

NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

MODELADO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.

J.D. D. Ocampo (C.E.C.P.), M.A. Ayuso (G.P.G.), A. Pelayo L. (C.E.C.P.)

Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto.
Mexicali, Baja California, México.

RESUMEN.

Se desarrolló un modelo tridimensional del campo geotérmico de Cerro Prieto en estado termodinámico inicial estable. El modelo muestra que los flujos internos de fluido y calor dependen principalmente del sistema estructural, al igual que el patrón de recarga. El modelo ajusta razonablemente la entalpía de producción, la evolución de la presión y temperatura de yac. de los pozos existentes en cada uno de los elementos que conforman la malla utilizada.

Para el período histórico de 1973 a 1988, también se muestra que inicialmente el campo se encuentra en estado de líquido dominante siendo recargado por el sistema de fallas principales, del nivel más profundo en contacto con el basamento.

La zona de Cerro Prieto Uno presenta un área de infiltración superficial debido al adelgazamiento del paquete arcilloso que aísla al sistema superficialmente en la zona Oeste del campo. La zona central del campo, conformada prácticamente por el área de Cerro Prieto Tres caracterizada por valores bajos de porosidad, permeabilidad de matriz, fallas secundarias pequeñas, indica una tendencia a incrementar la saturación de vapor, produciendo fluidos de alta entalpía, a medida que la extracción de fluidos se ha incrementado para satisfacer la necesidad de demanda de vapor por las centrales geotermoeléctricas.

Se continúa el modelado en una segunda etapa por un período de 25 años a partir de 1989, obteniéndose resultados satisfactorios que permiten visualizar posibilidades de expansión del campo hacia la zona Este conocida como Polígono Hidalgo.

INTRODUCCION.

Estudios importantes sobre modelado del campo geotérmico de Cerro Prieto han sido realizados en años anteriores, por personal técnico de CFE y también por la compañía ELC, Electroconsult, en relación a tratar de confirmar la capacidad del yacimiento y la expansión del mismo hacia nuevas áreas con posibilidades de explotación, habiéndose confirmado en todos los casos la factibilidad del sistema, aún con modelos elementales y menor historia de producción con la que se cuenta actualmente.

Durante el año de 1988, se llevó a cabo un estudio detallado del modelado del yacimiento de Cerro Prieto, utilizando el simulador tough (ver

sión actualizada del shaft 79), tratando de cubrir básicamente dos aspectos:

1ª La comprensión de la evolución termodinámica del yacimiento a través de sus parámetros principales presión, temperatura y entalpía de producción en su relación con las propiedades físicas de la formación.

2ª Analizar en función del punto anterior, la factibilidad de expandir la zona de explotación hacia la parte Este del campo que es la que presenta mejores posibilidades actualmente.

Asimismo el objetivo principal para poder lograrlos aspectos antes mencionados fue el desarrollo del modelo detallado y realista del campo, siendo este completamente tridimensional con elementos que contienen desde un solo pozo hasta cuatro en algunos casos, agrupados por zonas de características semejantes, basándose en el sistema estructural; permitiendo esto que el ajuste de los valores de entalpía de producción, flujo másico extraído, presión y temperatura, fuera más exacto en cada elemento y de un mayor grado de confiabilidad a la predicción a futuro de la simulación de todo el campo.

MODELO GENERAL DEL CAMPO.

El modelo general del campo fue desarrollado en base a un análisis detallado de toda la información generada por cada pozo desde sus inicios dividiéndola en grupos de acuerdo a la especialización que cumple dentro del modelo, siendo esta la siguiente:

- Fecha de terminación de los pozos y expansión del campo.
- Litología y alteración hidrotermal.
- Sistema estructural del campo.
- Diagramas de terminación y zonas abiertas al flujo de los pozos.
- Registros de entrada y salida de lodos para definir zonas de pérdidas y temperaturas estabilizadas de formación.
- Núcleos para análisis de propiedades de la formación.
- Estudios de sismología de reflexión para definir la cima del basamento granítico.

Con el análisis de la información y los criterios de diseño se efectuó la primera subdivisión del campo en zonas, siendo dichos criterios los siguientes:

- La subdivisión se efectuó de acuerdo al patrón estructural del campo.
- La cima del yacimiento se definió como la cima de la zona de sílice y epidota.
- La zona productora está dentro de la profundidad de la isoterma de 300°C.

La malla primaria resultante de esta primera subdivisión se muestra en la figura 1, conteniendo superpuesto el patrón estructural del campo referido a la cima de la lutita gris.

Con la finalidad de marcar los límites superiores e inferiores de los niveles que se consideraron en el modelado, se graficó la malla primaria sobre las siguientes configuraciones:

- Plano de localización de pozos.
- Configuración de la base de los sedimentos clásticos no consolidados.
- Configuración de la cima del yacimiento.
- Configuración de la cima del basamento.
- Configuración de la profundidad de la isoterma de 300°C.

Dando esto como resultado los niveles siguientes:

- Nivel 1, delimitado por la base de los SCNC y la cima del yacimiento.
- Nivel 2, delimitado por la base superiormente por la cima del yacimiento y de un espesor promedio al de todas las zonas productoras de los pozos que están en cada una de ellas.
- Nivel 3, delimitado por el límite inferior del nivel 2, hasta el basamento.

Partiendo de toda la información generada hasta esta etapa se diseñó una malla tridimensional, que sintetiza el modelo conceptual del campo asociado a las propiedades del mismo para cada uno de los elementos, en base a los pozos que contiene, su secuencia estratigráfica y la profundidad de los mismos, la figura 2, muestra la malla resultante utilizada para la simulación.

Una vez definidos los elementos en forma real (volúmenes, áreas de interfase y distancias interelementos), se analizó la información de cada pozo individualmente, agrupándose posteriormente por elementos para formar la historia que se utilizaría durante la etapa de calibración, siendo esta:

- Historia de producción (flujos, entalpías, calidad del fluido) por pozo y elemento.
- Historia de temperatura en base a registros, por pozo y elementos, a la profundidad del centro de este último.
- Historia de presión por pozo y elementos a la profundidad del centro del elemento.
- Análisis de propiedades del fluido por pozo, contenido de gases y compuestos químicos.
- Evolución de temperatura de geotermómetros, por pozo.
- Características de la recarga del sistema en base a las configuraciones anuales de isótopos y de temperaturas de geotermómetros.

DESARROLLO DEL MODELO.

La malla utilizada está compuesta de 320 elementos divididos de la manera siguiente:

- 60 Elementos frontera.
- 260 Elementos reales, divididos en elementos internos con producción y elementos de transición entre los primeros y la frontera.

Previo a la etapa de ajuste histórico y de los cálculos de predicción del comportamiento del yacimiento, se realizó un estudio del estado estable del yacimiento, prueba de parámetros y condiciones iniciales, con una simulación de 200 años aproximadamente.

Las condiciones frontera impuestas al modelo fueron: abiertas al flujo (P, T=CTE) por el Este, Sur y Oeste del campo y cerrada por Norte, donde las condiciones litológicas indican que los sedimentos no consolidados se profundizan a valores superiores a los 3000 mts, con temperaturas inferiores a 100°C (pozo PRIAN).

La etapa de ajuste período 1973-1988 se inició con las condiciones inicialmente obtenidas en el estado estable, los datos de producción de vapor del pozo equivalente por elemento y los parámetros de la formación obtenidos de los estudios geológicos en el campo. De estos parámetros los que tienen mayor dependencia sobre el funcionamiento del yacimiento son la permeabilidad (K), la porosidad (ϕ) de la matriz y las permeabilidades relativas (K_{re} , K_{rv}) del fluido, dependientes de la saturación de vapor; sobre estos últimos parámetros dado que no hay estudios tendientes a definir su valor, se probaron diferentes correlaciones hasta concluir que las más óptimas son las de variación lineal con valores residuales de cero en ambos casos, es decir $K_{re} = K_{re}(se)$ y $K_{rv} = (sv)$ donde $Sv = (1-Se)$; finalmente la correlación de K_{re} hubo de ser modificado por una correlación empírica cercana a la lineal y que dió mejor ajuste para las entalpías de producción en los elementos con saturación de vapor creciente, o zona de vapor. En esta misma zona es donde hubo que hacer mayor esfuerzo en el ajuste de la porosidad y per-

meabilidad hasta lograr la evolución deseada coincidiendo con la observación real; resultando en una relación de valores bajos, menores a los reportados por el análisis de núcleos además de los usados en zonas falladas y de recarga (elementos transitorios y frontera).

RESULTADOS.

Después de 15 años de explotación comercial del campo, la extracción de agua y vapor se ha incrementado aproximadamente 7 veces obedeciendo al programa de instalación de capacidad de generación, la cual a su vez, ha aumentado casi 8 veces. fig. 3 y 4.

Los resultados muestran que el funcionamiento del campo depende grandemente del sistema estructural, es decir de la ubicación de las fallas primarias y secundarias, su echado y longitud de salto.

Básicamente se observan, tres sistemas en el campo; el primero en Cerro Prieto Uno somero, ubicado a la izquierda de la falla Cerro Prieto recargado débilmente por el Este y grandemente por el Oeste con infiltración superior, su tendencia ha sido a disminuir la entalpía de producción y la temperatura a medida que ésta ha tenido que calentar los fluidos de recarga de menor temperatura. Se concluye que no existe recarga caliente inferior al existir una capa sello o casi impermeable de espesor variable, que lo aisla de Cerro Prieto Uno (profundo); este sistema es del tipo líquido-dominante.

El segundo sistema se ubica al Sureste y a través del sistema vulcano (fallas Delta y Pazcuaro) con orientación SW-NE; traspasando el área del polígono Hidalgo y parte del polígono Nuevo León cuyo contenido es de líquido dominante, a diferencia con el primer sistema es que es más afallado y con temperaturas iniciales mayores. Su evolución depende de la recarga que tiene del Este y Sureste, con poca infiltración superior.

El tercer sistema se ubica en el área de Cerro Prieto Tres al Norte del sistema vulcano, el cual se caracteriza por tener fallas secundarias de poco echado y pequeños saltos, con valores bajos de permeabilidad y porosidad. Se puede definir como un sistema semiaislado que se recarga con fluidos de alta temperatura y en bajos porcentajes de los laterales y poca infiltración superior. Su evolución de acuerdo con la producción es la de un sistema en ebullición permanente con saturaciones de vapor creciente, que es función de la cantidad másica que se extrae. Lo mencionado anteriormente sobre los efectos de permeabilidad, porosidad y permeabilidades relativas, es la mejor manera de entender el abatimiento de la presión, donde se requieren gradientes de presión (∇P) en tres yacimiento y pozo, mayores, para un flujo de mezcla con alto contenido de vapor o totalmente vapor, afectando la evolución de la presión de yacimiento; en el caso de la temperatura también --

existe abatimiento dado que es la formación la que cede energía (calor) para que se dé la ebullición; finalmente el aumento de entalpía se manifiesta como consecuencia del proceso conjunto y los parámetros de formación.

De la totalidad de los elementos se tiene historia de presión, temperatura y producción de 81 de ellos, en algunos casos de un solo parámetro, en otros de 2 y en la mayoría de los 3, habiéndose graficado la evolución real y calculada.

Para los 81 elementos en gráficas que contienen:

- Evolución de la presión.
- Evolución de la temperatura.
- Evolución de la saturación de vapor y calidad de producción.
- Evolución de la entalpía de producción.
- Evolución de la producción de agua, vapor y mezcla.

A continuación se muestran de la figura No. 5 a la No.10, algunas gráficas como las señaladas anteriormente para ciertos elementos.

De los resultados obtenidos de los parámetros de presión y temperatura en la etapa de ajuste, se calculó los valores promedio de los mismos para todo el campo, indicando un abatimiento de 19% para la presión (35 BAR) y 2.5% para la temperatura (8°C), fig. 11 y 12. La variación de la presión es mucho más sensible que la temperatura a los cambios del régimen de extracción; ambos parámetros tienen la tendencia a estabilizarse en la medida en que se conserve dicho régimen, fig. 13 y 14.

CONCLUSIONES.

- Con las aproximaciones y consideraciones hechas en el modelo en la representación del campo de Cerro Prieto, se ha obtenido una buena calibración de la evolución de la presión, temperatura, producción y entalpías para el período 1973-1988.

- La evolución termodinámica de las áreas de CP1 y CP2 es la de un sistema de líquido dominante con fronteras abiertas al flujo. El área de CP1 somero presenta abatimientos de temperatura y entalpía de producción a valores donde se requiere extraer una gran masa para obtener poco vapor, por lo que se tendrá que extraer más de su parte profunda. En el área de CP2 con condiciones iniciales más favorables (temperaturas superiores a los 325°C), permite mantener las condiciones actuales de explotación por un período de 20 años más a partir de 1988.

- El abatimiento de presión en los pozos de la zona de vapor de CP3 se debe a los bajos valores de permeabilidad, porosidad de la formación y del efecto causado por las movi- lidades de esa zona -- en ebullición que se está expandiendo dentro de la región de líquido, además del daño causado a formación por depositación de minerales.

- La aparición de la zona de vapor en el área de CP3 es función, principalmente, de la sobreexplotación de dicha zona y no de lo que se está ex- trayendo en las zonas vecinas, es decir su estado actual y futuro es prácticamente independien- te.

- En cuanto a los parámetros de presión y temperatura del yacimiento, éstos tan solo se han abati- do en promedio para todo el campo, un 19% para la presión (35 BAR) y un 2.5% para la temperatura - (8°C).

REFERENCIAS.

Desarrollo Geotérmico de CFE
Cerro Prieto Re-Evaluación del potencial
ELC Electroconsult Milan Italia
Mayo de 1986.

Tough User's Guide
Karsten Prues
Earth Sciences Division
University of California
Berkeley, California

Avances en la Actividad del Modelado del Campo Geotérmico de Cerro Prieto.
Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Subgerencia de Estudios Geotérmicos
Departamento de Evaluación y Yacimientos
Reporte interno
Noviembre de 1987.

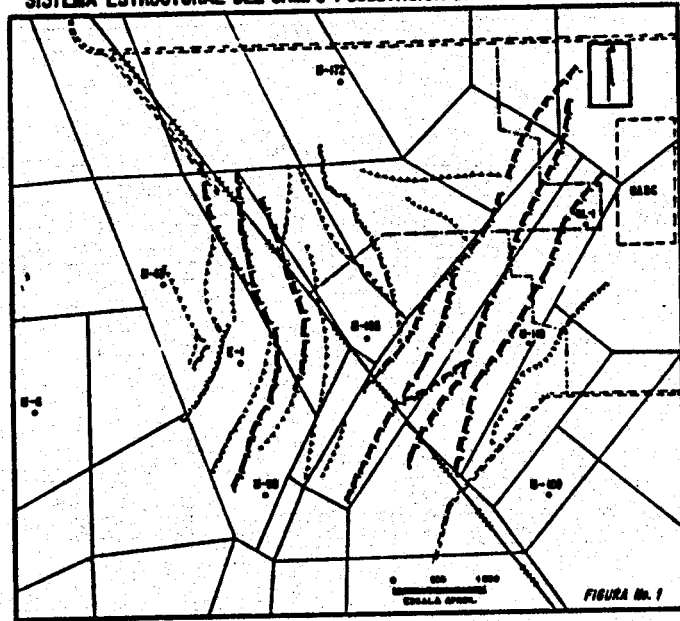
Modelado del Campo Geotérmico de Cerro Prieto,
Estudio de Factibilidad de 110 MW, en el área de CP-IV.
Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Subgerencia de Estudios Geotérmicos
Departamento de Evaluación y Yacimientos
Informe No. 1388-09

Evaluación del Yacimiento del Campo Geotérmico - de Cerro Prieto durante su explotación comercial.
Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Subgerencia de Estudios Geotérmicos
Departamento de Evaluación y Yacimientos
Reporte interno.

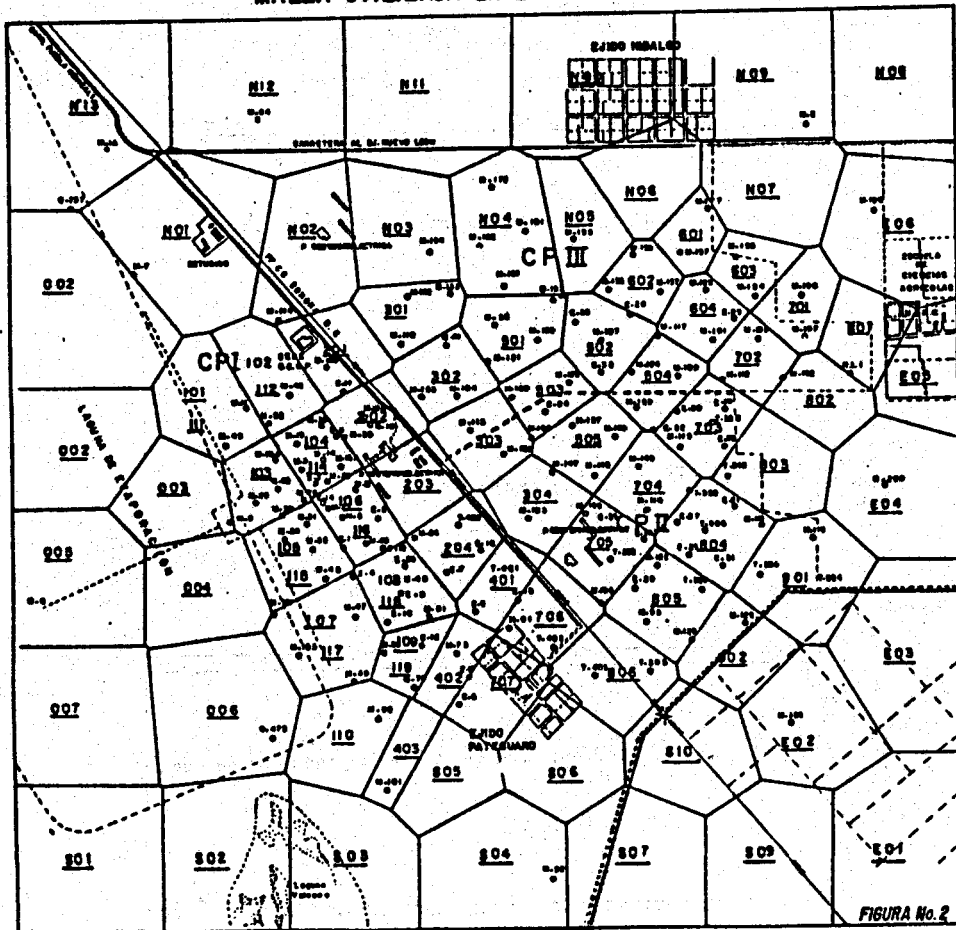
Estudio de Modelado en el Campo Geotérmico de -- Cerro Prieto.
Comisión Federal de Electricidad

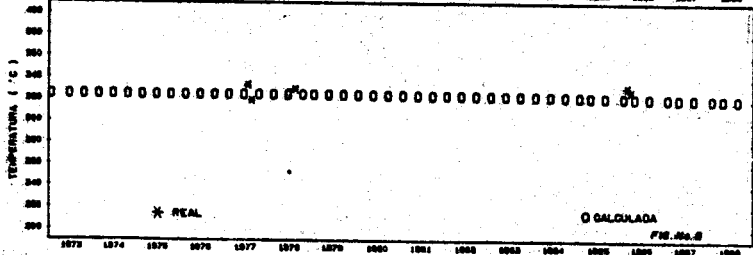
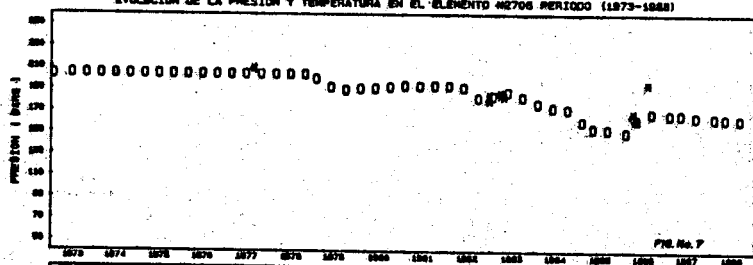
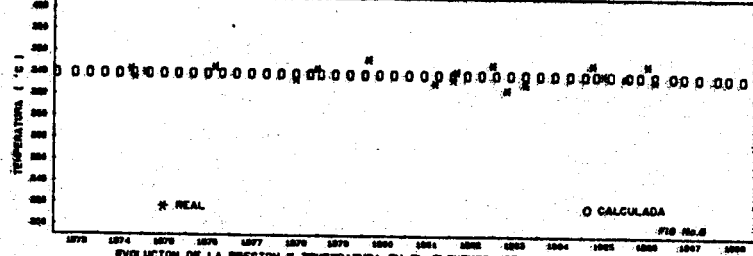
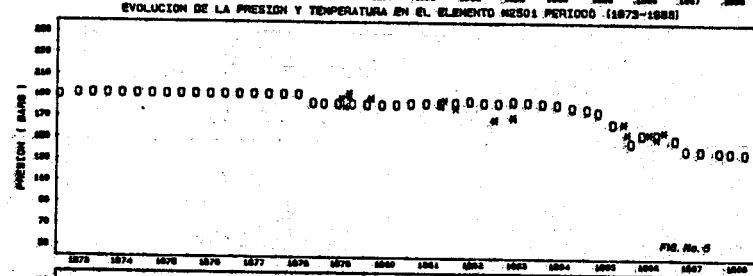
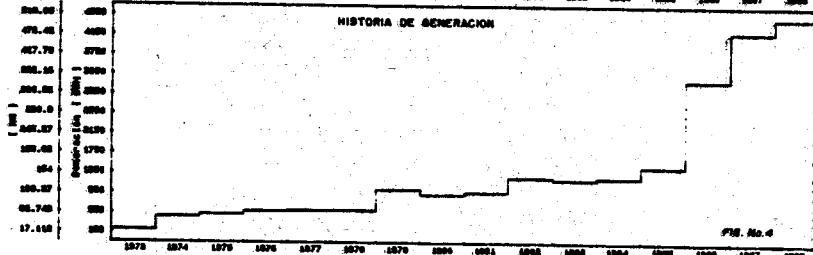
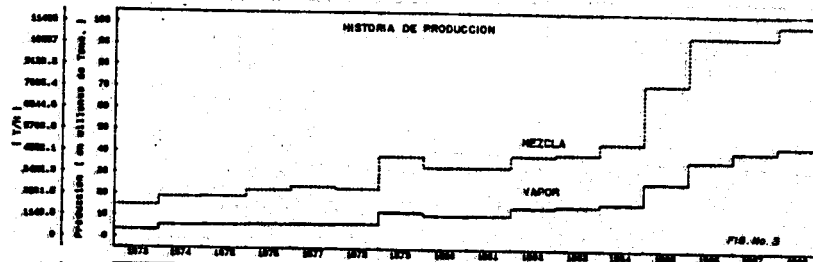
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Subgerencia de Estudios Geotérmicos
Departamento de Evaluación y Yacimientos
Reporte 1383-015
Octubre de 1983.

SISTEMA ESTRUCTURAL DEL CAMPO Y SUBDIVISION PRIMARIA DE LA MALLA

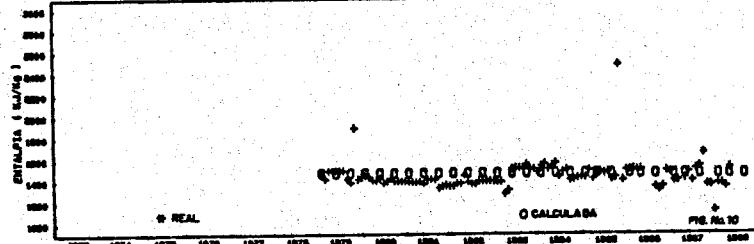
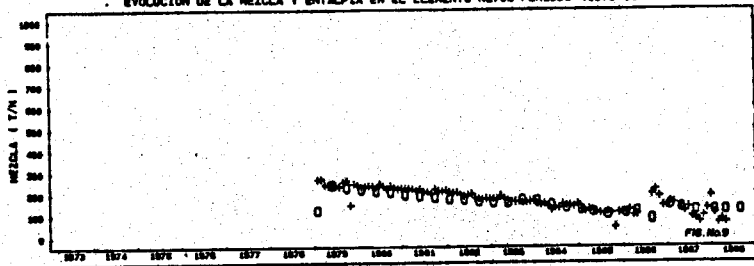


MALLA UTILIZADA EN LA SIMULACION

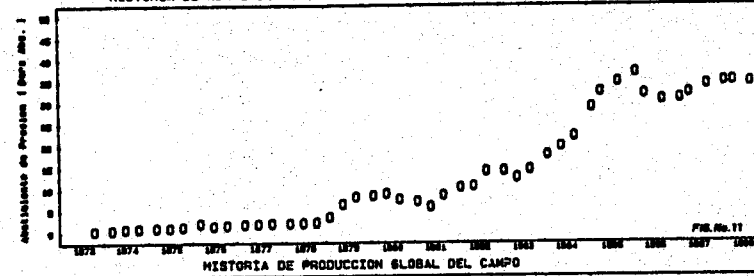




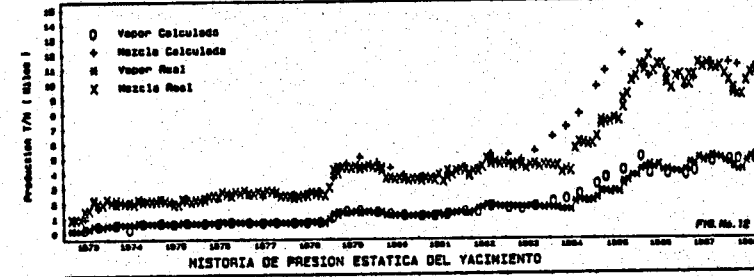
EVOLUCION DE LA MEZCLA Y ENTALPIA EN EL ELEMENTO M2706 PERIODO (1973-1993)



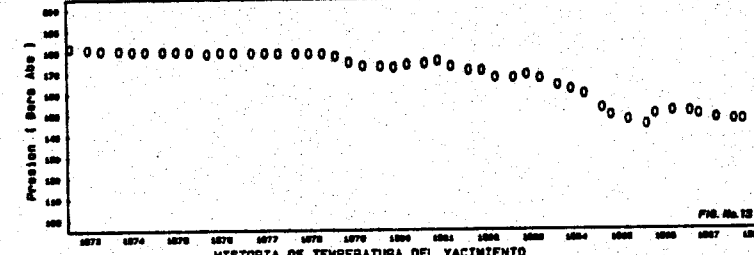
HISTORIA DE ABATIMIENTO DE LA PRESION ESTADICA DEL YACIMIENTO



HISTORIA DE PRODUCCION GLOBAL DEL CAMPO



HISTORIA DE PRESION ESTADICA DEL YACIMIENTO



HISTORIA DE TEMPERATURA DEL YACIMIENTO

