

70 24



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA REMOVER  
ARSENICO DEL AGUA AL INDUCIR CAMPO  
MAGNETICO"



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE;  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :

LOURDES MONSERRAT MEZA TREJO



MEXICO, D.F.

FALLA DE ORIGEN

1990



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# INDICE

	Pag
1. INTRODUCCION	1
2. SEPARACION MEDIANTE CAMPO MAGNETICO	4
2.1 <i>Introducción</i>	4
2.2 <i>Propiedades magnéticas de los materiales</i>	6
2.3 <i>separación magnética de alto gradiente</i>	10
2.3.1 Principios	10
2.3.2 Mecanismo de remoción	13
2.4 <i>Aplicación de la separación magnética de alto gradiente (SMAG) en el tratamiento de agua</i>	23
2.4.1 Remoción de sólidos suspendidos	24
2.4.2 Metales pesados	29
3 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	34
3.1 <i>Principio de campo magnético</i>	34
3.2 <i>Metodología de cálculo</i>	37
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
4.1 <i>Condiciones de prueba</i>	45
4.1.1 Selección de variables experimentales	45
4.1.2 Calidad del agua	46
4.1.3 Diseño de experimento	47
4.1.4 Campo magnético	49
4.1.5 Flujo de agua	52
4.1.6 Empaque de la columna	53
4.2 <i>Experimentación</i>	55
4.2.1 Procedimiento de prueba	55
4.2.2 Técnicas analíticas	57
4.2.3 Resultados	58

	Pag
4.3 <i>Análisis de resultados</i>	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1 <i>Conclusiones</i>	70
5.2 <i>Recomendaciones</i>	73
REFERENCIAS	75
ANEXO	80

## 1. INTRODUCCION

En la naturaleza se encuentran distribuidos de una manera u otra los elementos en formas químicas estables, debido a un proceso iniciado millones de años antes de que fuera la Tierra habitable para los seres vivos. El hombre, en su afán por lograr bienestar y superación, ha centrado la atención en explotar y aprovechar todos los recursos que le son de utilidad, desechando indiscriminadamente aquellos que poco o ningún beneficio le dejan.

Conforme han crecido los pueblos y han logrado avances tecnológicos significativos, se han ido desperdiciando los recursos naturales como si la capacidad de recuperación del medio ambiente fuese infinita. Con el reconocimiento del desequilibrio ecológico ocasionado, por ejemplo por la extinción de gran variedad de seres vivos, se manifiesta ahora cada vez mayor interés por evitar contaminar el ambiente, lo que se procura mediante el reuso de los recursos o la disposición adecuada de los desechos. El interés ha surgido obviamente de los países desarrollados, porque son los que primero se dan cuenta del deterioro ecológico ocasionado al medio ambiente por las sustancias tóxicas producidas con el avance tecnológico.

Poco a poco, conforme se fabrican, se liberan o se disponen tales sustancias, se van conociendo los efectos causados al medio ambiente. La preocupación mundial es cada vez mayor y las autoridades reglamentan tanto el uso de dichas sustancias como el aprovechamiento de los recursos. Sin embargo, como la manifestación de contaminación del medio natural es lenta, tal es el caso de los cuerpos de agua superficial y subterránea, resulta importante realizar estudios alternativos de tratamiento como medida preventiva para remover tóxicos como metales pesados de agua para consumo humano en un futuro.

En nuestro país existen regiones en las que, por las características geográficas y geológicas y la forma de aprovechar este recurso, el agua está contaminada con elementos tóxicos. Así sucede en diferentes zonas de la Comarca Lagunera, al noreste del estado de Durango y sureste de Coahuila, donde el acuífero está contaminado con arsénico. La manifestación se atribuye a causas de diferente índole, tales como características geológicas del subsuelo, explotación minera y contaminación por uso del suelo (asentamientos humanos, y actividades agrícolas e industriales); sin embargo, el problema existe y puede volverse crítico con el tiempo, dado que la principal fuente de abastecimiento de agua es el acuífero. Hasta la fecha, se ha tratado de solucionar el problema buscando nuevas fuentes de agua o tratando con ósmosis inversa la de algunas zonas rurales. Ese tratamiento es costoso y requiere capacidad técnica calificada durante la operación.

Ante esta situación y dada la crisis económica del país, se debe recurrir a la tecnología disponible, para estudiar la posibilidad de tratar el agua con los procesos convencionales existentes. Poco se sabe al respecto, y se requiere estudiar más este campo. Algunos investigadores han hecho pruebas de tratamiento en laboratorio, mediante el uso de coagulantes, y han descrito la posibilidad de tratamiento bajo circunstancias de mayor control, puesto que hacerlo cuando ésta contiene tóxicos no se puede considerar como un sistema trivial de tratamiento, dado el riesgo

que ello significa.

Al estudiar la posibilidad de tratar el agua mediante dispositivos compactos, por la dificultad que existe en poblaciones dispersas de implantar sistemas de potabilización, ha surgido el interés por investigar el efecto de inducir campo magnético como posible mecanismo de tratamiento.

El estudio parte de una revisión bibliográfica, con base en la cual se diseña y construye el dispositivo de prueba para la Separación Magnética de Alto Gradiente (SMAG). La experimentación se fundamenta en los principios teóricos de tratamiento y en bases estadísticas para evaluar el posible efecto de las variables involucradas en el tratamiento. El diseño de experimentos corresponde a un arreglo cuadrado latino con dos réplicas, siendo variables del tratamiento la intensidad de campo magnético, el material de empaque y el tipo y dosis de coagulante.

## 2. SEPARACION MEDIANTE CAMPO MAGNETICO

### 2.1 Introducción

La separación magnética es una técnica antigua, usada desde principios de siglo en la recuperación, eliminación o concentración de minerales de hierro en la industria metalúrgica<sup>(1,2)</sup>. El magnetismo, después de su gran aplicación en equipos de generación eléctrica y en motores, se usa en la industria en dispositivos para separación magnética, que remueven generalmente partículas de cuarzo de materiales altamente magnéticos que contienen cantidades considerables de hierro en un medio no magnético; estando restringida su aplicación a separar solamente sustancias o compuestos altamente magnéticos tales como hierro y magnetita.

Con el desarrollo de la industria del acero y debido a los grandes volúmenes de agua requeridos en las diferentes etapas del proceso, que se caracterizan por contener sólidos suspendidos difíciles de

remover mediante tratamiento convencional, se inicia el reuso del agua y se desarrollan investigaciones para su tratamiento y recuperación de hierro que cumplan con la reglamentación sobre el control de la contaminación del agua; así surgen los primeros estudios sobre separación magnética de gradiente elevado, identificada en la literatura como HGMS (High Gradient Magnetic Separation), que se puede considerar como una metodología relativamente reciente comparada con otras<sup>(9)</sup>, que se caracteriza por la separación de partículas pequeñas de poca susceptibilidad magnética que la separación magnética convencional no logra retener con flujos de agua de varios órdenes de magnitud mayores que los logrados con filtración por gravedad.

Con el transcurso del tiempo y como consecuencia de los resultados observados de la aplicación de HGMS para remover del agua sólidos suspendidos susceptibles al campo magnético, se desarrollan investigaciones y aplicaciones en el campo del tratamiento de agua y en procesos industriales<sup>(4,5,6)</sup>. De esa manera, el HGMS, se ha utilizado en la recuperación de minerales<sup>(7,8,9,10)</sup>, desulfuración de carbón<sup>(10)</sup> y recuperación de magnetita del carbón<sup>(11)</sup>, entre otros usos.

Conforme se profundiza en el campo de esta metodología, y se experimenta que existen diferentes comportamientos de los materiales hacia el campo magnético<sup>(12)</sup> y hay mayor interés de investigación dadas sus características ventajosas con respecto a procesos convencionales de separación, los estudios se enfocan al tratamiento del agua como potencial aplicación del proceso. Bajo tales circunstancias se logran aplicaciones en tratamiento de agua, al conjugar el HGMS con sembrado magnético y coagulación para remover contaminantes tales como fosfatos<sup>(13,14)</sup>, aceites<sup>(15)</sup>, bacterias<sup>(16)</sup> y algunos metales pesados<sup>(17,18)</sup>. De esa forma, relativamente en poco tiempo, se han desarrollado investigaciones en la industria y el laboratorio en la publicación de documentos relacionados con la posibilidad de recuperar tóxicos de aguas contaminadas, incluyendo aguas residuales de las plantas

nucleoeléctricas.

## 2.2 Propiedades magnéticas de los materiales

Inicialmente se creyó que los materiales en presencia de un imán eran o no atraídos. Sin embargo, conforme se ha profundizado en este campo, se ha encontrado que la mayoría de los materiales, dependiendo de sus características físicas y químicas, son susceptibles al campo magnético, unos en mayor o menor grado que otros. Thompson y Oldfield<sup>(12)</sup>, de investigaciones realizadas por diferentes autores, describen que, conforme a su comportamiento ante el campo magnético, existen materiales paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y diamagnéticos.

### a) Paramagnéticos

Los materiales paramagnéticos se identifican por ser atraídos hacia el campo magnético, pero se caracterizan, una vez desaparecido el campo, por no quedar magnetizados de manera permanente ya que la magnetización es muy débil. Se atribuye su particular comportamiento a que las moléculas, los iones o los átomos poseen momentos dipolo magnético permanente que tienden a alinearse paralelamente en la dirección de cualquier campo; siendo poca la energía magnética involucrada, la agitación térmica intenta constantemente eliminar el arreglo magnético. De ahí que el momento magnético dependa del campo aplicado y de la temperatura. Algunos minerales<sup>(13)</sup>, constituidos por silicatos de Fe, Mg, Ca, Al, Mn o Cr, o combinación de ellos, por la diferente forma de cristalizar, identificados como olivina, piroxenos, granates y biotita, se clasifican en estos tipos de materiales (ver tabla 2.1).

La susceptibilidad de las sales paramagnéticas disminuye conforme aumenta la temperatura, mientras que en el caso de los metales cuyo valor es menor que para las sales, con frecuencia es independiente de la temperatura.

b) Ferromagnéticos

Son materiales tales como hierro, que se caracterizan por la forma en la cual cambian drásticamente sus propiedades magnéticas a una temperatura crítica conocida como temperatura Curie. Por abajo de esa temperatura los materiales conservan una magnetización residual; en cambio, con temperaturas superiores a la crítica, como consecuencia de la energía térmica, desaparece el ordenamiento ferromagnético y se comportan como paramagnéticos.

La magnetización residual resulta de un fenómeno espontáneo que proviene de las características de grupo magnético, por interacciones de intercambio con los momentos magnéticos elementales de los electrones vecinos alineados en forma paralela por efectos de mecánica cuántica. Como consecuencia de tales efectos, el momento magnético neto es mucho mayor que el de los materiales paramagnéticos y diamagnéticos. Halliday *et al* (20) informan que elementos como Fe, Co, Ni, Gd y Dy, junto con las aleaciones que formen, manifiestan un comportamiento ferromagnético (ver tabla 2.1).

Los materiales ferromagnéticos, entre los que se encuentra el hierro, tienen un comportamiento específico al estar expuestos a un campo magnético de intensidad variable, su estado magnético depende de los antecedentes del material y del campo magnético al que están sujetos. En la fig 2.1 se representa la curva de imantación, expresada como la relación entre la densidad de flujo, B (magnetización) y la excitación magnética, H (campo magnético) cuando el material está inicialmente desimantado (12,20,21).

El material al someterlo a un campo variable (segmento o-a) hasta la saturación y disminuir a cero el campo aplicado (segmento a-b) queda magnetizado permanentemente (segmento o-b). A la variación de magnetización que manifiesta el material al aplicársele campo y al disminuirlo a cero, se le conoce como Histéresis. El ciclo

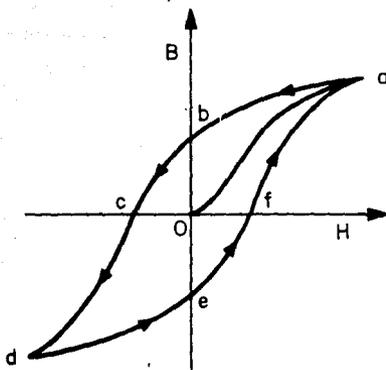


Fig 2.1. Ciclo de histéresis

completo se manifiesta indefinidamente al invertir la corriente en el campo aplicado.

c) Ferrimagnéticos

Estos materiales aparentemente son muy parecidos a los ferromagnéticos; siendo muy difícil distinguir entre las dos propiedades a pesar de usar técnicas magnéticas de medición. Conservan una magnetización residual cuando la temperatura es menor que la crítica, denominada de Curie o de Néel<sup>(22)</sup> y con temperaturas superiores a la crítica, se comportan en forma semejante a los materiales tanto ferromagnéticos como paramagnéticos. En los materiales naturales el comportamiento ferrimagnético proviene del ordenamiento del momento magnético del "spin" de los electrones, de la capa 3d incompleta de los elementos de la primera serie de transición, caso particular de Fe y Mn por la fuerza de intercambio<sup>(22)</sup>.

Las ferritas, como es el caso de la magnetita ( $Fe_3O_4$ ), son por lo general óxidos de hierro con una estructura "spin" que contiene

dos tipos de sitios magnéticos, los cuales tienen momentos magnéticos paralelos opuestos (antiparalelo) de diferente magnitud. Por tanto, el momento magnético elemental de una ferrita tiene ese comportamiento, pero la suma de los momentos predomina en una dirección y conduce a una magnetización neta<sup>(19)</sup>.

#### d) Diamagnéticos

La propiedad magnética de estos materiales es muy débil comparada con otros efectos magnéticos, proviene de la interacción de un campo magnético con el movimiento orbital de los electrones, produciendo una magnetización negativa pequeña. Los momentos magnéticos del "spin" de electrones no contribuye a la magnetización, ya que todos los movimientos están en parejas y se cancelan unos con otros. La magnetización desaparece en cuanto se elimina el campo magnético; si éste es fuerte, repele al material diamagnético. Los materiales diamagnéticos mantienen ese comportamiento independientemente de la temperatura<sup>(12)</sup>.

Materiales naturales tales como silicoaluminatos de Na, K, Ca tienen propiedades diamagnéticas. En la Tabla 2.1 se resumen elementos y sales que manifiestan tal comportamiento.

Algunos autores, de acuerdo con las características magnéticas de las sustancias, identifican a éstas conforme al interés particular de estudio o de investigación.

Según la literatura<sup>(4)</sup> es difícil definir las características magnéticas de los materiales, porque entre investigadores existen diferencias tanto en la clasificación como en la cuantificación de la susceptibilidad ya que se estudian bajo diferentes patrones de referencia. Es claro que, de acuerdo con su estructura atómica, un material cae en una clasificación específica pero, al formar compuestos o sales el nuevo material, puede encontrarse en otra clasificación (caso del cobre y sales). Lo anterior trae como consecuencia la incertidumbre de la clasificación del material si

se desconoce su estructura y no se sabe como responde a la presencia de un campo.

TABLA 2.1. CLASIFICACION DE LOS MATERIALES SEGUN SUS CARACTERISTICAS MAGNETICAS <sup>(19 - 23)</sup>

<u>PARAMAGNETICO</u>	<u>FERROMAGNETICO</u>	<u>FERRIMAGNETICO</u>	<u>DIAMAGNETICO</u>
O <sub>2</sub>	Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	B, Si
Li	Co	FePO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	S, N, P
Na	Ni	MnCO <sub>3</sub>	Cu, As, Cd
Al	CrO <sub>2</sub>	Mn(OH) <sub>2</sub>	Br
Mg	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	Pb, Hg, Sb,
K	CrS	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Ca	CoO	α MnS	CaCO <sub>3</sub>
Mn	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni(OH) <sub>2</sub>	Zn(OH) <sub>2</sub>
Cr	Co <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	NiO	ZnO, βZnS
Sn	Cu(OH) <sub>2</sub>	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tierras raras	CuO	TiO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>
Ba	FeCO <sub>3</sub> (siderita)	Zn	H <sub>2</sub> O
NO	FeS (pirrotita)	FeS (pirrotita)	Gases raros
Fe	FeS <sub>2</sub> (pirita)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (magnetita)	NaCl
Silicatos de Fe, Mg, Al, Ca	Sales de Mn con As, Bi, P, S y Sn	Oxidos de Fe y Mn α Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Hematita) α FeOOH (Goetita)	Silicato de Al, Ca, K, Na Kaolinita

### 2.3 Separación magnética de alto gradiente

#### 2.3.1 Principios

Los separadores magnéticos de alto gradiente se fundamentan en el mismo principio de los separadores magnéticos convencionales. Mitchell *et al* (1975)<sup>(4)</sup> representan en la fig 2.2 el esquema de separación magnética convencional de partículas magnéticas y no magnéticas.

El principio en separación magnética convencional consiste en que

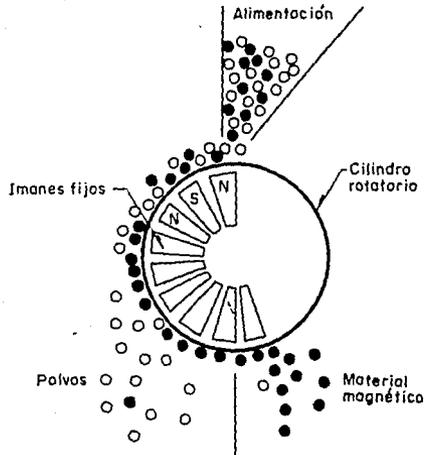


Fig 2.2 Separador magnético convencional tipo tambor

las partículas magnéticas (puntos oscuros) se pegan a la superficie del cilindro rotatorio mientras las fuerzas magnéticas predominan; en cambio las partículas no susceptibles (puntos claros) caen.

El proceso, en el caso de separación magnética de alto gradiente, consiste en empacar con material magnético (fibra, malla, partículas, etc.) una columna sujeta a la acción de campo magnético, que al inducirlo magnetiza el material de empaque. El fluido que contiene las partículas que se desean remover pasa por la columna y estas se adhieren o quedan atrapadas en dicho empaque. El material magnético con que se empacka la columna provoca, al inducir el campo magnético, que éste sea intensificado.

La magnetización,  $M$ , de una partícula está definida por su naturaleza química; propiedad que determina si son o no separables magnéticamente. En los materiales para y diamagnéticos la magnetización es una función lineal del campo magnético<sup>(4)</sup>.

$$M = X H$$

2.1

donde

$M$  magnetización

$X$  susceptibilidad magnética

$H$  campo magnético.

Los materiales paramagnéticos, por su poca magnetización, difícilmente se logran separar del agua mediante el uso de dispositivos convencionales de campo magnético. Sin embargo, por el campo inducido y el gradiente que se logra, pueden ser atrapados en los dispositivos de gradiente magnético elevado. Como consecuencia de su poca magnetización, la susceptibilidad de esos materiales es positiva, generalmente varios órdenes de magnitud menor que en el caso de los materiales ferro y ferrimagnéticos. En cambio los materiales diamagnéticos, por tener susceptibilidad magnética negativa, no son atrapados<sup>(3)</sup>.

En un campo magnético uniforme las líneas de flujo son paralelas en la región de mayor intensidad. Cuando se introduce un material susceptible al campo magnético las líneas de flujo se desvían y se concentran donde se encuentra dicho material. En los esquemas de la fig 2.3 se representan ambos comportamientos<sup>(1)</sup>.

La presencia de tales materiales, al concentrar las líneas de flujo, provocan que el campo se intensifique en esas regiones. Así resulta que el material y el medio tiene una magnetización

características y, como consecuencia de esto, se producen gradientes mayores de campo magnético<sup>1,4</sup>.

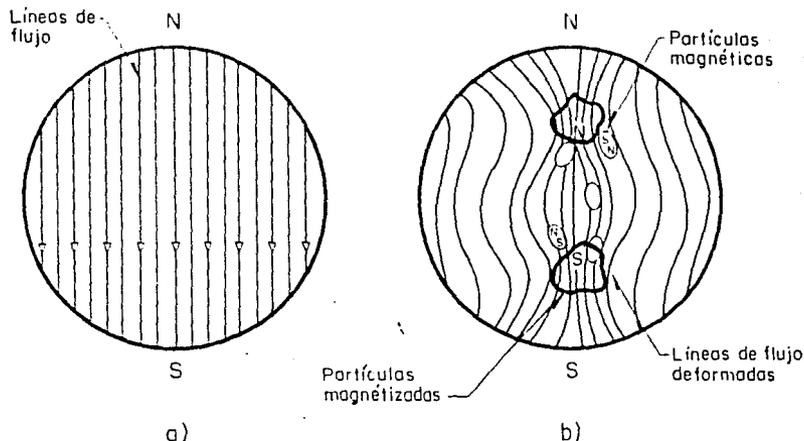


Fig. 2.3 Comportamiento de las líneas de flujo en un campo magnético uniforme: a) simple. b) con partículas susceptibles al campo

### 2.3.1 Mecanismo de remoción

El mecanismo de atrapamiento de partículas mediante la inducción de campo magnético es complejo, depende de características, tales como geometría y diseño del dispositivo, naturaleza del medio que transporta las partículas y la susceptibilidad magnética de estas. Las fuerzas que actúan, dependiendo de las características magnéticas del material, pueden ser de diferente naturaleza (repulsión o atracción) que actúan sobre la partícula; algunas de las cuales se suman a la fuerza magnética, pero existen otras que se oponen al atrapamiento<sup>(40)</sup>. Existen fuerzas de tipo no magnético que intervienen de una u otra forma en el proceso de

atrapamiento de las partículas; estas fuerzas se identifican con el peso de la partícula (gravedad), flotación, arrastre de las partículas por el fluido, inercia, etc.

Cada autor, por el enfoque particular del problema que desea resolver, plantea de diferente manera las variables que intervienen en la remoción de las partículas; sin embargo, el mecanismo es semejante con ciertas variantes.

En cualquier técnica de separación magnética la fuerza magnética ejercida sobre una partícula debe ser mayor que cualquiera de las fuerzas que actúan para mantenerla en suspensión.<sup>19</sup> La manera más simple de hacer el análisis de fuerzas que actúan en una partícula es considerar únicamente la componente vertical de fuerza magnética como la resultante de atracción.<sup>2,10</sup>

La fuerza neta,  $F_n$ , que actúa sobre una partícula, la cual se encuentra cerca de un medio magnetizado, corresponde al balance representado en la fig 2.4. En este caso Trinidad y Kolm<sup>10</sup> consideran el flujo descendente en una columna empacada con fibra metálica, introducida en un solenoide.

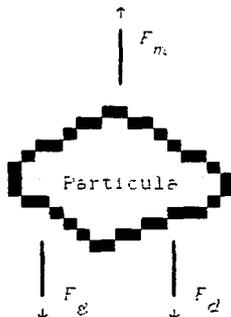


Fig 2.4 Balance de fuerzas simplificado actuando sobre una partícula

Para atrapar una partícula en el campo magnético la fuerza de éste debe ser mayor que la suma de las fuerzas que se oponen<sup>(2)</sup>.

Por tanto,

$$\frac{F_m}{F_g + F_d} > 1$$

a) Fuerza magnética

La representación de la fuerza magnética es mas o menos complicada dependiendo de las suposiciones hechas en cada estudio. Sin embargo, en todos los casos depende de la distancia entre centros de partículas y material magnetizado y de la posición angular de la partícula con respecto a la partícula o fibra magnetizada.

La fuerza magnética que actúa en una partícula puede representarse de diferentes formas. Praveen<sup>(2)</sup> y otros investigadores<sup>(3,4)</sup> la expresan de manera general en función del volumen de la partícula, ec 2.2 .

$$F_m = \Delta M H dV \quad , \quad 2.2$$

Mitchell *et al*<sup>(4)</sup> la expresan en función del gradiente de  $H$ , porque consideran que todas las partículas ubicadas en un campo magnético desarrollan, tal como lo representa la fig 2.5, un polo norte y uno sur en sus extremos.

$$F_m = V M \text{ grad } H$$

donde

$F_m$  fuerza magnética

$V$  volumen de la partícula

$M$  magnetización de la partícula

$grad H$  gradiente del campo magnético que actúa sobre la partícula

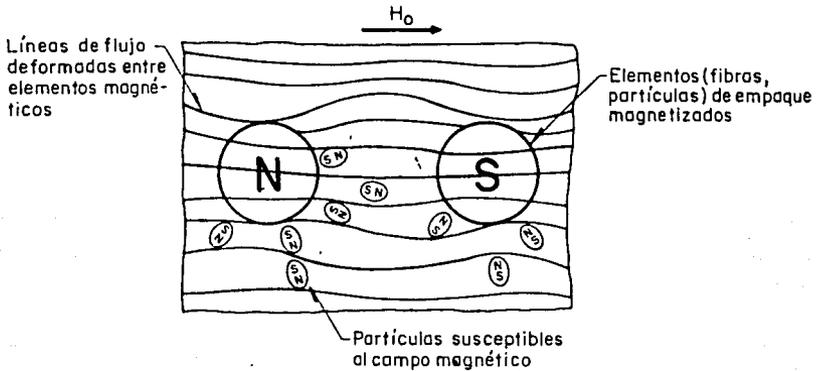


Fig 2.5 Desarrollo de polos en partículas susceptibles expuestas en un campo magnético

La expresión general de fuerza magnética de atracción de una partícula en el vacío y sujeta a un campo magnético se representa por la ec 2.3<sup>(2,3,24)</sup>:

$$\bar{F}_m = \Delta \int \bar{M} \cdot \bar{H} d v \quad 2.3$$

siendo  $M$  la magnetización de la partícula expuesta a un campo magnético  $H$ . La integración está considerada sobre el volumen de la partícula.

En sistemas reales, especialmente en el caso del agua, el gradiente magnético afectará tanto a la partícula como al medio

donde se encuentra<sup>(4)</sup>.

Es posible generalizar la ec 2.3 para un medio donde la magnetización de la partícula o la del medio es grande comparable con el valor de  $H$ . La simplificación de la ec 2.3, por considerar solamente la componente de la fuerza en la dirección  $x$  debida a la componente de el gradiente de campo en la misma dirección, lleva a la ec 2.4 .

$$F_x = \int (M_p - M_m) \frac{dB}{dx} dv \quad 2.4$$

donde

$M_p$  magnetización de la partícula

$M_m$  magnetización del medio.

Es claro que la fuerza depende de la integral tanto del campo magnético  $H$  como del gradiente  $dB/dx$  sobre el volumen de la partícula<sup>(24)</sup>. Debido a que es difícil evaluar la integral cerrada de las propiedades en el volumen de la partícula, se elige un punto  $r$  de la partícula para evaluar tales propiedades. Oberteuffer<sup>(24)</sup> supone que con la ec 2.5 es posible sustituir la ec 2.4 .

$$F_x = v [ M_p(r) - M_m(r) ] \frac{dB(r)}{dx} \quad 2.5$$

Sustituyendo la ec 2.1, la cual relaciona la magnetización con la susceptibilidad magnética, se obtiene la ec 2.6 .

$$F_x = v (x_p - x_m) H(r) \frac{dB(r)}{dx} \quad 2.6$$

Para evaluar la expresión se considera que el punto  $r$  corresponde al centro de la partícula.

Es claro que cuando se incrementa el campo magnético,  $H$ , también aumenta la fuerza magnética como consecuencia del incremento tanto de magnetización de la partícula como del gradiente de campo<sup>(2,3,24)</sup>. Sin embargo, el gradiente o la distancia con que varía significativamente el campo magnético afectará de manera importante a la fuerza magnética. Si se considera una partícula esférica cerca de un alambre ferromagnético expuesto a un campo magnético uniforme, la fuerza magnética que ésta experimentará, ver fig 2.6, se podrá desarrollar de la manera siguiente:

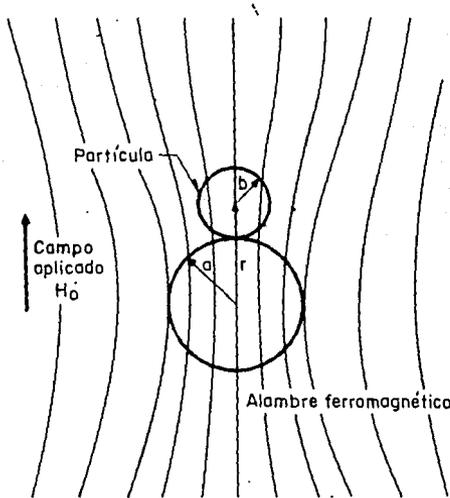


Fig 2.6 Partícula atraída a un alambre ferromagnético magnetizado por un campo uniforme  $H_0$

El campo resultante,  $H$ , sobre el eje de simetría para un campo aplicado,  $H_0$ , menor que el de saturación del alambre ferromagnético,  $H_s$ , está definido por la ec 2.7<sup>(2,3,24)</sup>.

$$H = H_0 \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} \right] \quad 2.7$$

Por tanto, el gradiente de campo aplicado correspondiente al eje de simetría de la partícula se identifica por la ec 2.8.

$$\frac{dH}{dr} = -2H_0 \frac{a^2}{r^3} \quad \text{o} \quad \frac{dB}{dr} = 2B_0 \frac{a^2}{r^3} \quad 2.8$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ec 2.6, la fuerza magnética queda expresada en función del radio tanto del alambre ferromagnético como de la partícula paramagnética.

$$F_m = -\frac{8}{3} \pi b^3 (\chi_p - \chi_m) \left[ H_0 + H_0 \frac{a^2}{(a+b)^2} \right] E_0 \frac{a^2}{(a+b)^3} \quad 2.9$$

En caso que el radio del alambre sea tres veces el radio de la partícula,  $a = 3b$ , la ec 2.9 se simplifica a la forma.

$$F_m = 1.84 (\chi_p - \chi_m) H_0^2 b^2$$

Siendo la fuerza magnética proporcional al cuadrado tanto del campo magnético aplicado como del tamaño de la partícula.

Oberteuffer<sup>(24)</sup>, con objeto de maximizar la fuerza magnética que actúa en la partícula, relaciona los radios de partícula y del alambre con los resultados de  $F_m$  como se representan en la fig 2.7. Se observa claramente en dicha figura que se maximiza la fuerza, ec 2.9, cuando los radios son del mismo orden de magnitud; resultando, al derivar  $F_m$  de la ec 2.9, que la fuerza es máxima cuando el diámetro del alambre es 2.7 veces mayor que el de la partícula.

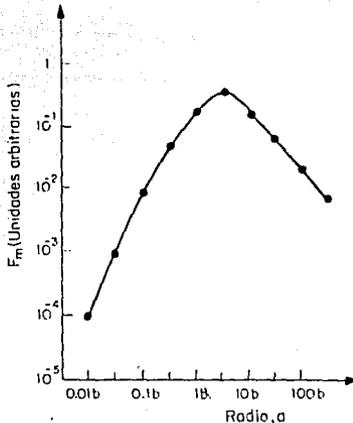


Fig. 2.7 Fuerza magnética actuando en la partícula de radio  $b$  como función del radio  $a$  del alambre

b) Fuerza hidrodinámica de arrastre

Siempre que exista un movimiento relativo entre una partícula y el fluido circundante, este ejercerá una fuerza de arrastre sobre la partícula<sup>(25)</sup>. Tal fuerza de arrastre,  $F_d$ , varía con el régimen de flujo (Número de Reynolds y forma de la partícula). La fuerza, en el caso de partículas esféricas y dependiendo del  $Re$ , está dada por la Ley de Stokes, por una ecuación de régimen intermedio o por la Ley de Newton<sup>(10)</sup>.

$$F_d = C_d A_p \rho u^2$$

donde

$C_d$  coeficiente de arrastre

$A_p$  área de la partícula perpendicular al flujo

$\mu$  velocidad de flujo

$\rho$  densidad del fluido.

En el caso de partículas esféricas se sustituye la relación correspondiente por su diámetro. Si se considera flujo laminar, según Stokes  $C_d = 24/Re$  y el  $N_{F_e}$  en el intervalo entre 2 y 500<sup>(3)</sup> será .

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu}$$

donde

$d$  diámetro de la partícula

$u$  velocidad de flujo

$\rho$  densidad del fluido

$\mu$  viscosidad del fluido.

Si el fluido es agua,  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$  y  $\mu = 0.01$  poise, el  $Re$  se simplifica a  $d u \times 10^2$  y, la fuerza hidrodinámica, de acuerdo con la ley de Stokes, a

$$F_d = 12 \pi \mu v b \quad 2.10$$

donde

$v$  velocidad de la partícula con relación al flujo

$b$  radio de la partícula.

Mc Nellan<sup>(3)</sup> identifica que las tasas de flujo que interesan en el

proceso varían entre 20 y 200 gpm/pie<sup>2</sup> (0.08 y 0.815 lpm/cm<sup>2</sup>) o sea 1.35 a 13.5 cm/s. Para remover partículas entre 0.1 y 100 micras significa que el valor de  $Re$  debe mantenerse en un intervalo de 0.001 a 10.

c) Fuerza gravitatoria

De acuerdo con la Ley de Newton se establece un balance de fuerzas para evaluar la fuerza gravitatoria o de flotación<sup>(26)</sup>.

$$\Sigma F = m \cdot a$$

Fuerza de flotación:  $F_f = V_p \rho_f g$

Fuerza de peso:  $F_p = V_p \rho_p g$

$$\Sigma F = V_p \rho_p g - V_p \rho_f g$$

$$\Sigma F = V_p (\rho_p - \rho_f) g$$

Fuerza por gravedad :

En el caso de partículas esféricas,  $V_p = \frac{4}{3} \pi b^3$ , la fuerza gravitatoria resultante está representada por la ec 2.11 .

$$F_g = \frac{4}{3} \pi b^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad 2.11$$

Al observar las ecs 2.9, 2.10 y 2.11, que definen las fuerzas que actúan en una partícula arrastrada en un fluido y expuesta a un campo, se identifican algunas características de fuerzas

relacionadas con el diámetro de la partícula. La fuerza hidrodinámica de arrastre es importante para tamaños pequeños de partículas (ec 2.10); en cambio la fuerza gravitatoria, por la potencia al cubo del radio (ec 2.11), es más importante para tamaños grandes de partículas. La fuerza magnética es importante para un tamaño intermedio de partícula<sup>(24)</sup> (ec 2.9).

Oberteuffer<sup>(5)</sup> y Mitchell<sup>(4)</sup>, de acuerdo con las experiencias vividas en este campo de investigación, enfatizan que el atrapamiento eficiente depende del tamaño y susceptibilidad magnética de las partículas. La intensidad de campo magnético, la velocidad de flujo, la naturaleza, geometría y cantidad del empaque (fibra, malla, etc.) se identifican como las variables más importantes que influyen en el atrapamiento; por tanto, cada variable tiene su propio efecto en el proceso. El aumento de campo magnético incrementa el atrapamiento de partículas porque la fuerza magnética es mayor; en cambio al aumentar la tasa de flujo, la fuerza hidrodinámica es mayor y el atrapamiento es menos eficiente. En el transcurso del tratamiento la recuperación de las partículas magnéticas disminuye conforme aumenta la carga del material de empaque (matriz), es decir, se saturan los sitios de alto gradiente y quedan cada vez menos disponibles para el atrapamiento.

#### *2.4 Aplicación de la separación magnética de alto gradiente (SMAG) en el tratamiento de agua*

La SMAG al emplearse en el tratamiento de agua ha tenido dos enfoques importantes. El primero ha sido en la industria metalúrgica y en calderas, en el tratamiento de las aguas residuales para recuperar sólidos suspendidos o productos de corrosión que son generados durante el proceso. Sólidos que, por las características del proceso, son susceptibles al campo

magnético y que cuando se produce éste son atrapados eficientemente. El segundo enfoque de remoción es para aquellos sólidos suspendidos o impurezas no susceptibles al campo magnético, que consiste en dosificar partículas con características ferromagnéticas al agua (sembrado magnético). Tales partículas como la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) actúan como adsorbentes que de esa manera son filtrados magnéticamente por medio de la SMAG<sup>(1,2,6,27,28)</sup>.

Mitchell<sup>(4)</sup> y De Latour<sup>(27)</sup> describen que, en algunos casos, es necesario combinar el sembrado magnético con la coagulación para estimular la formación de flóculos alrededor de las partículas de magnetita y lograr la remoción más eficiente de los sólidos suspendidos e inclusive de materia soluble. En este último caso no son necesarios tiempos grandes de contacto como los requeridos en floculación convencional antes de la filtración; tampoco es necesaria la sedimentación. También es posible remover los contaminantes coloidales mediante esta técnica, incluyendo algas o microorganismos indeseables en el agua tratada o potable (bacterias, virus, etc.).

#### 2.4.1 Remoción de sólidos suspendidos

El tratamiento del agua residual de proceso en la siderurgia en general y en la industria minera involucra la remoción de partículas suspendidas muy pequeñas con características magnéticas significativas. La remoción de partículas del agua es importante porque para producir 1 ton de acero se requieren del orden de 151 m<sup>3</sup> de agua<sup>(6)</sup>.

Mitchell *et al*<sup>(4)</sup> y Oberteuffer *et al*<sup>(6)</sup> indican que al aplicar la SMAG a los efluentes de agua de las etapas de proceso en una siderúrgica se logran eficiencias de remoción global del orden de 90 por ciento. Eficiencias semejantes se obtienen en la remoción

de óxidos de hierro (magnetita y hematita) del agua de caldera y en la recuperación de productos de corrosión radiactivos que se manifiestan en el agua de enfriamiento de un reactor nuclear.

Kelland<sup>(7)</sup> describe la aplicación de la SMAG en el procesamiento de materiales tales como arena, mineral de hierro, óxido de molibdeno y sílice, entre otros; también define su utilidad en los problemas de contaminación como en la purificación de carbon (desulfuración) antes de la combustión y en el tratamiento de aguas residuales. Las variables de control durante la experimentación son: carga, gasto, campo, pH y densidad, diseño de la matriz, temperatura y, en algunos casos, el tamaño de las partículas. Los resultados obtenidos por dicho autor destacan el efecto de las variables en la recuperación de hierro del mineral tratado. Con mayor campo magnético (10-100  $KO_e$ ) y menor flujo (5-20 cm/s) la eficiencia de atrapamiento de hierro es mayor. Con base en los resultados obtenidos se reconoce la posible aplicación en remover partículas pequeñas (malla 500), con susceptibilidad magnéticas mucho menor que la requerida en la separación convencional.

En su trabajo Trindade<sup>(10)</sup> enfatiza la importante aplicación que tiene la SMAG en la separación de las impurezas del carbón, específicamente de la desulfuración por la presencia de piritita, cuyas características paramagnética favorecen la separación. La experiencia la observó en una columna empacada con fibra o malla de acero introducida en un solenoide. El modelo de balance de fuerzas indica que las variables independientes más importantes son: tamaño de las partículas, velocidad de flujo, intensidad del campo y las características del empaque. Las pruebas de tratamiento las realizó con un campo de 20  $KO_e$  a tres diferentes velocidades, 0.4, 2.0 y 4.0 cm/s, para una distribución de tamaño 92 por ciento más pequeño que 44  $\mu m$ . Los resultados demuestran una recuperación del 40 por ciento del contenido de azufre en el carbón original.

Kelland *et al*<sup>(14)</sup>, en el afán por mejorar la recuperación de la magnetita (paramagnética) como impureza del carbón, observaron que la SMAG, a diferencia de la separación convencional, remueve partículas muy pequeñas. Las pruebas se efectuaron con campo entre 0.5 y 5.0  $KO_e$ .

De Latour<sup>(13)</sup>, en el estudio sobre el control de la contaminación del agua mediante separación magnética, identifica la importancia que tiene en el tratamiento las características del filtro y el sembrado magnético con la remoción de sólidos suspendidos y disueltos. El filtro magnético consiste en una columna empacada con material ferromagnético magnetizado, que involucra menos del 5 por ciento del volumen de la columna y se caracteriza el sistema por la poca resistencia al flujo; esto permite tasas de filtración entre 50 y 150  $gpm/pie^2$  (0.2 - 0.61  $lpm/cm^2$ ) que vuelven ventajoso el proceso.

El trabajo de De Latour se fundamenta en que existen unos elementos contaminantes en el agua que son susceptibles al campo magnético y otros que no lo son. Los elementos susceptibles se pueden remover más fácilmente con la presencia de campo magnético o con el sembrado de material magnético como la magnetita ( $Fe_3O_4$ ). En el caso de elementos contaminantes no magnéticos la remoción se puede lograr en presencia de campo magnético pero con sembrado magnético y con la dosificación de un coagulante como  $Al_2(SO_4)_3$ . De esa forma es factible la remoción tanto de sólidos suspendidos como disueltos por medio de los mecanismos de adsorción y atracción magnética. Pruebas hechas con agua de río y agua residual logran eficiencias de remoción en el ámbito de 30 a 99 por ciento de sólidos suspendidos; resultados obtenidos con dosis de 5 ppm de  $Al^{3+}$ , 1000 ppm de  $Fe_2O_3$  y campo magnético de 10  $KO_e$ .

Jun-Ichi Yano *et al*<sup>(29)</sup>, en el estudio de la remoción de sólidos suspendidos del agua residual de la industria del acero por medio

de la filtración en presencia de campo magnético, identifican las ventajas de la SMAG con respecto a otros procesos de tratamiento. Este autor concentra la atención en el uso eficiente del dispositivo experimental, clasifica a los sólidos suspendidos por sus características físicas y por el contenido de partículas ferromagnéticas. Hace pruebas con campo magnético de  $3 KO_e$  ( $2.4 \times 10^5$  A/m) para remover 200 mg/l de sólidos suspendidos a un flujo del orden de (5.6 cm/s). Los resultados obtenidos demuestran que el mayor contenido (porcentaje) de partículas ferromagnéticas en los sólidos suspendidos hace más eficiente el proceso, el ión calcio se deposita en el empaque, las partículas de aceite se absorben en los sólidos y también se adhieren en la superficie del empaque. En el caso de partículas suspendidas no magnéticas, éstas se pueden remover eficientemente con la dosificación de polímeros sin la inducción de campo de mayor intensidad.

Jun-Ichi Yano<sup>(29)</sup>, como conclusión de su trabajo, considera prometedora la aplicación de la SMAG en tratamiento de agua e identifica algunas características de los procesos con respecto a la clasificación del tipo de agua residual, ver tabla 2.2. Dentro de las ventajas identificadas destacan las siguientes: pérdida de presión menor a  $1 \text{ kg/cm}^2$  con tasas de flujo del orden de 16 cm/s, poco consumo de agua de retrolavado y superficie pequeña ocupada por la instalación.

Petrakis et al<sup>(15)</sup> realizaron experiencias con SMAG para remover sólidos suspendidos y aceites de efluentes de aguas residuales, entre los que se identifican hidrocarburos y sólidos poco susceptibles al campo magnético. Durante la experimentación se utiliza una columna de 3 pulgadas (7.6 cm) de diámetro, empacada con fibra y malla de acero inoxidable; acomodadas éstas de tal forma de intensificar el campo. El dispositivo produce intensidades máximas de campo magnético de 20,000 gauss (2 Tesla). De los resultados más importantes observados por este autor

TABLA 2.2 CARACTERISTICAS DE OPERACION ENTRE LOS PROCESOS  
DE FILTRACION SEGUN JUN-ICHI YANO *et al* (29)

CLASIFICACION AGUA RESIDUAL	CLASE I ABSORBEDOR		CLASE II LAMINACION			CLASE III ENFRIAM.	
	SS(I), mg/l	150		150			80
SS(E), mg/l	< 15		< 15			< 25	
Q(I), m <sup>3</sup> /h	20		1100			720	
M.de filtrac.	SMAG	F.arena	SMAG	Clarific. F.arena	Clarific. <sup>a</sup>	SMAG	Clarific.
Flujo, m/h	200	30	600	40 <sup>b</sup>	20	200	2
Corrida, h	0.33	8	0.33	24 <sup>b</sup>	cont.	1	cont.
Retrolav., min	1	15	2	15 <sup>b</sup>	no	4	no
Lavado, m <sup>3</sup> /dia	16	30	340	300 <sup>b</sup>	no	270	no
Energia, KV	3		30			40	
Espacio, m <sup>2</sup>	4.5	8	40	500	900	200	700
C.de operac.	0.7	1	0.4	1	2.6	0.3	1
C.de Instal.	1.1	1	0.4	1	0.9	1.5	1

a SS(E) = 25 mg/l

b Se refiere al filtro de arena

SS Sólidos Suspendidos

(I) Influyente

(E) Efluente

destacan los siguientes: La eficiencia de remoción de sólidos y de aceite aumenta cuando la magnetita que se dosifica o siembra es más pequeña porque permite una mejor distribución y suspensión; es poco el efecto de aumentar el campo magnético (>0.2 Tesla) en la eficiencia de remoción de aceite; la turbiedad aumenta conforme se intensifica el campo; tiempos de contacto mayores de 30 segundos, y gastos menores de 8 gpm/pie<sup>2</sup> (0.032 lpm/cm<sup>2</sup>) no mejoran significativamente la eficiencia de remoción (> 90%) durante el tratamiento. En pruebas preliminares, al conjuntar sedimentación y SMAG, se obtuvieron eficiencias de remoción de partículas superiores al 95 por ciento. Petrakis informa también de resultados exitosos para remover cromo y plomo de aguas residuales.

Resultados obtenidos por Oberteuffer et al.<sup>(6)</sup> denotan la importancia que tiene la variación de la tasa de flujo en la remoción de sólidos suspendidos; a mayor velocidad menor eficiencia de atrapamiento. Observaron que bajo condiciones específicas de tratamiento (4500 mg/l de SS y 2.5 m/min), al aumentar el campo de 2 a 10 KG disminuyen los sólidos suspendidos de 10 a 1 mg/l, respectivamente.

Un ejemplo de diagrama de flujo sobre el proceso de tratamiento de agua con SMAG en la industria del acero para la recuperación de partículas se representa en la fig 2.8. Dicho diagrama esquematiza el proceso completo de tratamiento (remoción, lavado y recuperación de sólidos).

#### 2.4.2 Metales pesados

El agua de proceso en la industria metalúrgica se caracteriza por contener de una u otra forma gran variedad de metales, entre los cuales se identifican los metales pesados. Como consecuencia de

los grandes volúmenes de agua que utilizan y las cargas de elementos disueltos y suspendidos que son arrastrados durante el proceso, se han desarrollado estudios de recuperación de los metales o simplemente de tratamiento de las aguas altamente tóxicas. Mitchell et al.<sup>(13)</sup> describen como importante el proceso desarrollado por los japoneses (Nippon Electric Company of Japan), que consiste en tratar el agua residual con  $FeSO_4$ , neutralizar con  $NaOH$  y oxidar con aire bajo condiciones específicas. Del tratamiento se obtiene un sedimento de ferrita donde los metales han coprecipitado, el cual se remueve por medio de la filtración magnética. Reportan eficiencias superiores al 98 por ciento en la remoción de metales tales como  $Hg$ ,  $Cd$ ,  $Cu$ ,  $Zn$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Mn$ ,  $Fe$ ,  $Bi$  y  $Pb$ .

Praveen,<sup>(2,17)</sup> estudiando el intercambio de iones entre los flocúlos de hidróxido férrico y metales pesados en presencia de material magnético y campo magnético, observó que la presencia de coagulante  $-Fe_2(SO_4)_3-$  mejora la eficiencia de remoción de  $Cd$ ,  $Cu$ ,  $Ni$  y  $Zn$  en un ámbito más amplio de pH, especialmente en medio ácido; en cambio, cuando las pruebas se hicieron sin coagulante, la remoción aumenta conforme se incrementa el pH (5-11). Las pruebas las hizo de acuerdo con las características descritas en la tabla 2.3 y bajo las condiciones del diagrama de la fig 2.8. Los resultados obtenidos por ese investigador fueron que el coagulante tiene un efecto significativo en la remoción de los metales a pH menor que 9.0.

En pruebas con valores de pH mayores que 9.0 la precipitación de los metales es el factor importante en la remoción y, por lo tanto, la diferencia entre las pruebas con y sin coagulante no fue substancial.

TABLA 2.3 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS PRUEBAS

Metales pesados	Cd, Cu, Ni, Zn
Conc. inicial, mg/l	60 - 70
pH de pruebas	2 - 11
Filtro millipore	0.45 $\mu$ m
$Fe_2(SO_4)_3$ , mg/l	667
Tasa de flujo, ml/min	45 - 55
Campo magn., KG	5
$Fe_3O_4$ , mg/l	667
Vol. de prueba, ml	1500

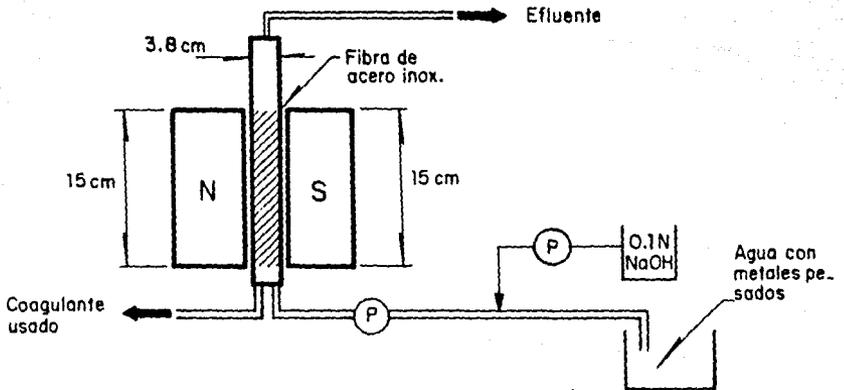


Fig 2.8 Diagrama esquemático de equipo usado para la remoción de metales pesados por medio de SMAG

En la fig 2.9 se representan los resultados observados en la

remoción de cadmio, cuyo comportamiento es semejante al de los otros metales.

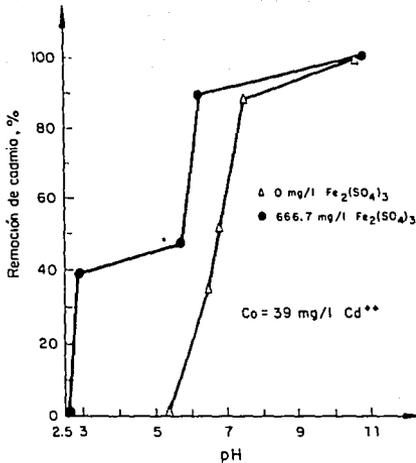


Fig 2.9 Efecto de sulfato férrico en la remoción de cadmio<sup>(2)</sup> mediante SMAG

Terashima<sup>(10)</sup> llevó a cabo pruebas semejantes a las de Praveen<sup>(2)</sup> para remover cadmio, definió otras variantes al hacer pruebas con diferentes coagulantes, entre los que escogió  $CaSx$ ,  $Na_2S$  y  $FeCl_3$ . Las pruebas se realizaron con agua preparada, mezclando la solución de cadmio (20 mg/l) con agua de lavado de gases de una planta municipal incineradora de basuras. La experimentación se hizo manteniendo un flujo y una intensidad de campo de 100 m/h y 0.8 a 1.0 Tesla, respectivamente. El separador magnético se diseñó con las características siguientes: longitud de 15 cm y diámetro de 2.24 cm, relleno con 200 capas de malla 24, hechas con alambre ferromagnético de 150  $\mu$ m de diámetro. El campo magnético se indujo en la dirección perpendicular al flujo de agua. Como ejemplo de los resultados obtenidos por Terashima se presenta la fig 2.10, la cual representa el efecto del pH en la remoción de cadmio con la variación de magnetita y cloruro férrico.

### 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

De acuerdo con la información recopilada sobre el tema, existen dos formas de inducir el campo magnético en el dispositivo de tratamiento: Líneas de flujo magnético paralelas y perpendiculares al sentido de circulación del agua. Para fines de simplificación de dispositivo magnético y porque se reportan eficiencias de remoción durante el tratamiento, se elige que las líneas de flujo magnético sean paralelas, es decir, corresponde al diseño de un solenoide. Con esa base se diseña la bobina; aunque el principio de diseño para ambos sistemas es el mismo.

#### 3.1 Principio de campo magnético

Fue en el año de 1820 que el Físico danés Hans Cristian Oersted (1770-1851) observó por primera vez que una corriente eléctrica produce campo magnético en el espacio circundante. Observó, durante la experimentación, que la aguja de una brújula se desviaba cuando se acercaba ésta a un conductor por el que pasaba una corriente. A partir de esa época diferentes investigadores

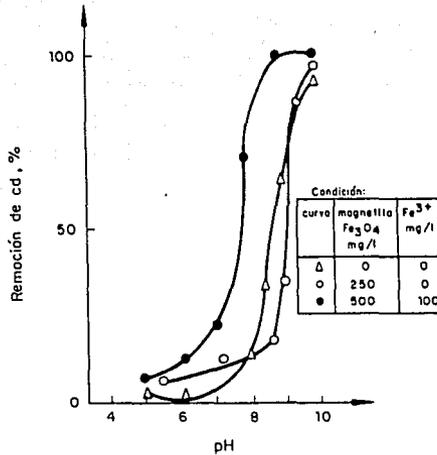


Fig 2.10 Efecto del pH en la remoción de cadmio con diferentes dosis de magnetita y  $FeCl_3$

En dicha figura se observa un comportamiento semejante cuando se usa papel filtro (curva  $\Delta$ ) que cuando varía la dosis de coagulante y magnetita.

En general, con los tres tipos de coagulantes se obtuvieron resultados satisfactorios de remoción de cadmio. El mecanismo de atrapamiento se describe de manera semejante al observado por otros autores. En ese trabajo se contempla la posibilidad de recuperar los coagulantes y la magnetita después del tratamiento.

Investigadores como Watson *et al*<sup>(30)</sup> manifiestan la importancia que tiene la SMAG en la recuperación de metales tales como oro y uranio de los residuos minerales.

desarrollaron experimentos y expresiones matemáticas relacionadas con diferentes comportamientos de campo magnético, entre las cuales se encuentra la ley de Ampere<sup>(20)</sup> que relaciona cuantitativamente el campo magnético y la corriente en la expresión siguiente:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 I \quad 3.1$$

Válida para cualquier configuración de campo magnético, con cualquier corriente y trayectoria de integración. Con el análisis de la ec 3.1, en un alambre rectilíneo con corriente  $I$  como lo muestra la fig 3.1, se observa que a un punto del alambre le corresponde un segmento  $dL = 2\pi r$  y que el campo inducido por las

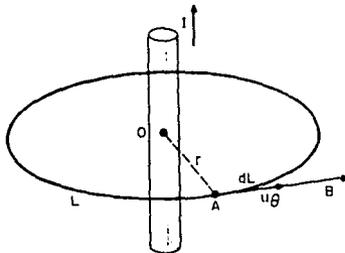


Fig 3.1 Campo Magnético en una corriente rectilínea<sup>(23)</sup>

líneas de inducción  $L$  es tangente a la trayectoria  $r$ ; de ahí que la circulación magnética en el punto  $OA$  sea

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B \oint d\mathbf{l} = B (2\pi r) = \mu_0 I \quad 3.2$$

proporcional a la corriente e independiente del radio de trayectoria, no importando la trayectoria circular concéntrica. La

circulación magnética será siempre  $\mu_0 I$ .

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Después de muchos experimentos realizados en este campo, se desarrollaron expresiones como la conocida ley de Ampere-Laplace, de la cual se deriva la expresión de campo magnético que induce una corriente circular a lo largo del eje, ver fig 3.2.

$$B = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + R^2)^{3/2}} \quad 3.3$$

En el caso de un solenoide en lugar de existir solo una corriente circular hay muchas, dependiendo del número de vueltas que se tengan. En la fig 3.2 se muestra el corte longitudinal de un solenoide, identificando algunas de sus características de diseño.

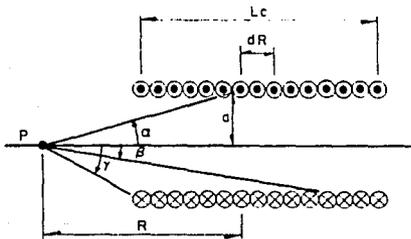


Fig 3.2 Campo magnético en un punto X situado sobre el eje de una corriente solenoidal

En dicha figura, el número de espiras (N) por unidad de longitud (Lc) corresponde a  $N/Lc$  y, el número de éstas en una sección  $dR$ , es  $(N/Lc)dR$ . Como cada espira induce un campo en el punto X, el campo correspondiente a las espiras contenidas en  $dR$  resulta.

$$dB = \left[ \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + R^2)^{3/2}} \right] \frac{N}{Lc} dR \quad 3.4$$

Del análisis de la figura anterior se obtienen las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} R &= a \operatorname{Cotan} \alpha \\ dR &= -a \operatorname{Cosec}^2 \alpha d\alpha \\ a^2 + R^2 &= a^2 \operatorname{Cosec}^2 \alpha \end{aligned}$$

Sustituyéndolas en la ec 3.4 se convierte ésta en la ec 3.5; la cual, integrada en toda la longitud del solenoide, permite evaluar

$$dB = \frac{\mu_0 NI}{2Lc} (-\sin \alpha d\alpha) \quad 3.5$$

el campo global.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2Lc} (\cos \beta - \cos \alpha) \quad 3.6$$

Si se considera que la relación  $R/a$  es muy grande (solenoides largo) y el punto  $X$  está cerca de su centro, entonces los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  se aproximan a  $90^\circ$  y  $0^\circ$ , respectivamente; esto permite simplificar la ec 3.6 a la forma.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{Lc} \quad 3.7$$

La ec 3.7 es la base en el diseño de la bobina. Los cálculos parten de esa expresión, que descrita de otra forma, se representa por las ecuaciones.

$$B = \mu_0 H \quad ; \quad H = \frac{NI}{Lc}$$

### 3.2 Metodología de cálculo

De acuerdo con la información obtenida de la recopilación bibliográfica (cap 2 ) sobre aplicación de campo magnético en la eliminación o recuperación de elementos magnéticos, por simplificación en la experimentación, se restringe el diseño a las magnitudes de los siguientes parámetros: inducción de las líneas de campo magnético paralelas al flujo de agua en el dispositivo experimental, diámetro interno de la bobina de 5.08 cm (2 pulg.), longitud de la bobina de 30 cm (12 pulg), voltaje máximo de 110 volts, temperatura de calentamiento de 70°C superior a la ambiente e intensidad de flujo magnético aproximada de 10,000 ampere-vueltas. Definidas las dimensiones y condiciones de operación del solenoide, el diseño se centra en conocer el calibre y cantidad de alambre magneto requerido para la bobina. Para lograr tal propósito, es conveniente definir antes algunos conceptos y proceder posteriormente a la secuencia iterativa de cálculo.

*Factor de espacio.* Se define como la relación en el corte longitudinal de la bobina (fig 3.3 ) entre el área de cobre y el área total con aislamiento y espacios huecos.

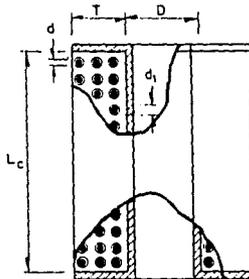


Fig 3.3 Identificación de variables en corte longitudinal del solenoide

De acuerdo con la nomenclatura de la fig 3.3 el área de cobre y total corresponden a las expresiones.

$$\text{Área de cobre} = \frac{\pi d_1^2 N}{4} \quad ; \quad \text{Área total} = LcT$$

De ahí que el factor de espacio ( Sw ) corresponda a la ec 3.8, fundamental en los cálculos posteriores del diseño.

$$Sw = \frac{\pi d_1^2 N}{4LcT} \quad 3.8$$

Sin embargo, para fines de diseño, un valor aproximado recomendado<sup>(3)</sup> es a partir del diámetro del alambre y su aislamiento,

$$Sw = \frac{0.85\pi d_1^2}{4d_1^2} \quad 3.9$$

Tomando en cuenta la descripción de datos de la fig 3.3, la ley de Ohm y el calor generado por el paso de corriente por un conductor, se obtienen las ecs 3.10 a 3.18, requeridas en el procedimiento de cálculo del solenoide.

Longitud media de la espira :

$$l = \pi ( D + T ) \quad 3.10$$

Área del conductor :

$$A = \frac{K l ( NI )}{1.16 E} = \frac{K l N}{1.16 R} \quad 3.11$$

Número total de espiras :

$$n = \frac{1,270,000 Sw}{A} \quad 3.12$$

$$N = n Lc T = \frac{1,270,000 Sw LcT}{A} \quad 3.13$$

Resistencia total :

$$\rho = \frac{1.100.000 \text{ Sw K}}{A^2} \quad 3.14$$

$$R = \rho V = \frac{K \ell N}{1.16A} = \frac{1.100.000 \text{ Sw K}(\text{LcT}\ell)}{A^2} \quad 3.15$$

Peso del alambre :

$$W = w V = (0.71 \text{ Sw} + 0.040) \text{Lc T} \ell \quad 3.16$$

Calor generado :

$$Q = \frac{K (\text{NI})^2}{1.470.000 \rho \text{ Sw}} \quad 3.17$$

Espesor de la bobina :

$$T = \frac{1}{4} \left[ \left[ \frac{Q}{L_c^2} - D \right] + \left[ \frac{Q}{L_c^2} - D \right] + \left[ \frac{8QD}{L_c^2} \right]^{1/2} \right] \quad 3.18$$

Un posible procedimiento de cálculo es suponer el espesor del embobinado y calcular, con la ec 3.10, la longitud media de la espira.

TABLA 3.1 CARACTERISTICAS DE ALAMBRE MAGNETO  
POLILAT-180. CAPA DOBLE DE ESMALTE (32)

CALIBRE AWG	DIÁMETRO ALAMBRE DESNUDO						AISLAMIENTO				PESO kg/m	LONGI- TUD in/g	Resistencia a 20°C ohm/m
	Mínimo		Nominal		Máximo		Mínimo incremento en diámetro		Diámetro máximo				
	mm.	pulg.	mm.	pulg.	mm.	pulg.	mm.	pulg.	mm.	pulg.			
14	1.813	0.0825	1.628	0.0641	1.838	0.0844	0.081	0.0032	1.732	0.0682	18.75	53.46	8.28
15	1.435	0.0565	1.450	0.0571	1.458	0.0574	0.078	0.0030	1.547	0.0609	14.90	87.33	10.4
16	1.278	0.0503	1.290	0.0508	1.298	0.0511	0.074	0.0029	1.384	0.0545	11.83	84.33	13.2
17	1.136	0.0448	1.151	0.0453	1.156	0.0455	0.071	0.0028	1.240	0.0488	9.404	106.3	16.8
18	1.013	0.0399	1.024	0.0403	1.029	0.0405	0.068	0.0028	1.110	0.0437	7.470	133.8	21.0
19	0.902	0.0356	0.912	0.0359	0.917	0.0361	0.064	0.0025	0.993	0.0391	5.937	166.4	26.4
20	0.805	0.0317	0.813	0.0320	0.818	0.0322	0.058	0.0023	0.862	0.0351	4.702	212.8	33.2
21	0.718	0.0282	0.724	0.0285	0.728	0.0286	0.056	0.0022	0.798	0.0314	3.754	267.7	41.8
22	0.635	0.0250	0.643	0.0253	0.645	0.0254	0.053	0.0021	0.714	0.0281	2.981	337.0	53.2
23	0.560	0.0224	0.574	0.0228	0.577	0.0227	0.051	0.0020	0.643	0.0253	2.385	422.0	66.8
24	0.505	0.0199	0.511	0.0201	0.513	0.0202	0.048	0.0019	0.577	0.0227	1.875	533.0	84.5
25	0.450	0.0177	0.456	0.0179	0.457	0.0180	0.046	0.0019	0.518	0.0203	1.495	696.0	106.0
26	0.398	0.0157	0.404	0.0158	0.408	0.0160	0.043	0.0017	0.462	0.0182	1.188	845.0	125.0
27	0.358	0.0141	0.361	0.0142	0.363	0.0143	0.041	0.0018	0.417	0.0164	0.943	1052.0	169.0
28	0.318	0.0125	0.320	0.0126	0.323	0.0127	0.041	0.0018	0.373	0.0147	0.748	1332.0	215.0
29	0.284	0.0112	0.287	0.0113	0.290	0.0114	0.038	0.0015	0.338	0.0133	0.589	1675.0	268.0
30	0.251	0.0098	0.254	0.0100	0.256	0.0101	0.036	0.0014	0.302	0.0119	0.473	2113.0	338.0
31	0.224	0.0086	0.228	0.0088	0.229	0.0089	0.033	0.0013	0.274	0.0108	0.378	2645.0	431.0
32	0.201	0.0079	0.203	0.0080	0.208	0.0081	0.030	0.0012	0.249	0.0098	0.304	3328.0	539.0

Con la ec 3.11 se calcula el área del conductor y se compara el resultado con la información de la tabla 3.1. Los datos de diámetro de dicha tabla se sustituyen en la ec 3.9 para calcular un valor aproximado de  $Sw$  y, con la ec 3.18, se calcula el espesor de la bobina; valor que se sustituye en la ec 3.11 para calcular una nueva área y comparar, con el diámetro obtenido de la tabla, el valor resultante de  $Sw$  con el calculado al principio con valores supuestos. Si resultan aproximadamente iguales, se identifica el diámetro y se calculan los demás parámetros; en caso contrario, se prosiguen los cálculos hasta obtener valores de  $Sw$  semejantes. Con la ec 3.18, una vez conocido  $Sw$ , se está en posibilidad de calcular el calor generado, considerando que la disipación será hacia la superficie externa de la bobina y que, para una elevación no mayor de  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la fig 3.4 reporta  $0.45\text{ watts/pulg}^2$ .

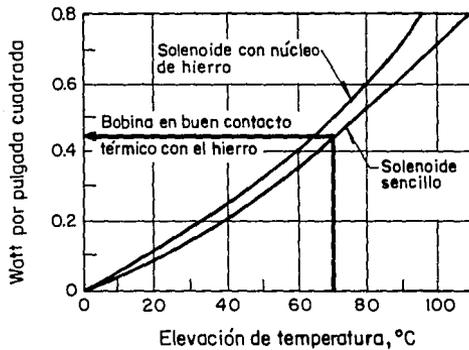


Fig 3.4 Relación de potencia de alimentación-área periférica externa de una bobina con aislamiento de enamel

En el esquema de la fig 3.5 se representa el diagrama de flujo que detalla el procedimiento iterativo de cálculo de una bobina tipo solenoide.

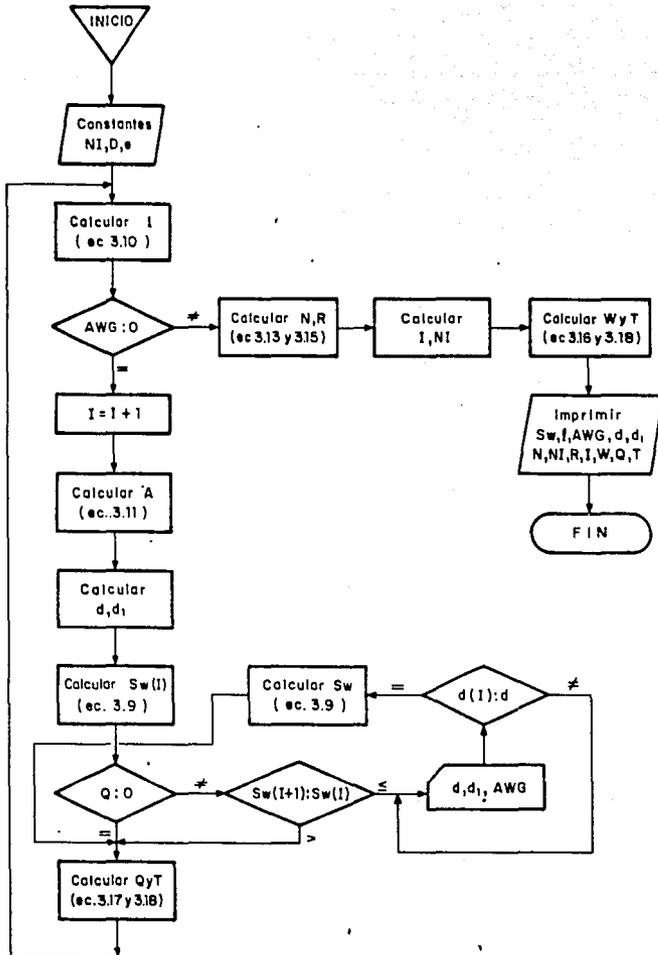


Fig 3.5 Diagrama de flujo para el cálculo de un solenoide

## NOMENCLATURA :

A	Area del conductor, en circular mil (igual al cuadrado de diametro en milésimas de pulg.)
a	Radio de la espira
B	Campo magnético inducido con dirección según regla de la mano derecha, en tesla (T)
D	Diámetro del devanado de la bobina, en pulg.
d	Diámetro del alambre de cobre, en pulg.
d <sub>1</sub>	Diámetro del alambre aislado, en pulg.
E	Voltaje, en volts
H	Intensidad de campo magnético, en ampere-vuelta / m
I	Intensidad de corriente, en ampere
K	Relación de resistencia específica del conductor $K = \frac{100}{C} + 0.004 (t - 20)$ ; en este caso se considera C como la conductividad del cobre de 100% y t, la temperatura de 70 °C; Por tanto, K vale 1.2
Lc	Longitud de la bobina, en pulg
ℓ	Longitud media de la espira, en pulg
N	Número total de espiras
n	Número de conductores por pulg. cuadradas
NI	Ampere - vuelta
Q	Calor generado, en watts
R	Resistencia total, en ohms
Sw	Factor de espacio del embobinado
T	Espesor de la bobina, en pulg
V	Volumen del espacio embobinado, en pulg <sup>3</sup> $V = Lc \ell T$
W	Peso total del alambre incluyendo su aislamiento, en libras
w	Peso del embobinado por pulg <sup>3</sup> del espacio embobinado, en libras $w = 0.271Sw + 0.040$
ρ	Resistencia de la bobina por pul <sup>3</sup> del espacio embobinado
μ <sub>0</sub>	Permeabilidad magnética del vacío

## RELACIONES DE UNIDADES (22)

CARACTERISTICAS	SI	CGS	RELACION
Campo magnético inducido	$B_o$ , Tesla (T)	B , Gauss (G)	$1T = 10^4$ G
Intensidad magnética	$H$ , Av $m^{-1}$	H, Oersted (Oe)	$1Avm^{-1} = 0.0126$ Oe
Campo magnético inducido	$B_o = \mu_o H$	$B = H$	$1T = 10^4$ Oe
Permeabilidad del vacío	$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$	$\mu_o = 1$	$1Hm^{-1} = \frac{10^7}{4\pi} Goe^{-1}$
Potencial eléctrico	E , Volt	E , Volts	
Corriente eléctrica	I , Amperes	I , Ampere	
Potencia	Q, Watts	Q, Cal/s	1 Watt = .24 Cal/s
Resistencia total	R, Ohm	R, Ohms	
Permeabilidad magnética del vacío	$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$	$\mu_o = 1$	$1Hm^{-1} = \frac{10^7}{4\pi} Goe^{-1}$

Un circular mil es una unidad del sistema de medidas inglesas con una superficie igual al área de un círculo con diámetro de un mil (0.001 pulg). Es la unidad de área de uso casi universal para alambres y cables. Para obtener los circular mils de un conductor cilíndrico macizo, se eleva al cuadrado su diámetro expresado en milésimas de pulgada.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen las características de tratamiento, condiciones experimentales y la información obtenida de cada prueba. Para definir condiciones, características y alcances de las pruebas fue conveniente, dada la novedad de aplicación de la SMAG en la remoción de arsénico del agua, el apoyo en la información recopilada (cap 2), en las características del agua contaminada y en las propias limitaciones para realizar la experimentación; por tal situación surgió el interés de fundamentar con el apoyo de la estadística los resultados de las pruebas. Para lograrlo se recurrió al diseño de experimentos de un cuadrado latino.

### 4.1 *Condiciones de prueba*

#### 4.1.1 Selección de variables experimentales

Dada la poca información que, sobre estudios con campo magnético, existe en la remoción de metales y, por ser esta la primera experimentación con SMAG para remover arsénico, se seleccionaron las variables tomando como base algunas de las condiciones probadas por diferentes investigadores .

De acuerdo con los resultados obtenidos por Martínez,<sup>(33)</sup> la remoción de arsénico mediante coagulación-sedimentación se logra con concentraciones de coagulantes mayores de 30 mg/l. Con objeto de experimentar el efecto de adición de coagulante, sin propiciar la coagulación durante la mezcla de reactivos, la dosis de coagulante seleccionada es de 20 mg/l. Por las características eficientes de remoción se seleccionan como coagulantes sulfato férrico y cloruro férrico.

Como el propósito del estudio es evaluar el efecto del campo magnético en la remoción, en este caso de arsénico, se elige como otra variable de experimentación.

Debido a que en el tratamiento es importante el material ferro o paramagnético con que se empaque la columna, se consideró este como la tercer variable experimental. De esa manera se seleccionaron en principio tres variables como más importantes (campo magnético, coagulante y empaque). Por desconocer las propiedades magnéticas de los compuestos formados por arsénico en medio acuoso y en presencia de coagulante, se decidió observar el comportamiento de remoción en lugar de involucrar el sembrado de material magnético como otra variable experimental.

#### 4.1.2 Calidad del agua

El agua sintética usada para hacer todas las pruebas se preparó en el laboratorio tomando en cuenta las características del agua de algunos de los pozos de la Comarca Lagunera<sup>(34)</sup> (ver tabla A.2) La tabla 4.1 resume los parámetros de calidad considerados. El agua se preparó en tambos de 50 litros con agua de la llave y mediante

la dosificación de algunos reactivos. Para que tuviese una calidad como la descrita en dicha tabla fue necesario hacer la dosificación mediante el procedimiento siguiente: En un recipiente de 50 litros de capacidad se adiciona un volumen de aproximadamente 30 litros de agua de la llave. Previa disolución o suspensión de los reactivos con agua de la llave, se dosifican a intervalos con la correspondiente agitación 5g de  $\text{Ca(OH)}_2$ , 7.5g de  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , 7.5 g. de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 5 ml. de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; después se afora a 50 litros y se dosifica alternadamente aire y  $\text{CO}_2$  hasta lograr la calidad deseada. El tiempo de preparación fue de tres a cuatro días de burbujeo continuo y agitación por intervalos de tiempo. Una vez que se logra la calidad aproximada deseada se dosifican 25 ml de una solución que contiene 1000 mg/l de arsenico, preparada de la disolución correspondiente del  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4$ . El agua cruda soblante por prueba, al mezclarse con otro volumen preparado de 50 litros, fue suficiente para hacer otras dos pruebas.

TABLA 4.1 CALIDAD DEL AGUA DE EXPERIMENTACION

<u>PARAMETRO</u>	<u>VALOR</u>
Temperatura	18 °C
pH	7.5
Alcalinidad, $\text{CaCO}_3$	39 mg/l
Dureza de $\text{Ca}^{++}$ , $\text{CaCO}_3$	227 "
Cloruros, $\text{Cl}^-$	48 "
Sulfatos, $\text{SO}_4^{--}$	443 "
Arsénico, $\text{As}^{5+}$	0.45 "
Turbiedad	0.5 NTU

#### 4.1.3 Diseño de experimento

Con el propósito de evaluar el efecto en el tratamiento debido a la variación de las variables seleccionadas (campo magnético, tipo de coagulante y empaque), se decidió en esta etapa del estudio hacer pruebas con tres niveles de variación por parámetro elegido;

selección que lleva a un diseño de experimentos del tipo *cuadrado latino*.

La metodología sobre el diseño de experimentos *cuadrado latino* está descrita en los trabajos de Miller<sup>(35)</sup>, Box<sup>(36)</sup>, Cochran<sup>(37)</sup> y Mendehatt<sup>(38)</sup>. En el *anexo* se hace una descripción sobre la metodología que se sigue en el análisis estadístico.

En el arreglo en forma matricial que se presenta en la fig 4.1 se muestra la distribución seleccionada de las variables para cada prueba. Dicha figura contiene dos matrices porque se consideran dos réplicas (repeticiones) para evaluar el efecto por experimentación.

		Replica I			Replica II		
		Empaque			Empaque		
		1	2	3	1	2	3
%	20	A	B	C	B	C	A
C		(1)	(2)	(3)	(10)	(11)	(12)
a	60	C	A	B	A	B	C
m		(4)	(5)	(6)	(13)	(14)	(15)
p	100	B	C	A	C	A	B
o		(7)	(8)	(9)	(16)	(17)	(18)

Fig 4.1 Arreglo matricial de las condiciones experimentales de tratamiento al variar empaque, campo magnético y reactivo de hierro.

Las variables experimentales identificadas en la fig 4.1 se describen a continuación: A, B y C corresponden a cloruro férrico, sulfato férrico y nada de coagulante, respectivamente; el empaque 1, 2 y 3 corresponden a rebaba, recortes y balines, respectivamente; la intensidad de campo corresponde a 20, 60 y 100 por ciento de la intensidad que se logra con el reóstato, que en ampere-vueltas corresponden a 7,600, 22,500 y 33,750 A-v/m, respectivamente. La intensidad de campo convertida a Oersted corresponde a 96.13, 282.73, y 483.48, respectivamente.

#### 4.1.4 Campo magnético

Para identificar la dirección y evaluar la magnitud del campo magnético inducido por el solenoide fue necesario hacer unas pruebas con la ayuda de un medidor de flujo magnético (Teslametro marca Systron Donner, mod.3103A). Para corroborar la orientación de los polos se utilizó una brújula. En las figs 4.2 a y b se esquematiza el sentido de la corriente y las líneas de flujo en el solenoide que se usó durante las pruebas.

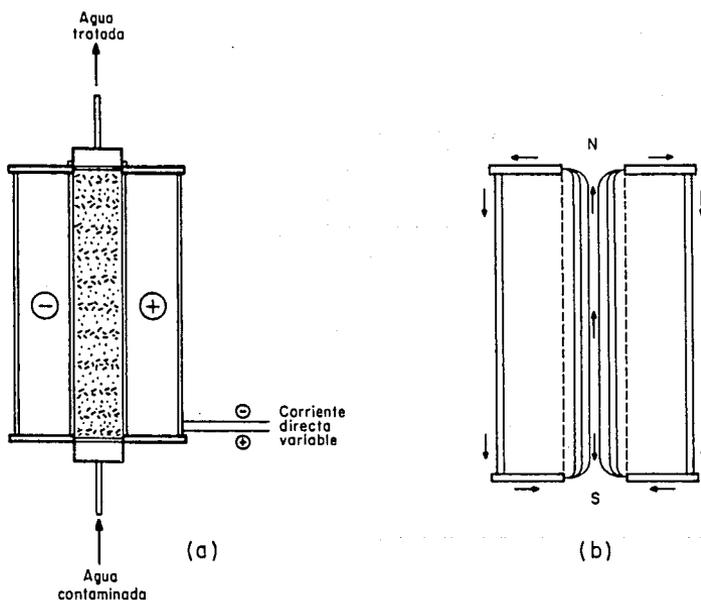


Fig 4.2 Esquema del solenoide: a) con respecto al sentido de la corriente y b) con respecto al sentido de las líneas de flujo

Tomando en cuenta que el solenoide se construyó con aproximadamente 13,500 vueltas de alambre magneto calibre 20 AWG y que se hicieron lecturas de corriente y voltaje para probarlo, en la tabla 4.2 se resumen algunos datos incluyendo el cálculo

correspondiente de H. El objetivo de dicha tabla es conocer la intensidad de campo con respecto al porcentaje de vuelta del reóstato como parametro da control en las pruebas.

TABLA 4.2 CALCULO DE H CON RESPECTO A LA VARIACION DE LA CORRIENTE

% (Vuelta)	I (Amper)	E (Volts)	R(E/I) ( Ohm )	H (Oersted)
0	0	0	0	0
20	0.17	22.5	132.35	96.13
30	0.27	33	122	152.68
40	0.33	46	139.4	186.60
50	0.43	55	127.99	243.15
60	0.50	67.5	135	282.73
70	0.61	78	127.86	344.94
80	0.69	90	130.43	390.17
100	0.855	110	128.65	483.48

Para determinar físicamente en medio aire la intensidad del campo en la longitud de la columna, se introdujo el sensor axial a diferente profundidad y se observó que éste es constante en los 20 cm centrales de la longitud total del solenoide; así como también es lineal en el mismo intervalo de longitud con respecto a la intensidad de corriente o voltaje aplicado. En las figs 4.3 y 4.4 se presentan tales comportamientos.

También se hizo una prueba introduciendo alambre recocado en manojo como entrehierro y, por el centro de estos, se deslizó el sensor. Los resultados obtenidos fueron semejantes a los de la fig 4.3, porque las líneas de flujo se conducen por el material ferromagnético. Para observar el efecto de magnificación del campo, se introdujo una barra metálica con características paramagnéticas pero interrumpiendo el contacto en un extremo con la cubierta metálica del solenoide, para interferir las líneas de

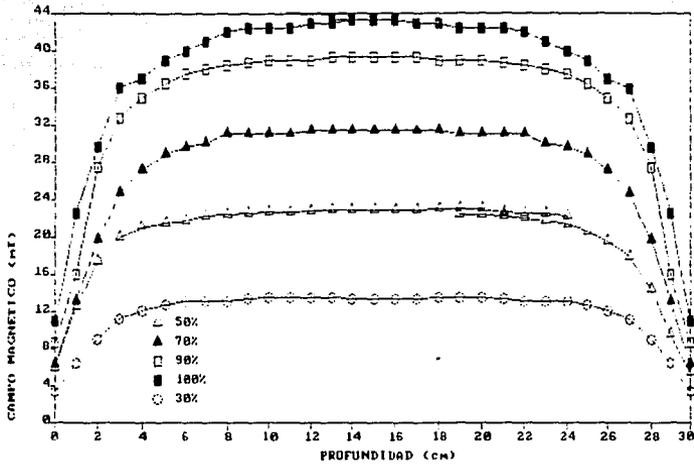


Fig 4.3 Variación del campo magnético en medio aire con respecto a la profundidad del solenoide

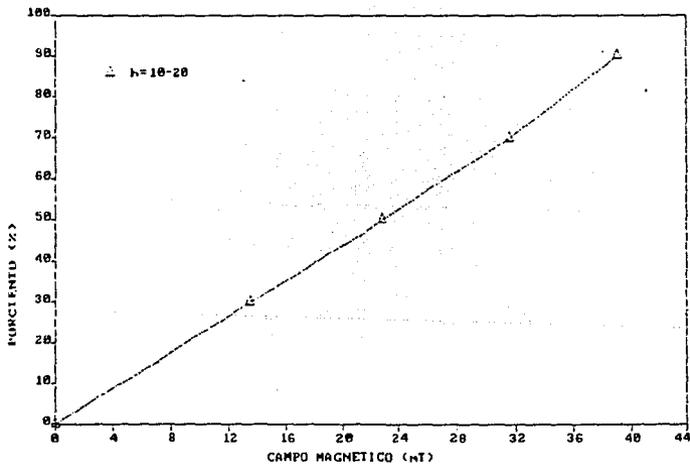


Fig 4.4 Comportamiento del campo magnético con respecto a la intensidad de corriente alimentada al solenoide

flujo con el sensor axial o transversal. Con una separación suficiente (5mm) para interferir con el sensor, se observó que el campo se intensifica significativamente con la variación de la corriente. Para 0.43 amp la lectura del teslámetro indicaba 380 mT y para 0.85 amp el resultado fue de 500 mT. La información obtenida resalta la magnificación del campo dependiendo del incremento de la permeabilidad del material con que se empaque la columna. Debido a la imposibilidad que existe para determinar el campo cuando se empaqueta la columna (entrehierro) del solenoide éste se describe como  $H(A-v/m)$ .

Con objeto de corroborar que el solenoide no se calentaría durante su operación, se dejó doce horas con máximo voltaje (110 volts) y, con un termómetro pegado al embobinado interno y aislado del medio ambiente, se observó que después de siete horas de operación, suficientes para hacer cada prueba, la temperatura máxima medida fue de 82 °C; valor por abajo de la temperatura de diseño del alambre magneto (180 °C). Dado que la corriente disminuye conforme se calienta el solenoide y, por tanto, disminuye el campo, se decidió mantenerla constante corrigiendo durante la prueba la posición (porcentaje de vuelta) del reóstato.

#### 4.1.5 Flujo de agua

En la búsqueda de una mayor eficiencia de remoción de arsénico y por facilitarse las pruebas, se eligió usar flujo ascendente en vez de descendente. El flujo descendente favorece la sedimentación de las partículas por efecto de la gravedad y se opone a la atracción de ésta hacia las zonas de campo magnético. En el flujo ascendente la gravedad se opone al arrastre de las partículas debida a su inercia, favoreciendo de esa forma la atracción de éstas hacia las zonas de intensidad magnética.

Con objeto de hacer conservadora la experimentación para remover arsénico mediante campo magnético, se seleccionó flujo constante a

través de la columna del orden de 160 ml/min ( $10.5 \text{ ml/min.cm}^2$ ); valor que resulta comparable al inferior de los recomendados para filtración rápida ( $8.3-2.5 \text{ ml/min. cm}^2$ )<sup>(39-42)</sup>. Los flujos recomendados en sistemas mediante campo magnético de gran intensidad (1 a 10 Tesla) es en el intervalo de 204 a 611 ml/min.cm<sup>2</sup>. El gasto se restringió principalmente por desconocimiento del comportamiento de la remoción durante el tratamiento, por la capacidad de almacenamiento de agua, y porque, con cuatro horas de operación continua, se logra tratar suficiente agua para evaluar el sistema experimental.

#### 4.1.6 Empaque de la columna

Debido a la poca información que existe con respecto a las propiedades magnéticas de los elementos y sus respectivas sales y complejos que forman en medio acuoso, se decidió experimentar con coagulante pero sin usar material magnético (sembrado) para atraer indirectamente las partículas hacia las regiones de mayor campo. Se utilizaron tres tipos de materiales metálicos de empaque: rebaba, recorte y esferas. La rebaba es material de desecho de acero maquinado en frío, "cold-rolled", laminillas enrolladas de aproximadamente un cm de largo con sección de 4 mm de ancho por 0.5 mm de espesor. El recorte es alambre recocido para construcción de 2.5 mm de diámetro, cortado en tramos irregulares de más o menos 5.0 mm de largo. Las esferas son balines acerados para rodamientos con diámetro entre 3 y 4 mm.

Por las características de la columna difícilmente se puede mantener una distribución uniforme del material de empaque; dado el efecto de agrupamiento del campo sobre el material metálico, fue necesario introducir material soporte para mantener la distribución del empaque. Para lograr dicho propósito se usó arena de granulometría específica de tamaño mayor ( $\pm 1.41-1.19 \text{ mm}$ , #12-#16) que el identificado para usar como medio filtrante ( $\pm 1.2-0.6 \text{ mm}$ , # 16-30) con objeto de reducir el efecto de filtración en

este sistema de tratamiento. La arena utilizada es de tipo basáltico con alto contenido de sílice, la cual fue seleccionada para usarse en un modelo experimental <sup>(43)</sup>.

Para cada prueba se pesaron 150 g de material de empaque, distribuido con arena como soporte a lo largo de la columna. Por la poca disponibilidad de material y debido al número de pruebas, se utilizó siempre el mismo material y solamente se reponía el que se perdía durante el lavado después de cada prueba. A continuación se especifican algunas características identificadas con respecto al material de empaque de la columna.

El volumen empacado de la columna siempre fue el mismo (628 ml); sin embargo, por las características del material metálico de empaque (rebaba, recorte y balines), hubieron variaciones entre la relación de material soporte (arena) y éste.

Haciendo un cálculo aproximado del área superficial representada por el material metálico se obtiene la información siguiente: la superficie expuesta de la rebaba es aproximadamente de  $0.0766 \text{ m}^2$ , la superficie del recorte es de  $0.0288 \text{ m}^2$  y la de los balines es de  $0.0187 \text{ m}^2$ . De esa manera la relación de superficie entre rebabas, recortes y balines es del orden 4 : 1.6 : 1 veces, respectivamente. Por las propias características del material metálico en cuanto al volumen ocupado dentro de la columna, la cantidad de arena también varía y la relación de valores promedio en peso de la arena cuando se empaquetan balines, recortes y rebabas es de aproximadamente 723, 690, y 527 g, respectivamente. De esa forma la relación en peso de la arena con respecto a los balines, recorte y rebaba es de 4.8, 4.6 y 3.5, respectivamente. Lo anterior denota la influencia de superficie que tiene la rebaba, sobre el recorte y, éste último, sobre los balines.

Con el fin de conocer algunas de las características del material metálico se hicieron algunos análisis cualitativos y cuantitativos. Primero, para conocer los elementos químicos que

constituyen el material, se observaron las muestras con el microscopio electrónico de barrido y, por medio del espectrómetro de rayos X se detectaron éstos. Conociendo los elementos que constituyen cada material se hizo una digestión en medio ácido ( $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ ) para disolverlos y determinar cuantitativamente por flama en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer, mod. 2380. En la tabla 4.3 se resumen algunas de las características identificadas del material.

TABLA 4.3 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL METALICO DE EMPAQUE

	Porcentaje en peso				
	Fe	Cr	Ni	Mn	otros
Rebaba	71.2	0.52	0.064	0.52	27.86
Recortes	97.08	0.025	0.017	0.42	2.46
Balines	98.88	0.59	0.044	0.46	0.026

Se observa en dicha tabla que cada material está constituido por los metales identificados y por otros elementos tales como carbón que no fue posible identificar, pero que corresponden a la diferencia en porcentaje para completar el peso de las muestras.

#### 4.2 Experimentación

##### 4.2.1 Procedimiento de prueba (metodología)

Con objeto de efectuar todas las pruebas del diseño de experimentos bajo condiciones semejantes se idearon diferentes arreglos de flujo; el que mejores características presentó se muestra en la fig 4.5 .



el volumen filtrado y la turbiedad del efluente. Terminada la prueba se extrae una muestra (global) del recipiente de almacenamiento de agua tratada, se acidifican las muestras con un mililitro de HCl concentrado, grado reactivo, guardándolas, previamente etiquetadas en el refrigerador a  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  si no es posible analizarlas el mismo día.

#### 4.2.2 Técnicas analíticas

Los parámetros determinados o medidos durante y después de la experimentación se fundamentan con las técnicas analíticas descritas por los métodos estándar<sup>(44)</sup>.

Arsénico. Se determina por el método del dietilditiocarbamato de plata, que consiste en dos etapas de reducción. La primera ocurre al dosificar de yoduro de potasio (KI) y cloruro de estaño ( $\text{SnCl}_2$ ) en medio ácido (HCl), efectuándose la reducción de arsénico pentavalente, As(V), a trivalente, As(III). La segunda etapa se lleva a cabo cuando se agrega cinc metálico, reduciendo el arsénico trivalente a arsina  $\text{AsH}_3$ . Este hidruro (gas) al burbujear en la solución de piridina con dietilditiocarbomata de plata forma un complejo rojo susceptible para una determinación colorimétrica.

Cloruro. Se determina por el método Argentométrico en condiciones alcalina  $\text{pH}=7-10$ , que se ajusta con la dosificación de una solución de hidróxido de sodio (NaOH). Esta determinación se basa en que al comenzar la titulación con nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) se agrega cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), para que indique el punto final de los cloruros (precipitado blanco) presentes en la muestra. El cloruro de plata ( $\text{AgCl}$ ) es precipitado cuantitativamente y, después de este, el exceso de plata forma el cromato de plata ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ), precipitado de color rojizo el cual indica el punto final de la titulación.

Potencial hidrógeno. Parámetro determinado con un potenciómetro o medidor de pH marca Corning, mod.10 .

Dureza. Determinación volumétrica hecha por el método complejante del ácido etileno diamino tetracético, usando como indicador Eriocromo negro T a un pH =  $10 \pm 0.1$ ; siendo el viraje de color vino a azul. El cambio de color indica el punto final de la titulación.

Alcalinidad. Titulación hecha por el método potenciométrico.

Turbiedad. La turbiedad se determinó directamente con un nefelómetro marca Turner, modelo 40.

Sulfatos. Determinado por el método turbidimétrico, precipitando los sulfatos con cloruro de bario. La absorbancia de la suspensión se mide con un nefelómetro o un espectrofotómetro y, la concentración, se determina por comparación en una curva de calibración.

Hierro, Manganeso, Cromo, Niquel. Debido a los niveles de concentración requeridos de metales en agua para uso potable y algunas limitaciones para el análisis de otros, se determinaron estos por medio de absorción atómica (flama) con un espectrofotómetro marca Perkin Elmer, mod. 2380.

#### 4.2.3 Resultados

La información recopilada durante la experimentación se resume en la tabla 4.4, la cual representa condiciones de las pruebas y algunos resultados obtenidos durante la realización de éstas. En los resultados no se incluyen datos de pH porque fueron muy parecidos al valor determinado en el agua original (tabla 4.1).

Debido al número de análisis de arsénico que significa cada prueba y con objeto de conocer la remoción parcial durante la prueba, se hicieron solamente análisis terciados de las muestras colectadas.

TABLA 4.4 CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS  
EXPERIMENTALES

MUESTRA No	GASTO (ml/min)	$\Delta T$ ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	OBSERVACIONES
1-1	160	0	18.8		
1-2	155	21	20.0	0.073	
1-3	150	41	16.8		
1-4	146	61	14.9	0.042	
1-5	142	81	13.4		
1-6	139	101	12.1	0.002	
1-7	136	121	10.9		
1-8	136	138	10.1	0.068	
1-9	128	154	9.2		cambio de carga
1-10	122	176	8.4	0.036	
1-11	117	191	8.1		
1-12	110	206	7.8	0.002	
MG			13.3	0.073	
2-1	154	0	5.0		
2-2	166	20	3.8	0.064	
2-3	164	40	3.1		
2-4	162	60	2.3	0.068	
2-5	160	80	1.7		
2-6	158	100	1.6	0.062	
2-7	156	120	2.0		cambio de carga
2-8	152	140	1.4	0.090	
2-9	142	160	1.3		faltó energía
2-10		176	1.0	0.054	
MG			4.2	0.060	
3-1	160	0	0.5		
3-2	150	20	0.4	0.272	
3-3	147	45	0.4		suspendido el bombeo
3-4	146	60	0.4	0.334	
3-5	145	80	0.4		
3-6	145	100	0.3	0.334	
3-7	142	120	0.4		
3-8	140	140	0.4	0.295	
3-9	134	160	0.5		cambio de carga
3-10	128	180	0.4	0.306	
3-11		191	0.3		
M.G			0.4	0.248	
4-1	156		5.3		
4-2	148	20	9.5	0.085	
4-3	138	40	7.5		
4-4	129	60	5.6	0.062	
4-5	124	80	6.9		
4-6	116	100	6.5	0.048	
4-7	112	120	5.7		
4-8	107	140	5.3	0.056	
4-9	104	160	4.7		cambio de carga

TABLA 4.4 (Continuación)

MUESTRA No	GASTO (ml/min)	$\Delta T$ ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	OBSERVACIONES
8-6	140	100	2.1		
8-7	138	120	1.8		
8-8	136	140	1.2	0.19	
8-9	128	160	0.6		cambio de carga
8-10	120	180	0.7	0.177	
8-11	114	196	0.8		
M.G			2.5	0.174	
9-1	160	0	3.2		
9-2	160	20	2.7	0.104	
9-3	158	40	2.2		
9-4	154	60	2.2	0.097	
9-5	152	80	2.0		
9-6	148	100	1.8	0.113	
9-7	146	120	1.8		
9-8	142	140	1.7	0.120	
9-9	134	160	1.6		cambio de carga
9-10	105	180	1.2	0.090	
M.G			2.3	0.113	
10-1	154	0	9.9		
10-2	152	20	4.8	0.048	
10-3	148	40	3.1		
10-4	146	60	3.3	0.056	
10-5	142	80	2.0		
10-6	137	100	4.0	0.020	
10-7	134	120	3.1		
10-8	129	140	2.0	0.020	
10-9	123	160	0.9		cambio de carga
10-10	116	180	1.3	0.020	
M.G			9.7	0.043	
11-1	161	0	1.6		
11-2	157	20	1.4	0.204	
11-3	152	40	0.8		
11-4	146	60	1.3	0.25	
11-5	140	80	0.9	0.21	
11-6	134	100	0.9	0.25	
11-7	132	120	0.8		
11-8	123	140	0.8		
11-9	114	160	0.7	0.206	
11-10	105	180	0.9		cambio de carga
M.G			1.5	0.225	
12-1	161	0	5.9		
12-2	164	20	3.4	0.13	
12-3	164	40	3.1		
12-4	164	60	3.1	0.13	
12-5	164	80	3.2		

TABLA 4.4 (Continuación)

MUESTRA No	GASTO (ml/min)	ΔT ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	OBSERVACIONES
4-10	98	180	3.6	0.051	
4-11	92	200	5.2		
4-12	86	220	2.6	0.045	
4-13	76	235	3.6		
M.G			7.1	0.060	
5-1	152	0	4.2		
5-2	146	20	1.4	0.02	
5-3	144	40	1.2		
5-4	142	60	1.2	0.02	
5-5	138	80	2.0		
5-6	134	100	1.8	0.054	
5-7	132	120	1.5		
5-8	131	140	1.3	0.038	
5-9	124	160	0.8		
5-10	116	180	1.0	0.038	
5-11	111	200	0.8		
M.G			3.2	0.056	
6-1	159	0	5.9		
6-2	158	20	2.9	0.060	
6-3	156	40	2.8		
6-4	156	60	3.2	0.062	
6-5	156	80	3.4		
6-6	156	100	3.8	0.117	
6-7	156	120	4.1		
6-8	152	140	3.8	0.095	
6-9	144	160	3.4	0.118	
6-10	138	180	2.9	0.114	
M.G			4.2	0.104	
7-1	160	0	11.1		
7-2	159	20	7.4	0.056	
7-3	155	40	6.2		
7-4	150	60	4.0	0.048	
7-5	148	80	2.6		
7-6	146	100	1.3	0.038	
7-7	140	120	1.3		
7-8	136	140	1.4	0.036	
7-9	128	160	1.2		
7-10	120	180	0.9	0.020	
7-11	88	194	1.1		
M.G			8.1	0.038	
8-1	158	80	1.3		
8-2	152	100	2.8	0.191	
8-3	152	120	2.5		
8-4	148	140	2.4	0.19	
8-5	146	160	2.4	0.220	

cambio de  
cargacambio de  
cargacambio de  
carga

TABLA 4.4 (Continuación)

MUESTRA No	GASTO (ml/min)	$\Delta T$ ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	OBSERVACIONES
12-6	163	100	3.4	0.133	
12-7	163	120	3.0		
12-8	156	140	3.0	0.169	
12-9	148	160	2.7		Cambio de
M.G			3.6	0.142	Carga
13-1	162	0	7.8		
13-2	158	20	5.8	0.081	
13-3	153	40	5.1		
13-4	148	60	3.2	0.045	
13-5	141	80	2.7		
13-6	135	100	2.8	0.043	
13-7	132	120	2.4		
13-8	126	140	2.9	0.045	
13-9	114	160	2.1		Cambio de
13-10	106	180	1.7	0.040	Carga
13-11	100	200	1.5		
M.G			7.8	0.073	
14-1	160	0	10.9		
14-2	152	20	5.0	0.073	
14-3	152	40	4.7		
14-4	152	60	4.4	0.064	
14-5	152	80	4.2		
14-6	152	100	4.1	0.104	
14-7	152	120	4.1		
14-8	148	140	3.7	0.095	
14-9	142	160	3.3		Cambio de
14-10	138	160	3.3	0.073	Carga
M.G		173	4.7	0.095	
15-1	164	0	0.4		
15-2	162	20	0.4	0.322	
15-3	158	40	0.4		
15-4	156	60	0.4	0.32	
15-5	154	80	0.4	0.34	
15-6	154	100	0.3		
15-7	152	120	0.3	0.35	
15-8	146	140	0.4	0.35	
15-9	138	160	0.4		Cambio de
15-10	134	180	0.4	0.314	Carga
M.G			0.4	0.298	
16-1	160	0	8.6		
16-2	150	20	9.4	0.163	
16-3	134	40	8.8	0.127	
16-4	128	60	8.3	0.073	interrupción
16-5			9.0	0.119	
16-6	170	85	5.2	0.079	inicio

TABLA 4.4 (Continuación)

MUESTRA No	GASTO (ml/min)	$\Delta T$ ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	OBSERVACIONES
16-7	164	105	5.4		
16-8	146	125	5.8	0.057	
16-9	135	145	5.7		
16-10	124	165	5.4	0.036	
16-11	118	185	4.6		
16-12	112	205	4.5	0.059	
16-13	108	225	2.9		
16-14	104	245	3.8	0.042	
16-15	94	265	3.2		
16-16	86	285	3.5	0.029	
M.G			4.5	0.044	
17-1	170	0	6.7		
17-2	160	20	3.9	0.104	
17-3	158	40	2.9		
17-4	156	60	2.5	0.099	
17-5	156	80	2.3		
17-6	154	100	2.4	0.099	
17-7	154	120	2.4		
17-8	147	140	2.0	0.082	
17-9	141	160	1.6		
17-10	134	177	1.6	0.105	
M.G			3.8	0.112	
18-1	160	0	4.8		
18-2	160	20	3.4	0.119	
18-3	160	40	3.4		
18-4	160	60	3.7	0.133	
18-5	160	80	3.9		
18-6	160	100	4.0	0.193	
18-7	156	120	4.0		
18-8	152	140	3.6	0.178	
18-9	84	159	3.2		
M.G			3.7	0.140	

Para poder hacer una comparación de resultados entre las pruebas es importante que éstas se hayan hecho bajo circunstancias muy parecidas, por ejemplo volumen de agua tratada y tiempo de prueba semejantes. Para comparar tales parámetros se resumen algunos resultados en la tabla 4.5, considerando solamente la información obtenida de la muestra global de agua tratada. La temperatura del agua de todas las pruebas del diseño de experimentos tuvo una

variación de 18 a 22 °C, variable importante difícil de controlar para los fines experimentales pero que se puede considerar constante para fines prácticos.

TABLA 4.5 RESULTADOS GLOBALES DE LAS PRUEBAS

MUESTRA GLOBAL No	VOLUMEN ACUMULADO (l)	$\Delta T$ ACUMULADO (min)	TURBIEDAD (NTU)	ARSENICO (V) RESIDUAL (mg/l)	REMOCIÓN DE AS ( V ) (%)
1	28.4	206	13.3	0.073	84
2	27.00	176	4.2	0.060	86
3	26.60	191	0.4	0.248	45
4	27.20	239	7.1	0.060	86
5	27.30	204	3.2	0.056	87
6	27.60	180	4.2	0.104	77
7	27.60	196	8.1	0.038	91
8	27.66	200	2.5	0.174	61
9	26.75	182	2.3	0.113	75
10	26.08	192	9.7	0.043	90
11	26.22	196	1.5	0.225	50
12	26.80	169	3.6	0.142	64
13	26.00	202	7.8	0.073	84
14	25.12	176	3.0	0.095	79
15	26.74	176	0.4	0.298	34
16	37.64	293	4.5	0.044	90
17	27.55	180	3.8	0.112	75
18	25.00	160	3.7	0.140	69

#### 4.3 Análisis de resultados

De acuerdo con la información individual de remoción obtenida en cada una de las pruebas, aunque no corresponden los volúmenes de agua tratada pero los niveles de remoción son específicos para cada prueba, se puede aseverar que la eficiencia de remoción es constante sin importar el volumen de agua tratado; salvo algunos casos que presentaron anomalías durante la experimentación todos los demás tienen comportamiento semejante. Bajo tales consideraciones se hace el análisis de varianza con los resultados obtenidos de las muestras globales resumidos en la tabla 4.5.

Después de hacer todos los cálculos correspondientes del análisis de varianza descrito en el anexo se obtienen los resultados presentados en la tabla 4.6. El análisis se hizo considerando las eficiencias de remoción y tomando como base un valor promedio de la concentración inicial de arsénico de todas las pruebas.

TABLA 4.6 ANALISIS DE VARIANZA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Origen de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F
Reactivo de hierro	2	1500.8	750.4	9.3
Campo magnético.	2	152.4	76.2	0.9
Empaque	2	2164.8	1082.4	13.4
Repetición	1	180.5	180.5	2.2
Error	10	805.0	80.5	
Total	17	4803.6	363.0	

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla anova, para una  $F$ , ver tabla A.3, con 99 por ciento de confianza, dos y diez grados de libertad, igual a 7.56, es significativo el efecto del coagulante y tipo de empaque pero no así la intensidad del campo, posiblemente porque es pequeña o porque las condiciones de prueba no fueron apropiadas para analizar su efecto. La réplica experimental no es significativa en la eficiencia de remoción lo cual da confianza a la forma de llevar a cabo las pruebas. Haciendo un análisis individual de los resultados obtenidos por prueba se resumen las observaciones siguientes:

El nivel de remoción de arsénico es específico para cada prueba, generalmente, salvo algunos casos, se mantiene constante desde el inicio del tratamiento hasta finalizar la prueba. En las figs 4.6 a 4.8 se representan algunos casos relacionados con el comportamiento descrito.

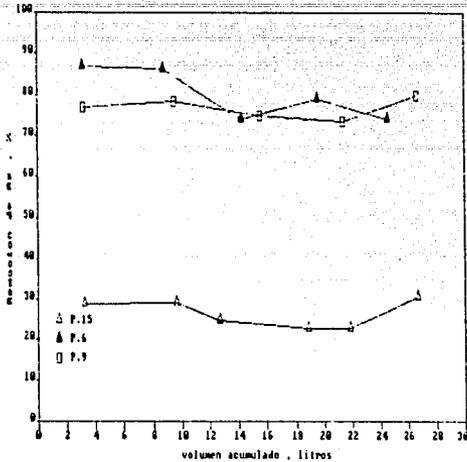
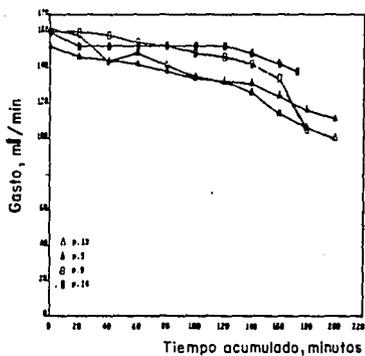


Fig 4.8 Resultados de algunas pruebas con empaque balines

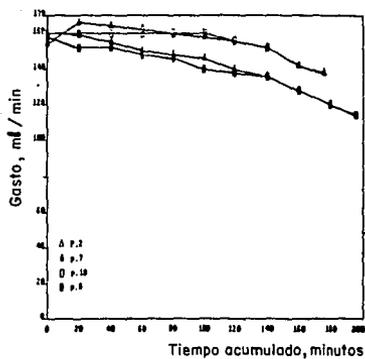
Bajo las circunstancias de operación de las pruebas difícilmente se puede observar algún comportamiento de agotamiento de la columna, salvo por la saturación del empaque debido a la disminución del gasto.

La variación del gasto estuvo sujeta a las condiciones de cada prueba; la rapidez de disminución fue mayor en aquellas pruebas hechas con rebaba y con cloruro férrico. En las figs 4.9 a y b se ejemplifica este comportamiento de variación entre empaques y coagulantes.

En este tipo de experimentos la turbiedad del agua tratada es un parámetro indicativo de su calidad por las condiciones de prueba. En general, la turbiedad es producida por la oxidación del empaque y del coagulante dosificado; las pruebas en que se midió mayor turbiedad fueron hechas con rebaba y sulfato férrico, o en las que se encontraban estos presentes. En las figs 4.10 a y b se representan algunas pruebas que manifiestan ese comportamiento.



(a)

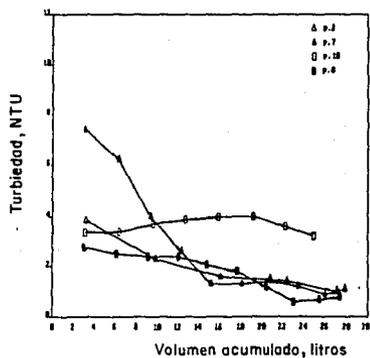


(b)

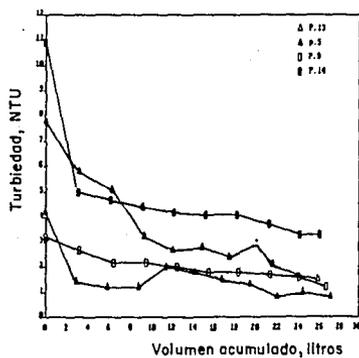
Fig 4.9 Variación del gasto dependiendo de la prueba.

(rebaba, recorte, balines con  $\text{Fe}_2\text{SO}_4$  y  $\text{FeCl}_3$ )

a) cloruro ferrico y b) sulfato ferrico



(a)



(b)

Fig 4.10 Variación de la turbiedad dependiendo de las

condiciones experimentales de las pruebas. Con

a) cloruro ferrico y b) sulfato ferrico

No importando que se seleccionó arena de granulometría mayor que la recomendada en filtración rápida y se mantuvo flujo turbulento en la recirculación de agua con una bomba centrífuga, parece que ésta tiene un efecto importante en la retención de las partículas formadas con el coagulante. De acuerdo con los resultados de las pruebas las características del material de empaque identificado como rebaba son muy particulares; por la forma y rapidez con que se oxida ocasiona mayores eficiencias de remoción de arsénico. El inconveniente que tiene la rebaba es que, por el contenido de hierro y la superficie en contacto con el agua, al oxidarse produce mayor turbiedad.

Haciendo la comparación de algunas pruebas(3,4,8,11,15y16) con rebaba, recorte y balines sin dosificar coagulante se observa que la remoción es mayor conforme aumenta la superficie del material de empaque, es decir, remueve mejor la rebaba( $\pm 80\%$ ), después el recorte( $\pm 50\%$ ) y, por último, los balines( $\pm 35\%$ ). La característica particular del agua es que se produce mayor turbiedad al haber mayor remoción.

Los resultados obtenidos de las pruebas hechas con rebaba(1,4,7,10,13y16) denotan la importancia de este empaque en la remoción( $> 80\%$ ) a pesar de dosificar o no los coagulantes.

En pruebas donde se utilizó recorte como empaque (2,5,8,11,14 y 17) se observa el efecto que tuvo la presencia de coagulante en la remoción; con recorte se logra retener el 50 por ciento de arsénico y con coagulante aumenta a casi 80 por ciento. Aunque la turbiedad es mayor conforme aumenta el nivel de remoción su valor después de las pruebas no es mayor que 5 NTU.

Las pruebas (3,6,9,12,15y18) realizadas con balines mejoran la eficiencia de remoción en presencia de los coagulantes, observándose un aumento de aproximadamente 40 a 73 por ciento; siendo menos turbia, en el caso de las pruebas con coagulantes, el agua tratada con cloruro férrico.

En general, después de comparar las pruebas por nivel de remoción y turbiedad del agua, se puede afirmar que las pruebas hechas con recorte y coagulantes producen buenas eficiencias ( $\pm 80\%$ ) y bajas turbiedades ( $\pm 3.5$  NTU). Otras pruebas producen mejores eficiencias pero mayores turbiedades y, viceversa.

Al tratar de definir algún efecto del campo inducido durante las pruebas, se encuentra que en el caso de aquellas hechas con rebaba y balines la turbiedad disminuye un poco conforme éste aumenta, posiblemente eso se deba a las características propias de comportamiento del material de empaque.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Del análisis de varianza se puede concluir que las variables que más influyen en la remoción de arsénico son el coagulante y tipo de empaque metálico porque, bajo las condiciones experimentales del diseño cuadrado latino 3x3, dichas variables son significativas para un nivel de confianza del 99 por ciento. En cambio, el campo magnético y repetición experimental, bajo tales condiciones, no resultaron significativos.

Al hacer una evaluación cualitativa de los resultados individuales de remoción global y por muestra, porque durante el tratamiento se obtuvieron niveles de remoción aceptables (ver inciso 4.2.3), se logran identificar algunas características importantes con las cuales es posible definir porqué unas variables tienen mayor influencia que otras en el tratamiento:

-Por las propias condiciones experimentales de las pruebas, al estar el agua en contacto con la sal de hierro y debido a la

oxidación del empaque metálico, el proceso que según parece predomina es la coagulación con el correspondiente atrapamiento de los floculos en el medio soporte (arena con material metálico). Todo parece indicar que el hidróxido de hierro hidrolizado adsorbe o reacciona tan pronto está en contacto con el arsénico y, a su paso por el material soporte, crece y es retenido. En el caso del material metálico éste primero se oxida y, de haber tiempo de retención suficiente en la columna, flocula y se presenta un mecanismo semejante al caso anterior.

-El campo magnético no es lo suficientemente intenso como lo describen en las referencias citadas( ver cap 2) y tal vez a eso se deba en parte el poco efecto que tuvo en la remoción. También es posible que las propias características del floculo o partícula formada entre el hidroxido férrico y arsénico sea poco o nada susceptible al campo, o simplemente es tan significativo el efecto del coagulante y empaque que el efecto del campo no se observa.

-El efecto por dos repeticiones no es significativo y eso indica que las variaciones como consecuencia del desarrollo experimental son mínimas, lo que da confianza al análisis de los resultados (niveles de remoción y turbiedad). A pesar de usar arena como medio soporte de mayor granulometría que la recomendada para filtros rápidos con los diferentes empaques, sirvió ésta de medio para el atrapamiento del floculo. De alguna manera permite mayor capacidad de flujo de agua por la propia porosidad del material.

-El análisis de la información generada por prueba permite identificar que, por lo general, las pruebas con sulfato férrico producen mayor turbiedad que las con cloruro férrico, especialmente cuando se usó rebaba como material de empaque.

-En relación a los tipos de empaque empleados, se observa una

mayor eficiencia de remoción con rebaba que con cualquiera de los otros empaques empleados, pero produce mayor turbiedad. Tal parece que en estos materiales el área superficial juega un papel importante en la rapidez de oxidación del hierro (rebaba > recorte > balines) y, como consecuencia de eso, se observa que en general la rebaba remueve más( $\pm 80\%$ ) que el recorte( $\pm 50\%$ ) y que los balines ( $\pm 35\%$ ). A diferencia de los otros empaque que mejoran la eficiencia de remoción con la presencia de coagulante en el agua, la rebaba, por su rápida oxidación y gran remoción, no es mas eficiente que cuando se dosifican los coagulantes.

A pesar de que el material metálico de empaque contiene impurezas(metales pesados) que pueden disolverse y restringir el uso del agua, el porcentaje en peso comparado con la cantidad de hierro oxidado es bajo y no alcanza a rebasar los límites permisibles con relación al volumen de agua tratado. Sin embargo, bajo tales condiciones de experimentación y con la posibilidad de que los tóxicos no sean removidos, es necesario considerar determinaciones de metales para garantizar el tratamiento.

De acuerdo con los resultados observados de remoción de arsénico representados en la fig 5.1, las pruebas hechas con rebaba presentan en general los mejores niveles de tratamiento, concentraciones próximas e inferiores a los límites permisibles para agua potable(0.05 mg/l). Dicho comportamiento sugiere la selección de esa variable como alternativa de remoción del elemento. Sin embargo, debido a las variaciones observadas de la turbiedad(1 a 10 NTU), causadas por las condiciones de tratamiento, es recomendable, antes de establecer conclusiones a priori con la información disponible, continuar con pruebas selectivas hasta establecer condiciones óptimas para la remoción de éste tóxico y, de esa manera, poner mayor atención a otros parámetros de calidad que por reglamento limitan el uso del agua.

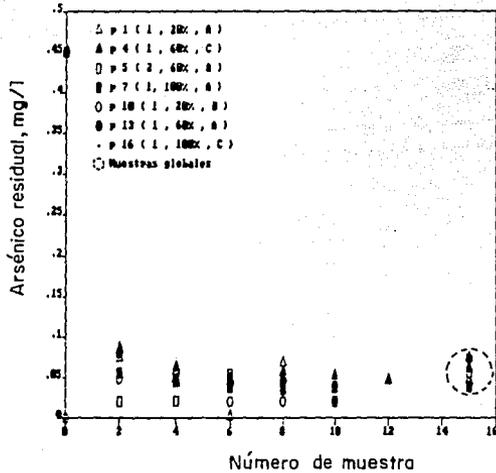


Fig 5.1 Representación de resultados de pruebas con mayor eficiencia de remoción

## 5.2 Recomendaciones

A pesar de que con el análisis de varianza de los resultados globales por prueba e incluso individuales por muestras no ha sido posible detectar el efecto significativo del campo, no quiere decir que este no influya en la remoción indirecta del contaminante, gran parte de su influencia dependerá de las condiciones establecidas al planear la experimentación. Por tanto, es recomendable que sea modificado el empaque de la columna, buscando un material que aumente la permeabilidad magnética para que al inducir el campo éste realmente sea intensificado.

Se deberá tomar en cuenta la posibilidad del sembrado magnético para que predomine el mecanismo de atrapamiento del flóculo en el dispositivo experimental. También resulta conveniente desarrollar la experimentación en proceso continuo, con objeto de evitar que el coagulante sea alterado por la recirculación y esté demasiado

tiempo en contacto con el elemento que se desea remover.

Así mismo, aunque se tenga que enfatizar en lo dicho, es conveniente, dado que se obtuvieron algunos resultados satisfactorios de tratamiento del agua a nivel potable, experimentar con diversos niveles de variación de las variables consideradas hasta, de ser posible, obtener resultados satisfactorios de remoción.

## REFERENCIAS

1. Mitchell, R. et al (1975). High Gradient Magnetic Filtration of Magnetic and Non-Magnetic Contaminants from water. Separation and Purification Methods 4(2), 267-303.
2. Praveen, A. (1984). Evaluation of Ion-Exchange Properties of Ferric Hydroxide Floccs for the Removal of Heavy Metal Wastes Using a High Gradient Magnetic Separator. A Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University for the Degree of Doctor of Philosophy.
3. Mc-Nallan, M. (1974). Magnetic Separation of Iron Bearing Solids from Water. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science at the Massachusetts Institute of Technology.
4. De Latour, C. (1974). Magnetic Fields in Aqueous Systems. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy at the Massachusetts Institute of Technology.
5. Oberteuffer, J.A. (1973). High Gradient Magnetic Separation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mg-9, No. 3.
6. Oberteuffer, J.A. et al (1975). High Gradient Magnetic Filtration of Steel Mill Process and Waste Waters. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mg-11, No. 5.
7. Kelland, D.R. (1973). High Gradient Magnetic Separation Applied to Mineral Beneficiation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-9, No. 3.

8. Lawyer, J.E. and Hopstock, D.M. (1974). Wet Magnetic Separation of Weakly Magnetic Minerals. Minerals Sci. Eng., Vol. 6, No. 3.
9. Kelland, D.R. and Maxwell, E. (1975). Oxidized Taconite Beneficiation by Continuous High Gradient Magnetic Separation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-11, No. 5.
10. Trindade, S. C. *et al* (1973). Magnetic Desulfuration of Coal. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-9, No. 3.
11. Kelland, D.R. (1978). Improved Magnetite Recovery in Coal Cleaning by HGMS. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. mag-14, No. 3.
12. Thompson, R. and Oldfield F. (1986). Environmental Magnetism. Allen & Unwin (Publishers) Ltd.
13. De Latour, C. (1973). Magnetic Separation in Water Pollution Control. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-9, No. 3.
14. Bitton, G. *et al* (1974). Phosphate Removal by Magnetic Filtration. Water Research, Vol. 8, pp 107-109.
15. Petrakis, L. *et al* (1978). High Gradient Magnetic Separations in Water Pollution Control. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-9, No. 3.
16. Bitton, G. *et al* (1974). The Removal of Escherichia Colibacteriophage T<sub>7</sub> by Magnetic Filtration. Water Research, Vol. 8, pp 549-551.
17. Praveen, A. *et al* (1985). Heavy Metals Removal by High Gradient Magnetic Separation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-21, No. 5.

18. Terashima, Y. *et al* (1984). Removal of Dissolved Heavy Metals by Chemical Coagulation, Magnetic Seeding and High Gradient Magnetic Filtration. *Water Research*, Vol. 20, No 5, pp 537-545.
19. Leet, L.D. y Judsson, S. (1980). *Fundamentos de geología física*. Quinta reimpresión. Editorial limusa.
20. Resnick, R. y Halliday, D. (1979). *Física*, parte II. Décima tercera impresión. Editorial CECSA.
21. Sears, F.W. (1974). *Electricidad y magnetismo: Fundamentos de física*. Sexta edición. Editorial agular.
22. Lee, W.E. (1970). *Magnetism. And Introductory Survey*. Dover Publications.
23. Alonso, M y Finn, E.J. (1970). *Física*, Volumen II. Campos y Onda. Editorial Fondo Educativo Interamericano S.A.
24. Oberteuffer, J.A. (1974). *Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-10, No. 2.
25. Perry, R.H. and Chilton, C.H. (1973). *Chemical Engineers Handbook*. 5th Edition. Mc Graw-Hill, Kogakusha, Ltd.
26. Martínez - P, J.L. (1982). *Tratabilidad del agua grasosa de un autoservicio mediante flotación*. Trabajo de grado de maestría en Ingeniería Sanitaria. DEPMI, UNAM.
27. De Latour, C. and Kolm, H. (1976). *High Gradient Magnetic Separation*. JAWWA, pp. 325-327.
28. De Latour, C. (1976). *Seeding Principles of High Gradient Magnetic Separation*. (Parte II). JAWWA, pp 443-446.

29. Jun-Ichi Yano *et al* (1979). Application of High Gradient Magnetic Separation for Water Treatment in Steel Industry. Proceedings of an International Conference on Industrial and Applied Magnetic Separation. pp 134-136.
30. Watson *et al* (1983). The Recovery of Gold and Uranium from Gold Ore Leached Residues by HGMS. IEEE Transactions on Magnetics, Vol Mag - 19, No.5 .
31. Roters , H. C. (1941). Electromagnetic Devices. First Edition. John Wiley & Sons.
32. Conductores Latincasa, S.A. (1988). Catálogo de productos Alambre Magneto Polilat 180.
33. Martinez - P, J.L. (1988). Coagulación con sales de hierro alternativa para remover arsenico del agua, I Simposio Nacional sobre Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería, UNAM, pags 472-88.
34. Mendoza, G. y Salas G, D (1976) . Remoción de arsénico de las aguas naturales. Instituto de Ingeniería, UNAM, Serie No 373.
35. Miller, I. and Freud, J.E. (1977). Probability and Statistics for Engineers. Second Edition. Prentice-Hall.
36. Box, E.P.G. *et al* (1978). Statistics for Experimenters, an Introductions to Desing, Data Analysis and Model Building. John Wiley & Sons.
37. Cochran G. *et al* (1965). Diseños experimentales. F. Trillas, S.A.
38. Mendenhall, W. (1982). Introducción a la probabilidad y la estadística. Wadsworth Internacional/ Iberoamerica.

39. Degremont (1979). Water Treatment Handbook. Fifth Edition. John Wiley & Sons.
40. CEPIS 13 (1981). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Segunda edición .
41. Weber, W.J. (1972). Physicochemical processes for Water Quality Control. John Wiley & Sons.
42. Sanks, R. L. (1980). Water Treatment Plant Desing for the Practicing Engineer. Inc. Ann Arbor Science.
43. Cruickshank, V.C. y Martínez, J.L. (1986). Simulación de acuíferos geotérmicos. "Investigación sobre cedencia de calor y macrodispersión." Informe interno, proyecto 5309. Instituto de Ingeniería, UNAM.
44. Standard Methods For The Examinations of Water and Wastewater (1975). 14th. Edition. APHA-AWWA-WPCF.
45. SRH (1973). Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas, México D.F.
46. Diario Oficial de la Federación, México D.F. Lunes 18 de enero de 1988 .

## ANEXO

( ANALISIS DE VARIANZA )

El principio del análisis de varianza se fundamenta en que las poblaciones son normales con varianzas iguales, para contrastar la hipótesis de que las muestras se obtienen de poblaciones con medias iguales; para lograrlo se comparan las estimaciones de  $\sigma^2$ , uno basado en la varianza entre las medias muestrales y, otro basada en la variación dentro de las muestras. Si la hipótesis es cierta, se puede demostrar que la varianza intermuestral y la varianza muestral interior son estimaciones independientes de  $\sigma^2$  y, resulta que la relación es una variable aleatoria que tiene distribución F. Cuando la hipótesis es falsa la varianza intermuestral es mayor que la varianza muestral interior y deberá rechazarse si F es mayor que la  $F_{\alpha}$  correspondiente a la de las tablas A.3 Y A.4 .

El diseño experimental ( cuadrado latino ) consiste básicamente en comparar n tratamientos para eliminar fuentes extrañas de variabilidad al comparar las medias de un conjunto de muestras. El arreglo matricial es del tipo n x n; siendo las filas, columnas y tratamientos las variables independientes. Las tres son variables cualitativas, aunque los tratamientos podrian ser niveles de un factor cuantitativo. Una representación esquemática de un arreglo 3 x 3 se describe en la fig A.1

I			II			III		
A	B	C	B	C	A	C	A	B
C	A	B	A	B	C	B	C	A
B	C	A	C	A	B	A	B	C

Fig A.1 Arreglo de un cuadrado latino 3 x 3

El arreglo se caracteriza por ser cuadrado con n letras distintas, donde cada letra aparece solamente una vez por columna y por fila;

donde cada letra aparece solamente una vez por columna y por fila; incluye  $n$  tratamientos y es necesario incluir  $n^2$  observaciones. El análisis de varianza se divide en cuatro conceptos importantes de la experimentación por efecto de la variación de: filas, columnas, tratamientos y el error experimental. A continuación se resumen las ecuaciones en que se fundamenta un diseño de experimentos de

**-TERMINO DE CORRECCION**

$$C = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r Y_{i(j(k),l)} \right]^2}{r n^2} \quad \text{A.1}$$

Donde

$$C = \frac{(\text{suma de todas las observaciones})^2}{r n^2}$$

$r$  # de réplicas

$n$  # de observaciones en cada total

$Y_{i(j(k),l)}$  Suma de todas las observaciones, de la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna de la  $l$ -ésima replica, y el subíndice  $k$ , entre parentesis, indica que pertenece al  $k$ -ésimo tratamiento.

**- EFECTO DE TRATAMIENTO**

$$SS(\text{Tr}) = rn \sum_{k=1}^n (\bar{T}_{(k)} - \bar{Y})^2 = \frac{1}{rn} \sum_{k=1}^n T_{(k)}^2 - C \quad \text{A.2}$$

Donde

$\bar{T}_{(k)}$  Promedios de todas las observaciones en el tratamiento  $k$

$T_{(k)}$  Total de las  $rn$  observaciones pertenecientes al  $k$ -ésimo tratamiento.

$\bar{Y}$  Promedio de las observaciones contenidas en las muestras

**-EFECTO DE FILA**

$$SSR = rn \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - \bar{Y})^2 = \frac{1}{rn} \sum_{i=1}^n T_i^2 - C$$

$$SSR = \frac{1}{rn} \sum_{i=1}^n T_i^2 - C$$

A.3

Donde

$\bar{T}_i$  y  $T_i$  Promedios y totales de las  $rn$  observaciones en toda la fila  $i$

#### -EFECTO DE COLUMNA

$$SSC = rn \sum_{j=1}^n (\bar{T}_j - \bar{Y})^2 = \frac{1}{rn} \sum_{j=1}^n T_j^2 - C$$

$$SSC = \frac{1}{rn} \sum_{j=1}^n T_j^2 - C \quad A.4$$

Donde

$\bar{T}_j$  y  $T_j$  Promedios y totales de las  $rn$  observaciones en toda la columna  $j$

#### -EFECTO DE REPLICACION O REPETICION

$$SS(\text{rep}) = n \sum_{l=1}^r (\bar{T}_l - \bar{Y})^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{l=1}^r T_l^2 - C$$

$$SS(\text{rep}) = \frac{1}{n^2} \sum_{l=1}^r T_l^2 - C \quad A.5$$

Donde

$\bar{T}_l$  y  $T_l$  Total de las  $n^2$  observaciones en la réplica  $l$

#### VARIACION TOTAL

$$SST = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r (Y_{ij(k)l} - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r Y_{ij(k)l}^2 - C \quad A.6$$

Donde

$Y_{ij(k)l}$  Observación de la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna de  $i$ -ésima réplica y, el subíndice  $k$  entre paréntesis indica que pertenece al  $k$ -ésimo tratamiento

La suma de cuadrados de error (SSE) se puede obtener por sustracción a partir de la siguiente ecuación :

$$SST = SS(\text{Tr}) + SSR + SSC + SS(\text{Rep}) + SSE \quad A.7$$

$$SSE = SST - SS(Tr) - SS(R) - SSC - SS(rep) \quad A.8$$

Los cuadrados medios correspondientes a los tratamientos, filas, columnas y réplicas, se pueden obtener dividiendo las suma de cuadrados respectivas entre los grados de libertad de cada una de las variaciones, resumiéndolos finalmente en la siguiente tabla de análisis de varianza .

TABLA A.1 ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)

ORIGEN DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	F
Tratamiento	$n - 1$	$SS(Tr)$	$MS(Tr) = SS(Tr) / n - 1$	$MS(Tr) / MSE$
Filas	$n - 1$	$SSR$	$MSR = SSR / n - 1$	$MSR / MSE$
Columnas	$n - 1$	$SSC$	$MSC = SSC / n - 1$	$MSC / MSE$
Repetición	$r - 1$	$SS(Rep)$	$MSS(Rep) = SS(Rep) / r - 1$	$MSS(Rep) / MSE$
Error	$(n-1) \cdot (rn+r-3)$	$SSE$	$MSE = SSE / ((n-1)(rn+r-3))$	
Total	$rn^2 - 1$	$SST$		

TABLA A.2 ANALISIS FISICOQUIMICOS DE AGUA DE TRES POZOS DE LA REGION LAGUNERA <sup>(34)</sup>

PARAMETRO <sup>a</sup>	POZOS				
	SAN SALVADOR	ESPERANZA			FINISTERRE
pH	8.4	8.3	8.0	8.7	8.1
Sólidos totales	260	900	1520		1060
Sólidos disueltos	240		1500		1040
Sólidos suspendidos	20			20	20
Alcalinidad total (CaCO <sub>3</sub> )	140	224	242	278	194
Alcalinidad de carbonatos (CaCO <sub>3</sub> )	8	16	0	20	4
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	32		84	76	104
Dureza cálcica (CaCO <sub>3</sub> )	24		68	56	92
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	8	24	26	36	52
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	56	470	540	720	520
Hierro	0	0.1	0.08	0	0.25
Manganeso	0		0.01	0	0
Arsénico	0.45	0.7	0.5	1.3	0.36

<sup>a</sup> Los datos se expresan en mg/l, excepto el pH

TABLA A.3 PRUEBA F 95%

$v_1$	$v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161.4	196.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	
2	185.1	198.0		192.5	193.0	193.5	193.8	194.0	194.1	194.3	194.5	194.8	194.8	194.8	194.8	194.8	194.8	194.8	194.8	194.8
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.12	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.75	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.02	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.54	1.47	1.39	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25	
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.10	

TABLA A.4 PRUEBA F 99%

$v_1$	$v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	405.2	449.5	540.1	562.5	576.4	585.9	592.6	598.2	602.2	605.6	608.6	611.7	615.7	619.9	623.5	626.4	628.7	631.3	633.9	636.4
2	98.51	99.81	99.17	99.25	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31
3	34.51	30.82	26.66	26.71	26.74	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77	26.77
4	21.20	18.08	16.69	15.98	15.52	15.21	14.88	14.60	14.46	14.35	14.27	14.20	14.13	14.07	14.02	13.97	13.93	13.88	13.85	13.81
5	16.26	13.27	12.08	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.97	9.92	9.85	9.77	9.70	9.64	9.59	9.54	9.50	9.45
6	13.75	10.92	9.74	9.15	8.73	8.43	8.22	8.08	7.94	7.83	7.74	7.67	7.60	7.53	7.47	7.42	7.37	7.32	7.27	7.22
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.54	6.47	6.40	6.33	6.27	6.22	6.17	6.12	6.07	6.02
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.73	5.67	5.60	5.53	5.48	5.42	5.37	5.32	5.27	5.22
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.17	5.11	5.04	4.97	4.91	4.85	4.79	4.73	4.67	4.61
10	10.04	7.56	6.53	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.77	4.70	4.63	4.56	4.51	4.45	4.39	4.33	4.27	4.21
11	9.65	7.21	6.21	5.67	5.31	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.33	4.26	4.21	4.15	4.09	4.03	3.97	3.91
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.09	4.03	3.97	3.90	3.84	3.78	3.72	3.66
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.89	3.82	3.76	3.69	3.63	3.57	3.51	3.45
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.73	3.66	3.61	3.54	3.48	3.42	3.36	3.30
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.57	3.52	3.45	3.39	3.31	3.25	3.19	3.13	3.06
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.02	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.01	2.95	2.89	2.84	2.77
17	8.40	6.11	5.18	4.65	4.31	4.07	3.89	3.76	3.65	3.56	3.41	3.26	3.18	3.10	3.01	2.92	2.86	2.80	2.74	2.67
18	8.29	6.01	5.09	4.56	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.21	3.08	3.00	2.90	2.82	2.76	2.70	2.64	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.64	3.52	3.44	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49	2.41
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.07	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42	2.34
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.01	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36	2.28
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.96	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31	2.21
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.91	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26	2.16
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.87	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21	2.11
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17	2.07
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13	2.03
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10	2.00
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44					

(45)

TABLA A.5

CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE LOS CUERPOS RECEPTORES SUPERFICIALES EN FUNCION DE SUS USOS Y CARACTERISTICAS DE CALIDAD\*

Clase	Uso	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
		pH	Temperatura (°C)	O.D. (mg/l)	Bacterias Coliformes N.M.P. (Organismos/100 ml)	Aceites y Grasas (mg/l)	Sólidos Disueltos (mg/l)	Turbiedad (U.T.J.)	Color (Escala Platino Cobalto)	Olor y Sabor	Nutrientes Nitrogeno Fósforo	Materia Plástica	Sustancias Tóxicas
				Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo	
DA	Abastecimiento para sistemas de agua potable e industria alimenticia con desinfección únicamente. Recreación (contacto primario) y libre para los usos DI, DII y DIII	6.5 a 8.5	C.N. más 2.5 (a)	4.0	200 fecales (b)	0.76	No mayor de 1000	10	20	Ausentes	(c)	Ausente	(d)
DI	Abastecimiento de agua potable con tratamiento convencional (coagulación, sedimentación, filtración y desinfección) e industrial.	6.0 a 9.0	C.N. más 2.5 (a)	4.0	1000 fecales (e)	1.0	No mayor de 1000	C.N.	(f)	(g)	(c)	Ausente	(d)
DII	Agua adecuada para uso recreativo, conservación de flora, fauna y usos industriales.	6.0 a 9.0	C.N. más 2.5 (a)	4.0	10,000 coliformes totales como promedio mensual; ningún valor mayor de 20,000 (h)	Ausencia de película visible.	No mayor de 2000	C.N.	C.N.	C.N.	(c)	Ausente	(d)
DIII	Agua para uso agrícola e industrial.	6.0 a 9.0	C.N. más 2.5 (a)	3.2	1000 (i) y libre para los demás cultivos.	Ausencia de película visible.	(i)	C.N.	C.N. más 10		(c)	Ausente	(d)
DIV	Agua para uso industrial (excepto procesamiento de alimentos).	5.0 a 9.5		3.2									(d)

pH = Potencial hidrógeno  
 O.D. = Oxígeno disuelto  
 N.M.P. = Número más probable

U.T.J. = Unidades de turbiedad Jackson  
 mg/l = miligramos por litro

C.N. = Condiciones naturales  
 °C = Grados centígrados

ANEXO DE LA TABLA A.5 <sup>(45)</sup>

- (a) **Máximo 30°C excepto cuando sea causada por condiciones naturales.**  
**Medida en la superficie fuera de la zona de mezclado.**
- (b) **Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 mínimo), podrá ser mayor a 2000 coliformes fecales.**
- (c) **No deben existir en cantidades tales que provoquen una hiperfertilización.**
- (d) **El criterio con respecto a sustancias tóxicas es el siguiente:**  
**Ninguna sustancia tóxica sola o en combinación con otras estará presente en concentraciones tales que conviertan el agua del cuerpo receptor en inadecuada para el uso específico a que se destine.**  
**La Tabla No. 3 resume algunas de las sustancias tóxicas que de acuerdo con la información disponible se encuentran bajo reglamentación y estudio en varias partes del mundo.**  
**Los valores de las sustancias de esta tabla no son limitativos y están sujetos a modificación de acuerdo con el futuro avance tecnológico.**
- (e) **Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 como mínimo), podrá ser mayor a 2000 coliformes fecales.**
- (f) **No será permitido color artificial que no sea coagulable por tratamiento convencional.**
- (g) **Removible por tratamiento convencional.**
- (h) **2000 coliformes fecales como promedio mensual, ningún valor mayor de 4000.**
- (i) **Conductividad no mayor de 2000  $\mu$ mohs/cm. Si el valor de RAS es mayor de 6, la Secretaría de Recursos Hidráulicos fijará el valor definitivo.**  
**RAS = relación de absorción de sodio.**  
**Boro 0.4 mg/l. Para valores superiores, la autoridad competente fijará el valor definitivo.**
- (j) **Para riego de legumbres que se consuman sin hervir o frutas que tengan contacto con el suelo.**

(45)

TABLA A.6

**VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE SUBSTANCIAS TOXICAS EN LOS CUERPOS RECEPTORES**

Limite máximo en miligramos por litro.

Clasificación (Tabla 2)	DA	DI	DII	DIII
Arsénico	0.05	0.05	1.00	5.00
Bario	1.00	1.00	5.00	—
Boro	1.00	1.00	—	2.0
Cadmio	0.01	0.01	0.01	0.005
Cobre	1.00	1.00	0.1	1.0
Cromo hexavalente	0.05	0.05	0.1	5.00
Mercurio	0.005	0.005	0.01	—
Plomo	0.05	0.05	0.10	5.00
Selenio	0.01	0.01	0.05	0.05
Cianuro	0.20	0.20	0.02	—
Fenoles	0.001	0.001	1.00	—
Sustancias activas al azul de metileno (detergentes)	0.50	0.50	3.0	—
Extractables con Cloroformo	0.15	0.15	—	—
<b>Plaguicidas</b>				
Aldrin	0.017	0.017		
Clordano	0.003	0.003		
D.D.T.	0.042	0.042		
Dieldrin	0.017	0.017		
Endrin	0.001	0.001		
Heptacloro	0.018	0.018		
Epóxico de heptacloro	0.018	0.018		
Lindano	0.056	0.056		
Metoxicloro	0.035	0.035		
Fosfatos orgánicos con carbamatos	0.100	0.100		
Toxafeno	0.005	0.005		
Herbicidas totales	0.100	0.100		
<b>Radioactividad</b>	picocuries por litro			
Beta	1.000	1.000	1.000	
Radio-226	3	3	3	
Estroncio	10	10	10	

TABLA A.7 NORMAS DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO <sup>(46)</sup>

Alcalinidad Total expresada Como $\text{CaCO}_3$ .....	400.00
Aluminio.....	0.20
Arsénico.....	0.05
Bario.....	1.00
Cadmio.....	0.005
Cianuro expresado como ión $\text{CN}^-$ .....	0.05
Cobre.....	1.50
Cloro libre: En agua clorada.....	0.20
En agua sobre clorada.....	1.00
Cromo hexavalente.....	0.05
Dureza de Calcio expresada como $\text{CaCO}_3$ .....	300.00
Fenoles o compuestos fenólicos.....	0.001
Hierro.....	0.30
Fluoruros expresado como elemento.....	1.50
Magnesio.....	125.00
Manganeso.....	0.15
Mercurio.....	0.001
Nitratos expresados como nitrógeno.....	5.00
Nitritos expresados como nitrógeno.....	0.05
Nitrógeno protéico.....	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido.....	3.00
Plomo.....	0.05
Selenio.....	0.05
Sulfatos, expresados como ión.....	250.00
Zinc.....	5.0
SAAM (Substancias Activas al Azul de Metileno).....	0.5
ECC (Extractables Carbón-Cloroformo).....	0.3
ECA (Extractables Carbón-Alcohol).....	1.5

Los demás que señale la norma correspondiente.