

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

13

**ESTUDIO DEL PROCESO DE INCRUSTACION EN
EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO
PRIETO BAJA CALIFORNIA**

PEDRO FLORES AGUIRRE

INGENIERIA QUIMICA

1 9 7 9



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
LIBRERÍA

AB TESIS 1979
DO M. C. 117
FECHA _____
PROC. _____
S. _____



PRESIDENTE Prof. CARLOS DOORMANN MONTERO

V O C A L Prof. ALEJANDRO RAMIREZ GRYSUK

Jurado asignado originalmente
según el tema.

SECRETARIO Prof. CARITINO MORENO PADILLA

1er. SUPLENTE Prof. ENRIQUE BRAVO MEDINA

2do. SUPLENTE Prof. CARLOS BAZAN VILLEGAS

Sitio donde se desarrolló el tema: CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

BAJA CALIFORNIA.

Nombre completo y firma del sustentante: PEDRO FLORES AGUIRRE

Pedro Flores Aguirre

Nombre completo y firma del asesor del tema: Prof. CARITINO MORENO

PADILLA

DEDICO ESTE TRABAJO A:

A LA MEMORIA DE MI MADRE

A MI PADRE

A MIS HERMANOS:

MARIA ELENA

MARIA DE JESUS

ARNULFO

RAUL

JOSE LUIS

Y A TODOS MIS AMIGOS.

AGRADEZCO LA COLABORACION
DEL PERSONAL DEL I.I.E.
ESTACION MEXICALI.

ESTUDIO DEL PROCESO DE INCRUSTACION EN EL CAMPO
GEOTERMICO DE CERRO PRIETO ,BAJA CALIFORNIA MEX.

PEDRO FLORES AGUIRRE.

INDICE

No.	TITULO	Pág.
I.-	Prólogo.	1
CAPITULO I		
1.-	Introducción.	1.1
1.1.-	Clasificación de Recursos Energéticos.	1.2
1.2.-	Panorama Mundial de Energéticos.	1.3
1.3.-	Panorama Nacional.	1.5
CAPITULO II		
2.-	Energía Geotérmica.	2-1
2.1.-	Aguas Subterráneas.	2-5
2.1.1.-	Capas Hídricas.	2-5
2.2.-	Origen de un Campo Geotérmico.	2-9
2.3.-	Clasificación de Campos Geotérmicos.	2-12
2.4.-	Exploración.	2-13
2.5.-	Perforación.	2-14
2.6.-	Pozos Geotérmicos.	2-15
2.7.-	Equipo Superficial.	2-17
2.8.-	Medición de Fluidos Geotérmicos.	2-20
2.9.-	Conduccion de Fluidos Geotérmicos.	2-20
2.10.-	Plantas de Generación.	2-22
2.11.-	Ciclos para Vapor.	2-22
2.12.-	Ciclos para Mezcla agua-vapor.	2 -22
2.13.-	Problemas Químicos.	2-26
2.14.-	Efectos Quimicos sobre los Componentes de la Planta.	2 -27

2.15.-	Incrustación. (Depósitos Químicos)	2-27
2.16.-	Corrosión.	2-29
2.17.-	Problemas por la Atmósfera Enrarecida.	2-31
2.18.-	Factores Ambientales.	2-32
2.19.-	Energía Geotérmica en el Mundo.	2-33

CAPITULO III

3.-	Potencial Geotermico de Cerro Prieto.	3-1
3.1.-	Campo Geotérmico de Cerro Prieto.	3-2
3.2.-	Otros Campos en el Mundo.	3-6
3.3.-	Algunas Consideraciones Económicas.	3-10
3.4.-	Geología Estructural de Cerro Prieto.	3-12
3.5.-	Análisis de el Fluido Geotermico de Cerro Prieto.	3-14

CAPITULO IV

4.-	Incrustación en Cerro Prieto.	4-1
4.1.-	Incrustación en Pozos Geotérmicos.	4-1
4.2.-	Mecanismos de Producción en Pozos.	4-1
4.3.-	Análisis de Incrustaciones.	4-3
4.4.-	Mecanismos de Incrustación en los Pozos.	4-7
4.5.-	Incrustación en equipos superficiales.	4-9

CAPITULO V

5.-	Propiedades de la Silice.	5-1
5.1.-	Formas Cristalinas, Amorfas y Acuosas de la Silice	5-2
5.2.-	Solubilidad de la Silice.	5-2
5.3.-	Silice en Solución.	5-2
5.4.-	Polimerización de Silice Disuelta.	5-5
5.5.-	Propiedades de Sulfuros.	5-11

CAPITULO VI

- 6.1.- Mecanismos probables de incrustación en sistemas geotérmicos. 6-1
- 6.2.- Discusión de los mecanismos. 6-3
- 6.3.- Mecanismos de incrustación por sulfuros. 6-6

CAPITULO VII

- 7.- Estudio Experimental 7-1
- 7.1.- Descripción de los equipos piloto y arreglos de prueba. 7-2
- 7.2.- Relación de pruebas y observaciones efectuadas. 7-13
- 7.3.- Datos de operación de el separador. 7-16
- 7.4.- Reporte de campo sobre la limpieza de un separador 7-18
- 7.5.- Descripción de muestras de incrustación. 7-20
- 7.6.- Incidencia de incrustación. 7-30
- 7.7.- Densidad de incrustación formada. 7-32

CAPITULO VIII

- 8.- Prevención y Eliminación de Incrustaciones. 8-1
- 8.1.- Tratamiento de Salmuera para Controlar la Formación de Incrustaciones. 8-1
- 8.2.- Tratamientos para Fluído Fresco. 8-2
 - A.- Tratamientos para Silice. 8-1
 - A.1.- Ajuste de pH. 8-2
 - A.1.1.- Adición de Acido 8-4
 - A.1.2.- Adición de Base. 8-4
 - A.2.- Adición de Magnesio. 8-4
 - A.3.- Aplicación de Potencial Eléctrico. 8-5

B.-	Métodos de Tratamientos para Sulfuros.	8-5
B.1.-	Ajuste de pH.	8-5
B.2.-	Oxidación.	8-6
C.-	Tratamientos para Calcita (CaCO_3)	8-6
C.1.-	Presión de CO_2 .	8-7
C.2.-	Ajuste de pH.	8-7
C.3.-	Adición de Fosfatos.	8-7
C.4.-	Adición de Sulfatos.	8-8
8.3.-	Tratamiento para Fluido Agotado.	8-8
8.3.1.-	Tratamiento para Silice.	8-8
a)	Sedimentación y Coagulación.	8-8
b)	Tanques de Retención.	8-9
c)	Filtración.	8-9
8.3.2.-	Tratamiento para Cacita.	8-9
a)	Inhibidores de Incrustación y Secues- trantes.	8-9
8.4.-	Eliminación de Incrustaciones e Incrustantes.	8-10
a)	Acidificación.	8-10
b)	Adición de base.	8-12
c)	Limpieza Mecánica.	8-12
d)	Lesinercrustación por cavitación y chorros de agua a alta presión.	8-13
e)	Impacto Térmico.	8-13
f)	Inyección de Aceites pesados.	8-13
g)	Control de la Incrustación por Campo Magnético.	8-14

CAPITULO IX

- 9.- Modelo matemático propuesto para el estudio de la incrustación. 9-1
- 9.1.- Discusión del modelo. 9-12

CAPITULO X

- 10.- Conclusiones y recomendaciones. 10-1

ANEXOS

- A.- Resultados de pruebas en los equipos piloto (sin separación de vapor).
- B.- Resultados de pruebas en los equipos piloto (con separación de vapor).
- C.- Resultados de pruebas de los equipos piloto en serie utilizando flujo mezclado de dos pozos.
- D.- Resultados de pruebas (2da. etapa del anexo C).
- E.- Determinación de Na y Ca en flujo de alimentación a los equipos piloto.
- F.- Calidad de vapor obtenido en los equipos piloto.
- G.- Análisis químicos del flujo de alimentación de los equipos piloto.
- H.-1 Composición química de incrustaciones formadas durante las pruebas en los pilotos.
- H.-2 Características físicas de las incrustaciones.
- H.-3 Insidencia de incrustación.

BIBLIOGRAFIA DEL MODELO.

BIBLIOGRAFIA GENERAL.

PROLOGO

P R O L O G O

Con motivo de los problemas surgidos recientemente por la escasez en la disponibilidad de petróleo y sus derivados, ha cobrado -- gran actualidad todo lo relacionado con la situación mundial en materia de energéticos y se ha opinado, discutido y escrito copiosamente en torno de este tema. Existe por lo tanto abundante literatura, tanto de difusión periodística como de múltiples estudios con diversos enfoques y niveles técnicos, así como grados de amplitud, detalle y profundidad en los diferentes aspectos del problema.

Es evidente que en la actualidad es esencial para cada país -- lograr el desarrollo industrial y económico requerido, para poder dar un nivel de vida satisfactorio a su población. La condición para ello, es disponer en forma permanente y segura de la energía necesaria para afrontar la creciente demanda energética de las múltiples y complejas actividades que implica este desarrollo.

En México, hasta la fecha, la responsabilidad de suministrar -- los energéticos requeridos por el país ha recaído en forma abrumadora -- en 92% del total -- sobre la industria petrolera nacional.

Afortunadamente los descubrimientos de los nuevos campos de -- Chiapas y Tabasco, han dado autosuficiencia en el volumen total de crudo requerido por la demanda, y esta situación aparentemente podrá sostenerse -- mediante trabajo intenso e inversiones adecuadas -- en los próximos años.

Resulta obvio, que esta circunstancia favorable habrá que aprovecharla al máximo para tomar todas las medidas que permitan garantizar la disponibilidad de los energéticos que el país requiera, en el futuro inmediato y a largo plazo.

Entre éstas medidas cabrá mencionar el uso racional de los energéticos disponibles, el impulso máximo a nuestra industria petrolera y el desarrollo intensivo de nuevas fuentes de energía. Entre éstas nuevas fuentes deben citarse en primer lugar dos que podrían suministrar cantidades ilimitadas de energía si se resuelven los problemas científicos y tecnológicos para hacer posible su utilización en forma económica; se trata de la energía solar y de la energía de fusión nuclear.

En segundo lugar pueden citarse fuentes de energía mas limitadas como el aprovechamiento de la energía de las mareas, la obtención de petróleo a partir de esquistos y de arena bituminosas y el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento más eficiente de fuentes de energía ya explotadas como el desarrollo de reactores de fusión de neutrones rápidos o reactores de fría; el perfeccionamiento de los procedimientos de extracción de petróleo y del gas natural para aumentar la cantidad que puede recuperarse de los yacimientos; obtención de combustibles líquidos y gaseosos a partir del carbón; la producción de hidrógeno para utilizarlo como un nuevo vector de energía, el aprovechamiento de los desperdicios para la producción de energía y el desarrollo de la tecnología geotérmica para obtener energía de las rocas calientes secas mediante su fracturación artificial, la inyección de agua y la extracción de vapor.

Con respecto al desarrollo de estas nuevas tecnologías, en particular la energía geotérmica, afronta actualmente una serie de problemas, algunos muy serios como por ejemplo:

La disposición de desechos, y la incrustación en los equipos para generar energía eléctrica. El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio que permita plantear alguna solución para resolver el problema de la incrustación que ocurre en el campo Geotérmico de Cerro Prieto en Baja California, México.

CAPITULO I

CAPITULO I

I.- INTRODUCCION

La energía se encuentra en el universo en cantidades ilimitadas, el problema que se afronta actualmente es como transformarla, almacenarla y conducirla, por ahora los conocimientos están enfocados al uso y transformación de lo que se ha llamado fuentes tradicionales de energía que son el Petróleo y la hidráulica.

Por otra parte no ha sido exhaustivo el uso de otras fuentes tradicionales como el Carbón y se empieza a experimentar con fuentes no tradicionales como la Nuclear y la Geotérmica, además se sabe que se podrá utilizar otras fuentes nuevas como la solar, Radial y la fisión nuclear.

Con respecto al Petróleo y la hidráulica, se puede aceptar -- que se sabe como utilizar estas fuentes de energía, con la nuclear y la Geotérmica se está aprendiendo y tiene que desarrollarse un método para acelerar y optimizar el aprendizaje, con la Solar, Radial y fisión no existen tecnologías adecuadas para el aprovechamiento de estos nuevos campos energéticos.

1.1. CLASIFICACION DE LOS RECURSOS ENERGETICOS

1.- TRADICIONALES

- A. Leña
 - A.1. Carbón de leña
- B. Petróleo
 - B.1. Crudo
 - B.2. Derivados (Gasolina, Diesel Pesado)
 - B.3. Gas (Natural y Licuado)
- C. Carbón
 - C.1. Carbón
 - C.2. Coquizado, destilado
 - C.3. Gasificado
- D. Hidráulica
 - D.1. Utilización mecánica
 - D.2. Transformación en energía eléctrica.
- E. Eólica
 - E.1. Utilización mecánica
 - E.2. Transformación en energía eléctrica.

2.- NO TRADICIONALES

- A. Energía Atómica
 - A.1. Reactores normales
 - A.2. reactores de cría
- B. Geotérmica

3.- NUEVOS

- A. Eólica
 - A.1. Transformación indirecta en hidrógeno.
- B. Hidráulica
 - B.1. transformación indirecta en hidrógeno.
- C. Solar
 - C.1. recolección de calor

- C.2. Transformación en energía eléctrica.
- C.3. Transformación indirecta en hidrógeno.
- F. Energía Gravitacional
- G. Energía Magnética
- H. Bombardeo Lasser

Esta clasificación obedece a un orden de posible utilización de nuestro desarrollo actual tanto económico como intelectual. Al analizar los energéticos es conveniente, inicialmente con fines de ubicación mostrar un panorama mundial y nacional actual a corto y mediano plazo.

1.2. PANORAMA MUNDIAL DE ENERGETICOS

La población mundial que en 1970 ascendía a 3600 millones de habitantes, para el año 2000 alcanzará una cifra entre 6000 y 7000 millones de habitantes (Fig. 1), lo que obviamente significará mayor demanda de energéticos, de alimentos, de viviendas y en general de todos los bienes y servicios que contribuyen al bienestar del hombre.

A mediados de 1970, el consumo mundial de petróleo, gas natural, líquidos derivados del gas natural (gasolina natural), carbón-energía hidroeléctrica y nuclear ascendió al equivalente de 99.2 millones de barriles de petróleo (TABLA 1) equivalente por día, previendo que gracias al incremento demográfico e industrial, en 1980 estas demandas aumentarán a 158 millones de barriles diarios. La proporción de hidrocarburos en 1970 fué de 68.8% y se estima que para 1980 ascenderá a 75.6% que junto con el 21% aportado por el carbón, en ese año, hacen una dependencia del 96.6% de combustibles fósiles, pese a la rápida introducción de reactores nucleares.

Este consumo extraordinario por todos sentidos plantea ciertos temores de que las reservas, siendo finitas evidentemente llegarán a su agotamiento algún día quizá ya no muy lejano.

POBLACION MUNDIAL

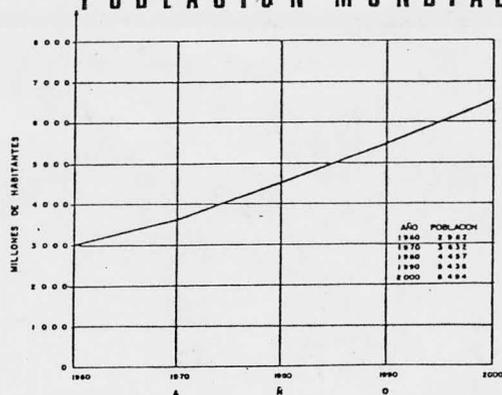


Figura 1

DEMANDA MUNDIAL ENERGIA

ENERGETICOS	1970		1975		1980	
	MMBPD	%	MMBPD	%	MMBPD	%
PETROLEO	45.26	45.60	62.07	49.60	83.15	52.40
GAS NATURAL	17.26	17.40	22.59	18.10	28.75	18.10
HIDROCARBUROS*	5.79	5.80	6.84	5.50	8.04	5.10
CARBON	30.38	30.60	31.17	25.00	33.40	21.00
NUCLEAR	0.58	0.50	2.47	2.00	5.39	3.40
T O T A L	99.27	100.00	125.14	100.00	158.72	100.00

*Liquidos derivados del Gas Natural.

TABLA 1

1.3 PANORAMA NACIONAL

Si el índice de crecimiento de la población en México se conserva como ahora; al extrapolarlo nos encontramos que para el año 2000 se espera tener en el país aproximadamente 135 millones de personas (FIG. 2) lo anterior debe significar necesariamente entre otras cosas un aumento en la demanda de energía.

En nuestro país los hidrocarburos contribuyen con la mayor parte de los energéticos y lo seguirán haciendo, si bien entre 1985 y 1980 comenzará a disminuir su participación en la estructura del consumo de energía primaria, manteniendo en el año 2000 una aportación de aproximadamente 80% (Tabla 2).

La clave de la evolución en la estructura de energéticos a largo plazo, en México, la constituye la introducción paulatina de la energía nuclear, para generación de energía eléctrica, desplazando a los combustibles fósiles, principalmente combustóleo y gas natural, y en mucho menor proporción al carbón mineral. El carbón por su parte será utilizado más ampliamente en los próximos años, no solo en la industria siderúrgica, sino también para la generación de energía eléctrica.

Es evidente que la participación del carbón en el año 2000 estará supeditada a un conocimiento preciso de las reservas que se dispongan en nuestro país, así como a la puesta en servicio de nuevas técnicas de extracción que hagan competitiva su utilización por ejemplo en la generación de electricidad.

La energía hidroeléctrica y la geotérmica con amplio potencial en nuestro territorio, se irán aprovechando progresivamente para equilibrar el balance energético. De la primera se estima que hay un potencial de 14.3 millones de kw, de los cuáles 12.5 son rentables; con respecto a la segunda es difícil precisar su potencial, pero es cierto que se cuenta con perspectivas favorables, de modo que hacia el año 2000 aunque prácticamente se aprovechará todo el

POBLACION DE MEXICO

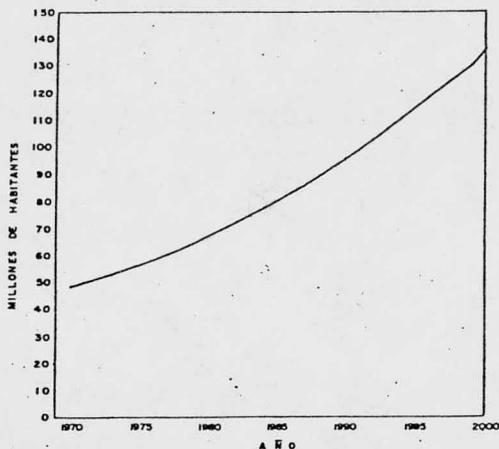


FIGURA 2

ESTRUCTURA DE LA OFERTA DE ENERGIA PRIMARIA EN MEXICO

	(POR CIENTO)			
	1970	1980	1990	2000
Petróleo	58.1	59.9	55.2	52.1
Gas natural	32.2	29.1	28.4	27.7
lutitas bituminosas	0.0	0.0	0.1	0.3
carbón	5.6	6.9	9.6	7.4
energía nuclear	0.0	0.2	3.1	9.6
hidroeléctrica y geotérmica	4.1	3.9	3.6	2.9
	100.0	100.0	100.0	100.0

TABLA 2

potencial, la contribución en la estructura del consumo total será poco significativa.

Este breve panorama de la estructura de energía en el año 2000 es meramente indicativo de ciertas tendencias registradas en el presente y a corto plazo; desde luego existe una serie de factores técnicos, económicos y sociales que pueden influir significativamente en la estructura del consumo de energía primaria en el año 2000.

Para poder precisar la evolución de los energéticos en México a mediano y largo plazo, se plantea la necesidad de una política nacional de energía.

Esta responsabilidad recae sobre la Comisión Nacional de Energéticos, organismo gubernamental integrado por algunas secretarías de Estado así como por las instituciones descentralizadas Petróleos Mexicanos, Comisión de Energía Nuclear, esta comisión tiene por objeto estudiar y promover el mejor uso de los recursos energéticos, de acuerdo con las disponibilidades y reservas en función de las necesidades que a corto plazo requiera el desenvolvimiento económico y social del país.

Por lo que respecta a la política a corto y mediano plazo para la energía geotérmica, se debe aprovechar las características favorables en varias regiones del país y la similitud de la tecnología de los pozos geotérmicos con respecto a los petroleros, esto puede permitir acelerar el desarrollo de esta fuente de energía mediante la colaboración entre CFE y PEMEX, para que pudiera alcanzarse para fines de siglo una capacidad instalada en plantas geotermoelectricas de por lo menos 2000 MW.

A largo plazo, la experiencia adquirida en la explotación de sistemas geotérmicos de convección hidrotermal, debe aprovecharse para investigar la posibilidad de extraer calor de las rocas secas calientes y también ver la posibilidad de utilizar la energía conte

nida en el agua geopresurizada.

Se han encontrado al perforar pozos petroleros en las costas de Texas y Louisiana, depósitos subterráneos de agua caliente a profundidades de 4000 a 6000 metros, y tiene presiones hasta de 700 kg/cm^2 y a una temperatura de unos 130°C y saturada de gas natural.

Es de suponerse que estos depósitos deben extenderse por el territorio Nacional, a lo largo de las costas del Golfo.

Su aprovechamiento suministraría cantidades considerables de gas natural y energía mecánica y térmica que podría utilizarse para la generación de electricidad.

C A P I T U L O I I

CAPITULO II

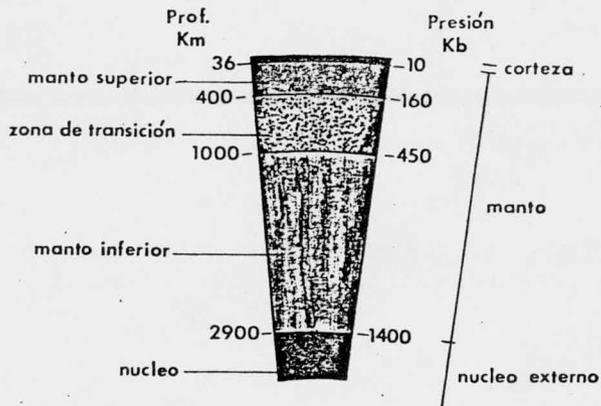
2. ENERGIA GEOTERMICA.-

La energía geotérmica es la energía de el interior de la tierra, y se manifiesta en forma de calor interno, es una característica física de nuestro planeta. Prescindiendo de las variaciones de la temperatura superficial de la corteza (limitadas a una estrecha capa de 20-50m como máximo y terminadas en el nivel neutro) -- que deben atribuirse a las variaciones térmicas de la atmósfera, -- puede afirmarse que por debajo de este nivel la temperatura aumenta con la profundidad, como han demostrado las medidas efectuadas en minas y perforaciones profundas.

De este modo se ha calculado el grado geotérmico que es el número de metros que hay que profundizar para que la temperatura aumente 1°C ; el valor medio es de unos, $34.8 \text{ m}^{\circ}\text{C}$. Inversamente, sentiendo por gradiente geotérmico el valor en grados centígrados, -- del aumento de temperatura por cada 100m de profundidad; el valor medio de este gradiente resulta ser de unos 3°C por cada 100m.

La tierra se asemeja a una esfera de 6370 Km de radio (Fig 3) Esta constituida por el NUCLEO que es una porción de 3470 Km de radio, o sea que se encuentra a 2900 Km de profundidad, su característica principal es que se encuentra en estado físico de fluidez. Los otros constitutivos, señalados por zonas de brusca transición son MANTO y CORTEZA. Esta última es de espesor variable y esta --- constituida por SIMA que yace sobre el MANTO y SIAL que parece flotar sobre el SIMA y es el constituyente de los continentes.

Las características principales del manto es que aunque presenta un coeficiente de rigidez que permite la transmisión de ondas de cizallamiento, se concluye que tiene un estado de plasticidad relativa, que permite movimientos en su interior.



Representación de la estructura interna de la tierra.

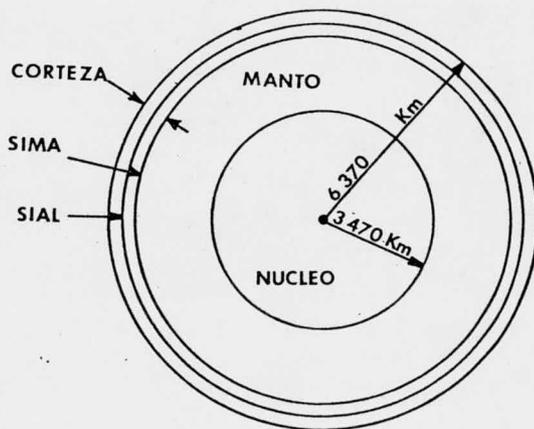


FIG. 3

Las hipótesis más recientes exponen que en el interior del MANTO -- existen celdas de convección, flujos de materia que transportan calor del interior a la superficie del planeta.

Si hubiera que calcular la temperatura del interior de la tierra a lo largo de un radio de la misma, extrapolando los valores de decididos del grado geotérmico, se llegará al centro de la tierra a -- temperaturas del orden de 200 000 °C .

Por consiguiente; no es válido el aumento de los valores de -- temperaturas en las proporciones señaladas hasta llegar al centro -- del Globo. Hay que admitir que la temperatura media debe aumentar -- hacia el centro de la tierra únicamente hasta un punto determinado-- (2 200 Km que es la base del MANTO) en donde no podría rebasar los-- 5 500°C (punto de fusión del OLIVINO Mg_2SiO_4 a la presión que co--- rresponde a esta profundidad que es de aproximadamente de 1 400 Ki-lobars). La temperatura del NUCLEO es del orden de 6 000°C.

Parece ser que en los lugares de la superficie donde se mani-- fiestan las celdas de convección éstas provocan debilidades en la -- corteza que favorecen la formación de magmas.

El magma (del griego, pasta), es una masa incandescente, en estado-- de fusión total o parcial, que se encuentran en el interior de la -- corteza terrestre o debajo de ella, esta formada esencialmente por-- diversos silicatos y contiene pequeñas cantidades de gases como --- agua, anhídrido carbónico, hidrógeno, ácido sulfhídrico, etc.

La proporción de éstos componentes varía entre límites muy amplios, que permiten distinguir muchos tipos de magmas. Según sea su conte-- nido de sílice, se distinguen magmas ácidos ($SiO_2 > 60\%$) y magmas bá-- sicos ($SiO_2 < 55\%$).

El mecanismo del ascenso de los magmas depende además de las-- propiedades físicas del magma (viscosidad, tensión de vapor y densi-- dad), de las condiciones tectónicas y de la naturaleza de las masas rocosas que el magma tiene que atravesar.

De acuerdo con las condiciones tectónicas tenemos dos probabilidades para el ascenso de los magmas:

- a) el magma puede quedar confinado y consolidarse en el interior de la corteza terrestre formando las rocas de origen magmático que reciben el nombre de PLUTONITAS O CUERPOS INTRUSIVOS. En particular, se llama BATOLITOS O CUERPOS SUBYACENTES si estas masas se encuentran desarrolladas en profundidad, por debajo de todas las rocas circundantes, de modo que no aparecen en éstas, sino inglobadas en su parte superior. Por el contrario, se denominaron CUERPOS INYECTADOS las masas rocosas magmáticas que permanecen incluidas en la masa circundante (con excepción de las trayectorias alimentadoras o chimeneas que han hecho posible la inyección)
- b) los magmas por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia -- arriba, romper la costra superficial de la tierra y desparr-- marse en forma de lava, gases volcánicos o ceniza creando un -- aparato volcánico.

Un volcán esta activo mientras su magma contenga un alto contenido de gases, que hacen que los materiales salgan al exterior al disminuir estos aumenta su viscosidad imposibilitando que pueda fluír por el conducto o chimenea y queda confinado a pocos kilómetros de la superficie.

Evidencias sísmicas indican que la profundidad promedio de la cámara magmática (Fig 4) es en promedio de 5 kilómetros.

Por su gran contenido de calor el magma es una fuente de gran duración, debido a la baja conductividad térmica de las rocas encajonantes pierden calor muy lentamente, y a no ser por movimiento directo de material volcánico, la única manera de que exista escape de energía por convección (transporte de calor mediante el movimiento de un fluido) es cuando entra en contacto con agua.

Para comprender mejor este mecanismo a continuación se hace una -- breve descripción de esta agua.

2.1 AGUAS SUBTERRANEAS

El agua al entrar en contacto con las rocas calientes, en el interior de la corteza de la tierra, forma celdas convectivas, o sea el fluido forma un ciclo de convección natural que transporta energía hacia la superficie. Estas aguas que discurren por debajo de la superficie terrestre, parece evidente que provienen del agua de lluvia infiltrada en ésta, además de la cantidad proveniente de la lluvia (agua meteórica), hay que tener en cuenta la que resulta de la condensación directa del vapor de agua en meatos del suelo y la de origen endógeno, aunque la aportación de éstas últimas dos es de escasa importancia.

Ya que la mayor cantidad de la precipitación meteórica, resulta que la fracción de agua que se infiltra depende del tipo de terreno en que ha caído. La capacidad de una roca para ser atravesada por el agua es lo que se llama permeabilidad; en función de la magnitud de este parámetro, las rocas pueden subdividirse en dos grandes grupos: a) rocas impermeables, cuyos poros y fracturas son tan minúsculos que no permiten la infiltración. b) Rocas permeables, en éstas al contrario que las anteriores el agua puede circular con mayor o menor facilidad.

2.1.1 CAPAS HIDRICAS

El agua que ha penetrado en el suelo tiende a profundizar progresivamente, siguiendo la trayectoria de los poros y fisuras hasta que encuentra un estrato impermeable sobre el cual corre o se estanca, según sea la posición de dicho estrato; de este modo el agua forma una capa hídrica. Cuando esta capa no tiene su superficie superior limitada por un estrato impermeable sino que este nivel superior es libre, toma el nombre de capa freática.

Pero no toda el agua que se reúne en esta capa; parte de aquella es retenida por encima del nivel freático y, forma una sutil --

membrana que reviste cada uno de los gránulos de la roca y constituye la Franja Capilar, por debajo de la cuál existe una zona de saturación y por encima se encuentran sucesivamente una zona de aereación y una zona de evaporación, o sea que en el subsuelo se puede encontrar agua bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fijada en el interior de estructuras cristalinas. (fig. 5)

Por otro lado, solamente una reducida minoría de zonas freáticas puede suministrar caudales significativos de agua, las zonas -- que si lo poseen se llaman acuíferos, o sea un acuífero es una zona natural situada por debajo de la superficie del suelo que es capaz de suministrar agua en cantidades suficientemente grandes como para ser económicamente explotables.

Los acuíferos pueden estar constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados, por rocas plutónicas masivas fracturadas, -- por estratos de areniscas porosas, por bancos de calizas carstificadas y por otros muchos contextos geológicos diferentes. Si el acuífero se encuentra en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios huecos de un terreno permeable se le denomina acuífero no confinado.

El acuífero confinado esta separado de la atmósfera por un terreno impermeable, el término semiconfinado se utiliza para condiciones -- intermedias. En muchas zonas, la primera agua freática no confinada que se suele encontrar está frecuentemente por encima de la zona general de las aguas freáticas, constituyendo un volúmen de agua mas ómenos aislado cuya posición ésta impuesta por la estructura y la -- estratigrafía del terreno (Fig 6) al acuífero que se encuentra bajo estas condiciones se le denomina acuífero colgado.

Reviste especial importancia la relación entre el agua freática y el régimen de los ríos. En caso de que el nivel superficial -- del río sea inferior al de la capa freática, el cauce fluvial se -- comporta como un canal de avenimiento; cuando ambos niveles son --- iguales no influyen el uno sobre el otro.

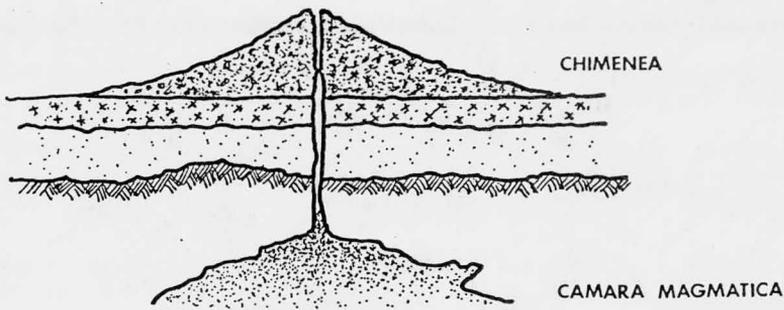


FIG. 4

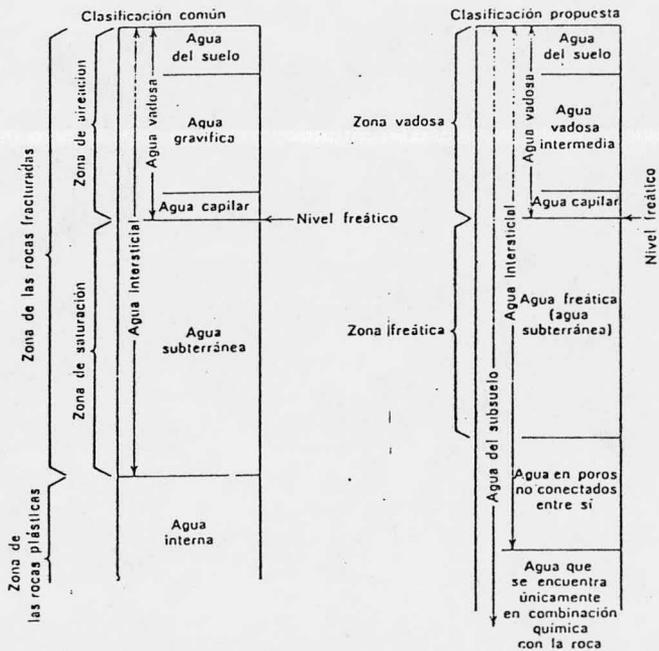


FIG. 5.- Clasificación del Agua del Subsuelo

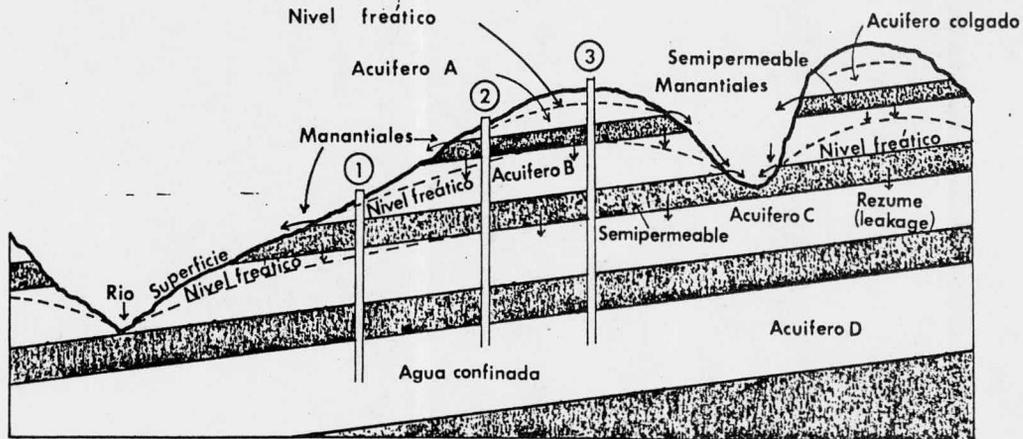


Fig.6 Aguas confinadas, no confinadas y colgadas, en una secuencia estratigráfica simple de areniscas y pizarras.

Por el contrario, cuando el nivel de la capa freática sea inferior al curso del agua, esa capa se alimenta del agua exterior en los períodos de crecida, del río y la restituye el cauce en los períodos de sequía.

Finalmente en las regiones costeras puede alumbrarse agua a niveles inferiores al del mar debido a la menor densidad del agua dulce.

2.2 ORIGEN DE UN CAMPO GEOTERMICO

Teniendo los conceptos de aguas subterráneas y de la concentración de calor geotérmico, el origen de un campo geotérmico se podría clasificar de la siguiente manera:

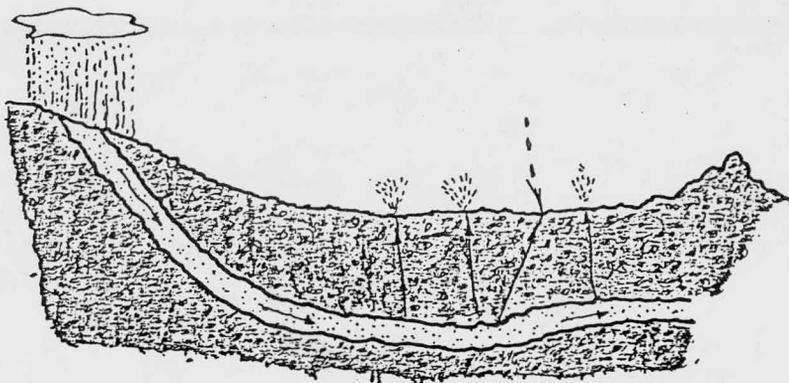
1) Por viaje de aguas a estratos bastante profundos como para calentar el agua, debido al gradiente geotérmico natural (1° por cada 33m de profundidad). Este CALOR NORMAL parece ser debido a desintegración radioactiva. (Fig. 7)

2) Por vapor escapado de un magma a través de fisuras.
(Fig. 8)

3) Por contacto de aguas freáticas o meteóricas, con rocas que están a temperatura elevada a causa de encontrarse sobre yaciendo un FOCO GEOTERMICO. (Fig. 9)

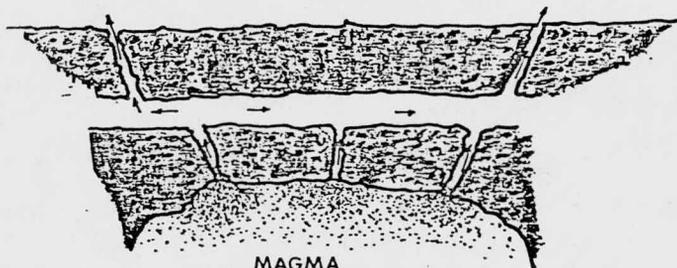
4) Puede ocurrir que haya un doble circuito de convección por aguas freáticas calentadas en vecindad de un estrato que contiene vapor y gases mágnmáticos que no tienen acceso a la superficie. (Fig. 10)

La tierra en su interior presenta un gradiente normal de temperatura (1°C por cada 30m), el calor en estas regiones se encuentra disperso y a gran profundidad, razón por la cuál su aprovechamiento económico, empleando las técnicas conocidas no es factible. Para que sea explotable en forma económica, este calor se debe manifestar en forma de energía geotérmica o sea, estar concentrado en vo-



VIAJE DEL AGUA A ESTRATOS BASTANTE PROFUNDOS

FIG. 7



MAGMA

FIG. 8

VAPOR DE UN MAGMA ESCAPADO A TRAVES DE
FISURAS

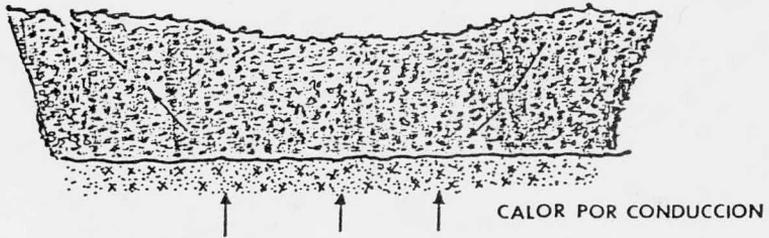


FIG.9

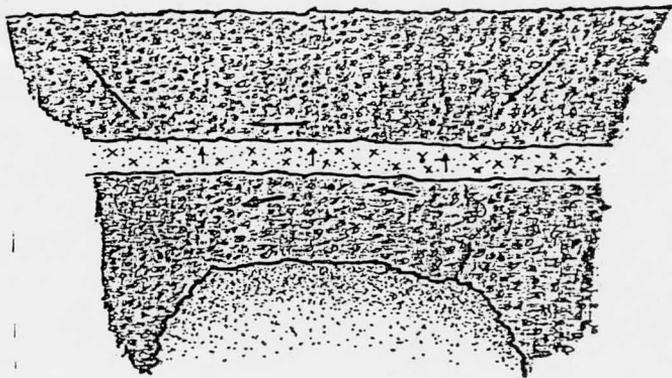


FIG.10 DOBLE CIRCUITO DE CONVECCION

lúmenes restringidos y a poca profundidad (depósitos) esto es similar a la concentración de metales en vetas y al petróleo en yacimientos. Las temperaturas en estas concentraciones varían desde 50- hasta 350°C, se localizan en estratos permeables y a profundidades menores a 3 km. Esta energía se encuentra almacenada en la roca y - en el agua, así como en el vapor existente en los pozos y fracturas de la roca.

Los depósitos geotérmicos conocidos están regulados por sistemas convectivos; el fluido geotérmico puede ser vapor, agua caliente o una mezcla de ambos, éste se extrae de la parte superior-- del depósito utilizando pozos.

Mediante estudios geoquímicos usando isótopos de hidrógeno y oxígeno, se ha podido establecer que en la mayoría de los campos en explotación, el 95% de el agua que forma los fluidos geotérmicos es - de origen meteórico y el 5% restante es de origen magmático.

2.3 CLASIFICACION DE CAMPOS GEOTERMICOS.-

Los campos geotérmicos de acuerdo al fluido que producen pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- a) Campos hipertermales
- 1) Campos húmedos; producen agua presurizada a temperaturas superiores a 100°C. Cuando este fluido asciende a la superficie, - en su trayecto se va reduciendo la presión y parte de él se va poriza instantáneamente formando vapor saturado, en tanto que la mayor parte permanece como agua en ebullición.
- 2) Campos secos; producen vapor seco saturado o vapor sobrecalentado a presiones por encima de la atmosférica.
- 3) Campos semi-termales; producen agua caliente a temperaturas - hasta de 100°C.

Los campos geotérmicos hipertermales de tipo húmedo (también llamados de agua supercaliente consisten de un lecho de rocas porosas calientes, saturadas con agua y por lo regular conteniendo sólidos en solución que varían desde 1 a 300 gramos por litro. Los principales campos de este tipo conocidos en el mundo a la fecha son: Cerro Prieto en México; Wairakei, Broadlands y Kawerau en Nueva Zelanda; Ahuachapán en el Salvador y el de Salton Sea en E.U.A.

Se estima que hay del orden de 20 campos de este tipo, por un campo del tipo seco.

Los campos geotérmicos hipertermales de tipo seco (también llamados de vapor dominante) producen vapor sobrecalentado, conteniendo una pequeña cantidad de gases principalmente CO_2 y H_2S , los mayores campos de este tipo son el de Larderello en Italia y el de los Geysers en E.U.A.

2.4 EXPLORACION.-

La exploración geotérmica, efectúa los estudios correspondientes para generar y obtener los datos necesarios que permitan elaborar una evaluación de una zona bajo estudio.

Para llevar a cabo, su objetivo se auxilia en la Geología la Geohidrología, la Geofísica, la Geoquímica y la Ingeniería de Perforación.

Con ayuda de la Geología, se elabora un modelo tridimensional de la estructura geológica de la región térmica en estudio; la Geohidrología deduce las posibles trayectorias por las cuales el agua puede fluir subterráneamente entre los estratos y a través de los alrededores de el modelo geológico, también se encarga de estudiar gradientes, porosidades y permeabilidades de los constituyentes de las formaciones geológicas.

La Geofísica detecta e interpreta la anomalías, utiliza para--

ello métodos sísmicos (reflexión o refracción), microsismicidad, -- gravimetría, magnetometría, sonido magneto-telúrico y aerotermometría entre otros, con esto se pueden conocer entre otros parámetros el gradiente térmico, el flujo, de calor la estructura geológica, - anomalías etc. La Geoquímica estudia los datos y análisis químicos de los fluidos geotérmicos, analiza las concentraciones de silice, - magnesio y las relaciones sodio-potasio ya que son indicadores de - temperaturas a profundidad, si la evidencia de los indicadores - coincide, las perspectivas de encontrar temperaturas elevadas son - excelentes.

El paso siguiente y quizá el definitivo, en la exploración es la perforación, con ella se comprueban o se modifican los datos anteriores, además de que su función principal es buscar y encontrarlos mantos productores de fluido geotérmico.

2.5 PERFORACION.-

La técnica de perforación de pozos geotérmicos, es similar a - la de los pozos petroleros, las diferencias básicas son las siguientes:

- a) Los mantos productores en los campos geotérmicos, se encuentran a menor profundidad que los yacimientos petroleros, -- por lo cuál se usa un equipo mas pequeño, que corresponde a uno de mediana capacidad.
- b) El diámetro de los pozos geotérmicos es mayor que el de los petroleros, lo que significa una carga mayor actuando sobre el equipo (hasta un 40% más)
- c) Es necesario usar un equipo especial para enfriar los lodos de perforación, ya que estos al entrar un contacto con mayores gradientes de temperatura, se ven afectadas sus propiedades químicas, físicas y reológicas.

La perforación de los pozos en una zona, se realiza siguiendo el --

patrón de una retícula geométrica, esto facilita el transporte y manejo de los fluidos extraídos.

2.6 POZOS GEOTERMICOS.-

Los pozos transportan los fluidos geotérmicos, desde la parte superior del depósito hasta la superficie, están formados por tuberías de diferentes diámetros y un cabezal o árbol de válvulas en su parte superior, los diámetros de las tuberías varían desde 55.8 cm (22") en la superficie (que es la tubería de anclaje, inmediatamente abajo de el cabezal), hasta 19.4 cm (8 5/8") en la parte más profunda (es tubería ranurada y se llama tubería de producción (Fig. 11). Toda la tubería excepto la de producción tiene un enjarre o ademe de cemento, cuando se termina la construcción del pozo, este se lava sustituyendo los lodos de perforación por agua.

Para que un pozo se active y empiece a producir fluidos geotérmicos, se elimina la columna hidrostática que forma el agua de lavado, ó cuando la variación del peso específico de ésta, debido al aumento de temperatura permite que el pozo fluya es lo que se llama activación natural, si no sucede esto, se induce a fluir el pozo mediante técnicas apropiadas. En la etapa inicial de producción, el pozo arroja junto con los fluidos, arena y residuos de los lodos de perforación, cuando esto sucede el pozo se deja en descarga continua y se van cambiando los diámetros de descarga mediante conos (aumenta el diámetro progresivamente) conforme va disminuyendo la arena y los residuos, a este conjunto de operaciones se le denomina DESARROLLO.

El fluido que se obtiene en la superficie puede ser vapor o una mezcla de agua-vapor en diferentes proporciones, este depende del tipo de campo y de las condiciones del manto productor. Las variables físicas más importantes de un pozo en producción son:

a) Presión en el cabezal

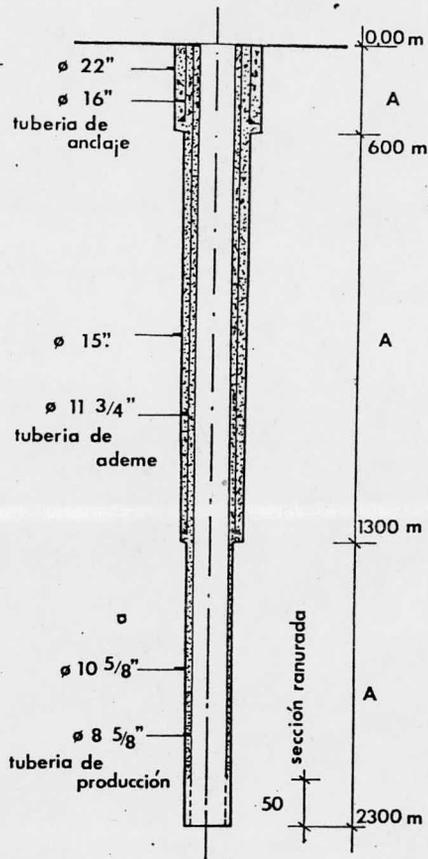


FIG. 11 Corte esquemático de Pozo Profundo (tipo)

- b) Temperatura en el cabezal
- c) Flujo másico
- d) Entalpía del fluido
- e) Calidad del fluido (ejem. % de humedad en el vapor)

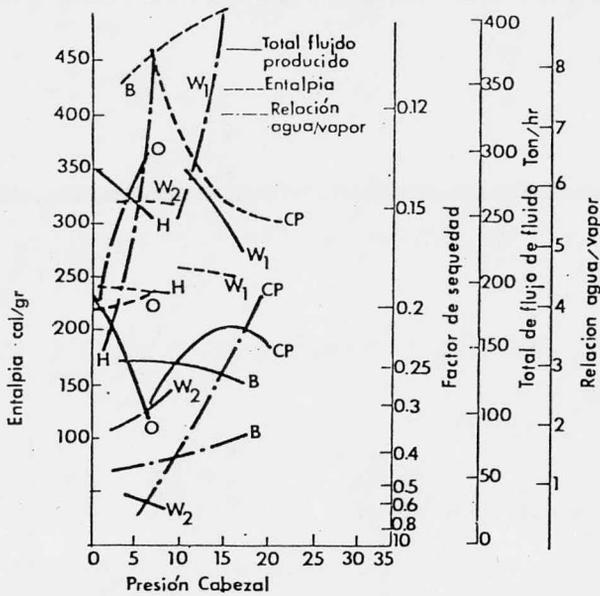
Las características del fluido descargado, a través de los pozos varía de campo a campo y aún más, dentro de un mismo campo éstas varían de pozo a pozo; como ejemplo para campos que producen mezcla tenemos la (Fig. 12) y para campos que producen vapor en la (Fig. 13).

2.7 EQUIPO SUPERFICIAL.-

Para lograr el cierre de los pozos, el control del flujo en los mismos, y cuando existe mezcla realizar la separación de las fases, se requiere como equipo básico el siguiente: árbol de válvulas a la cabeza del pozo, separadores de mezcla, silenciadores y trampas de agua, esto es lo que comúnmente se llama equipo superficial. (Fig. 14)

El árbol de válvulas se coloca en la descarga del pozo, difiere del usado en pozos petroleros solo en su tamaño, consiste generalmente de 3 válvulas que son, una válvula maestra, una para descarga horizontal y otra para descarga vertical. Cuando los pozos producen una mezcla agua-vapor, es necesario separar esta mezcla, esto se logra mediante un equipo de separación, en Cerro Prieto se usan separadores ciclónicos tipo WEBER.

Una vez realizada la separación, el vapor se envía a la planta, pasando antes por una trampa de agua, y el agua separada se envía a los silenciadores, de los cuáles hay dos tipos: verticales y horizontales, los silenciadores tienen como objetivo la medición del flujo, evitar la contaminación de áreas cercanas y la eliminación del ruido excesivo al descargar el agua a la atmósfera.



W₁: Wairakei, New Zealand, Profundidad (600-900m)
 W₂: Wairakei, New Zealand; barrenos someros (200-300m)
 O: Otake, Japon
 H: Hveragerdi, Islandia
 CP: Cerro Prieto, México
 B: Broadlans, New Zealand

Fig.12 Producción de mezcla Entalpia y calidades de fluidos para campos geotérmicos húmedos

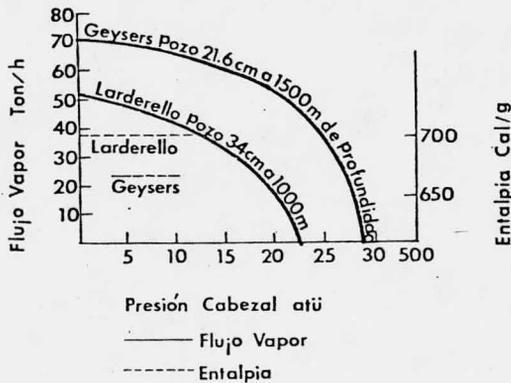


Fig. 13 Características típicas de pozos secos en campo Geotérmicos

2.8 MEDICION DE FLUIDOS GEOTERMICOS.-

Cuando se presenta mezcla agua-vapor, que es fluido en dos fases se emplean los siguientes procedimientos.

- a) Utilizando un separador
- b) Utilizando un silenciador monitoreando la presión crítica de labio a la entrada y midiendo el agua a la salida.
- c) Utilizando la presión crítica de labio y la presión-diferencial en el orificio de medición en la línea.
- d) Utilizando un geotermoindicador para determinar la entalpía y midiendo el flujo de agua a presión atmosférica.
- e) Determinar la temperatura de fondo y calcular la entalpía midiendo el flujo de agua a presión atmosférica.
- f) Determinar entalpía por el método de gases y midiendo el agua a presión atmosférica.
- g) Determinar la entalpía de la mezcla por el método del calorímetro de barril.

Los métodos usados en Cerro Prieto son:

- Utilizando separador
- a) con cono calibrado instalado en la descarga.
 - b) orificio de estrangulamiento instalado en la línea, midiendo la presión diferencial

2.9 CONDUCCION DEL FLUIDO GEOTERMICO.-

El fluido geotérmico se presenta como vapor, agua o como una mezcla de las dos, este fluido lleva sólidos disueltos y gases en diferentes proporciones, de acuerdo con esto se presentan los siguientes tipos:

- a) mezcla de agua, sales, gases y vapor de agua
- b) vapores
- c) líquidos sub-enfriados
- d) gases incondensables .

Cada uno de ellos presenta problemas particulares, siendo los principales la cavitación y el golpe de ariete, la conducción se realiza a través de una red de tuberías de diferentes diámetros longitud y materiales.

2.10 PLANTAS DE GENERACION.-

La energía geotérmica tiene diversas aplicaciones, siendo la más importante la generación de energía eléctrica, esta se genera mediante una planta geotermoeléctrica, estas plantas se operan --- mediante ciclos de vapor, de acuerdo a las características de éste, existen dos alternativas:

- a). Desarrollar trabajo mecánico por la expansión del vapor;
- b) Con el vapor, vaporizar otro fluido y obtener mediante la -- expansión de éste, trabajo mecánico (ciclo combinado)

A la fecha se emplea más la generación de trabajo mecánico - mediante la expansión del vapor endógeno. Los ciclos empleados son abiertos, el vapor se descarga a la atmósfera o condensa para aprovecharlo o desecharlo, los ciclos más comunes son los siguientes:

2.11 CICLOS PARA VAPOR.-

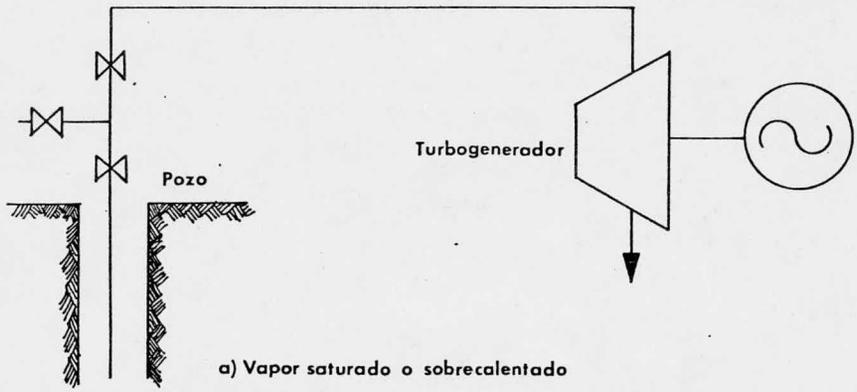
Cuando se dispone de vapor, este puede ser de dos tipos ---- sobrecalentado o saturado, si el vapor saturado es seco, se introduce igual que el sobrecalentado directamente a las turbinas si es -- saturado con humedad mayor al 1%, antes de pasarlo a las turbinas se introduce a un separador ciclónico de humedad.

- a) vapor saturado seco o sobrecalentado.

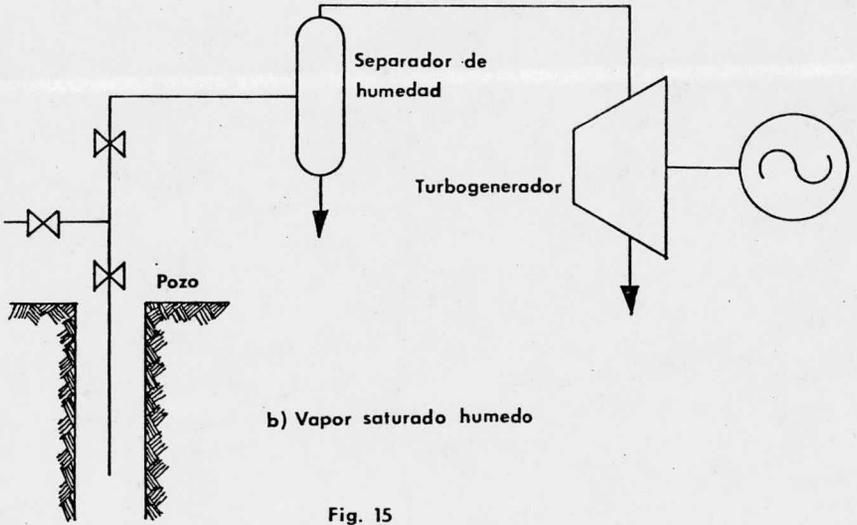
Este sistema presenta problemas de incrustación, tanto en la tobera como en la turbina, debido a los sólidos en solución, razón por la cual la mezcla requiere un tratamiento antes de ser alimentada (adición de HCl).

2.12 CICLOS PARA MEZCLA AGUA-VAPOR.-

De acuerdo a las condiciones de operación de las turbinas - solo se debe introducir vapor seco, a excepción del proceso en East Mesa (experimental) que usa un ciclo de expansión en dos fases, de acuerdo a las características de la mezcla se tienen varios ciclos

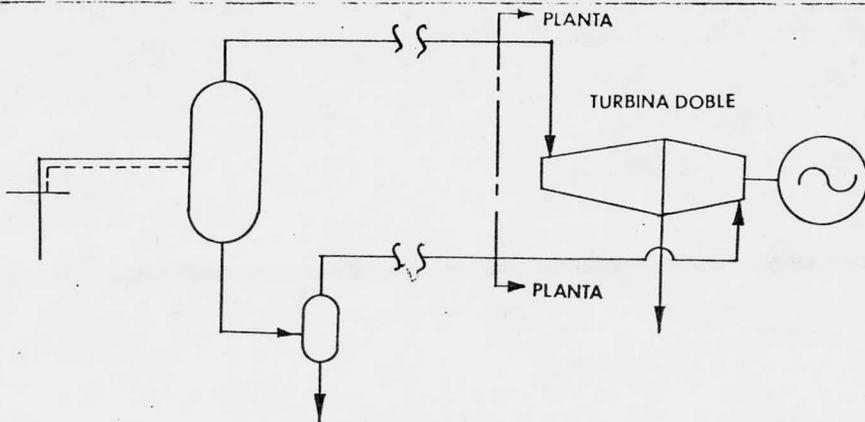


a) Vapor saturado o sobrecalentado

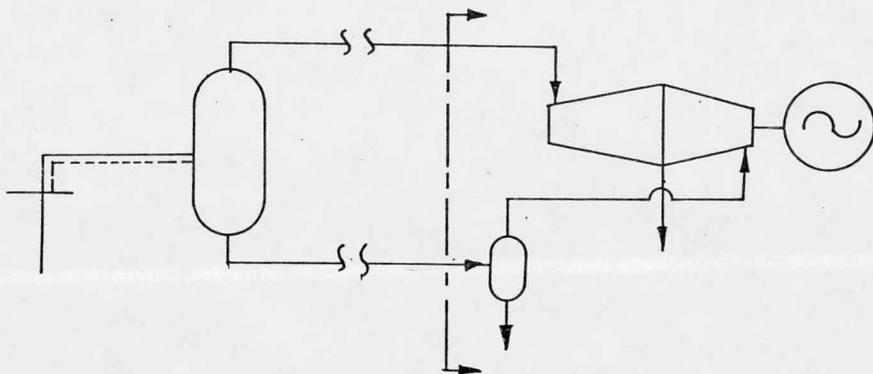


b) Vapor saturado humedo

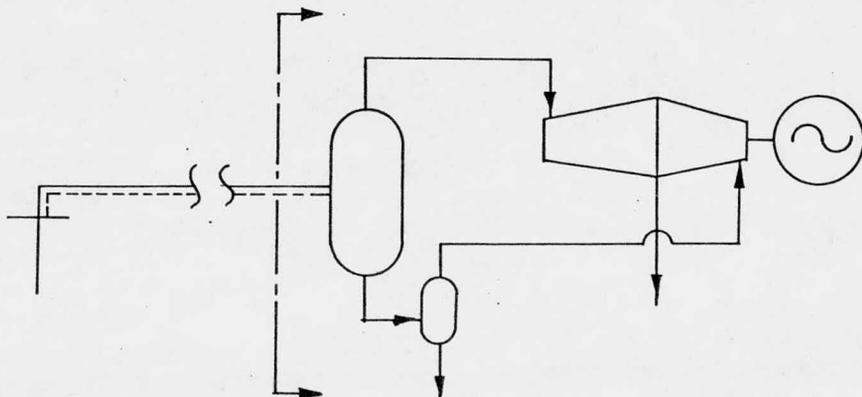
Fig. 15



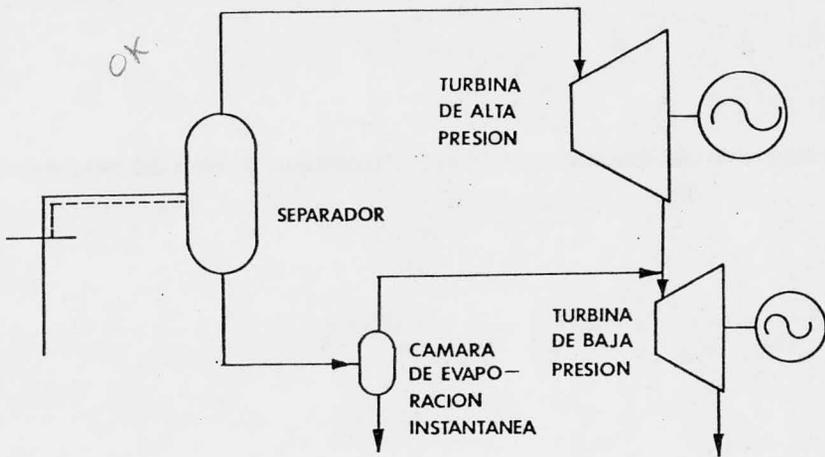
A) TRANSPORTE DE VAPOR SEPARADO



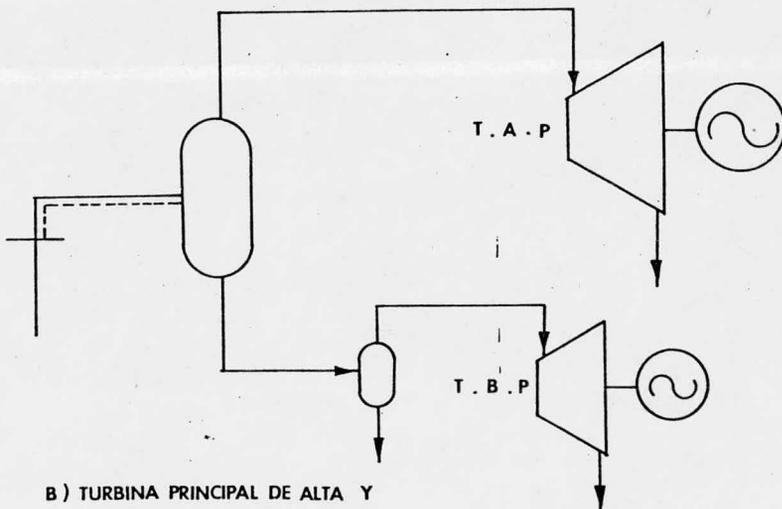
B) TRANSPORTE DE VAPOR Y AGUA CALIENTE SEPARADOS



C) TRANSPORTE DE MEZCLA AGUA VAPOR



A) TURBINAS DE ALTA Y BAJA PRESION SEPARADAS



B) TURBINA PRINCIPAL DE ALTA Y
SECUNDARIA DE BAJA PRESION

FIG.17 OTROS ARREGLOS EN CUANTO A DISPOSICION DE TURBINAS

a emplear.

a) Separación única de la mezcla.-

Al salir la mezcla del pozo, se pasa a un separador donde se obtiene vapor de alta presión y agua caliente, el vapor se pasa a las turbinas (de presión única) y el agua se desecha sin aprovechar la energía que aún lleva (podría obtenerse vapor de baja presión -- utilizando evaporación instantánea). Este sistema se aplica en algunas plantas, como ejemplo están las unidades 1 y 2 de la planta geotermoelectrica de Cerro Prieto en México.

b) Separación con evaporación instantánea del agua separada.-

Cuando el agua caliente separada, presenta condiciones de -- presión y entalpía que permitan su evaporación instantánea después que ha sido separada de la mezcla agua-vapor se incrementa notablemente la eficiencia del sistema. Los ciclos que se pueden desarrollar están en función de su forma de ser transportados y del arreglo en que se efectúa su expansión en las turbinas.

c) Uso del Flujo Total sin separación.-

Este ciclo se ha realizado solo a nivel experimental en East Mesa E.U.A. la turbina es de flujo radial, al ser introducida la -- mezcla a la turbina a través de una tobera, el vapor realiza su expansión y parte del agua se vaporiza instantáneamente en el ciclo, generando vapor para aumentar la eficiencia.

2.13 PROBLEMAS QUIMICOS.-

Los problemas que se presentan son ocasionados por las características del flujo, principalmente por gases incondensables y -- aguas geotérmicas.

AGUAS GEOTERMICAS.-

Estas aguas traen disueltos algunos sólidos, principalmente -- cloruros de metales alcalinos, sílice y en algunas existe ácido -- metabórico, sulfatos y trazas de fluoruros. El pH de estas aguas es muy variable y puede ir desde la acidez hasta la alcalinidad.

Como ejemplo de aguas alcalinas tenemos los de Cerro Prieto con un pH-8 como ácidas las de Matsukawa en Japón con pH-5.

GASES INCONDENSABLES.-

Estos gases provienen lo mismo que el vapor de el interior de la tierra, por lo que su presencia se considera inevitable. Las proporciones de los gases varían enormemente de campo a campo, como ejemplo tenemos: Hveragerdi en Islandia, el contenido de gases en este campo es muy pequeño, alrededor de 0.1% en peso, en el otro extremo tenemos el campo de Larderello en Italia con un contenido de 4.5 a 5%, y como casos intermediarios tenemos al campo de Wairakei en Nueva Zelanda de 0.35 a 0.5%. Los Geysers en E.U.A, de 0.6 a 1% y Cerro Prieto en México con 1.25% aproximadamente.

El principal componente de los gases es el CO_2 (de 80 hasta 97%) el que le sigue es el H_2S (de 1% hasta 19%), el resto lo forman pequeñas cantidades de CH_4 , N_2 , H_2 y algunas veces trazas de NH_3 , H_3BO_3 y gases nobles.

2.14 EFECTOS QUÍMICOS SOBRE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA.-

Los componentes químicos que se encuentran presentes en los fluidos geotérmicos, ocasionan básicamente los siguientes problemas

- a) depósitos químicos (incrustaciones)
- b) corrosión
- c) corrosión por esfuerzos

Estos problemas dependen de las condiciones físicas y químicas de los fluidos cuando éstos se ponen en contacto con los equipos. Los campos que manejan mezcla agua-vapor tienen mucho mas problemas que los campos que manejan solo vapor.

2.15 INCORUSTACION (Depositos químicos)

Hay diferentes tipos de incrustación, siendo los principales los originados por CaCO_3 (calcita), sílice (en forma de SiO_2) y sulfuros principalmente de Fe (lo forma el H_2S al entrar en contacto -

con las paredes del equipo). Estos depósitos se originan por diferentes causas y en diferentes sitios de la planta.

a) CALCITA (CaCO_3).- Se presenta principalmente en pozos de campos que manejan mezclas de agua-vapor, al ascender desde el fondo la mezcla, va perdiendo presión y parte se vaporiza instantáneamente, esta caída de presión también origina un desprendimiento de CO_2 que hace que se formen depósitos de calcio -- mediante un mecanismo de carbonatación, al ir creciendo el depósito -- primero empieza a restringir el flujo e incluso puede llegar a bloquear el pozo, en los equipos superficiales casi no se detecta este tipo de depósito.

b) SILICE.- Esta se encuentra en el fluido a niveles de sobresaturación, por ejemplo en los campos de Cerro Prieto y Wairakei. Cuando el flujo asciende a la superficie decrece su presión y temperatura, esto continúa conforme se va manejando el flujo en la superficie, esto afecta directamente sus propiedades, -- entre ellas la solubilidad decrece debido a esto la silice tiende a depositarse. Las condiciones de operación permiten que la silice continúe en estado de sobresaturación, el tiempo suficiente para evitar que precipite casi en su totalidad, hasta que el agua abandone el proceso.

En Cerro Prieto, el agua se descarga en canales abiertos a la atmósfera, aquí el agua se enfría por abajo del punto de ebullición y se deposita la silice en los canales en forma de precipitado en grandes cantidades, de aquí que los canales requieran una limpieza periódica y laboriosa.

El flujo de aguas subterráneas en la base del pozo, muchas veces se realiza a través de fisuras o irregularidades del terreno, esto origina una pequeña caída de presión capaz de vaporizar instantáneamente pequeñas cantidades de agua, cuando esto sucede la silice puede depositarse y obstruir la porosidad del terreno en ese lugar, esto impide el flujo de alimentación al pozo y lo deja fuera de operación.

c) SULFUROS.- El más abundante es el sulfuro de fierro, origi

nando por la presencia de H_2S este al ponerse en contacto con las paredes de los equipos (acero al carbón), se forma una película negra de FeS sobre la superficie, esta película protege al material de ataques posteriores este tipo de depósito no ocasiona problemas debido a su poco espesor, pero puede ser el iniciador de otro tipo de depósitos por ejemplo silice, el cuál puede llegar a ser grave.

INCRUSTACION EN LOS ALAPES DE LAS TURBINAS.-

Como la separación de la mezcla no es 100% eficiente, y si se trata de vapor, la limpieza de este en las líneas tampoco es de eficiencia total, esto trae como resultado que el vapor que se introduce a las turbinas, lleva pequeñas cantidades de humedad, la cuál contiene sólidos disueltos, que se depositan en los álabes cuando se abate la temperatura del vapor durante su expansión. Los resultados de los depósitos sobre la eficiencia del ciclo son muy notorios, por ejemplo: en Cerro Prieto ocasionan una pérdida de potencia de 4 a 5 mw de los 75mw nominales, trabajando con un factor de planta de 70%, esto origina que las turbinas se tengan que sacar periódicamente de operación y se limpien los álabes con chorros de arena. En Italia se utiliza como medio preventivo aceite para secar el vapor, obteniendo buenos resultados.

2.16 CORROSION.-

Los componentes químicos de los fluidos geotérmicos, principalmente el H_2S presente en los gases incondensables, atacan químicamente a los materiales de los equipos geotérmicos ocasionando la corrosión de estos además de que se acrecentan la corrosión por esfuerzos.

En la tabla 3 se presentan diferentes materiales que son de uso común en un campo geotérmico.

TABLA 3

Vulnerabilidad o resistencia de algunos materiales al ataque químico en presencia de fluidos geotérmicos.

<u>MATERIAL</u>	<u>COMENTARIOS</u>
<p>CATEGORIA I: Resistencia a la corrosión. Acero fundido de grano fino</p>	
<p>Acero dulce ó bajas aleaciones de acero, (en el estado no endurecido, condición perlítica)</p>	<p>El H₂S forma una película protectora, pero debajo de 30°C, esto no sucede, y el material se vuelve vulnerable. En presencia de oxígeno el material se hace vulnerable.</p>
<p>Acero 13% cromo en el estado ferrítico (suave)</p>	<p>Se emplea en los álabes de las turbinas.</p>
<p>Bronce ordinario 60/40 Aleación de bronce (Cu 70%, Zn 29%, Sn 1%) Bronce aluminio</p>	<p>Su resistencia es pobre en presencia de oxígeno.</p>
<p>Aluminio puro cromado endurecido Stellites no 1 y 6</p>	<p>vulnerable solo a muy altas temperaturas.</p>
<p>Acero (austenítico) Cr 18%, Ni 8%, Mo 3%</p>	
<p>Acero (austenítico) Cr 18%, Ni 8% u Co ó Ti estabilizado (endurecido por no-precipitado)</p>	
<p>CATEGORIA 2: Vulnerables a la corrosión,</p>	
<p>Cobre y aleaciones basadas en cobre, diferentes a los bronce -- mencionados arriba.</p>	
<p>Níquel y aleaciones basadas en níquel.</p>	
<p>Soldadura de latón</p>	<p>Potencialmente peligroso</p>
<p>Zinc</p>	<p>No es confiable a altas temperaturas.</p>
<p>Aleaciones de aluminio</p>	

CATEGORIA 3: Vulnerables a la corrosión con esfuerzo

MATERIAL	COMENTARIOS
Bronce de aluminio	
Hierro, 13% Cr (estado martensítico)	Cr 11%, Ni 35%, Mn 1.3%, Si 0.5% C 0.3%.
Aceros Mn 1.5%, Mo 0.3%	
Aceros al carbón endurecidos, o aleaciones bajas (incluyendo la estructura martensítica o cuasi-martensítica)	
La mayoría (si no es que todos) de los aceros inoxidable, si se que hay cloruros presentes (se agrava si hay oxígeno presente).	Corrosión por esfuerzo externa - ha ocurrido en campanas de acero inoxidable, cuando el agua de los pozos fuga a través de las bridas hacia ellas.
Hierro 13%Cr, en el estado suave y si los cloruros estan presentes solo en mínimas cantidades.	Se usa en los eliminadores de humedad del vapor, para proteger los álabes de las turbinas.

como ejemplos de materiales podemos citar los siguientes:
acero, 13% cromo; se usa en los álabes de las turbinas, este material en el estado martensítico (endurecido) tiene tendencia a presentar rupturas debidas a corrosión por esfuerzos, pero ofrece resistencia en el estado Ferrítico (blando) si los cloruros se presentan sólo en pequeñas cantidades.

Las condiciones más drásticas en cuanto a corrosión se refieren se presentan en el equipo de condensación del vapor y extracción de gases, ya que se encuentran presentes gases incondensables, vapor de agua y oxígeno, aqui se emplean algunas resinas o aluminio ya sea depositado en forma de película o fabricando toda la pieza con 99.5% de pureza, ya que es resistente a los gases geotérmicos, excepto a altas temperaturas.

2.17 PROBLEMAS POR LA ATMOSFERA ENRARECIDA.-

Al descargar el H_2S en la atmósfera en los alrededores, oca

sionan un aumento de concentración en la localidad, ataca las sub-- estaciones y las líneas de transmisión, para evitar este ataque se usan conductores de aluminio, al contacto con el H_2S se forma sobre el aluminio una película de sulfuro que lo protege de ataques posteriores. Ataca a los instrumentos y a los contactos de los reveladores en sus partes de cobre, aquí por lo general se usa plata. En -- los cuartos de control, las consolas tienen inyección de aire con -- su interior y son ventilados con aire purificado. Si los exitadores de los conmutadores son de cobre, la capa de sulfuro que se forma, -- provoca chispas en las escobillas creando muchos problemas razón -- por la cual se usan generadores auto-exitables.

2.18 FACTORES AMBIENTALES.-

La explotación de la energía geotérmica produce desechos que si no se controlan, pueden ocasionar cambios y contaminar el ambiente, los principales contaminantes son las sales disueltas en el agua de desecho y los gases incondensables.

- a) Agua de desecho.- la gran cantidad de sólidos disueltos -- no permite la disposición de ella sin contaminar, actualmente tenemos dos alternativas.
 - 1) evaporarla con energía solar y recuperar las sales.
 - 2) reinyectar el agua a través de pozos al interior de la -- tierra.
- b) Gases incondensables.- estos son principalmente H_2S y CO_2 por lo que respecta al H_2S para que no contamine se po--- dría recuperar el azufre, el CO_2 es equivalente al dese-- cho de una combustión, pero se podría recuperar mediante -- algún proceso para su posterior utilización.

Algunos otros países esperan en un futuro cercano poder ex-- plotar este recurso, entre ellos tenemos a Costa Rica, Guatemala, -- Etiopia, India, Antillas Francesas, Iran, Panamá, España, Kenia, -- Taiwan y Tailandia.

2.19 ENERGIA GEOTERMICA EN EL MUNDO.-

La capacidad instalada de este energético con el mundo para el año de 1976 de aproximadamente 1.4 millones de Kw, esto corresponde a la aportación de 9 países incluyendo México. De acuerdo a los reportes recibidos, en algunos otros países se espera empezar la explotación de energía geotérmica antes de 1980. Los países con capacidad instalada esperan ampliarla a corto y mediano plazo .

(TABLA 4)

TABLA 4

PAIS	EN SERVICIO MW	POR INSTALAR MW	EN PLANEACION MW
E.U.A.	522	1621	
ITALIA	420.6	41	60
NUEVA ZELANDA	202.2	165	
MEXICO	150	250	
JAPON	70	100	
EL SALVADOR.	60	30	
URSS	5.75		
ISLANDIA	2.8	70	
TURQUIA	0.5	15.5	
FILIPINAS		443	
NICARAGUA		65	30
INDONESIA			15
CHILE			
SANTA LUCIA		1.5	
T O T A L	136.35	2877	105

De los 2877 por instalar, no menos de 652 MW se instalarán entre 1977 y 1978, esto representa una velocidad de crecimiento --- anual promedio de 21.6% para estos dos años (de 1970/75 el promedio fué de 14.2%), esto pone de manifiesto que en un futuro cercano, la velocidad de crecimiento y puede ser aun mayor de lo calculado .

CAPITULO III

CAPITULO III

3. POTENCIAL GEOTERMICO DE MEXICO.-

La estrecha relación que tiene el volcanismo con la energía geotérmica, proporciona a México una gran cantidad de zonas con --- características favorables, para encontrar concentraciones de energía geotermica en el subsuelo, que puedan ser explotadas económicamente. Actualmente se tienen localizados aproximadamente 130 zonas con posibilidades (TABLA No. 5)

TABLA 5

ESTADO	No. de areas	TEMP. MEDIA °C
Aguas Calientes	5	50
Baja California	15	70-90
Chihuahua	5	60
Chiapas	2	70
Coahuila	2	40
Distrito Federal	1	40
Durango	5	60
Guanajuato	9	80
Guerrero	3	40
Hidalgo	6	75
Jalisco	16	85
Edo de México	3	80
Michoacán	22	90
Morelos	2	60
Nayarit	6	70
Nuevo León	1	50
Oaxaca	2	50
Puebla	3	65
Querétaro	6	70
San Luis Potosí	3	40
Sinaloa	3	60
Tamaulipas	2	40
Veracruz	1	50
Zacatecas	2	40

De estas manifestaciones, las mas importantes son las de Cerro Prieto en el Estado de Baja California norte y las de Eje Neovolcánico en la parte central del país, principalmente en los Estados de --- Michoacán y Jalisco. De los 78.5MW que se encontraban instalados en el año de 1977 en México, 75 MW corresponden a Cerro Prieto y 3.5 a Pathé en el Estado de Hidalgo, este último ya no produce puesto que se trató de una planta a escala piloto, pero demostró la factibilidad de la explotación comercial de este recurso energético en México.

De acuerdo a la Ref. 8 , considerando que solo se tienen perforaciones y estudios en 9 de las 130 zonas con posibilidades conocidas -- hasta ahora en forma general a partir de la información superficial de estas 9 zonas se considera que 8 pueden llegar a producir 100 Mw cada una y se encuentran en el centro del país la otra es Cerro --- Prieto en que se considera factible instalar una capacidad mínima de 450-500 Mw, de las 120 restantes se calculó en condiciones pesimistas de que solo el 30% produjera comercialmente y se estimó que pudieran soportar una capacidad media instalada de 75 Mw cada una. Todo lo anterior da en forma gruesa un potencial geotérmico para -- México del orden de 4 000 Mw instalados.

3.1 CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.-

Este campo se localiza en el extremo noroeste del país, en el Estado de Baja California Norte, en un área comprendida entre -- los $114^{\circ} 50'$ y los $115^{\circ} 48'$ de longitud oeste y los $32^{\circ} 44'$ de latitud norte, dentro del Valle de Mexicali a 30 Km al Sureste de la -- ciudad del mismo nombre, formando la provincia geotérmica junto con el Valle Imperial de E.U.A. (Fig.18)

El nombre de Cerro Prieto se debe al volcán del mismo nombre el --- cuál se encuentra en la zona, a partir de 1961 se inicia la exploración de esta área mediante la construcción de pozos con el fin de -- determinar la posibilidad de explotar este recurso, ese año se perforó el pozo I-A. En 1964 se inicia la segunda etapa de exploración

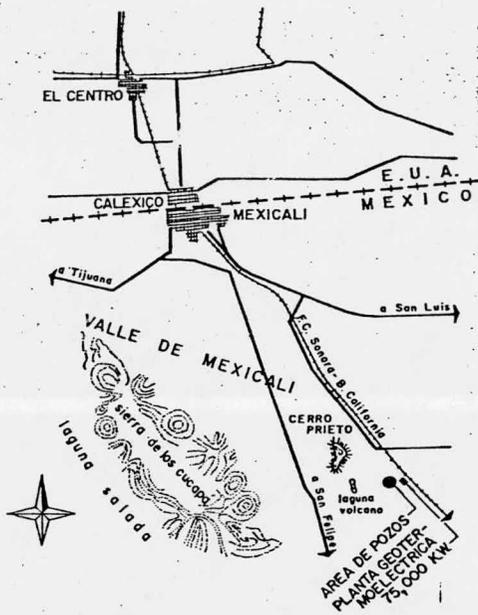


Figura 18 Localización del campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México.

de los pozos M-3 y M-5 que resultaron productores, el M-4 no produjo y el M-6 que fué dudoso.

con estos resultados, en 1966 se inicia la construcción de pozos para producción y en 1973 se instalan dos unidades de una planta generadora de 37.5 MW. Para esta etapa de 75 Mw se perforaron 26 pozos, de los cuales 22 son productores de una mezcla agua vapor y 19 --- están conectados a la planta. Actualmente estan en construcción las unidades 3 y 4 similares a las actuales y entrarán en operación en 1979 para lo cual se están perforando 14 pozos de producción y 4 de exploración.

También se encuentra en etapa de proyecto, la instalación de 4 unidades de 55 Mw cada una y colocar una unidad de baja presión - de 30 Mw de capacidad en las instalaciones actuales para totalizar 400 mw. Esta unidad de baja presión, va a utilizar el agua de desecho de las unidades de alta presión mediante una vaporización instantánea, para las etapas de 55 Mw se planea construir 22 pozos de explotación por año y 4 de exploración.

TABLA No 6

	AÑO	Unidades número	Numero y tamaño de unidades M ^w	en Servicio MW
	1973	1 y 2	2 x 37.5	75
	1979	3 y 4	2 x 37.5	75
	1980	5	1 x 30	30
CERRO PRIETO	1981	6	1 x 55	55
	1982	7	1 x 55	55
	1983	8	1 x 55	55
	1984	9	1 x 55	<u>55</u>
				TOTAL 400

Por lo que respecta al potencial de Cerro Prieto se dijo con anterioridad que era factible tener una capacidad instalada de 450-500 mwh con una vida útil de por lo menos 30 años, esto se refiere a las reservas probadas mediante estudios y perforaciones. Por otro lado este potencial no representa la capacidad total del campo ya - que ésta aún se desconoce, pero se estima que puede llegar a produ-

cir hasta 1206 Mwe (Ref. 2) con lo cual se pone en manifiesto su - importancia.

En 1975 la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto generó - cantidad de 518.4 millones de Kwh, que corresponde al 1.27% de la - generación bruta de la industria eléctrica nacional durante ese año alcanzando un factor de planta de 0.789.

Ixtlán de los Hervores, Michoacán

Se localiza en la parte central de México, dentro de la Sierra conocida como Eje Neovolcánico. Un gran número de manantiales calientes y hervidores de lodo, se manifiestan en el Valle en donde - se encuentra este campo, principalmente alineados con dirección -- este-oeste coincidiendo con los trazos de las principales fallas -- que afectan a la zona y a la región.

A la fecha se han perforado cinco pozos de exploración de diámetro-pequeño para conocer la columna estratigráfica y tres de diámetro - grande, uno de ellos hasta 1000 m de profundidad.

Los Azufres, Michoacán

Se localiza en la parte central del estado de Michoacán, en Eje Neovolcánico. En el año de 1977 se perforó un pozo de exploración llamado A-1, teniendo una profundidad de 1825m. alcanzando -- una temperatura en el fondo de 292°C.

Se utilizó tubería de 22" como máximo y de 11 3/4" como mínimo (sólo se además hasta 767m), de los 767 m. hasta los 1825 m. no existe tubería. rambien se llevaron a cabo levantamientos sismicos, de refracción, de resistividad, gravimétricos, magnetométricos y geoquímicos. El pozo A-1 tuvo un pequeño flujo de mezcla agua-vapor en la descarga, se planea hacer otras perforaciones en esta zona pero hasta la fecha no se ha podido determinar si es explotable económicamente.

La Primavera, Jalisco

El área de la primavera es una caldera volcánica de 14 Km de

diámetro con un gran número de manantiales termales y escapes de vapor, al oeste de la ciudad de Guadalajara.

En la zona se han hecho estudios geológicos y geoquímicos entre otros y se han efectuado varias perforaciones someras de pequeño diámetro, con objeto de tener un conocimiento más amplio sobre la estratigrafía y gradiente geotérmico.

San Marcos, Jalisco

A unos 80 km al suroeste de Guadalajara se localiza esta zona hidrotermal en la que se presentan escapes de vapor y manantiales termales, algunos con gastos de 300 litros por segundo. Se han efectuado en este campo estudios geológicos, de resistividad y de geoquímica, así como seis perforaciones de 50 a 300 m de carácter exploratorio y pequeño diámetro.

OTROS CAMPOS

Además de los campos descritos, se han realizado estudios en: Los Hervores de la Vega, La Soledad, San Juan Cosalá, San Pedro Mixcán, Santa Rita todos ellos en el Estado de Jalisco.

En Guanajuato se ha estudiado los siguientes lugares: Comanjilla - Abasolo, San Bartolo, La Pila y San Gregorio Cuerámano; en el Estado de Nayarit en el molote y Amatlán de Cañas. También en Santiago Maravatio Michoacán; San Ignacio, Sinaloa; Agua Blanca, Baja California.

Se tienen localizadas 130 zonas hidrotermales en el País, cuyo gasto y manifestaciones varían desde emanaciones con escurrimientos menores, hasta grandes volúmenes hidráulicos y escapes de vapor. Están distribuidas en la Península de Baja California en la Sierra Madre del Sur, guardando una estrecha relación con zonas de fracturamiento y afallamiento, la distribución de las zonas principales por estados en el País aparece en la tabla No. 5.

3.2 OTROS CAMPOS EN EL MUNDO.-

ITALIA

Son los pioneros en la exploración geotérmica, iniciaron los primeros trabajos en el año de 1905 en el poblado de Larderello. Los trabajos iniciales tuvieron como objetivo inicial extraer el ácido bórico de los manantiales con alta temperatura, para emplearlo en soldadura eléctrica. Más tarde con objeto de obtener energía eléctrica, analizaron la posibilidad de extraer mayor cantidad de vapor a través de pozos profundos.

Como resultado de estos esfuerzos se instala en 1921 el primer turbogenerador, con capacidad de 250 kw utilizando vapor del campo de Larderello, posteriormente se ha ido aumentando la capacidad, teniendo en la actualidad 400 Mw instalados y distribuidos en varias centrales.

El vapor que se obtiene en este campo es seco, (sobrecalentado), se registran temperaturas del orden de los 260°C en el fondo de los pozos y una presión máxima de 32atm. al cierre del pozo. Las perforaciones varían de 220 a 1600 metros de profundidad, los pozos tienen tuberías de 22" (559 mm) como máximo y 53/4" (146 mm)- como mínimo, estos pozos producen 140 ton/hr de vapor aproximadamente.

NUEVA ZELANDA

El principal campo es Wairakei, que se encuentra al Norte de la isla, inician los primeros trabajos en el año de 1950 y culminan en 1960 con la primer planta generadora con una capacidad instalada de 69 Mw posteriormente fué ampliada a 192Mw. Al noroeste de Wairakei existe otro campo llamado Kawerau que cuenta actualmente con una capacidad instalada de 10 Mw. En otro campo que se llama Rotorua el fluido geotérmico se usa en calefacción de casas habitación y para el acondicionamiento de aire de un hotel.

En Wairakei se ha obtenido una mezcla de agua-vapor en proporción de 7 partes por una de vapor, la producción para 190 Mw es de 10 800 ton/hr, con una presión máxima de 265 psig. En un pozo a-

670m., se encontró una temperatura máxima de 230°C., la profundidad de los pozos varía de 130 a 1300 m., las tuberías de producción varían de 76 a 203 mm. (de 3" a 8") de diámetro.

Se ha estimado que el potencial de los campos geotérmicos en Nueva Zelanda pueden producir 1.45×10^{10} Kwh/año utilizando una -- capacidad instalada de 2000 Mwe, lo que significa que solo se puede aprovechar el 15% de este potencial.

Una cosa interesante es que los trabajos iniciales en Nueva Zelanda demostraron que se podía explotar comercialmente un campo geotérmico predominantemente líquido.

JAPON

El desarrollo de la geotermia en Japón es reciente alrededor de 1970, en Matsukawa existe un campo de vapor sobrecalentado y se produce 22 Mwe, y se planea ampliarlo hasta 90 Mwe. En Otake que es un campo de predominio líquido se producen 13 Mwe. En Onuma se explotan 10 Mwe de un sistema de agua caliente desde 1973 y en Onikobe se instalaron 25 Mwe. Para 1977 se planea terminar una planta de 50 mwe en Hatchobaru.

Al norte de Japón se explora en Honshu y Hokkaido, si son positivos los resultados la capacidad para producir electricidad de recursos geotérmicos excederá los 1000 Mwe para 1982.

El potencial geotérmico de Japón lo han estimado en aproximadamente 50 000 Mwe para el año 2000.

E U A

El único campo que tiene en explotación se llama Big Geysers y se encuentra al norte de San Francisco en California, en 1970 contaba 78 Mwe y en 1975 con 502, se piensa aumentar 100 Mwe cada año y terminar en 1980. Este campo presenta características tan peculiares, como por ejemplo: para producir electricidad solo se tiene que entubar el vapor y llevarlo a la turbina, por lo que su estudio --- aporta poco o ningún interés. Tienen algunos otros campos geotérmicos en exploración como East Mesa, Salton y Brawley, todos en California.

OTROS PAISES

El Salvador instaló en 1975 30 Mwe y planea construir 60 Mwe más para completar 90 Mwe y terminarlos en 1978, en Islandia se utiliza para calefacción de casas habitación. También Chile, Turquía, Unión Soviética, Kenia, Indonesia, Canadá, Francia y Grecia tienen exploraciones geotérmicas, sin que hasta la fecha se tenga resultados definitivos sobre estos.

TABLA 7

CAPACIDAD DE GENERACION GEOTERMICA MUNDIAL EN 1975

PAIS	CAMPO	OPERACION MW	BAJO CONSTRUCCION MW
Italia	Larderello	380.6	
	Travale	15	
	Monte Amiata	22	
Nueva Zelanda	Wairakei	192	
	Kawerau	10	
México	Pathé	3.5	
	Cerro Prieto	150	30
Japón	Matsukawa	22	
	Otake	13	
	Onuma	10	
	Onikobe	25	
	Hatchabaru		50
	Takinoue		50
El Salvador	Ahuachapán	30	60
Islandia	Namafjall	2.5	
	Krafla		55
Filipinas	Tiwi		100
U. Soviética	Pauzhestk	5	
	Paratunka	0.7	
	Kizildere	0.5	
E U A	Big Geysers	502	216
TOTAL		1278.	606

TABLA 8

	<u>1976</u>	<u>1986</u>
E. U.	502	5000
Italia	421	800
N.Z.	190	400
México	75	1000
Japón	68	2000
El Salvador	60	180
U. R. R. S.	5.7	
Islandia	2.5	150
Turquia	0.5	400
Filipinas	3.5	300

incremento probable en 10 años más con lo cual se aprecia la importancia cada vez mayor que se está dando a esta energía para generar electricidad.

3.3 ALGUNAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

A continuación se dan los costos comparativos de inversión-actualizados a 1977.

TABLA 9

TIPO DE PLANTA	INVERSION Dls./KW
Nucleoeléctrica LWR(1) de 1200 MW	550
Nucleoeléctrica LWR(1) de 600 MW	725
Nucleoeléctrica HWR(2) de 600 MW	883
Termoeléctrica para carbón de 600 MW	424
Termoeléctrica para carbón de 300 MW	449
Termoeléctrica para combustóleo de 600 MW	315
Termoeléctrica para combustóleo de 300 MW	384
Geotérmica de 108 MW	690
Geotérmica de 54 MW	791
Hidroeléctrica	569

- (1) LWR: Reactores de uranio enriquecido moderados y enfriados con agua ligera.
- (2) HWR: Reactores de uranio moderados y enfriados con agua pesada

Los costos de energía generada, se dan a continuación, suponiendo un factor de planta anual de 0.8 y con los siguientes precios de combustibles.

Combustóleo	10.50 Dls./barril
Carbón	11.43 Dls./ton
uranio (U_{308})	33 Dls./lb

El costo de la energía generada en los distintos tipos de planta se expresa tomando como referencia el costo del KWH producido en una planta hidroeléctrica típica y al que se le ha sumado el costo de transmisión.

TABLA 10

TIPOS DE PLANTA	COSTO RELATIVO DE LA ENERGI A GENERADA
Hidroeléctrica con transmisión	1.000
Carbón 600 MW	1.139
Geotérmia 110 MW	1.213
Carbón 300 MW	1.252
nuclear LWR 1200 MW	1.309
Combustóleo 600 MW	1.565
nuclear HWR 600 MW	1.570
nuclear LWR 600 MW	1.613

Aquí puede verse mediante el análisis de los datos anteriores que la generación de energía geotérmica es altamente competitiva con respecto a los otros combustibles, por ejemplo, aunque el costo por KW instalado en la planta geotermoeléctrica de C.P. , incluyendo el costo de los estudios preliminares, pozos geotérmicos explorativos de producción y de desfogue de agua separada, re-

sulta del orden doble del costo del K W instalado en una termoeléctrica convencional que utilice combustóleo como combustible, el costo de operación de la planta geotermoeléctrica, incluyendo el mantenimiento de los pozos es del orden del 50% del costo de una termoeléctrica que utilice combustóleo a precio nacional.

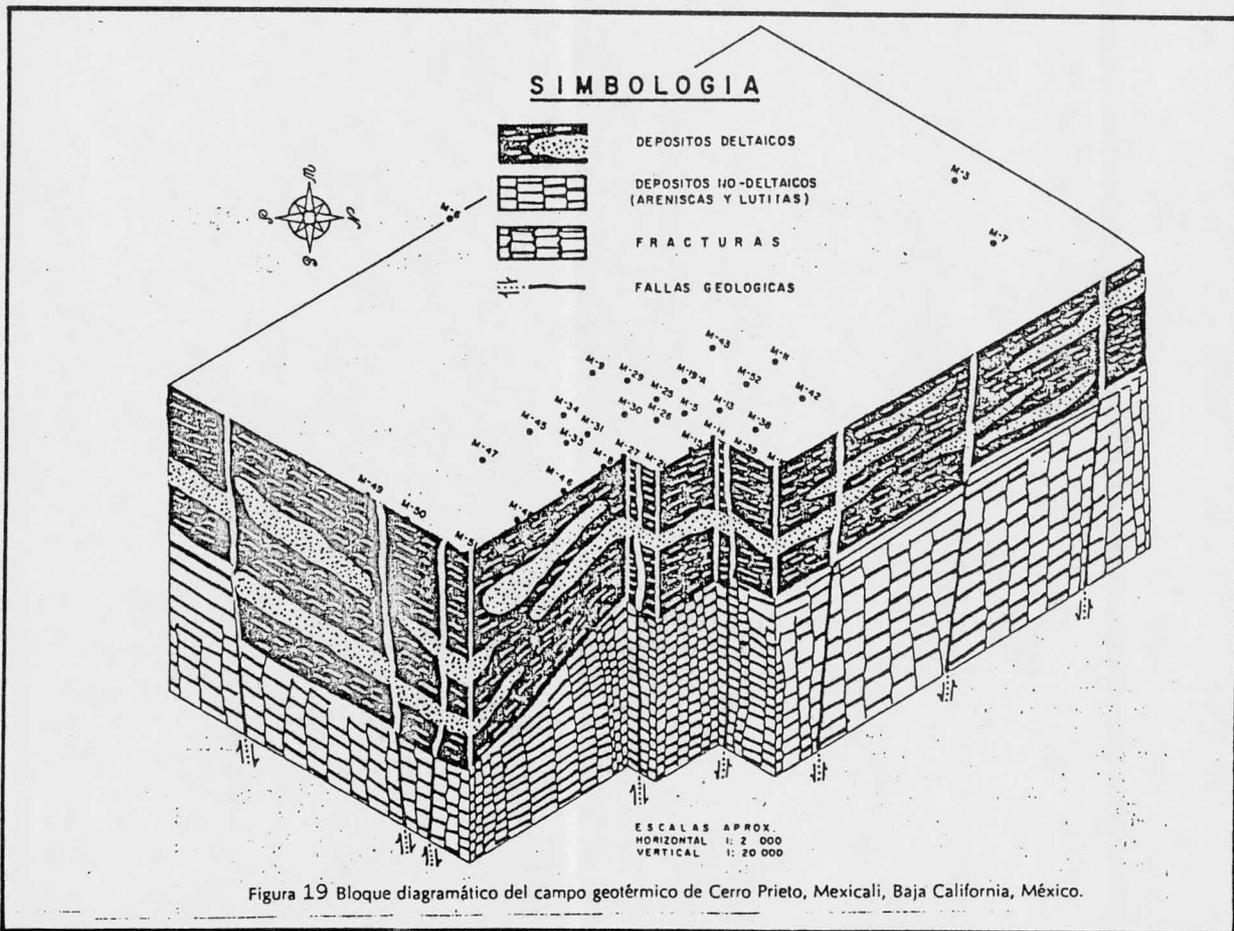
Todo lo anterior es sin considerar que pueden recuperarse -- los productos químicos disueltos en el agua desecho y el azufre del H_2S en los gases incondensables, que están presentes en los fluidos geotérmicos, esto plantea otra fase muy interesante en la generación de energía geotérmica y es la recuperación de subproductos. (Ref 12)

3.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL DE CERRO PRIETO.

En el valle de Mexicali penetran la falla de San Andrés y -- sus ramificaciones como son la falla de Imperial y San Jacinto --- siguiendo un rumbo nuroeste-sudeste, y es probable que existan --- otras fallas geológicas, con la información obtenida de los pozos - del campo de Cerro Prieto, se encontró que estos penetran dos clases de sedimentos: uno de ellos son los depósitos deltáicos y los - otros los no deltáicos.

Los depósitos deltáicos en la zona están representados por sedimentos en un gran porcentaje por arcilla, encontrándose lentes de variada granulometría así como también pequeños horizontes de grava - mezclada en ocasiones en los lentes de arena, en Cerro Prieto estos sedimentos tienen un espesor de 600 y 700m., aunque hacia el sur -- del campo donde se localiza el pozo M-51 y al este donde está el -- M-53 el espesor es superior a 1200m.

Los depósitos deltáicos descansan sobre sedimentos no deltáicos --- constituidos por lutitas y areniscas. Las areniscas están fracturadas y en ciertas áreas tienen un alto grado de fracturamiento, el - campo de Cerro Prieto se encuentra cortado por la falla de San Jacinto y esta falla ha originado una serie de fallas secundarias, -- que para el caso del campo de Cerro Prieto son importantes ya que--



junto con la zona de gran fracturamiento en el subsuelo definen --- áreas de mayor o menor facilidad para producir vapor en la superficie ya que por aquí fluye calor, agua y gases, lo cual afecta al -- agua congénita contenida en las areniscas. No se conoce con precisión el espesor de estos sedimentos no deltáicos, lo único que se sabe es para el caso del pozo M-3 se cortó la roca basal (granito)- a una profundidad de 2579 m.

3.5 ANALISIS DE EL FLUIDO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.

El campo geotérmico de Cerro Prieto, es un campo hidrotermal de tipo humedo (con promedio de agua). Los pozos perforados a una - profundidad promedio de 1300 m producen una mezcla de agua-vapor -- con una relación en peso que varía de pozo a pozo desde 0.5:1 hasta 4:1. El agua caliente que se extrae de los mantos productores, - la temperatura mas alta a la cuál esta puede encontrarse, es la temperatura de saturación que corresponde a la presión ejercida por -- una columna hidrostática de una altura igual a la profundidad del - estrato productor, tomando en cuenta la densidad del fluido geotérmico modificado por la salinidad y la temperatura. De esta forma la entalpía del agua tiende a aumentar con la profundidad del estrato-productor, promediando 320 Kcal/Kg.

La capacidad aproximada de cada pozo es de 500 000 lb/hr de la mezcla agua-vapor con condiciones promedio de 400°F de temperatura y 160 psig de presión, el agua residual es una salmuera que contiene 17 000 ppm en promedio de sólidos totales disueltos.

Los niveles de concentración de especies químicos disueltos- dependen de la temperatura y presión de el yacimiento geotérmico y también de la composición química de la salmuera resultante es variable, ya que a diferentes áreas de producción dentro del yacimiento, pueden existir diferencias significativas en la composición --- mineral, presión y temperatura.

TABLA 11

PDBO	PRESION GABEAL	PRESION SEPARADOR PSIG	PRODUCCION SEPARADOR TOR/HR			INSTALTA HP/1/3	CONSTITUYENTES QUIMICOS EN PARTES POR MILLON								SUMA DE GATINOS	PARTES POR MILLON				SUMA DE ARTONES	BOLIDOS DISUELTOS	SIO	INDICES		
			VAPOR	AGUA	MEZCLA		LI	Na	K	RD	Ca	Fe	S	CO ₂		HCO ₃	SO ₄	NO ₃	Na/K				Na/Fe	Fe/C	
M-5	108	91.6	41.5	127	168.5	528.4	21.98	8375	1874	9.59	0.44	455	22.8	444.38	15518	5.47	26.71	13.6	438.61	26118	1145	7.6	5511.8	0.7100	
M-8	91	91	23.7	94.9	78.6	578.2	23.26	5940	1508	6.85	0.59	297	19.56	314.35	10990	15.01	29.18	10.4	311.12	18450	882	7.72	5297.7	0.6200	
M-9	110	105	27.5	140.24	167.7	589	14.05	5793	852	6.21	1.86	481	12.0	503.51	16472	6.69	50.91	17.8	296.48	18354	556	11.56	3599.4	0.9400	
M-11	95	91.5	110.24	167.7	171.7	589	20.17	8524	1222	10.92	0.52	496	25.2	468.59	17783	6.44	18.55	14	445.92	27546	1045	6.83	2851.5	0.6600	
M-14	304	94.7	55.8	182.1	237.9	515.8	18.59	6797	1339	6.84	1.14	396	18.0	357.37	12600	7.29	29.2	12.8	356.41	20740	800	8.63	3695.9	0.7700	
M-19A	105	96.5	37.8	140.8	198.8	564.1	25.32	8611	2113	10.82	0.32	526	19.68	461.87	18297	5.83	22.26	16.8	458.05	27012	1148	6.93	2881.2	0.6700	
M-20	93	92	24.7	75.4	100.1	522.2	17.57	8249	1523	7.25	1.72	514	14.6	349.59	11790	6.08	25.22	6.4	335.31	20258	743	8.43	3550	0.7300	
M-21A	115	104	60.4	116.1	176.9	612.8	18.75	8595	1914	9.6	0.41	535	17.08	448.58	15538	4.26	28.44	12.8	439.15	25908	978	7.45	3317.4	0.7900	
M-25	92.3	92.5	28.5	76.4	104.7	543.1	22.48	8330	1953	10.56	0.5	479	20.08	445.17	15597	6.08	37.1	20.4	455.55	26040	1078	7.25	3019.6	0.6800	
M-26	299	105.7	71.8	209.2	281.7	557.1	15.56	8859	1447	4.52	0.56	492	14.6	357.88	18558	6.08	22.26	16	349.41	20540	958	7.83	2896.4	0.7500	
M-27	102	98.5	42.4	71.4	123.8	446.4	14.8	8007	1387	7.25	0.17	500	16.3	316.87	10956	6.81	35.61	14	305.38	18246	968	7.69	3265.1	0.7200	
M-29	99	92	39.5	240.5	275.8	595.5	10.53	7025	1287	6.84	0.59	513	15.14	367.88	12985	4.86	24.75	15.6	367.11	22122	700	9.12	3821.7	0.8200	
M-30	106	93	55.6	135.6	211.6	537.4	21.87	8141	1958	9.64	0.68	550	17.6	439.03	15295	3.65	17.31	16.3	432.16	26476	991	7.19	3219.2	0.6900	
M-31	105	97	44.9	125.4	180.4	576.0	16.98	6740	1505	8.15	0.18	518	15.72	357.39	12500	3.65	41.79	11.2	353.61	21128	824	7.62	2931.7	0.7200	
M-35	124	107.5	74.5	171.5	246	595.7	23.4	7902	2019	10.00	0.28	427	16.88	624.45	14687	2.92	34.87	14	415.24	25300	1141	6.66	2864.3	0.6400	
M-42	110	97.6	63.6	196.9	260.5	622.8	18.24	7402	1566	7.67	0.42	388	17.40	388.97	13593	1.82	33.39	7.2	381.17	22956	960	8.04	3577.4	0.7500	

NOTA: LAS LECTURAS SE TOMARON EN JUNIO DE 1977
 * Equivalentes por millón



3-15

C A P I T U L O I V

CAPITULO IV

4. INCRUSTACION EN CERRO PRIETO

La incrustación que se forma en los equipos del campo geotérmico de Cerro Prieto, es de diferentes tipos, siendo los principales detectados carbonatos (calcita y/o aragonita), silicatos (específicamente SiO_2) y sulfuros (principalmente Fe). Como las condiciones físicas, químicas y de operación varían de equipo, de pozo a pozo, y de lugar a lugar incluso dentro de un mismo equipo se obtiene una gran variedad de depositos, variando principalmente en el porcentaje de los elementos que la constituyen, en la densidad, velocidad de formación y apariencia. Por ejemplo el CaCO_3 es una sustancia cristalina, esto trae como consecuencia que debido a sus características angulares los cristales se ayudan a la mutua fijación, - en virtud de la cristalización o de la precipitación resultando una incrustación adherente. La sílice sigue un mecanismo de polimerización que aunque es una sustancia no-cristalina también forma una - incrustación adherente de gran consistencia.

Las incrustaciones son por lo general una combinación de los tres tipos anteriores (en pozos), en los equipos superficiales se localizan dos (sílice y FeS) combinados, la incrustación puede --- variar en dureza (según la escala de Mohs) desde el 1 (Talco) hasta el 7 (cuarzo).

4.1 INCRUSTACION EN POZOS GEOTERMICOS.

En los pozos geotérmicos se ha localizado incrustación que--- esta formada por los 3 tipos mencionados anteriormente (CaCO_3 , SiO_2 y FeS) éstos se encuentran combinados y forman una incrustación --- adherente, para poder explicar como se forma la incrustación en los pozos es conveniente analizar cualitativamente el mecanismo de producción de los mismos.

4.2 MECANISMO DE PRODUCCION EN POZOS

El reservorio de Cerro Prieto contiene agua sobrecalentada, al ascender ésta por el pozo pierde presión y se evapora isoentalpicamente, que en algunos casos se inicia en el mismo depósito, esto trae como consecuencia que la proporción agua/vapor varíe a lo largo de la columna del pozo. Analizando el flujo vertical a dos fases, se proponen cuatro patrones diferentes de flujo.

- a) FLUJO DE BURBUJEO: Cuando el vapor o gas se presenta como pequeñas burbujas distribuidas homogéneamente en el seno de la fase líquida.
- b) FLUJO CUANTIZADO: Consistente en el flujo alternado de "paquetes" de gas y líquido.
- c) FLUJO ANULAR: Cuando la fase gaseosa se desplaza a mayor velocidad por el centro de la tubería y la fase líquida se adhiere a las paredes formando un ángulo en la tubería.
- d) FLUJO DISPERSO: En el cuál la fase líquida se encuentra dispersa en gotas, en forma homogénea en el seno del gas o vapor.

Además de los patrones anteriores del flujo en dos fases, se tienen como límites el flujo de agua saturada y el flujo de vapor seco. La secuencia de patrones de flujo, puede explicarse también, como el resultado del crecimiento de una burbuja en el seno de un líquido.

El radio crítico o mínimo de una burbuja en el momento de su formación, según OSIPOVA (Ref 13) está dada por:

$$R = \frac{2\sigma}{\Delta P}$$

σ = tensión superficial

ΔP = diferencia de presión entre el líquido que rodea a la burbuja y la presión interna en la misma.

Al analizar la variación de la tensión superficial y la diferencia de presiones con la profundidad, se puede observar, que el radio de la burbuja irá creciendo al ascender dentro del pozo, lo cuál origina la variación de patrones de flujo antes indicado (fig. 20)

4.3 ANALISIS DE INCRUSTACIONES.

Las incrustaciones localizadas en los pozos varían en cuanto a composición, velocidad de formación y espesores, aunque casi todas ellas son del mismo tipo, esta variación ocurre de pozo a pozo, y aún dentro de un mismo pozo, esta varía a lo largo del pozo como ejemplos analizaremos los siguientes:

TABLA 12

ANALISIS COMPLETO DE INCRUSTACION. POZO M-11

DETERMINACIONES	COMO	RESULTADOS %
Silice	SiO ₂	25.1
Fierro	FeO	3.7
Cobre	CuO	0.1
Calcio	CaO	24.4
Magnesio	MgO	12.0
Sodio	Na ₂ O	0.4
Potasio	K ₂ O	0.3
Zinc	ZnO	0.2
Litio	Li	trazas
Manganeso	MnO	0.9
Estroncio	SrO	0.0
Cromo	CrO ₄	0.0
Cobalto	CaO	0.0
Niquel	Ni	0.0
Boro	B	0.0
Bario	Ba	0.0
Rubidio	Rb	0.0
Cloruros	Cl	1.4

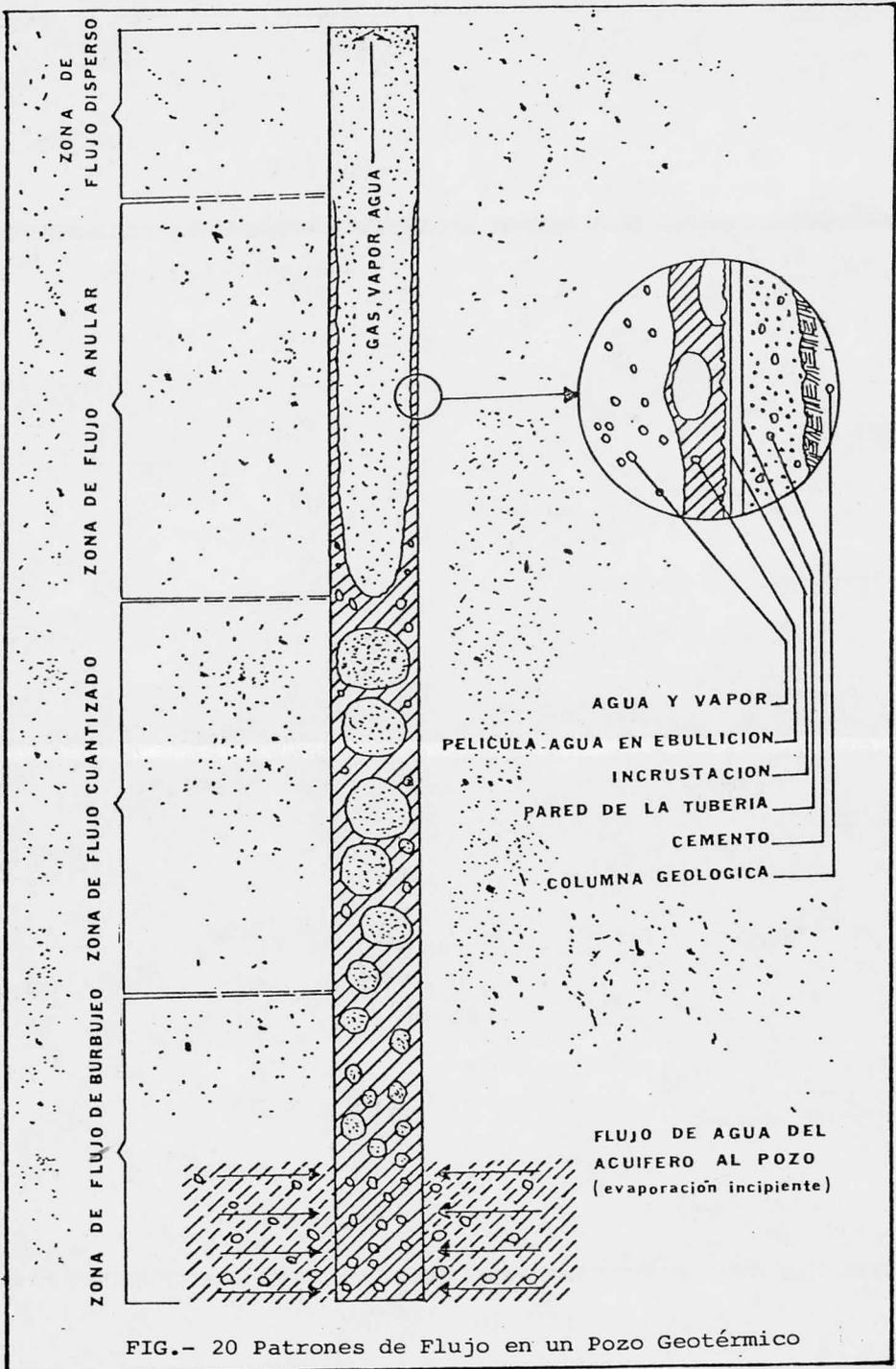


FIG.- 20 Patrones de Flujo en un Pozo Geotérmico

Oro	Au	0.0001 (1.0g/Ton)
Plata	Ag	0.0061 (61 g/Ton)
Azufre de sulfatos	S ^{II}	0.1
Azufre elemental	S ⁰	0.0
Sulfatos	SO ₄	0.0
Carbonatos	CO ₃	14.2
Perdidas por combustión a 400°C		1.4
Perdidas por combustión a 800°C		22.9

TABLA 13

ANALISIS DE INCRUSTACIONES DEL POZO M-11 (% en Peso)

PROFUNDIDAD metros	CaCO ₃	SiO ₂	FeS	NaCl	No determinado
27.6	30.53	61.10	5.73	0.71	1.93
74.3	35.00	60.05	4.31	0.64	0.0
120.9	48.92	44.34	4.59	0.43	1.72
167.7	43.9	51.60	3.67	0.46	0.37
214.4	35.93	56.96	4.36	0.59	2.16
260.7	44.44	49.54	4.03	0.59	1.40
307.2	54.70	39.35	5.08	0.64	1.43
344.7	52.00	42.28	5.08	0.64	0.0
399.8	33.89	59.46	5.81	0.84	0.0
482.6	34.85	54.10	6.08	0.97	0.0
585.3	38.55	53.91	6.52	1.02	0.0
600.0	39.31	52.52	3.74	1.63	2.8
659.5	55.54	37.44	1.64	0.49	4.9
715.4	79.74	12.87	1.25	0.28	5.86

TABLA 14

ANALISIS DE INCRUSTACION DEL POZO M-29 (% en Peso)

PROFUNDIDAD metros	CaCO ₃	SiO ₂	FeS	NaCl	No determinado
-----------------------	-------------------	------------------	-----	------	----------------

500-520 78.00 18.02 0.81 12.59 0.58

TABLA 15

ANALISIS DE INCRUSTACION DEL POZO M-9 (% en Peso)

PROFUNDIDAD	CaCO ₃	SiO ₂	FeS	NaCl	no determinado
147-170	75.76	12.41	0.82	9.46	1.65

TABLA 16

ANALISIS DE INCRUSTACION DEL POZO M-39 (% en Peso)

PROFUNDIDAD metros	CaCO ₃ %	SiO ₂ %	FeS %	NaCl %	No determinado
250	86.43	6.09	3.18	0.11	4.19
507	90.18	2.31	0.68	0.38	6.5
554	91.55	0.59	0.58	0.075	7.2
601	92.30	1.34	2.156	0.069	4.2
648	92.95	1.18	0.808	0.069	5.0
694	94.07	0.52	0.71	0.0806	4.7
750	93.59	1.54	1.21	0.116	3.6
797	93.72	1.55	0.502	0.0909	4.2
867	87.69	5.27	2.15	0.1195	4.8
890	85.47	8.37	1.53	0.2594	4.4
928	61.24	26.34	1.86	0.27	10.29
964	87.78	2.89	0.89	0.03	8.48
992	71.11	15.10	1.46	0.28	12.05
1015	70.26	15.98	4.64	0.17	8.95
1057	73.25	17.95	0.94	0.23	7.63
1076	90.56	5.18	0.98	0.14	3.14
1085	71.28	17.08	2.27	0.20	9.17
1095	73.30	17.60	3.07	0.25	5.78
1116	73.94	9.10	3.97	0.19	7.80

Al formarse los depósitos sobre las tuberías, estos no lo hacen -- uniformemente, sino que forman perfiles (Fig. 21), de acuerdo a -- las características de cada pozo, las velocidades de incrustación -- que presentan también son diferentes (TABLA 17).

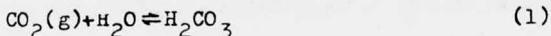
TABLA 17 :

POZO	INCRUSTA- CION ESPE CIFICA.	DIAMETRO INTERNO TURBINA EN ZONA DE INCRUSTACION	PRESION CABEZAL	PRODUCCION TOTAL	TIEMPO DE INCRUSTA- CION.
	cm/Ton	cm	Kg/cm ²	Ton/año	años
M-3	7.68 x 10 ⁻⁶	27.94	17.6	4.68 x 10 ⁻⁶	0.775
M-5	4.94 x 10 ⁻⁶	17.70	15.8	2.97 x 10 ⁻⁶	1.20
M-8	1.5 x 10 ⁻⁶	12.42	10.5	2.18 x 10 ⁻⁶	3.78
M-13	27.8 x 10 ⁻⁶	27.94	10.5	1.97 x 10 ⁻⁶	0.52
M-20	5.10 x 10 ⁻⁶	17.70	18.2	5.18 x 10 ⁻⁶	0.669
M-26	5.08 x 10 ⁻⁶	12.42	11.3	1.15 x 10 ⁻⁶	2.12
M-29	0.95 x 10 ⁻⁶	27.94	10.5	2.7 x 10 ⁻⁶	1.091
M-38	7.00 x 10 ⁻⁶	12.42	18.3	1.28 x 10 ⁻⁶	1.35

4.4 MECANISMOS DE INCRUSTACION EN LOS POZOS GEOTERMICOS.

Como se observa en los resultados de los análisis de la in-
crustación esta formada principalmente por CaCO₃, SiO₂ y FeS. De-
acuerdo a los patrones de flujo discutidos anteriormente, la in-
crustación se efectuó a través de los siguientes fenómenos que --
además son simultáneos:

- a) Cuando el flujo asciende del depósito hacia la superfi-
cie a través del pozo, este se evapora isoentálpicamente --
al ir decreciendo la presión durante el ascenso, esto ori-
gina que el CO₂ disuelto tienda a escapar de la solución, --
de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



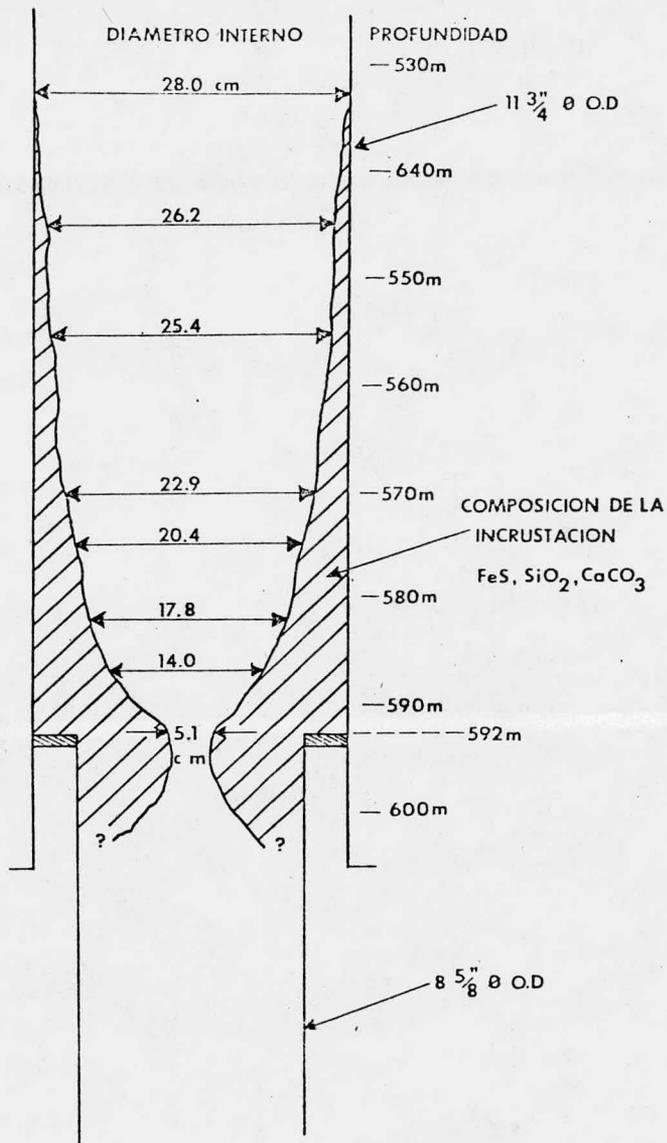
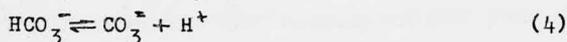
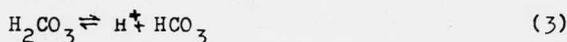
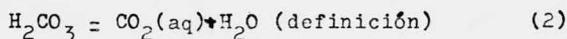


FIG. 21 Perfil de incrustación del pozo M-13
campo geotermico Cerro Prieto.

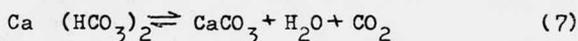
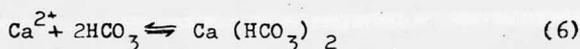


al escapar el CO_2 de la solución, las relaciones de equilibrio descritas en las ecuaciones 1 4 se desplazan hacia la izquierda, originando un aumento en el pH (porque también se desprende el H_2S), el ión carbonato reacciona con el ión Ca^{2+} para darnos CaCO_3 el cuál -- precipita.



La solubilidad del CaCO_3 en el fluido geotérmico depende principalmente de los siguientes parámetros: presión parcial de CO_2 (FIG 22) pH, composición química de el fluido y depende inversamente de la temperatura.

La reacción total en el sistema sería:



- b) La sílice solubilizada a las altas temperaturas del depósito, sobresatura la fase acuosa al decrecer la temperatura por la evaporación isoentálpica, y parte precipita en las paredes de la tubería (se discutirán los mecanismos posteriormente)
- c) El Fe reacciona con el H_2S para dar FeS (se discutirán los mecanismos mas adelante)

4.5 INCRUSTACION EN EQUIPOS SUPERFICIALES.

Al llegar la mezcla a los separadores, ésta se separa en -- las dos fases: vapor que se envía a las turbinas y agua sobrecalentada

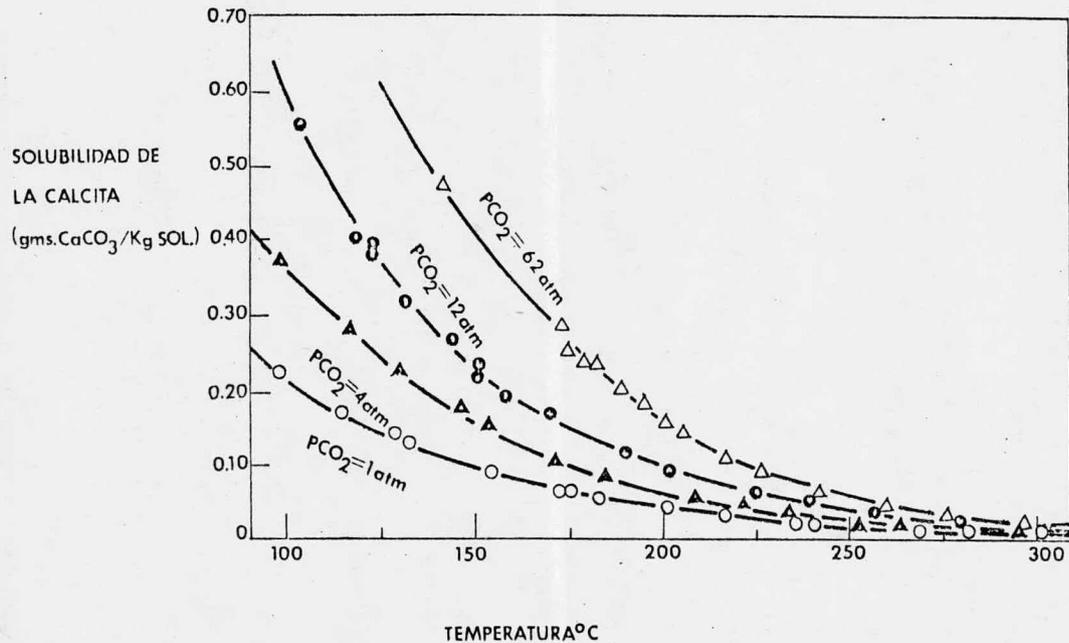


FIG. 22 La solubilidad de la calcita en agua hasta una temperatura de 300°C
a varias presiones parciales del dióxido de carbono.

da, esta agua se desecha a una laguna de evaporación o bien como en nuestro caso se manda a otro equipo similar al separador, para que mediante su evaporación isoentálpica nos proporcione vapor de baja presión (que será la unidad No. 5 en Cerro Prieto), esto trae como consecuencia una mayor concentración de la salmuera residual así -- como las correspondientes caídas de presión y temperatura. Durante la operación de los equipos superficiales, se han encontrado los siguientes datos:

SEPARADOR CENTRIFUGO TIPO WEBRE 54" Ø ESPESOR DE INCRUSTACIONES Y OBSERVACIONES (VER NOTA)

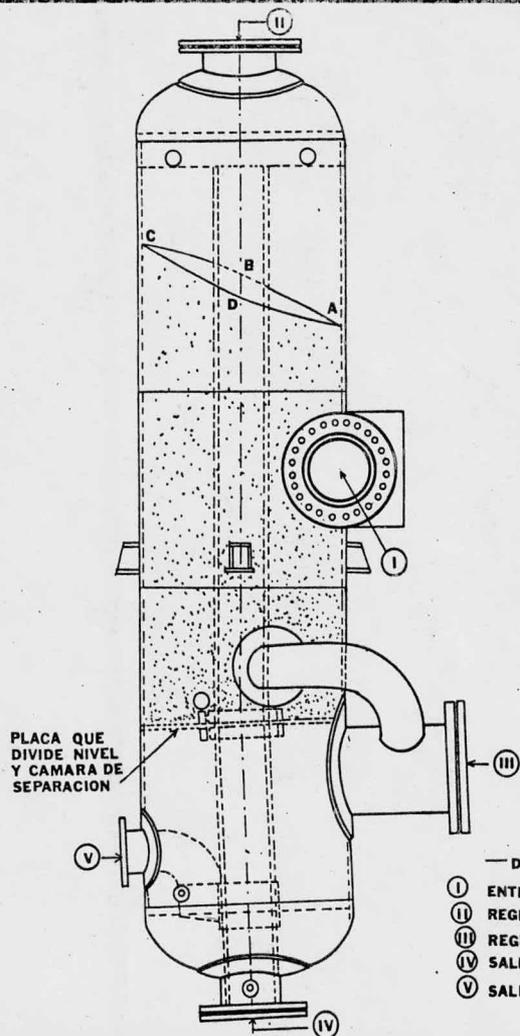
TABLA No. 18

POZO	CAMARA DE NIVEL	CAMARA DE SEPARACION	INDICADOR DE NIVEL	DISCO DE RUPTURA	CURVA ENTRADA	(1) TIEMPO DE FORMACION
M-5	BASTANTE	BASTANTE	BASTANTE	CORRIDO	BUENAS CONDICIONES	2 años 3 meses
M-8	REGULAR	REGULAR	REGULAR	CORRIDO	BUENAS CONDICIONES	1 año 10 meses
M-11	BASTANTE	BASTANTE	BASTANTE	BUENAS CONDICIONES	BUENAS CONDICIONES	2 años 1 mes
M-15A	LEVE	LEVE	BUENAS CONDICIONES	CORRIDO	EROSION LEVE	8 meses
M-19A	LEVE	LEVE	LEVE	EROSION LEVE	EROSION LEVE	2 meses
M-20	LEVE	LEVE	LEVE	CORRIDO	BUENAS CONDICIONES	1 año 8 meses
M-21A	LEVE	LEVE	LEVE	EROSION LEVE	EROSION LEVE	7 meses
M-25	LEVE	LEVE	BUENAS CONDICIONES	BUENAS CONDICIONES	BUENAS CONDICIONES	1 año 4 meses
M-30	LEVE	LEVE	LEVE	EROSION LEVE	EROSION LEVE	1 año 4 meses
M-31	REGULAR	REGULAR	LEVE	BUENAS CONDICIONES	BUENAS CONDICIONES	1 año 8 meses
M-34	REGULAR	REGULAR	LEVE	CORRIDO	EROSION LEVE	1 año 9 meses
M-35	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENAS CONDICIONES	BUENAS CONDICIONES	1 año 1 mes

NOTA: LEVE INCRUSTACION - de 0 hasta 1/8" de espesor
 REGULAR INCRUSTACION - de 0 hasta 1/2" de espesor
 BASTANTE INCRUSTACION - de 0 hasta 1 1/4" de espesor

(1) Desde que el Separador entra al Sistema inicialmente hasta Abril de 1975

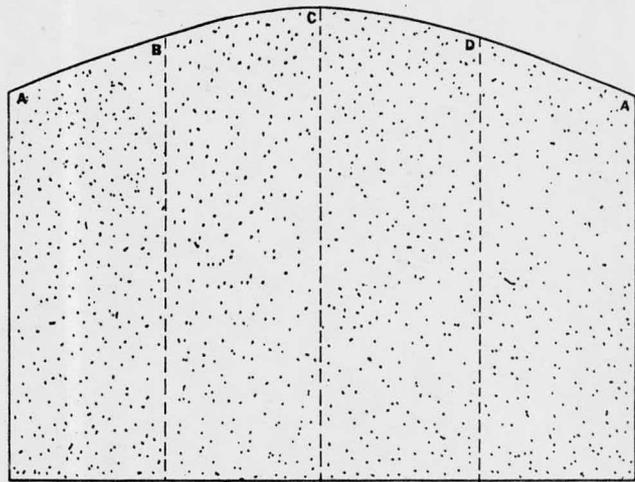
De acuerdo a los resultados de las evaluaciones, los separadores de los pozos M-5 y M-11, observaron más incrustación en las cámaras de separación y nivel respectivamente (FIG 23), como observación se nota que la incrustación disminuye en espesor conforme se va acercando a la parte superior del separador.



PLACA QUE
DIVIDE NIVEL
Y CAMARA DE
SEPARACION

Letras	Observaciones
A	Incrustación menor altura
B y D	" altura media
C	" menor altura

datos referidos a la placa que divide
camaras de separación y de nivel



PLACA QUE DIVIDE CAMARA DE SEPARACION Y NIVEL

(REF. 23)

— DESCRIPCION —

- I ENTRADA DE MEZCLA
- II REGISTRO HOMBRE CAMARA DE SEPARACION
- III REGISTRO HOMBRE CAMARA DE NIVEL
- IV SALIDA DE VAPOR SEPARADO
- V SALIDA AGUA SEPARADA

FIG. 23

Areas de incrustación en
camaras de separación de
los separadores de 54 #
Pozos M-5 y M11

CAPITULO V

CAPITULO V

PROPIEDADES DE LA SILICE

5.1 FORMAS CRISTALINAS, AMORFAS Y ACUOSAS DE SILICE (SiO_2).

SILICE CRISTALINA: Especies de silice con estructura cristalina.

- a) Macrocrystalina
cuarzo, tridimita, o cristobalita
- b) Criptocrystalina
Consiste de cristales fibrosos con poros submicroscopicos; el término general es calcedonia.

SILICE AMORFA: Formas de silice carentes de estructura cristalina.

- a) Silica gel.
Silice amorfa rígida con un contenido de agua de 20 a 50%.
- b) Silice gelatinosa.
Aparece en solución como un agregado o como un gel continuo.
- c) Sol de silice ó silice coloidal.
Silice dispersa en agua en partículas de dimensiones coloidales (10^{-3} a 10^{-6} mm)
- d) Opalo
Es la forma natural que presenta, incluyendo la silice de diatomita y radiolarita, generalmente con menos de 12% de agua.
- e) Silice vítrea.
Preparado por el subenfriamiento de una masa fundida.

SILICE ACUOSA: Especies de silice en solución.

- a) Acido Ortosilícico
Es la principal forma de silice en soluciones saturadas -

con pH menor a 9 es el monómero H_4SiO_4 , arriba de pH9 se disocia.

b) Disuelta o silice calorimétrica.

La silice en solución verdadera (H_4SiO_4) que reacciona -- con molibdato de amonio durante los 2 primeros minutos -- después que las soluciones son mezcladas.

c) Silice polimerizada

Son ácidos silícicos que contienen 2 (disilícico), 3 (tri silícico) o más átomos de silicio por molécula (incluyendo suspensiones coloidales)

d) Silice Total

Todas las especies de silice en solución pueden determinarse colorimetricamente siguiendo la conversión de silice polimerizada a él monomero por tratamiento con NaOH o por Técnica gravimétrica.

5.2 SOLUBILIDAD DE SILICE.

Datos de solubilidad para diferentes fases de silice a lo largo de la curva de presión de vapor para agua se ve en la fig. (28), se observa que la silice amorfa es mas soluble que el cuarzo a cualquier temperatura, los datos se obtuvieron teniendo un pH cercano a 7. En soluciones saturadas con pH menor pero cercano a 9, se tiene que la silice forma una dispersión molecular verdadera y la especie acuosa primaria es la molécula monomérica neutral de ácido ortosilícico H_4SiO_4 . Las solubilidades de todas las variedades de silice se incrementa a valores de pH que excedan a 8.5 como un resultado de la desviación de el ácido ortosilícico a los aniones $H_4SiO_4^-$ y $H_2SiO_4^{-2}$ donde la $K_1 = 10^{-9.8}$ (Figs.24, 25, y 28)

5.3 SILICE EN SOLUCION

Cuando una solución de silice empieza a sobresaturarse con respecto a la silice amorfa y si se mantiene en reposo, o se enfría, el cuarzo no cristaliza.

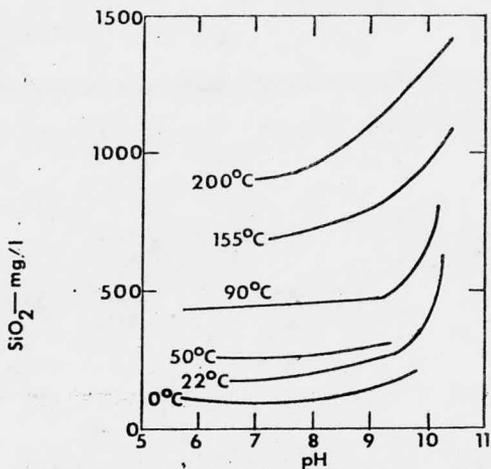


FIG. 24 SOLUBILIDAD DE SILICE AMORFA EN FUNCION DEL pH A DIFERENTES TEMPERATURAS

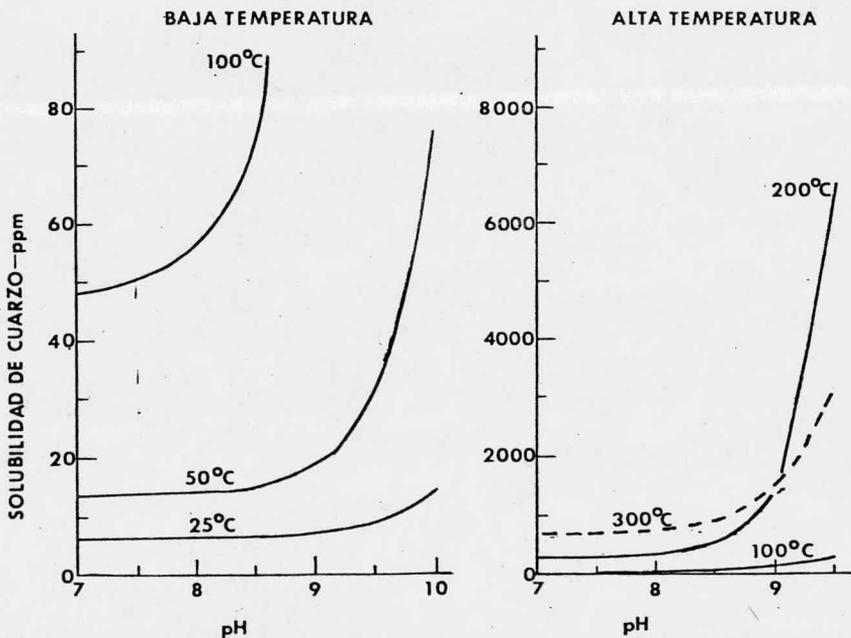


FIG. 25 SOLUBILIDAD CALCULADA DE CUARZO

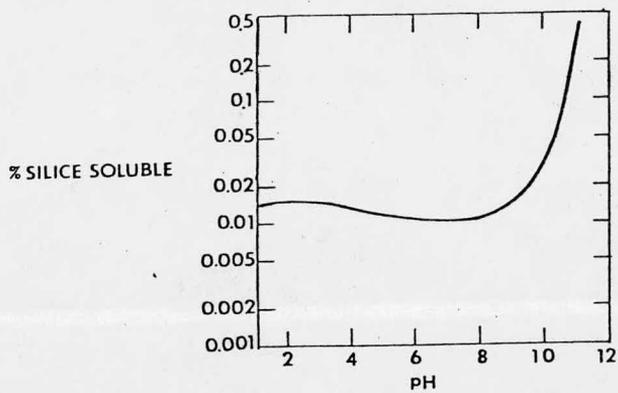


FIG. 28 SOLUBILIDAD DE SILICE EN AGUA (25°C)

En cambio la sílice disuelta polimeriza lentamente a una suspensión coloidal que puede precipitar al final como sílice amorfa. Otra particularidad es que la sílice en solución es incapaz de adaptarse -- rápidamente a las condiciones de cambio, especialmente cuando la -- temperatura decrece.

En soluciones sobresaturadas a bajas temperaturas (menores a 100°C) polimeriza lentamente por un período de varios meses o años hasta que la concentración de sílice disuelta se reduce a el valor de equilibrio. Las velocidades de disolución de las fases sólidas de sílice son -- también bajas a temperaturas bajas (Fig. 26 y 27).

A altos niveles de sobresaturación el sol de sílice puede eventualmente precipitar como masas floculentas en soluciones debilmente bá-- sicas, o puede llegar a formar un gel en soluciones debilmente áci-- das.

En soluciones inicialmente sobresaturadas, las concentraciones de e-- equilibrio de sílice disuelta se alcanzan relativamente rápido (pH= 7)

5.4 POLIMERIZACION DE SILICE DISUELTA.

De acuerdo a datos experimentales la velocidad de polimeriza-- ción de la sílice disuelta de monómero a polímero (incluyendo suspen-- siones coloidales con pH, salinidad, concentración, temperatura y -- la interacción con otras especies disueltas. Las partículas coloida-- les de sílice en soluciones alcalinas están cargadas negativamen-- te y debido a esto continúa hasta la coagulación debido a sus mu--- tuas repulsiones (Carman)

Sin embargo, en la presencia de sales solubles cargadas nega-- tivamente las partículas son susceptibles de neutralización por ca-- tiones.

A valores pH entre 1-3 las partículas de sílice coloidal pasan a -- través del punto isoeléctrico (punto donde su carga electrostática es neutralizada) y entonces son susceptibles de agregarse rápidamen-- te a pH= 3 las partículas coloidales tienen carga positiva y son -- afectadas por otros cationes en solución. (Ilcr)

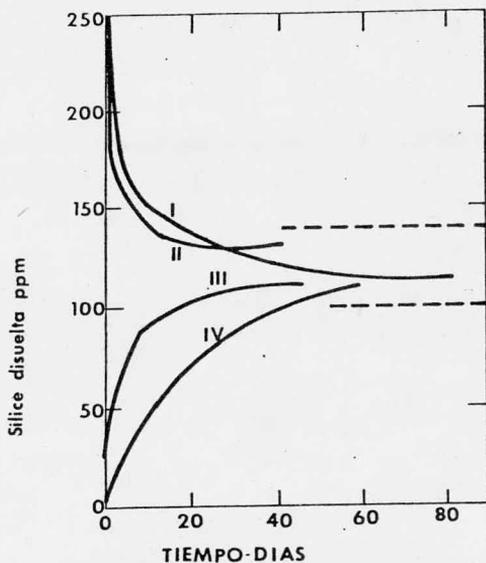


FIG. 26
 APROXIMACION A LA SOLUBILIDAD
 DE EQUILIBRIO DESDE AMBOS LADOS

CURVA	pH	SiO ₂	SiO ₂
		INICIAL TOTAL	DISUELTA INICIAL
I	7.7-8.3	320	284
II	7.3-7.9	975	544
III	8.3-7.4	187	25
IV	5.2-5.6	SILICA GEL EN AGUA	

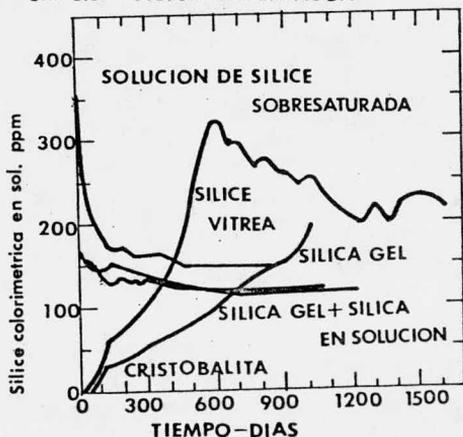
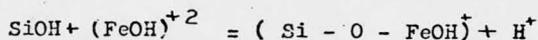


FIG. 27
 VELOCIDADES DE SOLUCION Y
 POLIMERIZACION DE SILICE
 AMORFA EN AGUA A 25°C

La presencia de iones $(\text{OH})^-$ y $(\text{F})^-$ catalizan la polimerización de sílice coloidal, el efecto catalítico de $(\text{F})^-$ y $(\text{OH})^-$ como una función del pH se da en la Fig. 29. La velocidad máxima de polimerización sucede entre valores de pH entre 5 y 8, en soluciones más básicas el incremento de carga negativa de las partículas coloidales --vence el efecto catalítico del incremento en concentración de $(\text{OH})^-$ (Iler; Goto).

En la Fig. 30 se muestra la velocidad de polimerización de ácido silícico como una función del pH y en la Fig. 31 se muestra la polimerización en función del pH en soluciones básicas. FOURNIER reporta que la sílice disuelta coprecipitará con hidróxidos de Fe, Al, Mg, Mn y otros elementos, sin embargo las reacciones no ocurren a bajo pH a el cual los hidróxidos de metal normalmente precipitan, la adsorción puede proceder por reacción de grupos silanol con los hidróxidos metálicos.



como ejemplo tenemos la coprecipitación con Aluminio Figs. 32

Las velocidades de polimerización (y disolución) aumentan cuando se aumenta la temperatura (KITAHARA), GOTO propone la siguiente ecuación para la velocidad de polimerización de la sílice disuelta.

$$-\frac{dc}{dt} = k(C - c_e)^n$$

donde:

- C = concentración de sílice monomérica
- C_e = concentración de equilibrio de sílice monomérica a una temperatura en particular
- k = constante de velocidad
- n = orden de reacción

KITAHARA reportó que $n=2$ en soluciones ácidas y $n=3$ en soluciones-

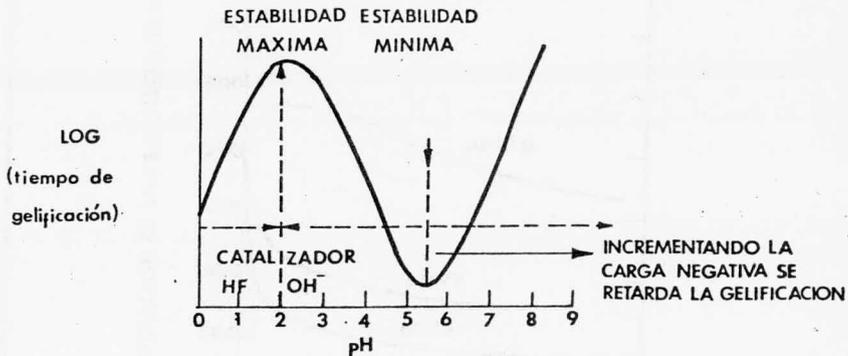


FIG. 29 ESTABILIDAD DEL SOL: RELACION ENTRE LOG(tiempo de gelificación) V.S PH.

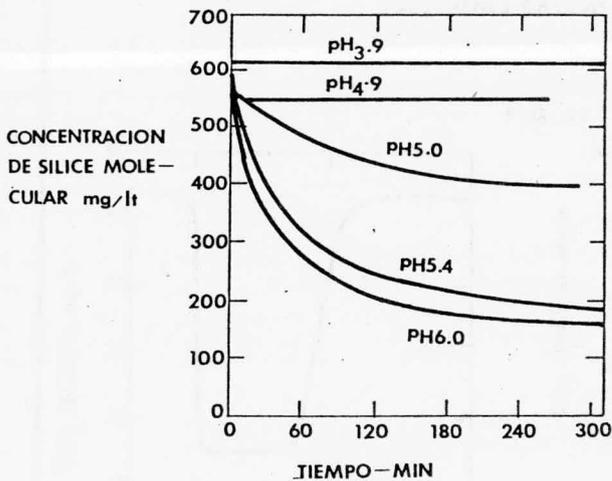


FIG. 30 POLIMERIZACION DEL ACIDO SILICICO EN SOLUCION ACIDA.

alcalinas, las gráficas de concentración de sílice monomérica y $-\log K$ como funciones del tiempo y el inverso de la temperatura respectivamente, indican que las velocidades de polimerización se incrementan cuando se incrementan las temperaturas. (Fig. 31)

5.5 PROPIEDADES DE LOS SULFUROS.

La incrustación formada por sílice va invariablemente acompañada por sulfuros principalmente de Fe y en algunos casos de Cu, la participación exacta en la deposición de sílice que es la que domina los procesos de incrustación es incierta. Sin embargo los efectos -- conocidos de los iones metálicos en las reacciones de agregación de sílice, nos hace suponer que metales como aluminio, fierro y cobre, promueven el enlase de las partículas de el sol de sílice para formar una gel de estructura rígida.

La ocurrencia de parte de el fierro y azufre en la incrustación en forma de cristales no necesariamente indica un mecanismo de cristalización directa desde la solución, se puede demostrar que parte del fierro y azufre en la incrustación no esta presenta como sulfuros, sin embargo es posible que la formación de el cristal pueda -- también resultar de un proceso de difusión en la matriz de la gel de sílice.

La disponibilidad de azufre en solución parece ser el factor limitante en la formación de sulfuros que pueden formar incrustación su oxidación ocurre a través de numerosas reacciones incluyendo las de la tabla 19 . Es evidente que la distribución de especies de -- azufre, el pH y la fugacidad de el oxígeno estan interrelacionadas.

TABLA 19

CONSTANTES DE EQUILIBRIO PARA LA OXIDACION DE ESPECIES DE AZUFRE * -
523°K (250°C)

REACCION	LOG K
$2H_2S + O_2 = S_2 + 2H_2O$	30.6
$H_2S + 2O_2 = H + HSO_4^{-1}$	62.5
$H_2S + 2O_2 = 2H + SO_4^{-2}$	57.1
$HS^{-1} + 2O_2 = 2H + SO_4$	64.4

(continúa)

$2H$	S^{-2}	$1/2O_2$	$= 1/2S_2$	H_2O	31.3
$2HS^{-1}$	C_2	$2H$	$= S_2$	$2H_2O$	45.3
S^{-2}	$2O_2$	$= SO_4^{-2}$			72.7

Todas las reacciones de oxidación anteriores tienen constantes de equilibrio grandes y se desplazarán a la derecha del equilibrio a esa temperatura si hay oxidantes disponibles. Sin embargo, consideraciones cinéticas pueden ser igualmente importantes en un fluido geotérmico fluyendo rápidamente.

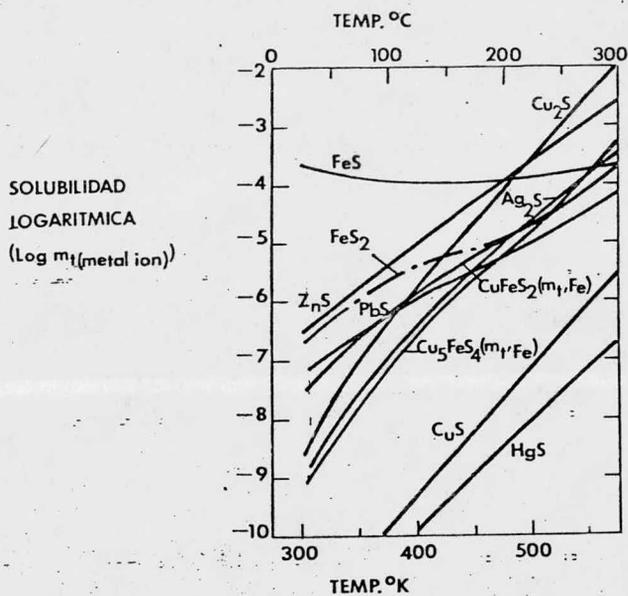


FIG. 35 SOLUBILIDADES DE LOS SULFUROS EN NaCl 3M.

CAPITULO VI

CAPITULO VI

6.1 MECANISMOS PROBABLES DE INCRUSTACION EN SISTEMAS GEOTERMICOS

En la operación de un campo geotérmico como el de Cerro Prieto, que utiliza vapor de un sistema en el cuál predomina la fase líquida, la planta se alimenta de vapor producido en un área de 1-km² conteniendo alrededor de 15 pozos, donde la capacidad promedio aproximada es de 500,000 lb/hr de una mezcla agua vapor conteniendo aproximadamente 25% de vapor a 400^oF y 160 psig el agua residual es una salmuera que contiene 17000 ppm (partes por millón) en promedio de sólidos totales disueltos.

Los niveles de concentración de especies químicas disueltas dependen de la temperatura y presión de el yacimiento geotérmico y también de la composición de los minerales complejos en las rocas del yacimiento, la composición química de la salmuera resultante es variable ya que a diferentes áreas de producción dentro del yacimiento pueden existir diferencias significativas en la composición mineral, presión y temperatura.

Hay diferentes especies químicas en salmueras geotérmicas -- con una notable tendencia a precipitar, en primera instancia está la sílice, que posee una capacidad de incrustación muy significativa ya que su solubilidad decrece rápidamente cuando decrece la temperatura, la sílice puede precipitar con otros cationes en las salmueras, principalmente cationes polivalentes.

La sílice al ser disuelta en el yacimiento a alta temperatura entra a la fase acuosa como monómero del ácido silícico. El nivel de solubilidad de cuarzo, en nuestro caso el monómero del ácido silícico está en equilibrio con cuarzo, cuando la solución fluye hacia la superficie sufre una disminución en su temperatura y presión, afectando enormemente la solubilidad de las especies -- presentes, esto origina que la sílice pueda precipitar a través de varios mecanismos:

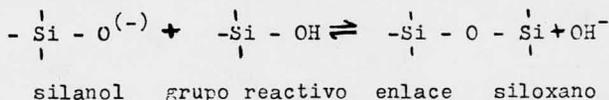
- 1) La presencia de iones metálicos (cationes polivalentes) --

tales como Ca, Mg, Fe ó Al, interaccionan con la sílice para formar silicatos metálicos que poseen un bajo índice de solubilidad, por lo cual se ven obligados a precipitar rápidamente, o sea la precipitación está controlada por la interacción entre las especies presentes.

2) Alternativamente, los productos de corrosión existentes -- dentro de la tubería, actúan como un centro activo para que los iones metálicos (principalmente Fe) reaccionen para formar mediante una nucleación estacionaria, silicatos metálicos sobre la superficie de la tubería.

3) El monómero del ácido silícico puede precipitar directamente de soluciones saturadas, mediante una reacción de polimerización (por ejemplo, grupos OH reactivos)

Esta "precipitación" es actualmente la formación de un enlace siloxano (dos átomos de silicio unidos mediante un puente de oxígeno) sobre un sitio activo, entre un grupo reactivo OH y uno de los grupos silanoles de el monómero del ácido silícico.



Los sitios activos pueden provenir de incrustación formada-- con anterioridad, superficies corroídas, partículas coloidales o sílice amorfa presente.

4) Si no hay sitios activos presentes, el ácido silícico puede polimerizar para formar sílice coloidal.

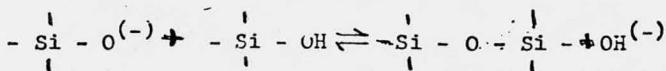
5) La sílice coloidal puede continuar la polimerización aún más y precipitarse a sí misma en la forma de una masa gelatinosa.

6) O bien la sílice del inciso 4 puede precipitar por la pre

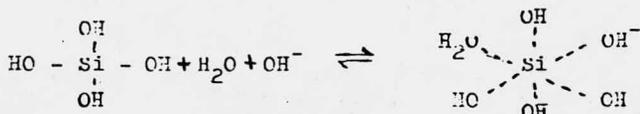
Presencia de pequeñas cantidades de cationes polivalentes tales como Ca, Mg, Fe, o Al, algunas evidencias sugieren que aniones de silicatos solo pueden precipitar con cationes metálicos, entonces el pH es un factor muy importante.

6.2 DISCUSION DE LOS MECANISMOS.

Diferentes mecanismos para la polimerización de ácido silícico se pueden proponer, involucra la colisión de dos moléculas de ácido silícico, una ionizada y otra no ionizada:

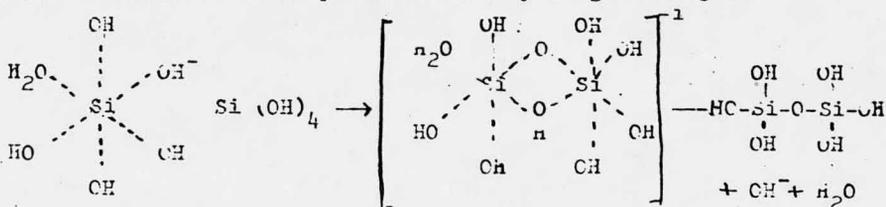


Iler, (referencia No.) propone la siguiente reacción, para convertir el monómero de ácido silícico a ion monosilicato:



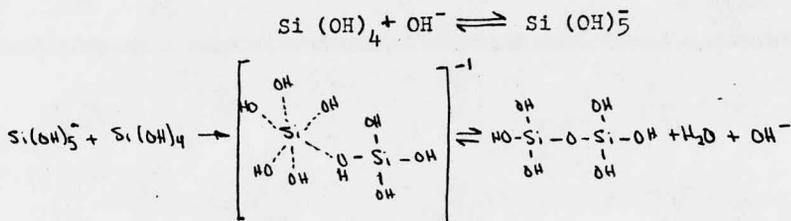
Esta reacción se inhibe en un medio fuertemente ácido, ya que es catalizada por los iones hidrógeno.

En la etapa de polimerización, el ión silicato reacciona para formar un producto intermediario, en el cuál se forma un ión disilicato, con átomos de silicio con un número de coordinación de 6, el enlace siloxano se forma posteriormente y se genera agua:



Alternativamente, la reacción puede ocurrir siguiendo el siguiente mecanismo, en el cuál solamente un átomo de silicio obtiene tempo-

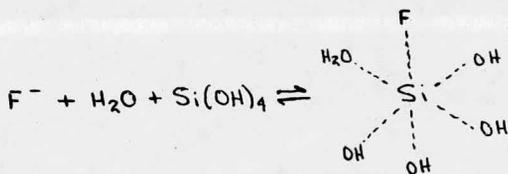
almente un número de coordinación de 6.

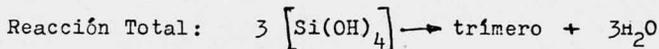
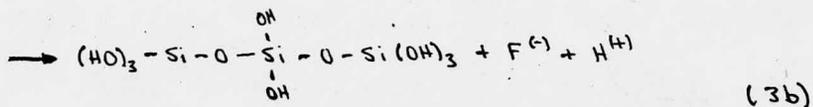
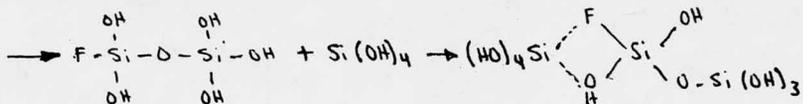
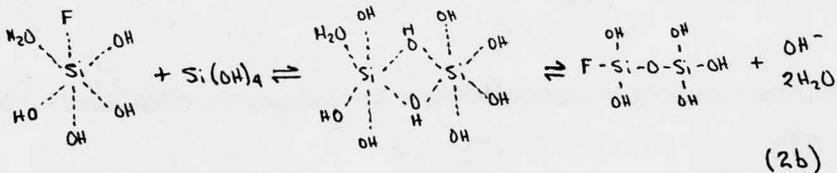


La reacción en un medio fuertemente ácido puede explicarse siguiendo el mecanismo hasta la ecuación No. 3.

Ahora suponiendo que un ión fluoruro catalizara la reacción en su desarrollo LLER sugiere (Referencia No. 12).

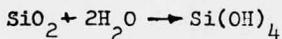
Las siguientes 3 etapas del mecanismo involucran la formación de un dimero (fluorosilicato), el cuál establece un equilibrio antes de la reacción de un monómero adicional para formar un trímero:



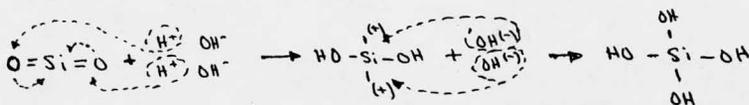


Las dos primeras etapas alcanzan el equilibrio rápidamente, por lo que es la tercera etapa la que controla la velocidad.

La reacción de formación del monómero del ácido silícico.



MECANISMO:



De acuerdo a lo anterior, los incisos 3, 4 y 5 involucran una reacción de condensación entre pares de grupos silanoles para formar -- enlaces siloxanos para los incisos restantes es necesario estudiarlos más a fondo para encontrar las velocidades de sus mecanismos y obtener una visión completa de el fenómeno

6.3 SULFUROS.

El principal sulfuro que interviene en la formación de in--- crustaciones es el sulfuro de fierro, las reacciones de la (1) a la (8) Fig. 6.3 muestran un diagrama esquemático de los procesos que -- podrían influenciar la precipitación de elementos formadores de in- crustación, se ilustra para FeS. Se hace notar que estas reacciones no definen completamente el sistema químico, además fueron seleccio- nados arbitrariamente de un conjunto de interacciones que no pueden ser ilustrados muy bien, sin embargo el principio es el mismo y --- estas simples consideraciones de acción de masas podrían conducir-- nos a algunas conclusiones útiles.

La reacción crítica es el equilibrio de la precipitación de- la reacción (3) para la cuál el producto iónico es conocido, sin em- bargo algunos otros procesos, como los que se muestran en la rig. afectan las actividades de Fe^{2+} y S^{2-} y determinaran si hay un exceso presente que sobrepase este producto y precipite en la matriz de la incrustación de sílice. En otras palabras, Fe y S pueden ser "alma- cenadas" en algunas especies cuyos números y estabilidades determi- nen la actual concentración de iones simples, reacciones de cloru-- ros complejos como el (5) son de particular importancia.

Las relaciones de solubilidad para algunos de los sulfuros - que forman incrustaciones se muestran en la Fig. 35 y son usados -- como aproximaciones para salmueras geotérmicas. En dichas salmueras por supuesto, existen otras especies reactivas que pueden alterar - su comportamiento en la precipitación. Por ejemplo, la reacción (4) indica que a una caída de presión que resultase en el desprendimien- to de CO_2 gaseoso podría en si mismo generar una precipitación, si- el equilibrio se mantuvo igual.

Las reacciones (1), (2) y (6) a la (8) son procesos por los-

cuáles la actividad de S^{2-} puede ser reducida a través de una conversión a otras especies, por ejemplo mejorando la solubilidad de FeS_2 .

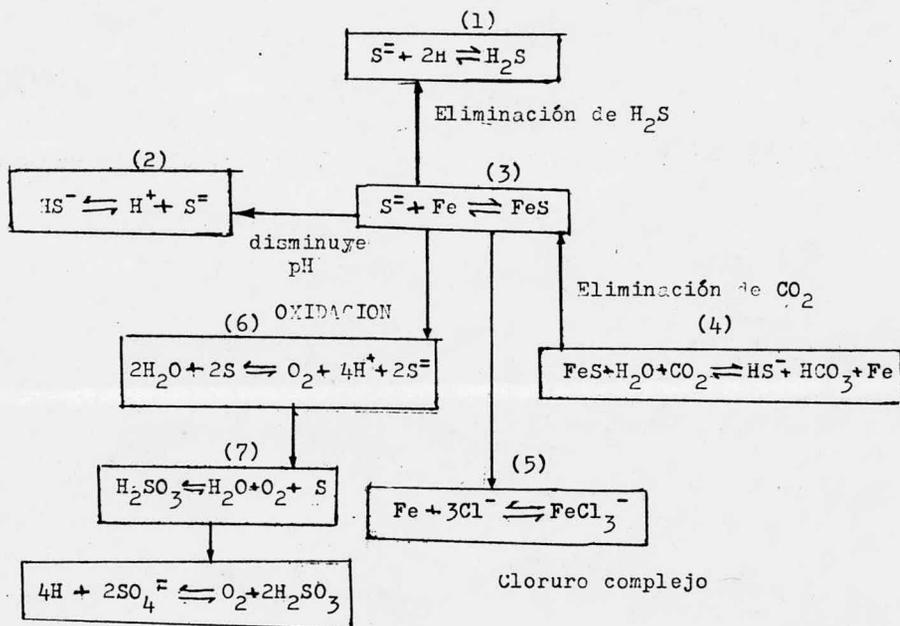


Fig. 6.3 Diagrama esquemático de reacciones típicas en la formación de incrustación de sulfuros.

CAPITULO VII

CAPITULO VII

ESTUDIO EXPERIMENTAL.

El estudio experimental solo se realizó en equipos superficiales, para tal efecto se instalaron cuatro separadores piloto centrífugos - verticales tipo WEBRE, así como arreglos de tuberías para pruebas - sin separación de vapor, también se efectuaron observaciones en --- equipos de separación de las mismas dimensiones que se usan actualmente en producción incluyendo un separador horizontal que maneja - 250 Ton/hr de salmuera.

Los factores más importantes considerados en la ocurrencia de los - depósitos son: la composición de la salmuera, las variaciones de -- temperatura, las variaciones de presión, las variaciones de la velo cidad de flujo y el pH.

7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PILOTO Y ARREGLOS DE PRUEBA.

Instalación en el POZO M-21A

a) Equipos piloto con separación de vapor en serie (Fig. 40)

Se tienen dos separadores centrífugos tipo webre instalados en serie, se realizan pruebas a una presión intermedia de 50 psig y a una presión baja que es de 15 psig. Con el objeto de comparar con una sola separación a 15 psig.

El arreglo consiste en primer lugar de un tanque o separador vertical centrífugo tipo Webre de 112cm de alto por 50cm de diámetro, equipado con una tapa superior bridada para efectuar observaciones en su interior, la descarga de vapor se hace a través de un tubo concéntrico con respecto al tanque y se mide el flujo a través de un cono calibrado. La descarga de agua se efectúa por el fondo del tanque y está conectada con un tanque de nivel de 55cm de largo por 25 cm de diámetro equipado con un nivel de vidrio. En la descarga de este tanque se tiene una válvula de diafragma, después de la válvula se tiene un orificio para regular el flujo que entra al segundo separador, este segundo separador es de las mismas dimensiones que el primero y con los mismos arreglos, solo que la descarga de agua es lateral a continuación se tiene una manguera de 3" de diámetro de alta presión con una válvula de pinza de diseño local, la cuál regula el flujo con buena precisión, esta manguera descarga a un silenciador vertical de 60cm de diámetro por 150cm de alto, la descarga de este va a un cajón equipado con vertedor, que es donde se mide el flujo de agua.

Los separadores están equipados en la descarga de vapor con conos calibrados, se tiene como instrumentación termómetros y monómetros.

b) Equipo de pruebas sin separación de vapor (Fig. 44)

Se tiene un arreglo de tuberías para estudiar la formación de incrustaciones sin separación de vapor (dos fases). El -

El equipo consiste de cinco tuberías equipadas con monómetros, orificios de regulación y válvulas de diferentes tipos, con una longitud de 8m equipadas cada una con un silenciador. una modificación-- incluye la variación de diámetro en dos arreglos con el fin de determinar variación de incrustación a diferentes presiones y velocidades.

Instalación en el pozo M-20

El equipo de separación es similar al instalado en el pozo M-21A -- pero solo se tiene un separador operando a 15 psig. El arreglo de -- tuberías de prueba sin separación de vapor es también similar al -- del pozo M-21A. (Figs. 43,39)

Flujo mezclado de pozos M-20 y M-21A Fig. 41

Cerca de la laguna de evaporación se tiene un equipo igual a los anteriores pero la alimentación se toma de las tuberías de descarga -- de agua separada de los pozos M-20 y M-21A, cuyos flujos se mezclan a la entrada del equipo piloto. La diferencia básica estriba en este equipo descarga mediante una línea de 3" de \emptyset y de 100m de longitud, dicha línea se mantiene presurizada mediante una válvula de -- pinza de 3" \emptyset colocada en una manguera de hule en la punta de la -- tubería, el separador trabaja a 15 psig. en este equipo se tiene -- programadover el efecto de mezclar el flujo de dos pozos y descargar directamente a la laguna mediante una línea presurizada.

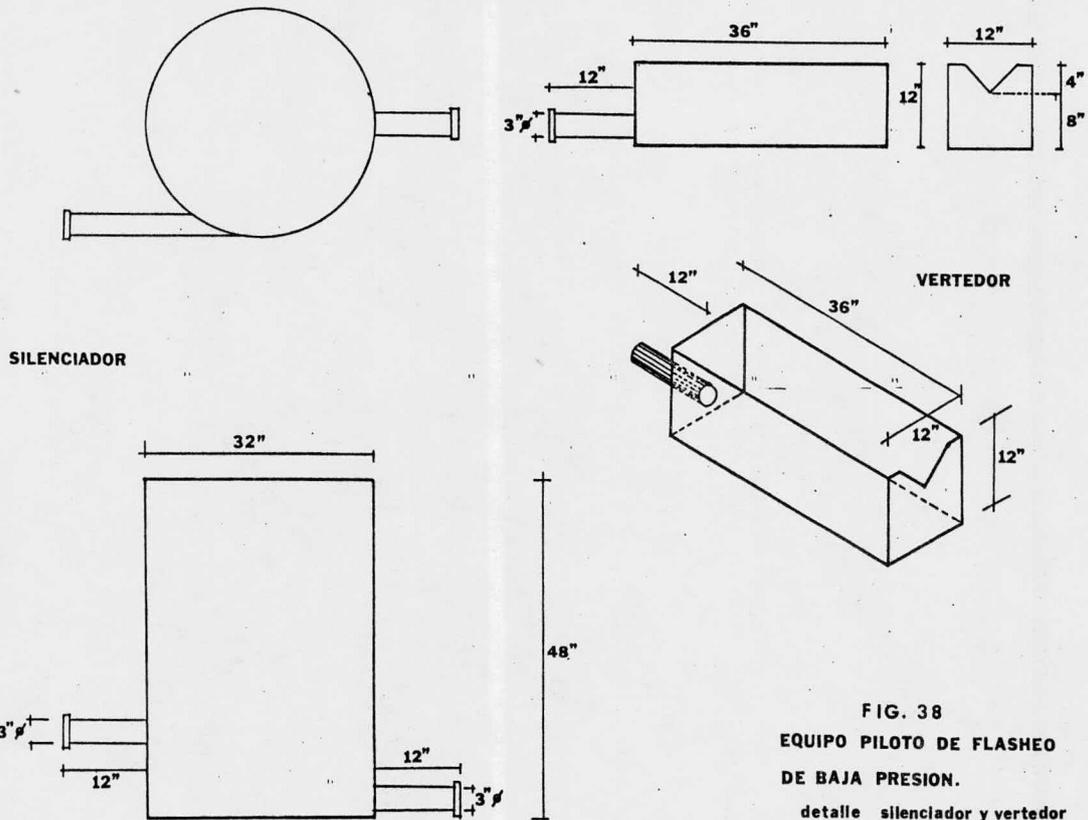
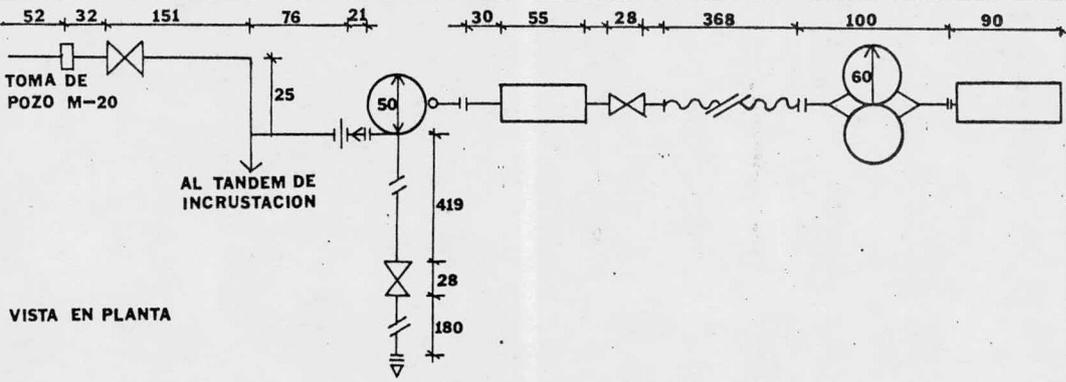
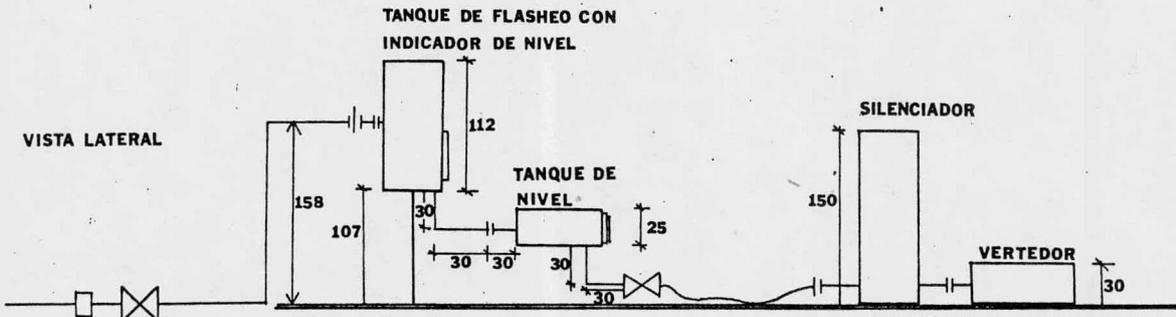


FIG. 38
EQUIPO PILOTO DE FLASHEO
DE BAJA PRESION.
 detalle silenciador y vertedor

7-7



VISTA EN PLANTA



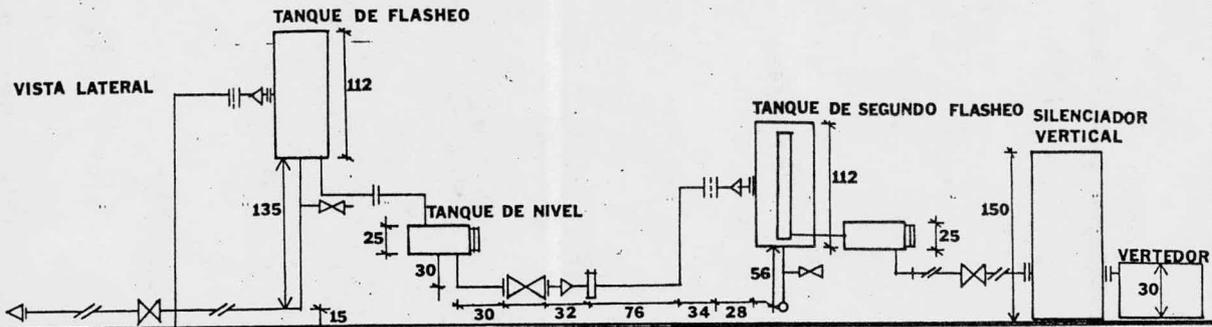
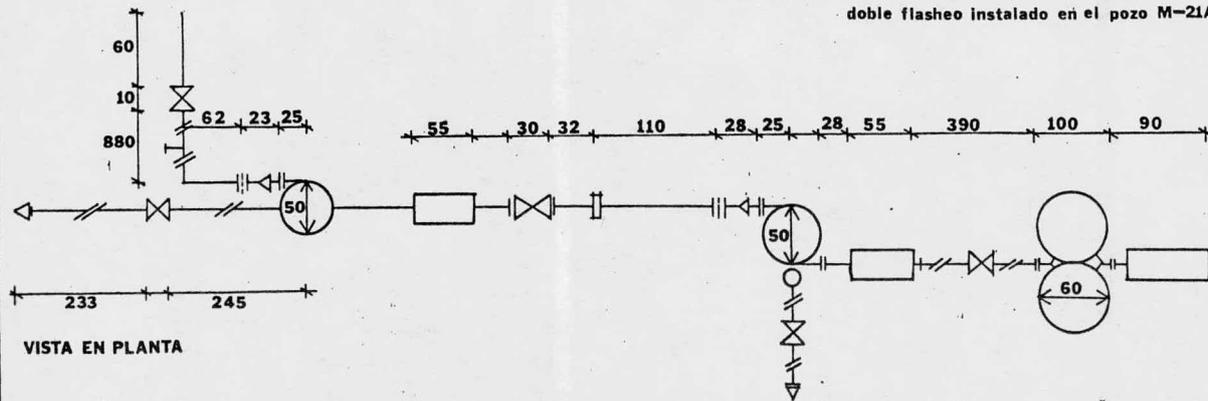
VISTA LATERAL

FIG. 39

Prueba de incrustación con separación de vapor. Arreglo de instalación en pozo M-20.

*dimensiones en cm.

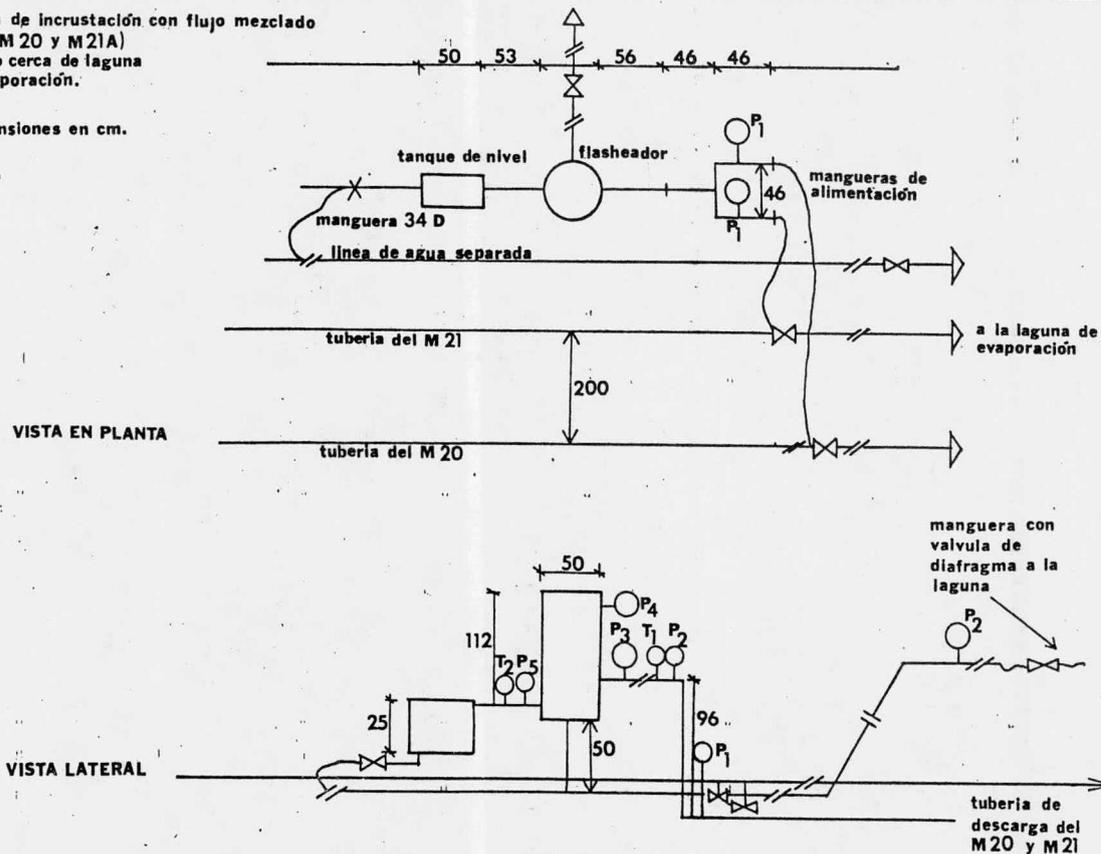
FIG. 40 Arreglo para pruebas de incrustación con doble flasheo instalado en el pozo M-21A



7-8

Prueba de incrustación con flujo mezclado
(pozos M 20 y M21A)
arreglo cerca de laguna de evaporación.

*dimensiones en cm.



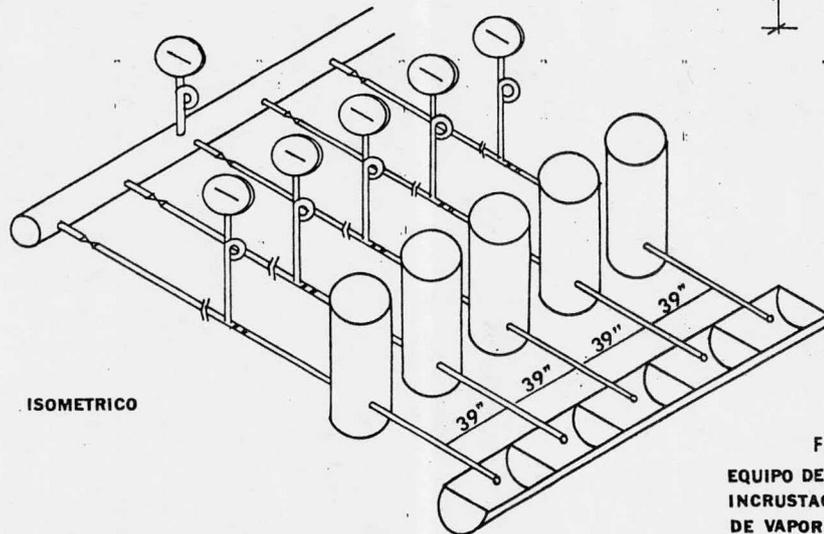
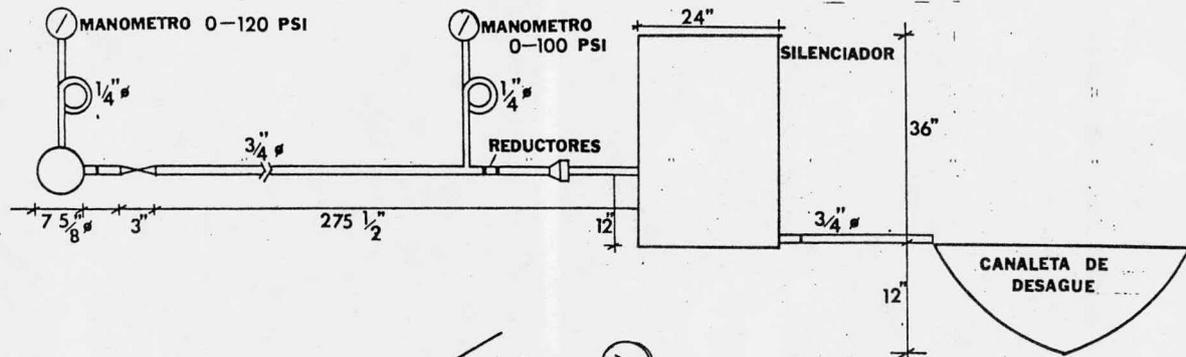


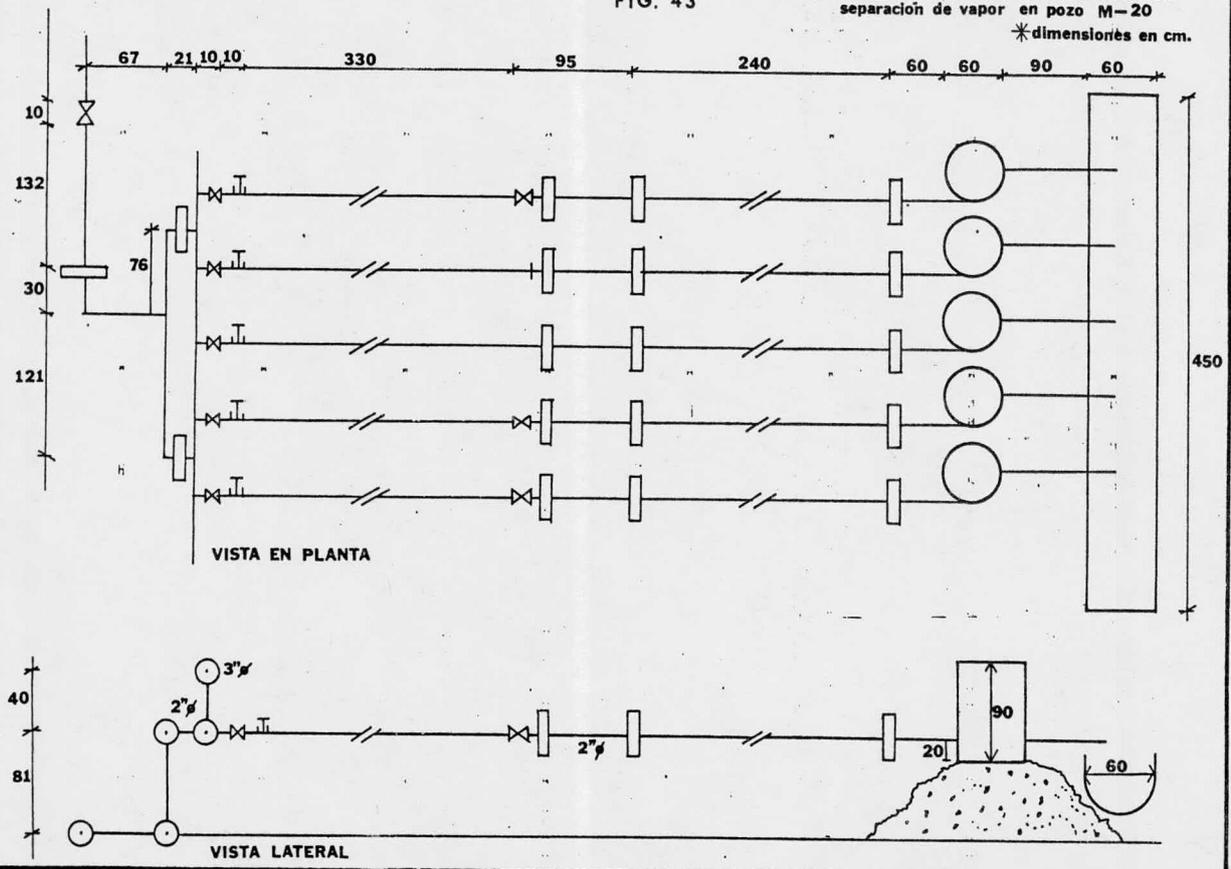
FIG. 42
EQUIPO DE PRUEBAS DE
INCRUSTACION SIN SEPARACION
DE VAPOR

7-11

FIG. 43

Arreglo Para Pruebas de Incrustacion sin
separación de vapor en pozo M-20

*dimensiones en cm.



7.2 RELACION DE PRUEBAS Y OBSERVACIONES EFECTUADAS

A continuación se da una tabla, que muestra en resumen las presiones a las cuáles se efectuaron las pruebas, así como también los tiempos de duración de cada una de ellas, y por bién los tiempos de duración de cada una de ellas, y por último las observaciones sobre la incidencia de incrustación después de la terminación de las pruebas, se incluyen observaciones realizadas en diferentes partes de los equipos pilotos con y sin separación de vapor, así como también las observaciones en los silenciadores y drenes (canales a la atmósfera) por los cuales se transporta el agua separada a la laguna de evaporación.

TABLA 20

Pozo M-20	Presión psig	Tiempo de prueba hrs	Incidencia de Incrustacion
Sin separación de vapor en tuberías de prueba (tanques)	5	960	ligera
	10	960	no hay
	15	960	no hay
	20	960	no hay
	3	504	ligera
	5	504	ligera
	7	504	ligera
	9	504	ligera

	<u>Presión Psig</u>	<u>Tiempo de prueba Hrs.</u>	<u>Incidencia de Incrustación.</u>
En silenciadores	0	504	regular
Con separación de vapor en equipo piloto	10	1370	muy ligera
	5	648	ligera
En tanque de agua	(10, 5)	2018	ligera
En silenciador	(10, 5)	2018	regular
 Pozo M-21A (arreglo piloto)			
Sin separación de vapor en tubería de prueba	5	960	ligera
	10	960	no hay
	15	960	no hay
	20	960	no hay
	3	960	ligera
	5	960	ligera
	7	960	ligera
	9	960	ligera
En silenciadores	0	960	muy intensa
Con separación de vapor en separador piloto	10	480	muy ligera
	5	936	ligera
En silenciador	0	936	muy intensa
 Doble flasheo (50 y 10 psig)			
En separador	50	648	no hay
En tanque de agua	50	648	no hay
En válvula de difragma	50	648	ligera
En separador	10	648	ligera
En tanque de agua	10	648	regular
En silenciador	0	648	muy intensa
 Pozos M-20 y M-21A (flujo mezclado en arreglo piloto)			
En separador	13	696	ligera
En tanque de agua	13	696	ligera

En tubería de agua (100 m. de longitud represionada en la punta).	13 a 9	696	ligera (mayor incidencia cerca de la punta).
-------------------------------------------------------------------	--------	-----	----------------------------------------------

Pozos M-35 y M-27 (separador MHI pruebas preliminares, flujo mezclado).

En separador	10	1680	ligera
En descarga de agua (antes de válvula)	10	1680	ligera
Válvula	9 a 1	1680	regular
En silenciador	0	1680	muy intensa

M-35 y M-27 (separador MHI, flujo mezclado)

En separador	5	1896	regular
En descarga de agua	5	1896	intensa
En válvula de compuerta	5 a 1	1896	intensa
En silenciador	0	1896	muy intensa
En separador	15	1920	ligera
En línea de descarga de agua (15 m. long.)	15	1920	regular
En válvula	14 a 1	1920	regular
En silenciador	0	1920	muy intensa

NOTAS:

1. El flujo del pozo M-20 es de carácter incrustante moderado y el de los pozos M-21-A, M-27, y M-35 es de carácter incrustante elevado.
2. Los arreglos piloto están aislados térmicamente. El separador horizontal (MHI) no está aislado.
3. En los arreglos piloto los gastos de agua son del orden de 10 T/hr y en el separador MHI del orden de 230 T/hr.

7.3 Datos diversos sobre operación del separador horizontal

1. Gasto máximo de agua introducidos

249 ton/hr (capacidad de diseño 250 ton/hr)

2. Vapor medido a diferentes presiones de separación

A 5 psig	-	30.48 ton/hr
10 psig	-	28.57 "
20 psig	-	26.56 "
25 psig	-	21.34 "

Se observa que al incrementar 1 psig de presión se reduce a 0.46 ton/hr aproximadamente la producción de vapor.

3. Calidad de vapor

A 5 psig	-	99.91 %
10 psig	-	99.90 %
15 psig	-	99.91 %
20 psig	-	99.96 %
25 psig	-	99.95 %

Según los resultados de calidad del vapor separado obtenido es buena, sin embargo no es lo suficiente para introducirla así a la turbina, por lo tanto se requiere de un separador o eliminador de humedad.

4. Los resultados obtenidos en las tablas, en algunos casos tienen variaciones de consideración, debido a que la presión del MHI (pf), gasto de alimentación y nivel de agua en el MHI, variaron a lo largo de la prueba por diferentes circunstancias, por ejemplo, salida del M-27 del sistema del segundo flasheo por mantenimiento en la tubería de descarga a la laguna. Una probable retroacción de la planta sobre las variables de operación, al entrar o salir las turbinas de operación.

5. Durante la prueba no se tuvieron problemas o cambios en la presión y nivel de agua en el separador primario.
6. Se observó durante todo el período de prueba una oscilación en la presión de trabajo del flasheador de aproximadamente ± 1.6 psig, el flujo de alimentación pulsante correspondía a la oscilación de presión (cada 3 segundos - aproximadamente) igualmente correspondiendo con los impulsos oscilaba el nivel de agua en el interior del flasheador (± 6 " aproximadamente).
7. Incrustación. En el interior del flasheador se encontró una capa delgada de diferentes espesores que oscilan entre $3/16$ " y $7/8$ " que no causarían problemas en operación continua, sin embargo en la descarga de vapor se tuvo cierta incrustación provocada por las sales existentes en el agua arrastrada durante la prueba, por lo que se recomienda un eliminador de humedad.

En la tubería de descarga de agua se obtuvo una incrustación del orden de $3/8$ " de espesor, aunque consideramos que al empezar la operación del flasheador el 23 de junio, éste tenía trazas de incrustaciones de operaciones anteriores. La salida de agua fué el punto con mayor incrustación dura, cabe señalar que a pesar de la incrustación, la calidad del vapor no se alteró sensiblemente.

7.4 REPORTE DE CAMPO SOBRE LIMPIEZA DEL SEPARADOR HORIZONTAL
DE LA INCRUSTACION FORMADA DURANTE PRUEBAS EFECTUADAS
DEL 1o. DE JUNIO, 1976 A ENERO DE 1977. CARACTERISTICAS
DE INCRUSTACIONES. ANALISIS QUIMICOS.

A. LIMPIEZA.

El tiempo de limpieza tanto del cuerpo del flasheador como del canal de agua que sale de los silenciadores se distribuye como sigue:

1). Cuerpo del Flasheador.

Un turno de 8 horas con cuatro hombres trabajando, en el cual los espesores variaron desde 3/16" a 7/8" (muestras IM-3).

2). Canal y cuerpo del Silenciador.

Cuatro hombres trabajando cinco turnos de ocho horas, con un área de limpieza en:

Canal: Aproximada de 38 m² (superficie del canal a la salida del silenciador, hasta el vertedero).

Cuerpo del silenciador: Area aproximada de 29.5 m².

B. CARACTERISTICAS DE INCRUSTACIONES.

1). Muestras de incrustaciones.

a). Entrada de agua al flasheador (IM-2).

b). Dentro del separador (IM-3, IM-6, IM-5, IM-7, IM-8).

c). Salida de agua separada y vapor (IM-4, IM-1).

2). Características.

Espesores medidos en las muestras señaladas anteriormente.

2.1 En la línea de entrada de agua al flasheador (muestras IM-2), se observan espesores desde 3/8" hasta 1 1/2".

2.2 Dentro del flasheador espesores desde 3/16" hasta 7/8" y con diferentes formas de incrustación (dependiendo del lugar incrustado dentro del separador).

2.3 En la salida de agua separada: 3/8" hasta 1".

2.4 En la salida del vapor, el espesor es uniforme:

1/16".

La cantidad de incrustación dentro del separador se estimó en 224 Kgs., siendo la incrustación de las muestras del tipo IM-3 principalmente.

Esta incrustación, se formó en un tiempo de operación de 149 días, iniciación de la operación junio 10.1976, y paro de la misma enero 19, 1977.

C. METODO DE LIMPIEZA.

El método es mecánico o sea a base de cincel y martillo, tanto en tubería como dentro del separador, como se observa en algunas muestras aún viene adherida una capa metálica.

TABLA 21

EVALUACION AGOSTO 22, 1977.

<u>MUESTRA</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>AREA</u> <u>APROX.M²</u>	<u>ESPEJOR</u> <u>APROX.CM.</u>
1	Salida de agua	1	1.1-1.3
2	Fondo del flasheador, abajo de las mamparas cerca del registro hombre, lado derecho.	2	0.1-0.3
3	Fondo flasheador, abajo de las mamparas lado izquierdo	2	0.1-0.3
4	Base de la mampara	0.5	0.9-1.1
5	Aleta de las mamparas	1	0.8-0.9
6	Lado de los canales en mamparas	3.5	0.4-0.7
7	Cuerpo del flasheador, cerca de entrada de agua	8	0.5-0.8
8	Registro-hombre hasta nivel de agua	0.1	0.2

7.5 DESCRIPCION DE MUESTRAS.

MUESTRA 1. (Salida de agua).

Presenta cinco capas diferentes de incrustación de diferente espesor, consistencia y color, presentando el mayor espesor (0.5-0.6 cm) la capa inferior, siendo de apariencia pososa y consistencia suave, presenta características de sílice amorfa. La capa inmediata superior presenta color oscuro, dureza mayor que la anterior y una consistencia compacta, con un espesor de 0.1 cm, seguida por una capa de color claro de 0.05 cm de espesor de características similares a la primera capa, a su vez es seguida por una capa de color oscuro y características similares a la segunda, por último la quinta capa es de apariencia similar a la primera y tercer capas pero difiere en cuanto a porosidad siendo menor con respecto a las anteriores.

La diferencia de características en las capas de incrustación observadas puede deberse principalmente a condiciones variables de operación y a diferentes mecanismos de depositación.

a). Variaciones durante la operación.

Las capas oscuras, probablemente se colorearon por la "suciedad" presente o por la formación de sulfuros en el inicio de cada operación, ya que al iniciar cada una de las operaciones se observa a la salida del silenciador que el agua sale con un color negruzco y posteriormente adquiere su color normal, esta "suciedad" podría difundirse en esta fase a través de la incrustación presente en el flasheador y la incrustación subsecuente sería blanca, una vez que el agua adquiriera sus características normales o termine de limpiar por arrastre las tuberías, de acuerdo a esto podemos observar la secuencia de tres corridas en lo siguiente:

La posible capa oscura de la primera corrida sería tan pequeña que queda adherida al cuerpo del flasheador.

Al inicio de la prueba (junio 13, 1977). el flasheador presenta trazas de incrustación de otras pruebas.

b). Diferentes mecanismos de incrustación.

Las diferentes capas probablemente se formaron por diferentes mecanismos de polimerización, los cuales a su vez dependen de las condiciones de concentración, presión, temperatura y/o variables de operación durante las pruebas.

Muestra No.2 - Fondo del flasheador, abajo de las mamparas (cerca del registro-hombre) lado derecho.

Esta muestra presenta dos capas diferentes, una blanca y una oscura, la parte oscura es la que estaba en contacto con el cuerpo del flasheador, ambas son consistentes, duras y compactas, en la parte que estaba en contacto con el cuerpo del flasheador de la capa oscura, se observa la presencia de óxidos de Fe ocluido en la capa de incrustación, probablemente formando un ferrosilicato que actuó como núcleo para la polimerización de la sílice. Los espesores fueron de 0.1 y 0.2 cm.

Muestra No.3 - Localizada en el fondo del flasheador, abajo de las mamparas, presenta tres capas, la que está en contacto con el cuerpo del flasheador es gris, la que sigue es negruzca y la última es de color beige.

En la capa gris se nota la presencia de óxidos de Fe, la capa

negra acusa la presencia de sulfuros y la capa beige es sílice con muy pocas impurezas.

Muestra No.4 - Se localiza en la base de la mampara, es de consistencia compacta y color claro, al lado que estaba en contacto con el flasheador se le nota presencia de sulfuros, en la parte superior aparece un color café de óxidos de Fe, depositados ahí por escurrimiento cuando el flasheador salió de operación y quedó abierto, quedando expuesto O₂ atmosférico. Es espesor de esta muestra es de 1 a 1.1 cm.

Muestra No.5 - Localizada en la aleta de las mamparas, similar a la anterior sólo variando en el espesor, que es de 0.8 - 0.9 cm.

Muestra No.6 - Localizada en el canal de la mampara.

Se pueden observar tres capas, la que estaba en contacto con el canal presenta formación de sulfuros, seguida de una capa de sílice casi sin impurezas, seguida a su vez de otra capa más delgada que revela la presencia de sulfuros.

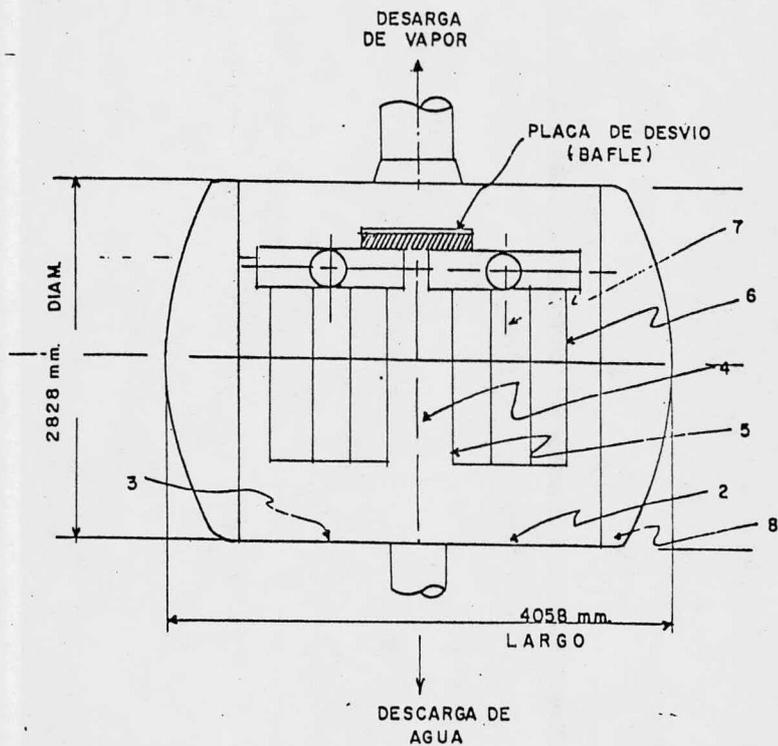
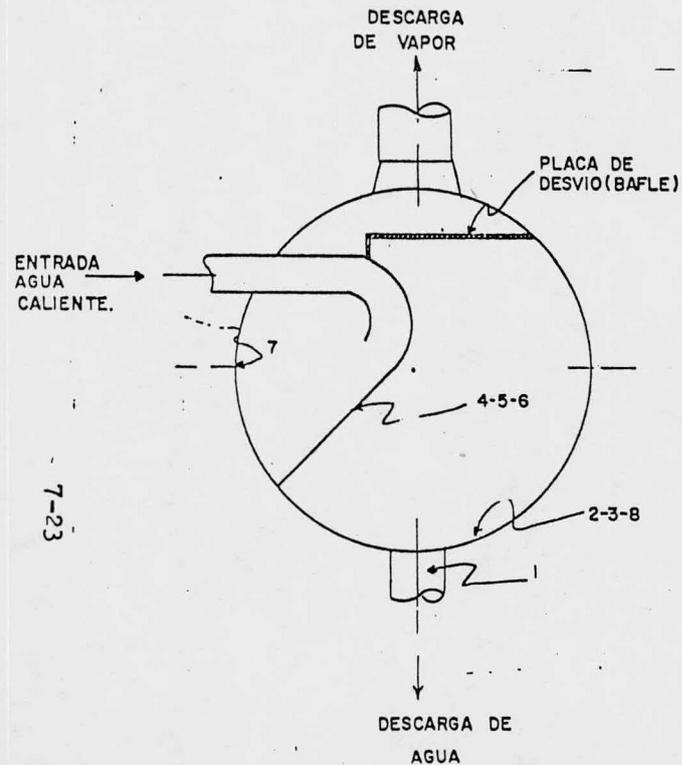
Muestra No.7 - Cuerpo del flasheador (cerca de la entrada de agua).

Como la mayoría de las muestras, esta consta de tres capas, la que estaba en contacto con el flasheador presenta sulfuros, la capa intermedia sílice amorfa con la diferencia de que la última capa es sílice cristalina, lo cual no indica la existencia de por lo menos dos mecanismos de polimerización diferentes.

Muestra No.8 - Registro-hombre hasta el nivel de agua, presenta tres capas, con la primera con presencia de sulfuros, la que le sigue de sílice amorfa y posteriormente otra capa de sulfuros, la primera capa también presenta óxidos de Fe y posiblemente ferrosilicatos.

FIGURA 45 INCRUSTACIONES

1ra. EVALUACION AGOSTO 22-77



7-23

OBSERVACIONES.

Se encontró por lo menos dos tipos de incrustación generada por la depositación de sílice.

Analizando lo expuesto antes, se aprecia que se tienen dos o más mecanismos de incrustación o polimerización de la sílice, uno de sílice amorfa, que presenta color blanco, poca dureza y porosidad y otro de sílice cristalino de color gris transparente, de dureza mayor que la anterior y sin porosidad (muestra No. 8).

De acuerdo a esto existen por lo menos dos mecanismos de polimerización de la sílice. Otro tipo fué el de incrustación de sílice combinada con sulfuros.

TABLA 22

ANALISIS EFECTUADOS A MUESTRAS DE
 INCRUSTACION EN SEPARADOR HORIZONTAL

PRIMERA EVALUACION- AGOSTO, 1977.

MUESTRA No.	3	4	7	8
CO ₃	0	0	0	0
FeS	0.1	1.0	0.1	12.8
SiO ₂	97.41	95.86	95.78	85.76
Cl	0	0	0	0
Otros	2.5	3.14	4.12	1.44
TOTAL:	100.0	100.0	100.0	100.0

DESCRIPCION DE INCRUSTACION EN SEPARADOR HORIZONTAL
(SEGUNDA EVALUACION)

MUESTRA No.

LOCALIZACION Y DESCRIPCION

(Ver Fig.de la Segunda Evaluación)

- 1 Cuerpo del flasheador (a la entrada de agua) sobre la cual está montada la mampara. Acusa la presencia de cuatro capas de diferente tipo y espesor, siendo la de menor espesor la que estaba en contacto con el cuerpo del flasheador, la siguiente tiene mayor espesor y aumentan a su vez en espesor las capas subsecuentes, la muestra presenta un espesor de 8 mm. El área cubierta por esta incrustación es de 5 m² aproximadamente.

- 2 Cuerpo del flasheador, fuera de la mampara.
Observaciones: Incrustación antigua (área difícil de limpiar). Area aproximada de 3 m² con un espesor de 6-7 mm. Presenta dos capas, una capa muy delgada al parecer de FeS de aproximadamente 0.5 mm que estaba en contacto con el flasheador y el resto es sílice blanda que presenta un color blanco con una superficie rugosa en forma de ondas.

- 3 Fondo del flasheador. Presenta dos capas oscuras similares, tanto en el color como espesor y consistencia, el espesor aproximado es de 2.5 mm, con un área de 4 m² aproximadamente.

- 4 Fondo del flasheador. Entre la mampara y la salida de agua. Presenta tres capas, dos grises y una capa blanca entre estas dos de mayor espesor. La

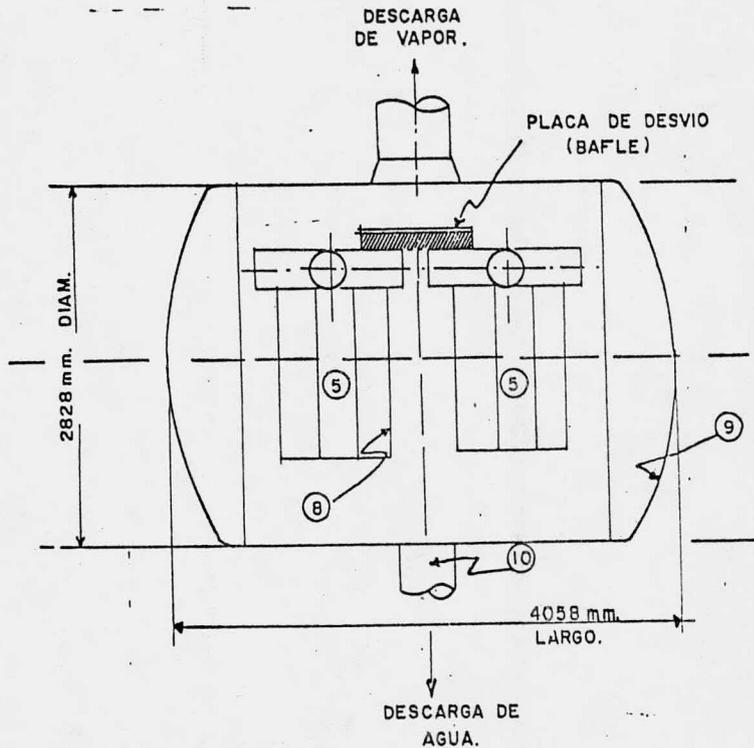
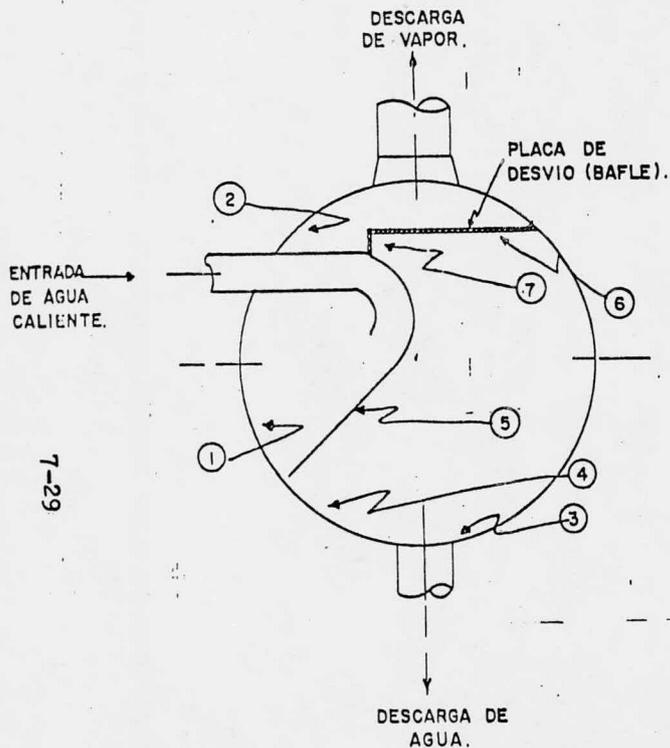
muestra presenta un espesor total de 4.0 mm aproximadamente.

- 5 Soportes de la mampara por fuera de los canales. Presencia de dos capas, una capa gris oscura de tipo fragil que estaba en contacto con la pared exterior del canal y otra capa superior superpuesta a la anterior con la diferencia que esta última era cristalina, sumando ambas capas un espesor de 3 mm aproximadamente.
- 6 Placa de desvío. A la salida del vapor, parte inferior de la placa. Presenta dos capas, una blanca fragil, porosa y de escasa adherencia, con un espesor de aproximadamente 7 mm en total (ambas capas) siendo la otra una capa translúcida, sin color, cubriendo prácticamente la totalidad de la placa.
- 7 Soporte de la placa de desvío. Parte inferior, a diferencia de la incrustación anterior, esta presenta una capa negra en contacto con el soporte y dos capas iguales a la anterior (6) siendo su espesor de 4.5 mm en total.
- 8 Pared interna de la mampara. Incrustación antigua. Presenta un espesor de 8.5 mm, se observan tres capas con las características de la muestra anterior.
- 9 Entrada de hombre. Presenta dos capas, la primera es de poco espesor, de color gris oscuro y la segunda capa de gris claro, con un grosor total de 4.5 mm (este tipo de incrustación se observa hasta donde llega el nivel de agua).

- 10 Salida de agua. En la tubería presenta cuatro capas, dos blancas y dos grises, alternadas, siendo una capa gris (la más obscura) la que estaba en contacto con el tubo, el espesor es de aproximadamente 5 mm.
- 11 Muestreador. En tubería de descarga de vapor hay formación blanca, fragil, con un espesor aproximado de 5 mm, casi 100% compuesta de sílice.

FIGURA 46 INCRUSTACIONES

2da. EVALUACION 28 DE SEPTIEMBRE



7-29

7.6 INCIDENCIA DE INCRUSTACION.

Los análisis químicos de la incrustación formada en los equipos -- superficiales de Cerro Prieto, nos indican que la mayor parte es silice, y el análisis físico nos revela los diferentes tipos de incrustación, esto nos revela que hay diferentes mecanismos de incidencia dependiendo de factores como presión, temperatura, velocidad, concentración, pH etc.

En un primer intento por evaluar la incidencia de incrustación se hicieron mediciones que se exponen en la tabla ⁴¹ expuesta a continuación, las unidades están dadas en $\text{gr} \times \text{cm}^2 \times \text{año}$. Este es el primer paso para evaluar la velocidad de incrustación experimentalmente.

TABLA 23

TABLA A.- Incidencia de incrustación en Cerro Prieto en gramos x cm² x año.

LOCALIZACION	EQUIPO O LUGAR	INCIDENCIA GR x CM ² X A	DENSIDAD APARENTE. APROX. GR/CM ³ .
POZO M-21	Tanque de nivel. 2o.Flasheo a 10 psig.	1.4	1.4
"	Canal de plástico. Presión atmosférica.	86.8	1.1
"	Silenciador	1.7	2.8
"	Tubo entrada a vertedor	4.2	1.4
"	Interior de vertedor 2o.flasheo	-	0.2
"	Tanque de nivel del 1er.flasheo	0.5	2.0
"	Canal de descarga de arreglo de prueba.	10.6	0.2
"	Válvula de diafragma	2.3	2.8
"	Tanque de nivel. 1er.flasheo 50 psig.	1.1	1.4
POZO M-20	Canal de plástico.Presión atmosférica.	72.3	0.7
POZO M-35	Parte inferior del vertedor	326.0	1.2
"	Canal de descarga a dren 324	390.0	1.2
"	Válvula de 10".Salida agua MHI.	-	1.3

7-31

7.7 DENSIDAD DE LA INCRUSTACION FORMADA A DIFERENTES PRESIONES Y VELOCIDADES.-

Al variar la presión, el diámetro de la tubería o el flujo también varía la velocidad del fluido, lo que se refleja en una variación significativa de la densidad de incrustación formada. También se ha encontrado una relación directa entre la densidad y la dureza de las incrustaciones de sílice formada, a mayor dureza y viceversa a menor densidad menor dureza.

La ventaja de conocer esto es que si se controla el tipo de incrustación por ejemplo, el hecho de que a baja velocidad y baja presión se formen incrustaciones de poca dureza y poca densidad (FIG. No. 47) esto facilitara su eliminación mediante medios mecánicos.

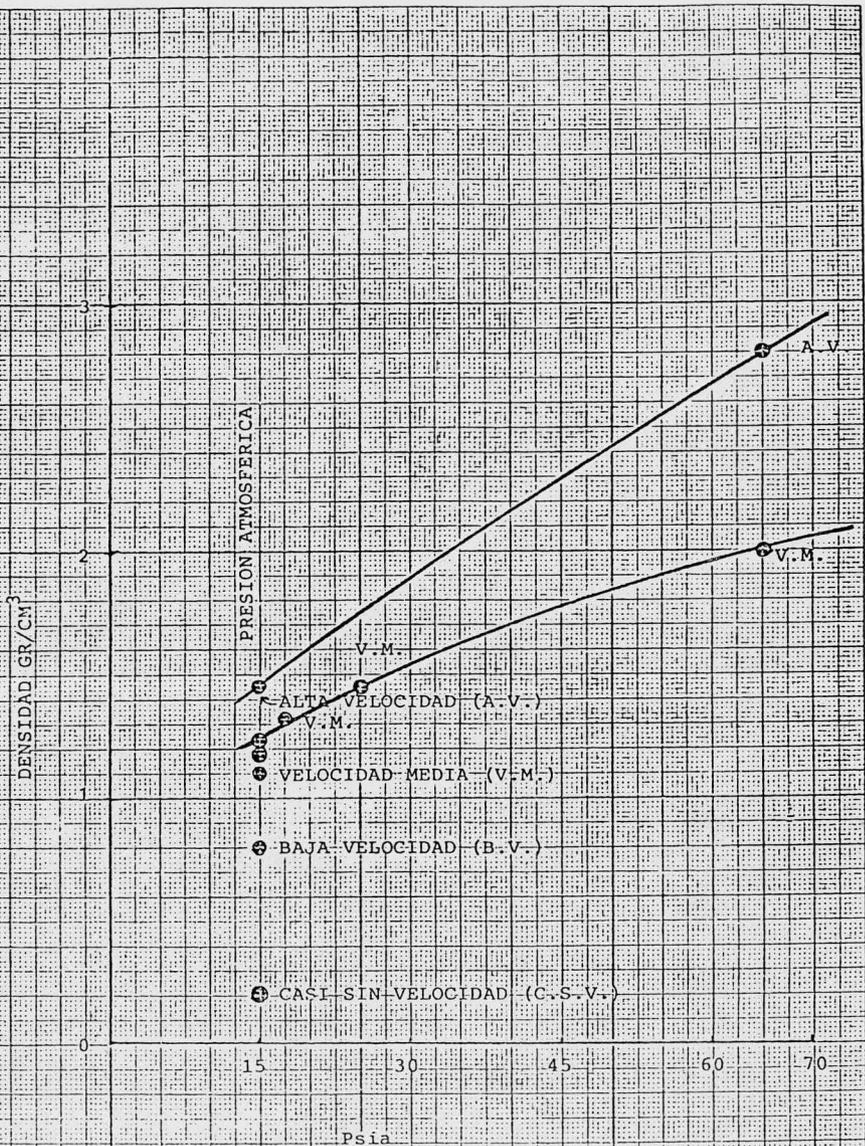


FIG. 4] DENSIDAD DE LA INCRUSTACION FORMADA A DIFERENTES PRESIONES Y A DIFERENTE VELOCIDAD (GR/CM³).

C A P I T U L O V I I I

CAPITULO VIII

8 PREVENCION Y ELIMINACION DE INCRUSTACIONES.

Este capítulo se describirán métodos químicos y mecánicos - para prevenir o eliminar las incrustaciones, los métodos químicos se usan principalmente para prevenir, minimizar la formación de --- incrustaciones en cambio los mecánicos se emplean para eliminar -- las incrustaciones una vez que éstas se han formado.

8.1 TRATAMIENTO DE SALMUERA PARA CONTROLAR LA FORMACION DE INCRUSTACIONES.

Los métodos químicos se pueden dividir en dos categorías:

- a) Métodos para controlar la incrustación originada por el fluido geotérmico "fresco" o sea antes de ser usado para la generación de energía.
- b) Métodos para controlar la incrustación originada por el fluido "agotado" en la generación de energía pero antes de ser desechado.

En la tabla 8-1 se dan algunos ejemplos de métodos usados en diferentes campos geotérmicos.

8.2 TRATAMIENTOS PARA FLUIDO FRESCO.

El término fluido fresco se refiere al fluido caliente procedente de los pozos que se usa para la generación de energía.

A.-Tratamiento para sílice.

La formación de incrustaciones por sílice dependen fuertemente del pH, ya que el pH controla la solubilidad de la sílice entre otras variables (temp. por ejemplo), siendo la sílice disuelta más estable a pH bajo, a pH alto tam-

bién puede ser estable pero precipitan hidróxidos que pueden inducir la precipitación de la sílice disuelta.

A.1 Ajuste de pH

A continuación se describen los métodos que pueden usarse para prevenir la formación de incrustación por sílice con adición de ácidos o bases para modificar el pH en el agua caliente.

TABLA 8-1

TRATAMIENTOS TÍPICOS PARA CONTROLAR LA FORMACION DE INCRUSTACION

TIPO DE INCRUSTACION	TRATAMIENTO	LUGAR DE PRUEBA
SILICE	Ajuste de pH (inyección de ácido)	Magmamax pozo No. 1 Niland California
SILICE	Inyección de base (NH_3 o NaOH)	Pozos Sinclair California
SILICE	Dilución de fluido geotérmico no evaporado	Namafjall, Islandia
Mezclada	Aplicación de potencial eléctrico	Pozo Sinclair No. 4 California
Calcita en pozos	Mantener la presión de CO_2	Pozo No. 6-1 East Mesa, California.
Calcita en pozos	Adición de ácido	Método propuesto
Calcita en pozos	Adición de fosfatos alcalinos	Método propuesto

TRATAMIENTOS PARA FLUIDO AGOTADO DESECHADO

Silice y arsénico	Sedimentación y coagulación (adición de cal apagada, hipodorito y floculante)	Usado en Wairakei y Broadlands, Nueva Zelanda
Silice	Sedimentación en canales, tanques de retención	Otake, Japón y Ahuachapan, El Salvador
Calcita	Adición de inhibidores y sequestrantes (polifosfatos, EDTA)	Método propuesto

A.1.1 ADICION DE ACIDO.

La adición de ácido ha dado buenos resultados para prevenir la incrustación. Se ha usado HCl dosificándolo a la salmuera caliente hasta alcanzar un pH = 3, pero a las temperaturas de operación el material de los equipos esta sujeto a corrosión ácida, sin que hasta el momento se haya encontrado un inhibidor para el ácido que funcione a temperaturas elevadas.

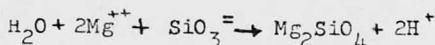
A.1.2 ADICION DE BASE.

Se usa hidróxido de sodio o amoniaco, el primero induce a precipitar hidróxidos de los metales presentes en la solución, el segundo se agrega con la idea de alterar la naturaleza del precipitado para que este no se adhiera a las superficies.

Resultados de laboratorio dicen que con la inyección de amoniaco no se evita la precipitación de sílice, pero es posible controlar donde reunirá la precipitación.

A.2 ADICION DE MAGNESIO.

En el tratamiento de aguas para su uso en procesos de calentamiento, enfriamiento y generación de vapor, la adición de sales de magnesio (por ejemplo dolomita) durante el suavizado en caliente con caliza reduce el contenido de sílice en el agua, la reacción produce silicato de magnesio insoluble. (Ref 39)



Para alcanzar una separación óptima se requiere un pH 9 y alrededor de 15 minutos de tiempo de residencia, esto trae como consecuencia los problemas de "adición de base" y la retención de flúidos resulta en una disminución de la entalpía y puede requerirse para controlar los efectos de erosión

la eliminación de sólidos (por ejemplo Mg_2SiO_4)

A.3 APLICACION DE POTENCIAL ELECTRICO.

Se ha estudiado la influencia del potencial eléctrico sobre la incidencia de la incrustación. El fluido proveniente de una tubería de 51mm se pasó a través de una tubera y posteriormente expuesto a 6 electrodos de acero inoxidable (9.53 mm de diametro) por períodos hasta de 2 horas, las pruebas se efectuaron con potenciales aplicados de 5, -5 y 30 --- volts, se formó más incrustación en los electrodos negativos que en los positivos o neutros.

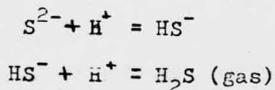
De acuerdo a los autores, las diferencias anteriores, sugieren que especies (por ejemplo $Pb(OH)$, $Fe(OH)$) empiezan a precipitar en la presencia de un arco eléctrico ya que de otro modo estas permanecerian en la solución (Ref. 43)

B METODOS DE TRATAMIENTO PARA SULFUROS.

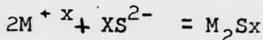
Como se mencionó en el capitulo de PROPIEDADES hay un gran número de reacciones de sulfuros involucrados en los procesos de generación de energía utilizando fluidos geotérmicos. La adición de ácido puede resultar en la eliminación de H_2S gaseoso, disolución de sulfuros y dirigir el equilibrio a -- favor de la formación de CO_2 .

B.1 AJUSTE DE pH

La adición de ácido a soluciones de sulfuros favorece la -- formación de H_2S en solución y la probabilidad de un incremento en la fase gas (incondensable), por ejemplo tenemos -- la siguiente reacción:

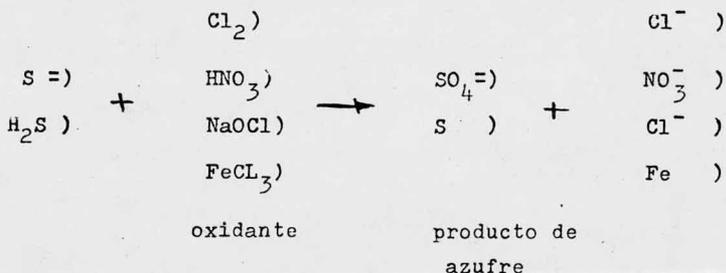


Cuando se adiciona una base, la concentración de S^{2-} aumenta y -- sulfuros insolubles empiezan a precipitar.



B.2 OXIDACION.

La oxidación de sulfuros a azufre o a sulfatos se ha propuesto como un medio para controlar la incrustación por -- sulfuros, la reacción total simplificada sería:



Un posible problema aquí es la formación de sulfatos metálicos -- insolubles (por ejemplo $CaSO_4$), así también como el azufre elemental el cuál puede causar erosión en la tubería y obstruir los sistemas de inyección. Se puede usar un agente dispersante para evitar que se depositen los sólidos.

C. TRATAMIENTOS PARA CALCITA ($CaCO_3$)

La calcita es un problema de incrustación común asociado -- con el agua usada como enfriamiento, calentado y con propósito de generación de vapor. La solubilidad de $CaCO_3$ en agua y salmuera -- depende de un número de parámetros incluyendo los siguientes: presión parcial de CO_2 , temperatura, pH y la composición química -- de las salmueras. Los métodos para prevención de la formación de -- incrustación por $CaCO_3$ están basados en el control adecuado de uno

o más de estos parámetros:

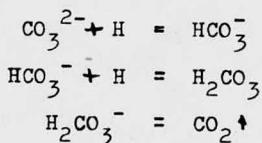
C.1 PRESION DEL CO₂

Como se mencionó en capítulos anteriores, cuando el fluido asciende por el pozo desde el depósito a la superficie, la caída de presión origina que el CO₂ disuelto se desprenda, con un -- consiguiente aumento del pH en la salmuera lo cuál aumenta la posibilidad de que se deposite calcita.

Mantener la presión del CO₂ puede tener resultados en el control de la precipitación de la calcita, sin embargo una desventaja de mantener alta presión en el pozo es que la velocidad de flujo debe reducirse considerablemente abajo de aquella a la cuál el pozo fluye libremente. Esta desventaja puede posiblemente ser superada por el uso de una bomba de pozo profundo.

C.2 AJUSTE de pH.

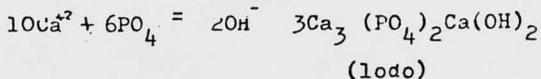
La adición de ácido favorece la eliminación de carbonato -- por la formación de CO₂ de acuerdo a las siguientes reacciones:



La eliminación de carbonato previene la formación de calcita, sin embargo, grandes cantidades de ácido se requieren para tener un efecto estabilizador en la salmuera.

C.3 ADICION DE FOSFATO.

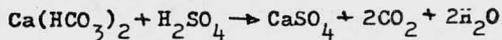
En los sistemas de generación de vapor, el calcio se precipita en la forma de un lodo por la adición de fosfato alcalinos, este lodo se posteriormente se elimina por una sedimentación o un filtrado:



Una desventaja de este método es la posibilidad de precipitación de sustancias insolubles (por ejemplo sulfuros, hidroxidos, carbonatos) a los pHs elevados que se requieren para la precipitación del fosfato.

C.4 ADICION DE SULFATO.

Este método se basa en que la solubilidad del CaSO_4 es cien veces mayor comparada con el CaCO_3 .



La desventaja de su aplicación a salmuera geotérmica es la formación de otros sulfatos insolubles (ejem. BaSO_4) que puede formar incrustaciones, y obstruir los sistemas de inyección por el CaSO_4 formado.

8.3 TRATAMIENTO PARA FLUIDO AGOTADO.

Estos tratamientos se aplican a la salmuera separada principalmente con el objeto de evitar que los sólidos en suspensión precipiten, durante el proceso o para disponer apropiadamente de la salmuera cuando esta se deseche.

8.3.1 TRATAMIENTO PARA SILICE

a) Sedimentación y Coagulación.- la sedimentación se usa comúnmente en el tratamiento de aguas de desecho, en el cual los sólidos suspendidos abandonan el líquido por la influencia de la fuerza de gravedad, estos procesos se llevan a cabo en piletas diseñadas especialmente para este propósito

En los procesos de coagulación, el coagulante se adicio

na a el agua, inicialmente se mezcla rápidamente y esta agitación disminuye para que el material floccule, los coágulos posteriormente se separan por gravedad, la coagulación depende de varios factores por ejemplo: clase y calidad de coagulante usado, mezclado, pH del agua y temperatura de la misma.

b) Tanques de Retención: La precipitación de sílice de soluciones sobresaturadas es un proceso progresivo en el cual la sílice coloidal produce paulatinamente geles o precipita, esto puede requerir días o semanas para que se alcance el equilibrio en el rango de temperatura ambiente (22 a 27°C)

c) Filtración: La filtración es un proceso para separar -- sólidos no disueltos de aguas turbias a través de un -- filtro o un medio poroso.

Se usa para remover sílice coloidal y otras partículas que no se han eliminado en los procesos de sedimentación.

8.3.2 TRATAMIENTO PARA CALCITA.

La calcita también puede removerse por sedimentación y coagulación, usando métodos similares a los de sílice, aquí se presentan otros métodos para prevenir la incrustación por calcita.

a) Inhibidores de incrustación y secuestrantes: La secuestación es el proceso para mantener cationes formadores de incrustación (por ejemplo: Ca, Ba, Fe), como iones de complejos metálicos por la adición de agentes quelatantes o secuestrantes a el agua desechada.

Los agentes secuestrantes mas usados en el tratamiento de aguas son polimetafosfatos inorgánicos (TABELA 3-2). El ácido etilendiamin-tetra-acético (EDTA) y sus sales-

de sodio se usan como inhibidores de incrustación en el tratamiento de aguas para calderas.

El EDTA forma complejos solubles estables con casi todos los iones metálicos por ejemplo: Mg^{++} , Ca^{++} , Sn^{++} , Ba^{++} y tiene una ventaja -- sobre los polimetrafosfatos en que no se hidroliza, pero su alto -- costo puede limitar su uso.

TABLA 8-2

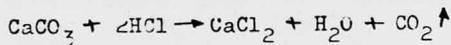
POLIMETAFOSFATOS USADOS PARA PREVENIR LA FORMACION DE INCRUSTACION

NOMBRE	FORMULA
Pirofosfato Tetrasódico	$Na_4P_2O_7$
Trifosfato de sodio	$Na_5P_3O_{10}$
tripolifosfato trisódico	$Na_3P_3O_9$
Hexametrafosfato hexasódico	$Na_6P_6O_{18}$
Fosfato de sodio-calcio	$Na_2O.CaO.P_2O_5$
Fosfato de sodio-magnesio	$Na_2O.MgO.P_2O_5$
Fosfato de sodio-zinc	$Na_2O.ZnO.P_2O_5$

8.4 ELIMINACION DE INCRUSTACIONES E INCRUSTACIONES

Aquí se describen métodos para eliminar la incrustación una vez que se ha formado ya sea en los pozos o en el equipo de la planta de generación, los métodos descritos abajo son -- los comunmente usados.

a) Acidificación: es el método usado para limpiar los pozos de incrustación por adición de ácido. El tipo de ácido -- depende de la composición de el depósito por ejemplo: -- HCl para calcita, HF para silice, la calcita reacciona -- con el HCl para formar $CaCl_2$ soluble de acuerdo a la --- siguiente reacción:



Este método se ha usado en East Mesa E.U.A., con HCl al -- 15% para limpieza y también en Hungría, Nueva Zelanda y Japón.

TABLA 8-3

TRATAMIENTOS PARA ELIMINAR INCRUSTACIONES
METODOS COMUNES

Tipo de incrustación	Tratamiento	Lugar de aplicación
CaCO ₃ en pozos	bombear HCl inhibido en el pozo	East Mesa E.U.A. pozos
CaCO ₃ en tuberías de pozos	Lavar con HCl inhibido.	5-1 Otake, Japón Hungría y Kawerau en Nueva Zelanda
Silice en intercambiadores de calor	Lavar con bifluoruro de amonio	Hveragerdi en Islandia
Silice en el pozo	Bombear una solución de NaOH en el pozo	Matsukawa, Japón
CaCO ₃ en pozos	Fresar o reperforar	Nueva Zelanda y México
Incrustaciones combinadas en componentes de la turbina	Inyección alternada de aceites pesados	Larderello en Italia
Incrustaciones combinadas en líneas de - salmuera	Banear con chorros de agua a alta presión.	Niland E.U.A.

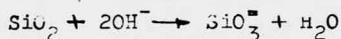
METODOS EN DESARROLLO

incrustaciones combinadas en tubos intercambiadores de calor	Cavitación	experimentos de Laboratorio
Calcita (planta piloto)	Cavitación Térmico	experimentos de laboratorio

En Otake se utilizó para la limpieza de un pozo con incrustación -- de calcita, HCl al 35%, se emplearon 5000Kg de ácido y 75Kg de inhi bidor, se bombeo agua para mantener la concentración de ácido entre 3 y 5%, sin embargo no se eliminó la incrustación totalmente pero - la producción casi se duplicó como se muestra en la sig. Tabla:

	presión del separador kg/cm ²	vapor Ton/hr	Agua Ton/hr	presión al cierre Kg/cm ²
Antes de la limpieza	2.1	4	25	2.2
Después de la limpieza	2.1	8	56	2.8

- b) Adición de base: La sílice no es muy soluble en agua y -- ácido pero si lo es en soluciones de NaOH para formar --- silicatos solubles.



En Matsukawa Japón, se eliminó una incrustación formada - por 90% sílice en un pozo utilizando NaOH el procedimien- to es el que sigue: 125 Kg de NaOH se disolvieron en 300- lts de agua, la solución se introdujo por el cabezal du-- rante 8 minutos manteniendo alta presión y alta tempera-- tura, se lavó posteriormente con agua limpia durante 15 - minutos y se repitió el procedimiento, la incrustación se eliminó completamente.

Una ventaja de usar NaOH es la posibilidad de que preci piten hidroxidos, lo cuál requerirá HCl para su elimina-- ción.

- c) Abocardar: es el uso de medios mecánicos tales como la -- acción cortante de un instrumento giratorio sobre la su-- perficie de la incrustación en pozos y tuberías, se ha -- usado en Nueva Zelanda, Hungría y en Cerro Prieto México.

En Cerro Prieto un pozo de baja entalpía (menos de 400 - ETU/lb) se espera que se incruste por calcita en más o - menos 1 año y uno de alta entalpía (alrededor de 650 -- ETU/lb) se incrusta por sílice en 3 o 4 años.

La operación de limpieza se lleva de 5 a 10 días teniendo un costo de aproximadamente 40 000 pesos/día.

La desventaja es el riesgo de dañar la tubería por la -- abrasión o la erosión.

d) Desincrustación por cavitación y chorros de agua a alta- presión:

La cavitación emplea medios pulsantes para remover la -- incrustación mediante chorros de agua a alta presión que se dirigen a la superficie de la incrustación. Si la velocidad del agua es tal que se desarrollen zonas de alta y baja presión repetitivamente, se forman burbujas y se colapsan en la interface sólido-líquido, esto es lo que - se llama cavitación. El colapso de estas burbujas o cavi- dades resultan en impactos de presión que alcanzan cien- tos de atmósferas en áreas localizadas. El impacto resul- tante desprende secciones de material poroso o material- depositado en la tubería.

e) Impacto Térmico: Cuando se realizán cambios de tempera-- tura en un equipo o tubería, los diferentes coeficientes de expansión, del metal y de los depositos, hace que es-- tos últimos presenten grietas y posteriormente se des-- prenda, en pruebas de laboratorios utilizando diferen-- cias de temperatura de 20^oC durante 15 minutos se obtuvo una eficiencia de 30-40%.

f) Inyección de aceites pesados: Se usa en Larderello ita-- lia para limpiar las paletas de las turbinas, utilizando alternadamente para suavizar la incrustación y para remo- verla facilmente.

g) Control de la incrustación por Campo Magnético.

El sistema consiste de un magneto permanente, donde el núcleo es un cilindro de fierro de 40 o 50 cm. - de largo por 10 o 20 de diámetro, el agua al fluir por el sistema se modifica la estructura cristalina del precipitado bajo la influencia del campo magnético y como consecuencia es mas fácil removerlo de las tuberías. Desafortunadamente este método es inaplicable para controlar la incrustación en pozos ya que se coloca de 40 a 50 m. de profundidad en el pozo y esto es muy difícil debido a su diámetro externo.

C A P I T U L O IX

CAPITULO IX

9

MODELO MATEMATICO PROPUESTO PARA EL ESTUDIO DE LA INCRUSTACION

Este modelo matemático para estudiar la incrustación en sistemas geotérmicos, se basa en la teoría de colisiones moleculares y en una rama de la mecánica cuántica, la cinética está entonces en combinación con las condiciones de equilibrio termodinámico de la solución, para determinar la velocidad total de formación de la incrustación.

aplicando la ecuación de continuidad de fenómeno de transporte tenemos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de masa} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{masa} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida de} \\ \text{masa} \end{array} \right\}$$

(referencia 3 3)

aplicándola a nuestro sistema nos da:

$$\frac{dx}{dt} = (\varnothing_d - \varnothing_r) \quad (1)$$

donde

x = espesor de incrustación

t = tiempo

\varnothing_d = velocidad de deposición de incrustación

\varnothing_r = velocidad de remoción de incrustación

la ecuación 1 en forma desarrollada será:

$$\frac{dx}{dt} = a_1 J S - a_2 T x \quad (2)$$

(Referencia W2)

$$J = K_c (C_b - C_w) \quad (3)$$

(Referencia Z3)

$$K_c = \frac{U_b \sqrt{f/2}}{11.8 \cdot Sc^{2/3}} \quad (4)$$

(Referencia I1)

donde a_1 y a_2 = constantes de proporcionalidad

J = velocidad de transferencias de masa

K_c = coeficiente de transferencia de masa

C_b = concentración de especies en la salmuera

C_w = concentración de especies en la pared

U_b = velocidad de flujo de la salmuera

f = factor de fricción de fanning

Sc = número de Schmidt = $\mu/\rho D$

S = probabilidad de reacción *

T = esfuerzo cortante en la pared *

μ = viscosidad de la salmuera

ρ = densidad de la salmuera

D = coeficiente de difusión de masas

* Se discute su cálculo más adelante

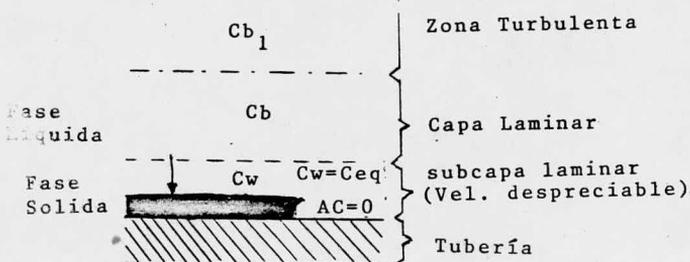
Para un sistema de multicomponentes, la ecuación (2) se convierte en:

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{li} \frac{F_i C_i}{i} - a_2 T_x \quad (5)$$

(referencia 11)

donde AC_i = sobresaturación de las especies i

= $(C_b - C_w)$ pero aquí suponemos que $C_w = C$ equilibrio para una mezcla y una temperatura dada. [C_w se supone igual a C en el equilibrio porque la deposición de incrustación en la pared de la tubería en la subcapa laminar (en donde la velocidad del fluido es despreciable) indica que el exceso de producto de la reacción es transferido del líquido a la fase sólida, implicando el equilibrio]



lo cual significa que en la subcapa laminar tenemos $AC=0$

$$F_i = Si \frac{U_b f/2}{11.8 Sc_i^{2/3}} \quad (6)$$

donde

$$s_{ci} = \mu / \rho D_i$$

μ = viscosidad del fluido

ρ = densidad del fluido

D_i = coeficiente de difusión de masa de las especies en el fluido

S_i = probabilidad de reacción

La solución de la ecuación diferencial:

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{1i} \frac{F_i C_i}{i} - a_2 T_x \quad (7)$$

que es una ecuación diferencial lineal de primer orden, y que nos representa un crecimiento, su solución tiene forma exponencial y sería:

$$X = A (1 - Ce^{-Bt}) \quad (8)$$

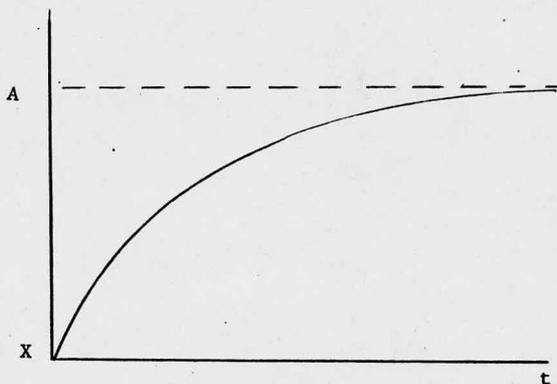
DONDE

$$A = \frac{FAC}{j}$$

$$B = T_x$$

C = Constante de integración, se calcula fijando condiciones iniciales

Cuando la ecuación 8 se representa graficamente, adquiere una gráfica de la siguiente forma:



Esto recuerda con datos publicados y trabajos teóricos de otros autores (TABOREK y colaboradores, julio 1972)
(Referencia No T1)

Para determinar la probabilidad de reacción S_i es necesario desarrollar una pseudo ϕ'_d que se basa en la teoría de colisiones moleculares, suponiendo temporalmente que $\phi_r = 0$ tenemos:

$$\frac{dN_i}{dt} = \left(\frac{1}{4} N \bar{v} \right) S_i = \phi'_d \quad (\text{erosión despreciable}) \quad (9)$$

donde N_i = productos de reacción de las especies i
 N = densidad de reactantes = ΔC ;
 \bar{v} = velocidad molecular promedio

S = probabilidad de reacción

la ecuación (9) al simplificarse queda:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{colisiones moleculares}}{\text{tiempo}} \cdot \frac{\text{reacciones}}{\text{colisión}} = \frac{\text{reacciones}}{\text{tiempo}} = \rho' d \quad (10)$$

aplicando la velocidad molecular de la teoría cinética cuántica (Daniels and Alberty) (Referencia No 21) y aclarando que la energía cinética relativa del centro de masa (de la molécula) deberá ser más o menos igual a la energía de enlace molecular para que la reacción ocurra, para una colisión de dos cuerpos con especies de diferentes masa:

$$S = \left(\frac{\left(\frac{m_i + m_j}{2} \right)^{3/2}}{2\pi K T} \right) \cdot e^{-E_i/KT} \cdot 4\pi v^2 dv \quad (11)$$

(Referencia No 21)

donde:

E_i = energía de enlace por molécula, especies i

E_i = 100 Kcal/mol

m = masa molecular

K = constante de Boltzman = R/N_0

N_0 = número de Avogadro

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta

v = velocidad molecular promedio a la temp T

dv=rango de velocidad entre v y (v+dv) donde las condiciones de energía promedio hacen que el enlace sea mas probable.

la diferencia entre la velocidad molecular relativa y la velocidad molecular promedio en un espacio tridimensional es:

$$[\sqrt{2} - 1]$$

normalizado queda:

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.2928$$

$$\frac{0.2928}{2} = 0.146$$

esto significa que de las moléculas que interaccionan, las que tienen $\pm 14\%$ de la velocidad promedio a la temperatura T, quedan enlazadas.

$$\rho'd = \left[\frac{(m_i + m_j)^{3/2}}{2\pi K T} \cdot e^{-E_i/KT} \cdot 4\pi v^2 dv \right] \left[\frac{1}{4} nV \right] \quad (12)$$

(Referencia Z1)

Haciendo un análisis dimensional tenemos:

$$\rho'd = \left[\frac{\frac{\text{masa}}{\text{molécula}}}{2\pi \frac{\text{erg}}{\text{grado-molécula grado}}} \right]^{3/2} \cdot \left[e^{-\frac{\text{erg/molécula}}{\text{grado-molécula grado}}} \right]$$

$$\cdot 4\pi \left[\frac{\text{distancia}^2}{\text{tiempo}^2} \right] \left(\frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} \right) \left[\frac{\text{moléculas}}{\text{distancia}} \right]^3 \left(\frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} \right) \quad (13)$$

usando la relación $E = mc^2$ para la transformación masa-energía

$$\text{erg} = \text{masa} \frac{\text{distancia}^2}{\text{tiempo}^2}$$

las unidades se reducen a

$$\rho'd = \frac{\text{molécula}}{\text{tiempo-distancia}^2}$$

las cuáles son las unidades deseadas para la deposición de incrustación

$$\rho'd = \frac{\text{incrustación}}{\text{tiempo-área}}$$

(referencia 11)

Observamos que durante el desarrollo de la δ 'd, es posible calcular la probabilidad de reacción S, la cual se sustituye en la ecuación (5) para calcular dx/dt.

El otro factor de la ecuación, δ r (velocidad de remoción) que es $\delta = a_2 T_x$, establece que esta velocidad es directamente proporcional al espesor de incrustación; por ejemplo: cuando el espesor de incrustación aumenta la probabilidad de que se remueva la capa superficial de incrustación.

$$T = \frac{f \rho U_b}{2gc} \quad (14)$$

(referencia II)

y

$$a_2 = K' \sqrt{w} \delta_w$$

K' = constante, es determinada por vía experimental

\sqrt{w} = esfuerzo cortante de la incrustación (refiriéndose a las especies más débiles)

δ_w = fracción masa de las especies más débiles)

Los datos actuales son insuficientes para proponer un modelo que sea representativo, es necesario diseñar experimentos para obtener una gran cantidad de información que nos permita un mejor ajuste del modelo.

Este trabajo concuerda con trabajos publicados por diversos autores (referencia T1).

RESUMEN:

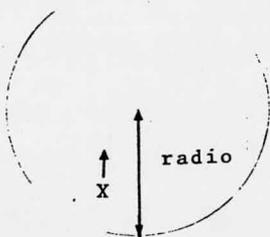
Resumiendo el desarrollo completo del modelo anterior tenemos:

- 1) La velocidad de incrustación se expresa en términos de difusión de masa, probabilidad de reacción, esfuerzos cortantes y a la sobresaturación de los reactivos.
- 2) La cinética cuántica se usa para determinar la probabilidad de reacción S
- 3) S se inserta en la ecuación (5) para determinar la incrustación total.

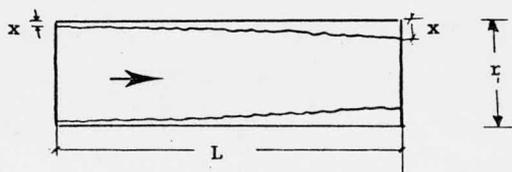
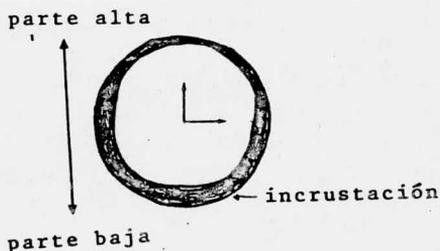
El cálculo en la computadora empieza en la ecuación (5), codificando (traducir el lenguaje matemático a lenguaje de máquina) esta ecuación se inicia la operación

DISCUSION DEL MODELO

El modelo nos proporciona la velocidad de crecimiento de la incrustación así como el espesor de la misma., pero con la limitación de que lo hace en un solo eje (una dimensión) para un punto a las condiciones establecidas (en nuestro caso referimos este eje al radio).



La evidencia experimental demuestra que la incrustación varía con respecto a los 3 ejes (3 dimensiones) por lo cuál el modelo debe desarrollarse más adelante para 3 dimensiones y manejarlo con coordenadas cilíndricas.



L=longitud
r= radio
x= espesor de
incrustación

NOTA: el dibujo es una simplificación

La evidencia demuestra que en la parte baja de la tubería se forma el mayor espesor de incrustación, esto se debe a que la gravedad influye en el fenómeno alterando los perfiles de concentración. También el espesor varía con la longitud, a mayor longitud mayor espesor (disminución de temperatura y solubilidad, aumento de tiempo de polimerización).

9.2 CONDICIONES INICIALES, FINALES Y DE FRONTERA

Para la aplicación del modelo necesitamos calcular el valor numérico de la constante C (ecuación 8), para lo cual fijamos las siguientes condiciones iniciales:



recordando que la ecuación 8 representa una solución de una ecuación diferencial lineal y de primer orden tenemos:

$$X_0 = 0 \quad \text{a} \quad t_0 = 0$$

Para condiciones finales tendríamos

$$0 \leq x \leq A \quad \text{a} \quad t = t_i$$

estrictamente hablando :

$$0 \leq x \leq r \quad \text{para cualquier} \quad t \neq 0$$

Para probar el modelo con éstas condiciones, se piensan obtener las condiciones de frontera y las finales, de datos experimentales estas condiciones serán las condiciones reales del proceso.

Con este objeto se van a tomar para su estudio, 3 tramos de tubería, tomadas a diferentes distancias en una misma línea de las que tienen más tiempo en operación. (estos tramos se solicitaron a la Coordinadora en C. P.)

Los tramos solicitados corresponden al sistema de descarga a la laguna del N-5, las muestras serán tomadas en la sección recta de la línea cerca de la laguna

Obteniendose datos de:

- a) Características físicas de la tubería (\emptyset , longitud, cédula rugosidad etc)
- b) concentración de salmuera
- c) Temperatura, presión, densidad, entalpa de la salmuera
- d) patrones y velocidad de flujo
- e) fases presentes de la solución
- f) velocidad y espesor de incrustación a un tiempo t
- g) flujo másico
- h) concentración de saturación de las especies

El planteamiento para encontrar las condiciones finales y de frontera reales sería el siguiente:

para un sistema con las características anteriores, encontramos un espesor de incrustación x y una velocidad de incrustación dx/dt a un tiempo t .

¿ Cuanto tiempo se requiere para alcanzar un espesor y una velocidad dy/dt ?

9.3

INFORMACION EXPERIMENTAL NECESARIA

- a) Temperatura de salmuera
- b) presión de salmuera
- c) entalpía de salmuera
- d) densidad de salmuera
- e) viscosidad de salmuera
- f) velocidad de flujo
- g) fases presentes de la solución
- h) flujo másico
- i) Composición de la salmuera
- j) concentración de saturación de las especies
- k) velocidad de incrustación
- l) espesor de incrustación
- m) tiempo requerido
- n) características del proceso
- o) cambios durante la operación de los incisos anteriores
- p) otros factores (características del equipo, \emptyset , long, cédula)

9.4

INFORMACION TEORICA NECESARIA

Esta especificada durante el desarrollo del modelo.

$$\begin{aligned}
 A &= 15.51 \times 10^{-3} \\
 B &= 1.02 \times 10^{-2} \\
 C &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= 29.77 \times 10^{-3} \\
 B &= 1.96 \times 10^{-2} \\
 C &= 1
 \end{aligned}$$

(Valor usado para el período de inducción = 100 hrs.)

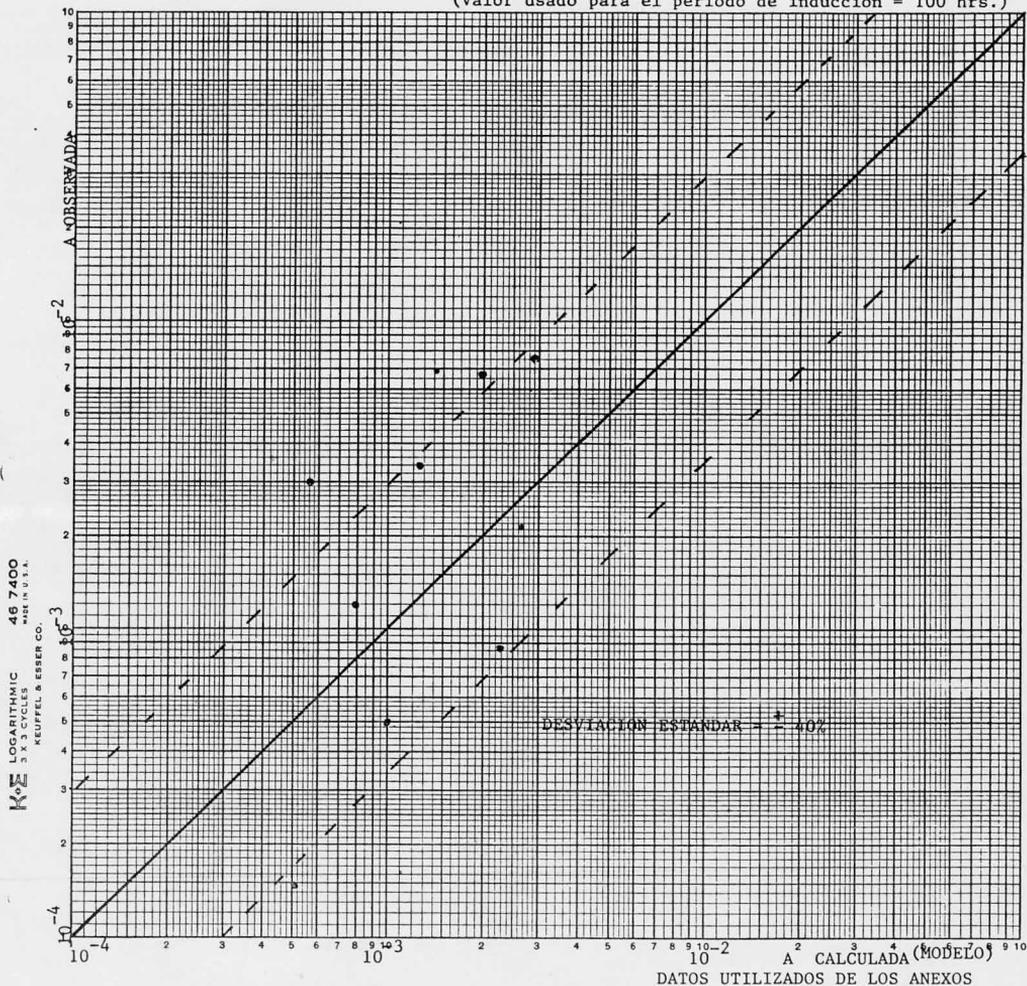


FIG. 9 - 1 SENSIBILIDAD DEL MODELO

Los casos que pueden presentarse durante la formación de la incrustación son los siguientes:

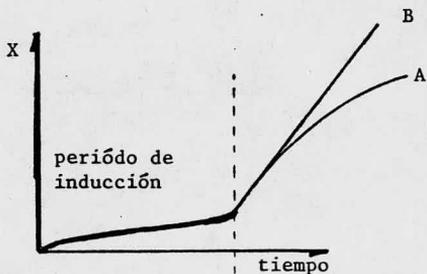
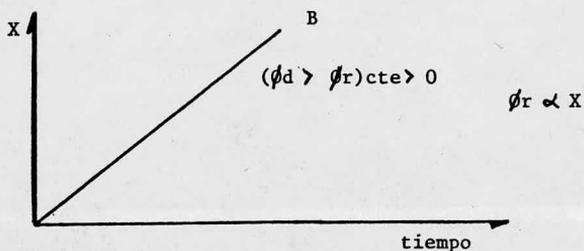
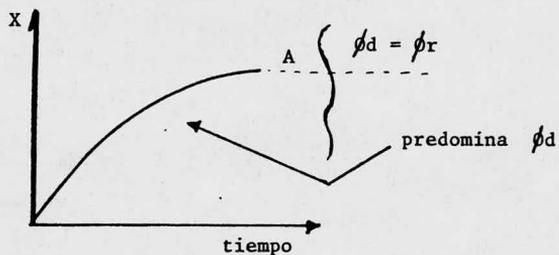


FIG. 9 - 2

Para calcular los coeficientes experimentalmente para resolver las ecuaciones planteadas se puede seguir el siguiente método:

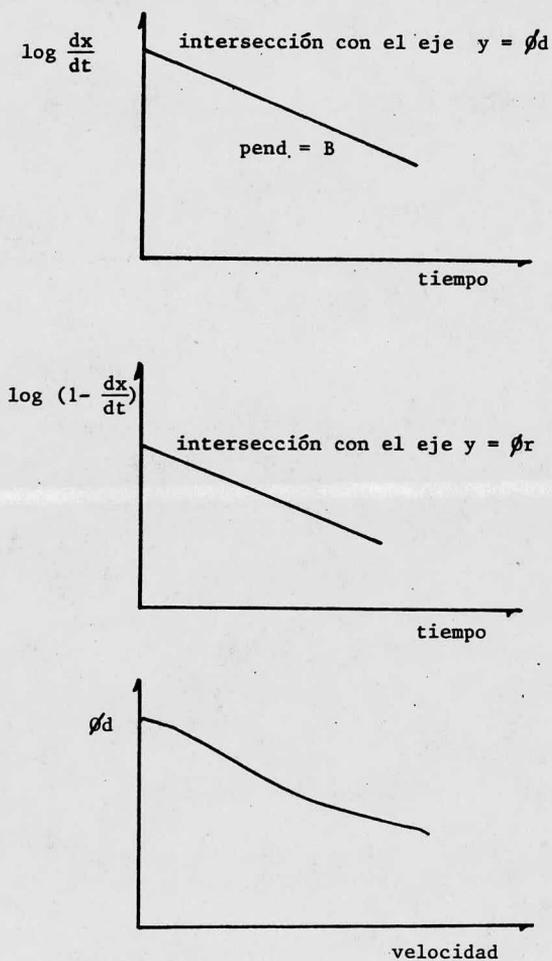


FIG. 9 - 3

C A P I T U L O X

CAPITULO X

Conclusiones y Recomendaciones.

Resumen.- El proceso de incrustación en sistemas geotérmicos depende de un gran número de parámetros, y se efectúa a través de diversos mecanismos que pueden ser competitivos, simultáneos, consecutivos o independientes, esto trae como consecuencia una gran complejidad para su estudio.

Los métodos actuales para controlar la incrustación se han descrito en el CAPITULO VIII, y consisten básicamente en el tratamiento de la salmuera mediante aditivos químicos para prevenir la incrustación o métodos mecánicos para eliminarla una vez que se ha formado..

El agregar reactivos químicos presenta algunas desventajas, tales como: su alto costo, los efectos colaterales como es la precipitación de otros compuestos indeseables que pueden generar problemas graves (por ejem. Hidróxidos), o también puede generar corrosión (por la adición de ácidos), por otra parte los métodos mecánicos pueden originar erosión y abrasión, por otro lado estos métodos no son completamente eficientes.

CONCLUSIONES.

- 1.- La incrustación en los pozos geotérmicos por calcita depende principalmente de la presión, ya que al decrecer se libera el CO_2 disuelto y se promueve una carbonatación.
- 2.- Al desprenderse el CO_2 y el H_2S de la salmuera, el pH aumenta, la sílice polimeriza más rápido y es co-precipitada con sulfuros e hidróxidos.

- 3.- La velocidad de polimerización depende fuertemente del pH, es mínima a pH bajo (1 a 3), y es máxima cerca de pH 7.5.
- 4.- La velocidad de polimerización de soluciones de sílice sobresaturadas es función directa de la temperatura.
- 5.- La densidad y el espesor de la incrustación, son funciones inversas a la velocidad del flujo.
- 6.- El mejor solvente para la incrustación de pozos hasta la fecha es el HCl, y para los equipos superficiales es el HF.

RECOMENDACIONES.

- 1.- Es conveniente que el modelo se implemente a tres dimensiones para que sea más representativo.
- 2.- Mejorar o buscar nuevos sistemas de monitoreo para estudiar la formación de incrustaciones y sus parámetros.
- 3.- Probar la mayor cantidad de datos en el modelo, con el objeto de encontrar los coeficientes más representativos del campo geotérmico de Cerro Prieto.
- 4.- Estudiar el modelo con los efectos de inhibidores de incrustación, secuestrantes, aditivos, etc. sobre los fluidos geotérmicos y sus propiedades.

A N E X O A

Arreglos de Pruebas de Incrustación.

Nomenclatura.

P_c - Presión del cabezal

P_L - Presión en la línea.

P_a - Presión absorbedor de presión.

$P_{5,10,etc.}$ - Presiones de operación en las líneas del Tandem

$F_{5,10,etc.}$ - Flujos de agua.

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN LOS EQUIPOS PILOTOS DATOS DE OPERACION.

A) EQUIPO SIN SEPARACION DE VAPOR.

T A B L A A - 1

FECHA:	28-VI-77	30-VI-77	4-VII-77	6-VII-77	8-VII-77
P_e psig	90	90	93 :	96	94
P_s psig	88	89	91	92	92
P_1 psig	89	90	92	93	93
P_a psig	74	69	72	75	85
P_5 psig	2.5	1.5	1.7	2	8
P_{10} psig	11.5	8.5	10.2	15	10
P_{10} psig	14	7.5	17.5	17	22
P_{15} psig	15	12	11	17	30
P_{20} psig	9.5	17	10	15	22.5
F_5 Lt/m	7.5	5.4	7.2	9.3	15.5
F_{10} Lt/m	10.1	6.5	8.9	13.6	13.6
F_{10} Lt/m	8.6	7.5	8.9	17.8	19.3
F_{15} Lt/m	2.3	1.1	1.4	2.3	10.5
F_{20} Lt/m	2.8	4.2	2.7	3	5.1

TABLA A - 2

TANDEM INCRUSTACION POZO M-20

	MAYO		JUNIO																		
	30	31	1	2	3	6	7	8	9	10	13	15	16	17	20	21	22	23	24	27	
PC _{psig}	98	92	90	94	83	82	83	82	77	78	76	78	76	77	77	78	77	77	78	78	90
PS _{psig}	86	83	83	83	94	90	90	89	87	87	87	85	88	90	88	90	88	88	88	91	90
PL _{psig}	95	90	90	90	90	90	90	90	88	86	98	90	88	89	89	90	90	90	90	88	90
PA _{psig}	75	75	78	70	70	73	75	73	73	73	72	75	75	77	77	75	75	73	75	75	90
P5 _{psig}	4	5	5	5	5	4	5	4	4	4	4	8	4	6	5	8	4	4	7	3	90
P10 _{psig}	10	10	10	8	9	8	9	8	8	8	7	9	8	11	12	7	9	8	10	9	90
P10 _{psig}	9	10	10	8	10	8	8	8	8	7	6	10	7	11	6	10	8	7	8	11	90
P15 _{psig}	15	15	15	15	17	15	18	15	17	18	17	15	11	14	11	10	10	12	11	16	90
P20 _{psig}	20	20	20	22	20	2	3	2	1.3	2.5	1.4	3	2	5	3	3	2	2	3	18	90
F5 _{lt/m}	6.6	8.4	8.7	6.1	8.4	4.8	7.1	6.3	3.7	5.6	5.3	9.1	7.6	9.8	8.7	9.8	8.7	6.7	9.1	7.3	90
F10 _{lt/m}	7.7	6.6	6.8	4.4	6.1	5.9	6.6	6.1	5.4	5.3	6.1	9.4	7.6	9.8	9.1	8.1	7.8	6.0	8.4	8.7	90
F10 _{lt/m}	7.1	7.0	7.9	3.5	6.1	4.2	6.1	5.8	3.2	3.5	3.1	8.4	6.3	8.2	8.1	8.7	8.3	3.7	5.0	9.4	90
F15 _{lt/ml}	1.6	1.8	2.1	1.5	1.9	1.6	1.9	1.8	1.4	1.4	1.5	2.1	2.0	2.0	1.8	2.9	1.7	1.3	1.8	2.1	90
F20 _{lt/m}	4.2	3.4	4.4	5.0	4.3	1.6	1.7	1.6	1.0	1.1	1.0	1.3	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.3	1.7	4.8	90

T A B L A A - 3

Lectura de datos en equipo de incrustación en el Pozo M-20

FECHA:	22-VII-77	25-VII-77	29-VII-77	1-VIII-77	8-VIII-77	11-VIII-77
P _c psig	92	92	96	94	96	97
P _s psig	80	78	78	76	76	78
P ₁ psig	93	93	91	91	92	95
P _a psig	40	38	55	67	64	67
P ₁ psig	1	1	1	1	1	0.75
P ₃ psig	3.2	2	3	3	3	2.7
P ₅ psig	3.5	4	5	5	5	5
P ₇ psig	2.2	2.5	7	6	6	5.5
P ₉ psig	9	9	9	9	7	7
F ₁ lt/m	5.81	7.74	9.3	8.6	8.6	8
F ₃ lt/m	7.26	11.6	4	11.6	5.81	6.1
F ₅ lt/m	6.64	8.6	10.1	8.6	11.6	9.3
F ₇ lt/m	1	2.8	4.47	3.6	3.22	3.1
F ₉ lt/m	3	3.27	3.9	3.1	2.9	2.6

T A B L A A - 4

FECHA:	5-VII-77	8-VII-77	11-VII-77	29-VII-77	1-VIII-77	8-VIII-77	10-VIII-77		
P _c psig	117	112		122	120	120			
P _s psig	104	108		96	94	96			
P ₁ psig	92	94		94	95	90			
P _a psig	7	98.5		95	97	96			
P ₃ psig				3	2.5	2.8			
P ₅ psig	11.5	5.5	FUERA DE OPERACION	5	3.5	4.2	FUERA DE OPERACION		
P ₁ psig				1	1	1			
P ₇ psig				7	4.5	-			
P ₈ psig				9	8.7	-			
P ₁₀ psig	6.5	2							
P ₁₀ psig	15	3.5							
P ₁₅ psig	-	13							
P ₂₀ psig	85	25							
F ₃ Lt/m					2.39	4.38		2.73	
F ₅ Lt/m	9.3	6.28			5.4	4.94		3.32	
F ₁ Lt/m				2.73	2.9	2.67			
F ₇ Lt/m				3.6	3	2.02			
F ₉ Lt/m				2.05	1.93	1.29			
F ₁₀ Lt/m	6.28	3.87							
F ₁₀ Lt/m	9.3	4.65							
F ₁₅ Lt/m	6.11	4.84							
F ₂₀ Lt/m	-	4.84							

A N E X O B

B) Equipo Piloto de Separación

CON SEPARACION DE VAPOR

NOMENGLATURA

Pc	=	Presión cabezal (psig)
P _S	=	Presión separador primario (psig)
P _s	=	Presión separador piloto (psig)
P _{cono}	=	Presión cono de medición (psig)
N _v	=	Nivel agua en vertedero (cms)
G _s	=	Flujo de vapor separado (ton/hr)
G _{w₁}	=	Flujo de agua alimentada (ton/hr)
G _{w₂}	=	Flujo de agua separada (ton/hr)
G _{w₃}	=	Flujo de agua en el vertidor (ton/hr)

Separador Piloto Pozo - M21A

Fecha	Pc Psig	Ps Psig	Pao Psig	Pe Psig	Po Psig	Psi Psig	Pcono Psig	Tf °C	Tv °C	Tcono °C	Nv Cm	Gs Ton/hr	Gw ₁ Ton/hr	Gw ₂ Ton/hr	Gw ₃ Ton/hr	G _{So} Ton/hr
Jun. 8	120	96		10.8	9.8	9.8	4.2	95	101	88	5.4	0.359	4.16	3.80	3.70	0.105
" 9	120	95		11.5	10.0	10.1	4.2	95	102	95	5.3	0.359	3.96	3.60	3.50	0.104
" 10	120	96		13.0	11.9	11.4	-	97	100		5.2	-	-	3.37	3.26	0.112
" 13	112	96		12.7	11.5	11.5	3.2	96	104		5.2	0.340	3.71	3.36	3.26	0.106
" 14	112	97		12.5	11.0	11.0	3.5	97	104	97	5.3	0.346	3.95	3.61	3.50	0.110
" 15	115	97		11.5	11.5	11.2	3.4	96	100		5.3	0.344	3.95	3.61	3.50	0.114
" 16	120	96		13.5	12.0	11.5	3.6	96	104	89	5.6	0.348	4.49	4.15	4.01	0.138
" 17	120	96		13.5	11.5	11.3	3.2	96	105	94	5.4	0.340	4.16	3.82	3.70	0.121
" 20	120	96		13.5	12.0	11.8	3.5	97	105	94		0.346				
" 21	120	97		13.5	12.5	12.0	3.7	97	104	83	4.8	0.350	3.17	2.82	2.73	0.095
" 22	121	96		12.5	12.0	12.0	3.6	96	103	97	4.8	0.348	3.00	2.75	2.66	0.091
" 23	112	96		12.5	12.0	12.0	3.6	96	104	97	4.8	0.348	3.10	2.75	2.66	0.091
" 24	112	96		13.0	12.0	12.0	3.5	96	96	97	4.9	0.345	3.31	2.97	2.87	0.099
Jul. 5	117	104	25	6.5	12.0	4.0	4.7	97	96	97	6.3	0.369	5.95	5.59	5.40	0.186
" 8	112	108	26	7.0	6.0	5.2	5.5	95	96	95	6.4	0.384	6.10	5.71	5.61	0.102
" 13	120	97	22	6.2	6.5	3.8	4.3	97	96	94	5.5	0.361	4.27	3.91	3.84	0.076
" 22	120	100	23	7.0	5.0	4.8	4.5	96	97	88	6.3	0.365	6.35	5.99	5.90	0.091
" 25	120	97	23	6.5	5.0	4.5	4.3	99	97	90	5.6	0.361	4.43	4.07	4.01	0.061
" 27	120	95	22	6.5	4.8	4.7	4.6	97	97	95	5.9	0.366	5.00	4.63	4.57	0.065
" 29	120	96	23	7.0	4.9	4.7	4.6	98	95	98	5.4	0.368	4.12	3.75	3.70	0.055
Ag. 1	120	94	22	6.5	4.8	4.2	4.5	99	97	97	5.5	0.365	4.26	3.89	3.84	0.055
" 8	120	96	22	6.0	4.8	4.6	4.4	95	-	-	-	0.363	-	-	-	-

T A B L A B - 3

Lectura de datos en flasheador piloto en el pozo M-20

FECHA	Agosto 25	Agosto 29	Agosto 31	Sept. 2	Sept. 5	Sept. 7	Sept. 8	Sept. 12	Sept. 14	Sept. 19
P_c psig.	97			97		86				
P_s psig.	76			78		76				
P_s psig.	7.5	6	4.5	4.3	4.8	4.2	4.5	4.5	4.5	4.5
P_{cono} psig.	6	5.5	4	4	3	4	4	4.2		4.2
N_v cm	6.22cm	6.14	4.44	5.6	5.8	4.8	5.9	5.7	4.7	6

FLASHEADOR PILOTO M-20

Ton/hr Gw ₃	F ₂	1-F ₂	Ton/hr. Gw ₂	Ton/hr. Gs ₂	Ton/hr. Gw ₁	Ton/hr. Gs ₂₀	
4.77	0.016	0.984	4.84	0.38	5.22	0.51	25 AGOSTO
4.62	0.0157	0.9843	4.69	0.371	5.061	0.507	20 AGOSTO
2.058	0.0157	0.9843	2.09	0.343	2.433	0.243	31 AGOSTO
3.66	0.0142	0.9858	3.71	0.343	4.053	0.400	2 SEPT.
4.002	0.0157	0.9843	4.06	0.325	4.385	0.441	5 SEPT.
2.49	0.0157	0.9843	2.52	0.343	2.863	0.283	7 SEPT.
4.17	0.0157	0.9843	4.23	0.343	4.57	0.451	8 SEPT.
3.83	0.016	0.984	3.89	0.347	4.23	0.424	12 SEPT.
2.36	0.016	0.984	2.39	0.353	2.743	0.266	14 SEPT.
4.35	0.017	0.983	4.42	0.353	4.773	0.41	19 SEPT.

B - 5

T A B L A B - 4

A N E X O C

c).- SEPARADOR PILOTO (FLUJO MEZCLADO DE POZOS M20 Y M21A)

NOMENCLATURA

Pe_1	=	Presión línea pozo M-20
Pe_2	=	Presión línea pozo M-21-A
Pa_0	=	Presión antes del orificio
Pd_0	=	Presión después del orificio
Pf	=	Presión separador piloto
Psa	=	Presión salida piloto
Pc	=	Presión cono
Nv	=	Nivel de agua vertedero
Psl	=	Presión al final de la tubería de descarga
F	=	Flujo de agua lt/ng
Gs	=	Gasto de vapor flasheado (ton/hra)

TABLA C-1
EQUIPO EN SERIE EN PLATAFORMA M-21-A

	Ton/hr Gw ₁	Ton/hr Gw ₂	Ton/hr Gw ₃	Ton/hr Gw ₄	Ton/hr Gs ₂	Ton/hr Gs ₂₀	Ton/hr Gs _{3'}	Ton/hr Gs ₃₀	Ton/hr F ₁	Ton/hr F ₂	Ton/hr F ₃
25 AGOSTO	4.91	4.60	4.2	4.07	0.31	0.22	0.398	0.269	0.045	0.0585	0.032
24 AGOSTO	-	-	-	1.72	0.284	-	0.371	-	-	-	-
31 AGOSTO	-	-	-	2.058	0.283	-	0.371	-	-	-	-
2 SEPT.	2.23	1.966	1.625	1.58	0.274	0.113	0.341	0.106	0.051	0.054	0.028
5 SEPT.	-	-	1.805	1.786	0.292	-	-	-	-	-	0.0106
7 SEPT.	2.69	2.383	2.063	2.006	0.307	0.123	0.358	0.168	0.045	0.062	0.027
9 SEPT.	-	2.56	2.192	2.122	-	-	0.371	-	-	-	0.031
12 SEPT.	2.603	2.306	1.946	1.894	0.297	0.114	0.362	0.1532	0.044	0.066	0.026
19 SEPT.	3.04	3.04	2.4	2.366	0.294	0.105	0.349	0.206	0.034	0.075	0.0132

T A B L A C - 2

FECHA	Agosto 25		Agosto 29		Agosto 31		Sept. 2		Sept. 5		Sept. 7		Sept. 9		Sept. 12	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
P _C psig	120	120	122	122												
P _S psig	98	98	99	99												
P _S psig	50	12	50	10.7	54.5	11	44	10.2	43.9	3.7	50	9.8	50	11.5	50	9
P _{conq.} psig	2.3	7	0.75	5.5	0.7	5.5	1	3.85	1.2		2	4.8		5.5	1.5	5
N _V cm	5.3		4.35				4cm		4.4cm		4.4cm		4.5cm		4.3cm	

T A B L A c - 3
 CON FLUJO MEZCLADO EN LINEAS DE AGUA SEPARADA DE
 POZOS M-21A y M-20

PRESION CONO psig	3.5	13.5	16	10	132	OBSERVACIONES
PRESION ENTRADA M-21A psig	23	77	78	60	60	PRUEBA No.1 Válvula de salida de agua del flasheador totalmente abierta. Válvula de descarga a la laguna casi totalmente cerrada. No hay nivel. Flujo 3 Ton/hr aprox.de agua en salida laguna.
PRESION ENTRADA M-20 psig	22	77	77	59	59	PRUEBA No.2 Válvula de salida agua abierta total Válvula salida laguna abierta total. Nivel 4"
PRESION ANTES ORIFICIO psig	20	75	74	56	55	
PRESION DESPUES ORIFICIO psig	3	21.5	19.5	10	12.5	PRUEBA No.3 Válvula de salida agua abierta total. Válvula de salida laguna abierta mitad. Nivel 4"
PRESION FLASHEO psig	4	21	19.5	10.5	13.5	
PRESION SALIDA AGUA psig	3.5	20	19	10	13	PRUEBA No.4 Válvula salida agua abierta total Válvula salida laguna abierta 1/4 Nivel 1"
PRESION PUNTA LAGUNA psig	0.5	5	5	2	9	PRUEBA No.5 Idem anterior cerrando más válvula descarga laguna.
No.Prueba	1	2	3	4	5	Se observa desaparición vapor en descarga. Nivel no sube 4.5 ton.de agua a la salida de la laguna.

A N E X O D

T A B L A D - 1

D).- PRUEBAS EN EQUIPO DE INCRUSTACION CON SEPARACION DE VAPOR CON FLUJO MEZCLADO DE POZOS M-20 Y M-21A.

FECHA	PSIG P	PSIG P _{e2}	PSIG P _{ao}	PSIG P _{ao}	PSIG P _f	PSIG P _{sa}	PSIG P _c	PSIG Niv.	PSIG P _{sL}	LTS/SEG F	OBSERVACIONES
SEPT.13 1	55	51	50	12	12	11.5	11.7	1"	6	1.6	Gs ₁ = 0.485 Ton/hora Válvula de salida laguna 1/2 cerrada.
2	54	50	48	10	11	10	10.1	1/2"	2	-	Gs ₁ = 0.456 Válvula de salida laguna totalmente abierta.
3	50	50	45	7	9	7.5	7.6	1/2"	1.5	2	Gs ₁ = 0.410 Válvula salida laguna totalmente abierta flasheando cada 2seg
4	51	50	47	9	9.5	9	9.7	1/2"	4.2	1.11	Gs ₁ = 0.448 Válvula salida laguna estrangulada parcialmente.
5	55	52	50	8.5	8.7	8	8.2	1"	3	-	Gs ₁ = 0.421 Válvula salida laguna abierta, la presión baja lentamente.
6	52	59	58	12	13	12	13	1"	5.8	1.5	Gs ₁ = 0.509 Válvula salida laguna cerrada 3/4.
7	56	54	53	9	9.5	8.7	9.2	1"	2	2	Gs ₁ = 0.439 Válvula salida laguna abierta totalmente flujo pulsante.
8	56	55	53	11	11	11	11.2	1"	6	1.25	Gs ₁ = 0.476 Válvula salida laguna estrangulada totalmente se ahogó a la 1/2 hora.

TABLA D - 2
 PRUEBAS EN EQUIPO DE INCRUSTACION CON SEP. DE VAPOR
 CON FLUJO MEZCLADO DE POZOS M-20 Y M-21-A.

Fecha Prueba	Pe ₁ psig	Pe ₂ psgi	Pa ₀ psig	Pdo psig	PP psig	Psa psig	Pc psig	Niv psig	P _{sl} psig	F Lit/seg	Gs ₁	Observaciones
Sept 15 (1)	52	49	48	9	9.2	8.5	8.9	1/2"	3	2.5	0.43	Válvula salida laguna abierta
(2)	52	50	48	9.5	11.2	10.5	11.1	3/4"	6.6	1.17	0.47	Válv. salida laguna estrangulada totalmente.
(3)	53	50	47	9.7	10.5	9.5	10.1	1/2"	2.2	1.82	0.45	Válv. salida laguna abierta totalmente
(4)	54	51	48	9.7	10.3	9.9	10.1	1/2"	4.7	1.5	0.45	Válv. salida laguna estrangulada parcialmente.
(5)	54	52	49	9.6	11.1	10.5	11.	1/2"	5.2	2.5	0.47	Válv. salida laguna estrangulada parcialmente.

En la prueba No. (2) el equipo se ahogo a los 4 minutos.

En la prueba No. (3) la presión Psl siguió bajando durante 10 minutos.

En la prueba No. (4) la presión Psl subió hasta 6 en 10 minutos.

En general la presión Psl a la salida a la laguna responde a los 10 minutos de establecidas las condiciones.

Se dejó el equipo en condiciones estables en la prueba No. 5.

A N E X O E

E).- Determinación de Na y Ca en agua separada a la presión atmosférica. Arreglos de prueba instalados en los Pozos M-20 y M-21.

T A B L A E - 1

Tandem Pozo No.	Fecha	Toma	Na ppm	Ca ppm
M-20	27/6/77	1	5594	465
		2	5845	489
		3	6216	481
		4	5220	481
		5	5096	477
	8/7/77	1	6511	-
		2	6511	449
		3	6630	429
		4	6576	441
		5 verted.	6760 6393	465 449
	22/7/77	1	6963	434
		2	6740	493
		3	6870	481
		4	7035	465
		5	6760	481
	4/8/77	1	6611	-
2		6558	464	
3		7038	463	
4		7122	-	
5		6845	-	
M-21A	6/7/77	1	8000	485
		2	8395	497
		3	8050	493
		4	8330	497
		5	8352	469
		verted.	8160	385

A N E X O F

F).- FLASHEADORES PILOTO - DETERMINACIONES DE CALIDAD

T A B L A F - 1

F.PILOTO POZO No.	FECHA	PRESION SEP Kg/cm ²	SODIO EN VA POR ppm	SODIO EN AGUA SEP. ppm	HUMEDAD Y %	CALIDAD 100-y %
M-20	9/VII/77	1.64	3.6	6870	0.05	99.95
	22/VII/77	1.7	4.1	6552	0.06	99.94
	4/VIII/77	1.65	3.2	6699	0.05	99.95
M-21A	6/VII/77	1.45	11	7402	0.15	99.85
	21/VII/77	1.38	7	8395	0.08	99.92
	4/VIII/77	1.37	4.5	8176	0.055	99.945

A N E X O G

T A B L A G - 1

G).- ANALISIS EN EQUIPOS DEL POZO M-21A

Sept. 2, 1977.

TANDEM	Na ppm	K ppm	Ca ppm	SiO ₂ ppm	SOLIDOS
1	8346	1768	460	976	28 210
2	8453	1746	435	976	26 512
3	8037	1768	420	945	26 548
4	8248	1745	420	981	26 452
5	8025	1751	420	961	26 752
VERTEDERO	7095	1760	425	980	25 980

T A B L A G - 2

VAPOR SEPARADO POR COND.	Na ppm	CALIDAD %
1er FLASHED 50 psig	4.22	99.95
2do FLASHED 10 psig	6	99.95

A N E X O H

TABLA H - 1 COMPOSICION QUIMICA DE LAS INCRUSTACIONES FORMADAS EN LOS FLASHADORES PILOTO TRABAJANDO A PRESIONES DENTRO DEL RANGO DE 15 a 50 Psig.

No	DESCRIPCION	POZO	P _{mo} Kg/cm ² a Psig	T _{mo} °C	SiO ₂ %	Fe %	Ca %	Mg %
01	Cuerpo 1er Flasheador	M-21A			79.02	0.82	0.038	0.023
03	Salida agua tanque nivel 1er Flash.	M-21A			67.60	7.50	0.200	0.420
04	Cuerpo 2o. Flasheador	M-21A			46.60	33.00	0.110	0.022
07	Salida agua tanque nivel 2o. Flash.	M-21A			81.90	0.23	0.150	0.027
08	Vertedero	M-21A			82.10	3.40	0.290	0.120
09	Cuerpo del Flasheador	M-20			6.83	52.00	0.066	0.005
11	Salida agua tanque nivel	M-20			83.40	2.10	0.076	0.020
13	Vertedero	M-20			50.20	0.10	0.760	0.002
14	Cuerpo del Flasheador	Laguna			36.98	31.00	0.500	0.043
18	Salida agua tanque nivel	Laguna			56.20	8.50	0.370	2.900
20	Vertedero	Laguna			89.20	0.42	0.060	0.110

Nota: T_{mo} = Temperatura media de operación; P_{mo} = Presión media de operación.

TABLA H - 2 CARACTERISTICAS FISICAS DE LAS INCRUSTACIONES FORMADAS EN LOS FLASHEADORES
PILOTO TRABAJANDO A PRESIONES DENTRO DEL RANGO DE 15 a 50 Psig.

No	DESCRIPCION	POZO	A P A R I E N C I A	CONSISTENCIA	ESPESOR mm	TIEMPO h
01	Cuerpo 1er Flasheador	M-21A	Gris negrusca.No prop. magnét.	Muy frágil	2.0	1992
02	Paréd Tanque N. 1er Flash	M-21A	Gris clara. No prop. magnéticas	Muy frágil	1.5	1992
03	Salida Agua T.N. 1er Fls	M-21A	Gris. No prop. magnéticas.	Dura	2.0	1992
04	Cuerpo 2o flasheador	M-21A	Negra amarillenta.Prop. magnét.	Muy frágil	2.0	1992
05	Pared T.N. 2o Flasheador	M-21A	Gris negrusca. Prop. magnéticas	Frágil.	1.5	1992
06	Entrada Agua T.N. 2o Fla	M-21A	Gris. Propiedades Magnéticas	Frágil.	3.0	1992
07	Salida agua T.N. 2o Fla.	M-21A	Multicapas gris y blancas NPM.	Algo dura	6.0	1992
08	Vertedor	M-21A	Entre amarillo y verde.NPM.	Vitrea muy dura	12.0	1992
09	Cuerpo del Flasheador	M-20	Negra amarillenta.Prop. Magnét.	Frágil	1.2	1608
10	Pared Tanque Nivel	M-20	Multicolores. Prop. Magnéticas	Muy frágil	1.0	1608
11	Salida agua Tanque Nivel	M-20	Multicapas vitreas. Gris Prop.M.	Muy frágil	1.5	1608
12	Cuerpo Silenciador	M-20	Blanca. Muy porosa	Blanda.	13.0	1608
13	Vertedero	M-20	Blanca. Muy porosa.	Blanda.	2.4	1608
14	Cuerpo del Flasheador	Laguna	Gris negrusca. Propiedades Mag.	Frágil.	1.0	1848
15	Interior descarga vapor	Laguna	Gris negrusca. Propiedad. Magn.	Muy frágil	0.8	1848
16	Exterior descarga vapor	Laguna	Gris negrusca. Prop. Magnéticas	Poca consisten.	1.0	1848
17	Pared tanque nivel	Laguna	Gris negrusca. Prop. Magnéticas	Frágil	1.0	1848
18	Salida agua tanque nivel	Laguna	Gris negrusca. No prop. magnét.	Algo dura	8.0	1848
19	Válvula salida de agua	Laguna	Gris negrusca. Prop. magnéticas	Poca consisten.	0.7	1848
20	Cuerpo del vertedor	Laguna	Gris verdusca. Vitrea P.M.debil	Muy dura	4.5	1848
21	Salida agua vertedero	Laguna	Gris verdusca. Vitrea N.P.M.	Muy dura	4.0	1848

TABLA H - 3 INSIDENCIA DE INCRUSTACIONES EN LOS FLASHEADORES PILOTO, TRABAJANDO A PRESIONES DENTRO DEL RANGO DE 15 a 50 Psig.

No	DESCRIPCION	POZO	I_s g/cm ²	D' g/cm ³	I_{sa} g/cm ² año	$V \left(\frac{I_{sa}}{D'} \right)$ cm/año	$V(e/t)$ cm/año	ESPESOR mm	TIEMPO días
01	Cuerpo 1er Flasheador	M-2 A	1.10	2.69	3.98	1.48	0.72	2.0	83
02	Pared Tanque Nivel 1er Fl.	M-21A	0.90	3.20	3.25	1.02	0.54	1.5	83
03	Salida Agua T.N. 1er Fla.	M-21A	1.20	3.60	4.34	1.20	0.72	2.0	83
04	Cuerpo 2o. Flasheador	M-21A	1.72	4.40	6.22	1.41	0.72	2.0	83
05	Pared T.N. 2o. Flasheador	M-21A	0.50	3.00	1.81	0.60	0.54	1.5	83
06	Entrada agua T.N.2o. Flash	M-21A	0.20	0.75	0.72	0.96	1.08	3.0	83
07	Salida agua T.N. 2o. Flash	M-21A	4.00	1.20	14.46	12.05	2.17	6.0	83
08	Vertedor	M-21A	2.16	2.40	7.81	3.25	4.34	12.0	83
09	Cuerpo del Flasheador	M-20	0.50	2.40	2.24	0.93	0.54	1.2	67
10	Pared Tanque Nivel	M-20	1.00	3.00	4.48	1.49	0.45	1.0	67
11	Salida agua tanque nivel	M-20	0.52	0.99	2.33	2.35	0.67	1.5	67
12	Cuerpo Silenciador	M-20	2.00	1.53	8.96	5.85	5.82	13.0	67
13	Vertedero	M-20	1.28	0.58	5.73	9.88	1.07	2.4	67
14	Cuerpo del Flasheador	M-20	0.50	3.00	1.95	0.65	0.39	1.0	77
15	Interior descarga vapor	Laguna	0.40	2.00	1.56	0.78	0.31	0.8	77
16	Exterior descarga vapor	Laguna	0.50	2.00	1.95	0.97	0.27	1.0	77
17	Pared tanque de nivel	Laguna	0.60	2.90	2.34	0.81	0.39	1.0	77
18	Salida agua tanque nivel	Laguna	1.21	2.00	4.71	2.36	3.12	8.0	77
19	Válvula salida de agua	Laguna	0.40	2.00	1.56	0.78	0.27	0.7	77
20	Cuerpo del vertedor	Laguna	1.10	2.40	4.29	1.79	1.75	4.5	77
21	Salida agua vertedero	Laguna	1.00	2.30	3.90	1.69	1.56	4.0	77

BIBLIOGRAFIA DEL MODELO

- A1 Alexander, G.B., J. Am. Chem. Soc., 76 ., 2094 (1954).
- A2 Allegrini, G. and Benvenuti, G., Geothermics - Special Issue No. 2
U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources
Pisa, Italy, 1970, Vol. 2, Part 1, 865 1970.
- Allen, L.H. and Matijevic, E., J. Colloid and Interface Sci., 31 ,287
1969
- A4 Ashley, K.D. and Innes, W.B., Ind. Eng. Chem., 44,2857 (1952)
- A5 Allyn R. Marsh, Gerhard Kleim; POLIMERIZATION KINETICS ANDEQUILIBRIA OF
SILICIC ACID IN AQUEOUS SYSTEMS, Lawrence Berkeley Laboratory.
- H1 Hahn, H.H. and Stumm, W.J., Colloid and Interface Sci., 28, 134 (1968).
- H2 Hurd, C.B., Frederick, K.J., and Haynes, C.R., J. Phys. Chem., Chem 42,
85(1938).
- I1 Investigate brine chemistry and combined heat/mass transfer, scalin ki-
netics and develop models to predict geothermal plant degradation, EPRO
PR 653-1 1976.
- I2 Iler, R.K., The colloid chemistry of silica and silicates, Carnell Univ
Press, Ithica, N.Y. 1955
- K1 Kennedy, G.C., Econ. Geol., 45 629 (1950).
- L1 Lehrman, L. and Shukdener, H.L., Ind. Eng. Chem., 44 , 1764 (1952).
- M1 Muffler, J.P., Geothermal Resources, U.S. Mineral Resources, U.S. Geol.
Survey Prof Paper No 820, 1972.
- O1 O'melia, C.R. and Stumm, W.J., Colloid and Interface Sci., 23, 437 1967.
- S1 Sato, H., Geothermics-Special Issue No. 2, U.N. Symposium on the Develop-
ment and utilization of Geothermal Resources, Pisa 1970 Vol 2 part 2 1970
- T1 Taborek, et al., Predictive Methods for Fouling Behavior Chem. Eng. Pro.,
Vol 68, No 7, July, 1972.
- W1 Weil, W.A., A new Approach to surface Chemistry and to Heterogeneous Ca-
talysis, Mineral Industries Exp. Sta. Bull. No 57, Pennsylvania State Co-
llege 1951.
- W2 Watkinson, A.P. and Epstein, N., Particulate Fouling of Sensible Heat Ex-
changers Vol 1, Fourth International Heat Transfer Conference, Paris 1970
- Z1 Kern, D.Q. and Seaton, R.C., A Theoretical Analysis of Thermal Surface
Fouling. British Chemical Eng May, 1959.
- Z2 Bird Byron R, Warren Stewart., Edwin N. Lighthfoot., TRANSPORT PHENOMENA.
John Wiley & Sons New York 1960.

Z3 Boyce W.E., DiPrima R.C. Ecuaciones Diferenciales y Problemas con Valores en la Frontera Ed. Limusa, México 1977.

Z4 Smith J.M., Chemical Engineering Kinetics., International Student Edition
Mc Graw Hill Kogakusha L.T.D. Tokyo, Japan 1970.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Demanda de energéticos en el año 2000
Ezázán Navarrete Gerardo, Mondragon M Fco, Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, Nov 1974 pags. 60-75.
- 2) Análisis de las opciones energéticas de México
Viqueira Landa Jacinto, representaciones y servicios de ingeniería, México 1977.
- 3) Recursos Energéticos
Decelis Contreras Rafael, Revista IMIQ. Nov 1974 pags 42-59
- 4) * Proyecto Geotérmoelectrico de Cerro Prieto, Contaminación y protección básica, Mercado G Sergio.
- 5) * Reparación y Control de pozos Geotérmicos en Cerro Prieto - Baja California México.
Dominguez A. Bernardo, Vital B. Francisco.
Second United Nations Symposium on the
- 6) * Método Actual para la apertura e inicio de Explotación de pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto Baja California México.
Dominguez A Bernardo, Bermejo de la Mora Fco. Javier
- 7) * Potencial Geotérmico de la República mexicana
Alonso Hector
- 8) * Informe Preliminar sobre la Geología Estructural del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California México.
Paredes A. Eduardo
* Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco California, USA 20-29 mayo 1975.
- 9) Origen de un Campo Geotérmico
ler. curso de geotermia organizado por el Instituto de investigaciones eléctricas para el personal técnico de la coordinadora General Ejecutiva de Cerro Prieto C.F.E., 11 al 21 de octubre de 1977.
Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Mexicali Baja California.
- 10) Enciclopedia Salvat de la ciencia Tomo 13 Geología Salvat - Editores Pamplona España 1968
- 11) García Muñoz J, Gutierrez Ramirez R, Lima L.
La explotación y el aprovechamiento de la energía geotérmica. Seminario de Ingeniería mecánica y Eléctrica Facultad -

de Ingenieria UNAM 1973.

- 12) Geothermal Energy Development
H. Christopher H. Armstead
Prog Energy Combust Sci. Vol 2 pag 181-238
Pergamon Press Great Britain (1977)
- 13) El flujo de los pozos geotérmicos (un estudio analítico)
Tolivia M Enrique
Dpto. de Recursos Geotérmicos (reporte interno no publicado)
- 14) WIGLER D.M. Recovery of flash steam fan hot from water
Vol 2. Proceedings of the United Nation Symposium on the
Development and utilisation of Geothemal Resources Pisa -
Roma Sep. Oct 1970
- 15) Owen, L.B., Presipitation of Amorphous silica from High -
Temperature hypersaline Geothemal Brines, Report UCRL --
51866, Laurence Livermore Lab., Univ. of California, Live
more (junio 1975)
- 16) FOURNIER, R.O., "The solubility of Amorphous silica at --
High temperatures and high pressures" Conference on Scale
Management in Geothermal Energy Development, San Diego --
California 2-4 Agosto 1976, Report COO-2607-4, Energy --
Research and Development Administration (Division of geo-
themal Energy) Washington, D.C., pag 19-23 (1976).
- 17) Owen, L.B. Comunicaciones personales (julio 1977)
- 18) Alexander, G.B. Heston, W.M., and Iler, R.K., The solubi
ty of Amorphous silica in water. "J. Phys. Chem, 58, 453-
455 (1954)
- 19) Jackson, D., and Hill J.J. Possibilities for Controlling-
Heavy metal Sulfides in Scale from Geothemal Bimés Report
#UCRL - 51977, Laurence Livermore Lab, Univ. of Califor-
nia, Livermore (enero, 1976)
- 20) Weber, W.J., Physicochemical Processes for water Quality-
Control, Wiley Interscience New York (1972)
- 21) Yanagase, T., Suginochara, y., Yanagase K., "The proper---
ties of scales and Methods to Prevent them", Geothermics,
Special Issue 2, 2 (2) 1619-1623 (1970)
- 22) Mañon M. A., Aprovechamiento Integral del fluido Geotér--
mico de la zona de Cerro Prieto Baja California, tesis --
Profesional Facultad de Química, UNAM, 1970.
- 23) Cortez, A. C., reporte de observaciones efectuadas a sepa

radiores centríugos en Cerro Prieto (1975) Informe Interno CFE.

- 24) Alexander, G.B., J. Am. Chem. Soc., 76, 2094 (1954)
- 25) Allegrini, G. and Benvenuti, G., Geothermics-Special Issue No 2 (U.N. Symposium on the Development and utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970), Vol. 2, Part 1, 865 --- (1970).
- 26) Allen, L.h. and Matijevic, E., J. Colloid and Interface Sci., 31, 287 (1969)
- 27) Ashley, K.D. and Innes, W.B. Ind. Eng. Chem., 44, 2857 --- (1952).
- 28) Allyn R. Marsh, Gerhard Klein., POLIMERIZATION KINETICS -- AND EQUILIBRIA OF SILICE ACID IN AQUEOUS SYSTEMS, Lawrence Berkeley Laboratory M.S. Thesis, 1975.
- 29) Hahn, H.H. and Stumm, W., J. Colloid and Interface Sci., 28 134 (1968).
- 30) Hurd, C.B., Fredenck, K.J., and Haynes, C.R., J. Phys Chem, 42, 85 (1938)
- 31) Investigate brine chemistry and combined heat/mass transfer, scaling Kinetics and develop models to predict geothermal plant degradation, EPRI RP 653-1 1976.
- 32) Iler, R.K., The Colloid Chemistry of Silica and Silicates, Cornell Univ. Press, Ithica, N.Y. 1955
- 33) Kennedy, G.C. Econ. Geol., 45 629 (1950)
- 34) Lehrman, L. and Shuldener, H.L., Ind. Eng. Chem., 44, 1765 (1952).
- 35) Muffler, J.P., "Geothermal Resources", U.S. Mineral Resources, U.S. Geol Survey Prof. Paper No 820, 1972.
- 36) O'Melia, C.R. and Stumm, W., J. Colloid and Interface Sci., 23, 437 (1967).
- 37) Sato, H., Geothermics-Special Issue No 2, (U.N. Symposium on the Development and utilization of Geothermal Resources Pisa, 1970) Vol. 2, Part2 1546 (1970).
- 38) Taborek, et al., "Predictive Methods for Fouling Behavior" Chem. Eng. Pro., Vol 68, No 7, July, 1972.
- 39) Weyl, W.A. "A new Approach to Surface Chemistry and to --- Heterogeneous Catalysis" Mineral Industries Exp.Sta. Bull.

No. 57, Pennsylvania State College (1951).

- 40) Watkinson, A.P. and Epstein, N., "Particulate Fouling of - Sensible Heat Exchangers" Vol 1, Fourth International Heat Transfer Conference, Paris Versailles, 1970.
- 41) Daniels, F. and Alberty, R.A. Physical Chemistry. 3rd ed - John Wiley and Sons, Inc, New York, 1966.
- 42) Kern, D.Q. and Seaton, R.E. "A theoretical Analysis of --- thermal Surface Fouling" British Chemical Eng. May, 1959.
- 43) R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot., --- TRANSPORT PHENOMENA., John Wiley Sons, New York, 1960.
- 44) W. E. Boyce, DiPrima R.C., ECUACIONES DIFERENCIALES Y PROBLEMAS CON VALORES EN LA FRONTERA. En Limusa, México 1977.
- 45) J.M. Smith, CHEMICAL ENGINEERING KINETICS., 2nd Edition -- International Student Edition, Mc Graw Hill Kogakusha L. - T.D. Tokyo, Japan, 1970.

