



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTIMULACION CON EXPLOSIVOS NUCLEARES  
DE FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A :  
SALVADOR PEREZ RANGEL



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.

C O N T E N I D O

RESUMEN.....	1
INTRODUCCION.....	4
APLICACION DE LA TECNOLOGIA PETROLERA EN OTRAS AREAS....	7
USO FUTURO DE LOS EXPLOSIVOS NUCLEARES.....	10
CAPITULO I	
PROYECTOS EFECTUADOS.....	16
PROYECTO GNOMO.....	16
PROYECTO GASBUGGY.....	20
PROYECTO RULISON.....	22
PROYECTO RIO BLANCO.....	23
CAPITULO II	
EVENTOS QUE OCURREN EN UNA EXPLOSION NUCLEAR SUBTERRA NEA.....	28
CAPITULO III	
DIMENSIONES DE LA CHIMENEA Y RADIOS DE FRACTURA.....	34
EFFECTOS DE LOS PARAMETROS DE LAS ROCAS.....	34
EFFECTOS DE LOS PARAMETROS EXPLOSIVOS.....	35
CAPITULO IV	
EFFECTOS EN LA ESTIMULACION DE LOS YACIMIENTOS .....	44

## CAPITULO V

POSIBILIDADES DE INCREMENTO EN LA PRODUCTIVIDAD.....	49
------------------------------------------------------	----

## CAPITULO VI

RADIOACTIVIDAD REMANENTE EN LOS HIDROCARBUROS QUE SE - PRODUCEN.....	61
MEJORAMIENTO EN EL DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS NUCLEA - RES.....	64

## CAPITULO VII

ESTADOS ACTUALES DE LOS PROYECTOS DE ESTIMULACION NU - CLEAR.....	68
----------------------------------------------------------------------	----

## CAPITULO VIII

LIMITACIONES DE LA TECNOLOGIA ACTUAL.....	73
-------------------------------------------	----

## CAPITULO IX

ACEPTACION PUBLICA DE ESTA TECNOLOGIA.....	78
OBSERVACIONES CONCLUYENTES DE DICHA TECNOLOGIA.....	80
CONCLUSIONES.....	82
APENDICE # 1 .....	85
MODELO DE FLUJO DE LA CHIMENEA.....	85
VALORES DE FLUJO DE LA CHIMENEA.....	86
APENDICE # 2 .....	88
ECUACION DE LOS RADIOS DE PRODUCTIVIDAD.....	88
BIBLIOGRAFIA.....	91

R E S U M E N

La demanda energética actual nos muestra la posibilidad de que las reservas de energéticos fáciles se terminen, ya que se ha visto, que en un futuro cercano la demanda de gas natural podrá sobrepasar la producción de las reservas actuales, ya menos de que no desarrollen métodos de recuperación más económicos podría ocasionarse una crisis energética, debido a la falta de estos hidrocarburos.

En el caso del aceite la situación es similar; - la posibilidad cada día más creciente del valor de la utilización de los explosivos nucleares en la tecnología de - la estimulación es evidente, debido al avance de esta técnica y se puede conciderar que se está muy cerca de su explotación comercial.

La explotación comercial de los yacimientos de - gas y aceite depende principalmente de la permeabilidad - efectiva del medio poroso, así como también del área de - drene del pozo.

El factor principal que nos afecta la recupera - ción comercial de estos hidrocarburos es la bajísima per - meabilidad de las formaciones que contienen gas y/o acei - te.

Esto es un fenómeno, conocido mundialmente, y se presenta en el Area de las Montañas Rocallosas en donde se efectuaron una serie de experimentos, realizando la estimu - lación de los yacimientos mediante la utilización de la -

tecnología a base de explosivos nucleares.

Con la estimulación, con los explosivos nucleares se crea una chimenea (caverna) llena de cascajo con una alta permeabilidad y una zona fracturada con las mismas características las cuales aumentan la recuperación de los hidrocarburos.

Los esfuerzos experimentales de la Comisión Federal de la Energía han sido concentradas en el Area de producción submarginal, de bajísima permeabilidad llamada Area de las Montañas Rocallosas.

En esta área se realizaron los siguientes experimentos: Se realizó una explosión nuclear de 29 kt dicha carga fue denotada en una profundidad de 1292 mt en la formación gaseosa de Pictured Cliffs dicho experimento fue conocido como el proyecto Gasbuggy. En 1969 otro artefacto de 40 Kt fue denotado a una profundidad de 2513 mt en el condado de Garfield en Colorado y fue conocido con el nombre de Proyecto Rulison en 1973 se utilizaron tres artefactos nucleares 30 kt, cada uno, la profundidad de la detonación de estos artefactos fueron de: 1780, 1899 y 2039 mt. respectivamente, con dichas explosiones nucleares, se tienen datos de la cavidad superior únicamente ya que las demás cavidades no quedaron comunicadas.

En estos proyectos los pozos de gas indicaron un aumento en la producción de 5 a 8 veces mayor en comparación con pozos convencionales.

Un análisis comprensivo del estado de esta técnica

ca, de los requisitos desarrollados y de la economía de estos proyectos. Determino las posibilidades económicas de -obtener producciones de gas razonables y consideraciones -de costos favorables con la estimulación con explosivos nucleares.

Los proyectos de estimulación con explosivos nucleares mencionados anteriormente han sido estudiados in -tensivamente, también para yacimientos de aceite. La posibilidad de obtener aceite de yacimientos de Lutitas así como la recuperación de aceite de arenas Lituminosas ha sido examinada con gran detalle y se ha propuesto un proyecto -para la explotación de estas lutitas bituminosas localizadas en Colorado, Estados Unidos de Norteamérica, este proyecto es llamado " Proyecto Bronco " que con la detonación de un artefacto de 50 kt a una profundidad de 1021 mt con un contenido promedio de aceite de 24 galones/Tonelada, la chimenea podrá proporcionar alrededor de 200 000 barriles de aceite.

Es necesario hacer estudios para cada área de -las propiedades de usar este tipo de estimulaciones, dependiendo de las potenciales específicas particulares de cada área.

El aumento de la producción del gas y aceite con el uso de los explosivos nucleares es una meta técnica que requiere estudios intensivos debido a la gran demanda de -hidrocarburos.

## I N T R O D U C C I O N

El hombre avanza cada vez más rápido, adquiriendo conocimientos en todos los campos, así mismo, el mejor aprovechamiento de los recursos naturales para el futuro se ha convertido en un gran motivo de preocupación.

Como Ingenieros petroleros, debemos de preguntarnos si nuestra tecnología tiene alguna aplicación en esta nueva era, valiente y amenazadora. Sabemos que requerimos petróleo para hacer funcionar los fantásticos equipos nuevos, y que seguiremos utilizando combustibles fósiles en el futuro.

Veremos que el progreso hacia un mundo mejor depende de tres factores muy importantes - Suministro de energía, recursos minerales y medio ambiente-. Hagamos un breve examen y veamos como puede contribuir la Ingeniería Petrolera en estos aspectos.

### Suministro de Energía:

Durante las próximas décadas, la humanidad seguirá dependiendo de las actuales formas de energía. - Carbón, petróleo y gas-.

Si las estimaciones son correctas sobre la disminución de las reservas de petróleo y gas, pronto se necesitarán métodos para obtener carbón y aceite de las lutitas bituminosas y para producir el gas de las areniscas de bajísima permeabilidad. Parece ser que esto será necesario -

antes de que la energía nuclear pueda hacer muchas incursiones en el suministro de la energía.

Cuándo la energía nuclear esté en su auge, su mayor utilización será en la generación de energía eléctrica. Los combustibles fósiles podrán utilizarse en la fuerza motriz, calefacción de interiores, lubricantes, materias primas para plásticos y posiblemente hasta para alimentos. Por lo tanto, la industria petrolera no debe dudar de la energía nuclear; y en cambio, debemos utilizar nuestra tecnología para acelerar su desarrollo.

Nuestro mundo cada día es más exigente, en consumo de energía, ya que consume la energía mucho más rápido de lo que se desarrolla.

La Ingeniería Petrolera puede jugar un papel muy importante en la solución de algunos problemas de la Industria Nuclear.

### Recursos Minerales:

El mundo requiere cada día de más bienes de consumo, y así como las naciones hacen esfuerzos para tener un mejor medio de vida, el problema se agudiza cada día más, porque más bienes de consumo, demandan más minerales, más hierro, más cobre, vanadio, aluminio, etc; de hecho más materias primas de todas clases.

### Medio Ambiente:

Con el crecimiento de la población, la preocupación sobre el medio ambiente se vuelve cada día más importante. Tal vez se pueda controlar la población. ¿Pero se podrá reducir la contaminación con una sociedad técnicamente siempre en crecimiento?.

Se requerirán los mayores esfuerzos de todos los investigadores en Ingeniería para resolver este y otros problemas.

En la Ingeniería Petrolera se han manejado el agua salada, sulfuro de hidrógeno o hidrógenado y otros aceites y gases contaminantes. Sin duda alguna, estas experiencias y esta tecnología pueden ser mejoradas y podrán aplicarse en otras industrias.

Examinaremos muy brevemente lo que ofrece la Ingeniería Petrolera para atacar los mayores problemas de energía, recursos minerales y del medio ambiente.

## APLICACIONES DE LA TECNOLOGIA PETROLERA EN OTRAS AREAS

### 1.- EN LA INDUSTRIA

Se ha recorrido un largo camino desde que el primer pozo petrolero fue perforado por C. Drake. La tecnología petrolera se ha convertido en una ardua ciencia, en lugar de arte de hace más de 30 años. Ahora se perforan me - jores pozos, haciendo frente a condiciones extremas, tanto en el Artico como en las profundidades de la tierra; y a - demás, se ha aumentado la eficiencia de la recuperación en un promedio del 0.5% por año desde los últimos 20 años.

Con tecnología más moderna, esta taza puede cre - cer aún más, pero siempre se ha estado trabajando con un - margen decreciente de recursos minerales y naturales.

Diferentes aspectos de la Ingeniería Petrolera - pueden ser de gran valor para resolver problemas que son - ajenos a la industria; ya que se ha alcanzado y desarro - llado gran destreza en técnicas de perforación toma de re - gistros, corte de núcleos, terminaciones de pozos, tecnología costera incluyendo las terminaciones submarinas.

Se han introducido nuevos métodos para la explo - tación de los yacimientos tales como la inyección de gas y agua, inyección de miscibles inyecciones cíclicas y con - tínuas de vapor, combustión Insitum, etc.

Además, se ha elaborado programas de computadora con modelos de yacimientos para de esta manera poder predecir el comportamiento de estos.

Como antes se mencionó, parece ser que las reservas de carbón, de Lutitas bituminosas y de Areniscas de bajísima permeabilidad impregnadas de gas tendrán que llenar el vacío energético antes de que la energía nuclear tenga su auge. Por lo tanto, requeremos aplicar todos nuestros conocimientos de Ingeniería en apresurar su desarrollo.

En fechas recientes las Compañías Petroleras han mostrado una gran inclinación hacia el carbón y las areniscas de bajísima permeabilidad impregnadas de gas; también están suscribiendo investigaciones para tratar de convertir el carbón en gas y aceite, y se tienen varios proyectos en camino de recuperar el aceite contenido en las Lutitas bituminosas.

De esta manera, la Industria Petrolera no será sorprendida, mientras las reservas de gas y petróleo continúan disminuyendo.

La experiencia de la Ingeniería, en perforaciones y terminaciones podrá aplicarse a cualquiera de las condiciones extremas que salgan a nuestro encuentro.

## 2.- EN LA RECUPERACION DE MINERALES

En cuanto a la recuperación de las reservas mi -

nerales, la Tecnología de la Industria Petrolera ha tenido una aplicación más lenta. Tal vez esto sea porque en el pasado, la Industria Petrolera a tomado el papel suministrador de energía y no se ha extendido mucho hacia otros minerales.

Esta relativa posición está cambiando rápidamente y pronto podremos observar como la tecnología petrolera se expande para la recuperación de otros minerales. Por ejemplo: pronto veremos la utilización de nuevas técnicas para la realización de enormes perforaciones para estructurar túneles de minas.

En muchas áreas mineras, enormes desechos y restos de "pilotes" y "gangas", se están reexplotando por vaciamiento de inundaciones. Encontramos aquí, una excelente oportunidad para planear por adelantado estos vaciamientos para que puedan tratarse como reservas y sean filtrados en forma más efectiva, utilizando técnicas de inundación con agua común y corriente.

Como por ejemplo: El cobre que se recupera por filtración reduce la contaminación, ya que no requiere calcinamiento y no se suelta dióxido de sulfato durante el proceso de fundición.

### 3.- EN LA CONSERVACION DEL MEDIO AMBIENTE

¿ Dónde puede aplicarse la tecnología petrolera para combatir la contaminación fuera de la Industria? -

Enormes volúmenes de líquidos podrían ser bombeados subterráneamente en el vacío dejado por la producción de gas o petróleo. Si el desperdicio contiene sólidos dispersos, entonces es aconsejable fracturar el lecho de lutitas y almacenarlos como cementantes.

Esto es lo que se hace en Oak Ridge con alguno de los desperdicios altamente radiactivos.

En la minería, el manejo de las emanaciones de dióxido de sulfuro de ventas agotadas es un problema y de tecnología petrolera puede intervenir ya que desde hace tiempo viene manejando este producto ya que este acompaña a grandes cantidades de metano.

La investigación se ha redituado y la recuperación del sulfuro contenido en el sulfuro de hidrógeno se ha convertido en un éxito. Alguna tecnología similar podría aplicarse para resolver el problema del dióxido de sulfuro, aunque debe admitirse de que se vuelve muy difícil en bajas concentraciones.

### USO FUTURO DE LOS EXPLOSIVOS NUCLEARES

El precursor de la era nuclear fue la bomba atómica - La Liberación tremenda de energía por escisión del uranio 235-. Se ha controlado para la construcción de reactores, para generar energía eléctrica. Pero como explosivo combinado con la tecnología, puede contribuir enormemente para resolver los tres problemas antes mencionados, literalmente se convierte en un gigante sobre la tierra.

La técnica para detonar explosivos nucleares bajo la tierra o subterráneamente es simple, se perfora un agujero y se coloca un pequeño explosivo nuclear en el fondo y se tapa dicho agujero, después se detona a control remoto.

Todo lo que queda es una enorme chimenea de roca suelta, rodeada de una vasta región de roca altamente fracturada debido a las ondas de sacudimiento. Esta chimenea tiene la forma de un cilindro de roca.

¿ Qué es lo admirable de este inmenso montón de rocas bajo la tierra con miles de metros cúbicos de volumen vacío y que se encuentra rodeado de miles de metros cúbicos de roca en estado de fracturamiento?.

#### 1.- EN LA INDUSTRIA PETROLERA:

Lo admirable de esto es que se ha encontrado la manera de fracturar rápidamente un cuerpo mineral, la manera de explotar yacimientos no costeables para que estos puedan producir el petróleo o el gas contenido en dichos yacimientos o reservas.

Si los explosivos nucleares funcionan de la misma manera en los depósitos o yacimientos de lutitas bituminosas y de areniscas de bajísima permeabilidad impregnadas de gas, estos métodos de estimulación pueden más que duplicar las reservas de gas natural del mundo.

En la producción normal de hidrocarburos se per

foran pozos hacia los yacimientos, esto es común para yacimientos de rocas permeables en los cuales los hidrocarburos fluyen libremente. Pero cuándo los poros de las rocas se encuentran poco comunicados, no se reditúan tan fácilmente la explotación de dichos yacimientos.

Entonces, los explosivos nucleares prometen un nuevo medio más eficaz para lograr el fracturamiento masivo de las rocas. Con las estimulaciones nucleares, el diámetro efectivo del pozo será la chimenea de roca suelta y el área fracturada circundante, que cubriría un área circundante de varios metros cuadrados. De esta manera el gas puede extraerse en cantidades superiores a 10 veces la contribución normal de un pozo.

Por lo tanto, las reservas que en la actualidad son muy difíciles de explotar y que no se consideran económicas, podrían fácilmente ser explotadas. Las estimulaciones nucleares en los yacimientos de rocas areniscas de muy baja permeabilidad prometen un progreso inicial hacia el empleo de los explosivos nucleares.

Se ha calculado que las estimulaciones nucleares podrán más que duplicar las reservas de gas de los E.U.

## 2.- EN LA MINERIA

Existe una razón para cualquier compañía minera use los explosivos nucleares si se logra economía.

Barrenar ha sido una vieja historia en la Minería, pero si los explosivos nucleares producen una reducción substancial en el costo al valor más IVA, entonces las compañías podrían aumentar sus utilidades sin subir sus costos.

Se supone que su empleo inicial en la Minería será para desprender minerales para excavación de obstáculos o en el caso del mineral cobre para filtración en su lugar de origen.

La chimenea de roca suelta que se creará podría usarse para la operación de colado, introduciendo ácido en la cima de la chimenea de roca suelta, permitiendo que escurra por el mineral, donde se disolverá el cobre y posteriormente se bombearía la solución preñada por medio de pozos a la superficie.

La consideración más importante desde el punto de vista económico es cuánto mineral se pueda colar y esto no se sabrá con toda certeza hasta no haberse probado. (Ver figura # 2).

### 3.- EN EL ALMACENAMIENTO DE GAS:

Se han hecho estudios, sobre el uso de explosivos nucleares para formar cavidades subterráneas o recipientes para almacenar gas natural cerca de los centros de consumo. En esta aplicación, el explosivo nuclear sería detonado en una formación impermeable de gran espesor.

La cavidad de almacenamiento tendría un volumen que se creará por la fuerza de la explosión nuclear. En realidad, esto se haría según pudiera controlarse la porosidad de la chimenea derrumbada y el tamaño de la carga que fuese utilizada.

#### 4.- EN LA DISPOSICION DE DESPERDICIOS Y RECURSOS HIDRAULICOS:

El concepto de la creación de cavidades nucleares para tirar los desperdicios es casi el mismo que para el almacenamiento de gas, en este caso se utilizaría un pozo de inyección para desperdicios líquidos en la cavidad resultante, así como la zona de roca suelta.

La chimenea misma podría servir como pozo final para las partículas finas que pudieran removerse en la planta de filtración en la superficie.

Con el uso Ingenieril de estas técnicas podrían resolverse no únicamente los problemas relacionados con el control de desperdicios de grandes ciudades, sino que también podrían aliviarse algunos de los problemas de escasez de agua.

Por ejemplo: El alcantarillado de una ciudad podría manejarse de la siguiente manera: Los sólidos grandes podrían ser separados de la corriente de desperdicio y combinarse con fosfatos y nitratos naturales para la elaboración de un excelente fertilizante.

Los líquidos, tratados químicamente, se inyectarían en un depósito subterráneo a través de un pozo de inyección que fuese perforado.

Otros pozos situados a una distancia apropiada - del pozo de inyección harían posible el uso del agua recuperada, tratándola y purificándola químicamente, así como, por filtración con rocas areniscas limpias a lo largo de - un kilómetro y medio aproximadamente.

## CAPITULO I

### PROYECTOS EFECTUADOS

En 1957 tuvo lugar en los Estados Unidos de Norteamérica un experimento llamado Reinier, que consistió en hacer explotar bajo la tierra una carga de 1.7 Kilotones.

Un Kilotón de explosivos nucleares tiene aproximadamente la energía liberada por 1000 toneladas de TNT. - Un Negatón equivale a un millón de toneladas de TNT. Este experimento suministro mucha información sobre el mecanismo de la explosión de una carga nuclear bajo el subsuelo - y demostró que la energía de este tipo obtenida podía utilizarse para diversos fines, como la explotación de minerales, excavaciones, construcción de presas, etc.

El interés que despertó el experimento fué grande y fueron muchas las cuestiones por investigar que suscitó, por lo que la Comisión de Energía Atómica decidió considerar los estudios y para esto puso en marcha el proyecto conocido con el nombre de "Plowshare". El lugar de origen y sede del proyecto es el laboratorio de Radiación de la Universidad de California.

Desde 1960 la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos anunció que había sido autorizada para efectuar el experimento en Carlsbab, Nuevo México.

El primer experimento del proyecto Plowshare, se efectuó el 10 de Diciembre de 1961.

El propósito principal de este experimento (Llamado Gnomon) era averiguar la posibilidad de recuperar la energía calorífica liberada por la explosión. Del proyecto Gnomon lo único que puede verse sobre la superficie de la tierra es un grupo de instalaciones en el centro de una planicie deshabitada.

La población más cercana, Carlsbad, Nuevo México está a una distancia de 40 kilómetros, las instalaciones contenían instrumentos y aparatos para registrar y recoger los radioisótopos y energía proveniente de la cámara subterránea donde se efectuó la detonación.

Existía una cavidad de 3 X 2.5 mt. en una formación salina situada 365 metros bajo la tierra llamada la "habitación cero", donde el artefacto nuclear fué detonada. En el techo existía un hueco a través del cual algunas muestras de radioisótopos serían llevados hasta la superficie de la tierra después de la explosión del proyecto "Gnomon".

En esta cavidad también existía un tubo de vacío que sería utilizado en conexión con la medición de neutrones, especialmente diseñado para proporcionar información de explosiones nucleares para usos pacíficos, se prepararon instalaciones de pesadas puertas metálicas diseñadas para atrapar los efectos de la explosión en el túnel subterráneo de dicho proyecto.

La explosión nuclear "Gnomon" formó una cavidad de 3 mt. de diámetro por debajo del nivel superficial en la formación salina cavernosa, dos huecos parcialmente per-

forados y preparados para recobrar los radioisótopos y la energía, se extendieron hasta la cavidad de la detonación después de realizado el experimento.

Antes de que se efectuara el proyecto se había previsto que la explosión fundiría una 6 500 toneladas de sal y elevaría considerablemente la temperatura de otras tantas toneladas del mismo material, se calculo que el 50% de la energía total liberada queda almacenada localmente en forma de calor, podía recuperarse y esto permitiría obtener vapores para operar una estación termoeléctrica.

Otro de los objetivos de este experimento es de investigar la posibilidad de recuperar los radioisótopos producidos por el gran flujo de neutrones originado por la detonación.

Se han realizado experimentos para investigar la posibilidad de usar explosivos nucleares bajo el suelo para estimular e incrementar la recuperación final del gas natural que se encuentra en formaciones de bajísima permeabilidad, constituídas por rocas areniscas de grano fino a grueso, bien consolidadas y liberamente calcáreas.

Un reciente estudio del potencial tecnológico del gas natural de la Comisión Federal de la Energía estima que, en la formación localizada en el área de las Montañas Rocallosas existe una reserva de hidrocarburos (gas natural) de alrededor de  $600 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de gas, cifra que puede ser comparada con  $500 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de gas que han sido producidos por todos los pozos que hasta la fecha han sido puestos a producir en las otras áreas de los Estados Uni -

dos de Norteamérica.

El gas de esta área de las Montañas Rocallosas - está contenido en una formación que tiene muchos estratosdelgados de areniscas, los cuales pueden ser fracturados - para de esta manera obtener gastos adecuados de producción. Y se espera lograr este objetivo con los explosivos nucleares, de estas formaciones delgadas con los fracturamientos hidráulicos masivos (fluidos fracturantes con apuntaladores) no se han obtenido gastos de producción adecuada.

A continuación se comentarán los resultados de - los tres experimentos de fracturamiento con explosivos nucleares, efectuados en las formaciones de areniscas de bajísima permeabilidad que contienen gas localizados en el - área de las Montañas Rocallosas.

Hace 10 años el fracturamiento o estimulación - con explosivos nucleares se tenía como un proyecto excitante y promisorio para aumentar la permeabilidad de las formaciones areniscas de bajísima permeabilidad que contienen gas natural, ya que mientras no exista una tecnología más avanzada no pueden ser explotadas económicamente estas formaciones.

A la fecha ya han sido terminados tres de estos proyectos y un cuarto ha sido cancelado, puede decirse que de los tres proyectos que han sido completados y terminados no se obtuvieron los resultados ni los beneficios económicos esperados. Sin embargo, la posibilidad técnica del uso de los explosivos nucleares para estimular e incrementar la producción de gas natural de las formaciones de ba-

jísima permeabilidad ha sido demostrada, ya que se logran incrementos en los gastos de producción del orden de 2 a 4 veces superiores a las obtenidas con las estimulaciones de fracturamiento hidráulico.

Un análisis de los efectos de la estimulación y los costos que ocasiona la realización de un fracturamiento con explosivos nucleares, permite concluir que los pozos fracturados con explosivos nucleares en la actualidad no son comercialmente atractivos y que su rivalidad con respecto a los otros métodos convencionales de estimulación es solamente sí el costo total de la estimulación nuclear es del orden de  $1 \times 10^6$ .

Generalmente los costos de fracturamientos son de un orden de magnitud mayor que los del fracturamiento hidráulico masivo.

La aceptación de esta tecnología es importante, aunque no sea favorable por el momento, ya que avances en ella pueden alcanzar condiciones favorables.

Una comparación de los datos que se tienen de los proyectos Gasbugy Rulison y Río Blanco se presentan en la tabla # 1. Y dichos proyectos se enunciarán de una manera breve.

### PROYECTO GASBUGGY

El proyecto Gasbuggy fué un experimento que se realizó en una formación de muy baja permeabilidad llamada

Pictured Cliffs; Localizada en San Juan Basin, Nuevo México, en el área de los cuatro puntos: Nuevo México, Arizona, Utah y Colorado.

La formación de Pictured Cliffs está constituida por rocas areniscas bien consolidadas, de grano fino y ligeramente calcáreas.

La realización de este proyecto estuvo a cargo de la Compañía de Gas Natural El Paso y se llevó a cabo el 10 de Diciembre de 1967.

Dicho proyecto se efectuó en un pozo cuya profundidad total fué de 1342 mt, el tamaño del agujero era de 28" y se utilizó una Tubería de Revestimiento de 20".

El artefacto que se utilizó tenía las siguientes características: El rendimiento era de  $29 \pm 3$  Kt (kilotonnes), las dimensiones eran de 46 cm. de diámetro y tenía una longitud de 9.2 mt, dicho artefacto fue colocado en el fondo del pozo y el cable para detonar a control remoto estaba colocado dentro de una sarta de tubería de revestimiento de 7".

El material de apizonamiento para proteger las instalaciones superficiales de los efectos sísmicos que se usó fue cemento.

La profundidad de la detonación fué de 1292 mt, con dicha explosión nuclear se obtuvo una cavidad (chimeña) de 55 mt. de diámetro por 122 mt. de altura y se efectuó un reconocimiento de la misma 30 días después de la detonación.

Para complementar la información disponible sobre las reservas en esta área y de la información de la producción de ocho pozos que se perforaron originalmente en el área de pruebas de Gasbuggy. Se perforaron otros dos pozos de prueba el GB - 1 y el GB - 2, en el año de 1967.

El pozo GB - 1 fué perforado hasta una profundidad de 1342 mt, aproximadamente 12.5 mt. debajo de la base de la formación Pictured Cliffs ( 1292 mt ) fué detonado - el artefacto y se efectuó la estimulación nuclear.

En adición al pozo GB - 1 que fué designado con el nombre de GB - ER y al GB - 2 designado con el nombre de GB - 2 RS, se perforó otro pozo el GB - 3 con un espaciamiento de 76 mt con respecto al GB - ER.

Durante tres años se estuvieron realizando pruebas intensivas en el GB - ER y durante este período se monitorearon las presiones con los pozos GB - 2 RS y el GB - 3.

### PROYECTO RULISON

La realización de este proyecto estuvo al cargo de la Compañía Austral Oil Co. y se llevó a cabo el 10 de Septiembre de 1969.

El proyecto Rulison fué un experimento que se realizó en una formación de muy baja permeabilidad llamada Mesaverde, que se estima contiene más de 100 000 m<sup>3</sup> de gas natural.

La formación de Mesaverde se encuentra constituida por rocas areniscas bien consolidadas, de grano fino y ligeramente calcáreas.

Dicho proyecto se efectuó en un pozo cuya profundidad total fué de 2652 mt, el tamaño del agujero era de 15" y se utilizó una Tubería de Revestimiento de 10 3/4".

El artefacto que se utilizó tenía las siguientes características: El rendimiento de este era de 43  $\frac{7}{8}$  Kt (kilotones), las dimensiones eran de 23 cm de diámetro y una longitud de 4.57 mt. Dicho artefacto fué colocado en el fondo del pozo y el cable para detonar a control remoto estaba colocado dentro de una sarta de tubería de revestimiento de 3/4".

El material de apizonamiento para proteger las instalaciones superficiales de los efectos sísmicos que se usó fue arena y grava.

La profundidad de la detonación fué de 2513 mt, con dicha explosión nuclear se obtuvo una cavidad (chimeña) de 45 mt de diámetro por 82 mt de altura y se efectuó un reconocimiento de la misma 6 meses después de la detonación.

#### PROYECTO RIO BLANCO

La realización de este proyecto estuvo a cargo de la Compañía CER Geonuclear Corp. y se llevó a cabo el 17 de Mayo de 1973.

El proyecto Río Blanco se realizó en una forma -  
ción localizada en Piceance Basin, W. Colorado.

La formación se encuentra constituida por rocas -  
areniscas bien consolidadas, de grano fino y ligeramente -  
calcáreas.

Dicho proyecto se efectuó en un pozo cuya profun-  
didad total fué de 2399 mt, el tamaño del agujero era de -  
15" y se utilizó una Tubería de Revestimiento de 10 3/4".

El artefacto que se utilizó tenía las siguientes  
características: Se utilizaron tres cargas explosivas de -  
30 Kt cada una de rendimiento, las dimensiones de estas -  
eran de 20 cm. de diámetro y la longitud no se conoce. Di-  
cho artefacto fué colocado en el fondo del pozo y el cable  
para detonar a control remoto fué colocado dentro de una -  
sarta de tubería de revestimiento de 7".

El material de apizonamiento para proteger las -  
instalaciones superficiales de los efectos sísmicos que se  
usó fue cemento y agua gelatinizada.

Las profundidades de detonación fueron tres y -  
son respectivamente: 1780, 1899 y 2039 mt, con dichas ex -  
plosiones nucleares únicamente se tienen datos de la cavi-  
dad superior formada ya que las demás cavidades no queda -  
ron comunicadas y las dimensiones de esta son de 40 mt de  
diámetro y se considera que se desarrolló en forma semicir-  
cular.

Se efectuó un reconocimiento de la misma a los -  
4 meses de las detonaciones.

Un dato muy importante que se encontró con estos experimentos es que conforme avanzaban los desarrollos de estos proyectos se mejoraba esta tecnología y los residuos radioactivos eran menores, como se observa en esta tabla.

PROYECTO GASBUGGY	40 000 (Ci)	Total de Tritium producido
PROYECTO RULISON	10 000 (Ci)	Total de Tritium producido
PROYECTO RIO BLANCO	1 000 (Ci)	Total de Tritium producido

Ci.- Unidad nuclear ( Curie, simb. Ci ).

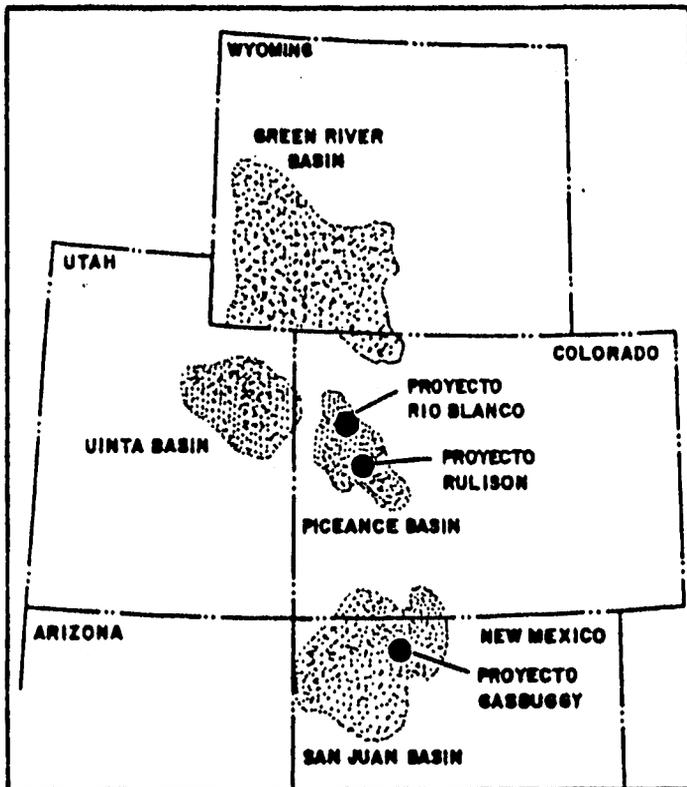


Figura 1 .- Localización de los experimentos de fracturamiento con explosivos nucleares en el área de las montañas rocallosas.

Tabla N° 1.-

COMPRESION DE LOS DATOS QUE SE TIENEN DE LOS PROYECTOS GASBUGGY, RULISON Y RIO BLANCO.

	<u>GASBUGGY</u>	<u>RULISON</u>	<u>RIO BLANCO</u>
FECHA	10 DICIEMBRE, 1967	10 SEPTIEMBRE, 1969	17 MAYO, 1973
INDUSTRIA PATROCINADORA	EL PASO NAT. GAS CO.	AUSTRAL OIL CO.	CER GEONUCLEAR
LOCALIZACION	SAN JUAN BASIN Y NEW MEXICO	PICIANCE BASIN Y W. COLORADO	PICEANCE BASIN W. COLORADO
RENDIMIENTO DEL ARTEFACTO (Kt)	29 ± 3	43 ± 8	3 DETONACIONES SIMULTANEAS DE 30 Kt CADA UNA
DIAMETRO DEL ARTEFACTO (cm)	18 cm	23 cm	28 cm
PROFUNDIDAD TOTAL DEL AGUJERO DE EMPLAZAMIENTO (mt)	1342 mt	2652 mt	2399 mt
TRITIUM TOTAL PRODUCIDO (Ci)	40 000 ( Ci )	10 000 Ci	1000 Ci
PROFUNDIDAD DE LA DENOTACION ( mt )	1292 mt	2513 mt	1780, 1899, 2039 mt
PESO DEL ARTEFACTO ( kg )	9080 kg	681 kg	- - -
LONGITUD DE LA CAJA DEL ARTEFACTO ( mt )	9.18 mt	4.53 mt	- - -
TUBERIA EN LA QUE SE COLOCA EL CABLE DE DETONACION ( pg )	7 "	3/4"	7"
TAMAÑO DEL AGUJERO PERFORADO ( pg )	28 "	15 "	15 "
MATERIAL DEL APIZONAMIENTO COLOCADO.	CEMENTO	ARENA Y GRAVA	CEMENTO Y AGUA GELATINIZADA.
TAMAÑO DE LA CAVIDAD (DIAMETRO Y ALTURA) mt	63 x 140 mt	46 x 82 mt	40 mt DE DIAMETRO Y FORMA ESFERICA
TIEMPO DE RECONOCIMIENTO DESPUES DE LA DETONACION.	30 DIAS	6 MESES	4 MESES

## CAPITULO II

Eventos que ocurren en una Explosión Nuclear Subterránea

Cuando se tiene una detonación nuclear, toda la energía producida por la reacción de los explosivos nucleares es liberada en un tiempo menor que una milésima de segundo (mseg). Las presiones y temperaturas iniciales son del orden de varios millones de Kg/cm<sup>2</sup> y millones de grados centígrados.

Se forma una gran bola de fuego, nada detiene su formación y así continúa expandiéndose.

Una onda de movimiento supersónico es arrojada radial y exteriormente, vaporizando, fundiendo, triturando, agrietando y desplazando la roca.

Después de esta descarga de energía, el impacto de la onda y los vapores de la roca dejan una cavidad esférica.

El volumen máximo de la cavidad se lleva a cabo en alrededor de 100 milésimas de segundo. Subsecuentemente pérdidas de calor, escapes de gas contenido a través de los sistemas de fracturas y la condensación del vapor, reducen la presión haciendo que la roca fracturada alrededor de la cavidad se desplome hacia la parte inferior de la misma.

Por lo general ocurren desplomes en el interior de la cavidad durante segundos o hasta horas después de la detonación, la roca desplomada dentro de la cavidad forma un complejo chimenea - zona de cascajo (ripio).

La mayoría del material fundido y los productos producidos por la fisión radioactiva se acumula en el fondo de la chimenea en forma de escoria vidriosa, los desplomes continúan hasta que se forma una bóveda con la suficiente firmeza como para soportar el peso de las formaciones que se encuentran encima de esta ó hasta que la zona de cascajo de la chimenea la pueda sostener.

La porosidad de la zona de "cascajo" (que es el espacio vacío entre los fragmentos de roca caídos) tiene un rango del 20 al 30% y la permeabilidad de la chimenea se considera infinita.

Los productos sólidos de la radiación son atrapados en la roca solidificada que se encuentra en el fondo de la cavidad. Los productos gaseosos de la radiación quedan atrapados en el montón de roca, en pequeñas cantidades, de esto puede disponerse fácilmente.

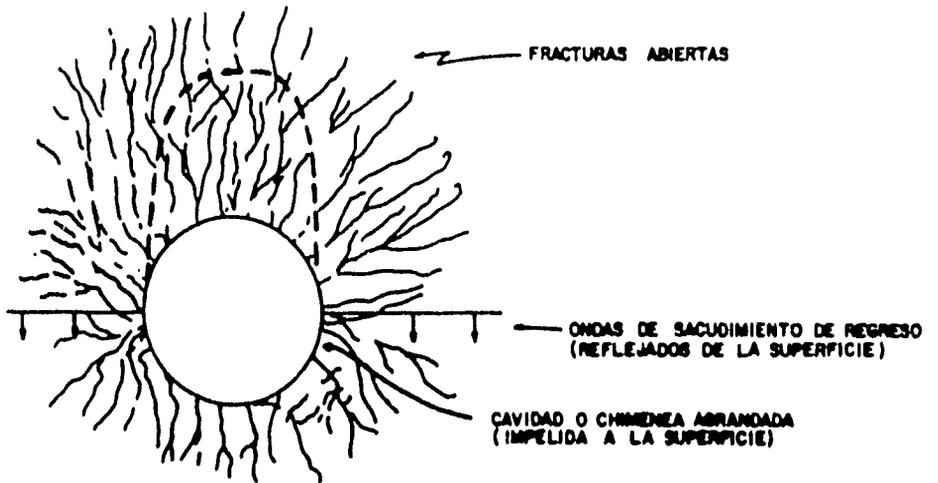
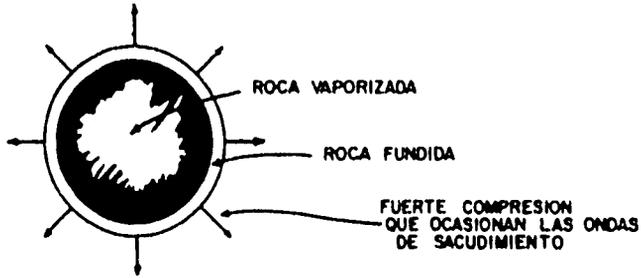
Todo lo que queda es una enorme chimenea de roca suelta, rodeada por una vasta región de roca que se fracturó altamente debido a las ondas de sacudimiento (ver esquema # 1). Esta chimenea tiene la forma de un cilindro de rocas.

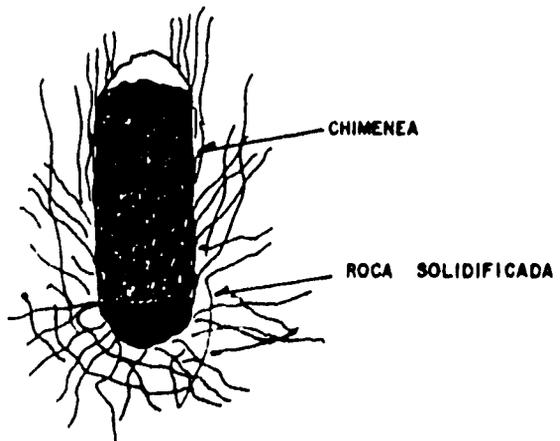
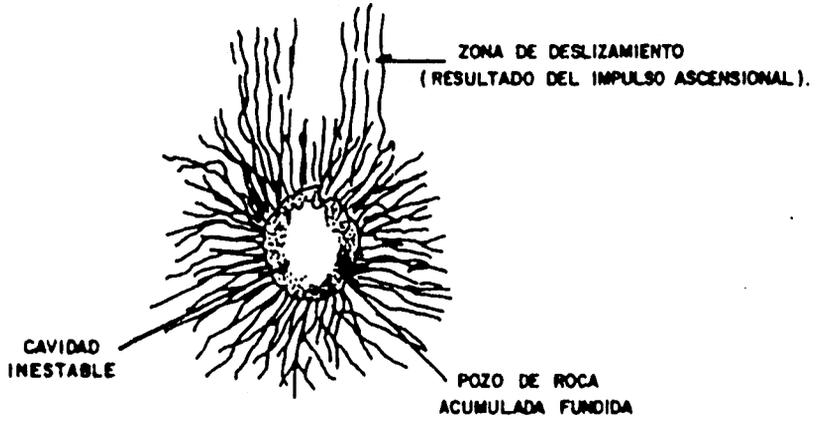
Con los explosivos nucleares, el diámetro efecti

vo del pozo será la chimenea de roca suelta y el área fracturada circundante, que cubriría un área de cientos de metros cuadrados. Y así el gas puede producirse en cantidades superiores a 10 veces la producción normal de un pozo.

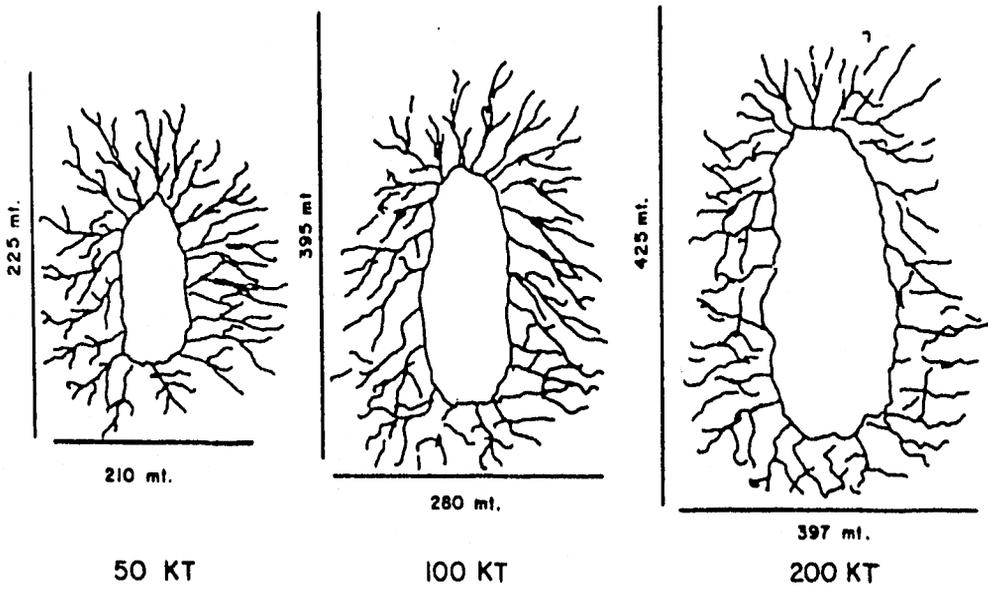
Se han hecho explosiones nucleares de distintas cargas a una misma profundidad y se han visto las diferencias que existen en la longitud vertical y en la longitud horizontal de la zona fracturada circundante. (ver esquema # 2).

MECANISMO DE LA FORMACION DE LA CHIMENEA - CAVIDAD DEVIDA AL USO DE LOS EXPLOSIVOS NUCLEARES.





## ESQUEMA # 2



CHIMENEA Y ZONAS FRACTURADAS QUE RESULTAN DEL USO DE EXPLOSIVOS NUCLEARES DE DIFERENTES CARGAS (KILOTONES) A UNA MISMA PROFUNDIDAD (1000 mt).

## CAPITULO III

Dimensiones de la Chimenea y radios de Fractura

Utilizando programas de computadora, que fueron desarrollados por la Physics International, se realizaron estudios teóricos paramétricos para determinar la influencia de las propiedades de las rocas y las propiedades de los explosivos en los efectos de la detonación. De particular interés, fueron el tamaño de la cavidad formada (chimenea) y la zona fracturada circundante.

Se hizo también un estudio de los efectos de la detonación en la superficie y en el equipo de la superficie, del tipo de apizonamiento que se debería de tener en el pozo para contener los efectos de la detonación.

La mayoría de los cálculos se hicieron considerando una carga explosiva cilíndrica con un radio de 1 mt. y de longitud infinita.

Efectos de los Parámetros de rocas

Para determinar el efecto de los parámetros de las rocas se hicieron una serie de cálculos utilizando un explosivo base de línea ( TNT ) y cuatro tipos de rocas.

Para describir particularmente las propiedades de las rocas, se utilizaron;

Areniscas bien consolidadas (SSA), areniscas poco consolidadas (SSB) y lutitas bituminosas bien consolidadas y poco consolidadas.

Estos materiales ajustan su comportamiento a la siguiente ecuación de condición:

$$P = a_1 \mu + a_2 \mu^2 + a_3 \mu^3 + a_4 \mu^4 + \dots$$

con un modelo de rendimiento de la forma:

$$Y = \text{número de } ( Y_0, Y_1 + Y_2 P )$$

Todos los parámetros se han resumido en la tabla # 2.

Las areniscas tuvieron ecuaciones de condición idénticas pero marcadamente resistencias diferentes.

En cambio, las dos lutitas bituminosas tuvieron iguales resistencias, pero diferentes ecuaciones de condición: Al modificar cada uno de estos parámetros separadamente se obtuvo, en buena medida, la importancia relativa de ellos.

### Efectos de los Parámetros Explosivos

En el estudio de los parámetros de los efectos de las rocas se utilizó una ecuación de condición para ( TNT ). En el estudio de los parámetros explosivos fue necesario usar una ecuación con condiciones más simples, de-

bido a la falta de información. En estos cálculos se utilizó una ecuación de condición " Ley Gamma ", con presión de finida como :

$$P = (\gamma - 1) E^0/v$$

Los parámetros para la ecuación de condición "Ley Gamma " son proporcionadas por las compañías que elaboran estos explosivos y fueron derivados de correlaciones teóricas más que de mediciones directas : Los modelos son característicos.

En uno se tiene una alta gamma ( Ley ) y baja potencia ( LE ); otro tuvo valores de baja gamma ( Ly ) y alta potencia ( HE ); y el tercero tuvo valores intermedios de gamma y potencia.

Los valores de los parámetros explosivos se muestran en la tabla # 3.

Los significados físicos de potencia y gamma son:

(1) La más alta potencia nos indica una más grande onda de sacudimiento frontal generada por la detonación; Y

(2) La más baja gamma nos indica un mayor volumen de gas producido por la detonación del explosivo."

Como es lógico, el explosivo de alta potencia y baja gamma es el más efectivo. De esta información resul

ta evidente que el radio de la chimenea y la zona fracturada circundante dependen de los valores de " E " y de " y ".

De los resultados de éstos cálculos, que " E " debería llevarse hasta el máximo, y que " y " debería llevarse al mínimo para crear un explosivo más efectivo en términos de la formación de la chimenea y de la zona fracturada circundante.

Se han hecho estudios acerca de un cierto número de explosiones nucleares efectuadas subterráneamente, y estos nos han proporcionado una representación bastante consistente de los lineamientos geométricos que se producen. Los aspectos de principal interés relacionados con el desplazamiento de la roca y el llenado del volumen vacío dentro del pozo, como resultado de la estimulación nuclear incluyen:

- 1.- La configuración de la chimenea.
- 2.- El volumen vacío de la chimenea.
- 3.- La permeabilidad de la chimenea.
- 4.- La permeabilidad de las zonas circunvecinas a la chimenea.

Han sido discutidas estas en función del rendimiento del explosivo, profundidad de la detonación y del tipo de rocas que se trate. La configuración de la chimenea y el volumen vacío de la misma, según estas discusiones

nes concuerdan estrechamente. En cuanto a la permeabilidad dentro y fuera de la chimenea, no se reportó en estas discusiones una respuesta cuantitativa.

Y según se ha visto las características geométricas de la chimenea después del disparo pueden ser calculadas como una función del rendimiento de la carga, de la profundidad de la formación que se va a estimular y las propiedades físicas de las rocas, usando un proceso de ecuaciones desarrolladas de datos obtenidos de proyectos subterráneos realizados.

La figura # 1 es una solución gráfica para algunos problemas y nos muestra como se puede determinar rápidamente los radios de las chimeneas y la altura de éstas en función de la profundidad de la formación y del rendimiento nuclear para formaciones areniscas.

Tanto en la estimulación nuclear como en los otros métodos de estimulación. El valor cuantitativo del aumento de la permeabilidad fuera de la chimenea, es de vital importancia para el pronóstico de la recuperación final de los hidrocarburos.

Aparte de la gran capacidad de almacenamiento de la chimenea, la mayor ventaja del ambiente creado por la explosión nuclear sobre el que se tenía originalmente, es la capacidad para rendir una mayor producción.

Y esto se logra perforando después del disparo, pozos en la zona fracturada de la chimenea.

La geometría del ambiente nuclear o la influencia posterior al disparo debido a la simetría de la explosión, puede simularse asignando valores variantes de permeabilidad a varios anillos anulares concéntricos al área fracturada circundante, con la chimenea actuando como un gran pozo.

Para ver el modelo de flujo de la chimenea en base al cual se hace esta consideración consultar el apéndice # 1.

NOMENCLATURA

- $G$  = Módulo del esfuerzo cortante, Mbar  
 $a_1$  = Coef. de Compresibilidad, Mbar  
 $Y_0$  = Esfuerzo de rendimiento Von Mises, Mbar  
 $Y_1$  = Fuerza Cohesiva, Kbar  
 $Y_2$  = Coef. Mohr - Coulomb  
 $\rho$  = Densidad del explosivo, grm/cc  
 $\delta$  = Parámetro del volumen - presión  
 $E_0$  = Fuerza de detonación, Mbar/cc  
 $r_c$  = radio final de la cavidad, mt  
 $\rho$  = Densidad de la roca, grm/cc  
 $t_c$  = Tiempo de formación de la cavidad, mseg  
 $\nabla$  = Pico de esfuerzo radial a 5.2 mt, Kbar  
SSA = Roca arenisca bien consolidada  
SSB = Roca arenisca poco consolidada  
SHA = Lutita bituminosa bien consolidada  
SHB = Lutita bituminosa poco consolidada  
H, M, L, V = Alto, Medio, Bajo y Variable  
E = Energía

TABLA N° 2.- RESUMEN DE LOS CALCULOS PARAMETRICOS.

Títulos	PROPIEDADES DE LAS ROCAS								PROPIEDADES EXPLOSIVAS		
	<u>P</u>	<u>G</u>	<u>a<sub>1</sub></u>	<u>a<sub>2</sub></u>	<u>a<sub>3</sub></u>	<u>Y<sub>0</sub></u>	<u>Y<sub>1</sub></u>	<u>Y<sub>2</sub></u>	<u>ρ</u>	<u>r</u>	<u>E<sub>0</sub></u>
SSA-TNT	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	20	1	0.88	1.63	TNT	0.06
SSB-TNT	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.63	TNT	0.06
SHA-TNT	2.64	0.125	0.256	8.95	-22.5	1	0.2	1.0	1.63	TNT	0.06
SHB-TNT	2.2	0.05	0.164	0.897	-0.765	1	0.2	1.0	1.63	TNT	0.06
MyME SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.3	3.0	0.06
LyHE SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.35	1.9	0.071
HrHE SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.35	4.1	0.071
HrLE SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.3	3.5	0.039
VrLE SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.3	3.5	0.039
H <sub>p</sub> rNT SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.63	3.0	0.06
4.1 <sub>r</sub> LE SSB	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.3	4.1	0.039
SSB-TNT	2.4	0.113	0.374	-0.13	1.67	5	0.2	0.7	1.63	TNT	0.06

RESULTADOS

<u>r<sub>c</sub></u>	<u>t<sub>c</sub></u>	<u>V<sub>5</sub></u>	<u>V<sub>5</sub></u>	<u>V<sub>25</sub></u>
1.66	6	96	37	27
2.01	10	104	38	17
2.60	12	164	35	18
2.65	10	97	21	--
2.03	9	117	32	20
2.30	12	85	25	17
2.00	6	137	35	22
1.78	7	96	37	15
1.77	7	94	24	16

NOMENCLATURA

- ρ = Densidad de la roca, grm/cc
- G = Módulo del esfuerzo cortante, Mbar
- a<sub>1</sub> = Coef. de Compresibilidad, Mbar
- Y<sub>0</sub> = Esfuerzo de rendimiento Von Mises Mbar
- Y<sub>1</sub> = Fuerza Cohesiva, Kbar
- Y<sub>2</sub> = Coef. Mohr-Coulomb
- ρ = Densidad del explosivo, grm/cc
- r = Parámetro de volumen-presión
- E<sub>0</sub> = Fuerza de detonación, Mbar/cc
- r<sub>c</sub> = radio final de la cavidad, mt.

NOMENCLATURA

$t_c$  = Tiempo de la formación de la cavidad , msec  
 $v$  = Pico de esfuerzo radial a 5.2 mt. Kbar  
SSA = Roca arenisca bien consolidada  
SSB = Roca arenisca poco consolidada  
SHA = Lutita bituminosa bien consolidada  
SHB = Lutita bituminosa poco consolidada  
H,M,L,V = Alto, medio, bajo, variable  
E = Energía

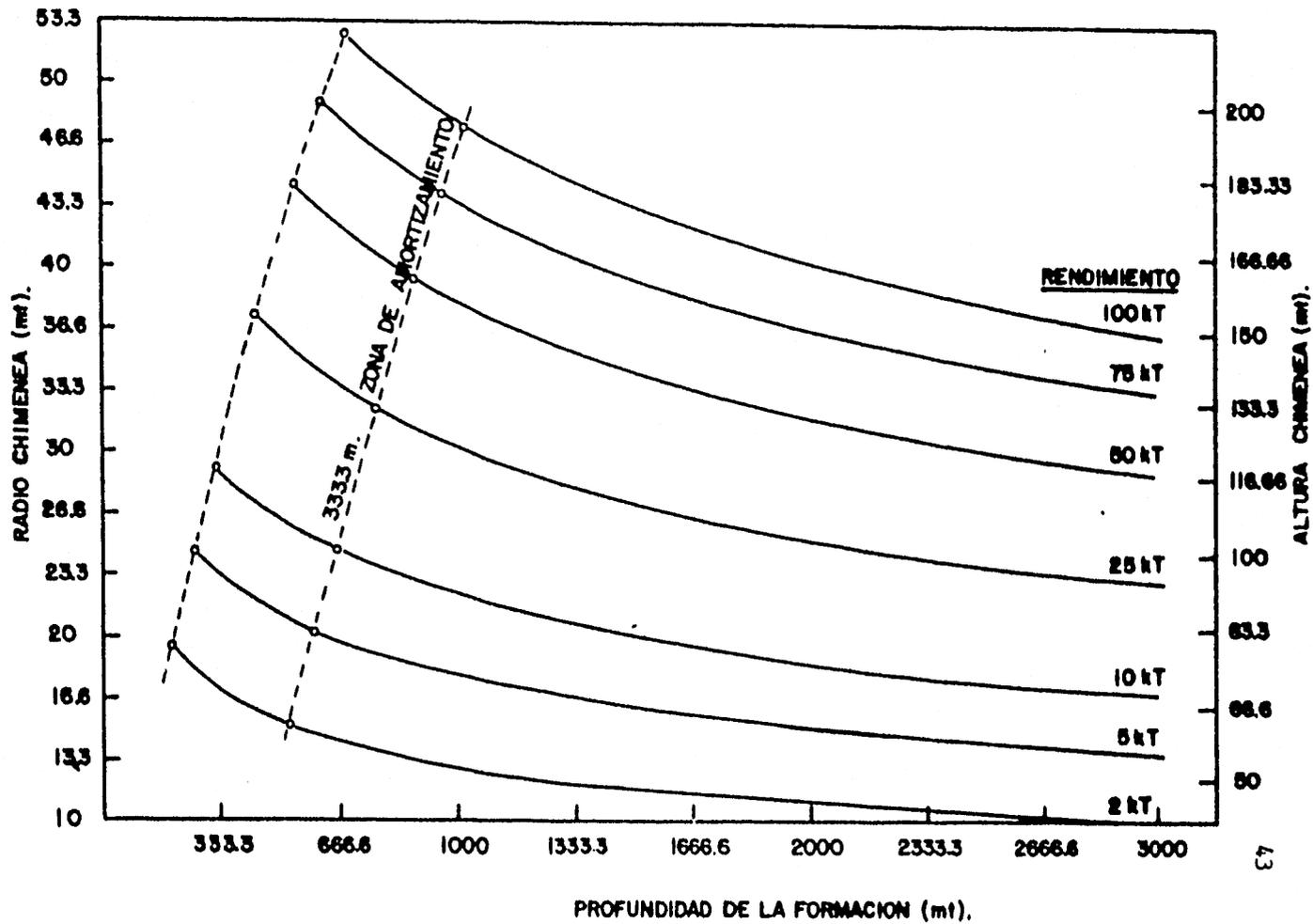


Figura 1 .— Solución grafica para determinar rapidamente los radios de la chimenea

## CAPITULO IV

Efectos en la Estimulación de los Yacimientos

La importancia dominante de la formación no alterada es revelada por una apreciación objetiva de la composición - chimenea - zona fracturada en relación a el área de drene. Por lo tanto, unos breves pero importantes puntos, primero se relacionaron con el significado de las dimensiones radiales de la composición chimenea - zona fracturada y el - incremento esperado en la productividad.

La respuesta del yacimiento a un fracturamiento con explosivos nucleares en términos de un gasto de producción y de una recuperación final depende de la contribución de - tres elementos: La chimenea, la zona fracturada circunvecina de la chimenea y de la formación inalterada más alta de la zona fracturada.

El significado de las dimensiones radiales puede ser - mejor ilustrado usando uno de los tres experimentos, tal - como, el más reciente proyecto (Río Blanco) y atendiendo o considerando las características del yacimiento.

El proyecto Río Blanco consistió en la detonación simultánea de tres cargas nucleares de 30 kilotones, la cavidad superior tuvo un radio de 21 mt y la extensión de la zona-fracturada tuvo una longitud de alrededor de tres veces el radio de la cavidad a partir del agujero del pozo, de a - cuerdo con los datos de las pruebas de incremento y decre-

mento de presión.

Asumiendo que el área de drene del gas en las formaciones Meseverde y Fort Unión es de  $1.29 \text{ Km}^2$  por pozo, la zona de la composición chimenea - zona fracturada (o el área físicamente alterada por la explosión) es únicamente de  $0.01 \text{ Km}^2$  ó menos del 1 % del área de drene (figura # 2).- Aún si la relativamente pequeña área de drene de gas de  $0.64 \text{ Km}^2$  por pozo se considera, el área estimulada es una fracción del espacio chimenea - pozo y esto es tan solo el 1.7 %.

El volumen de gas contenido en el espacio estimulado es insignificante con relación al 99% porciento del volumen de gas que se encuentra fuera de la zona fracturada y sujeta a las leyes que gobiernan el flujo de fluidos en un medio poroso inalterado.

Además, debido a que el logaritmo del término:

$$\frac{r_e}{r_w}$$

en la ecuación de los radios de productividad (Apendice 2), una vez que las paredes del pozo son agrandadas unos cuantos metros, incrementos relativamente pequeños de la productividad son el resultado de incrementos en los radios de las paredes de los pozos. Esto es mejor ilustrado en la figura # 3, la cual es una solución gráfica de la ecuación de los radios de productividad.

La chimenea y la zona fracturada circunvecina - puede considerarse como si fuera un pozo de dimensiones - muy grandes, lo que puede comprenderse fácilmente.

Sin considerar el tamaño de la chimenea y de las fracturas de la zona circunvecina, el gas debe de fluir - finalmente hacia la chimenea desde los lugares más aleja - dos del área de drene y con esta consideración se sobrepasa el volumen de la región estimulada del yacimiento.

Consideraciones prácticas de la tecnología actual para la aplicación de los explosivos nucleares de manera - comercial limitan la estimulación a cargas no mayores de - 100 K<sub>t</sub>. El fracturamiento masivo hidráulico ( MHF ) tiene las mismas limitaciones, en la geometría de drene, que los explosivos nucleares; a pesar de que la extensión de la - fractura hidráulica puede fácilmente exceder la extensión radial del sistema de fracturas hechas por los explosivos nucleares. Recientes experiencias con MHF demuestran que - los resultados son, en general, considerablemente abajo de los esperados.

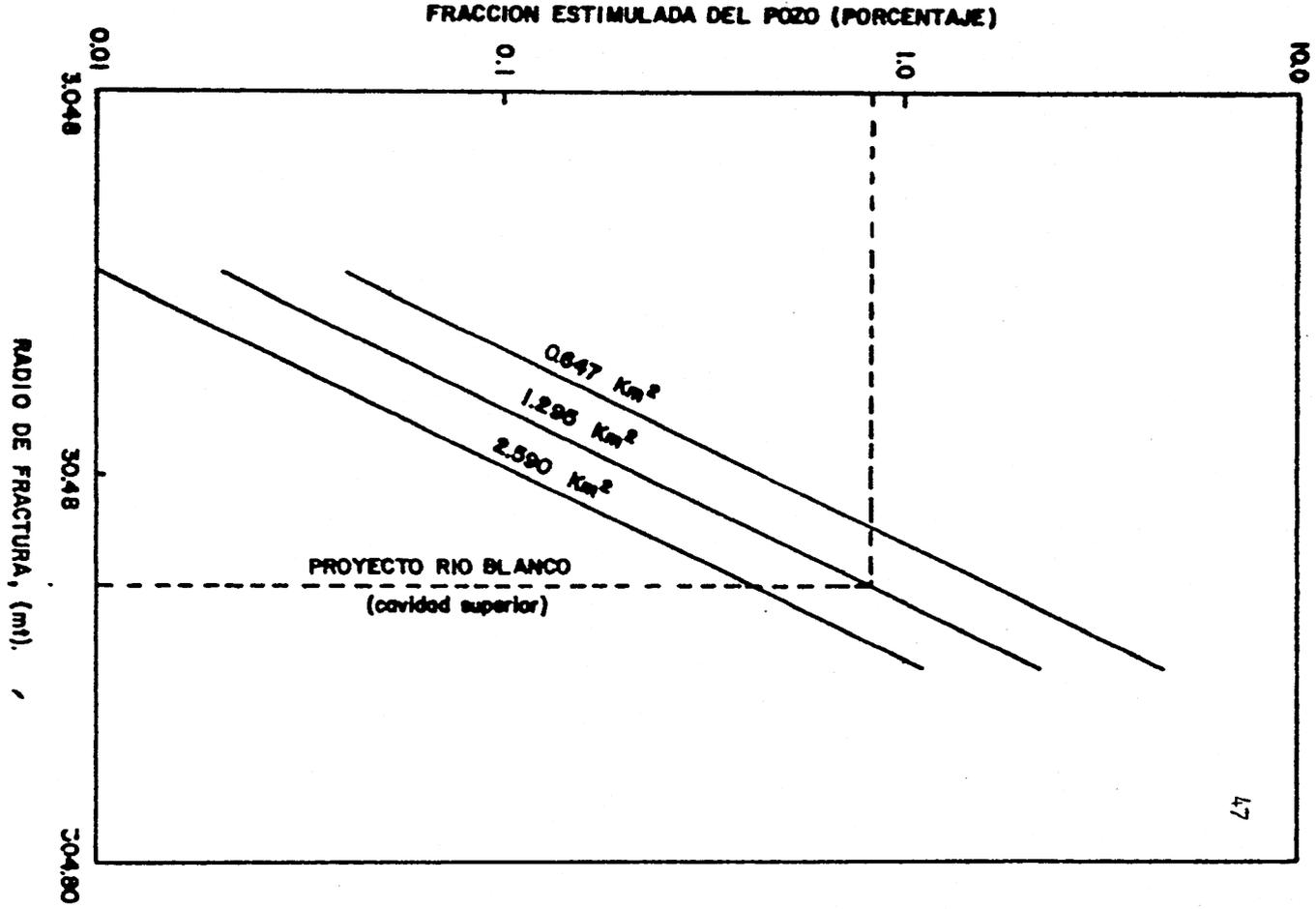


Figura. 2 --- El area estimulada como una fracción del area de drenaje del pozo.

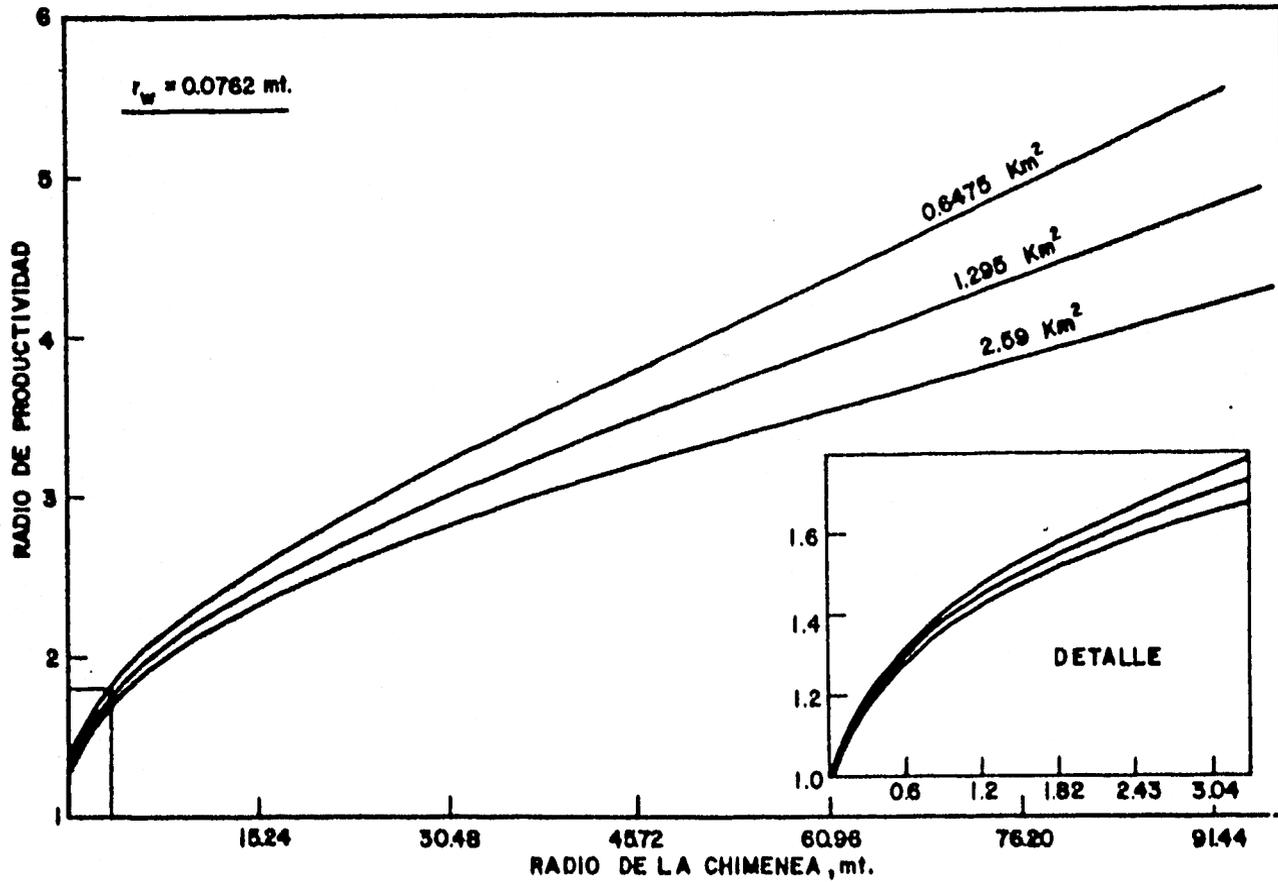


Figure 3 .- Relacion de productividad como una funcion de los radios de la chimenea y el area de drene de los pozos.

## CAPITULO V

Posibilidades de Incremento en la Productividad

En la realización de la evaluación de los pozos, - el patrón usualmente utilizado es el índice de productividad medido o determinado en agujero abierto, y sin alteración en la permeabilidad de la vecindad del pozo.

Entonces la relación del índice de productividad - de un pozo después de la estimulación referida al índice - de productividad antes del tratamiento nos da una indica - ción del efecto de la estimulación.

La relación de productividad es afectada al cam - biarse la permeabilidad al ser mejorada o aumentada la - permeabilidad en las vecindades del pozo.

Para comenzar ( la relación de productividad teó - rica de un pozo) si los radios de cualquier pozo son doble mente ampliados de 0.25 mt ( además de los 1.29 Km<sup>2</sup> de es - pacio considerado), se tendrá entonces que la relación de - productividad será de 1.8 o sea un mejoramiento del índice de productividad de aproximadamente 8 %.

Agrandamiento del radio de las paredes del pozo - de 20.11 mt dieron como resultado un mejoramiento del índi - ce de productividad de 260 %.

Si la zona fracturada fuera considerada de permea

bilidad infinita y el radio de las paredes del pozo fuera de 60.3 mt (Proyecto Río Blanco ), el índice de productividad para este caso determinado o específico podría aumentar en un 390 %. Las observaciones de la contribución de la zona fracturada alrededor de la chimenea producida nuclearmente han demostrado que ésta es relativamente pequeña, aún con el gran incremento de la permeabilidad de la zona fracturada que se tiene.

En la figura # 4 se hace posible el establecimiento de los límites de la relación de productividad para la combinación de la chimenea - área de la zona fracturada. Y la permeabilidad entre la zona de permeabilidad no mejorada y la permeabilidad de la zona mejorada, considerada infinita. El desarrollo de este concepto es presentado en el apéndice # 2.

Lo esencial de esta cuestión es que una vez que las paredes del pozo han sido incrementadas unos cuantos metros, de su radio original, incrementos relativamente pequeños pueden esperarse de nuevos incrementos en las paredes del pozo, esto nos hace suponer que la extensión del fracturamiento es mayor que el obtenido por medio de las ecuaciones, empleando para dicho cálculo, dando como resultado un incremento mayor de 5 ó 6 veces en la productividad.

Sin duda, las características del flujo de la formación inalterada no tienen mayor importancia en la estimulación nuclear como para cualquier otro método de estimulación.

La ventaja notable del fracturamiento de los pozos con los explosivos nucleares se encuentra en su capacidad para fracturar muy grandes intervalos. Esta capacidad es particularmente usada en áreas donde las formaciones productoras son numerosas y separadas por lutitas impermeables de gran espesor de varias decenas de metros.

Esta capacidad puede, sin embargo tener una desventaja, cuando no se estén trabajando con condiciones ideales, tales como la proximidad de un acuífero y que a causa de esto se tenga que disponer de grandes volúmenes de agua contaminada con elementos radioactivos.

Para ilustrar este tema nos vamos a basar en los resultados obtenidos en el Proyecto Gasbuggy que fué uno de los cuatro experimentos que se efectuaron en el área de las Montañas Rocallosas, para investigar la posibilidad de utilizar los explosivos nucleares para estimular las formaciones e incrementar la recuperación final del gas natural.

Después de la detonación de los explosivos nucleares, el agujero de emplazamiento, GB - E, se volvió a perforar y se terminó de perforar en Enero de 1968, y se le designó con el nombre del GB - ER.

Este pozo de gas GB - ER tenía la tubería de revestimiento ( TR ) situada a 1154 mt - aproximadamente 61 mt - sobre la cima de la formación Pictured Cliffs debido a condiciones mecánicas que se presentaron en el agujero - y desde ese punto se realizaron todas las mediciones de presión y temperatura del fondo del pozo.

Se realizaron breves pruebas de producción para verificar si existía comunicación entre el agujero del pozo y la chimenea. Este pozo fué disparado en Enero de 1968 para crear presión y se pudo determinar que hubo un aumento en la presión de la chimenea de 67.2 a 75.86 Kg/cm<sup>2</sup> esto fué determinado a una profundidad de 1156 mt en junio de 1968, cuando se comenzaron a realizar las pruebas de producción más extensas.

Durante una prueba de producción que realizó durante 15 días que se inició en Junio; el pozo GB - ER se puso a producir con un gasto de 141 581 m<sup>3</sup>/D durante 6 días y se notó que la presión de la chimenea disminuyó hasta una presión de 64.54 Kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura en el fondo del agujero era de 120 °C.

El pozo fue cerrado durante un día ( 24 horas ), tiempo durante el cual la presión en el fondo del pozo tuvo un incremento de 0.77 Kg/cm<sup>2</sup> o sea que la presión se incrementó hasta 65.31 Kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura disminuyó hasta 78.8 °C, esto fué ocasionado por el efecto local de enfriamiento de la formación de alrededor.

La prueba de producción fue realizada durante 5 días manteniendo un gasto de 141 581 m<sup>3</sup>/D después de lo cual la presión y la temperatura tuvieron una disminución y aumento respectivamente de 55.68 Kg/cm<sup>2</sup> y 119.4 °C. El valor del gasto fue reducido a 21 237 m<sup>3</sup>/D y al final de 4 días la presión se incrementó en 1.13 Kg/cm<sup>2</sup>.

Durante esta prueba se tuvo una producción de 1.6140 MM m<sup>3</sup> y el pozo fue cerrado hasta Noviembre de 1968, con el fin de tomar muestras de gas para ser analizadas.

Para identificar la proporción de gas que penetra en la chimenea se realizaron una serie de tres pruebas de flujo de 30 días cada una, con menores proporciones sucesivamente, pero con una presión constante siendo sostenida, - esto se inició en Noviembre de 1968.

A continuación se realizó una prueba de producción con una duración de 7 meses, con una presión en el fondo del pozo aún más baja, el pozo se puso a producir con un gasto de  $24.32 \text{ MM m}^3/\text{D}$ ; sin embargo, fue necesario reducir el gasto periódicamente para mantener constante la presión de la chimenea.

El valor final de flujo fué de  $9.91 \text{ MM m}^3/\text{D}$ , después del primer período de prueba que fue de 30 días, la presión de la chimenea se redujo de  $60.88$  a  $50.48 \text{ Kg/cm}^2$ , - produciendo  $.1415 \text{ MM m}^3/\text{D}$  durante 5 días.

La proporción de flujo a inicios de la segunda prueba fué de  $16\ 989 \text{ m}^3/\text{D}$  y esta proporción se redujo a  $14\ 158 \text{ m}^3/\text{D}$  cerca del final del segundo período; sin embargo la presión de la chimenea continuó disminuyendo hasta llegar a una cifra final de  $49.14 \text{ Kg/cm}^2$ .

Al producir cerca de  $.113\ 264 \text{ MM m}^3/\text{D}$  durante 7 días, la presión de la chimenea disminuyó entonces a  $36.41 \text{ Kg/cm}^2$ , después de estos 7 días, se inició el tercer período de pruebas de 30 días, con una proporción de flujo de  $11\ 326 \text{ m}^3/\text{D}$  cerca del final de la prueba, con una presión final de la chimenea de  $35.71 \text{ Kg/cm}^2$ , en Febrero de 1969.

La cifra de producción se incrementó para bajar -

la presión de la chimenea a  $19.40 \text{ Kg/cm}^2$ , y en Marzo de 1969 se inició un largo período de pruebas de producción con una duración de 7 meses aproximadamente.

Una proporción inicial de flujo de  $14\ 158 \text{ m}^3/\text{D}$  se estableció como un esfuerzo por mantener una presión constante en la chimenea de  $19.40 \text{ Kg/cm}^2$  la cifra de proporción de flujo fué reducida gradualmente a  $4\ 530 \text{ m}^3/\text{D}$  en Junio de 1969.

Esta producción continuó hasta Agosto de 1969, fecha en la que se incrementó a  $4\ 995 \text{ m}^3/\text{D}$  y esta proporción se mantuvo hasta Octubre del mismo año, cuando se bajó a  $4\ 530 \text{ m}^3/\text{D}$ . La presión de la chimenea se conservó inicialmente constante en  $19.40 \text{ Kg/cm}^2$  durante esta prueba.

En Octubre de 1969, empezó el agotamiento definitivo, después de que  $8\ 070 \text{ m}^3/\text{D}$  de gas (incluyendo no hidrocarburos) se hubieran producido.

Para inicio de la prueba posterior al disparo, se midió una presión final en la chimenea de  $9.63 \text{ Kg/cm}^2$  en Noviembre de 1969.

El GB - ER se volvió a perforar para así tener un largo período de levantamiento de presión. Las gráficas 5-A hasta 50 nos presentan la información del desarrollo de los pozos del proyecto Gasbuggy durante estas pruebas de producción.

El GB - 2RS y un nuevo pozo ( el GB-3 ), que se terminó de perforar en Septiembre de 1969, fueron usados -

para monitorear, las presiones durante las pruebas del -  
GB -ER.

Estos pozos, por su proximidad a la chimenea añadieron valiosa información sobre el comportamiento de la -  
presión muy cerca de la chimenea.

MM m<sup>3</sup>/D : Millones de metros cúbicos por día

M m<sup>3</sup>/D : Miles de metros cúbicos por día

m<sup>3</sup>/D : Metros cúbicos por día

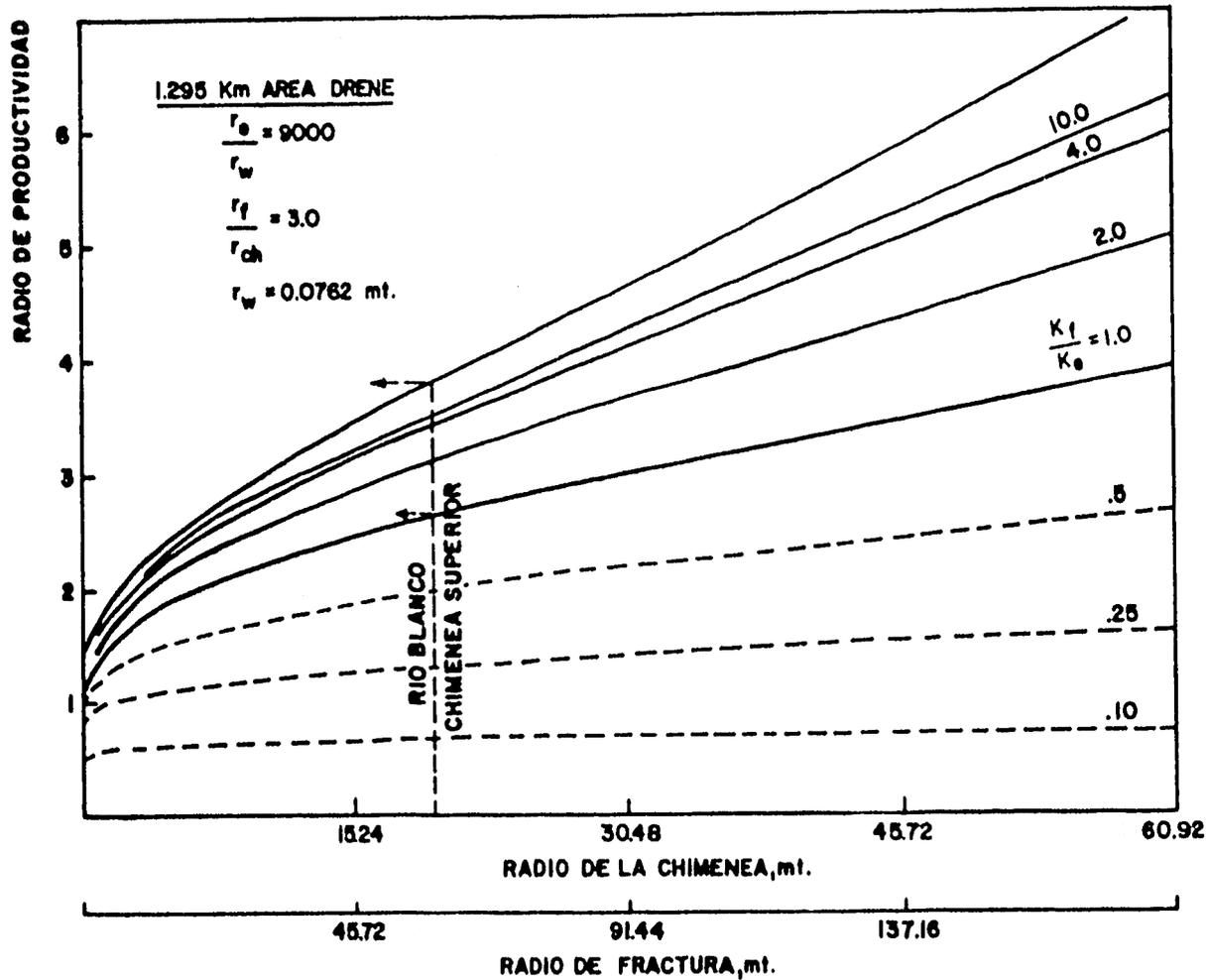


Figura 4 Relacion de productividad como una funcion de la alteracion de la permeabilidad en la zona fracturada circunvecina de la chimenea.

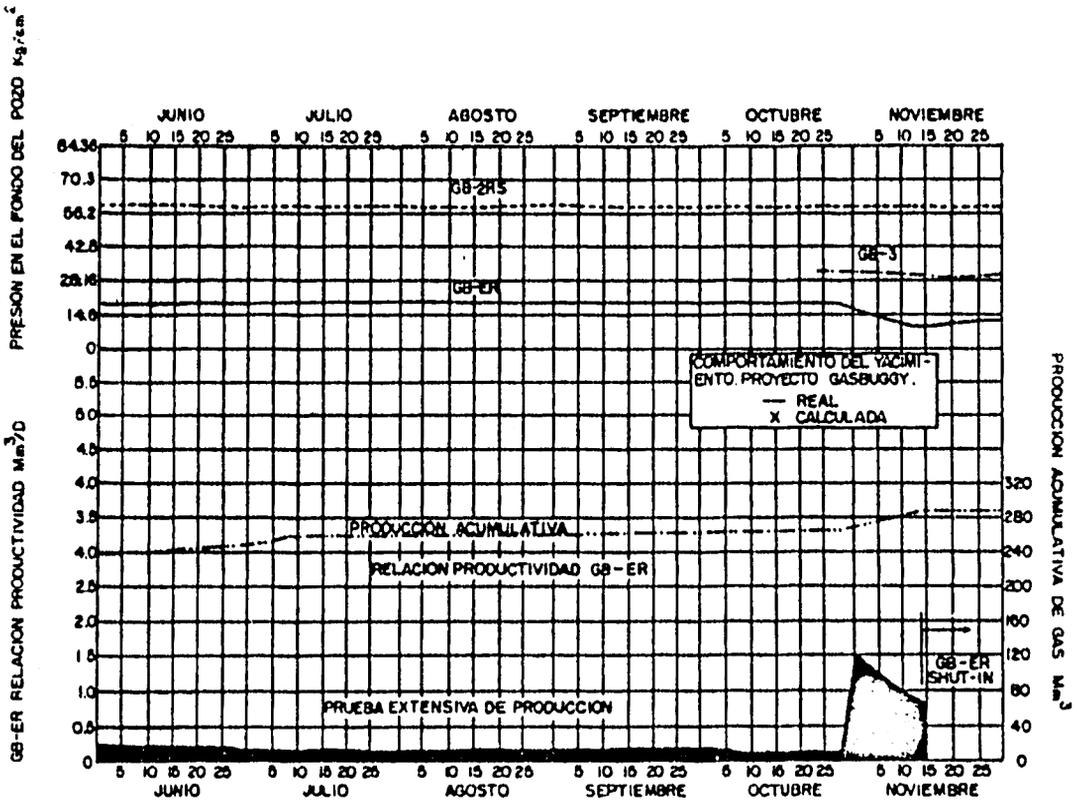


Fig. 5A - Desarrollo de las pruebas de Producción durante los meses de Junio a Noviembre, 1969.

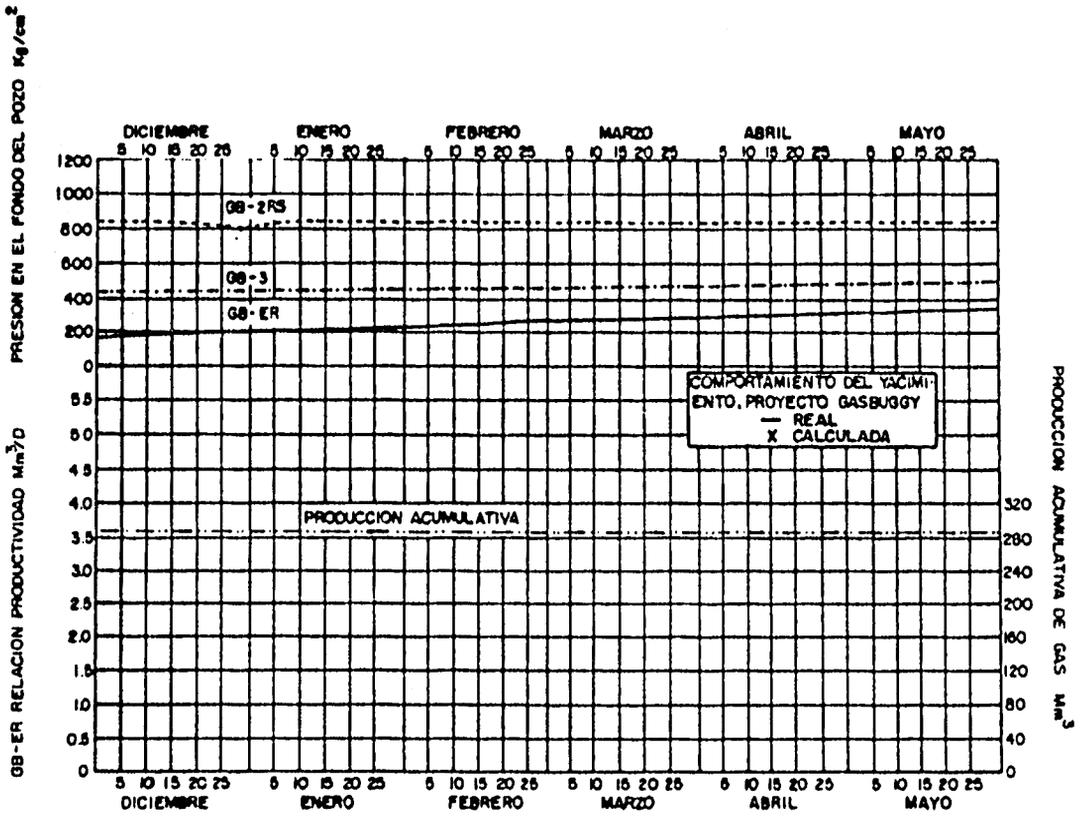


Fig. 5B - Desarrollo de las pruebas de Produccion durante los meses de Dic de 1969 a Mayo 1970

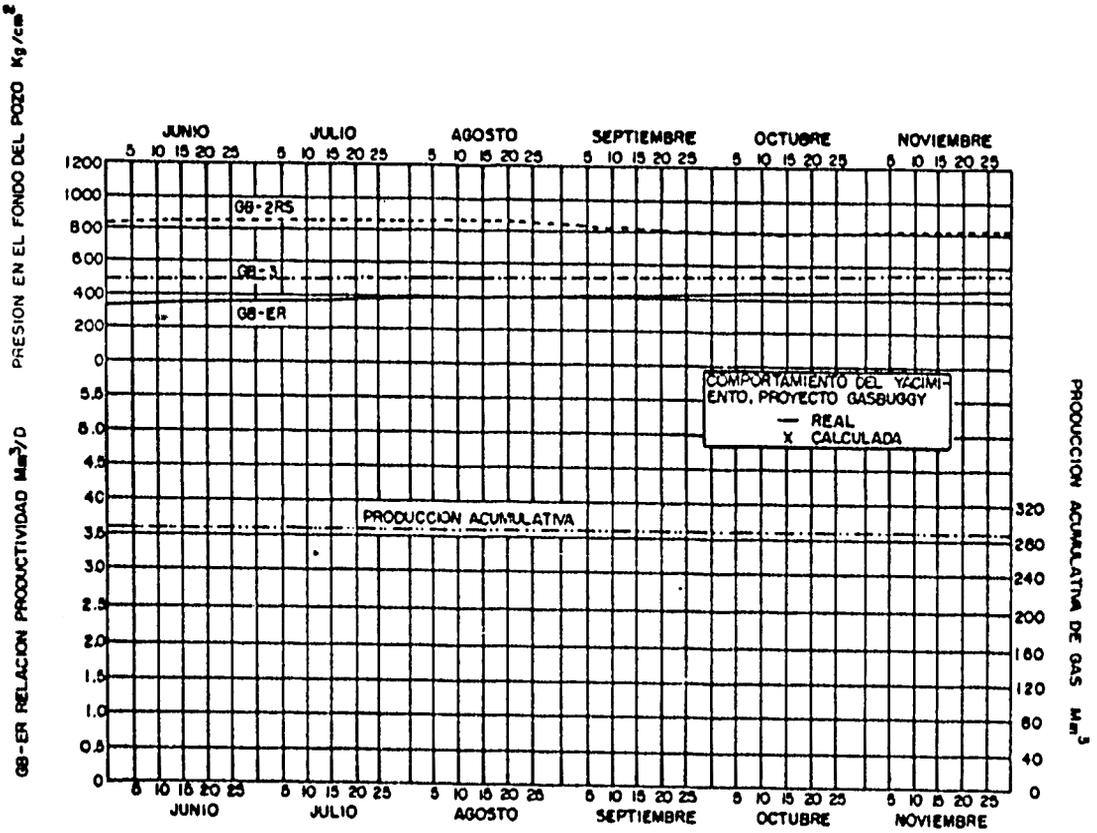


Fig. 5C - Desarrollo de las pruebas de Produccion durante los meses de Junio a Noviembre de 1970

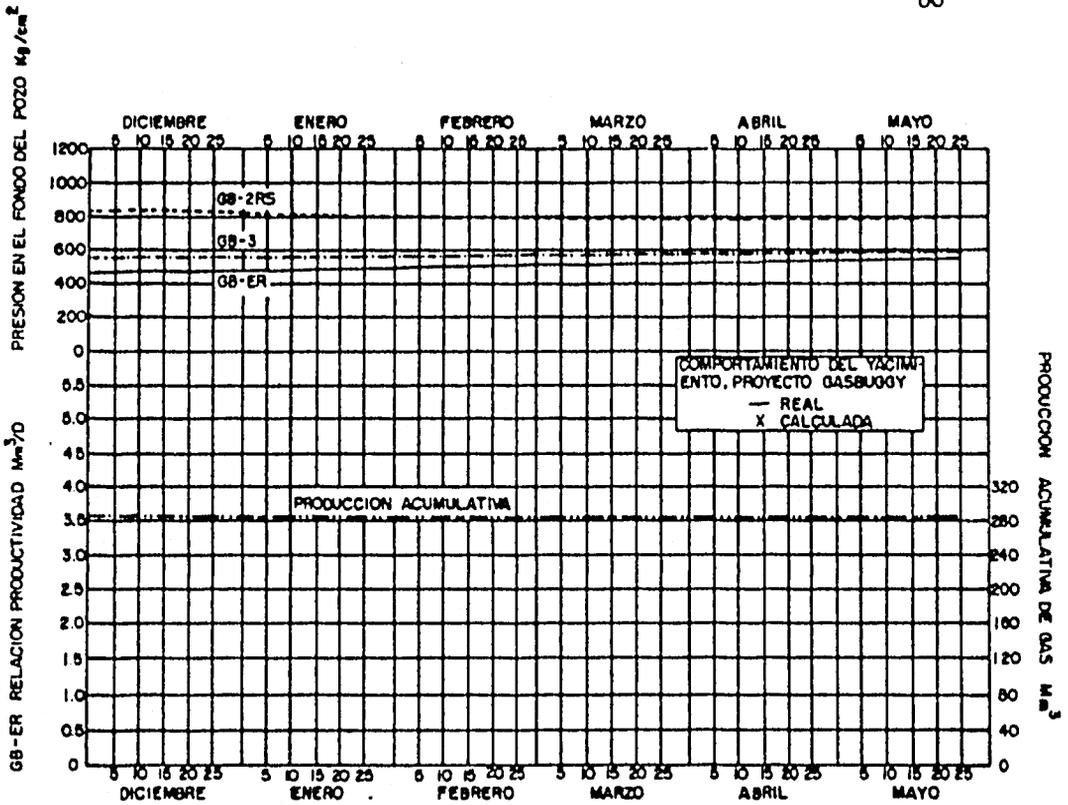


Fig5D - Desarrollo de las pruebas de Produccion durante los meses de Dic.de 1970, a Mayo, 1971

## CAPITULO VI

Radioactividad Remanente en los Hidrocarburos que se Produ  
cen

La Ingeniería Petrolera deberá lograr un control-cuidadoso de la contaminación radioactiva. Hasta ahora, el programa de investigación del gobierno de los E.U. comprenden de más de 300 disparos nucleares.

Estos se han llevado a cabo sin peligro para nadie y sin efecto alguno en la vida vegetal, animal o en el agua de la zona en donde se realizan dichos experimentos.

De hecho para un campo hogar que es ocupado por más de 200 empleados localizado en Mercury, Nevada. Que es un sitio de investigación proviene de los pozos de French-Man Flap, sitio de numerosas pruebas nucleares.

Los principales contaminantes de una explosión nuclear son: El cesio, Estroncio, Iódo, Criptón y el Tritio- que son los productos derivados de la escisión.

De estos a los que más se les teme son: El Cesio,- Estroncio y el Iodo.

En el empleo de los explosivos nucleares el Cesio y el Estroncio son atrapados en la roca solidificada del fondo de la chimenea y nunca volverá a saberse de ellos.

Los tres restantes son gases y deberan ser trata-

dos y controlado su manejo; el Iodo tiene una media vida - corta de 8 días en cuyo caso es necesario solamente esperar que transcurra dicho tiempo. El Criptón y el Tritio - pueden manejarse fácilmente por dilución o atrapamiento.

La radiación por lo tanto, no es un gran problema, que no pueda ser controlado por la ingeniería nuclear si - se tiene un control adecuado.

Las estimulaciones nucleares en los yacimientos - de rocas areniscas de muy baja permeabilidad, prometen un - progreso inicial hacia el empleo de los explosivos nuclea - res.

El proyecto Gasbuggy fue un experimento de 26 ki - loton es, que demostró que los niveles de radiación fueron menores de lo esperado. En el proyecto Rulison se utilizó - una carga de 40 kilotonnes.

Los niveles de radiación están cinco veces abajo - de los niveles del proyecto Gasbuggy y el gas se encuentra en cantidades comerciales.

En la tabla # 3 podemos observar la composición - del gas contenido en la formación Pictured Cliffs antes - del disparo que constituye el flujo de gas de la formación hacia la chimenea creada nuclearmente, también nos propor - ciona un análisis representativo realizado en diferentes - períodos durante las pruebas de producción.

En tres años de pruebas (después del disparo) más

de 200 metros cúbicos de gas fueron analizados, el contenido de no Hidrocarburos varía desde 48% poco después del disparo nuclear, hasta el 11% al final del largo período de las pruebas de producción, 17 meses después.

Se asumió que las muestras de gas del GB-ER en un determinado tiempo era representativa del gas contenido en la chimenea en ese momento, y que el flujo de gas de la formación de la chimenea tenía la misma composición que la que tenía el gas en la formación antes del disparo nuclear.

La formación Pictured Cliffs, de aproximadamente 92 m. de espesor fué analizada por medio del corte de núcleos en los pozos GB-1 y GB-2 y el GB-3. Los resultados del análisis de las muestras de los núcleos tomados del GB-1 y GB-2 se compararon favorablemente y se consideró que eran representativas del yacimiento.

## MEJORAMIENTO EN EL DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS NUCLEARES

Una novedad, son la serie de artefactos nucleares llamada Diamond ha sido diseñado por la Administración de desarrollo y reservas de Energía (anteriormente llamada Comisión de Energía Atómica AEC) específicamente para la aplicación en el programa Plowshare. El diseño del artefacto es diferente del estandar; este artefacto tiene únicamente 7.8 pg de diámetro, incluyendo la carga de refrigeración y produce mucho menos cantidades de Tritium residual que los artefactos usados en los proyectos Gasbuggy y Rulison.

Por ejemplo el Tritium residual total que se tenía en cada detonación nuclear de los proyectos Gasbuggy, Rulison y Río Blanco, era estimulado en 40 000, 10 000 y 1000 curies (Ci) respectivamente.

Unicamente al rededor del 5% del Tritium total se encontraría contenido en la fase gaseosa, el 40 % se estimaba, sería atrapado en la roca fundida y alrededor del 55% estaría contenido en el agua.

El pequeño diámetro del explosivo usado en el último experimento ayuda a reducir los costos normales, considerando el costo de las barrenas y tubería de revestimiento, usados en estos proyectos.

Una comparación de estos y otros datos de los tres experimentos de fracturamiento con explosivos nucleares es mostrado en la tabla # 4.

El costo del artefacto Diamond no ha sido todavía revelado, lo que hace suponer que el costo de este no sería menor que el costo de los artefactos nucleares proyectados por la Comisión de Energía Atómica hace 14 años, con un rango de \$ 350 000.00 para una carga de un rendimiento de 10 kilotones y de \$ 600 000.00 para una carga de un megatón.

TABLA N° 3.- COMPOSICION DEL GAS DEL GB-ER (PROYECTO GASBUGGY) EN PORCENTAJE

	ANTES DEL DISPARO	PRUEBA DE PRODUCCION DE CORTO PLAZO, JUNIO 1968.	PRUEBA DE PRODUCCION 30 DIAS, NOV. 1968.	PRUEBA DE PRODUCCION EXTENSIVA FEBRERO, 1969.	FIN DE LA PRUEBA DE PRODUCCION EXTENSI- VA NOVIEMBRE, 1969.
BIOXIDO DE CARBONO	0.29	35.60	24.27	16.37	8.89
HIDROGENO	--	12.03	10.11	6.38	2.35
ACIDO SULFHIDRICO	--	0.11	0.02	0.04	0.02
NITROGENO	0.59	0.51	0.80	0.65	0.54
METANO	85.36	45.45	56.35	65.66	73.24
ETANO	7.40	4.83	5.30	6.03	7.20
PROPANO	4.00	0.95	1.93	2.86	4.41
i-BUTANO	0.75	0.19	0.39	0.58	0.86
n-BUTANO	0.94	0.16	0.41	0.69	1.18
i-PENTANO	0.29	0.05	0.12	0.22	0.39
n-PENTANO	0.20	0.03	0.08	0.16	0.29
HEXANO	0.18	0.09	0.22	0.36	0.63
VALOR DE CALENTAMIENTO (BTu/cu ft)	1.178	588	790	938	1 112
PESO ESPECIFICO	0.673	0.890	0.808	0.776	0.768

TABLA # 4.- COMPARACION DE LA CANTIDAD DE TRITIUM PRODUCIDA EN LOS PROYECTOS  
GAS BUGGY , RULISON Y RIO BLANCO

	<u>GAS BUGGY</u>	<u>RULISON</u>	<u>RIO BLANCO</u>
TRITIUM TOTAL PRODUCIDO	40 000	10 000	1000
Peso del artefacto (Kg)	9080 Kg.	681 Kg.	—
Long. de la caja del artefacto (mt)	9.18 mt.	4.53 mt.	—
Rendimiento del artefacto (kt)	29 <sup>+</sup> <sub>-</sub> 3	43 + 8 —	de detonaciones simultáneas de 30 kt. cada una.

## CAPITULO VII

Estados Actuales de los Proyectos de Estimulación Nuclear

De los avances de los tres proyectos de fracturamiento con explosivos nucleares, puede decirse que: (1) - Las predicciones con respecto al tamaño de la cavidad y a los efectos físicos dentro de ellas fueron mejoradas antes de la detonación nuclear. (2) Que la cantidad de Tritium residual que se ha obtenido de todas las pruebas de estimulación nuclear, desde el Proyecto Gasbuggy hasta el Proyecto Río Blanco se redujo debido al nuevo artefacto Diamond; y tal vez la más importante. (3) En los tres casos existe una manifiesta discrepancia entre estos, en cuanto a la evaluación del yacimiento antes de la detonación y las características del yacimiento determinadas después de haber realizado dichas pruebas.

Los dos primeros enunciados son bastante positivos; sin embargo la gran discrepancia entre la evaluación de la formación antes y después del disparo merece una inspección final minuciosa.

En el caso del Proyecto Gasbuggy, es factible un estudio de la estimación del promedio diario de producción (a través de 20 años) de alrededor de  $14.158 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/D comparado con o en contraste de 37.25 Kg/cm<sup>2</sup> de presión que se tienen en el sistema de recolección. Estas estimaciones están basadas en la capacidad de flujo de la formación de 7.62 milidarcys mt ( md- mt ), en un sistema de fractura " consecutiva " y un explosivo nuclear más pequeño que en la actualidad se está utilizando.

Cuatro meses después de la producción inicial se sigue manteniendo el gasto de producción que es menor al promedio que se predijo para los 20 años y la presión en el fondo del agujero (BHP) es menor en 42.1942 Kg/cm<sup>2</sup> y continúa bajando. La mejor estimación de flujo de gas de la formación hacia la chimenea fué de aproximadamente de  $1.84 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{D}$  para una presión en la chimenea de 35.153-Kg/cm<sup>3</sup>.

En estas circunstancias parece que la permeabilidad de la matriz de la roca fué sobreestimada. Los datos de los análisis hechos a núcleos, muestran una permeabilidad promedio de alrededor de 0.1 md, en tanto que los datos de la presión obtenidas y los datos de producción de la chimenea nos indican que la permeabilidad de la formación es del orden de .0001 o igual de baja.

Una tendencia similar puede ser observada en el proyecto Rulison; en este caso la permeabilidad de la formación antes del disparo fué estimada primero en 0.5 md y luego en 0.01 md. En tanto los datos de producción y los estudios de la simulación del yacimiento hechos después del disparo indican que la permeabilidad de la matriz posteriormente era de aproximadamente 0.001 a 0.04 md.

Igualmente interesante es el grado de incertidumbre en la estimación del espesor neto efectivo expuesto, que fué considerado en un caso de 60.96 mt y el otro única mente de 22.86 mt ambos estudios se hicieron después de las pruebas de producción preliminares.

En realidad, la evaluación de las formaciones - productoras de muy baja permeabilidad es siempre muy difícil cultosa.

En el proyecto Río Blanco se confirma a sobre - estimar las propiedades del yacimiento antes de realizarse la prueba. De acuerdo con la factibilidad del estudio, el pozo estimulado (con tres detonaciones simultáneas de 30 Kt de explosivos) podría producir gas natural con un - gasto de producción de  $2.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{D}$  durante 1.2 años, - declinando esta a  $5.66 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{D}$  después de 25 años; la - recuperación esperada en el período de 25 años es estima - da en  $7.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ . La más reciente estimación de la pro - ducción acumulativa del gas durante los 25 años de la chi - menea superior del Proyecto Río Blanco es de  $3.11 \times 10^8 - \text{m}^3$ . Este corresponde al promedio de producción diario de -  $3.39 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{D}$ .

Una vez que se obtuvieron resultados inespera - dos del Proyecto Río Blanco, del conocimiento de la re - gión fracturada con los explosivos y después de las prue - bas de producción, lo que se descubrió es que no existía - comunicación con las regiones fracturadas con los explosi - vos localizadas más abajo.

Diversas evaluaciones independientes son hechas antes de la detonación basadas en el corte de núcleos, en la corridas de registros y pruebas de flujo hechas en los pozos.

Dentro del intervalo estimulado por la explo - sión nuclear superior, la capacidad del yacimiento se en - cuentra entre un rango de 1.24 a 2.31 md mt.

La realización de las pruebas de incremento y - decremento de presión indicaron que la capacidad de la - formación era de únicamente de 0.73 md la cual es 6 ó 10- veces menor que el esperado. La capacidad de la formación en la región estimulada por el explosivo del fondo, parece ser mucho mejor que las estimaciones hechas antes de - la detonación; todos los análisis del yacimiento muestra - ban un valor de alrededor de .3048 md - mt comparado con el 0.152 md - mt determinado de los datos de producción.

En términos de permeabilidad, las regiones esti - muladas en la parte superior e inferior del yacimiento - con explosivos tenían anteriormente permeabilidades de al - rededor de 20 y 1.9 microdarcys respectivamente, una muy - baja permeabilidad con respecto a las que se presentan - normalmente.

Los datos de estimaciones potenciales de gastos de producción de gas y de recuperaciones totales tienen - una variación de consideración, revelando esto la gran in - certidumbre de las propiedades del yacimiento y de las - del gas de este lugar.

Por ejemplo en 1970 un estudio de los efectos - de la estimulación pronosticaron en el sitio del Proyecto Rulison recuperación acumulativa de gas en un período de - 25 años de 1.302 a  $2.26 \times 10^8 \text{ m}^3$  con un gasto promedio de producción de 1.415 a  $2.548 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{D}$ .

Cinco años más tarde otro estudio compara los - efectos de las tres estimulaciones nucleares y concluyó - que en 50 años la producción acumulativa de los Proyectos Gasbuggy, Rulison y la chimenea superior del proyecto Río Blanco sería una cantidad de  $.424 \times 10^8$  a  $2.548 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{D}$  (figura # 6).

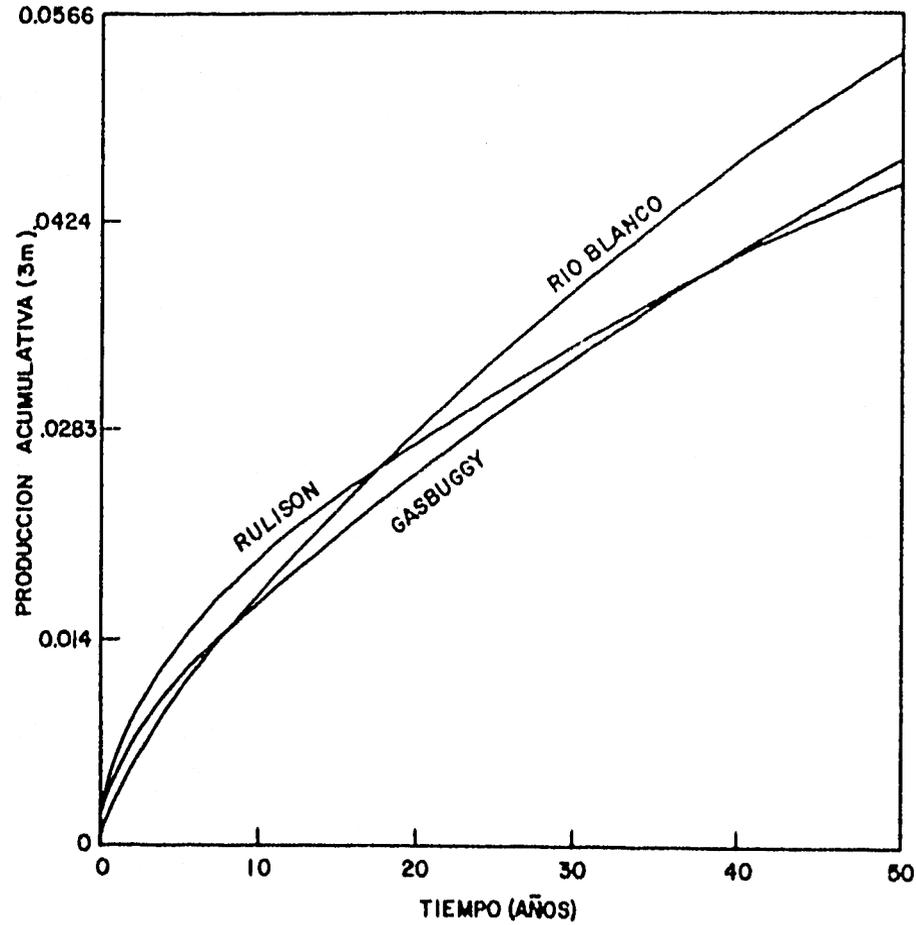


Figura 6 .— Comparación de la producción de gas de los proyectos Gasbuggy, Rulison, y la chimenea superior del proyecto Rio Blanco.

## CAPITULO VIII

LIMITACIONES DE LA TECNOLOGIA ACTUAL

Los mayores efectos del fracturamiento con explosivos nucleares quedarán dentro del rango de predicciones hechas antes de la detonación, salvo dos notables explosiones.

(1) La primera es una aparente gran discrepancia entre la evaluación de la formación o yacimiento antes del disparo y las características del yacimiento determinadas de las pruebas de producción efectuadas recientemente en la zona donde se hicieron los tres experimentos de fracturamiento con explosivos nucleares, y (2) la falta de comunicación entre las chimeneas del proyecto Río Blanco inesperada.

La falta de comunicación entre las chimeneas del proyecto Río Blanco puede ser una característica de las detonaciones simultáneas y, como, tal, la solución de esta falta de comunicación no representa un gran problema; en el caso de un plan secuencial de detonaciones no se tiene buenos resultados en la intercomunicación de las chimeneas. De gran importancia es el hecho de que las pruebas de producción en los otros experimentos dieron como resultado una reevaluación de las propiedades básicas del yacimiento.

Las formaciones de muy baja permeabilidad difieren grandemente de las formaciones normales. Esto puede variar, de un extremo a otro, de zonas de gas separados

de espesores uniformes y prolongados de lado a lado, con grandes porciones que tienen numerosas zonas lenticulares dentro y fuera a lo largo de la sección. Esta secuencia geológica está en muchos casos, compuesta fundamentalmente de arcillas y lutitas con algunas zonas de areniscas, de tal manera que se vuelve difícil distinguir la zona comercial. Además, estas zonas comerciales pueden tener un rango de porosidad menor del 5 por ciento a mayor del 15 por ciento y la saturación de agua inmóvil o congénita con un rango del 50 al 70%.

La permeabilidad del gas en el yacimiento tiene un rango menor que 1 microdarcy a unos cuantos milidar cys, que puede ser de 1 a 3 órdenes de magnitud más baja que el de un yacimiento de aceite y gas ordinario.

Un número de interrogantes fundamentales relacionados con las características de los yacimientos tienen que ser todavía solucionados. Desgraciadamente, los registros hacen menos clara que lo deseado la naturaleza de las formaciones.

Los mayores problemas de esta área son la determinación de la saturación de gas, la estimulación de la zona comercial neta, y la permeabilidad original de la formación. La exactitud de las mediciones del yacimiento, temperatura, presión y porosidad se presentan razonablemente adecuadas.

Otro gran problema del área es la calibración de la información obtenida por los registros y las mediciones finales hechas en el laboratorio de los núcleos,

en las pruebas de formación, tales como las pruebas de incremento y decremento de presión. Los registros y el análisis de los núcleos siguen siendo las bases sobre las - cuales la evaluación de las formaciones se basa. Muchos - de los principios básicos usados en los análisis de los - núcleos actuales son iguales a los que originalmente fueron establecidos y no se han hecho cambios materialmente desde entonces. Algunas de estas técnicas están sujetas a rigurosas limitaciones. Como puede mostrarse en numerosas investigaciones de laboratorio, en las formaciones de areniscas de bajísima permeabilidad, la permeabilidad depende principalmente de la presión de confinamiento y de la saturación de agua como se muestra en la figura # 7.

Estas características son bien conocidas hoy en día por las personas que trabajan en la investigación, pero esta tecnología no ha sido transferida adecuadamente - para todo el personal de servicio de las compañías quienes miden la permeabilidad en el laboratorio o a muchos - otros usuarios de sus servicios.

La reducción en la permeabilidad es muy importante en las formaciones de baja permeabilidad. De acuerdo con las condiciones del yacimiento representativas de una formación de muy baja permeabilidad, al inicio de la vida productiva, la permeabilidad efectiva es cerca de -  $1/20$  de la que ha sido medida por un método estandarizado de la industria del gas, realizando mediciones a baja presión en núcleos secos. Por ejemplo: un análisis convencional de cerca de 200 núcleos del proyecto Gasbuggy daba - una permeabilidad inicial del gas de 0.16 md. en núcleos secos y un promedio de saturación de agua del 48 %.

Si la corrección es hecha con la presión de sobre carga original de 3000 psi \* (Fig. # 7) el factor de reducción resulta para la presión de sobrecarga y la saturación de agua es de 0.25 y 0.2, respectivamente.

El factor de reducción de la permeabilidad total es en este caso de 0.05, así la permeabilidad que se tuvo no fue de 0.16 sino de 0.008 md.

La estimulación más reciente, casualmente com - para más favorablemente la permeabilidad del yacimiento - con la obtenida de las pruebas de producción, la cual fue aproximadamente de 0.01 md.

Otras importantes cuestiones aún requieren ser contestadas, tales como el agua producida con el gas - (por lo general se tienen mayores gastos que los esperados) que se encuentra uniformemente distribuida en los poros que están ocupados por el gas, principalmente en el - desarrollo de áreas longitudinales con ausencia de gas o con una saturación de gas inferior a la crítica, o en la producción extensas de agua de las Lutitas.

\* La presión de la sobre carga de presión es igual a -  
210.92 Kg/cm<sup>2</sup>

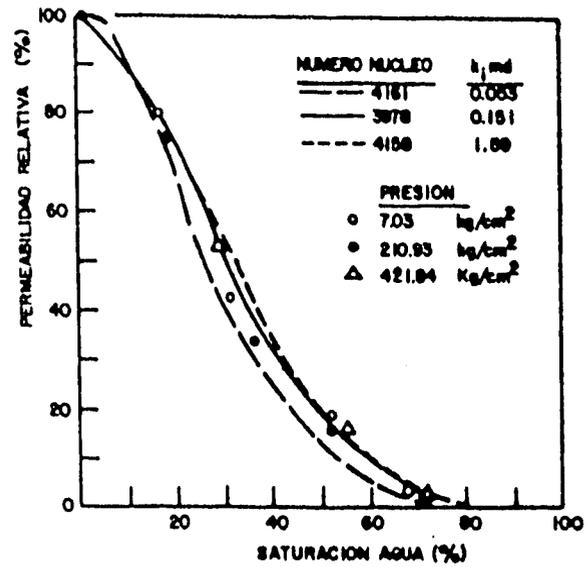
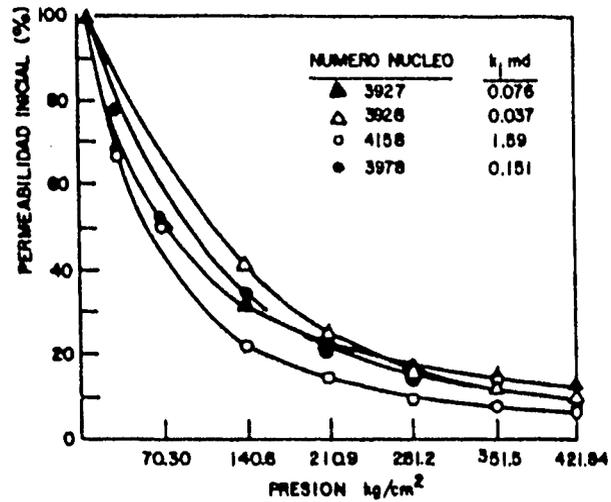


Figura. 7 La permeabilidad del yacimiento es una función de la presión de confinamiento y de la saturación de agua.

## CAPITULO IX

ACEPTACION PUBLICA

Además de los aspectos técnicos del fractura - miento con explosivos nucleares, la aceptación pública de la tecnología, es igualmente importante. Esta nunca ha si do favorable y, de hecho, una publicidad reciente parece haber creado nuevos celos. Por ejemplo, el proyecto Ru - lison, experimentó numerosos retrasos causados por las - protestas de varios grupos de protección ecológica y del - medio ambiente.

Si estas acciones provienen de la inhabilidad - del público para discernir la diferencia entre el armamen tismo nuclear y el fracturamiento de pozos de gas con ex - plosivos nucleares, es inmaterial; cualquier compañía que contemple el fracturamiento con explosivos nucleares en - este tiempo enfrentará una oposición increíble de varios - grupos y del público en general. El cuadro económico ac - tualmente desfavorable del fracturamiento con explosivos - nucleares no es soportable, el temor del público ofendido es probablemente otra razón, porque las mayores compañías petroleras no se han comprometido con la teconología de - fracturamiento con explosivos nucleares. Tal vez algunas - compañías pequeñas pueden haber contado con ser la van - guardia de la teconología moderna, y resultar en la publi - cidad favorable.

La magnitud de los problemas que los responsa - bles de los proyectos deben afrontar están ejemplificados por las leyes ambientales preparadas para el proyecto -

Wagon Whell que fueron diseñados para una última prueba - que involucra cinco explosivos nucleares para ser puestos secuencialmente. El proyecto fué finalmente cancelado.

### OBSERVACIONES CONCLUYENTES

La situación de la tecnología del fracturamiento con explosivos nucleares parece estar en la posición inevitable de tener problemas técnicos, económicos y políticos.

Los problemas técnicos, que son fundamentales, no son insuperables.

Un progreso definitivo ha sido hecho desde la primera aplicación de fracturamiento de pozos con explosivos nucleares y más está por venir, particularmente con respecto a la mejor definición y el entendimiento de las formaciones ultradelgadas. Los problemas mayores parecen estar en la seguridad de la determinación de la permeabilidad del gas que saturó el yacimiento, y la estimación de la zona neta económica.

Aún no se puede considerar que los proyectos de fracturamiento con explosivos nucleares no tengan una proyección futura, estos aspectos son determinados con mucha atención en unión con la aplicación del fracturamiento hidráulico masivo.

Los aspectos económicos fueron relacionados estrechamente para tener éxito en la solución de problemas técnicos. Muchos estudios económicos factibles fueron realizados y, aún cuando con estas estén en desacuerdo, los fracturamientos con explosivos nucleares pueden considerarse desde el punto de vista económico realizables. Estu

dios realizados por personas directamente implicadas en - la aplicación de esta tecnología, está dirigida indudablemente hacia la mayor optimización que aquellos hechos por evaluaciones independientes.

El clima político parece plantear el único gran impedimento en este tiempo y no presentan mejoras que puedan ser consideradas en un futuro cercano. La aceptaciónpública de esta tecnología, es menos decadente y declinante; sino todo lo contrario, es muy importante y parece - que hay esperanzas de que en un futuro cercano esta tecnología sea empleada.

Lo que es además manifiesto es que el uso de - los explosivos nucleares requieren de cambios legales y - políticos. Consecuencias políticas imponen que el desarrollo de campos de gas de baja permeabilidad se hagan es - fuerzos por mejorar las tecnologías convencionales, tal - como el fracturamiento hidráulico masivo.

## C O N C L U S I O N E S

Es necesario que el público deje de pensar, cuando se habla de energía nuclear, en la guerra o en los artefactos bélicos. Los progresos científicos y técnicos son, en esta época, tan rápidos que es ya una realidad la aplicación pacífica de esta energía.

Muchos científicos han dirigido su atención hacia las posibilidades de utilizar los explosivos nucleares o termonucleares en la ejecución de proyectos industriales y de ingeniería. Por otra parte, en varios países están haciéndose investigaciones para gobernar a voluntad una explosión termonuclear a fin de aplicar la energía liberada, utilizando los sistemas de transformación usuales.

La importancia del descubrimiento de las reacciones termonucleares o de fusión estriba en el hecho de que con este descubrimiento el hombre cuenta ahora con una nueva fuente de energía barata y casi inextinguible.

El empleo de la energía nuclear en un futuro próximo tendrá influencia sobre el problema de abastecimiento de agua. Este problema es de los más gudos en México. En muchos casos el agua de la lluvia escurre sobre terrenos poco permeables y se precipita hacia torrentes y ríos que finalmente van a dar al mar.

Se ha pensado que una explosión nuclear puede crear "chimeneas" como sucedió en el experimento Rainier, que permitan conducir el agua hacia depósitos subterráneos. Tales conductos, situados estratégicamente, pueden-

ayudar a la conservación del agua.

Una técnica similar se puede seguir para comunicar dos acuíferos; es posible, en determinadas circunstancias, ayudar a cargar uno de ellos o bien si hay un yacimiento petrolero cerca, se puede crear de esa manera un empuje hidráulico que ayude a la explotación del mismo.

Hay otras aplicaciones de la energía nuclear a la ingeniería, que son perfectamente factibles.

Los efectos de los experimentos efectuados a la fecha permiten asegurar que la energía nuclear puede usarse con ventaja en muchos proyectos industriales o de ingeniería.

Se cuenta con una fuente casi inextinguible de energía; el origen de esta energía es la fusión nuclear, cuyo principal ingrediente es el deuterio. Se ha descubierto ya un procedimiento barato para aislar el deuterio del hidrógeno natural.

En el campo de la explotación petrolera, se sabe que una detonación nuclear es capaz de inducir, por el choque una desintegración molecular y dar origen a productos ligeros. Además, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos ha hecho experimentos.

Estos experimentos proporcionaron información muy valiosa, relativa a la extracción del petróleo, principalmente del que se encuentra en arenas y lutitas bituminosas.

La aplicación de estas ideas en México parecen-  
lejanas a primera vista, pero hay que tener presente, que  
los cambios y el progreso actuales son rápidos. La Indus-  
tria Petrolera Mexicana está alerta.

MODELO DE FLUJO DE LA CHIMENEA

La ecuación diferencial parcial para el flujo transitorio de la fase gaseosa es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (vPr)}{\partial r} = \rho \frac{\partial P}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

se utilizó para la integración el rango:

$$r_0 = r = r_e \dots\dots\dots(2)$$

La velocidad en esta ecuación es proporcionada por la relación de Darcy

$$v = \frac{K(U)}{\mu(p)} \frac{dP}{dr} \dots\dots\dots(3)$$

que considera a la presión sujeta a la velocidad y a la distancia sujeta a la permeabilidad.

La variable de la permeabilidad se obtiene con:

$$K(U) = K_i K_o(U) \dots\dots\dots(4)$$

en la que  $K_i$  es la permeabilidad promedio antes de la detonación nuclear.

La densidad en la ecuación (1), contiene el factor de compresibilidad sujeto a la presión (P).

Los factores de compresibilidad del gas fueron calculados utilizando una correlación basada en la gravedad específica del gas, la viscosidad se obtiene por medio de las correlaciones de Lee que se encuentran basadas en el peso molecular y en la compresibilidad del gas.

Las integrales se desarrollaron utilizando derivadas finitas de cinco términos y métodos implícitos de computación como lo describe Eilerts.

Las observaciones reportadas por el investigador Boardman de varios experimentos nucleares subterráneos así como la respuesta inmediata de la presión en los pozos de los proyectos Gasbuggy, Rulison y Río Blanco llevaron a la conclusión de que la permeabilidad en la chimenea era infinita.

Esta suposición fue hecha con el objeto de calcular el valor de flujo de la formación hacia la chimenea.

Por lo tanto se supone:

$$\left. \frac{dP}{dr} \right|_t = 0 \quad \text{para } r \neq r_o$$

VALORES DE FLUJO DE LA FORMACION

Los valores de producción de gas en el pozo son una combinación de la evaluación del gas en la chimenea y la evaluación del gas en la formación

$$q_t = q_c + q_f \dots\dots\dots(E - 1)$$

La proporción en la que se acumula el gas o se produce de la chimenea en pequeños intervalos de tiempo  $\Delta t$  se determina o es determinado por el volumen de la chimenea y el cambio de la presión y la temperatura en la misma.

Esta relación la representa la ecuación:

$$q_c \Big|_n = \frac{A (B-C)}{\Delta t} \dots\dots\dots(E - 2)$$

Donde:

$$A = \left[ \frac{V_c}{z \beta T_c} \right]_{n-1} \quad B = \left[ \frac{P_c}{z P_c T_c} \right]_{n-1} \quad C = \left[ \frac{P_c}{z P_o T_c} \right]_{n-1}$$

La evaluación total de la producción del gas en el cabezal del pozo durante pequeños cambios de tiempo es:

$$q_t \Big|_n = \frac{((G_p)_n - (G_p)_{n-1})}{\Delta t} \dots\dots\dots(E - 3)$$

Sustituyendo las ecuaciones E - 2 y E - 3 en la ecuación E - 1 y reacomodando - esta tenemos:

$$q_f \Big|_n = \left[ \frac{((G_p)_n - (G_p)_{n-1}) - A(B-C)}{\Delta t} \right] \dots \dots \dots (E - 4)$$

Como anteriormente se dijo, independientemente del tamaño de la chimenea y de la permeabilidad de la región que se ha estimulado, el gas deberá fluir finalmente hacia la chimenea desde el área de drenaje del pozo.

Por lo tanto, la permeabilidad de la formación antes del disparo es un factor altamente crítico en el cálculo anticipado de la recuperación de los yacimientos estimulados nuclearmente.

#### NOMENCLATURA

- $G_p$  = Producción acumulativa de gas
- $K$  = Permeabilidad
- $P$  = Presión
- $q$  = Proporción de flujo
- $r$  = RADIO
- $V_c$  = Volumen de la chimenea
- $P_c$  = Presión de la chimenea
- $T_c$  = Temperatura de la chimenea
- $\Delta t$  = Intervalo de tiempo
- $q_c$  = gasto de la chimenea
- $q_f$  = gasto de la formación
- $q_t$  = gasto total
- $z$  = factor de desviación del gas

## APENDICE # 2

El gas liberado por la chimenea nuclear depende en gran escala de la capacidad que tengan las formaciones que circundan la chimenea de permitir el flujo hacia ésta.

La descripción matemática del flujo del gas hacia la chimenea es considerado con un tratamiento detallado, con un rango muy complejo de soluciones para la comparativamente simple "Ley de Darcy" para el flujo radial. Aún la suposición básica del flujo radial ha sido discutida enfáticamente. Esto es palpable cuándo se elabora en una forma muy pequeña cualquier modelo más complejo de lo que es necesario en este tiempo. Por lo tanto, el flujo radial de Darcy es supuesto.

El efecto de la estimulación de una explosión nuclear es más fácilmente estimado sobre la base de un mejoramiento en la producción relativa de un pozo con respecto a la de un pozo estimulado normalmente.

El término de relación de productividad o de relación de estimulación es comúnmente usado para las mismas comparaciones. Con la suposición de flujo radial, la relación de productividad puede ser calculada de una manera normal.

Ya que la chimenea es básicamente como un gran pozo, entonces estas aportaciones pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$PR = \frac{\text{Ln } r_e/r_w}{\text{Ln } r_e/r_{cn}} \quad (1)$$

Donde:

PR = Relación de Productividad     $r_{ch}$  = Radios de la chimenea

$r_w$  = Radios normales del pozo (ft)     $r_e$  = Radio externo de drenaje

Las soluciones de esta ecuación para varios intervalos de pozos se muestran en la figura # 4.

La contribución de la zona fracturada puede ser considerada un término de incremento en la permeabilidad de la formación o nuevos agrandamientos en las paredes de los pozos para tener "radios efectivos", los cuales se combinan con la chimenea y el radio de la zona afectada. Predicciones exactas del efecto de la zona fracturada sobre la productividad de un pozo son casi imposibles ya que la distribución de las fracturas, sus características de flujo y la influencia de cierre y/o del cierre de las fracturas sin apoyo, no se puede conocer cuantitativamente; sin embargo, aunque no en forma muy específica, esta consideración es posible para el mejoramiento de la zona fracturada en términos de la permeabilidad, al relacionarla con la formación inalterada. La modificación de la expresión (1) incluye a la zona fracturada y a los resultados de las permeabilidades promedio mejoradas y esta es:

$r_f$  = radio de la zona fracturada (ft)

$k_e$  = permeabilidad natural de la formación (md)

$k_f$  = permeabilidad de la zona fracturada (md)

La contribución de la zona fracturada hacia la chimenea es ilustrada en la fig. # 3.

Estudios actuales de los proyectos Gasbuggy, Rulison, Río Blanco y una apreciación del fracturamiento potencial de las formaciones con explosivos nucleares en un futuro cercano.

Un reciente estudio de la fuerza Tecnológica - del gas natural de la Comisión Federal de Fuerza estima - que, en la formación localizada en el área de las monta - ñas Rocallosas Rocky existe una reserva de hidrocarburos - (gas natural) de alrededor de  $600 \times 10^{12}$  ft<sup>3</sup> de gas.

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

- (1) National Academy of Sciences, The National Research -  
Council, Natural Gas from Unconventional Geologic -  
Sources, Washington, D.C., 1976.
- (2) Project Gasbuggy -- El paso NGC, USAEC, USBM, and LRL,  
El paso, Texas, May 14, 1965.
- (3) Lemon, R.F. and Patel, H.J., The Effect of Nuclear -  
Stimulation on Formation Permeability and Gas Recove-  
ry at Project Gasbuggy, SPE paper No. 3624, October -  
1971.
- (4) Reynolds, M. Jr., Bray, B.G., and Mann, R.L., Project  
Rulison: A Status Report, SPE paper No. 3191, presen-  
ted at SPE meeting in Pittsburgh, PA., November 5-6,-  
1975.
- (5) U.S. Atomic Energy Commission, Río Blanco, Gas Stimu-  
lation Project, Environmental Statement, WASH - 1519,  
April 1972.
- (6) DeGloyer and McNaughton, Report on Interpretation of-  
Test Data from Project Rulison in Rulison Field, Gar -  
field County, Colorado, December 1971.
- (7) Elkins, Lincoln F., An Interpretation of Gasbuggy, -  
Journal Petroleum Technology, June 1968.

- (8) Elkins, Lloyd E., The Role of Massive Hidraulic Fracturing in Exploiting Very Tight Gas Deposits, Natural Gas from Unconventional Geologic Sources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1976, 127-141.
- (9) Thomas, R.D. and Ward, D.C., Effect of Overburden Pressure and Water Saturation on Gas Permeability of Tight Sandstone Cores, Journal of Petroleum Technology, February 1972.
- (10) Fatt, I. and Davis, T.H., The Reduction in Permeability With Overburden Pressure, Trans. AIME, 1952
- (11) U.S. Atomic Energy Commission, Wagon Wheel Gas Stimulation Project, Environmental Statement, WASH - 1524, April 1972.
- (12) Suman, G.O., Sand Control, World Oil, June 1975 (figures reproduced from Mattox and Clothier).
- (13) Toman, J., Production Test Data and Preliminary Analysis of Top Chimney/Cavity (Project Río Blanco), Nuclear Technology, December 1975, 692-704.
- (14) MaLatchie, L.S. Hemstock, R.A. and Young, S.W., Effective Compressibility of Reservoir Rocks and Its Effects on Permeability, Trans. AIME, 1958.
- (15) David D. Rabb, Effects of nuclear Explosions on Gas Well Head and Gas field Equipment, University of California, September 1965.

Referencias Bibliográficas

1. Mitchell, F.R., Robinson, J.D., Vogiatzis, J.P., Pehoushek, F., Moran, J.H., Ausburn, R.F., and Berry, L.N.: (Usando mediciones de Resistencia para determinar la Distancia entre los Posos) "Using Resistivity Measurements to Determine Distance Between Wells", J. Pet. Tech. (June, 1972) 723-740.
2. Lee, E.L., Horning, H.C., and Kury, J.W.: (Expansión Adiabática de Productos de Detonación Altamente Explosivos) "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products", UCRL-50422, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, Calif. (1968).
3. Reynolds, M., Jr., Bray, B.G., and Mann, R.L.: (Proyecto Rulison Un reporte preliminar) "Projet Rulison: A Preliminary Report", Conf. 700101, Symposium on Engineering with Nuclear Explosives American Nuclear Soc. (1970) 1, 597-626.
4. Robinson, J.D. and Vogiatzis, J.D.: (Métodos Magnetostáticos para Estimar la Distancia y Dirección del Pozo Auxiliar al Pozo Cerrado) "Magnetostatic Methods for Estimating Distance and Direction from a Relief Well to a Cased Wellbore", J. Pet. Tech. (June, 1972) 741-749.
6. (Investigación de Posibles Usos de Explosiones Nucleares con Propósitos Pacíficos dentro de la Economía Nacional de la Unión Soviética) "Survey of Possible Uses

- of Nuclear Explosions for Peaceful Purposes Within -  
the National Economy of the Soviet Union", paper pre -  
sented at General Conference of the International At-  
omic Energy Agency, Vienna (Sept., 1970).
6. Wilkins, M.L. : (Cálculo de Flujo Elástico-Plástico) -  
"Calculation of Elastic-Plastic Flow", Methods of Com-  
putational Physics, B. Alder, S. Fernbach, and M. Ro -  
ttenberg, Eds., Academic Press, New York (1964) 3.