

53  
Lej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"TRATAMIENTO FISICO-QUIMICO DEL  
AGUA DE INYECCION EN LA  
RECUPERACION SECUNDARIA"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO PETROLERO**

**P R E S E N T A :**

**MANUEL VELEZ MARTINEZ**

México, D. F.

1989

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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.

# I N D I C E

Pág.

## INTRODUCCION

### CAPITULO I

Fuentes de Suministro .....	2
Sistemas de Inyección .....	4
Sistemas Cerrados .....	5
Sistemas Abiertos .....	6
Sistemas Semi-Cerrados .....	6
Problemas que se presentan en la Inyección .....	7

### CAPITULO II

Permeabilidad .....	13
Viscosidad .....	14
Presión Capilar .....	14
Influencia del agua irreductible .....	15
Porosidad .....	16
Condiciones Geológicas .....	17

### CAPITULO III

Métodos de análisis .....	19
Sedimentación .....	23
Coagulación .....	24
Asentamiento .....	31
Filtración .....	34
Deareación .....	39
Pruebas realizadas .....	41

### CAPITULO IV

Pautas normativas .....	45
PH, temperatura, turbidez .....	46
Oxígeno, bióxido de carbono, alcalinidad .....	47
Dureza total, dureza al calcio .....	48
Cloruros, sulfatos, fierro .....	48
Silicatos, solidos totales, cloro .....	49
Inhibidores de corrosión .....	49

### CAPITULO V

Sección de captación .....	52
Sección de filtros .....	52
Sección de tratamiento químico .....	53
Sección de Deareación .....	54
Sistema de bombeo .....	55

	Pág.
<b>CAPITULO VI</b>	
Muestreo, precisión .....	59
Interpretación .....	60
Control de la corrosión .....	61
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
Apéndice A	
Apéndice B	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	

## INTRODUCCION

La industria del petróleo ha sido decisiva para el desarrollo técnico y científico alcanzado en el presente siglo. Debido a la enorme demanda del petróleo y a su naturaleza no renovable, lo que ha implicado el mejoramiento de técnicas de explotación para su extracción máxima.

A causa del abatimiento de la presión que tiene lugar conforme se extraen los hidrocarburos, una parte de los mismos tiende a quedarse adherida a la roca, con esto, disminuye la productividad. Para compensar esta pérdida se han introducido técnicas de bombeo, desplazamiento de aceite y mantenimiento de la presión por inyección de fluidos u otros procedimientos, los cuales en conjuntos se denominan Recuperación Secundaria.

El método más utilizado de recuperación secundaria es la inyección de agua, por lo que ha sido objeto de detallados estudios, entre ellos, la deducción de las expresiones matemáticas que describen el proceso de su desplazamiento. Estas ecuaciones sirven para saber el comportamiento a través del yacimiento.

Otro aspecto que se deberá considerar y debido a su importancia es el análisis físico-químico del agua que será inyectada en el yacimiento para desplazar el aceite.

El agua, debido a su naturaleza, contiene una gran variedad de impurezas que son de origen orgánico, inorgánicos o de ambas, que puedan provocar serios problemas durante la inyección en las líneas y equipo superficiales y en el yacimiento,

para prevenir estos problemas es necesario hacerle un previo tratamiento físico-químico al agua a fin de eliminarlos y poder tener una calidad de agua aceptable.

Dada la importancia de tener agua de inyección libre de impurezas, es necesario conocer los mecanismos que permitan su eliminación, como son los tratamientos físico-químicos los cuales se dan a conocer en el presente trabajo.

Una calidad deficiente del agua causa un gran incremento en los costos de mantenimiento y operación, por lo que se disminuye el margen de rentabilidad al aplicar la recuperación secundaria, así como el retraso en el tiempo de realización del proyecto.

## CAPITULO I

FUENTES, SISTEMAS Y PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN

LA INYECCION DE AGUA



## FUENTES DE SUMINISTRO

Uno de los aspectos más importantes que tiene que ser considerado en un proyecto de inyección de agua para la recuperación secundaria es el agua misma. por lo que, deben de investigar se las posibles fuentes de suministro disponibles en cuanto a calidad y cantidad de agua y son capaces de suministrar.

En la naturaleza existen dos clases de agua, aguas dulces y aguas saladas que provienen de diversas fuentes, estas pueden ser tanto superficiales como subsuperficiales.

### AGUAS DULCES

Las aguas dulces superficiales, pueden provenir de: ríos, lagos, lagunas y lluvia. Por lo que hace necesario un tratamiento previo para poder usarlas como agua de inyección, para evitar posibles problemas en el yacimiento, las fuentes deben ser preferentemente pozos de baja profundidad, para que el agua elimine mediante filtración natural partículas indeseables lo que evitará su tratamiento y abatirá los costos de operación.

Las aguas subsuperficiales se obtienen perforando pozos hasta los estratos que la contienen, presentan una turbidez muy baja y un poder corrosivo mínimo, el tratamiento químico es menor y de bajo costo, por lo que, se recomienda el uso de sistemas cerrados para este tipo de aguas.

### AGUAS SALADAS

El agua salada suele encontrarse en forma subsuperficial en estratos de gran profundidad y en algunos campos se les encuentra en grandes cantidades, son muy ventajosas porque el tratamiento químico requerido es mínimo y su turbidez es muy baja.

### AGUAS SALADAS SUPERFICIALES

El agua de mar puede ser usada en lugares cercanos a este, una de las ventajas es el volúmen disponible sin límites, es conveniente extraerla por medio de pozos perforados en la orilla del continente o bien por obras de captación costa afuera. Su tratamiento químico requiere inhibidores de corrosión y bactericidas preferentemente.

También puede utilizarse el agua del yacimiento que se está produciendo junto con el aceite. Esta tiene la ventaja de ser compatible con los fluidos del yacimiento, pero hay que evitar la precipitación de compuestos solubles, los cuales causan problemas de taponamiento.

Una vez que se ha seleccionado la fuente de suministro es necesario contar con una planta de tratamiento, para el diseño de la misma se deben de considerar los siguientes factores.

## SISTEMAS DE INYECCION

Los principales factores que se deben de considerar y evaluar al diseñar una planta de tratamiento de agua de inyección son:

- a) Las características del agua o aguas, involucradas en el tratamiento.
- b) Los rangos adecuados de la calidad del agua previendo cambios de control en el tratamiento.
- c) Los rangos de capacidad de tratamiento ( volúmen, presión y flexibilidad )
- d) La planta se diseña con el fin de tratar un volúmen de agua máximo y mínimo, proporcionándole siempre la calidad requerida
- e) Localización óptima de la planta que será función de la posición geográfica de la fuente de abastecimiento y de los pozos inyectores.
- f) El tipo de planta se puede construir considerando el aspecto económico y de la calidad del agua deseada.

Las plantas de tratamiento de acuerdo a sus características se han clasificado en:

- SISTEMAS CERRADOS
- SISTEMAS ABIERTOS
- SISTEMAS SEMI-CERRADOS

El uso de cualquiera de estos tipos estará en función de la -

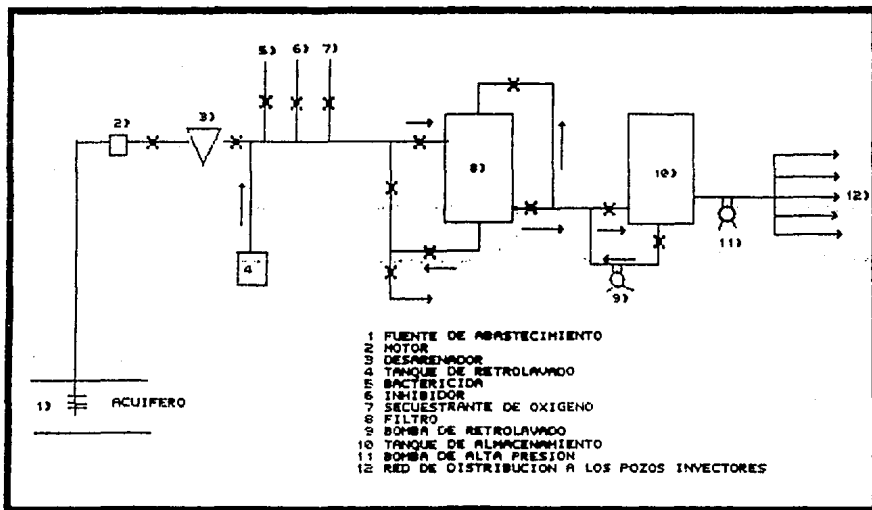
calidad del agua deseada y de la formación receptora, cada formación posee características particulares bien definidas que influyen en la calidad de agua que se debe inyectar, no es recomendable tratarla en forma excesiva para poder obtener alta calidad en el agua, pues esto significa gastos innecesarios, para ello se debe de seleccionar el tratamiento más adecuado para minimizar costos.

El tratamiento de aguas tiene como finalidad, evitar la corrosión, las incrustaciones superficiales y subsuperficiales eliminando así el daño a la formación, el acondicionamiento del agua se efectuará básicamente, por medio de filtrados y de tratamiento químico, estos se harán en las plantas mencionadas, las cuales se pueden describir como:

#### SISTEMA CERRADO

El sistema de tratamiento de agua cerrado es aquel en que el tratamiento de agua se hace en ausencia de aire, de esta manera se evita la disolución del oxígeno en el agua, la figura 1 muestra un diagrama con los elementos del sistema cerrado.

El agua después de ser tratada con este tipo de sistema, se almacena en un tanque, en el cual se puede conservar el agua tratada evitando el contacto con el oxígeno, esto se logra si se coloca una capa de gas en la parte superior del tanque, o bien una capa de aceite.

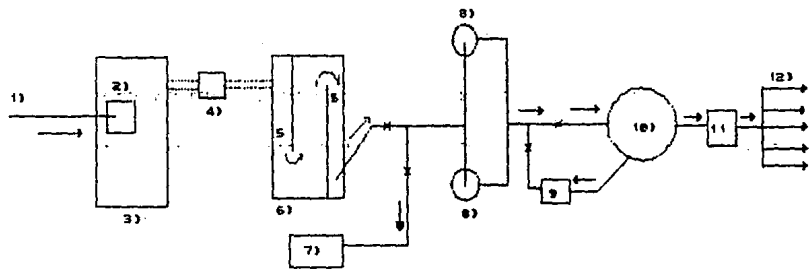


**UNAM**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
 MANUEL VELEZ MARTINEZ**

**DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO  
 DE UN SISTEMA CERRADO  
 PARA TRATAMIENTO DE AGUA**

**1**



1 AGUA PRODUCCION

2 AERADOR

3 ALIMENTADOR V ESTANQUE ABASTECEDOR

4 ALIMENTADOR DE ADITIVOS QUIMICOS

5 MANPARAS

6 ESTANQUE DE SEDIMENTACION

7 ESTANQUE DE RETORLAVADO

8 FILTROS

9 BOMBA DE RETORLAVADO

10 TANQUE DE AGUA TRATADA

11 BOMBA DE INYECCION

12 RED DE DISTRIBUCION

**UNAM**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ**

**DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO  
DE UN SISTEMA ABIERTO  
PARA TRATAMIENTO DE AGUA**

**2**

Cuando es necesario agregar al sistema bactericidas, inhibidores de corrosión y secuestrantes de oxígeno se recomienda hacerlo antes del filtro.

#### SISTEMAS ABIERTOS

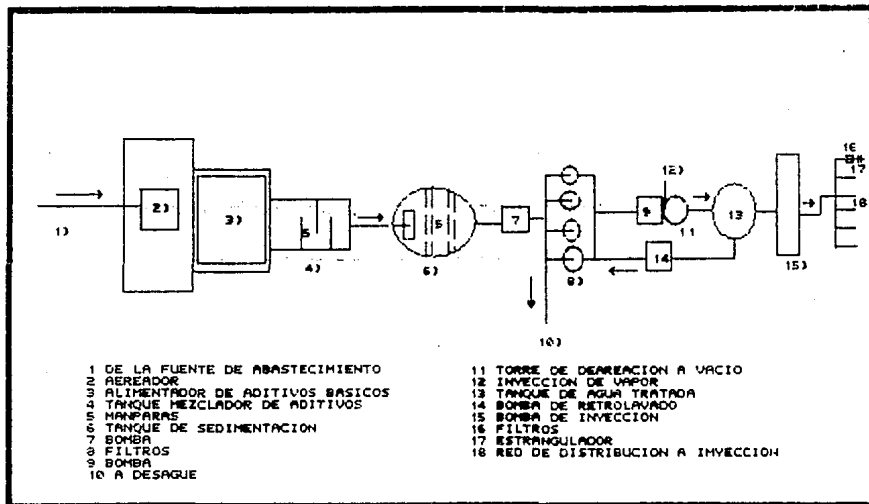
El sistema abierto, es el sistema en el cual el agua que se está tratando está en contacto con el medio ambiente sin restricción alguna, en muchas de estas plantas de agua se aeréa intencionalmente con el fin de eliminar los gases ácidos o para introducir oxígeno y eliminar por oxidación los compuestos solubles de fierro y manganeso a fin de precipitarlos, para reducir su contenido de carbonatos será necesario aumentar la pH.

La figura 2 muestra un sistema de tratamiento de agua de tipo abierto, la cual puede variar en su arreglo dependiendo de la fuente de abastecimiento, los agentes químicos son agregados antes de que el agua llegue a la presa de sedimentación.

#### SISTEMAS SEMI-CERRADOS

En este sistema, el agua es tratada como un sistema abierto hasta el punto de aereación; a partir de este punto y hasta los pozos inyectoros el sistema es de tipo cerrado.

En la figura 3 se muestra un sistema semicerrado, la deaeración del agua es efectuada aplicando vacío a la parte superior de una columna empacada antes de enviarla al tanque de agua --



**UNAM**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
 MANUEL VELEZ MARTINEZ**

**DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO  
 DE UN SISTEMA SEMI-CERRADO  
 PARA TRATAMIENTO DE AGUA**

**3**



limpia. Para evitar que el aire sea reabsorbido por el agua tratada es recomendable tener gas en el espacio libre del tanque de agua limpia o una pequeña capa de aceite. Esta última no es muy recomendable, pues se ha observado en el campo que el aire se disuelve rápidamente en el aceite logrando así una protección parcial del agua de inyección, el gas natural tiene una capacidad absorbidora de oxígeno, por lo que se recomienda como un excelente sello en los tanques de almacenamiento.

#### PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN LA INYECCION DE AGUA

Para definir algunos de los problemas que se presentan, es necesario los factores que los provocan y el modo de prevenirlos.

#### SOLIDOS DISUELTOS

Generalmente provienen de sales solubles monovalentes o divalentes los cuales en altas concentraciones pueden ocasionar problemas de incrustación y corrosividad por lo consiguiente se requiere de análisis químico que indique la presencia de estos iones. El análisis debe incluir una determinación cuantitativa del total de los sólidos disueltos, sodio, calcio, magnesio, bario, hierro total, cloruros, bicarbonatos, sulfatos, gravedad específica a 20°C, resistividad a 20°C y pH. Este es un análisis básico de agua y se debe -

hacer como parte de la factibilidad del estudio. Los datos pueden necesitar ponerse al día cuando sea seleccionada la última fuente del agua.

#### SOLIDOS EN SUSPENSION

Este término se refiere a los materiales acarreados como sólidos no disueltos en el agua. Estos materiales pueden causar taponamientos de pozos, y en donde se justifique económicamente, pueden ser removidos por desarenación y asentamiento y/o filtración.

#### MEDIOS CORROSIVOS Y SU PREVENCIÓN

La corrosión es un fenómeno complejo que puede presentarse de diferentes maneras, es el ataque de la superficie de un metal que puede ser causado por las reacciones químicas o electroquímicas de éste con otras sustancias del medio ambiente que la rodean, la corrosión electroquímica se presenta cuando los aniones y cationes ocurren simultáneamente en un punto sobre la superficie del metal. el flujo eléctrico de las áreas anódicas o las catódicas puede ser por celdas locales, la corrosión Biológica es causada por la actividad metabólica de algunos microorganismos que causan directa o indirectamente la deterioración del metal. Esta actividad se puede traducir como:

- Se produce un ambiente corrosivo

- Se crean celdas de concentración electrolítica sobre la superficie del metal
- Se altera la resistencia de la película protectora
- Se influye en las reacciones anódicas y catódicas
- Se altera la composición ambiental

Algunos aspectos que influyen en la corrosividad en un sistema son:

1) Composición del agua - análisis de minerales (sólidos sueltos); gases disueltos ( particularmente  $CO_2$ ,  $H_2S$  y  $O_2$  ); pH y material en suspensión ( incluyendo los sólidos y el aceite ).

2) Condiciones físicas - Temperatura, presión, velocidad de flujo, volumen de flujo y volúmenes acumulados y efectos de turbulencia y erosión.

3) Eléctrica y electroquímica - Acoplamiento de diferentes metales y celdas de concentración diferenciales.

PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

El tratamiento de agua para evitar los problemas que acompañan a su uso, se logra también mediante agentes que inhiben los efectos indeseables. Por ejemplo la corrosión puede detenerse mediante una película molecular protectora que haga las veces de barrera, impidiendo que el oxígeno entre en contacto con la superficie del metal. En sistemas de agua re

circulada se han usado para este fin, cromatos, aminas, polifosfatos, taninos y ligninas.

También se recurre a la adición de cal para la deposición de carbonatos cálcicos. La protección catódica, se basa en el principio de mantener una película de hidrógeno a costo de anodos que se sacrifican aplicando una corriente continua.

La precipitación del calcio, magnesio y hierro pueden evitarse por la adición de polifosfatos que forman complejos solubles. Los agentes secuestrantes son generalmente demasiado caros para emplearlos en sistemas de recirculación, a menos que la mayor parte de las impurezas hayan sido eliminadas por métodos de tratamiento, en tal caso su uso será mínimo.

INCRUSTACIONES Y COMPATIBILIDAD - La posibilidad de futuros problemas de incrustaciones debe ser revisado cuidadosamente a través de cada paso en el diseño de su sistema de agua. Las incrustaciones y depósitos se pueden formar debido a incompatibilidades de aguas, supersaturación, pérdidas de gases y entradas de oxígeno. En efecto las incrustaciones y depósitos son causados por la alteración del equilibrio químico del agua.

El agua disponible es a menudo incompatible con el agua de la formación que va a ser barrida. Existen muchas controversias y diferencias sobre el grado y efecto de deposición en el yacimiento causada por la incompatibilidad. Generalmente no se considera este tipo de deposición perjudicial para el proyecto, -

y no hay una solución completamente satisfactoria al problema.

Los remedios comunes y corrientes, incluyen limpieza general, mecánica y química, inhibición química, etc.

La actividad bacterial es un sistema de agua, puede causar gran número de problemas. El agua dulce se puede convertir en amarga por las secreciones ácidas de las bacterias, así mismo, se pueden formar lodos y otros agentes de taponamiento de pozos.

Se debe considerar que, aún cuando son comunes en los sistemas de inyección de agua, la sola presencia de microorganismos no es necesariamente perjudicial, estos últimos no siempre causarían problemas si el sistema ha sido diseñado para disminuir las oportunidades de su desarrollo.

## **CAPITULO II**

### **FACTORES QUE AFECTAN LA INYECCION DE AGUA**

Para obtener la mayor recuperación de aceite es necesario programar el gasto de inyección de acuerdo a los factores siguientes que definen la mecánica del yacimiento:

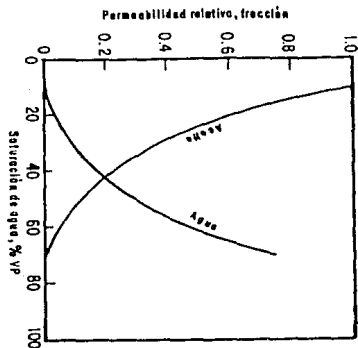
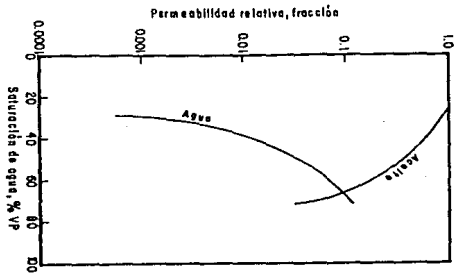
- a) Permeabilidad
- b) Viscosidad
- c) Presión capilar
- d) Influencia del agua intersticial
- e) Porosidad
- f) Fase de gas
- g) Condiciones geológicas

Una expresión matemática que define la posición del frente de desplazamiento es la fórmula de fracción de flujo, en ella están incluidos los factores mencionados.

Se considerará que la fórmula varía de acuerdo como varían las saturaciones del agua y éstas conforme se efectúa el desplazamiento. ( La deducción de la fórmula de fracción de agua se presenta en el apéndice A ).

#### PERMEABILIDAD

Se denomina permeabilidad absoluta a la propiedad que tiene la roca de permitir el paso de un fluido a través de ella, cuando se encuentra saturada al 100% del fluido, la permeabilidad efectiva pueden variar desde cero hasta el valor de la permeabilidad absoluta.



UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA

4



La influencia de las relaciones de permeabilidad se determinan graficando los valores de fracción de agua en donde

$$f_w = \frac{1}{1 + (k_o/k_w)(\mu_w/\mu_o)}$$

y las saturaciones de agua  $S_w$  correspondientes a esos valores de permeabilidad. Así mismo se graficarán las variaciones de las saturaciones contra la movilidad con objeto de observar el efecto de las variaciones que ocurren.

#### VISCOSIDAD

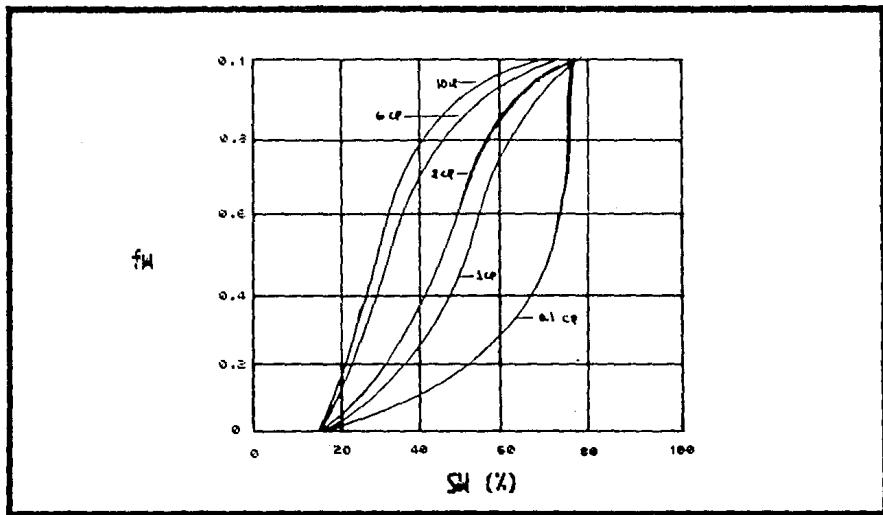
Para determinar la viscosidad se graficará la  $f_w$  en forma simplificada contra la  $S_w$  haciendo variar la viscosidad del aceite desde 1.0 cp hasta 10 cp y suponiendo la viscosidad del agua de 1.0 cp, se obtiene la gráfica correspondiente.

En esta figura se puede observar que entre menor es la viscosidad del aceite, la eficiencia del desplazamiento es mayor.

#### PRESION CAPILAR

Una forma de encontrar la  $P_c$  en una muestra de roca del yacimiento es determinando la presión que se debe aplicar a un fluido no mojante para alcanzar una cierta saturación de este fluido; a cada saturación corresponde una  $P_c$  y viceversa.

$$P_c = P_c ( S )$$

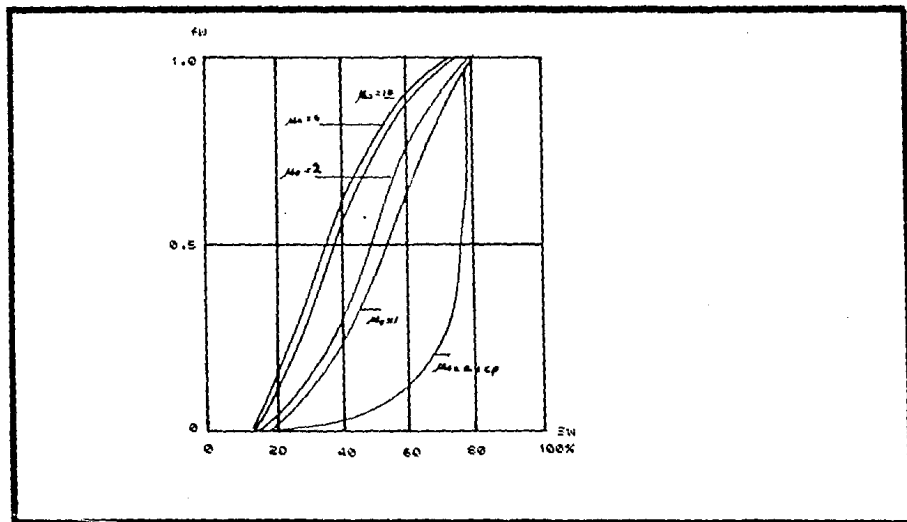


UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA DE  $f_w$  VS  $SW$   
PARA DIFERENTES  
VISCOSIDADES

5



**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA  
Fw vs Sw

6

Para este caso se usará la fórmula en su forma integrada:

$$f_{fw} = \frac{1 + \frac{k_{DA}}{\mu_o q_t} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (P_o - P_w)g \sin \alpha \right]}{1 + \frac{k_o}{\mu_o} \frac{\mu_w}{k_o}}$$

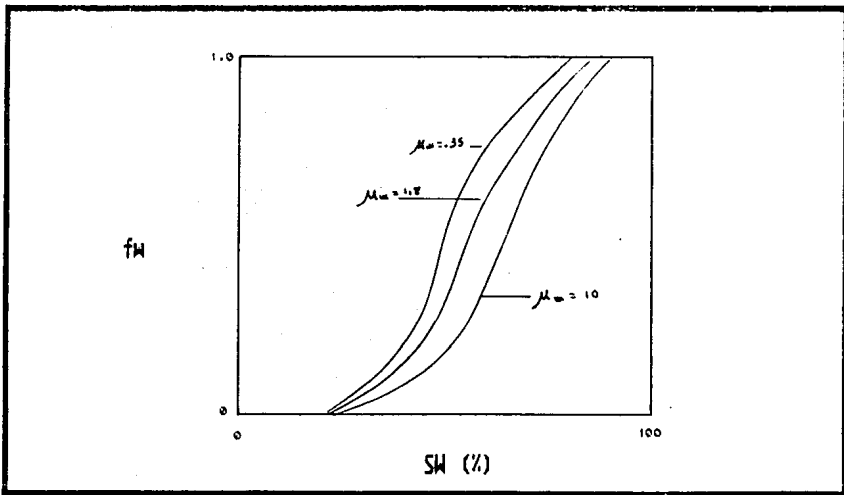
En el caso normal de que el agua satura la roca, el valor de la  $P_c$ , será positivo porque  $P_w - P_o + P_c$ , ya que la roca absorbe el fluido que la está saturando, obteniéndose por lo tanto una mayor cantidad de aceite recuperado.

El caso contrario es cuando el aceite esté mojando la roca, ya que entonces, la  $P_o$  es mayor que  $P_w$ , y  $P_w - P_o = P_c$ , disminuyéndose la recuperación de aceite.

#### INFLUENCIA DEL AGUA IREDUCTIBLE

Al efectuarse la inyección, el agua intersticial también será desplazada, por lo cual existirá siempre una conductividad al agua a lo largo del yacimiento pero se obtendrá el banco de aceite por efecto del agua desplazamiento, si la saturación del agua desplazante, si la saturación del agua irreductible no es mayor que su valor crítico de saturación del agua irreductible ( $Sw_{ci}$ ).

Si  $Sw$  es mayor que la  $Sw_{ci}$ , no se formará un frente de agua desplazante y ésta avanzará hasta los pozos sin desplazar el aceite.

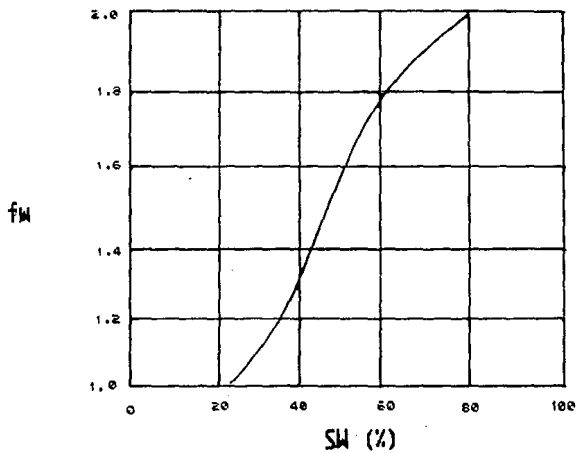


**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA  $f_W$  US  $SW$   
A DIFERENTES VISCOSIDADES  
DE AGUA

7



UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA . . FM VS SW  
AFECTADA POR EL AGUA  
IREDUCTIBLE

00

**POROSIDAD**

La porosidad de un medio poroso es el volúmen de poros entre el volúmen total de la roca:

Esta roca puede ser un yacimiento, una porción de él o sólo una muestra del mismo (núcleo).

La porosidad absoluta se considera cuando se toma en cuenta la totalidad de los poros aunque no todos esten comunicados entre sí, cuando se considera únicamente los poros comunicados de la roca se dice que es porosidad efectiva.

Los yacimientos tienen una porosidad de entre 5 a 30 por ciento, para considerar la porosidad es necesario tomar en cuenta la variación con el tiempo, ya que la presión varía con el tiempo y el medio poroso es compresible.

**FASE DE GAS**

La presencia de una tercera fase, que es la fase gaseosa se toma como una fase inmóvil. Como consecuencia las relaciones de permeabilidad relativa determinadas en función de las saturaciones de agua, deben obtenerse en los diaqramas en que se incluya la presencia de gas.

## CONDICIONES GEOLOGICAS

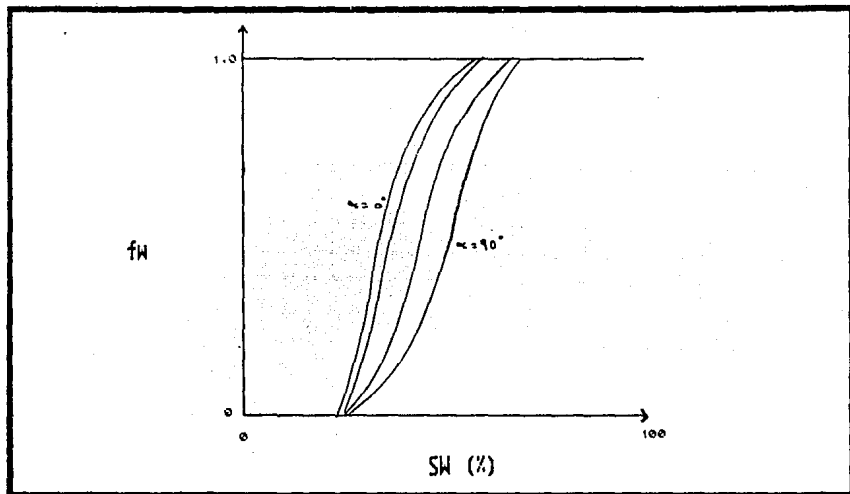
Para los diferentes ángulos del echado se puede hacer un análisis gráfico, donde se considerarán también las viscosidades y los gastos.

Al hacer una gráfica de  $f_w$  vs  $S_w$ , para diferentes viscosidades de aceite, se obtendrán las siguientes curvas, que significan que a medida que disminuyen la viscosidad del aceite aumenta la eficiencia del desplazamiento. Un desplazamiento de las curvas hacia la derecha significará que se tendrá una mejor eficiencia de desplazamiento y una mayor recuperación de aceite, debido a que al final habrá una mayor saturación de agua en el yacimiento, lo que implica que quedará una saturación de aceite menor.

Al graficar  $f_w$  vs  $S_w$  para diferentes ángulos de buzamiento. Se observa que cuando aumenta el ángulo del echado aumenta la recuperación.

Una vez definidos y aclarados estos factores, los cuales influyen en la fórmula de avance frontal se podrá definir un buen programa de inyección de agua.



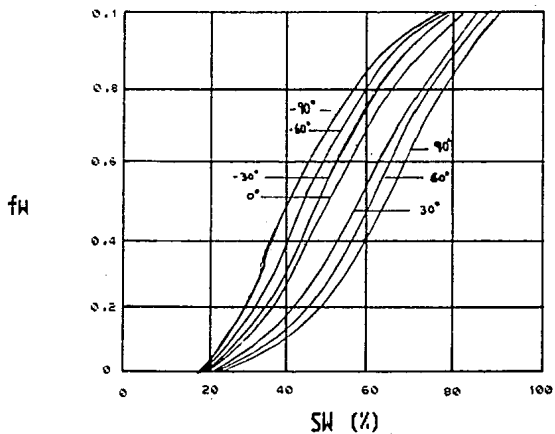


UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA FW US SW  
A DIFERENTES ANGULOS DE  
BUZAMIENTO

9

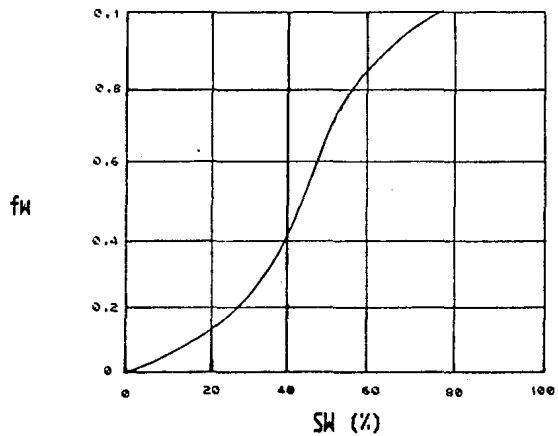


UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA DE  $F_w$  VS  $SW$   
PARA DIFERENTES ECHADOS

10



**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

GRAFICA

FW US SW

11

### **CAPITULO III**

#### **PROCESO DE TRATAMIENTO**

En este capítulo se mencionarán los procesos que se han empleado para mejorar la calidad del agua de inyección para evitar problemas durante su inyección.

El tratamiento del agua se hará teniendo en cuenta su naturaleza química y física, las necesidades requeridas y su factibilidad económica por lo cual se someterá a análisis previos para seleccionar el tratamiento idóneo.

Los pasos previos al tratamiento son los siguientes:

- 1- muestreo del agua
- 2- análisis químico y físico para determinar su calidad
- 3- selección del tratamiento
- 4- aplicación del mismo

#### ANALISIS CUANTITATIVOS

Mediante este análisis se determinará el contenido de los siguientes minerales, radicales aniónicos y gases.

Minerales: Ca, Mg, Na, Fe.

Radicales aniónicos:  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CL}^-$

Gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$

además: pH y demás análisis cuantitativos

#### METODOS DE ANALISIS

##### DETERMINACION DE CALCIO

Se determina como dureza total mediante el método del versenato de sodio el cual emplea el purpurato de amonio como indicador.

El método se basa en el intercambio del ion sodio por el de calcio hasta su determinación total: ppm como  $\text{CaCO}_3$  ML. gastados  $\times 20 =$  ppm como  $\text{CaCO}_3$ .

En la normalidad del versenato y demás reactivos para la titulación se usará como norma: un ml. de reactivo es igual a una parte por millón (ppm).

#### DETERMINACION DEL MAGNESIO (Mg) como $\text{CaCO}_3$

A 50 ml de muestra se le añaden 1 ml de solución buffer reguladora y 50 ml. de solución de oxalato de amonio al 20% se deja reposar por 30 minutos, el precipitado de oxalato de calcio se filtra y se lava a las aguas del lavado se les añaden varias gotas de cloruro de calcio hasta que no se precipiten.

A las aguas lavadas se añaden 4 gotas de ericromo negro T y se titula con versenato de sodio. ml gastados de versenato  $\times 20$  ppm de Mg como  $\text{CaCO}_3$ .

#### DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS ( S.T.D )

En forma de cloruro de sodio, como NaCl, su determinación se efectua por medio del aparato Solu Bridge-set, que mide la conductividad específica de las soluciones. este aparato es -

de fácil manejo con correcciones de temperatura.

ppm como  $\text{CaCl}_2 \times .95 = \text{S.T.D como NaCl}$

DUREZA TOTAL - A 50 ml. de muestra se le añaden 3 ml de solución reguladora Buffer y 1 ml. de indicador Ericromo negro T, titulándose con versenato de sodio hasta el cambio de coloración de rojo vino a azul.

ml. gastados de versenato de sodio  $\times 20 = \text{ppm de CaCO}_3$

Determinación de la alcalinidad como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y  $\text{OH}^-$ .

A 50 ml. de muestra, en un matríz se añaden dos o tres gotas de indicador de fenoftaleina. si da color rojizo se titula con ácido sulfúrico n/50 hasta su desaparición, los ml. gastados se multiplican por 20 siendo igual a ppm. de  $\text{CaCO}_3$ , siendo ésta la alcalinidad a la Fenofraleina en seguida se agregan 4 gotas del indicador de anaranjado de metilo, se titula nuevamente con ácido sulfúrico N/50 hasta el cambio de naranja a anaranjado rojizo, los ml. gastados por 20 es igual a las ppm de  $\text{CaCO}_3$ , siendo la alcalinidad a la M. Se relacionan los ml. gastados en F y M para las determinacione de  $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{OH}^-$ .

DETERMINACION DE CLORUROS como (CL). Mediante el método aryen to métrico volumétrico, se toma una muestra de 50 ml. se le añaden 4 gotas del indicador cromato de potacio, se titula con una solución de nitrato de plata N/35.5. hasta el cambio de color amarillo a rojizo. ml gastados  $\times 20 = \text{ppm de CL}$ .

DETERMINACION DE  $\text{CO}_2$  - A las muestras con un pH menor de 8.0 se le determina el  $\text{CO}_2$ . Procedimiento: Se muestrea en un frasco color ámbar de 500 ml. con tapón esmerilado se enfría a  $10^\circ\text{C}$ , procurando que no burbujee, ni que el aire quede dentro. Se toman 10 ml de la muestra y se agregan 10 gotitas del indicador fenoftaleina. titúlese con solución de carbonato de sodio N/22, hasta la coloración rosa persistente durante 5 min.

$\text{ppm de CO}_2 = \text{ml. gastados de sodio} \times 10.$

DETERMINACION DE OXIGENO EN EL AGUA - Se toma la muestra en dos frascos de tapón esmerilado de 350 ml. sin que burbujee dentro, ni quede aire dentro, se toma poco a poco conforme se vaya llenando el frasco, a uno de ellos se le pone 1 ml. de solución manganosa y otro ml. de sol. alcalina de yoduro, se agita y se deja reposar 5 min. Al otro frasco se le adicionan únicamente 1 ml. de solución alcalina de yoduro y después de 5 min. ambas muestras se les agrega 1 ml. de ácido sulfúrico concentrado y se le agita hasta la desaparición de los grumos como indicador se les pone engrudo de almidón y se titula con tiosulfato de sodio N/40. Los ml. gastados en la segunda muestra también de 200 ml. nos dá directamente en ppm de  $\text{O}_2$ .

Para el índice de langelier o de saturación. se necesitan las determinaciones del pH, temperatura, S. T.D. Alcalinidad a la m, dureza de calcio y el factor 9.30, que con los valores de dichas determinaciones obtenidas de tablas se encuentra un ph



de saturación el cual se resta del  $\text{pH}$  real del agua teniéndose así el índice de saturación cuyos valores son: negativos tendencia incrustante y cuando el valor sea cero, el agua estará químicamente balanceada, para la inyección se admite a  $+ 1$ .

EFFECTUADO EL ANALISIS SE PROCEDE A LOS SIGUIENTES TRATAMIENTOS.

Para la eliminación de materia orgánica, color, turbidez y dureza; se emplean las siguientes operaciones:

#### SEDIMENTACION

El término sedimentación se usa generalmente para indicar remoción de sustancias en suspensión sin ayuda de coagulantes, reduciendo la velocidad del agua a casi cero, aumentando el tiempo de retención de ésta en el tanque de sedimentación. La eliminación es solamente parcial dependiendo siempre de las sustancias disueltas de que se traten y de la temperatura de operación. Como las partículas pueden variar en un amplio margen desde las relativamente grandes hasta las de tamaño coloidal, no habiendo un límite de demarcación correcta entre lo que es turbidez y sedimento, sin embargo, sugiere el empleo de la palabra sedimento a aquellas partículas que en una muestra agitada se asientan rápidamente, no pudiéndose determinarse como turbidez; siendo ésta una definición bastante burda y no permite diferenciar entre dos partículas, una de ellas que por periodos de sedimentación simple, puede ser eliminada y otra que

sea necesaria la sedimentación con coagulantes o asentamiento. Estas últimas pruebas son muy necesarias y deben de llevarse a cabo, ya que por medio de una serie de ellas, se determina el grado de sedimentación y coagulación del agua por tratarse, es to se lleva a demostrar que el material suspendido pueda removerse en uno o varios periodos de sedimentación y encontrar si hay economía en el uso de coagulantes. Para la sedimentación simple o sin coagulantes, se puede llevar a efecto en lagos, lagunas, estanques, depósitos o tanques de la mayor capacidad posible, para que el tiempo de retención sea mayor y que no solamente se logre remover la materia gruesa, sino también la fina.

COAGULACION

Se pasa a través de un filtro, agua cruda con turbidez y color observaremos que éstos pasan sin que el material filtrante pueda detenerlos, lo cual indica que son partículas coloidales, por lo que resulta necesario el tratamiento para poder eliminarlas. El coagulante actúa formando floculos al cual se adhieren las partículas formando grumos con el color y la turbidez en el agua, los cuales por su aumento de peso se sedimentan siendo eliminados como lodos en el clarificador o retenidos en los filtros, llamándose coagulación a este tratamiento. Los floculos pueden actuar en dos formas; por Electroforesis o sea formando atracciones eléctricas hacia las partículas o por simple atrapamiento, llamándose Suspensoides. Como se dijo, for-

mando ambos, grandes grumos que fácilmente serán retenidos en los filtros dando afluentes claros; la mayoría de los floculos se asientan en el clarificador, siempre y cuando se use el equipo adecuado reduciendo grandemente la carga de los filtros, aumentando la capacidad de éstos.

Los coagulantes más usados, son compuestos a base de aluminio y hierro, por lo general sulfatos, que por su naturaleza ácida, éstas reaccionan con la alcalinidad natural o añadida del agua en tratamiento, para formar hidróxidos y sulfatos respectivamente. Por lo general se admite que los floculos son hidróxidos de aluminio, pero realmente son sulfatos básicos de composición compleja, la mayoría de los coloides que provocan el color y la turbidez están cargados positivamente mientras que los hidróxidos tienen carga negativa, de aquí que se consideren movimientos mecánicos eléctricos en la coagulación y también se presume que el anodo es atrapado sensiblemente por ca tión, teniéndose la experiencia que los sulfatos son más acti vos que los cloruros. La dosis de coagulante tiene una relación directa con el pH, la cual varía para cada tipo de coagu lación. El pH óptimo puede variar desde fracciones de dosifi cación en ppm a más o menos 80 ppm del coagulante para el sul fato de aluminio el pH se encuentra entre 5.5. a 6.8, con los coagulantes varía desde 3.5 a 5.5 y muy especialmente arriba de 9.0, sin embargo, algunas con bastante S.T.D. tienen un pH de 7.5 para el coagulante de aluminio, también cuando hay color se usan PH menores de 5.5.

Entre las aguas que más difícilmente se lleva a cabo la coagulación correcta, son las que tienen un alto color, baja turbidez y materia orgánica, con este tipo de agua el PH óptimo tiene un rango muy reducido, pero puede ayudarse añadiendo arcilla y sílice activada o polielectrolitos, encontrándose un PH abajo de 6.5.

La agitación controlada mejora grandemente la coagulación, no debe ser ni muy lenta que no ayude a la coagulación ni rápida porque rompería los floculos.

#### PRUEBAS DE DOSIFICACION EN EL LABORATORIO

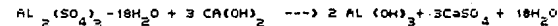
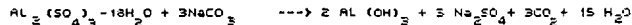
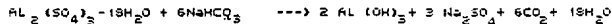
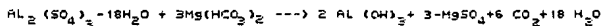
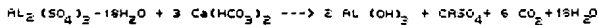
Para determinar la dosificación adecuada de coagulante, que, de acuerdo al pH se deba agregar al agua, seguir el siguiente procedimiento:

En diferentes recipientes de vidrio transparente se colocan muestras de agua, las cuales variarán en su pH, estos recipientes deben ser de boca ancha para facilitar el agregar los reactivos, deben estar perfectamente iluminados para poder observar la formación del floculo, la luz debe provenir de abajo hacia arriba, pero debe evitarse un calentamiento de la muestra, cuando se agrega el coagulante se debe agitar, preferentemente en forma mecánica. Al dosificar se sugiere que  $ca_{cm^3}$  sea igual a 1 ppm estos serán medidos lo más exacto posible, los reactivos que se usarán son: Coagulantes, Arcillas, Cal, etc. y todas tendrán similar manejo.

Después de agregar el reactivo por agitación a la muestra, se toma el tiempo de la formación del floculo, se deja de agitar y se mide el tiempo de asentamiento; por lo general se anota como porcentaje en periodos de 5, 10 y 15 minutos, estas pruebas se hacen por ensayo y error ya no existe un patrón a seguir que nos dé parámetros comparativos, pero nos darán un límite en la dosificación hasta encontrar el grado de floculación satisfactoria para cada caso.

#### COAGULANTES

Los coagulantes que más se usan por ser de una mayor aplicación práctica son: sulfato de aluminio con 18 moléculas de agua de cristalización, sulfato ferroso, con 7 moléculas de agua de cristalización, al igual el sulfato férrico, complejos cloridados, alumbre de potasio y aluminato de sodio. El sulfato de aluminio es el que más se usa por ser de gran rendimiento, más económico por kilo de peso. En la coagulación, el agua no necesariamente debe de estar libre de impurezas de hierro; en el mercado se encuentra en forma ácida y básica con un contenido de  $Al_2O_3$  de 14.5% a 17.5%, siendo su contenido teórico de 15.5% en el sulfato puro; en el mercado se encuentra con 14 moléculas de agua de cristalización, se puede comprar en forma granular, cristales, polvo o solución. Al disolver la forma sólida se recomienda emplear agitación mecánica. El reactivo se puede dosificar en seco por gravedad, por presión o en forma electroquímica siendo más usados los dosi-



**UNAM**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ**

**REACCIONES QUE SE LLEVAN  
A CABO AL COAGULAR EL AGUA  
CON SULFATO DE ALUMINIO**

12

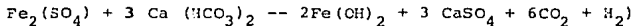
ficadores mencionados primero.

#### SULFATO FERRICO, $Fe_2(SI_4)_3$

Por lo general es conocido en dos formas comerciales que difieren en su contenido de sulfato férrico, generalmente varían de un 70 a 90%, algunas de estas sustancias contienen apreciable cantidad de sulfato de aluminio.

La forma granular que se encuentra en el mercado es muy soluble en agua y con agitación se prepara fácilmente con dos partes de ésta y una de sulfato, no es recomendable guardar estas soluciones por largo tiempo, ya que se hidrolizan pasando a hidróxido férrico, que es una solución corrosiva.

El pH óptimo para la coagulación se determina por medio de pruebas en el laboratorio, análogas a las del sulfato de aluminio, como ejemplo:



#### ACTIVACION DE LA FLOCULACION

Se usan sustancias que ayudan a mejorar la floculación, agrandando el flóculo y aumentando su peso, ayudando a eliminar color, sólidos suspendidos, materia orgánica, etc.

Este tipo de sustancias son arcillas, sílice activada y polielectrolitos.

## ARCILLAS

Las arcillas son empleadas para mejorar la coagulación, sobre todo en la eliminación de color en aguas fuertemente coloreadas, probablemente esto tenga su origen en la observación de que las aguas de bajo contenido mineral coagulen mejor cuando hay turbidez. Se ha comprobado que hay arcillas notablemente efectivas, para ayudar a eliminar el color y turbidez. El efecto de éstas se considera comunmente como acción de peso, las aguas de alto contenido de sustancias colorantes, pero de baja turbidez y materia orgánica, no se asientan rápidamente por lo liviano y pequeño de las partículas, estas arcillas tienen una completa aplicación.

La adición de arcillas aumenta el tamaño y peso del floculo y se asienta arrastrando consigo color y turbidez; en esto influye grandemente la capacidad de absorción de la arcilla, algunas de ellas han dado grandes resultados y son comercialmente conocidas pero deben probarse en el laboratorio antes de usarse la dosis usual es de 17 a 51 ppm de arcilla.

## SILICE ACTIVADA

Se usa con bastante frecuencia para ayudar a la coagulación y eliminar turbidez, color y materia orgánica, en casos difíciles en los que otros métodos han fallado. Como ya se había mencionado, la sílice activada no se encuentra en el mercado-



como tal, sino que se debe preparar, en el mismo sitio en que se va a aplicar y éste procedimiento se lleva por medio de sustancias ácidas sobre el silicato de sodio. En el proceso Baylis, el agente activador es el ácido sulfúrico sobre el silicato, también se han usado varios agentes tales como sulfato de aluminio, bisulfato y bicarbonato de sodio.

La sílice activada se prepara por lotes y se reactiva por medio de dispositivos especiales.

La dosis puede determinarse fácilmente en el laboratorio cuando se usa con alguno de los coagulantes comunes, como los ya mencionados, la dosis varía de 1 a 5 ppm, en sistemas de cal-sodio en frío es de 2.5 a 4 ppm.

#### POLIELECTROLITOS

Con esta denominación se conocen ciertos complejos orgánicos oxigenados, naturales o sintéticos que se emplean tanto como ayuda a la coagulación y a veces como coagulantes, o sea acompañados por otros o solos, estos materiales se clasifican como catiónicos y aniónicos, según su naturaleza electroquímica ayudan en la floculación, asentamiento y clarificación.

La dosificación y el tipo de polielectrolito adecuado debe de determinarse en el laboratorio, la dosis como es natural varía de acuerdo al tipo de agua y la aplicación de ésta.

Por lo general cuando se usa en clarificadores, la dosis usual es de 0.5 a 1.0 ppm reduciendo la dosis del coagulante, en los sistemas en frío cuando se usa como coagulante la dosis de 1 a 2 ppm.

#### ASENTAMIENTO

Como ya sabemos el término asentamiento se usa para el agua coagulada, el equipo de coagulación como el asentamiento debe de estar bien diseñado, para que se lleve a cabo una perfecta clarificación, con un mínimo de reactivo.

Actualmente se emplean dosificadores de reactivos automáticos que permiten una cuidadosa dosificación pudiendo ser éstos del tipo seco o húmedo, dependiendo de la capacidad de la planta y sus condiciones.

Es muy necesaria una buena agitación de los reactivos, siendo ésta por diversos medios.

#### CLARIFICADORES

Se emplea el equipo denominado equipo de lecho suspendido, ha tenido bastante uso, siendo muy popular en las plantas de tratamiento de agua, ya que su aplicación es variada tanto en la floculación como en el proceso de ablandamiento, con la cal sodada en frío, se puede efectuar ambas operaciones simultáneamente en caso de que así se requiera, la diferencia que --

20

existe entre este tipo y el de diseño convencional, es que en el primero todo el flujo de agua se filtra a través de un lecho de lodos, que se encuentran suspendidos generalmente en la parte inferior del equipo. Este contacto del agua con el floculo previamente formado, permite la completa utilización del floculo en su capacidad de absorción, por lo que se logra una disminución apreciable en el consumo de reactivos, requiriéndose un menor tiempo de retención, este produce efluentes claros de buena calidad.

#### FLOCULADORES Y TANQUES DE ASENTAMIENTO

Este tipo de equipo, es el que se cree más conveniente para el proyecto, el cual se describe a continuación y consta de: un mezclador con varios depósitos de floculación, provistos de agitación lenta y uno o varios depósitos de asentamiento o clarificadores.

El objetivo del mezclador rápido es el de hacer como su nombre lo indica, una mezcla rápida del agua cruda y los reactivos en el menor tiempo posible, ya que se ha observado que entre más rápida sea esta operación, mejor floculación se obtiene. Al empezar a formarse los floculos, lo hacen en partículas muy pequeñas y dispersadas uniformemente en el agua. Para que se tengan floculos grandes, es necesario que estos se aglomeren aumentando su tamaño para que así se asienten por el mayor peso adquirido, para lo cual se ha sugerido una

agitación lenta y de movimientos circulares en los floculadores, para lograr los fines deseados.

Después de formados los floculos es necesario que no se sometan a flujos turbulentos, puesto que los romperían y los dispersarían, también es recomendable que los ductos que comunican a los floculadores con los tanques de asentamiento, deben tener la suficiente área transversal para evitar que esto suceda.

Es muy conveniente evitar los llamados " cortos circuitos " o desmoranación de los floculos, por exceso de retención del agua en los asentadores para evitar esto, el tiempo de retención no deberá ser mayor de dos horas; pues muchas veces es sorprendente el tiempo necesario para la clarificación, debido al corto tiempo.

Los afluentes e influentes uniformes, el empleo de tanques adecuados da como resultado una buena operación.

Cuando se requieren flujos bastante grandes como en este caso, son necesarios tanques de sección transversal lo suficientemente grandes y muchas veces se prefiere dividirlos longitudinalmente, de manera que los periodos de tiempo empleados, siendo de 5 a 7 1/2 minutos en el mezclador rápido, de 20 a 45 min. en el floculador y de 1/2 a 2 horas, en el clarificador eliminando los lodos en forma intermitente o continua según el diseño del equipo en el primer caso por medio de una -

purga auxiliada con uan bomba centrifuga que se pone a funcionar por periodos de tiempo y la segunda con rastras mecánicas y eliminación continua de lodos.

FILTRACION

Los filtros usados actualmente para la filtración en este tipo de plantas y potabilizadores son de los que se emplean material granular como medio filtrante tales como grava y arena o antracita a través de las cuales el agua se filtra, en flujo descendente. A estos filtros se les conoce como filtros de arena al modelo antiguo se le agrega coagulante pero se tiene que esperar a que madurara lo que se define en cuanto empieza a salir el musgo, especie de sedimento de origen bacteriano para que empieze a filtrar.

El filtro moderno, es un filtro comparativamente rápido y no es necesario someterlo a maduración ya que coagula y es suficiente un periodo de 2 a 3 minutos antes de empezar el ciclo, para que el afuente sea bastante claro, la velocidad promedio de filtración es de 2 a 3 gal/min. por pie<sup>2</sup> de área filtrante ( 81 a 222 litros/min. por m<sup>2</sup> de área filtrante ). Teniendo una buena floculación y asentamiento se puede aumentar la velocidad de filtración. Este tipo de filtros rápidos se dividen en: de presión y de gravedad en las instalaciones industriales de poca monta por lo general se usan los primeros, pero si se manejan grandes volú-

menes de agua como en este caso son más recomendables los segundos y principalmente para el proceso de cal-sulfato de aluminio-cloro.

Los filtros de presión se fabrican en el tipo vertical y horizontal, siendo en forma cilíndrica de lámina de acero, con uno o dos agujeros para hombre y como medio filtrante grava y antracita y el equipo necesario para llevar a cabo las operaciones de filtración y retrolavado, con capacidad de filtración por unidad desde 2.5 a 235 gpm ( 9.45-1265 l/m ) y con velocidad de filtración de 3 gpm/pie<sup>2</sup> ( 122 l/min. x m<sup>2</sup> ).

De acuerdo a la capacidad de la plante y los requerimientos de la misma, se pueden tener de uno a varios filtros formando bacterias.

La filtración se lleva a cabo pasando el agua en flujo descendente, a través del lecho. El lecho de este tipo de filtro más antiguos es el de arena y el que le sigue el de antracita graduada.

Los medios filtrantes de tipo granular, presentan como ventaja en la operación de retrolavado, que se expande, expulsando la materia retenida en el filtrado.

#### FILTROS DE GRAVEDAD

Como ya se había dicho, estos filtros son los más adecuados -

para el tipo de planta, por su gran capacidad y buena calidad de los afluentes, con velocidad de filtración de 2 a 3 gpm/pie<sup>2</sup> ( 81-22 l/m.x m<sup>2</sup> ) de área filtrante. Se sugiere que la velocidad de retrolavado se base en la expansión del lecho filtrante, que debe ser aproximadamente el 50% de la altura de éste. En el invierno, cuando la viscosidad del agua aumenta el flujo de la misma, necesario para el retrolavado, es menor en el verano ya que la viscosidad disminuye, pudiendo variar en estos dos periodos de 10 a 20 gpm/pie<sup>2</sup> (408-826 l/min. x m<sup>2</sup> ) de área filtrante.

El retrolavado, consiste en meter el agua a contracorriente, o sea en el sentido contrario de como normalmente operan a la velocidad mencionada durante aproximadamente 15 minutos, para poner en operación un filtro, por algunos minutos el agua se tira al drenaje o se vuelca al clarificador, esperando que el lecho se asiente y por medio del coagulante como ya se mencionó se forma un lecho con las condiciones requeridas.

La eficiencia de la filtración se comprueba de una manera sencilla, tomando muestras y observándolas hasta que salga limpia y claro el efluente, entonces se deja de mandar al drenaje y se pone el filtro en operación, como ya es sabido la velocidad de filtrado es de 3 gpm/pie<sup>2</sup>; es aconsejable no excederse de este límite, haciéndose solamente por emergencia y por periodos de tiempo muy cortos, el filtrado con

tinua hasta que los indicadores de presión muestren una diferencia conocida como pérdida de carga, siendo ésta de 0.5 a 0.7 KG/CM<sup>2</sup> o sean de 8 a 10 lb/pg<sup>2</sup>, se llega a éste límite se somete el filtro a un retrolavado.

Es sabido que el ciclo del filtrado depende de la calidad y cantidad del agua que se va a filtrar, pues está en relación directa con la cantidad de sólidos en suspensión, cuando la coagulación y asentamiento son correctos, la cantidad del material insoluble disminuye, aumentando como ya se había dicho el ciclo del filtrado. Los filtros como ya es sabido operan por lo general en baterías de 2 o más unidades de tal forma que mientras una unidad se retrolava, las otras pueden absorber el flujo total, cuando la batería es de varios filtros ésta operación se lleva a cabo escalonadamente. o sea que las unidades se van retrolavando una a una con los afluentes de las otras, pudiendo ser también con el agua provenientes de un tanque de asentamiento, con agua cruda siempre y cuando tenga poca materia orgánica en suspensión, enjuagándose luego con agua filtrada.

Los filtros de gravedad pueden construirse de concreto, acero, o madera siendo el concreto el más usado, por su bajo costo y bajo mantenimiento.

El medio filtrante de grava y arena para filtros de gravedad, de cualquier capacidad y volúmen, desde un pie cuadrado de área filtrante y consta de las siguientes especificaciones:



29

5" (127 mm) de grava de 1-1/2" - 1" (38.1 - 25.4 mm)  
 5" (127 mm) " " " 1" - 1/2" (21.4-12.7 mm)  
 4" (101 mm) " " " 1/2" - 1/4" (12.7-6.35 mm)  
 4" (101 mm) " " " 1/4" - 1/6" ( 6.35 - 4.23 mm)  
 6" (152 mm) " arena fina de 0.8 a 0.5 mm.

Cuando se utiliza antracita (antrafilt)

5" (127 mm) de antrafil No. 6 de 13/16" - 1-5/8 " (20.6 -41.2 mm)  
 5" (127 mm) " " " 5 " 9/16" - 13/10 " (14.1 - 20.6 mm)  
 4" (101 mm) " " " 4 " 5/16" - 4/16" (7.95 - 6.3 mm )  
 4" (101.6 mm) " " " 3 " 3/16" - 2/16" (4.7-3.1 mm )  
 6" (152.4 mm) " " " 2 " 2/16" - 3/32" (3.1-2.4 mm )  
 24" (609.6 mm)" " " 1 " 0.5 a 0.65 mm

En los filtros de presión, la presión de trabajo es de 30 a 60 lb/pg<sup>2</sup> (2.12 - 4.24 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que en los filtros de gravedad, es la atmosférica sobre el tirante de agua del filtro, normalmente es de 5 a 6 lb/pg<sup>2</sup> ( 0.35 - 0.42 kg/cm<sup>2</sup> ).

#### DRENES

Las capas de arena y grava o de antrafilt, están colocadas sobre un sistema colector-distribuidor que sirve de doble propósito: para recoger el agua filtrada durante esta operación y distribuirla en el retrolavado.

El diseño de estos sistemas de drenado pueden variar usándose por lo general dos tipos, uno de ellos en los filtros de pre-

sión de tipo vertical consistente en una placa deflectora cuya arista inferior se coloca a fracciones de pulgada de la superficie abombada del fondo del filtro y tiene la ventaja de eliminar los rellenos de los fondos, para evitar que salga el material filtrante. El otro sistema recolector es con cabezal usando boquillas o "pichanchas" para recolección y distribución del agua, las boquillas pueden ser de bronce, latón, porcelana y plástico, ésta última es muy usada en los filtros de gravedad.

Los filtros de gravedad, generalmente se montan sobre una cisterna, la cual se utiliza para el servicio general, las canaletas del lavado tienen un doble propósito, distribuirla en el retrolavado y colectarla para este fin, pudiendo ser ésta de concreto o madera, estando situada en la parte superior del filtro.

FILTROS AUTOMATICOS SIN VALVULAS

Los más modernos filtros de gravedad, es el tipo automático sin válvulas, introducido recientemente en la industria.

Este tipo de filtros efectúa automáticamente todas las operaciones del ciclo, sin usar válvulas, manómetros, indicadores y demás accesorios.

DEAEREACION

La deaereación se hace por medio de una torre empacada, pu--

diendo ser el empaque, anillos rashing, por lo regular de 1 x 1" con un depósito en la parte inferior conectada a la salida del agua desaereada.

El agua entra por la parte superior con aspersion hacia arriba y escurre por gravedad entre el empaque completando la operación por medio de una bomba de vacío, además, de válvulas de control, interruptor y alarma para prevenir inundaciones del tanque.

La dereación o remoción de gases incondensables del agua se lleva a cabo, manteniendo las condiciones de operación que favorezcan la insolubilidad de éstos, facilitando su extracción.

Reduciendo la presión dentro del generador se aumenta la presión de vapor de los gases disueltos en agua y de acuerdo a la ley de Henry se debe establecer un equilibrio entre los gases disueltos en el líquido y la fase gaseosa no condensables y éstos a su vez son eliminados por medio de la bomba de vacío.

Al disminuir la presión atmosférica, se aumenta el vacío y se llega a un punto de presión y temperatura en el que el agua alcanza su punto de ebullición, facilitando enormemente la remoción de los gases.

La capacidad de deaereación de gases en el agua, depende de las siguientes variables: temperatura, condiciones reales de

presión y vacío.

De acuerdo a las pruebas desarrolladas en el área de Villahermosa. han permitido aplicar los siguientes tratamientos para el agua de inyección y requieren de tres pasos fundamentales:

- a) Desestabilización de los coloides
- b) Remoción del color
- c) Coagulación y floculación

La clarificación de las aguas residuales es un proceso de separación sólido/líquido a fin de permitir que los sólidos suspendidos sean segregados y separados por la acción de la gravedad.

Como se señaló al principio, los sólidos contenidos en las aguas residuales son muy diversos y de acuerdo a su tamaño de partículas se puede establecer el tiempo teórico para su separación por sedimentación natural:

<u>diámetro</u> en m/m	<u>ejemplo</u> tipo de sólido	<u>tiempo de</u> sedimentación
10 o mayor	grava	0.3 seg.
1 - 5	arena gruesa	3 seg.
0.1 - 1	arena fina	30-50 seg.
0.001 - 0.05	lodo, arcillas	30-1000 seg.
0.00001	materia coloidal	200-300 días.
$1 \times 10^6$	color	60 - 100 años.

En base a lo anterior el primer objetivo del tratamiento propuesto será precisamente la desestabilización de los coloides

# PETROLEOS MEXICANOS

ZONA SURESTE

DEPARTAMENTO INGENIERIA SISTEMAS DE PRODUCCION  
SECCION CONTROL DE CALIDAD DE HIDROCARBUROS

## ANALISIS DE AGUA

CAMPO. 1ri de DISTRITO Villahermosa ESTADO Tabasco  
 POZO No. 131 LOCALIZACION: X = \_\_\_\_\_ Y = \_\_\_\_\_ MUESTRA No. 2  
 FORMACION. \_\_\_\_\_ INTERVALO 3450 mts Equipo 4007  
 FECHA DE MUESTREO 20/II/89 FECHA DE ANALISIS 20/II/89

**PROPIEDADES FISICAS**  
 DENSIDAD. 1.058 g/cm<sup>3</sup> a 30 °C  
 PH 6.5 a 30 °C  
 RESISTIVIDAD \_\_\_\_\_ ohm/m a \_\_\_\_\_ °C  
 TURBIDEZ 80 FTU mg/l. de SiO<sub>2</sub> \_\_\_\_\_  
 COLOR turbia  
 OLORES hidrocarburos

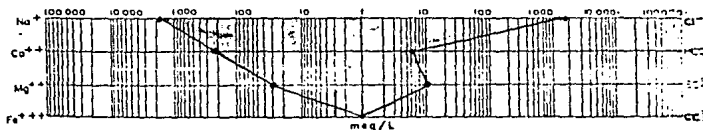
**SOLIDOS EN SUSPENSION Y SOLUCION, mg/l**  
 SOLIDOS TOTALES 119530.68  
 SOLIDOS DISUELTOS 119,681.18  
 SOLIDOS EN SUSPENSION \_\_\_\_\_  
 SILICE SOLUBLE (SiO<sub>2</sub>) 150.5  
 OXIDO FERRICO (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 1.687  
 ACIDEZ (CaCO<sub>3</sub>) \_\_\_\_\_  
 DUREZA TOTAL (CaCO<sub>3</sub>) 12,000  
 ALCALINIDAD A LA "F" (CaCO<sub>3</sub>) 0  
 ALCALINIDAD A LA "M" (CaCO<sub>3</sub>) 320  
 SALINIDAD (NaCl) 114,000  
 INDICE DE ESTABILIDAD condensancia herviente

**GASES EN SOLUCION mg/l**  
 ACIDO SULFHDRIDICO (H<sub>2</sub>S) \_\_\_\_\_  
 BIOXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) \_\_\_\_\_  
 OXIGENO DISUELTO (O<sub>2</sub>) \_\_\_\_\_

### IONES DISUELTOS

CATIONES	mg/L	FACTOR	meq/L	ANIONES	mg/L	FACTOR	meq/L
SODIO	44,832	0.0435	1950.192	CLORUROS	69,198	0.0282	1951.383
CALCIO	4200	0.0499	209.60	BICARBONATO	390.4	0.0164	6.102
MAGNESIO	369.5	0.0822	29.961	SULFATOS	574.6	0.0208	11.951
FIERRO	1.18	0.0358	0.0422	CARBONATOS	0	0.0333	0

### DIAGRAMA DEL ANALISIS



y la remoción del color.

#### DESESTABILIZACION DE LOS COLOIDES

La teoría señala que la estabilidad de la materia coloidal es un fenómeno de superficie originado por grupos químicos ionizables con cargas asociadas que originan la repulsión de las partículas evitando la sedimentación.

Estos grupos ionizables contienen radicales carboxílicos ( -COOH ) como la lignina y los taninos, los cuales en pH de 6 a 10 forman cadenas poliméricas con una fuente de carga negativa que le imparte una alta estabilidad y solubilidad.

Si el pH se abate en el rango de 4 a 5, la ionización se reduce y la solubilidad disminuye rápidamente hasta el punto en que se logra su precipitación.

Esto también ocurre con las partículas de color por lo que esta fase del tratamiento requiere la reducción del pH la cual se puede lograr con la adición de sulfato de aluminio o de una fuente de aluminio en dosis muy variables y de acuerdo a la naturaleza del agua de deshecho.

Una vez desestabilizada la materia coloidal, las partículas son todavía muy pequeñas para precipitar únicamente por efecto de la gravedad por lo que se requiere aglomerarlas y formar agregados más grandes.

Esta fase del tratamiento se denomina coagulación.

## COAGULACION Y SEDIMENTACION

La magnitud de la carga repulsiva negativa será neutralizada con la adición del coagulante fuertemente catónico a fin de transformar la materia coloidal en aglomerados más grandes y sedimentables.

Sin embargo encontramos que aunque la materia coagulada ya no posee carga superficial es necesario una aglomeración todavía mayor para una sedimentación rápida. Estos aglomerados más grandes se llaman " flocs " y el proceso de su formación se denomina floculación.

La floculación o parte final del proceso se esliga con la adicción del floculante aniónico, logrando en esta fase dos objetivos.

- a) Formación de floculos que englobaran las partículas finamente coaguladas atrapando a las sustancias que imparten color.
- b) Sedimentación de los floculos por gravedad, logrando una clarificación del agua la cual queda lista para su eliminación final.

## CAPITULO IV

### CALIDAD DEL AGUA DE INYECCION



La principal consideración relacionada con la calidad del agua de inyección, está en que debe ser lo suficientemente buena para permitir que el programa de inyección se lleve a cabo al costo mínimo sin exceder los límites establecidos por un programa dado.

El programa, debe establecer un ritmo de inyección a una presión constante en forma programada para cumplir con la inyección, sin embargo, al hinchamiento de las arcillas o por la depositación de compuestos insolubles. En cuanto a los niveles de corrosión éstos no deben ser demasiado altos para que no se afecte el proyecto en el aspecto operativo y económico.

Se ha tratado de establecer normas cuantitativas para definir la calidad del agua, lo que a la fecha no se ha podido establecer, debido a que se involucran factores diferentes para cada caso.

Sin embargo, se pueden establecer algunas pautas normativas que puedan ayudar a elaborar un programa de control de calidad para el tratamiento del agua y mantener así una calidad de la misma en forma aceptable hasta el momento de la inyección.

#### PAUTAS NORMATIVAS

Los valores que se dan a continuación están dados como un patrón sin ser de ninguna manera valores que deban ser fijos

A.- TEMPERATURA

PH

TURBIEDAD

DEMANDA DE CLORO

CLORO RESIDUAL

SOLIDOS SUSPENDIDOS

CUENTA TOTAL DE BACTERIAS

BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS

CONTEO DE PARTICULAS

VELOCIDAD DE FILTRACION

VELOCIDAD DE CORROSION

- CATODICA

- ANODICA

DUREZA DE CALCIO

DUREZA DE MAGNESIO

OXIGENO DISUELTO

Fe - SOLUBLE

B.- TURBIEDAD

CLORO RESIDUAL

SOLIDOS SUSPENDIDOS

VELOCIDAD DE FILTRACION

CUENTA TOTAL DE BACTERIAS

BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS

INDICE DE TAPONAMIENTO

**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

PROGRAMA DE CONTROL DE  
CALIDAD DEL AGUA DE INV.

13

C.- PH

TURBIEDAD

OXIGENO DISUELTO

CUENTA TOTAL DE BACTERIAS

BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS

SOLIDOS SUSPENDIDOS

VELOCIDAD DE FILTRACION

VELOCIDAD DE CORROSION

- PROBETAS DE RESISTENCIA

- POLARIZACION LINEAL

- FIERRO SOLUBLE

DE-POSICION DE ESCAMAS

- INSPECCION VISUAL

D.- VELOCIDAD DE CORROSION

- PROBETAS DE RESISTENCIA

- ATRAVES DE PROBETAS  
CORROSIMETRICAS

UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

PROGRAMA DE CONTROL DE  
CALIDAD DEL AGUA DE INV.

13

dado que estos dependerán de las características del agua que se vaya a tratar.

PH 5.5 a 7 ( permisible )

Un pH arriba de 7 indica un medio alcalino y abajo de 7 será un medio ácido, deben de determinarse en todas las fases del tratamiento, la coagulación óptima del agua con sulfato de aluminio da lugar a un pH alto y puede corregirse disminuyendo la misma.

#### TEMPERATURA

Una temperatura cercana al punto de ebullición favorece el depósito de materia que causa incrustaciones, algunos análisis sustanciales están en función de la temperatura, además, esta influye en la determinación de los índices de saturación tanto de LANGELETT para agua dulce como de STIFF-DAVIS para agua salada.

TURBIDEZ Debe tener la mínima posible

Debe determinarse en todas las fases del tratamiento, el agua filtrada indica un tratamiento defectuoso originado por el hidróxido de aluminio o el aluminato de sodio, en el agua cruda influye sobre la cantidad de coagulante que se requiere para el tratamiento.

OXIGENO 1.0 ( máximo permisible )

Es importante su control debido a que favorece la corrosión por lo que debe eliminarse. Su determinación se efectúa en agua que ha sido tratada, esto para verificar la eficiencia del desaereador que debe mantener una concentración de 0.5 ppm de oxígeno disuelto.

BIOXIDO DE CARBONO 5 a 10 ppm ( máximo permisible )

Tiene las mismas características del oxígeno, el análisis debe efectuarse en muestras recién obtenidas de agua libre de oxígeno, debido a su poder corrosivo pues al mezclarse con el agua, forma un ácido débil llamado ácido carbónico, que proporciona iones hidrogeno suficiente para el ciclo corrosivo.

ALCALINIDAD debe mantenerse un ph neutro

Es importante por su relación con el proceso de coagulación y es correlativo del poder corrosivo del agua. El sulfato de aluminio es una sal ácida que al agregarse en pequeñas cantidades al agua natural, reacciona con su alcalinidad formando floculos y si ésta es insuficiente para reaccionar con todo el sulfato, la coagulación será incompleta y quedará sulfato disuelto en el agua, si la coagulación es igual o mayor que la dosis de sulfato no se aumenta el poder corrosivo del agua al añadir el coagulante.

DUREZA TOTAL 12.000 ppm como  $\text{CaCO}_2$

Debe mantenerse igual o menor que la del "agua cruda" e indica si el agua filtrada es incrustante. Si la dureza del agua tratada es mayor que la del agua cruda indica exceso en la dosis de sulfato de aluminio por disolución del sulfato de calcio formado.

DUREZA AL CALCIO (Dependerá del calcio disuelto )

Debe permanecer igual o menor que la del agua cruda y se determina por iones de calcio disueltos (  $\text{Ca}^{++}$  ).

CLORUROS 69.168 ppm ( máxi,o permisible )

Son componentes habituales de las aguas naturales que provienen de depósitos salinos por los que ha pasado el agua.

SULFATOS ( Dependerá del agua )

La determinación se efectua en agua cruda y filtrada, lo que da idea del alumbre añadido y el cual no debe ser mayor de 2 ciclos de concentración respecto al contenido de sulfatos en agua cruda.

FIERRO

El fierro se encuentra como ion férrico (  $\text{Fe}^{+++}$  ), en las aguas superficiales, es importante como ion incrustante además de ser un indicador de corrosión en las líneas, aparece en pequeñas cantidades en las aguas naturales.

#### SILICATOS ( Lo mínimo posible )

Compuestos incrustantes que pueden dañar a la formación, por lo que deben mantenerse en concentraciones bajas.

#### SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

Es considerado como la suma de los sólidos disueltos expresados como ppm de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

#### CLORO RESIDUAL

Rara vez se encuentra en aguas naturales y se utiliza en tratamientos como un eficaz bactericida, se efectúa el análisis en aguas que han sido tratadas con cloro, tratando de mantener 1.0 ppm. El añadirlo como bactericida impide el desarrollo de bacterias.

#### INHIBIDOR DE CORROSION

Los rangos de concentración considerados para la inyección de este agente son:

1.0 ppm mínimo

3.0 ppm normal

10.0 ppm máximo

En el caso de que se detecte corrosión en el sistema se verificará lo siguiente:

- a) La tendencia corrosiva del agua
- b) El ajuste en la dosificación del químico
- c) El oxígeno disuelto en el agua.



## CAPITULO V

### APLICACION DE LOS METODOS DE OPERACION

Para tener un mejor control de las operaciones de inyección, es necesario analizar previamente y en forma global las secciones que conforman el sistema de inyección y los métodos de operación para el manejo del equipo.

- Sección de captación de agua
- Sección de filtros
- Sección de tratamiento químico
- Deaeradores
- Sección de bombeo

#### SECCION DE CAPTACION DE AGUA

En esta sección se encuentran las bombas que alimentan a la planta de agua de alguna fuente cercana. Para cumplir con los requerimientos de presión, las bombas deben proporcionar una presión de descarga en forma constante hacia los filtros, esto es posible si se controlan con manómetros instalados en las líneas de descarga hacia los filtros.

En el caso de que la presión o flujo de agua aumente en el cabezal de alimentación a filtros, se usa una línea que a modo de control de presión, descarga el agua hasta que se restablezcan las condiciones operativas en dicho cabezal.

#### SECCION DE FILTROS

De acuerdo a la capacidad de tratamiento de agua, se colocan

uno o más filtros formando bacterias para que estas operen en un rango adecuado de presión, se cuenta con manómetros en la entrada y la salida de los filtros, esto con fin de que al detectarse una caída de presión en algún filtro se inicie la operación de retrolavado en donde se localizó la caída de presión, quedando los filtros restantes para continuar con la operación normal y proporcionar al mismo tiempo el agua de retrolavado.

#### SECCION DE TRATAMIENTO QUIMICO

La planta de tratamiento está constituida por una serie de bombas dosificadoras y tanques de almacenamiento de reactivos en esta sección se inyectan los inhibidores de corrosión y agentes secuestrantes. La inyección de estos reactivos se hará por bombas dosificadoras controladas automáticamente por un registrador de flujo, de tal forma que pueda aumentar o disminuir la dosificación de estos productos de acuerdo con el flujo de agua a través de la línea; aquí mismo se añaden los coagulantes y los inhibidores de bacterias, estos últimos pueden ser el hipoclorito de sodio u otro bactericida.

En caso de que las bacterias persistan en el sistema se tendrá que investigar lo siguiente:

- a) Si la demanda del cloro del agua es mayor de 1.4.

- b) Si el intervalo de tiempo en que se efectúa la operación de choque es muy grande.
- c) Si es necesario cambiar a otro bactericida debido a que las bacterias toleran el empleo del mismo, se recomienda efectuar un análisis del agua para determinar el origen del problema.

#### SECCION DE DEAERACION

En esta sección se elimina el oxígeno y el bióxido de carbono disueltos en el agua, esto se hace debido a que ambos gases son los principales agentes corrosivos. Por ser esta una operación de gran importancia, es necesario que la instalación del deaerador cumpla con los siguientes requisitos:

- a) Que el deaerador esté fijo sobre cimientos adecuados a su peso, debiendo quedar este en perfecta posición vertical, para que se puedan colocar los accesorios como son: líneas, válvulas de control, flotador de nivel, interruptores y alarmas.
- b) Cumplido el requisito (a), se llena el deaerador completamente de agua, cerrándose las salidas hasta más o menos 60 cm ( 2 pies ) abajo del registro de hombres, se vierten los anillos rashing dentro del deaerador por el registro.
- c) Se ajusta el nivel de agua utilizando los anillos dejando el nivel hasta la altura deseada y eliminando material indeseable.

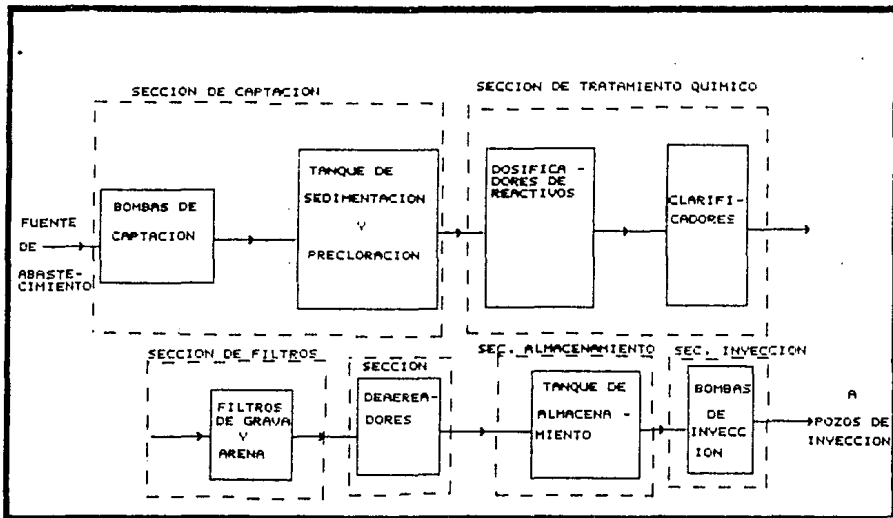
- d) Se conectan las líneas de descarga y de succión, teniendo cuidado al conectar las bombas de vacío, estas deben estar libres de rebabas de soldadura, limaduras y basura que puedan deteriorar el interior de la bomba ajustada a milésimas de pulgada, para lo cual se recomienda un resqueto y cepilla interior colocándose después una fina malla en el flange de succión.

#### ARRANQUE DE PRUEBA DEL DEAERADOR

En este tanque se comprueba, que las líneas de aire del control automático estén limpias y con una presión de  $1.36 \text{ dg/cm}^2$  (  $20 \text{ lb/pg}^2$  ), a continuación, se pone en operación la bomba de vacío y se comprueban sus características, después de esto cuando la bomba tenga 70 cm de vacío (  $27.6 \text{ pg}$  ) se abre la válvula de salida, poniéndose en operación el deaerador ya sea por gravedad con la elevación necesaria o por medios mecánicos.

#### SISTEMA DE BOMBEO AL YACIMIENTO

En esta sección se localiza el equipo de bombeo de alta presión cuyo flujo va directamente a un cabezal de distri



**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO

14

**CAPITULO VI**  
**ANALISIS DE LA APLICACION**

Para asegurar la eficiencia del proyecto de inyección es necesario analizar en forma continua los parámetros que intervienen en el mismo, para ello se requiere seguir un programa operativo bien definido para el control de calidad del agua y de la corrosión.

#### CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN

Este control se realiza mediante la aplicación de pruebas analíticas que definen la calidad del agua de inyección, así como el tratamiento que requiere para que ésta cumpla con las especificaciones establecidas, las cuales dependerán de las condiciones de la formación que va a ser intervenida.

De acuerdo a los resultados de las pruebas analíticas se obtendrá la información que define el tratamiento químico con el cual se evitarán la corrosión, incrustaciones y la formación de obstrucciones que no solo dañan al equipo, sino que además afectan la eficiencia de la recuperación del aceite.

Dependiendo de la calidad de los análisis y del muestreo se evitarán pérdidas de tiempo y se abatirán costos de operación.

Requisitos que definen la confiabilidad de los análisis.

- 1.- Muestreo representativo
- 2.- Precisión y reproducibilidad de los resultados
- 3.- Interpretación



## MUESTREO REPRESENTATIVO

La confiabilidad de los análisis, dependerá también de un buen muestreo, para lo cual se emplearán, equipos de muestreo específicos los cuales seguirán las siguientes recomendaciones.

- 1.- Es necesario se purgue de 2 a 3 veces el contenido del tubo muestreador, antes de tomar la muestra.
- 2.- El recipiente deberá enjuagarse de 3 a 4 veces con el agua a muestrear, antes de tomar la muestra.

## PRESICION DE LOS ANALISIS

La precisión de los análisis dependerá de la selección del método analítico empleado y del grado de exactitud con que se efectuó, así como de la reproducibilidad de los resultados.

## INTERPRETACION DE LOS ANALISIS

La interpretación de los análisis, es de suma importancia, ya que de ésta dependerá la selección del tratamiento más adecuado, lo que se reflejará en el incremento de la producción en la formación intervenida.

Análisis químicos básicos que definen el tratamiento del agua de -

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

inyección.

59

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE AGUA

SIMBOLO	SIGNIFICA	REPRESENTA
DT	Dureza total	Contenido de calcio y magnesio
DCa	Dureza al calcio	Dureza total de calcio
F	Alcalinidad a la fenoftaleina	La 1/2 de los carbonatos y todos los hidroxidos
M	Alcalinidad al anaranjado de metilo	Alcalinidad total de bicarbonatos y carbonatos
CO <sub>2</sub>	Bioxido de carbono	Bioxido de carbono disuelto
O <sub>2</sub>	Oxigeno	Oxigeno disuelto
ST	Solidos totales	Todos los materiales excepto el CO <sub>2</sub> y otros gases
STD	Solidos totales disueltos	Todos los materiales solubles excepto los gases
SS	Solidos suspendidos	Lodos o materiales que pueden ser eliminados por filtración
PH	Concentración del ion hidrogeno	Arriba de 7 alcalino abajo de 7 ácido

## CONTROL DE LA CORROSION

Para su control es necesario considerar los siguientes factores.

- 1.- Evitar las incrustaciones cristalinas debidas a la presencia de calcio, magnesio, oxigeno,  $CO_2$  y ácido sulfhidrídrico.

Para lo cual se emplearán.

- a).- Inhibidores de corrosión.
- b).- Medios alcalinos que anulen la corrosividad de las sales.
- c).- Formación de películas protectoras sobre las superficies metálicas.

INHIBIDORES	CONCENTRACION (%)	MEDIO CORROSIVO	SIST. METALICO
INORGANICOS			
POSFATO MONO-PLASTICO + NITRATO DE SODIO	CANTIDAD PEQUEÑA	AGUA DE MAR	ACERO
BENSODATO DE SODIO	0.5	SOLUCION DE 2.0% NaCl	ACERO DULCE
NITRITO DE SODIO	0.005	AGUA	ACERO DULCE
ORTOFOSFATO DE SODIO		AGUA pH= 7.5	FIERRO
SILICATO DE SODIO	0.01	AGUA PRODUCIDA	TUBERIA DE ACERO
ORGANICOS			
MERCAPTOBENZOTIAZOL		SOLUCION DE HCL	FIERRO - ACERO
FENIL-ACRIDINA	0.5	SOLUCION DE H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	FIERRO
OXIDO DE ETILENO-POSIN ANINA	2.2	SOLUCION DE HCL	ACERO DULCE
TIOURA		ACIDOS	FIERRO Y ACERO

## CONCLUSIONES

- 1 .- El tratamiento del agua de inyección en la recuperación secundaria es de suma importancia, ya que al tratar el agua antes de inyectarla al yacimiento, nos evita problemas de corrosión en las líneas y equipo superficial, así como también la deposición de material indeseable que ocasionaría un taponamiento de los poros del yacimiento, ocasionando baja recuperación de aceite.
- 2 .- Cada caso de inyección de agua deberá tratarse en forma individual, pues no existen reglas generales o patrones fijos, por lo que se debe tener presente que la inyección de agua se debe realizar con la mayor eficiencia posible y al menor costo.
- 3 .- La planta de tratamiento de agua se debe diseñar para el tipo de problemas que presente la operación, tomando en cuenta los factores; calidad del agua y capacidad de tratamiento, pero deben ser en su funcionamiento lo suficientemente adaptables para aceptar variaciones al separar sólidos en suspensión y en el manejo de las soluciones, así como los ritmos de inyección y la posibilidad de ampliar las instalaciones.
- 4 .- En un proyecto de inyección de agua hay que prever razonablemente los resultados del tratamiento del agua y ejercer los ajustes necesarios según las necesidades que se presenten.
- 5 .- Se deben de hacer una serie de análisis previos tanto del agua de inyección como la formación, para ver el grado de compatibilidad de las mismas.
- 6 .- Los productos químicos que se agregón, deben ser compatibles entre ellos y con el medio de inyección, así como también con-

los fluidos del yacimiento a las condiciones de éste, para evitar la aparición de fenómenos que por la gran frecuencia con que se presentan, pudiendo resultar molestos o perjudiciales como son, formación de espumas, floculaciones y precipitaciones.

- 7 .- La supervisión del buen funcionamiento en el sistema debe ser periódico y adecuado para evitar problemas que conduzcan al fracaso del proyecto.
- 8 .- Deben hacerse análisis químicos y bacteriológicos del agua - muestreada, en puntos estratégicos del sistema, para determinar si la calidad requerida ha variado y poder modificar en caso necesario el tratamiento.
- 9 .- Es preferible usar siempre el sistema cerrado que el abierto - siempre que sea económicamente recomendable.
- 10.- Hasta donde sea posible se debe evitar la aereación, tomando en cuenta, que es muy inconveniente por los problemas que esto ocasiona. La eliminación del oxígeno del agua de inyección -- es necesaria para obtener buenos resultados, debido a que éste es el principal agente corrosivo. la cantidad de oxígeno residual permisible depende del daño que origine y del aspecto económico que en cada caso se presente.
- 11.- En un sistema cerrado el uso de un tanque de balance deberá - ser el adecuado. de lo contrario es mejor no incluirlo. debido a que puede ser una fuente de cultivo de bacterias.

**APENDICE A**



### DEDUCCION DE LA ECUACION GENERAL DE FLUJO FRACCIONAL

La ecuación de darcy considerando la aceleración de la gravedad es:

$$v = - \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial s} - \rho \sin \alpha \right) \text{ ----- (1)}$$

donde

$$v = q/A$$

K = Permeabilidad

$\mu$  = Viscosidad

$\frac{\partial p}{\partial s}$  = Gradiente de presión

g = Gravedad

$\rho$  = densidad

$\alpha$  = ángulo de echado

Substituyendo  $v = q/A$  y  $\rho g = w$  (peso específico en la ecuación

(1) se tiene:

$$q = - \frac{KA}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial s} - w \sin \alpha \right) \text{ ----- (2)}$$

Considerando aceite, gas y agua

$$q_o = - \frac{K_o A}{\mu_o} \left( \frac{\partial p_o}{\partial s} - w_o \sin \alpha \right)$$

$$q_g = - \frac{K_g A}{\mu_g} \left( \frac{\partial p_g}{\partial s} - w_g \sin \alpha \right) \text{ (2')}$$

$$q_w = - \frac{K_w A}{\mu_w} \left( \frac{\partial p_w}{\partial s} - w_w \sin \alpha \right)$$

en general para un fluido que desplace (d) a otro

$$q_d = - \frac{K_d A}{\mu_d} \left( \frac{\partial p_d}{\partial s} - w_d \sin \alpha \right) \text{ ---- (3)}$$

Por otro lado, la presión capilar, por definición, es la diferencia de presiones entre uno y otro lado de una interfase:

$$P_c = P_o - P_d \quad \text{--- (4)}$$

de donde

$$\frac{\partial P_c}{\partial s} = - \frac{\partial P_d}{\partial s} + \frac{\partial P_o}{\partial s} \quad \text{--- (4')}$$

Despejando de las ecuaciones 2' y 3 a  $\frac{\partial P_o}{\partial s}$  y  $\frac{\partial P_d}{\partial s}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_o}{\partial s} &= w_o \text{ sen } \alpha - \frac{q_o \mu_o}{K_o A} \\ \frac{\partial P_d}{\partial s} &= w_d \text{ sen } \alpha - \frac{q_d \mu_d}{K_d A} \end{aligned} \quad \text{(5)}$$

Sustituyendo (5) en (4'):

$$\frac{\partial P_c}{\partial s} = \left[ - w_d \text{ sen } \alpha + \frac{q_d \mu_d}{K_d A} \right] + \left[ w_o \text{ sen } \alpha - \frac{q_o \mu_o}{K_o A} \right]$$

Simplificando

$$\frac{\partial P_c}{\partial s} = - (w_o - w_d) \text{ sen } \alpha - \frac{q_o \mu_o}{K_o A} + \frac{q_d \mu_d}{K_d A} \quad \text{--- (6)}$$

Se desea obtener la fracción del fluido desplazante (fd)

∴ se despeja a  $q_d$

$$\frac{q_d \mu_d}{K_d A} = \frac{\partial P_c}{\partial s} - (-w_d - w_o) \text{ sen } \alpha + \frac{q_o \mu_o}{K_o A}$$

$$q_d = \frac{\partial P_c}{\partial s} \frac{K_d A}{\mu_d} - \frac{K_d A}{\mu_d} (w_o - w_d) \text{ sen } \alpha + \frac{q_o \mu_o}{K_o A} \frac{K_d A}{\mu_d}$$

$$q_d = \frac{K_d A}{\mu_d} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial s} - (w_o - w_d) \text{ sen } \alpha \right] + \frac{q_o \mu_o K_d}{K_o \mu_d} \quad \text{--- (7)}$$

Por definición

$$f_{ol} = \frac{q_d}{q_{total}} = \frac{q_d}{q_d + q_o} \quad q_d = f_d q_t$$

Además

$$q_o = q_t - q_d ; q_o = q_t - f_d q_t \quad \therefore q_o = (1 - f_d) q_t$$

Sustituyendo las expresiones (8) en (7) para dejar a éste en función de  $f_d$  y  $q_t$ :

$$f_d q_t = \frac{(1 - f_d) q_t \mu_o k_d}{k_o \mu_d} + \frac{k_d A}{\mu_d} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (w_o - w_d) \text{sen } \alpha \right]$$

$$f_d q_t = \frac{q_t \mu_o k_d}{k_o \mu_d} - \frac{f_d q_t \mu_o k_d}{k_o \mu_d} + \frac{k_d A}{\mu_d} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (w_o - w_d) \text{sen } \alpha \right]$$

$$f_d q_t + \frac{f_d q_t \mu_o k_d}{k_o \mu_d} = \frac{q_t \mu_o k_d}{k_o \mu_d} + \frac{k_d A}{\mu_d} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (w_o - w_d) \text{sen } \alpha \right]$$

$$f_d = \frac{\frac{\mu_o k_d}{k_o \mu_d} + \frac{k_d A}{\mu_d q_t} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (w_o - w_d) \text{sen } \alpha \right]}{1 + \frac{\mu_o}{k_o} \frac{k_d}{\mu_d}}$$

Multiplicando y dividiendo el segundo término de (9)

Por  $\frac{k_o}{\mu_o}$ ,  $\frac{\mu_d}{k_d}$  se tiene

$$f_d = \frac{1 + \frac{k_d A}{\mu_o q_t} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - (w_o - w_d) \text{sen } \alpha \right]}{1 + \frac{k_o}{\mu_o} \frac{\mu_d}{k_d}} \quad \text{--- (10)}$$

ECUACION GENERAL DE FLUJO FRACCIONAL.

La ecuación general de flujo fraccional puede adoptar las siguientes formas:

Agua desplazando aceite:

$$f_w = \frac{1 + \frac{k_o A}{\mu_o q_t} \left[ \frac{\partial P_c}{\partial S} - g (P_u - P_o) \text{sen } \alpha \right]}{1 + \frac{k_o}{\mu_o} \frac{\mu_w}{k_w}}$$

Agua desplazando gas:

$$f_w = \frac{1 + \frac{k_0 A}{\mu_0 q_t} \left[ \frac{\partial p_c}{\partial s} - g (\rho_w - \rho_g) \sin \alpha \right]}{1 + \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\mu_w}{k_w}}$$

Gas desplazando aceite:

$$f_g = \frac{1 + \frac{k_0 A}{\mu_0 q_t} \left[ \frac{\partial p_c}{\partial s} - g (\rho_g - \rho_o) \sin \alpha \right]}{1 + \frac{k_o}{\mu_o} \frac{\mu_g}{k_g}}$$

Considerando las siguientes unidades:

$k_o$  y  $k_d$  = Permeabilidad efectiva (aceite y desplazante respectivamente) en darcies (D)

$$k_o = k_0 k_{r_o} \quad ; \quad k_d = k_0 k_{r_d}$$

$\mu_o$  y  $\mu_d$  = Viscosidad (aceite y desplazante respectivamente) en centipoises (cp)

$p_c$  = Presión capilar en  $\text{Lb/pg}^2$  (psi)

$s$  = Trayectoria de flujo en pies

$\frac{\partial p_c}{\partial s}$  = Gradiente de presión de la interfase respecto a la dirección del flujo (psi/pie)

$Q_t$  = Gasto total de fluido a condiciones de yacimiento (bl/día)

$A$  = Área de la roca porosa y permeable  $p_g^2$  a través de la cual escurre el flujo (no es área de poros)

$\alpha$  = Angulo del echado de la formación medido a partir de la horizontal: el signo es positivo cuando el flujo es hacia abajo la Ec. 10 se transforma.

$$f_d = \frac{1 - 1.127 \frac{k_0 A}{\mu_0 q_d} \left[ -\frac{\partial p_c}{\partial s} + 0.433 (p_d - p_0) g \sin \alpha \right]}{1 + \frac{k_0}{\mu_0} \frac{\mu_d}{k_d}} \quad \text{--- (11)}$$

Si se consideran despreciables las fuerzas capilares y las gravitacionales:

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{k_0}{\mu_0} \frac{\mu_d}{k_d}} \quad \text{--- (12)}$$

En el denominador de las ecuaciones 11 y 12 pueden tomarse permeabilidades relativas, ya que  $k_0/k_d = k_{ro}/k_{rd}$ , puesto que  $k_{ro} = k_0/k$  y  $k_{rd} = k_d/k$ .

**APENDICE 3**

## DETERMINACION DEL INDICE DE LANGELIER

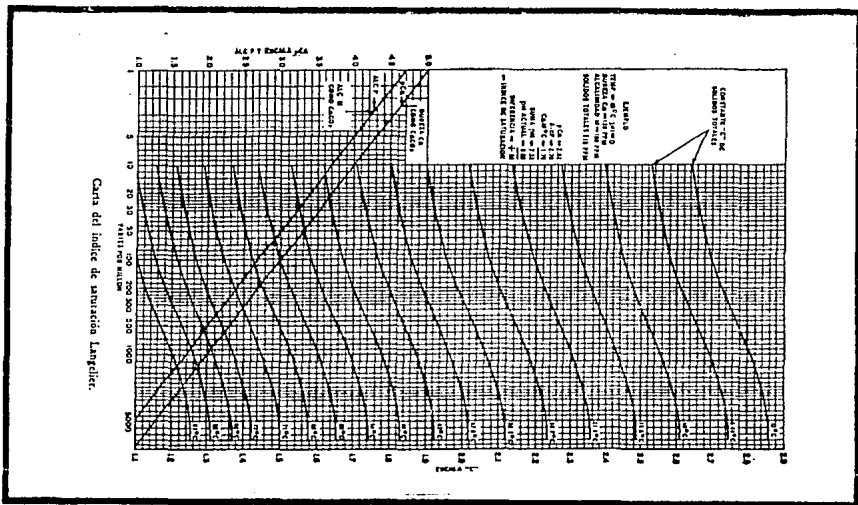
El índice de saturación o índice de langelier se calcula a partir de los siguientes valores: dureza del calcio, alcalinidad y los sólidos totales, siguiendo la secuencia que se describe.

- 1 .- Primero localícese la dureza de calci en la escala de partes por millón de la fig. 16 léase verticalmente hacia arriba, hasta la línea diagonal para dureza al Ca, lleve ese punto horizontalmente a la izquierda hasta la escala de alcalinidad pALK y pCa y localice el valor para pCa.
- 2 .- En forma similar. localice la alcalinidad para M sobre la escala de partes por millón, léase verticalmente hasta arriba a la línea diagonal para la alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  y entonces horizontalmente a la izquierda hacia la escala de alcalinidad p y pCa y se localiza el valor de pALK.
- 3 . Para encontrar C localíze los sólidos totales en la -- escala de partes por millón. y léase verticalmente hasta la línea de temperatura de éste punto léase horizontalmente a la derecha sobre la escala de C y así obtener el valor de C.

$$\text{pH}_s = \text{pCa} + \text{pALK} + C$$

en donde:  $\text{pH}_s$  es el pH de saturación.

pCa. es un factor logaritmico de la dureza del calcio,--



Carta del índice de saturación Langlier.



expresado en ppm de  $\text{CaCO}_3$ , equivalente.

$\text{pALK}$ , es el factor logaritmico de la alcalinidad  $M$ , expresado en ppm de  $\text{CaCO}_3$  equivalente.

$C$  es el factor logaritmico de los sólidos totales en partes por millón a la temperatura del agua.

El indice de saturación es la diferencia algebraica, entre el  $\text{pH}$  actual y el  $\text{pH}$  calculado de saturación, es decir ;

$$I_s = \text{pH}(\text{actual}) - \text{pH}_s(\text{calculado}).$$

Cuando  $I_s$  es cero, es decir cuando el  $\text{pH}$  es igual a  $\text{pH}_s$ , existe un equilibrio de saturación y no hay formación de incrustaciones y el ataque corrosivo se disminuye al mínimo.

Cuando  $I_s$  es positivo, es decir cuando  $\text{pH}$  es mayor que  $\text{pH}_s$ , existe una condición de sobresaturación de carbonato de calcio con respecto a la alcalinidad y a los sólidos totales, a las condiciones existentes de temperatura, habiendo tendencia a la depositación de incrustaciones, sobre la superficie de transmisión de calor.

Cuando  $I_s$  es negativo, es decir, cuando  $\text{pH}$  es menor que  $\text{pH}_s$ , el equilibrio está desbalanceado en dirección opuesta y ocurrirá corrosión del metal descubierto y se disolverá cualquier incrustación.

## INDICE DE ESTABILIDAD DE STIFF- DAVIS

Este índice, es el que se utilizó para determinar si el agua de mar, utilizada como agua de inyección, tiene tendencia incrustante o corrosiva. Para su determinación, se utiliza la fórmula:

$$I_s = \text{pH} - (K + \text{pCa} + \text{pALK})$$

donde:

$I_s$ , es el índice de estabilidad

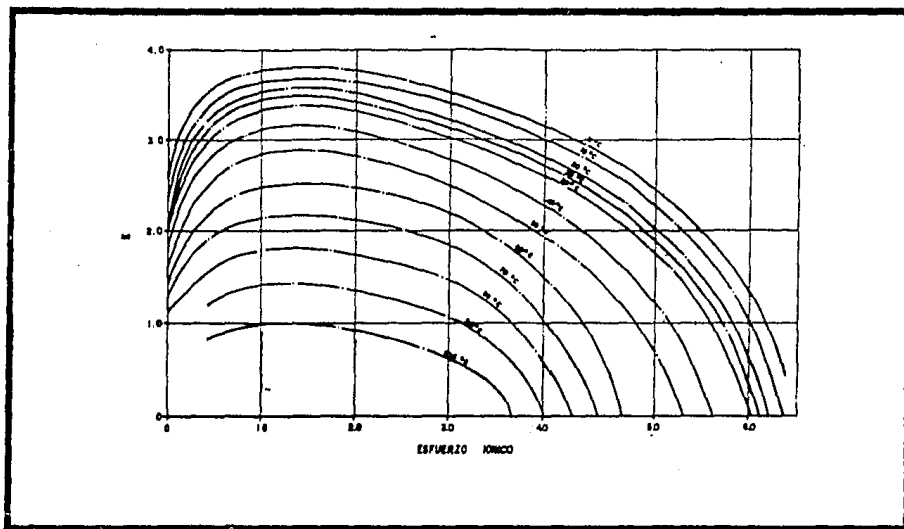
$\text{pH}$ , es el potencial hidrogeno

$K$ , factor que depende de la concentración del ion calcio

$\text{pALK}$ , factor que depende de la alcalinidad total.

Para obtener el índice antes mencionado, se requiere del análisis químico del agua, además, del  $\text{pH}$  y de la temperatura y se calcula de acuerdo al siguiente método.

- 1.- Se calcula el esfuerzo iónico de la suma de todos los componentes del agua.
- 2.- Determinar el valor de  $K$  a partir de la fig. 18 para lo cual se necesita el valor determinado en el inciso anterior y el dato de la temperatura.
- 3.- Con las partes por millón de calcio, obtenemos a partir de la fig. 19 el factor correspondiente al calcio.
- 4.- Con la alcalinidad total y con la gráfica de la fig. 19 se determina el factor correspondiente



UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

VALORES DE N Y DIFERENTES  
VALORES DE ESFUERZO IONICO

18

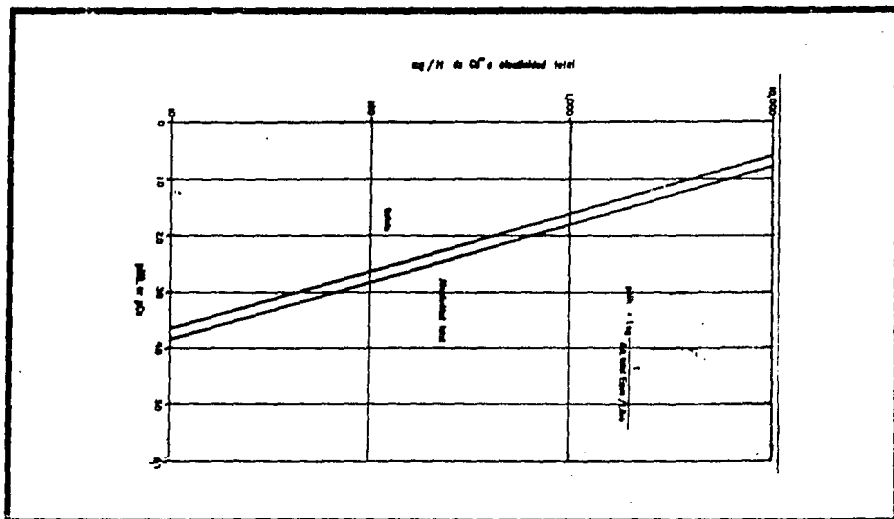
el cual sustituyendolo en la formula original,  
se obtiene el valor del indice de estabilidad.

5.- Los valores de pH,  $\text{CO}_3^{=}$ , y  $\text{HCO}_3^{-}$ , deben de determinarse en la planta de inyección.

Si el valor de  $I_s$ , es negativo indica que la tendencia del agua es corrosiva.

Si el valor de  $I_s$  es positivo nos indica que la tendencia del agua es incrustante.

Si el valor de  $I_s$  es cero nos indica que el agua esta en equilibrio químico.



**UNAM**

FACULTAD DE INGENIERIA  
MANUEL VELEZ MARTINEZ

CONVERSION DE PPM DE CALCIO Y  
ALCALINIDAD EN pCa y pAlk

19

## BIBLIOGRAFIA

- L. C. Case: "Water problems in oil production"  
Petroleum publ. CO.  
1970
- Wright Charles C. "Water Quality Control for subsurface  
Injection"  
Producers Monthly  
Octubre 1960
- Wright Charles C. "Rating Water Quality and corrosión  
control in water floods"  
Oil-gas-journal  
Mayo 1963
- Langelier, w. f. "The analytical control of anticorrosión  
water treatment"  
Water works assoc.  
Vol. 29 No. 10 1936
- Cox Charles R. "Práctica y vigilancia de las operaciones  
de tratamiento de agua"
- Sheppard T. Powel "Acondicionamiento de agua para la  
industria"  
Limusa 1966
- Catalan Lafuente, José G. "Química del agua"
- Basso Alvarez José, González Ensiso Raúl Castro,  
Rivera Ramírez Edumundo. "Acondicionamiento del agua para  
recuperación secundaria"  
Tesis UNAM Fac. Ingeniería 1976
- Water Treatment Microbiology.  
Industrias Petrolite
- Juan Galván R., Alberto Lory M., Jesús E. Nolasco,  
Yolanda Nava F. "Tratamiento del agua de inyección"  
Proyecto D-3110 Publicación No. 1 IMP. 1982
- "Principios Básicos para tratamiento de aguas"  
Industrias Nalco 1983
- "Apuntes de recuperación secundaria"  
Facultad de Ingeniería.