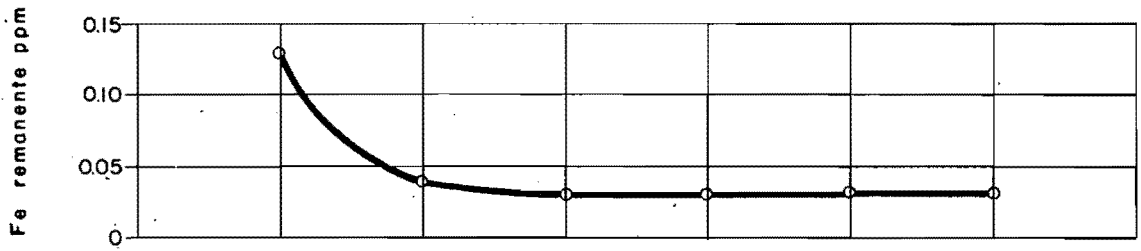
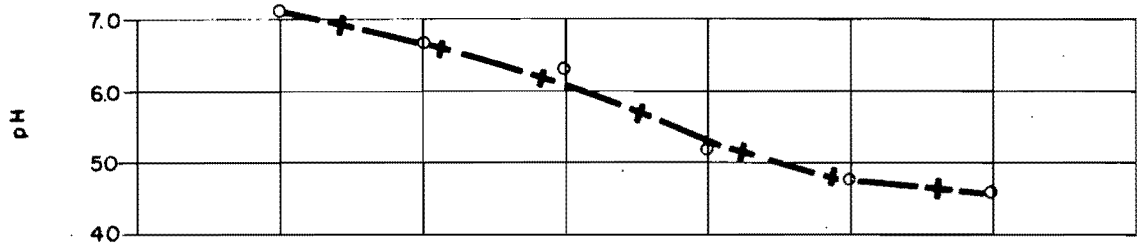
Gráfica Nº 3



Gráfica Nº 4



Gráfica Nº 5



Precloración = 7 ppm

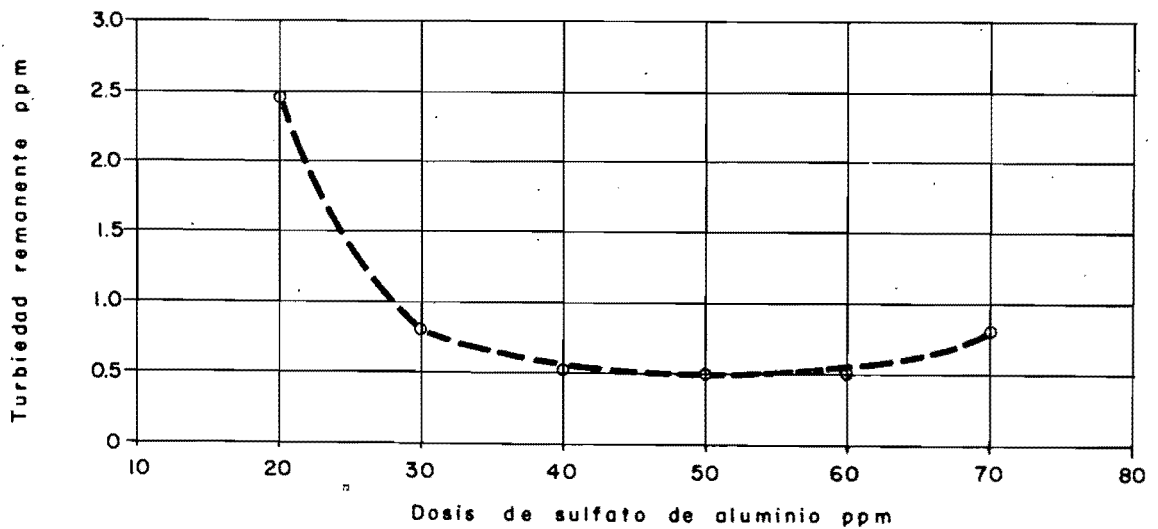
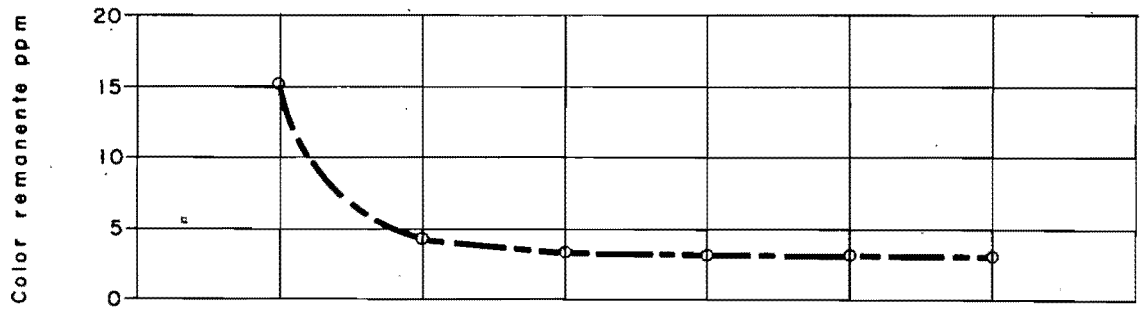
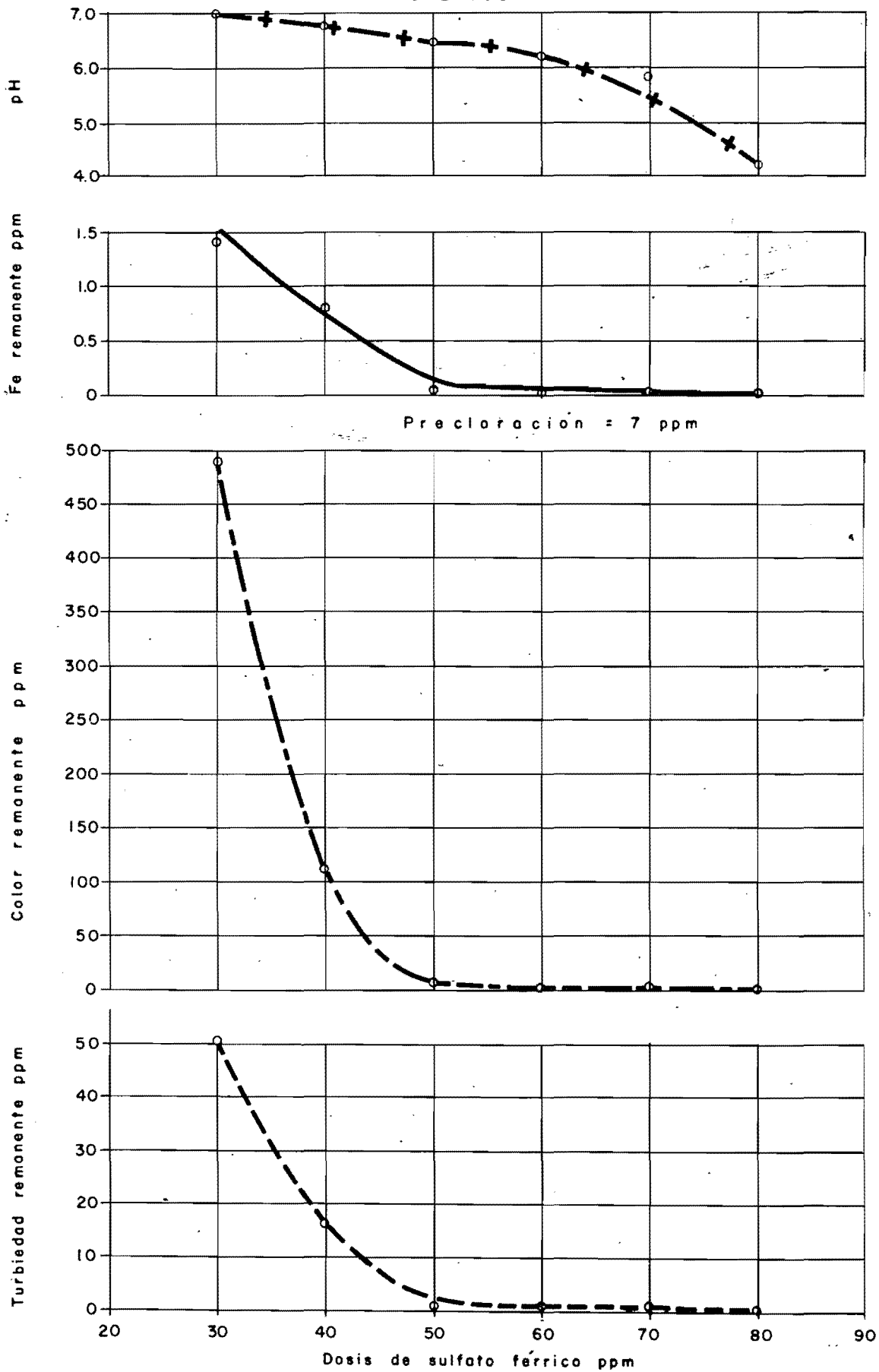
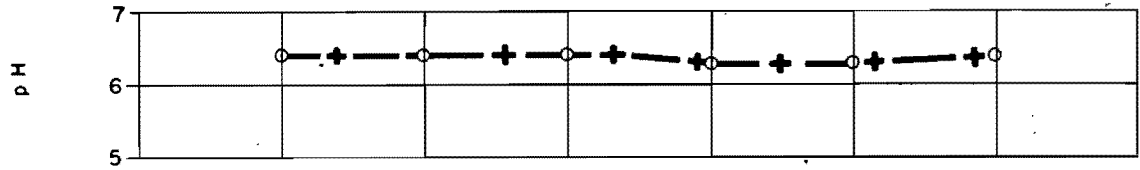


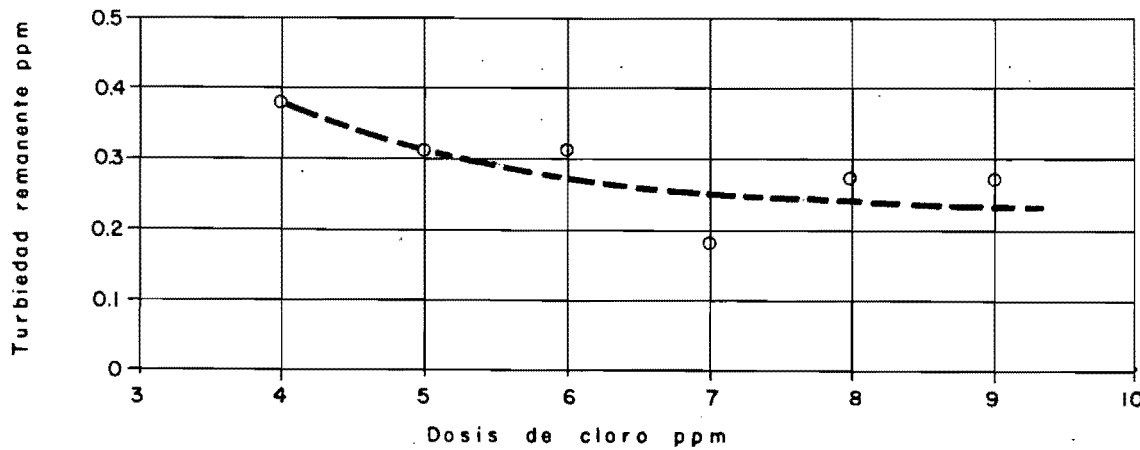
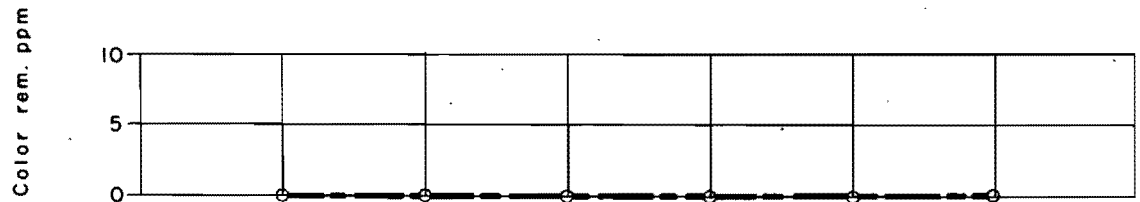
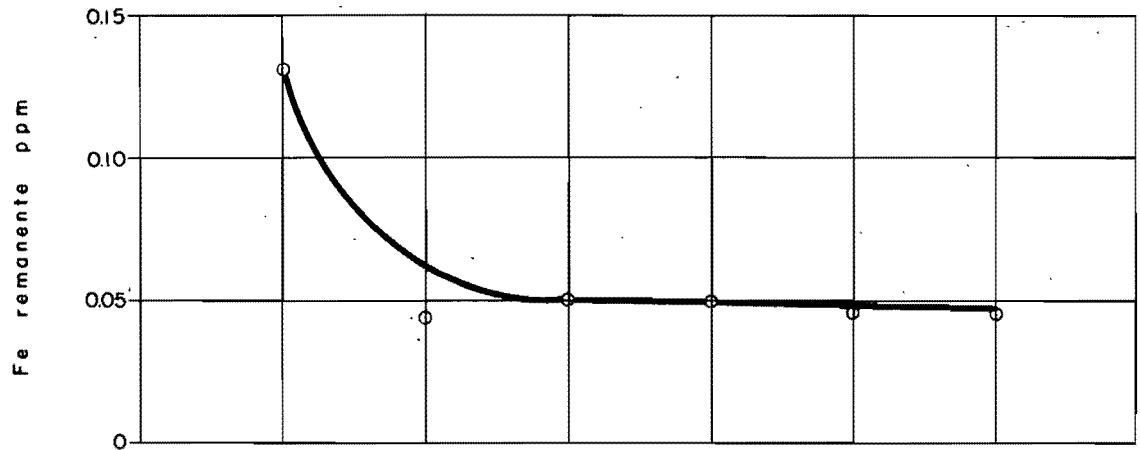
Gráfico Nº 6



Gráfica N° 7

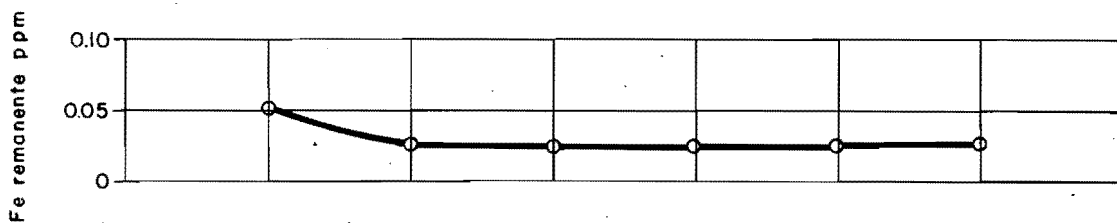
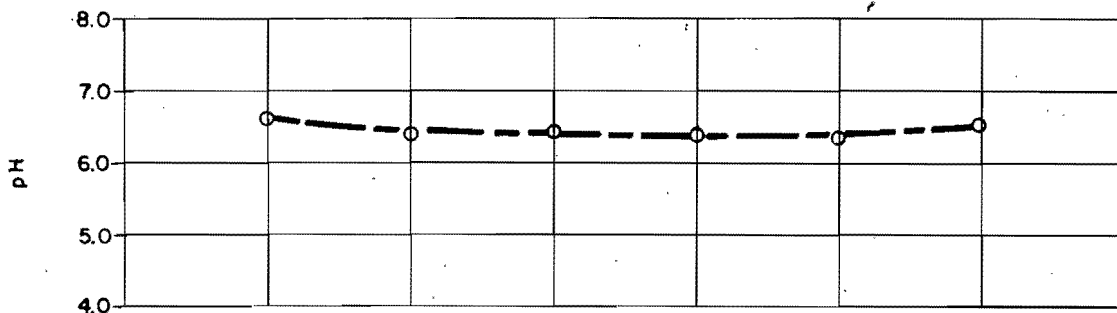


SULFATO DE ALUMINIO = 30 ppm





Grafica Nº 8



SULFATO FERRICO = 50 ppm

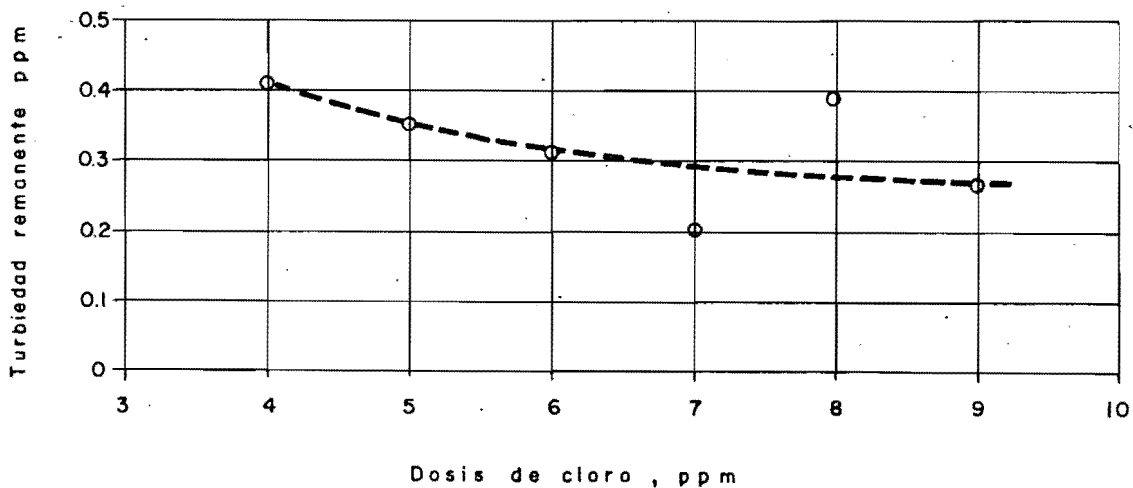
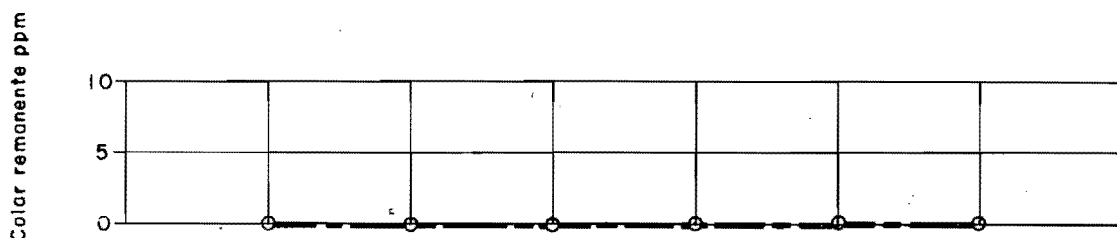
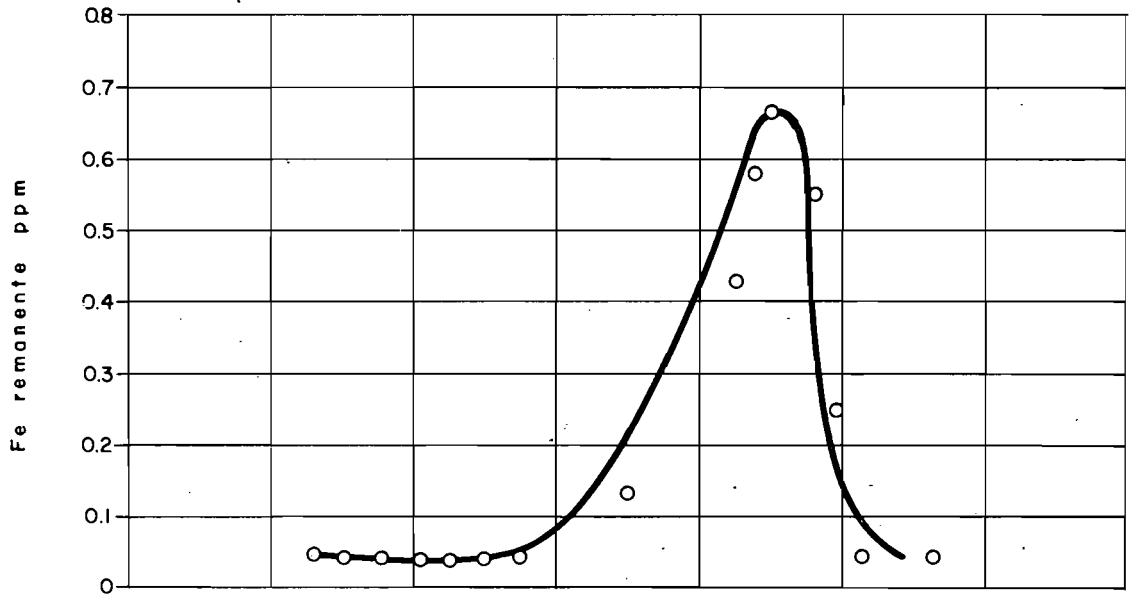
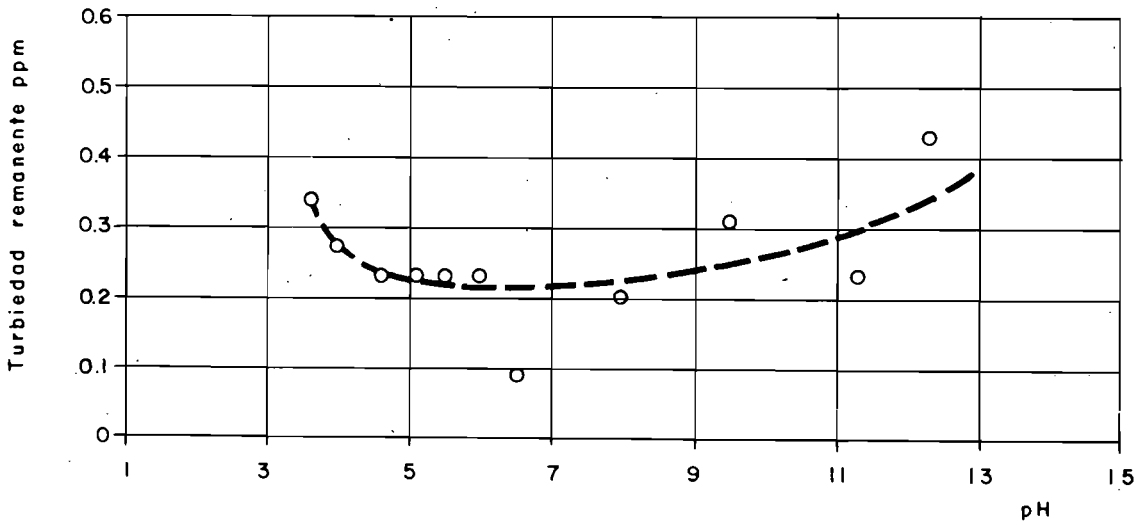
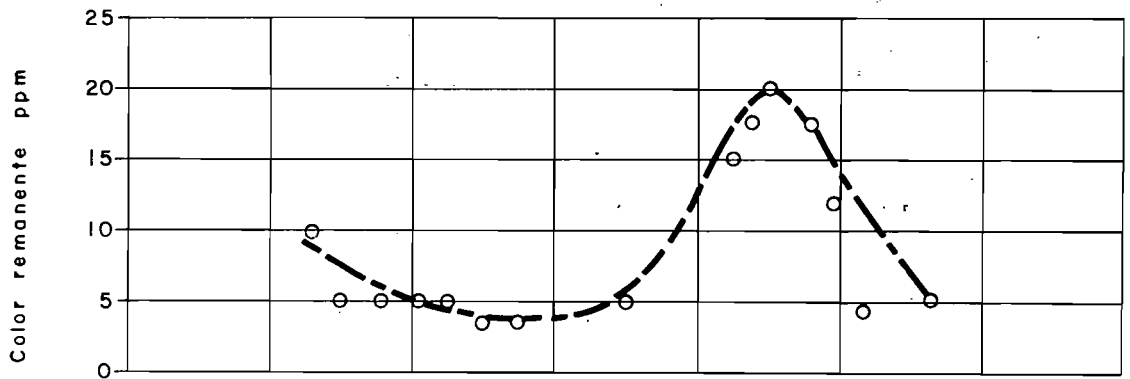


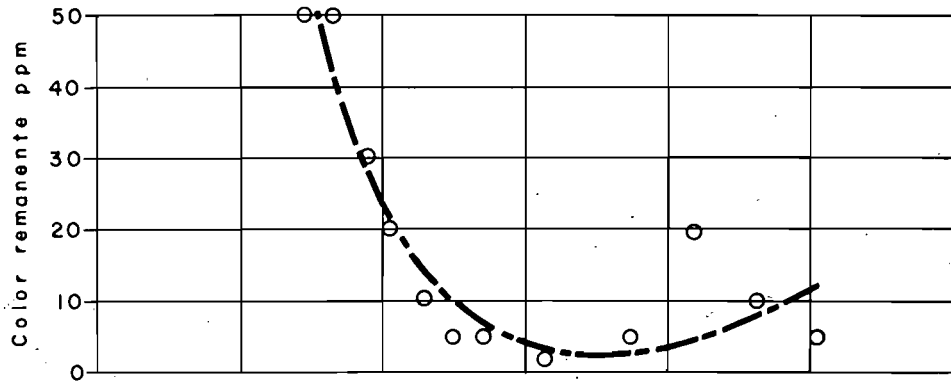
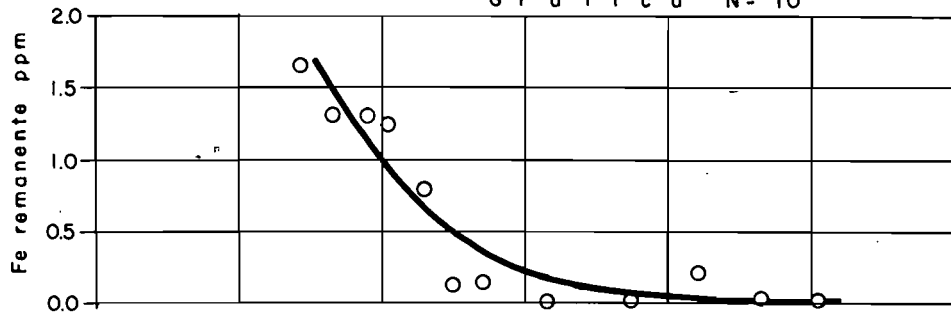
Gráfico Nº 9



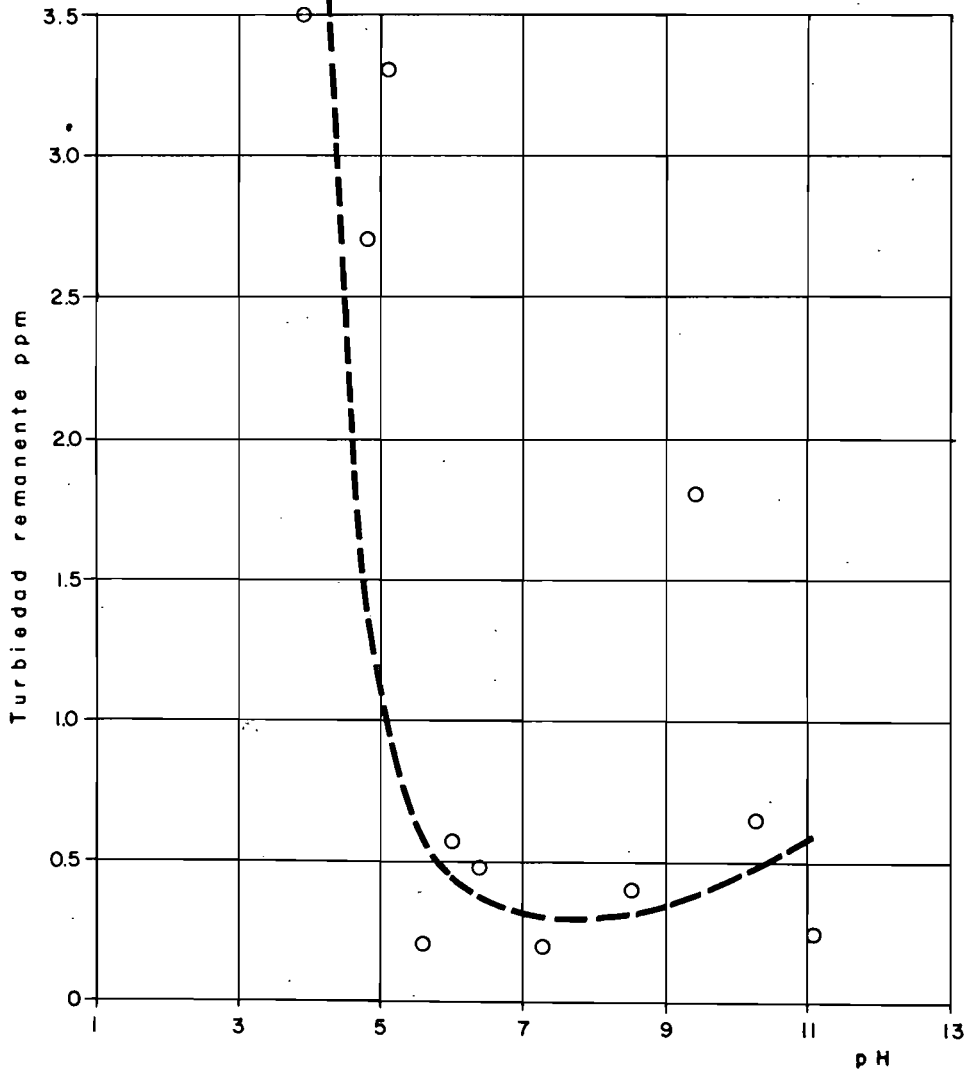
SULFATO DE ALUMINIO = 30 ppm



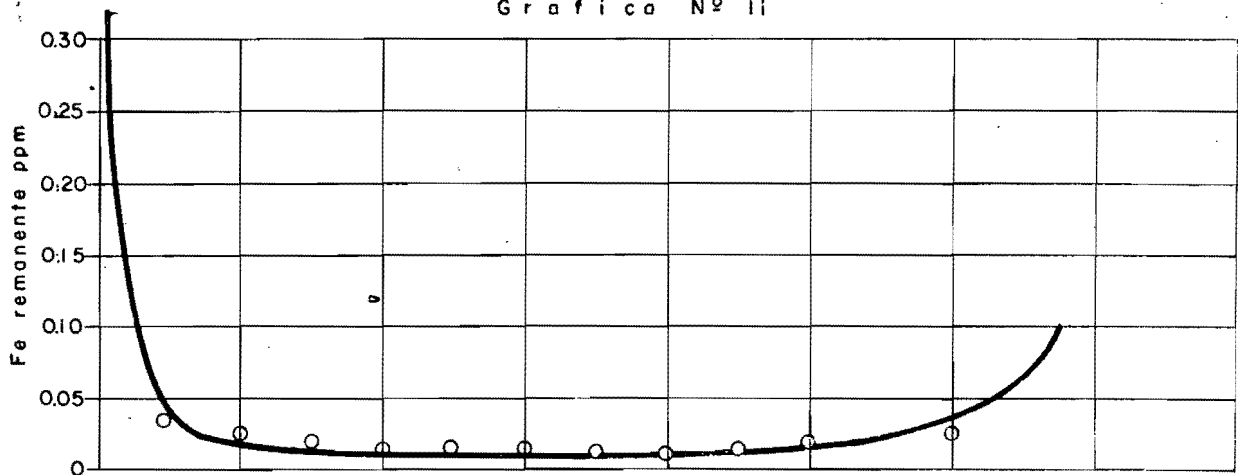
Gráfica Nº 10



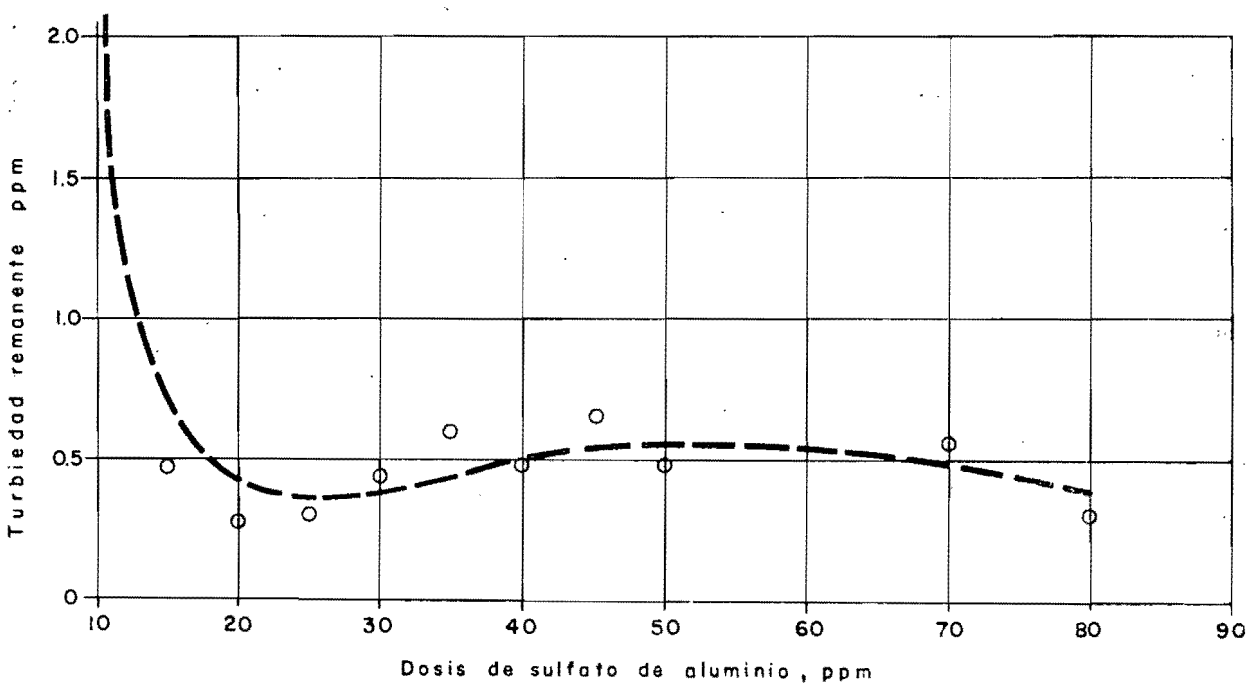
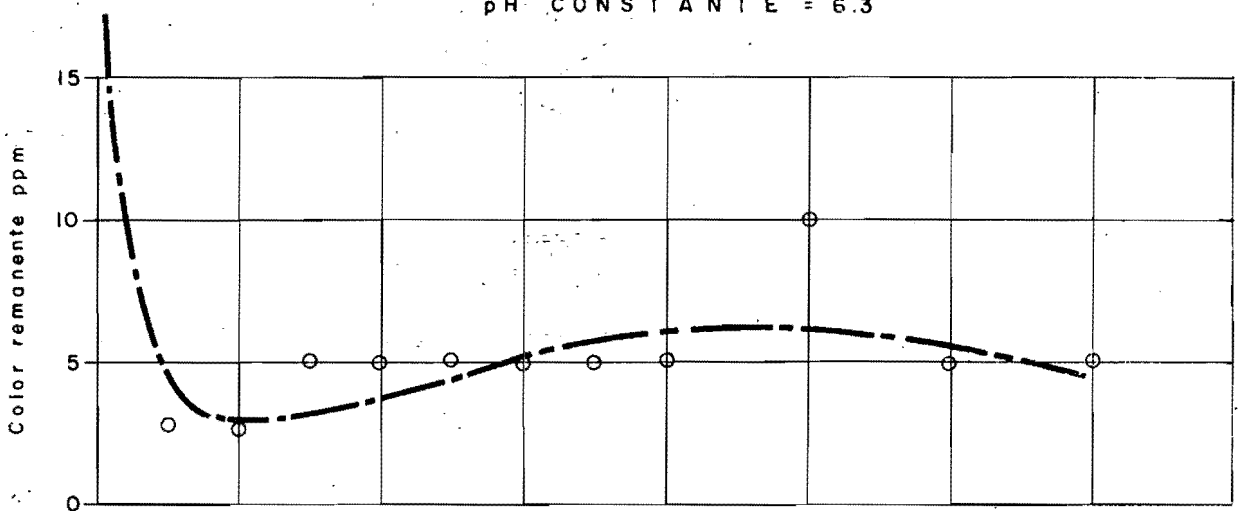
SULFATO FERRICO = 50 ppm



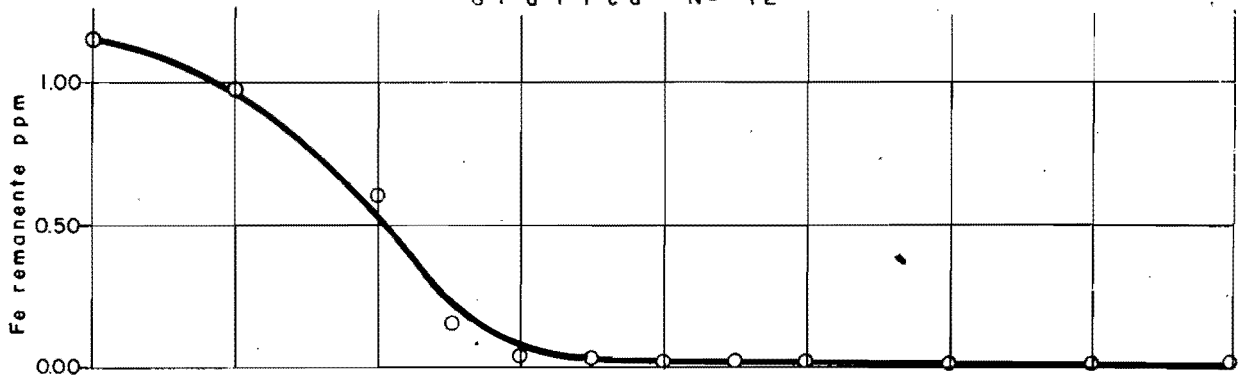
Gráfica Nº 11



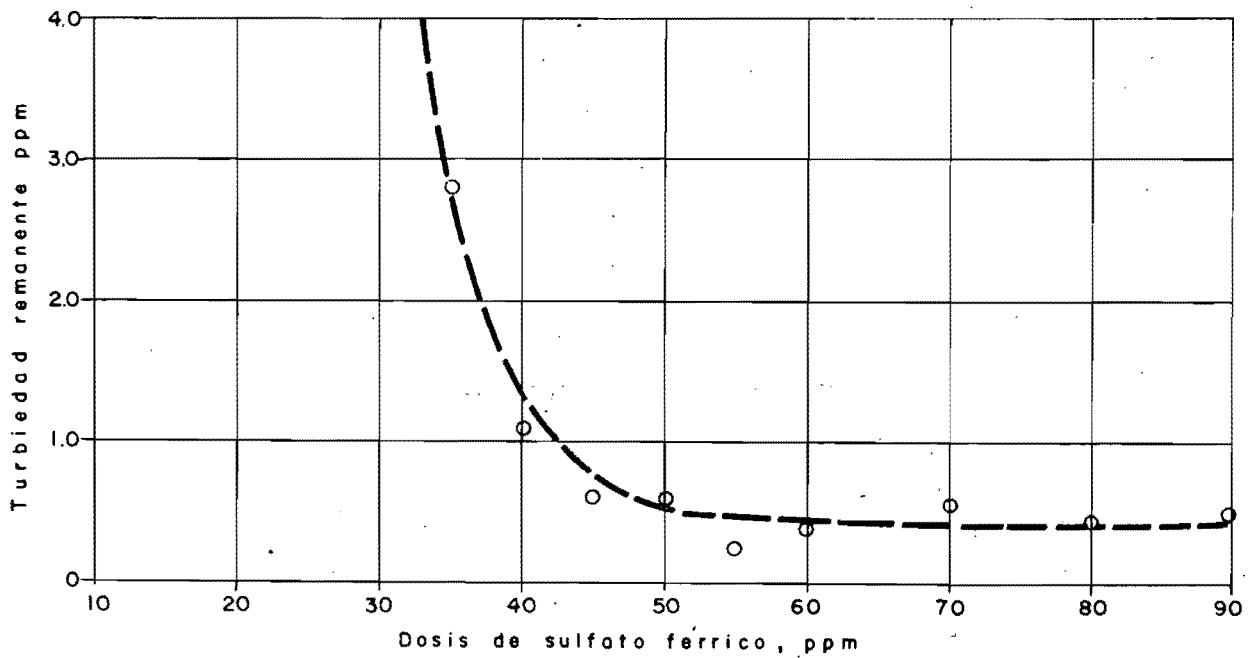
pH CONSTANTE = 6.3



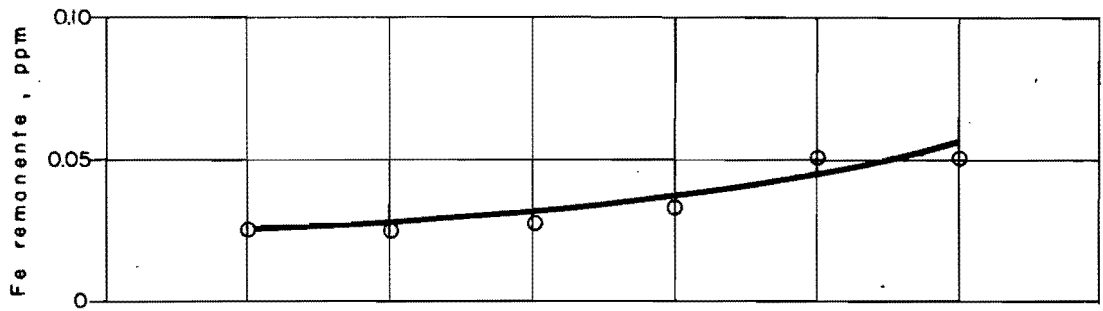
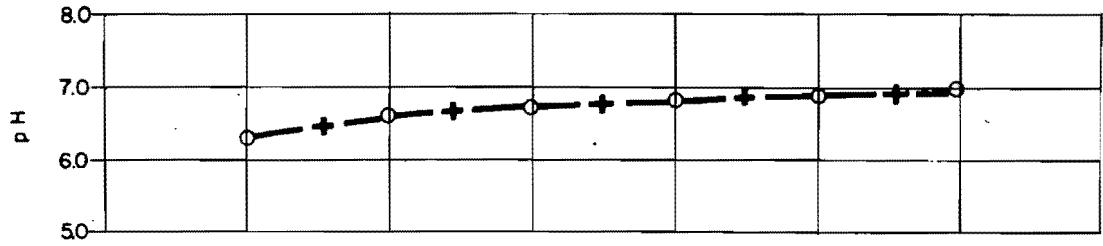
Gráfica Nº 12



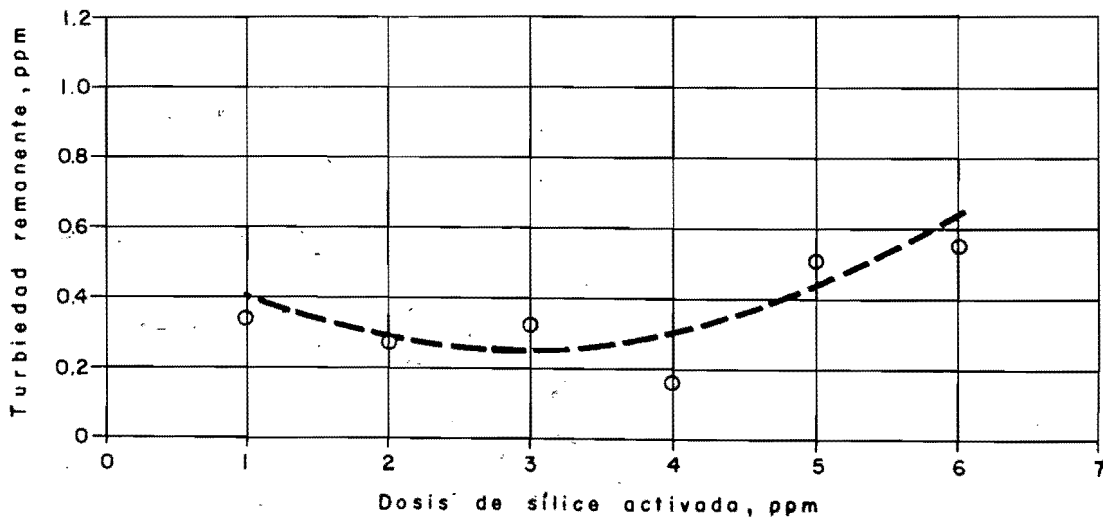
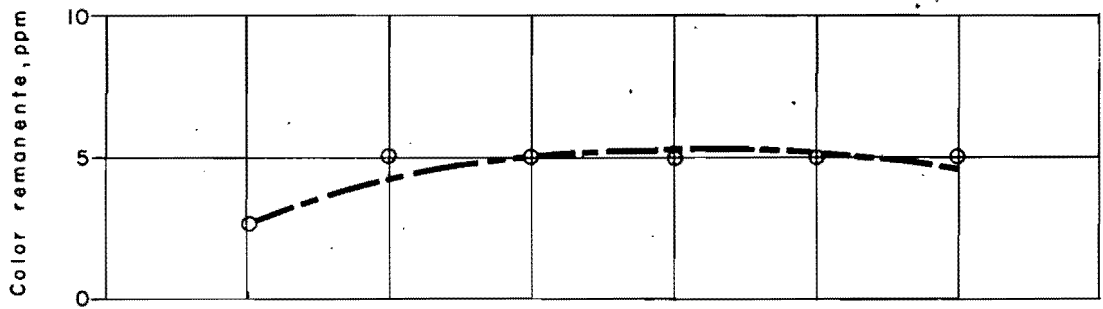
pH CONSTANTE = 7.5



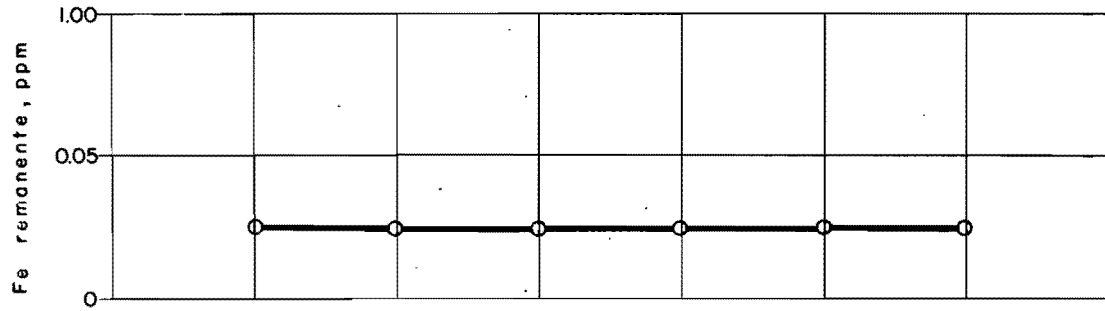
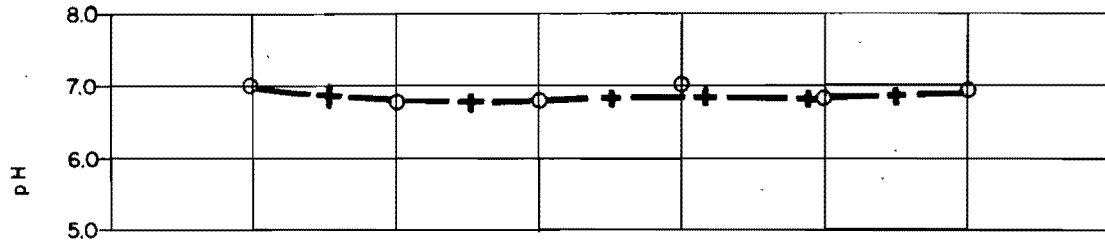
Gráfica Nº 13



SULFATO DE ALUMINIO = 30 ppm



Grafica Nº 14



SULFATO FERRICO = 50 ppm

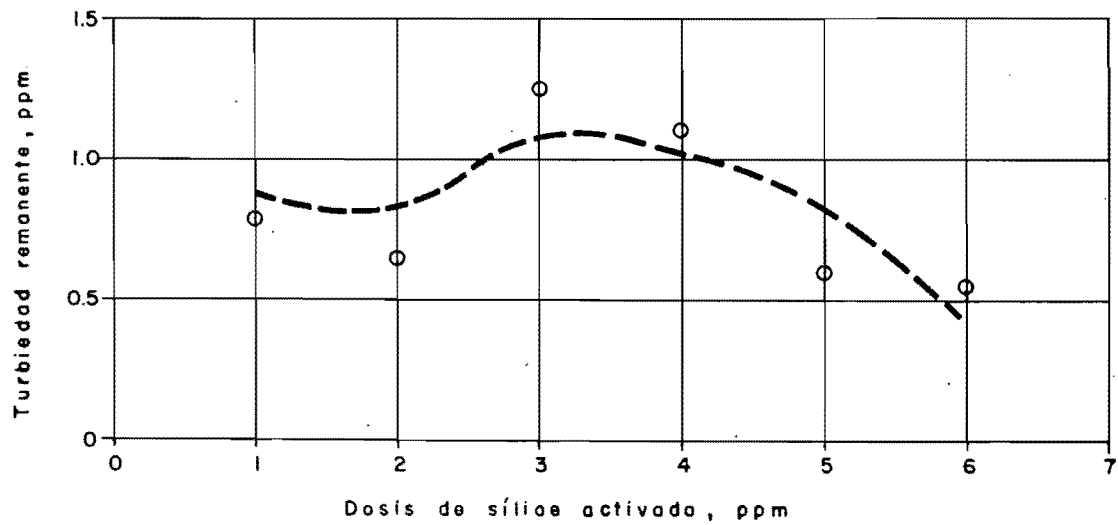
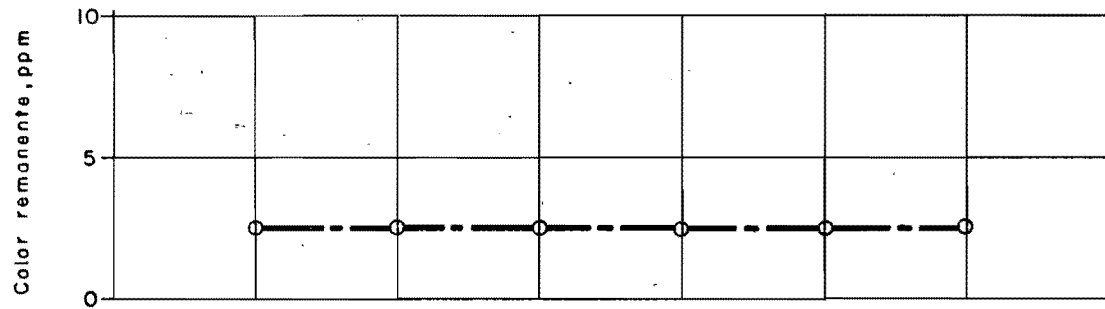
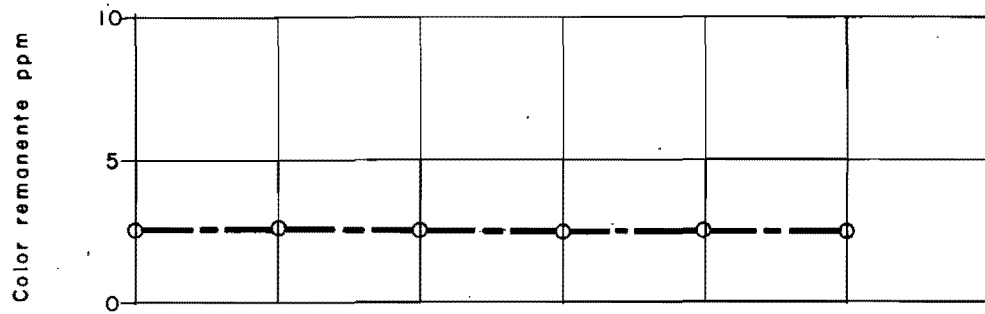
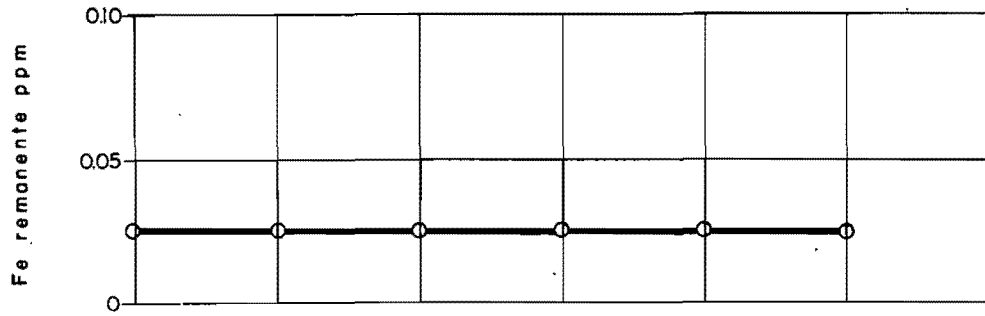


Gráfico N° 15



pH CONSTANTE = 6.3

SULFATO DE ALUMINIO = 15 ppm

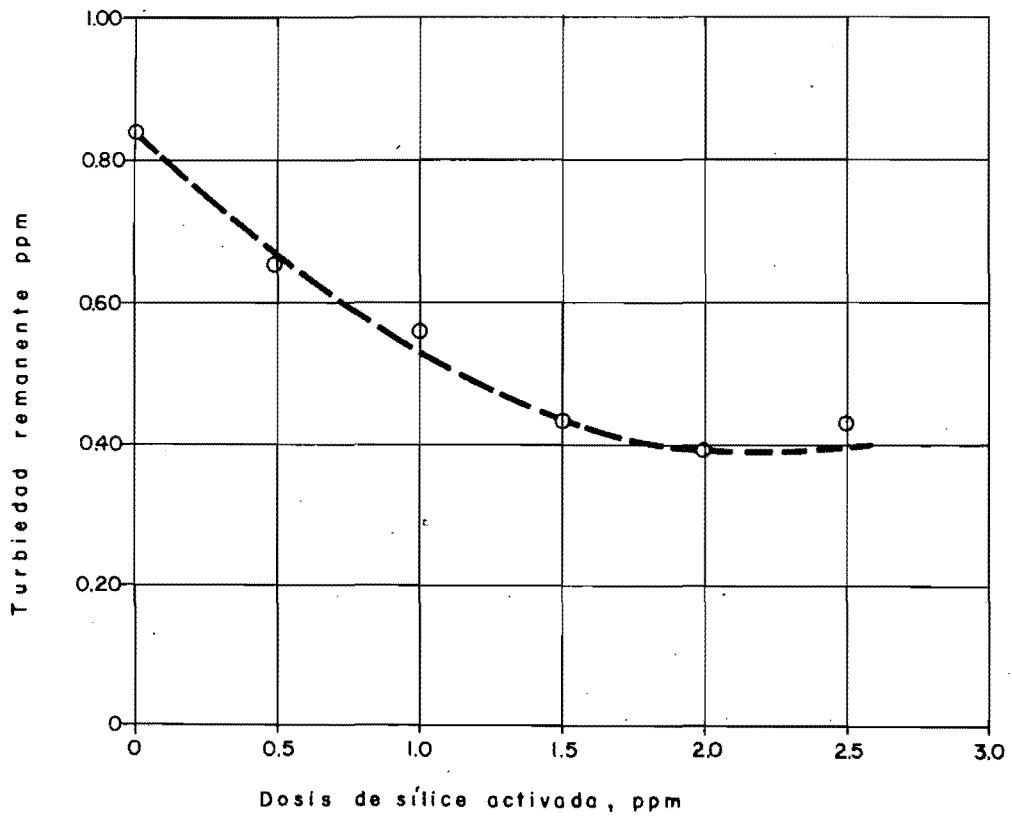
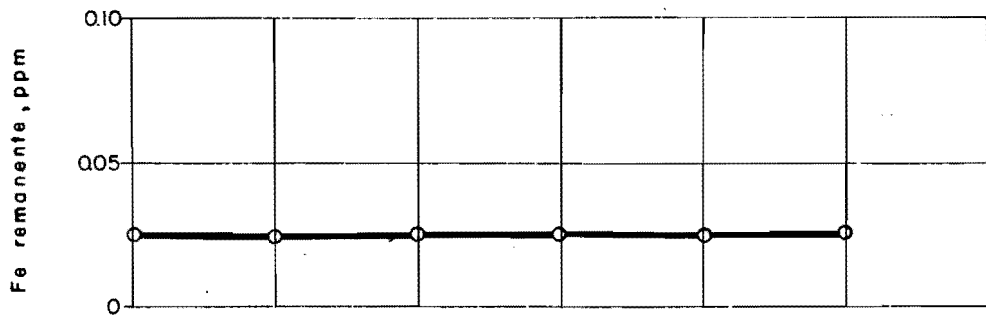




Gráfico Nº 16



SULFATO FERRICO = 40 ppm

pH CONSTANTE = 7.5

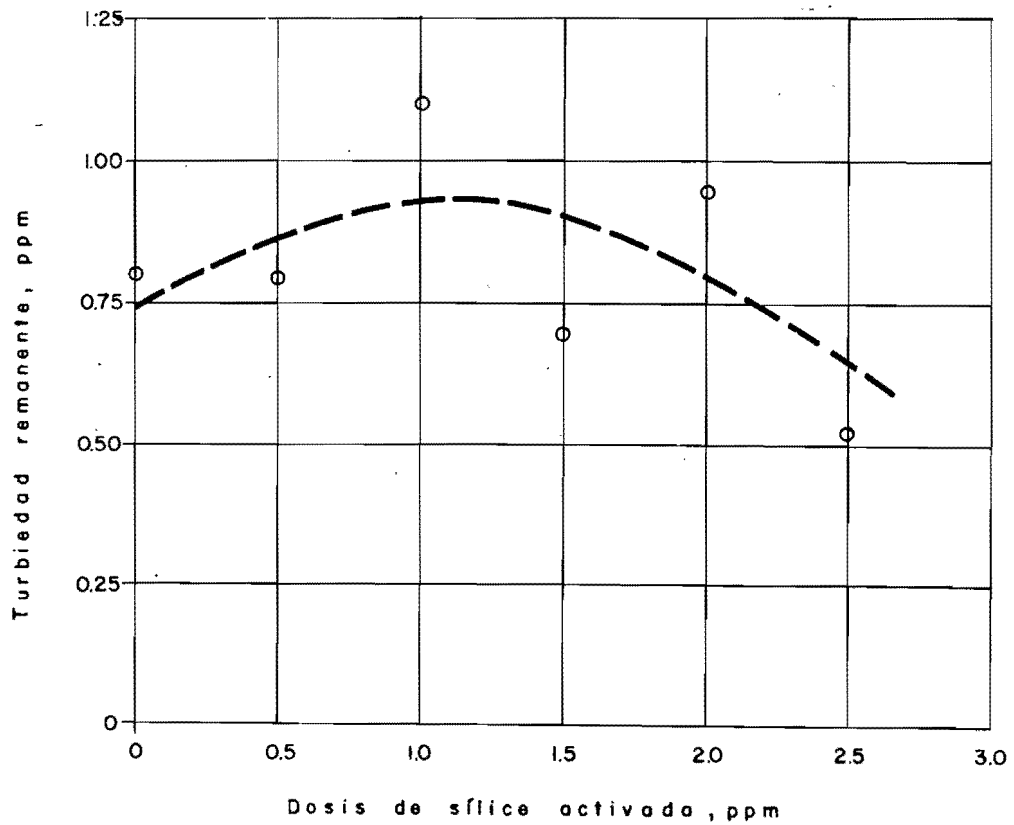
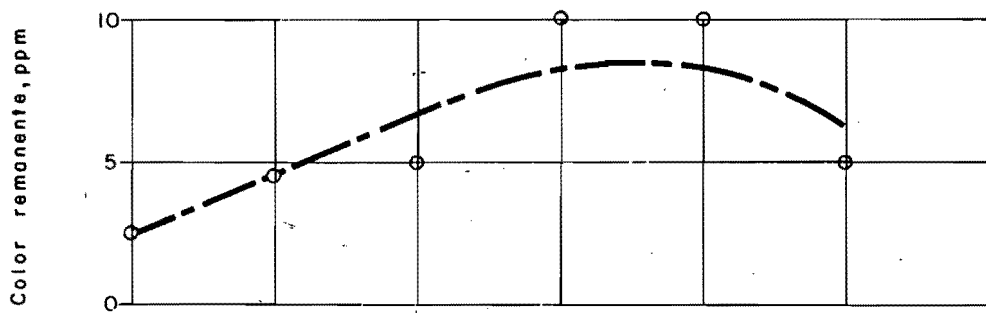
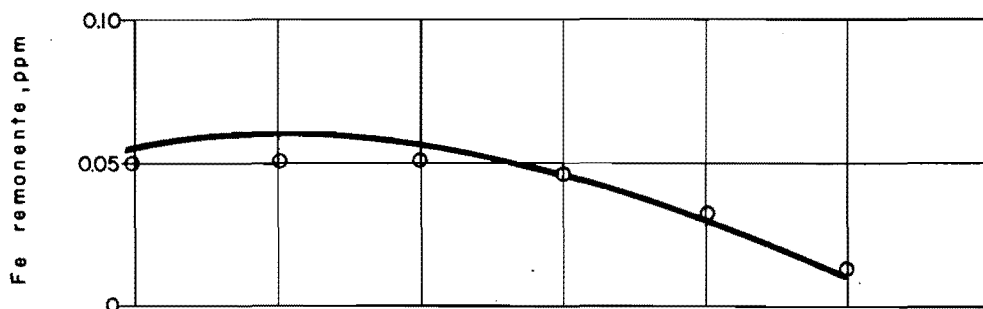
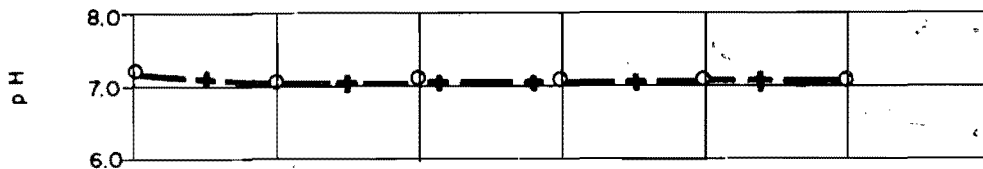
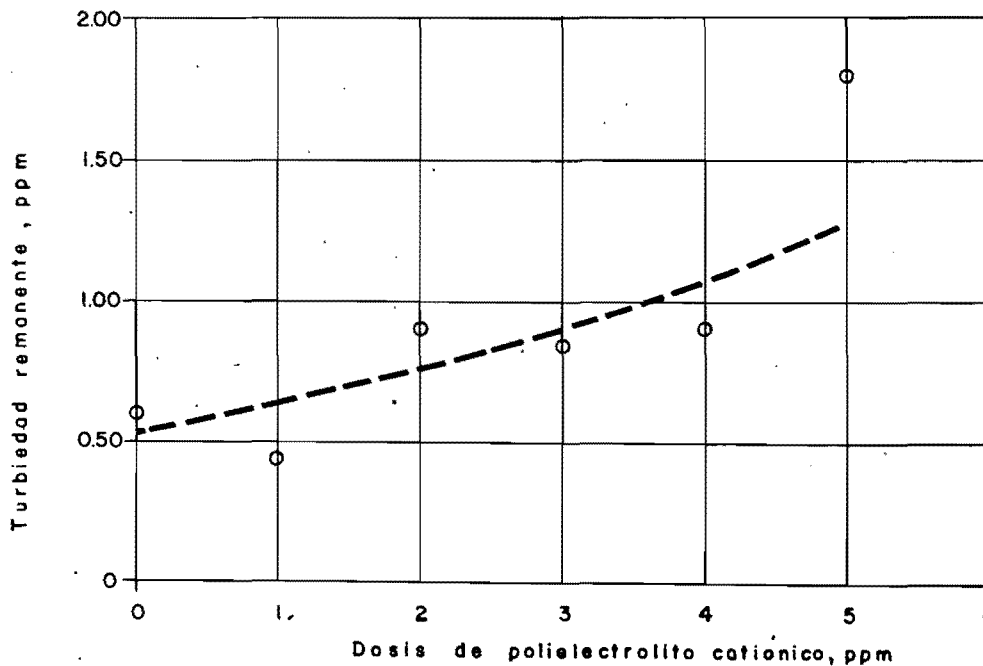
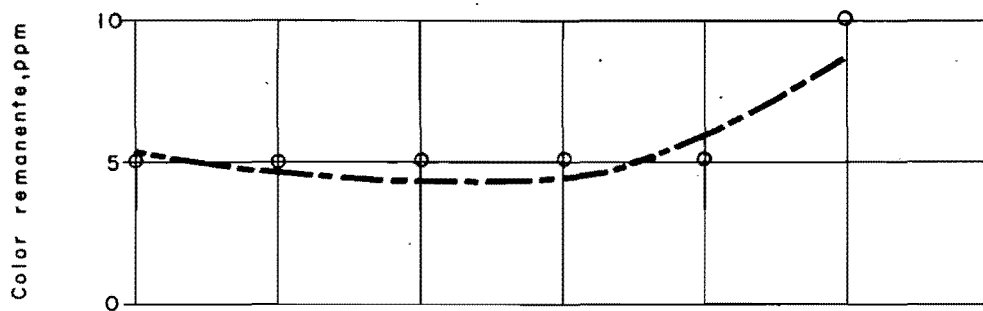


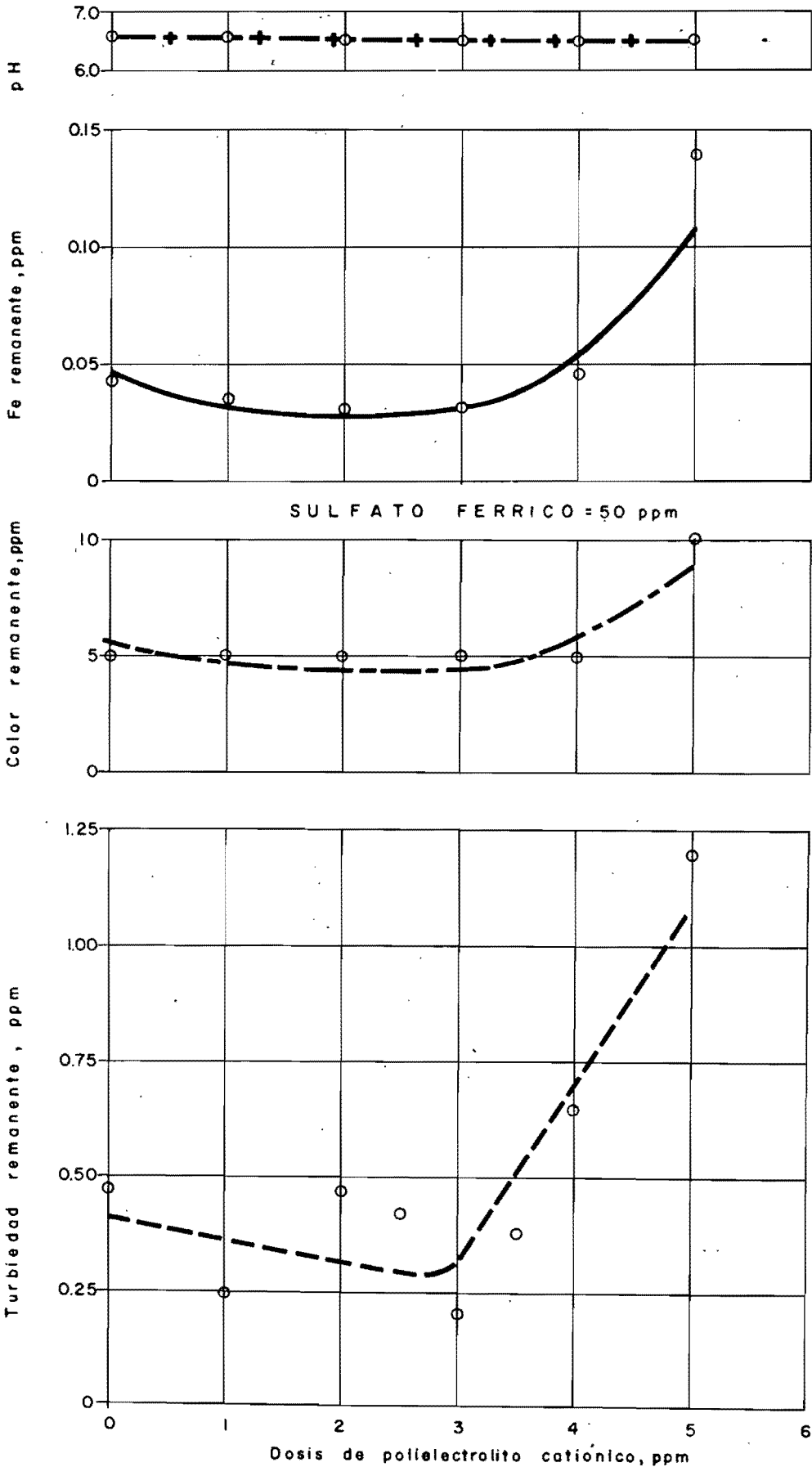
Gráfico N° 17



SULFATO DE ALUMINIO = 30 ppm



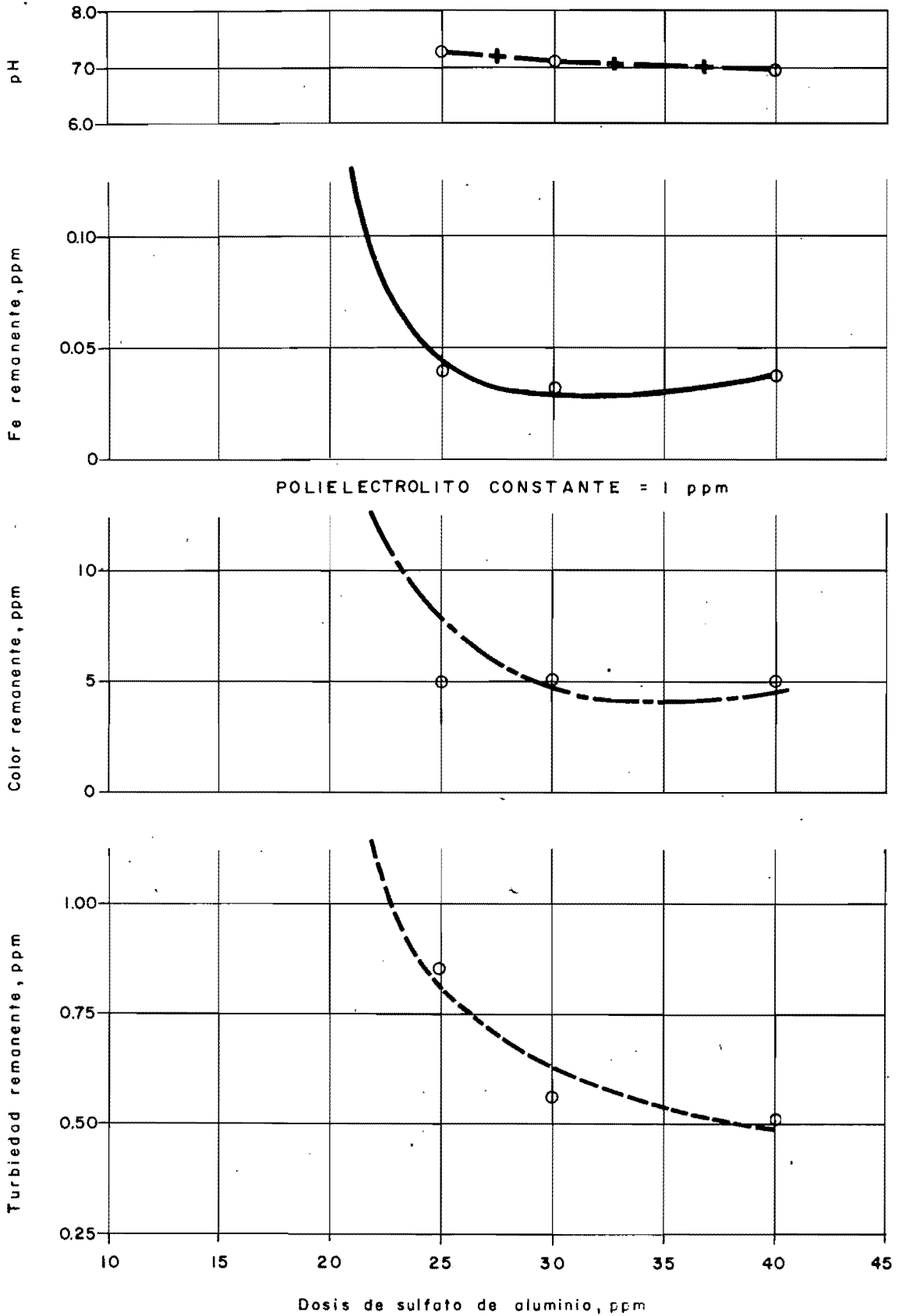
Gráfica N° 18



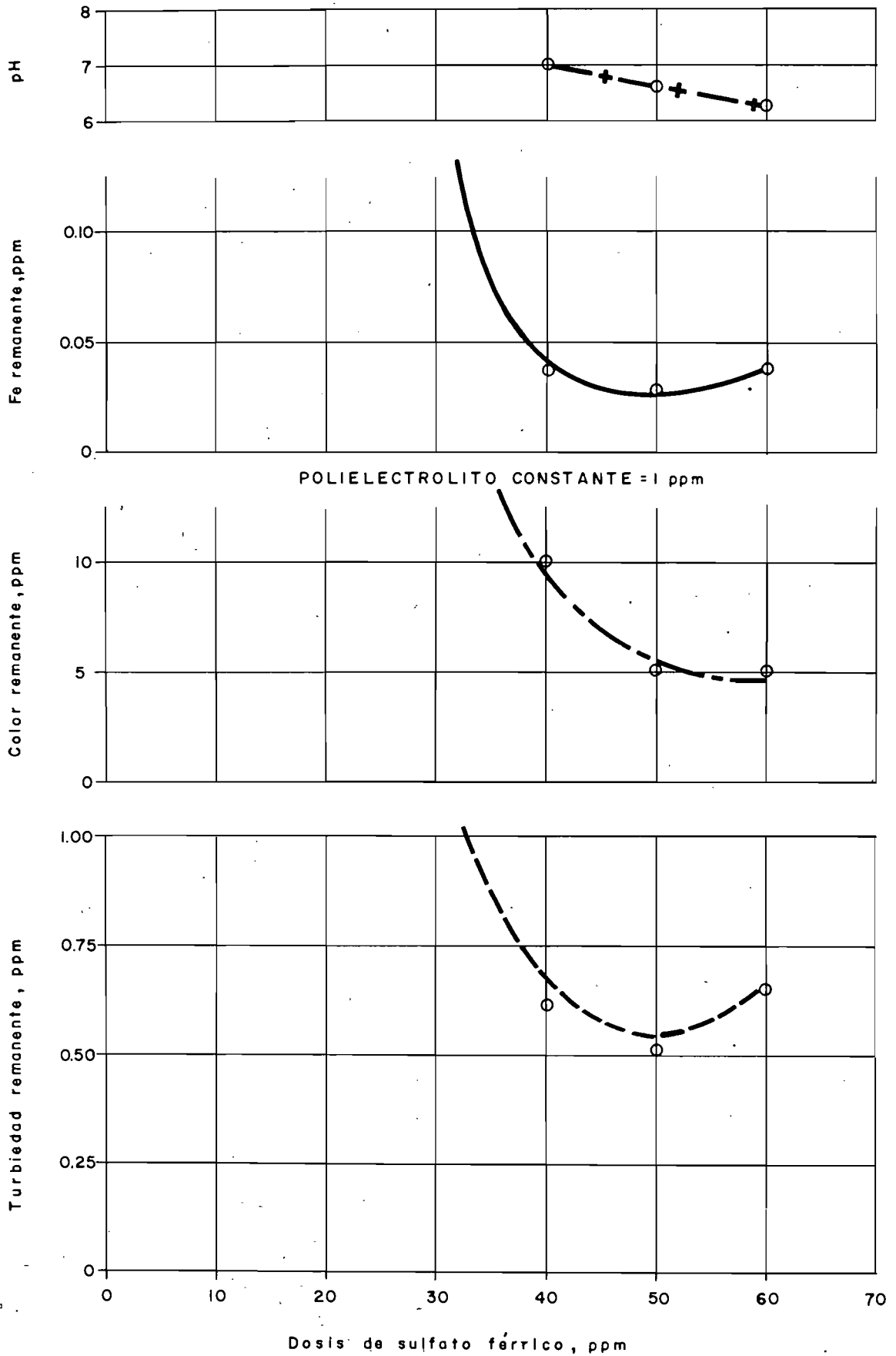
SULFATO FERRICO = 50 ppm



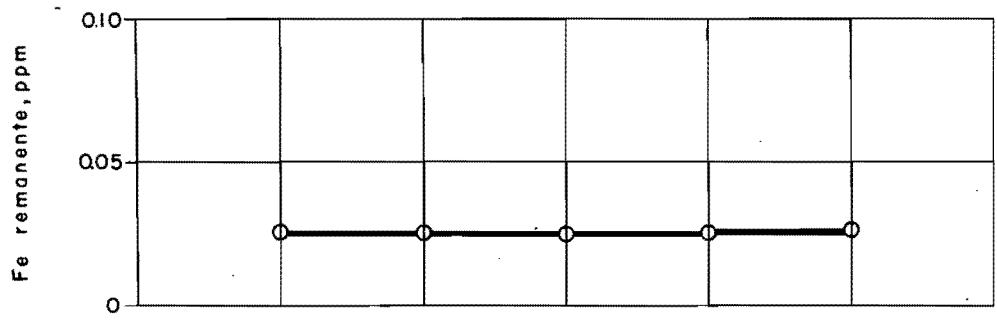
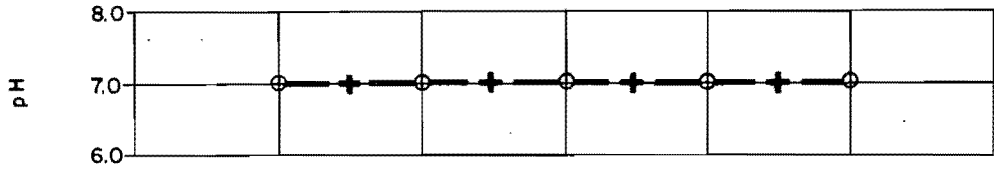
Gráfica Nº 19



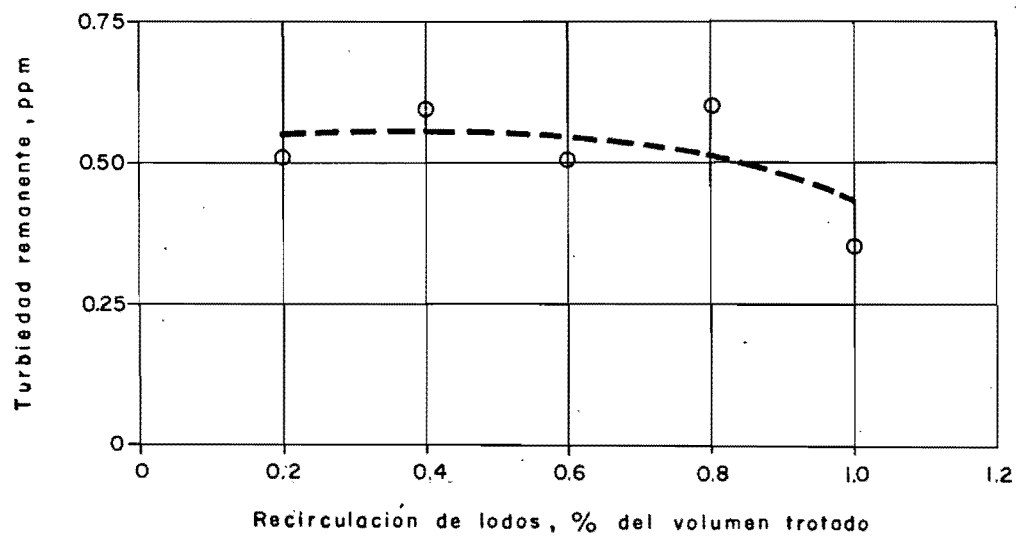
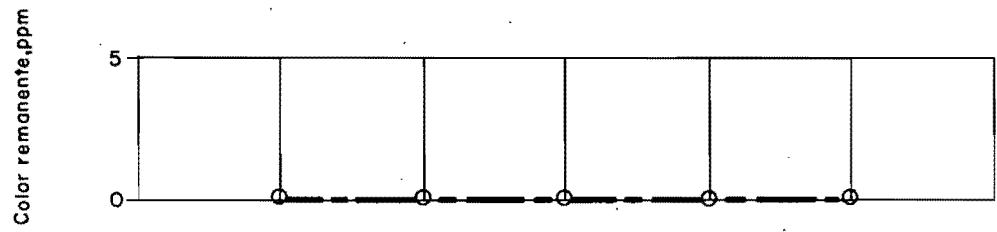
Gráfica N° 20



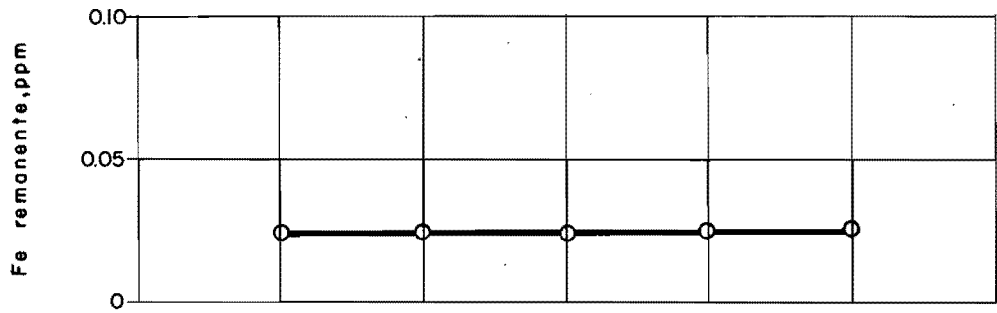
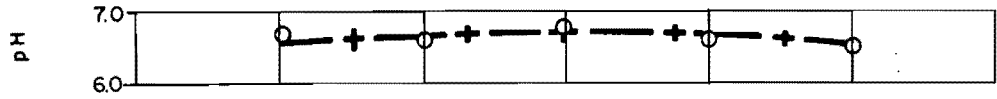
Gráfica Nº 21



PRECLORACION = 5 ppm  
SULFATO DE ALUMINIO = 30 ppm

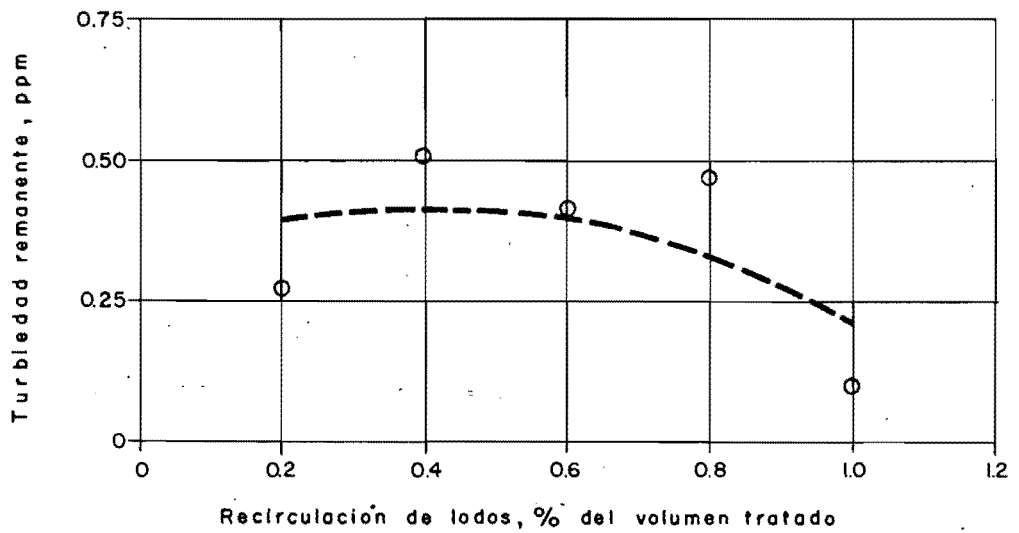
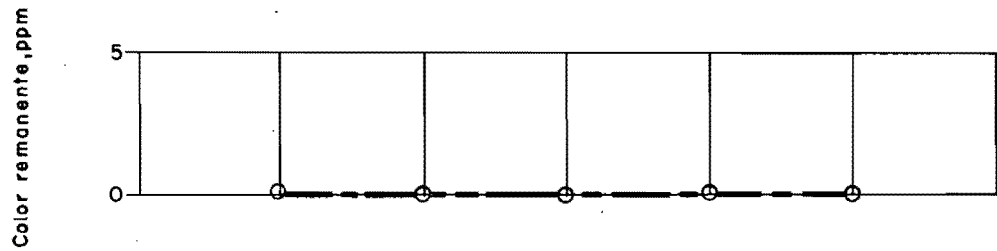


Gráfica Nº 22



PRECLORACION = 5 ppm

SULFATO FERRICO = 50 ppm



### 2.5.- Valoración de la agresividad de las aguas tratadas

Se hizo un estudio de la agresividad de las aguas con mejores resultados de coagulación, aceptando que el pH más conveniente para el proceso es el del agua natural.

Las pruebas elegidas fueron: C-28, D-42, K-121, K-127, M-146, M-152, O-172 y O-178. El estudio se realizó con base en las ecuaciones del Ing. Mach, para aguas en contacto con carbonato de calcio y cal hidratada. En ambos casos, se aplicó la ecuación(1) de Langelier, introduciendo los valores de  $[Ca^{++}]$  y  $[HCO_3^-]$  calculados con las ecuaciones de Mach. Los resultados obtenidos con Langelier son semejantes a los calculados con Mach.

En la página 86, se tiene el análisis químico necesario para aplicar las ecuaciones.

Las concentraciones iónicas de cada muestra se calcularon con

$$\mu = 0.5 \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2, \text{ pudiéndose utilizar el nomograma de la fig. 4.}$$

Los demás conceptos se calcularon con las ecuaciones siguientes:

tes:

$$s = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}}, \quad [H_2CO_3] = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_1^1}; \quad K_1^1 = 3.9 \times 10^{-7} \text{ para } 17^\circ C$$

$$y = \frac{1}{2}[HCO_3^-] + [H_2CO_3] = \text{const.}, \text{ invariante en las aguas en contacto con } CaCO_3.$$

$$y = [HCO_3^-] + [H_2CO_3] = \text{const. invariante en las aguas en contacto con } Ca(OH)_2; \quad [CO_3^{--}] \text{ es despreciable}$$



$$A = 3 [\text{cat}^{++}] + [\text{cat}^+] + [\text{aniones}^-]$$

$$D = 4 [\text{An}^-] - \frac{1}{2} [\text{cat}^+] + \frac{3}{2} [\text{An}^-]$$

$$Y = \frac{1}{3} (\mu - D) + \frac{4K'_2}{27K'_1 K'_s} (\mu - A) (\mu - D)^2$$

$$K_2^1 = 3.85 \times 10^{-11} \text{ para } 17^\circ\text{C}$$

$$K_s^1 = 5.03 \times 10^{-9} \text{ para } 17^\circ\text{C}$$

Por tanteos se calcula "Y" dando valores a  $\mu$ . "Y" debe ser igual a "y". La concentración iónica que haga que  $Y = y$ , indica el equilibrio del agua agresiva que sea con  $\text{CaCO}_3$  o con  $\text{Ca(OH)}_2$

Cálculo de  $\text{pH}_s$

$$\text{Mach: } \text{pH}_s = \log \frac{K'_s}{K'_2} - \log (\mu_e - A) - \log (\mu_e - D) + 2.5 S_e$$

$$\text{Langelier: } \text{pH}_s = \log \frac{K'_s}{K'_2} - \log [\text{Ca}^{++}]_e - \log [\text{HCO}_3^-]_e + 2.5 S_e$$

, y, A, D, Y,  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ ,  $[\text{HCO}_3^-]$  y  $[\text{Ca}^{++}]$  se expresan en  $10^{-3}$  moles/lit.



EQUILIBRIO DE LAS AGUAS EN CONTACTO CON CaCO<sub>3</sub>

Concepto	Prueba C-28		Prueba K-121		Prueba M-146		Prueba O-172	
	Prueba D-42		Prueba M-127		Prueba M-152		Prueba O-178	
<i>u</i>	1.858	2.013	1.749	1.884	1.626	2.07	1.832	2.09
S	0.0413	0.0429	0.0402	0.0416	0.0380	0.0435	0.0411	0.0437
[H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ]	0.163	0.325	0.107	0.164	0.123	0.205	0.147	0.146
Y	0.363	0.425	0.367	0.324	0.363	0.366	0.427	0.306
A	1.5	1.66	1.33	1.52	1.21	1.72	1.41	1.63
D	1.25	1.73	0.98	1.4	0.92	1.61	1.0	1.63
<i>u<sub>e</sub></i>	2.33	2.98	2.08	2.38	2.0	2.7	2.27	2.55
S <sub>e</sub>	0.0461	0.0519	0.0437	0.0467	0.0428	0.0494	0.0455	0.0481
pH <sub>S</sub> (Mach)	9.025	8.775	9.056	9.054	9.040	8.959	8.933	9.030
pH <sub>S</sub> (Lange- lier)	9.025	8.777	9.056	9.055	9.041	8.958	8.939	9.031

EQUILIBRIO DE LAS AGUAS EN CONTACTO CON  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Concepto	Prueba C-23	Prueba K-121		Prueba M-146		Prueba O-172		
		Prueba D-42		Prueba K-127		Prueba M-152	Prueba O-178	
<i>u</i>	1.858	2.013	1.749	1.884	1.626	2.07	1.832	2.09
S	0.0413	0.0429	0.0402	0.0415	0.0388	0.0435	0.0411	0.0437
[ $\text{H}_2\text{CO}_3$ ]	0.163	0.325	0.107	0.164	0.123	0.206	0.147	0.146
y	0.563	0.525	0.627	0.484	0.603	0.526	0.707	0.466
A	1.5	1.66	1.33	1.52	1.21	1.72	1.41	1.68
D	1.25	1.73	0.98	1.4	0.92	1.61	1.0	1.63
<i>u<sub>e</sub></i>	2.92	3.27	2.82	2.83	2.69	3.16	3.06	3.01
<i>S<sub>e</sub></i>	0.0513	0.0541	0.0504	0.0505	0.0493	0.0532	0.0525	0.0521
pH <sub>s</sub> (M)	8.617	8.604	8.552	8.717	8.568	8.648	8.464	8.729
pH <sub>s</sub> (L)	8.617	8.604	8.552	8.717	8.568	8.648	8.464	8.730

### 2.6.- Selección del proceso más adecuado de tratamiento.

El equilibrio de las aguas con  $\text{CaCO}_3$  se incluye con fines - ilustrativos, considerándose que en la práctica, la estabilización química de aguas clarificadas se haga por medio de cal hidratada, que es un producto económico y fácil de dosificar. Con base en esto, se analizaron los resultados de los  $\text{pH}_s$  que necesitarían alcanzar las ocho muestras para estar en equilibrio químico, eligiéndose la O-172, que tiene el índice de saturación menor en valor absoluto, lo que implica menor consumo de cal hidratada. Al elegir - con esta prueba el proceso más viable de coagulación, se tendrá un ahorro en la inversión inicial y de operación que requerirían una planta con dosificación de co-coagulantes.

La aplicación de lodos en el paso de floculación en la época de estiaje a principio de época de lluvias, quedaría sujeta a los resultados de pruebas de laboratorio con muestras de agua de esas épocas.

### 2.7.- Estabilización química del agua tratada

Agua tratada según la prueba (O-172), contacto con  $\text{Ca(OH)}_2$ , se tiene:

$$\text{pH}_s = 8.464$$

$$\mu e = 3.06 \times 10^{-3} \text{ moles/litro}$$

$$A = 1.41 \times 10^{-3} \text{ moles/litro}$$

$$D = 1.00 \times 10^{-3} \text{ moles/litro}$$

Calcio total al alcanzar el equilibrio

$$[\text{Ca}^{++}]_e = \frac{1}{3} (\mu_e - A) = \frac{1}{3} (3.06 \times 1.41) \times 10^{-3} = 0.55 \times 10^{-3} \frac{\text{moles}}{\text{lt}}$$

Calcio en el agua agresiva =  $0.14 \times 10^{-3}$  moles/lt

Calcio necesario para alcanzar el equilibrio =  $0.41 \times 10^{-3}$  moles/lt

Bicarbonatos totales al alcanzar el equilibrio:

$$[\text{HCO}_3^-]_e = \frac{2}{3} (\mu_e - D) = \frac{2}{3} (3.06 - 1.00) \times 10^{-3} = 1.372 \times 10^{-3} \frac{\text{moles}}{\text{lt}}$$

Bicarbonato en el agua agresiva =  $0.56 \times 10^{-3}$  moles/lt

Bicarbonato necesario para alcanzar el equilibrio :  $0.812 \times 10^{-3}$   
 $\frac{\text{moles}}{\text{lt}}$

Comprobación:

$$\mu_e = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 = \frac{1}{2} (2.20 + 0.88 + 0.523 + 1.372 + 0.916 + 0.225) \times 10^{-3}$$

$$\mu_e = 3.058 \times 10^{-3} \text{ moles/lt}$$

Cantidad de cal hidratada necesaria para alcanzar el equilibrio químico:

$$0.41 \text{ m mol/lt} \times 2 \text{ meq} \times 37 = 30.4 \text{ mg/lt} \div 30 \text{ ppm}$$

### Estabilización del agua tratada por pruebas en laboratorio

Se determinó la cantidad de cal que hay que agregarle a la muestra de la prueba 0.172 para obtener el equilibrio químico entre las concentraciones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{--}$ .

Con base en el cálculo teórico, que nos indica una cantidad de cal hidratada de 30 ppm, para alcanzar el pH de 8.5 aproximadamente,

se procedió a hacer varios ensayos con volúmenes de muestra de 250 ml, agregando cantidades crecientes de cal hidratada a cada volumen. Enseguida se determinó el pH y la alcalinidad total. Se agregaron después 5 gramos de  $\text{CaCO}_3$  (Q.P.), agitando intermitentemente durante 24 horas, al cabo de las cuales se determinó el pH y la alcalinidad total. En la tabla de la pág. 92 se indican los resultados obtenidos, y en la figura 7 se señala la dosis de cal que estabiliza químicamente el agua tratada.

Los resultados son:  $\text{Ca(OH)}_2$  necesaria = 35 ppm  
 $\text{pH}_s = 8.9$

La diferencia entre el pH calculado y el pH de ensayo hace meditar sobre la conveniencia de continuar los ensayos para calificar exactamente la bondad del procedimiento teórico, al compararlo con los resultados de laboratorio. Los ensayos de laboratorio deberán hacerse lo más numerosos posible, a fin de tener suficientes datos para fijar el error máximo permisible en estas determinaciones.

Desde el punto práctico, las diferencias en los valores encontrados por cálculo y por ensayo en laboratorio se juzgan aceptables.

### 3.- Sugerencias para el proyecto de las unidades de tratamiento de una planta, con base en el estudio realizado

Las características primordiales del agua de la presa "El Jihuite", color y hierro, determinaron un proceso de coagulación con sulfa-

Determinación de la dosis de cal hidratada necesaria para estabilizar el agua de la prueba O-172.

Muestra	dosis cal	pH		alcalinidad		diferencia de alcalinidades	Característica del agua
		antes de CaCO <sub>3</sub>	después de CaCO <sub>3</sub>	antes de CaCO <sub>3</sub>	después de CaCO <sub>3</sub>		
1	15	9.00	8.70	36	46	- 10	corrosiva
2	20	9.10	8.80	40	50	- 10	corrosiva
3	25	9.15	8.90	44	52	- 8	corrosiva
4	30	9.20	8.90	44	46	- 2	corrosiva
5	35	9.30	8.90	44	38	+ 6	incrustante
6	40	9.40	9.00	48	36	+ 12	incrustante
7	45	9.60	9.05	48	32	+ 16	incrustante
8	50	9.70	9.20	52	28	+ 24	incrustante
9	55	9.90	9.25	56	28	+ 28	incrustante
10	60	10.10	9.60	64	36	+ 28	incrustante
11	65	10.10	9.60	72	36	+ 36	incrustante



to de aluminio, con cloración previa y con recirculación de lodos sedimentados al paso de floculación, debiendo realizarse el proceso entre un pH 6.3 y 7.0 aproximadamente. Como complemento al proceso principal, será necesario estabilizar las aguas con cal hidratada después del paso de sedimentación.

Por otra parte, tratándose de aguas superficiales, en que sus concentraciones de materia suspendida coloidal tiene fluctuaciones de acuerdo a la época del año, se piensa en la ventaja de llevar al cabo este tratamiento por medio de unidades convencionales, en que cada proceso unitario se haga en unidades independientes, capaces de manejar las aguas con variaciones en las concentraciones de los índices principales. En particular, esto cobra peso, al necesitarse una etapa de estabilización que debe establecerse en una etapa posterior a la de clarificación,

De acuerdo a los pasos fijados en las pruebas de coagulación, se hacen las siguientes recomendaciones para elaborar un proyecto de planta potabilizadora.

. La precloración deberá hacerse antes de la etapa de mezcla rápida, a fin de permitir un tiempo de contacto entre el cloro y el agua de por lo menos 3 minutos.

. La dosificación de sulfato de aluminio se haría por medición en seco y aplicación en solución. Concentración recomendada: 10%.

La mezcla rápida deberá hacerse en forma casi instantánea en un tanque con un volumen tal que el tiempo de retención no exceda de 1 minuto.

La floculación, coagulación ortocinética de los micelios formados en la coagulación electrocinética, requiere de un diseño muy cuidadoso, ya que este paso puede considerarse como clave para la eficiencia total de la planta.

En las pruebas, se hizo la mezcla lenta por medio de un agitador mecánico de eje vertical, con una paleta de 7.6 y 2.54 cm de sección, utilizando recipientes de 133 cm<sup>2</sup> aproximadamente de sección, con un volumen de muestra de 1000 cm<sup>3</sup>.

La velocidad lineal de la paleta es:

$$v_p = \frac{2\pi r N}{60} \quad \begin{array}{l} N = 20 \text{ rpm} \\ r = \text{radio de la paleta} = 3.8 \text{ cm} \end{array}$$

$$v_p = 0.105 \times 0.038 \text{ m} \times 20 = 0.076 \text{ m/seg}$$

La velocidad relativa entre la paleta y el agua es:

$$v_r = 0.75 \times v_p = 0.057 \text{ m/seg}$$

$$\text{Gradiente de velocidad: } G = \left( \frac{C_D \cdot A \times v^3}{2 \cdot V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

en donde:

$C_D$  = coeficiente de arrastre = 1.8 para paletas planas

$A$  = área de la paleta = 19.3 cm<sup>2</sup>

$v$  = velocidad relativa = 5.7 cm/seg

$\nu$  = viscosidad cinemática =  $1.092 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/seg a 17°C

V = volumen del recipiente = 1000 cm<sup>3</sup>

$$G = \left( \frac{1.8 \times 19.3 \times 5.7^3}{2 \times 1.092 \times 10^{-2} \times 10^3} \right)^{\frac{1}{2}} = 17 \text{ l/seg}$$

Este valor del gradiente de velocidad será base para ajustar el mecanismo de floculación a escala industrial, con miras a variar el gradiente entre un valor óptimo de 30 a 60 l/seg a un valor entre 10 y 20 l/seg al final del periodo de floculación, de acuerdo a la sección del tanque y al área de las paletas o turbina.

La etapa de sedimentación fue exitosa en todas aquellas pruebas en que hubo formación de flóculos, teniéndose un tiempo máximo de 30 minutos para una óptima sedimentación.

A escala industrial se recomienda un tiempo no menor de 90 minutos, debido a las condiciones especiales que guardan estas unidades en cuanto a forma, corrientes de corta trayectoria, corrientes de convexión, dispositivos de entrada y salida, etc. Realmente en el laboratorio la sedimentación se hizo en condiciones más o menos ideales.

Para la recirculación de lodos se sugiere aprovechar la extracción de los mismos por presión hidrostática, para derivar el 0.6% aproximadamente del gasto, aplicándolos por medio de un inyector hidráulico en el inicio del proceso de floculación. El control

del volumen de lodos por recircular se puede hacer por medio de un rotámetro de paso directo.

La estabilización con cal hidratada necesariamente se hará después de la sedimentación a fin de permitir que la coagulación se lleve al cabo a un pH ligeramente ácido, sin requerirse alcalinidad natural para que tenga lugar la acción hidrolítica del coagulante.

Se sugiere un tiempo de contacto del agua con la cal de unos 30 minutos antes de pasar a los filtros. Como protección adicional se deberá aplicar hexametáfosfato de sodio 1 ppm como máximo, antes de los filtros.

Tratándose de un agua superficial que puede llegar a tener una fuerte variación en sus índices de E. Coli, se recomienda un diseño para filtros de manera de tener una eficiencia bacteriológica alta.

La velocidad de filtración no deberá exceder de  $1.5 \text{ lps/m}^2$

Aunque en los resultados de laboratorio se detectó cloro residual después del paso de sedimentación, se recomienda post-clorar el agua como protección contra una posible contaminación después de la salida de la planta.

#### 4.- Costo del tratamiento

Resumen de costos de productos químicos para la potabilización

de las aguas de la presa "El Jihuite"

Producto	Dosis	P.U.	costo/m <sup>3</sup>
Cloro (precloración)	5 gr/m <sup>3</sup>	\$ 4.00/Kg	\$ 0.02/m <sup>3</sup>
Sulfato de aluminio	30 gr/m <sup>3</sup>	\$ 1.10/Kg	\$ 0.033/m <sup>3</sup>
Cal hidratada	30 gr/m <sup>3</sup>	\$ 0.20/Kg	\$ 0.006/m <sup>3</sup>
Hexametafosfato de sodio	1 gr/m <sup>3</sup>	\$ 5.50/Kg	\$ 0.006/m <sup>3</sup>
Cloro (postcloración)	1 gr/m <sup>3</sup>	\$ 4.00/Kg	\$ 0.004/m <sup>3</sup>
		Suma:	\$ 0.069/m <sup>3</sup>

Costo por consumo de productos químicos para la coagulación, esta-  
bilización y desinfección: \$ 0.07/m<sup>3</sup>

##### 5.- Conclusiones

. Las pruebas de coagulación proporcionan los suficientes datos para establecer racionalmente el proceso de tratamiento de un agua y el diseño de las unidades involucradas.

. Con las pruebas de coagulación se puede determinar cuál de las acciones del coagulante: permutación o hidrolítica, es predominante y de mejores efectos, para fijar el orden de adición de productos químicos.

. Tanto el sulfato de aluminio como el sulfato férrico, coagulantes seleccionados para este estudio, probaron su bondad en la coa

gulación, comprobándose una vez más el porqué de su amplia difusión en este campo, sin dejar de reconocer que siempre será conveniente ensayar con otros productos.

Los estudios de esta naturaleza deben complementarse con estudios de electroforesis; a fin de determinar la carga de las partículas coloidales en la zona de óptima coagulación.

El estudio de coagulación es base para la investigación de proceso de floculación y sedimentación en unidades con diseños específicos.

El método teórico del Ing. Mach para determinar la agresividad del  $\text{CO}_2$  en las aguas clarificadas, se podrá comparar con pruebas de laboratorio, siempre que estas se hagan en gran número, a fin de determinar parámetros que nos indiquen desviaciones o errores máximos, etc.

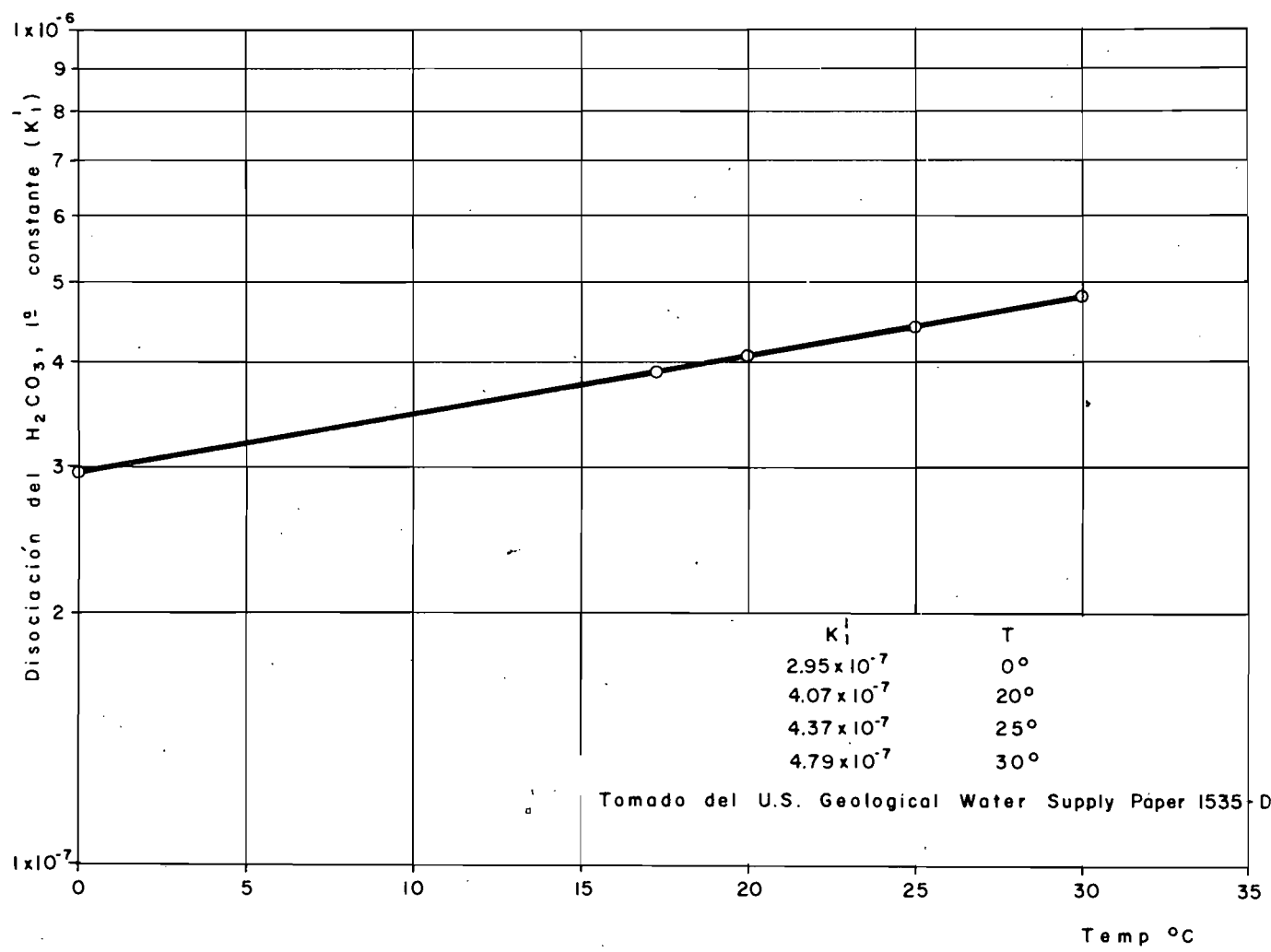


Fig. 1

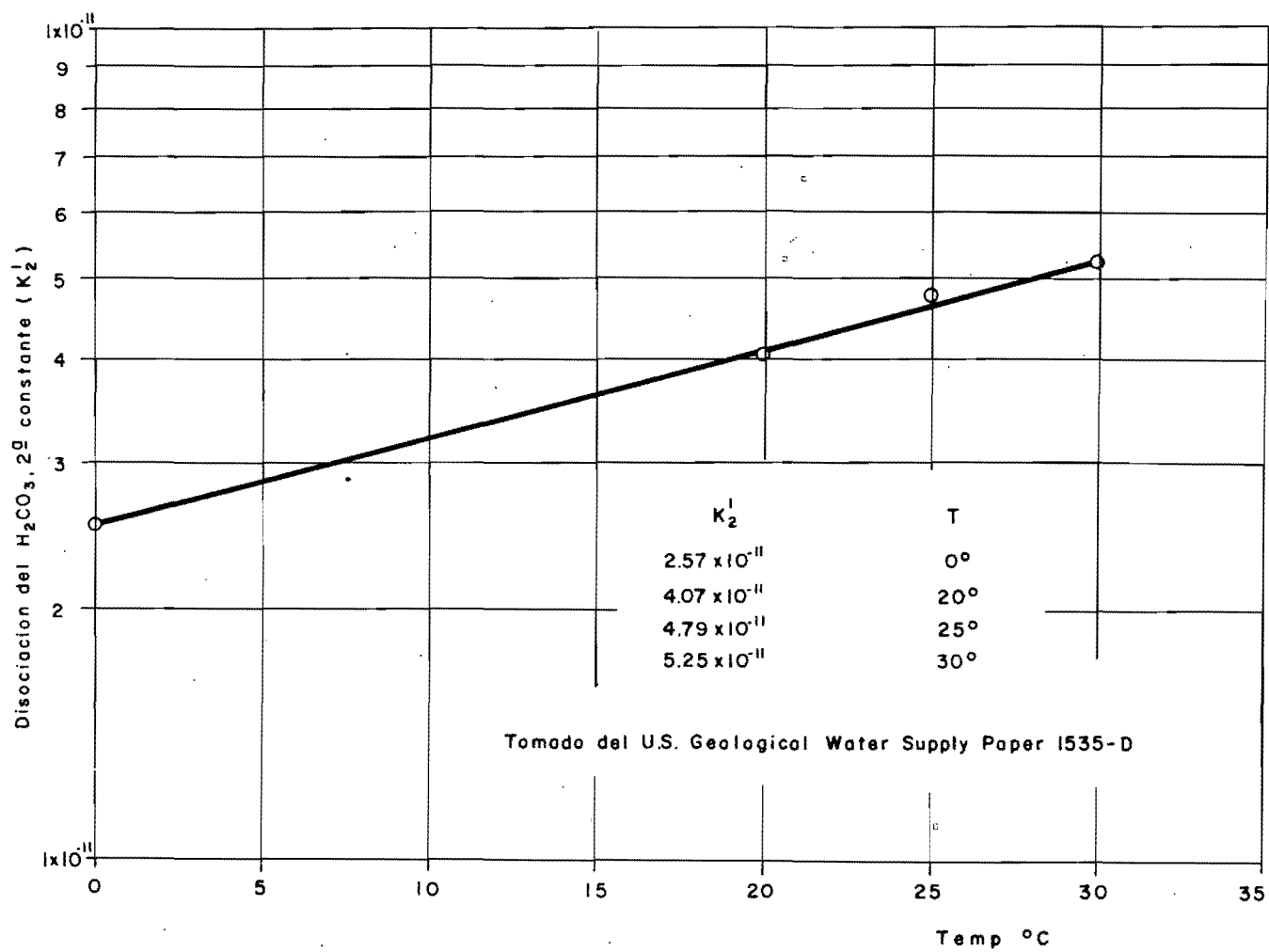


Fig. 2



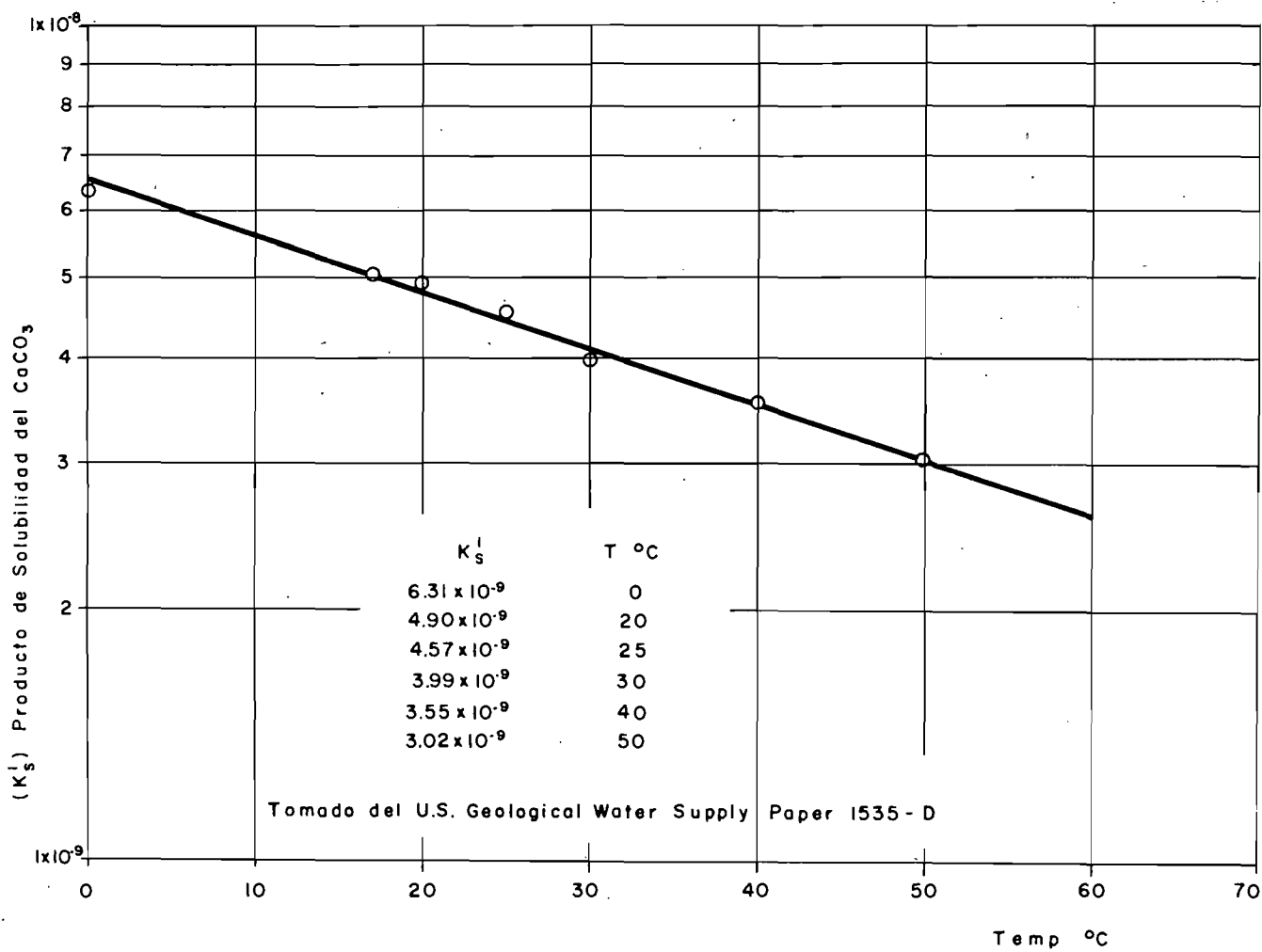


Fig. 3

### NOMOGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACION IONICA DE AGUAS NATURALES

Tamaño de:  
U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1535 - C

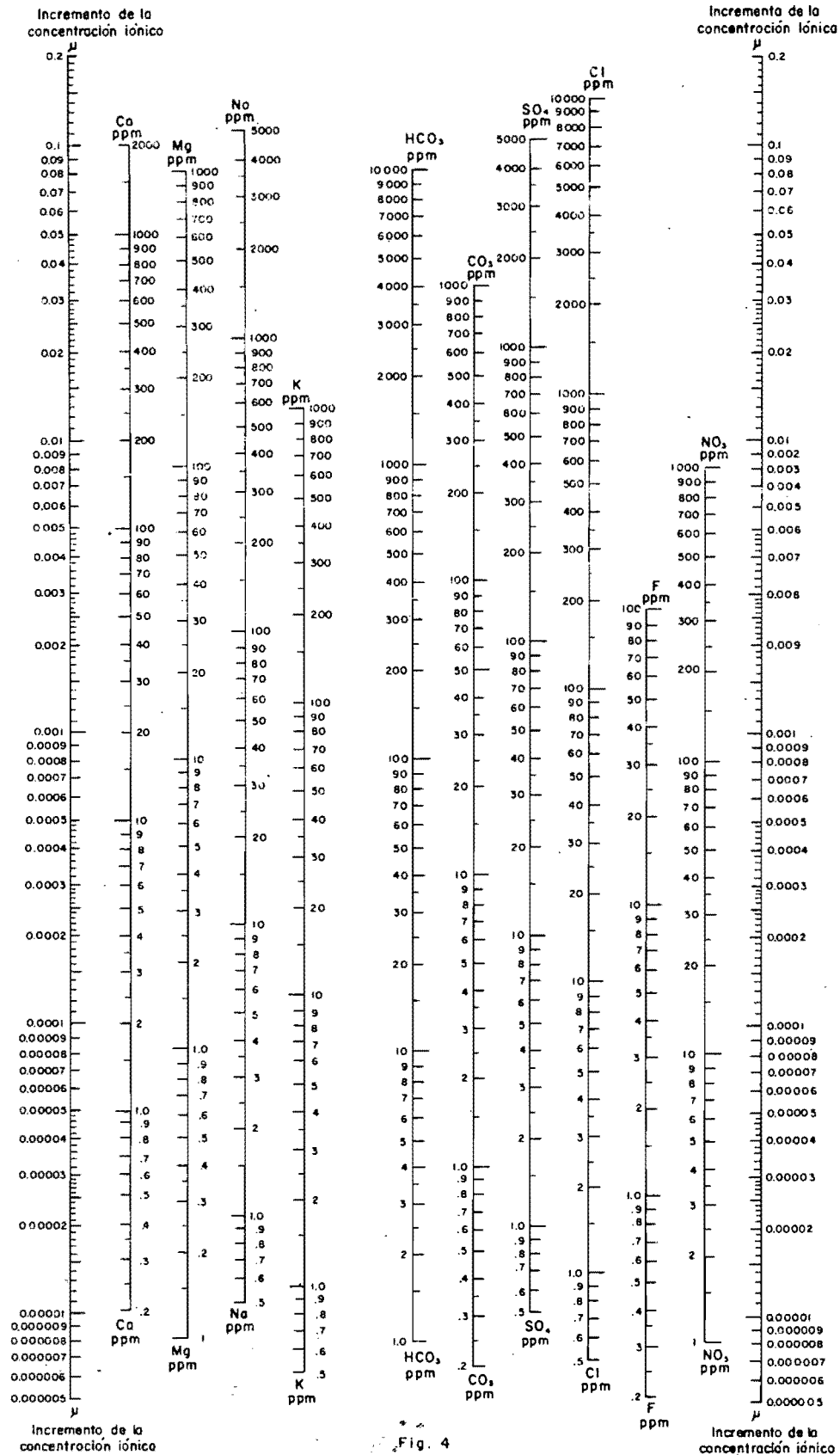
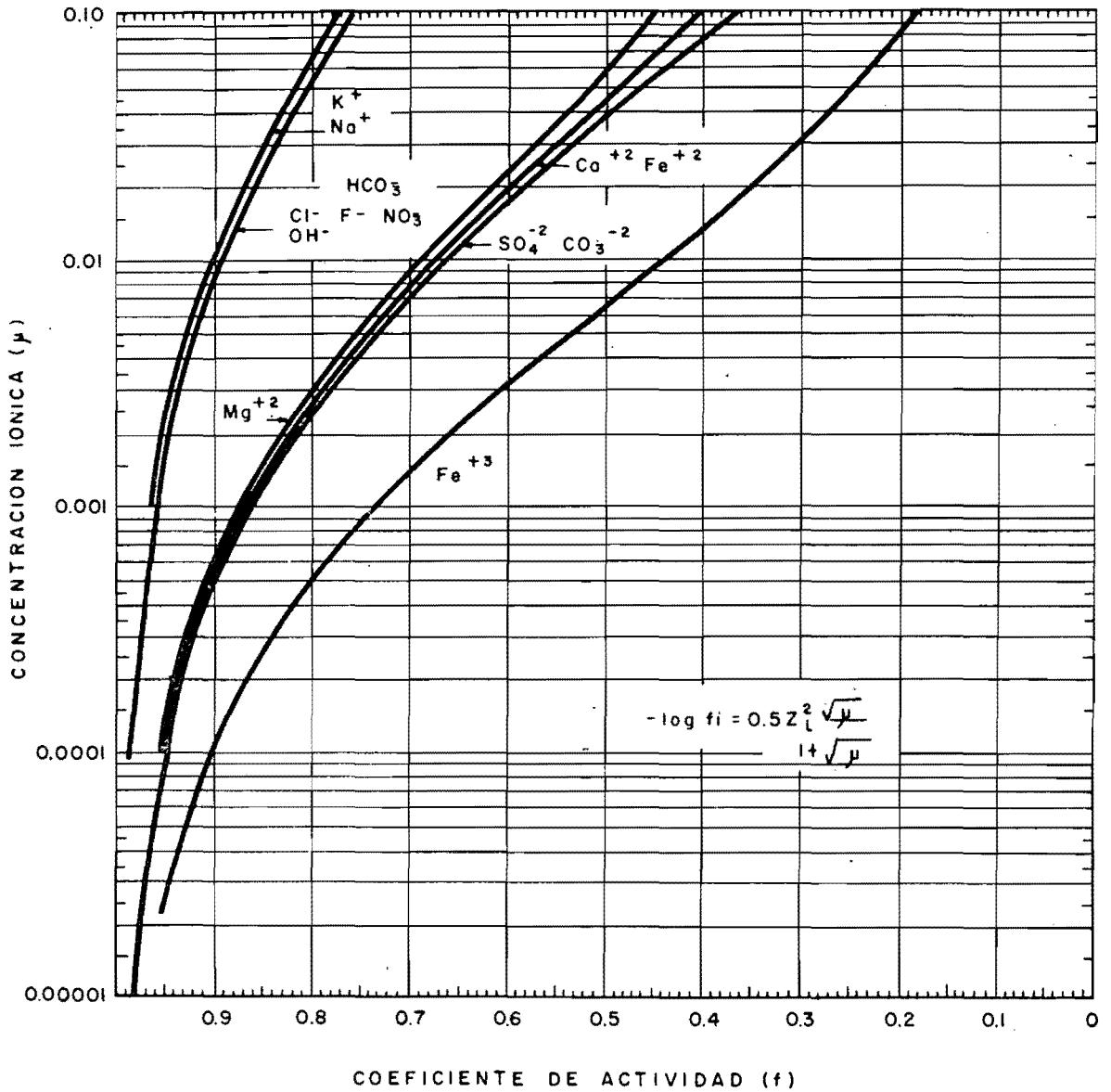


Fig. 4



RELACION ENTRE LOS COEFICIENTES DE ACTIVIDAD, PARA IONES IMPORTANTES EN AGUAS NATURALES, CON LA CONCENTRACION IONICA DE LAS SOLUCIONES

Tomado de:

U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1535 - C

Fig. 5

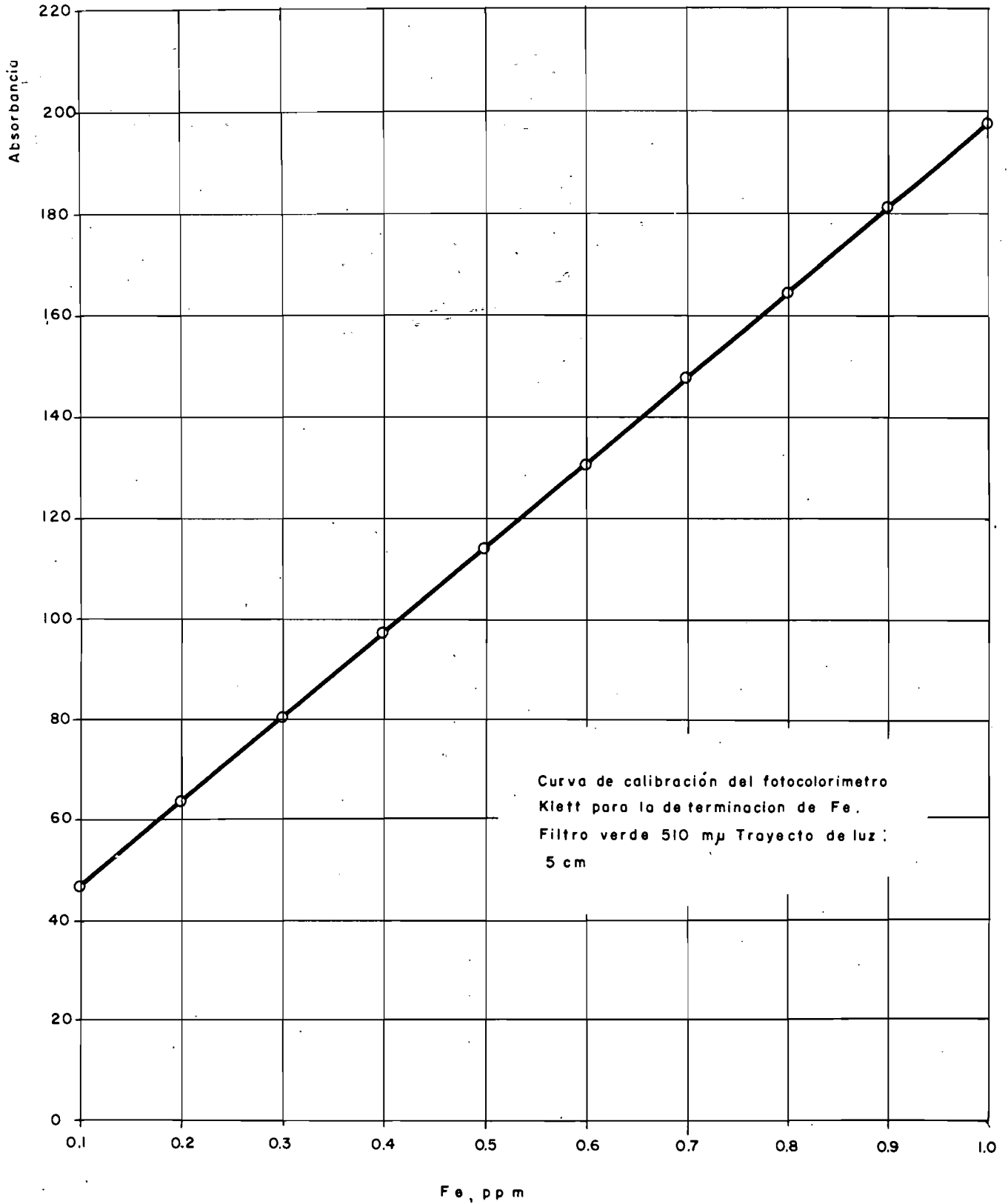
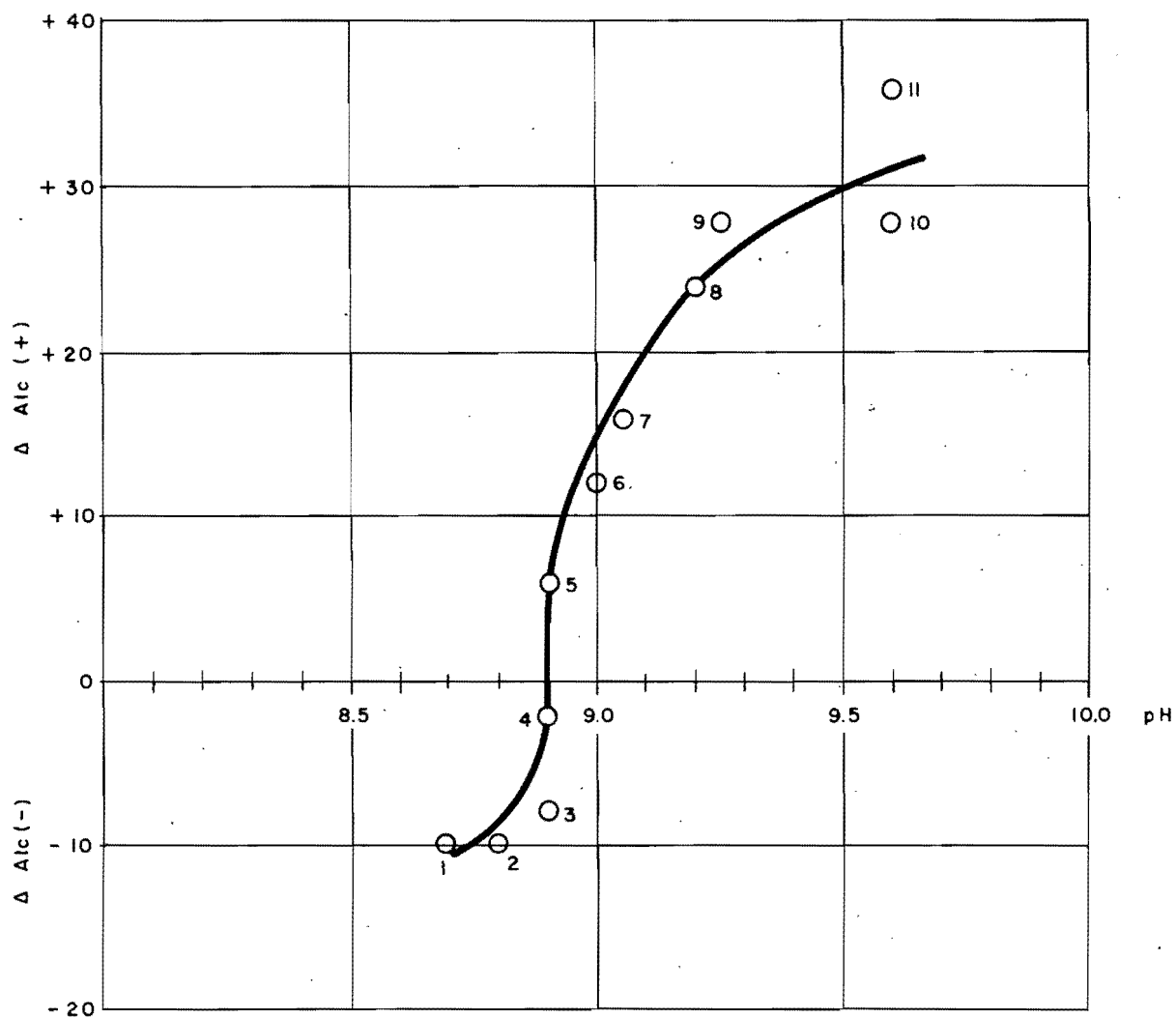


Fig. 6



## ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON CALHIDRATADA

Agua tratada: Prueba (O-172)

Muestra	Dosis (ppm)	pH
1	15	8.7
2	20	8.8
3	25	8.9
4	30	8.9
5	35	8.9
6	40	9.0
7	45	9.5
8	50	9.2
9	55	9.25
10	60	9.6
11	65	9.6

$$\Delta \text{Alc} = \text{Alc. antes} - \text{Alc. después}$$

Fig. 7

## B I B L I O G R A F I A

- (1) A.P.H.A, AWWA, WPCF.- Métodos Estándar para el Exámen de Aguas y Aguas de Desecho.- Undécima Edición
- (2) A.W.W.A Water Quality and Treatment
- (3) Baylis, J.R. "Use of Acid - Treated Sodium Silicate in Coagulation", J.A.W.W.A, Vol. 55 No. 12 (1963)
- (4) Bean, E. L. "Zeta Potential Measurement in the Control of Coagulation Chemical Dosage", J.A.W.W.A Vol. 56 No. 2 (1964)
- (5) Black A.P. and Willems D.G. "Electrophoretic Studies of Coagulation for Removal of Organic Color", J.A.W.W.A, Vol. 53 No. 5 (1961)
- (6) Black A.P. and Hannah, S.A. "Electrophoretic Studies of Turbidity Removal by Coagulation with Aluminium Sulfate" J.A.W.W.A, Vol. 53 No. 4 (1961)
- (7) Black A.P. and Smith A.L. "Determination of Mobility of Colloid Particles by Microelectrophoresis". J.A.W.W.A, Vol. 54 No. 3 (1962)
- (8) Black A. P. "Stoichiometry of the Coagulation of Color-Causing Organic Compounds with Ferric Sulfate". J.A.W.W.A, Vol: 55 No. 10 (1963)
- (9) Borchardt, E. Notas sobre Coagulación de las Aguas. Curso sobre Diseño de Abastecimientos de Agua Potable, División de Estudios Superiores, Centro de Ingeniería Sanitaria, UNAM (1962)

- (10) Christman, R. F. "Report of Research Committee on Color Problems", J.A.W.W.A, Vol. 59 No. 8 (1967)
- (11) Fair G.M. and Geyer J.C. Water Supply and Waste-Water Disposal, Ed. Wiley, 3a. Edición
- (12) Harris H.S., Kaufman W.J. and Krone R.B. "Orthokinetic Flocculation in Water Purification", Journal of the Sanitary Engineering Division Proceedings, A.S.C.E, Vol. 92, No. SA6 (1966)
- (13) Hoover, C.P. Water Supply and Treatment, publicado por National Lime Association, 8a. Edición.
- (14) Langelier, W.F. and Ludwig H.F. "Mechanism of Flocculation in the Clarification of Turbid Waters", J.A.W.W.A. Vol. 41 No. 2 (1949)
- (15) Mach M. Ecuaciones para establecer el equilibrio de aguas agresivas en contacto con  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ , presentadas por el Ing. J. M. Macías en el trabajo "Agresividad del  $\text{CO}_2$  en el Agua", Seminario del Curso de Postgrado en Ingeniería Sanitaria, UNAM (1967)
- (16) Mueller, K. C. "Effects of Polyelectrolyte Coagulant Aids on Removal of Missouri River Turbidity with Ferric Sulfate", J.A.W.W.A, Vol. 56 No. 3 (1964).
- (17) Rich, L. G. Unit Process of Sanitary Engineering, Ed. Wiley, (1963).
- (18) Rich, L. G. Unit Operations of Sanitary Engineering, Ed. Wiley, (1961).

- (19) Riddick, T. M. "Zeta Potential and its Application to Difficult Waters", J.A.W.W.A, Vol. 53 No. 8 (1961)
- (20) Sawyer, C. N. Chemistry for Sanitary Engineers, McGraw-Hill, Series in Sanitary Engineering and Science Ed. 1960
- (21) Stumm W. and Morgan J. J. "Chemical Aspects of Coagulation", J.A.W.W.A. Vol. 54 No. 8 (1962)
- (22) U.S. Geological Survey Water Supply Papers 1535 - C y 1535 - D.



- I N D I C E -

<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
Prólogo - - - - -	i
I.- INTRODUCCION - - - - -	1
II.- GENERALIDADES SOBRE COAGULACION	
1.- El color en las aguas. Naturaleza. Tratamiento - - - - -	3
2.- Mecanismos de coagulación. Coagulación electrocinética. Coagulación ortocinética. Características de los coagulantes. Especificaciones. - - - - -	7
3.- Co-coagulantes. Comportamiento - - - - -	14
4.- Estabilización de las aguas clarificadas - - - - -	17
III.- NEUTRALIZACION Y PRECIPITACION DE COLOIDES DE COLOR, APLICACION; AGUAS PRESA "EL JIHUITE", TEPATITLAN, JAL.	
1.- Datos del sistema de agua de Tepatitlán, Jal. Calidad de las aguas - - - - -	22
2.- Estudio de neutralización y precipitación de los coloides de color - - - - -	23
2.1.- Planteamiento - - - - -	23
2.2.- Coagulantes, co-coagulantes, productos químicos y equipo de laboratorio empleado - - - - -	25
2.3.- Programa de pruebas - - - - -	28
2.4.- Resultados. Tablas y Gráficas. Interpretación de resultados - - - - -	32

2.5.- Valoración de la agresividad de las aguas tratadas - - - - -	84
2.6.- Selección del proceso más adecuado de tratamiento - - - - -	89
2.7.- Estabilización química del agua tratada -	89
3.- Sugerencias para el proyecto de las unidades de tratamiento de una planta, con base en el estu- dio realizado - - - - -	91
4.- Costo del tratamiento - - - - -	96
5.- Conclusiones - - - - -	97
Figuras - - - - -	99
Bibliografía	