

CONSULTORES Y CONTRATISTAS DE EXPLORACIONES GEOFISICAS

•

**PETROLEO
MINERALES
AGUA SUBTERRANEA
Y
APLICACION A LA INGENIERIA CIVIL**

•

SERVICIOS GEOFISICOS, S. A. DE C. V.

AV. JUAREZ 97 DESPACHO 302

TELS. - 18 - 41 - 41 Y 12 - 89 - 70

MEXICO 1, D. F.

GEOFISICOS CONSULTORES PARA PETROLEOS MEXICANOS



*Seismograph Service Corporation
of Mexico*

AVE. JUAREZ 95 - 207 • MEXICO I, D.F.
TELEFONOS : 18-27-25 • 18-56-33

SUBSIDIARIA DE
SEISMOGRAPH SERVICE CORPORATION
6200 East 41st St. • Box 1590 • Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

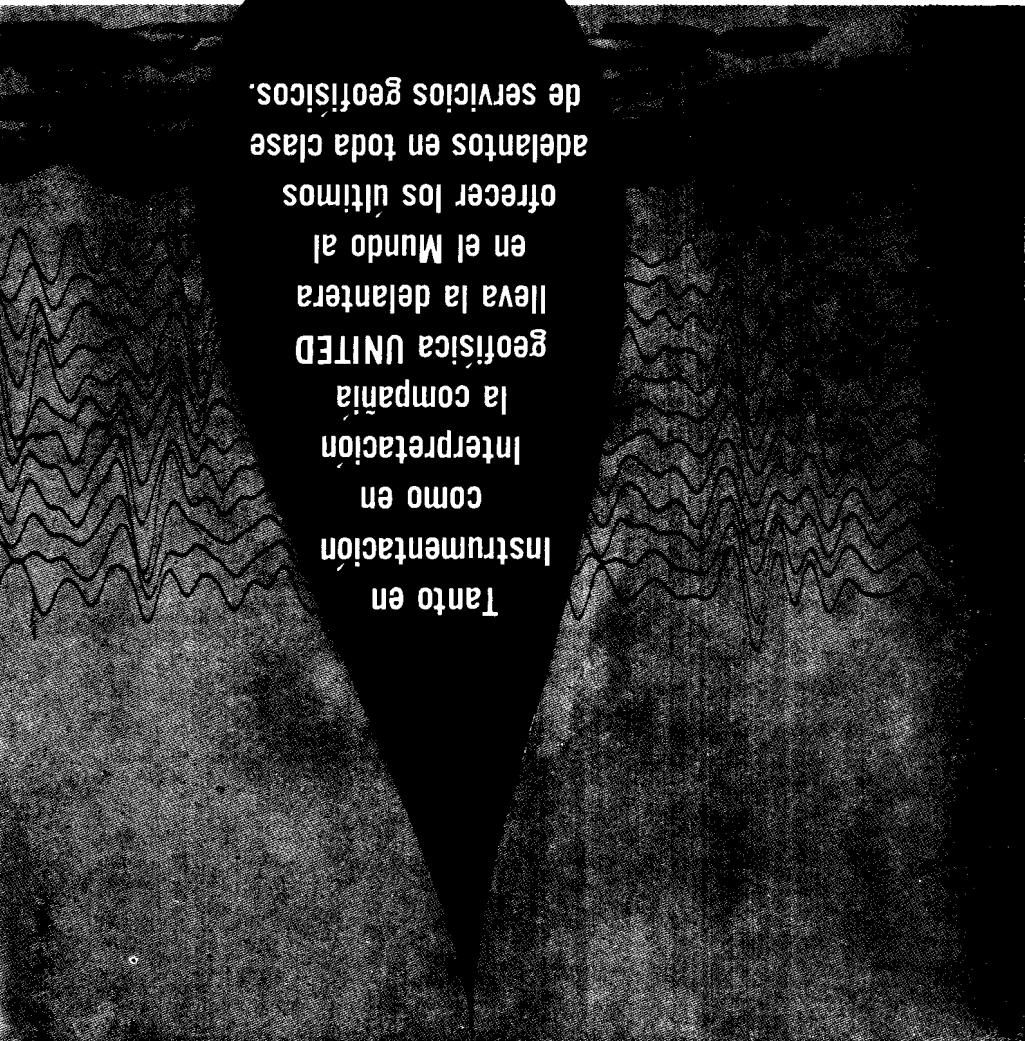
ESPECIALIZADOS EN :

SERVICIO DE GEOFISICA

- Levantamientos :
- Sismológicos
 - Gravimétricos
 - Magnetométricos
 - Procesado de Datos Magnéticos
 - LORAC - Levantamiento Electrónico

SERVICIO DE REGISTRO DE POZOS

- Registros para Evaluación de Formaciones
- Registros de Pozos de Producción
- Servicio de Terminación Permanente
- Registro Continuo de Velocidad



UNITED GEOPHYSICAL CORPORATION



Tanto en
Instrumentación
como en
interpretación
la compañía
geofísica UNITED
leva la delantera
en el Mundo al
ofrecer los últimos
adelantos en toda clase
de servicios geofísicos.

P. O. Box M, 2650 E. Foothill Blvd., Pasadena, California
194 Rue de Rivoal, Paris 16^e, France
Av. Paseo, Vargas, 435, 10^o piso, Rio de Janeiro, Brazil
Calle 36 D, Puerto Arenas, Magallanes, Chile
Av. Pedro Meirano 9, General Rocca, Provincia de Río Negro, Argentina
P.O. Box 288, Tropicana, Libyo
P.O. Box 999 M, Brisbane, Australia
P.O. Box 289, Swan City, Nigeria
Calle Tíidana No. 140, Los Pinos, Gran Canaria, Islas Canarias
345 M, Lebowan Blvd., Princeton Rd., Colorado
1700 Broadway, Room 504, Denver 2, Colorado
5902 E. 16th Street, Tulsa, Oklahoma
1702 Petroleum Life Bldg., Oklahoma City, Oklahoma
1908 Library Park Bldg., Oklahoma City, Oklahoma
Houston 2, Texas
Suite 1803, Bank of the Southwest Bldg., 900 Travis St.
P.O. Box 1861, Anchorage, Alaska
Suite 8, 34 Sixth Ave., S.W., Calgary, Alberta, Canada
Avda. Generalissimo, 53-5^o Bis, Madrid 16, Spain

Carlos Alemán S.A.

EXPLORACION

y

PERFORACION

Iturbide No. 36 Desp. 201. Tel. 10-15-64

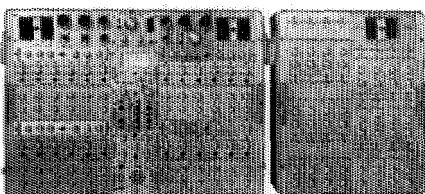
MEXICO 1, D. F.

SIE entregará el sistema sísmico Número 1000 durante el año

Durante este año la SIE producirá y entregará el unmil sistema sísmico que ha fabricado desde que la compañía empezó a operar hace 18 años. Nadie sabe cuál sistema será el #1000 debido a que los records del pasado no están completos, por lo tanto es posible que el total ya haya pasado 1000 unidades.

Lo importante es que SIE se mantiene al frente en el ramo de instrumentos sísmicos. La calidad superior y la mejora continua del rendimiento de los instrumentos de la SIE ha sido gran influencia en el establecimiento de muchos de los conceptos que hoy día existen en instrumentos sísmicos. Entre los "primeros" de SIE, se encuentran:

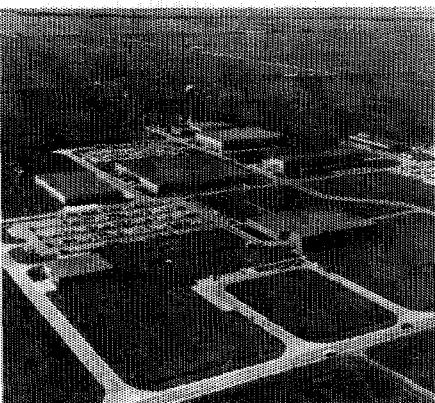
1. El sistema P-11, completamente portátil, integrable e independiente.
2. MR-4—el primer sistema de registro magnético FM (frecuencia modulada) aceptado por la industria.
3. PMR-6—el primer sistema portátil del registro magnético.
4. MS-12—el primer sistema para reducir datos sísmicos y procesar las cintas AM y FM.
5. PMR-20—el primer sistema portátil de registro magnético FM completamente transistorizado.
6. PT-100 con GCU-3—el primer sistema sísmico transistorizado, libre de distorsión, que incorpora medios para controlar el programa de ganancia.
7. TRO-6—la primera cámara registradora transistorizada capaz de proveer cinco tipos distintos de presentaciones, con un solo banco de galvanómetros.



PT-100—sistema amplificador transistorizado libre de distorsión.

La mayor parte de los geofísicos consideran los instrumentos sísmicos de SIE "el standard de la industria." La producción corriente de SIE incluye una línea completa de registradores y analizadores sísmicos, capaz de acopiar los más vastos requisitos de exploración geofísica.

Investigaciones y desarrollo. En total, SIE ha invertido en investigaciones y desarrollo de instrumentos geofísicos desde el 1947 mas de dos millones de dólares. Actualmente hay 25 personas en el departamento de Ingeniería de SIE, las cuales representan 130 años total de experiencia en la compañía y 45 años total de experiencia en ingeniería geofísica.



CENTRO DE DRESSER ELECTRONICS EN LOS SUBURBIOS DE HOUSTON

Cuando quiera el mejor instrumento sísmico, ya sea de nuestra producción corriente, o de diseño especial para satisfacer cualquier problema especial, llame enseguida a la SIE, la compañía que ha establecido el "standard" desde hace 18 años. La dirección es DRESSER SIE, 10201 Westheimer Road (P. O. Box 36230), Houston 42, Texas. CABLE: SIECO HOUSTON. TELEX: 713 571 2412. Teléfonos: SUNset 2-2000, o directamente al Departamento de Geofísica SUNset 2-5749 (Ventas) y SUNset 2-2893 (Departamento de Servicio).

SCHLUMBERGER

SCHLUMBERGER SURENCO, S. A.

AGENCIA EN MEXICO

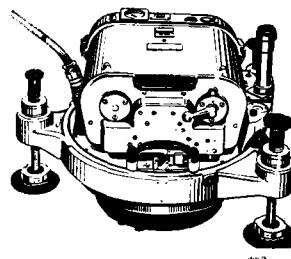
Av. Morelos 98, Desp. 306

Tels.: 46-85-25 y 46-13-85

MEXICO 6, D. F.

COMPAÑIA MEXICANA AEROFOTO, S. A.

**LOS SIGUIENTES ELEMENTOS RESPALDAN
NUESTROS 31 AÑOS DE OPERACION.**



EQUIPO DE RESTITUCION PARA PLANOS TOPOGRAFICOS:

- 1 Autógrafo WILD A-7
- 1 Autógrafo WILD A-8
- 1 Autógrafo WILD A-9
(Para fotografías granangulares
y supergranangulares)
- 4 Aviágrafos WILD B-8
- 3 Aparatos de Restitución KELSH
- 1 Múltiplex con 8 proyectores

- 1 Cámara fotogramétrica WILD RC-8
- 1 Cámara fotogramétrica WILD RC-9
- 1 Cámara supergranangular WILD RC-9
- 3 Cámaras fotogramétricas FAIRCHILD
- 1 Cámara fotogramétrica para fotografía
infra roja y a colores.

AVIONES DE ALTURA:

- F-15 Northrop, matrícula XB-FUJ
- Boeing B-17G, matrícula XB-BOE

Además equipo completo de laboratorio, mapas para mosaicos, fotografías panorámicas y fotografías
rectificadas de reproducción

120 empleados especializados en los distintos aspectos de la fotogrametría

DIRECCION:

Av. Obrero Mundial Núm. 338, Esq. con Pestalozzi
Teléfono: 43-38-30 con tres líneas directas

Méjico 12, D. F.

Douglas Dauntless, matrícula XB-QUC
North American, O-47-B matrícula
XB-YUW

AVIONES DE MEDIANA ALTURA:

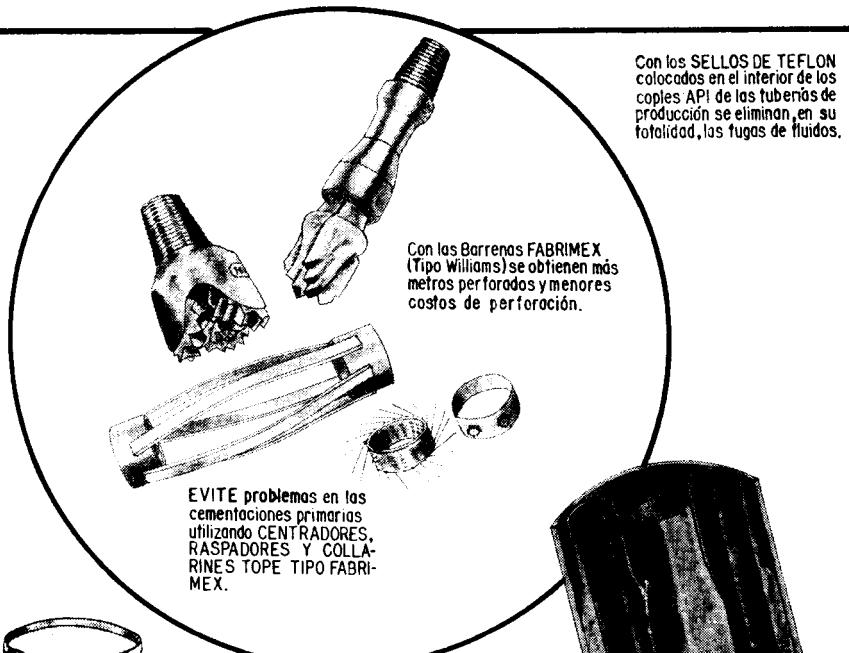
Strato Helio, matrícula XB-YOI
Beechcraft, matrícula XB-VIG
Beechcraft, matrícula XB-RAU
Cessna 190, matrícula XB-KUC

Talleres de Aviación y Hangares

Linderio Sur, Aeropuerto Central

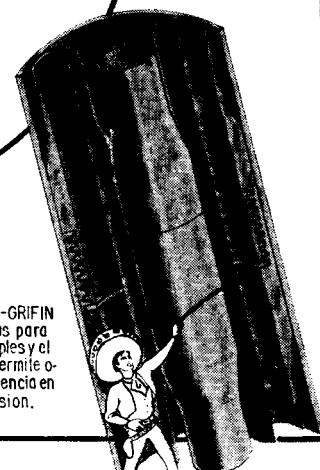
Tels.: 22-22-58 y 22-29-64

FABRIMEX, S. A. DE C.V.



Los PRODUCTOS QUÍMICOS FABRI-NUTRO son una garantía para evitar los problemas de corrosión, parafinamiento, incrustaciones de carbonatos, etc.

Los JUNTAS FABRI-GRIFIN "DS" están diseñados para terminaciones múltiples y el sello de teflón les permite operar con gran eficiencia en pozos de alta presión.



FABRICACION NACIONAL DE EQUIPO PARA LA INDUSTRIA PETROLERA

FCO. NOVOA N° 105 MEXICO 14 D.F. TELS: 17-44-10 17-73-51 17-93-79

SUCURSAL EN VERACRUZ Km.435 CARRETERA JALAPA VERACRUZ.

APARTADO POSTAL 659, VERACRUZ, VER.

ASOCIACION MEXICANA

DE

GEOFISICOS DE EXPLORACION

II-CONVENTION TECNICA NACIONAL

Tampico, Tamps.

Nov. 21, 22, 23 de 1963.

BOLETIN

de la

Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración

S U M A R I O

Efecto Direccional de las Cargas Distribuidas Linealmente y su Empleo en la Exploración Sísmica, por el
Ing. Daniel Gutiérrez.

El Acoplamiento de la Energía Explosiva a la Roca, por
R. Nicholls.

(Traducido por el *Ing. D. Gutiérrez*).

Método Gráfico para Analizar Registros de Velocidad,
por *C. R. Davis.*

(Traducido por el *Ing. Jorge R. Lazo*).

Nuevos Socios.

Contribuyentes.

ASOCIACION MEXICANA DE GEOFISICOS DE EXPLORACION

MESA DIRECTIVA PARA EL PERIODO 1963-1964

Presidente: Guillermo Hernández Moedano.

Vice-Presidente: Jesús Basurto García.

Secretario: Alfonso Cornejo Toledo.

Tesorero: Alfonso Hernández Osuna.

Vocal de Petróleo: Armando Eguía Huerta.

Vocal de Minas: Ernesto López Ramos.

Vocal de Ingeniería Civil: Enrique del Valle T.

Editor: Vladimir A. Olhovich.

Presidente Directivo Anterior: Santos Figueroa Huerta.

Este Boletín se publica cada tres meses y se distribuye gratuitamente a los socios.

El precio de suscripción para no socios es de \$ 150.00 m/n al año y
de \$ 50.00 m/n número suelto.

Para todo asunto relacionado con el Boletín: manuscritos, asuntos editoriales, suscripciones, descuentos especiales a bibliotecas públicas o de Universidades, publicaciones, anuncios, etc., dirigirse a:

ING. VLADIMIR A. OLHOVICH

Av. Juárez No. 97 Despacho 302.

Teléfonos 18-41-41 y 12-89-70

Méjico 1, D. F.

EFFECTO DIRECCIONAL DE LAS CARGAS DISTRIBUIDAS
LINEALMENTE Y SU EMPLEO EN LA
EXPLORACION SISMICA

Por el *Ing. D. Gutiérrez* *)

Resumen:

Se muestra que las cargas tienen propiedades direccionales bien marcadas, y que en cargas largas la explosión debe originarse en la parte superior para reducir la amplitud de reflejos fantasmas y para disminuir la energía que se propaga en el sentido horizontal.

También se muestra que es conveniente que la velocidad de explosión de la dinamita sea del orden del 80% de la velocidad de propagación de las ondas elásticas de la formación con que se produce la explosión, para evitar que gran parte de la energía se propague en el sentido horizontal.

Reflejos Fantasmas.

En la práctica de la exploración sísmica se ha observado que existe un tipo de reflexión múltiple que se origina en alguna discontinuidad elástica situada arriba del nivel del tiro, tal como la base de la capa de baja velocidad, o la superficie del terreno.

Esos reflejos han sido designados con el nombre específico de reflejos "secundarios" o "fantasmas". En la figura 1 se muestra la trayectoria seguida

* : Gerencia de Exploración, Petróleos Mexicanos.

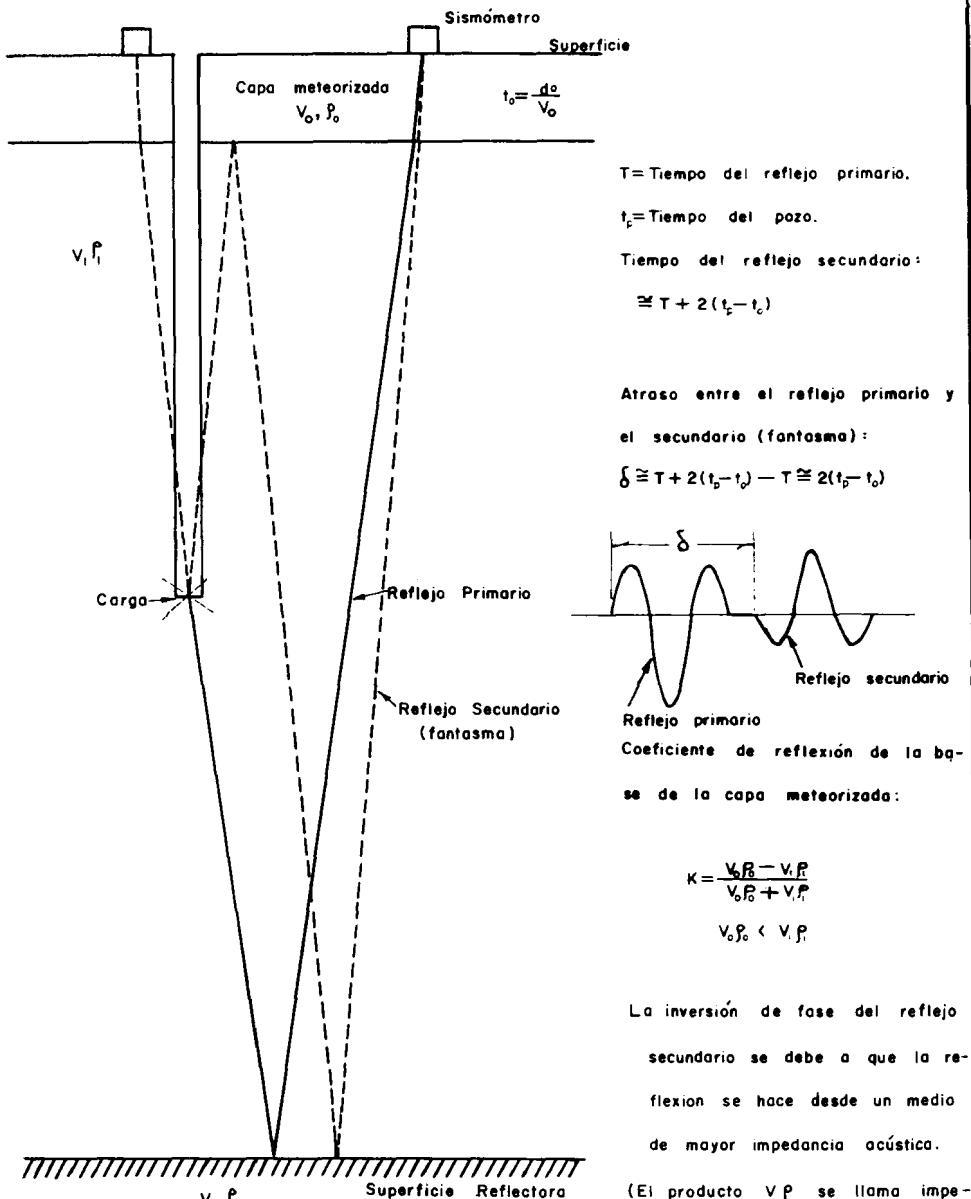
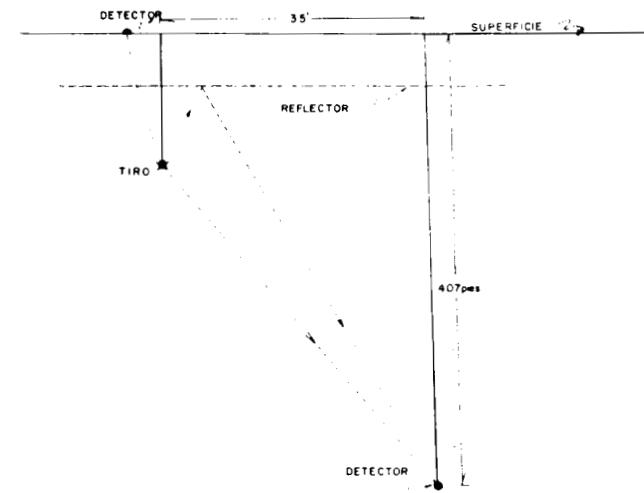
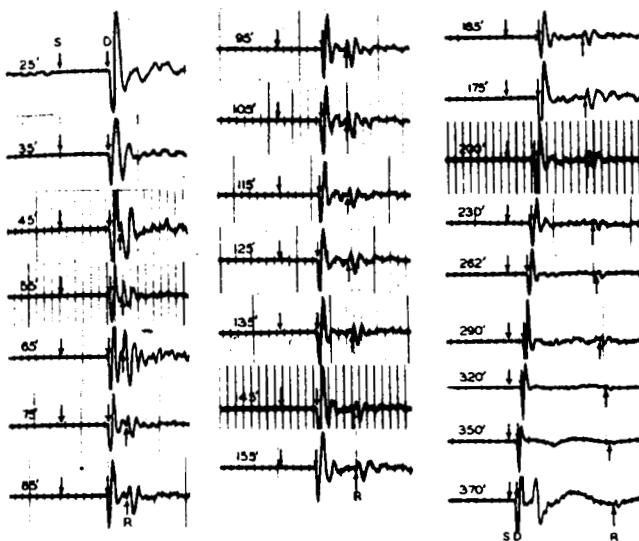


FIGURA I. RELACION ENTRE LOS REFLEJOS PRIMARIO Y SECUNDARIO



ARREGLO DE TIRO Y DETECTOR USADO POR VAN MELLE.



SEÑALES REGISTRADAS CON UN DETECTOR COLOCADO
DENTRO DE UN POZO A LA PROFUNDIDAD DE 407 PIES

S es la señal del tiro

D la señal directa

R la reflexión secundaria.

FIGURA 2. RESULTADOS DE UN EXPERIMENTO REALIZADO PARA DEMOSTRAR
LA PRESENCIA DE LOS REFLEJOS SECUNDARIOS ("FANTASMAS")

por un reflejo secundario en su viaje desde el punto de explosión a la base de la capa meteorizada, luego hacia un reflector profundo y de allí hacia la superficie. Para comparación, se muestra también la trayectoria del reflejo primario producido por el mismo reflector.

La diferencia entre los espacios recorridos es causa de un retraso entre los tiempos con que llegan los dos reflejos a la superficie del terreno.

Ese retraso vale aproximadamente $2(t_p - d/V)$, donde t_p es el tiempo del pozo, d es el espesor de la capa meteorizada, y V su velocidad. Se hace notar que hay una inversión de la fase del reflejo secundario debido a que ocurre la pérdida de media longitud de onda por realizarse la reflexión de la energía desde un medio de mayor hacia otro de menor impedancia acústica.

La existencia de los reflejos secundarios ha sido claramente demostrada en algunos experimentos que han sido descritos en la literatura publicada, tal como el realizado por Van Melle, y del cual se tomó la Figura 2.

En el diagrama de la parte superior de ella está indicada de manera esquemática la disposición de tiro y detector sísmico que fueron empleados por Van Melle.

Los sismogramas de la parte inferior fueron obtenidos con tiros pequeños a diferentes profundidades, notándose que a medida que aumentó la profundidad de los tiros creció el intervalo de tiempo entre las señales directa y reflejada, viéndose también con claridad la inversión de la onda inicial de esta última. En este experimento el reflector era la base de la capa meteorizada.

En la Figura 3, tomada de otra publicación, se muestra una serie de sismogramas que fueron obtenidos con tiros hechos a profundidades distintas en un mismo pozo.

En ella, los sismogramas fueron colocados de manera que los reflejos primarios aparecieran alineados.

Se nota que los reflejos secundarios, que están marcados con la letra G, convergen hacia los reflejos primarios a medida que se pasa desde los registros tomados con tiros profundos hacia los correspondientes a los tiros someros.

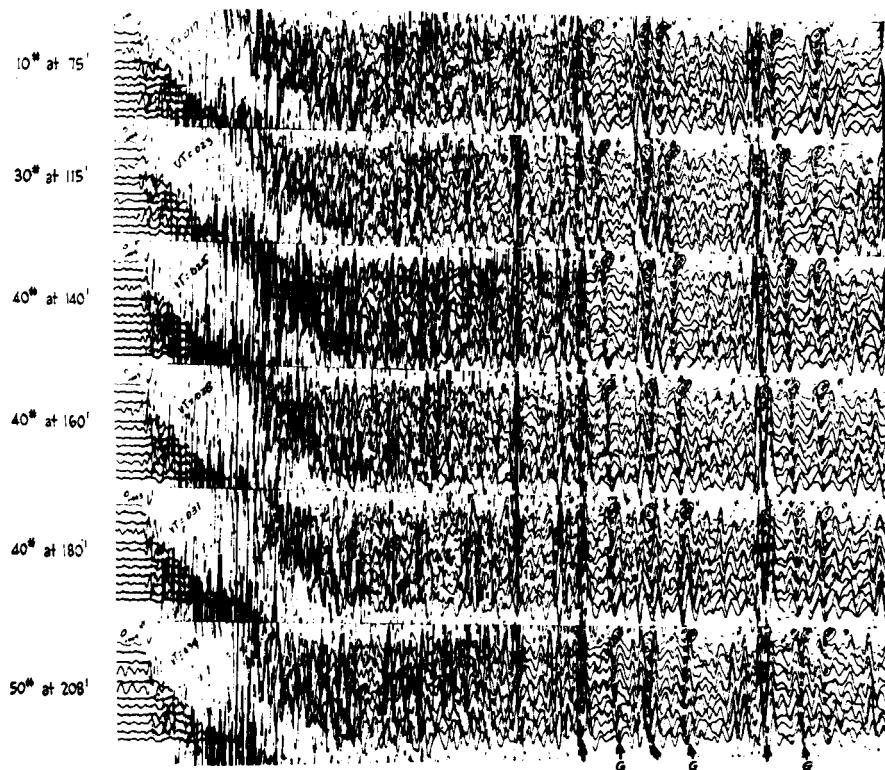


Figura 3.—Seis registros tomados de un mismo pozo a profundidades entre 75 y 208 pies. Puede verse que los reflejos secundarios convergen hacia los reflejos primarios a medida que se reduce la profundidad de los tiros. (Bibliografía 1).

Esta convergencia se debe a que el intervalo entre los reflejos primarios y secundarios se acorta al mismo tiempo que disminuye la profundidad del tiro, tal como era de esperarse, de acuerdo con el diagrama de la Figura 1.

En la Figura 4, también tomada de una publicación, se muestran un grupo de trazas de una serie de sismogramas que fueron obtenidos en diferentes puntos de una línea sísmica. Se observa claramente que el carácter del reflejo designado con la letra O es muy variable debido a que en unos registros fue reforzado y en otros distorsionado o muy debilitado por el reflejo fantasma que procedía del reflector D, situado un poco arriba en la columna geológica.

En la práctica de la exploración sísmica se presenta frecuentemente este tipo de reflejos múltiples, los cuales en muchos casos hacen difícil y a veces impiden hacer la correlación exacta de las fases de las ondas reflejadas, particularmente en los casos en que éstas provienen de horizontes reflejantes que se encuentran muy próximos unos de otros. Este problema ha estimulado la fabricación de dispositivos especiales que permitan aprovechar al máximo la propiedad direccional de las cargas distribuidas linealmente, según se describe adelante.

En el caso de las cargas distribuidas, al emitir éstas una mayor parte de la energía hacia abajo, se reduce la que viaja hacia arriba, lográndose de ese modo la utilización óptima de la energía liberada por la explosión, puesto que, como consecuencia, decrecen la amplitud de los reflejos fantasma y también la de las ondas superficiales.

En el presente trabajo se tratan, primero, la base teórica, y luego los resultados que se obtuvieron, mediante cálculo, sobre el efecto direccional de varios dispositivos de cargas distribuidas linealmente.

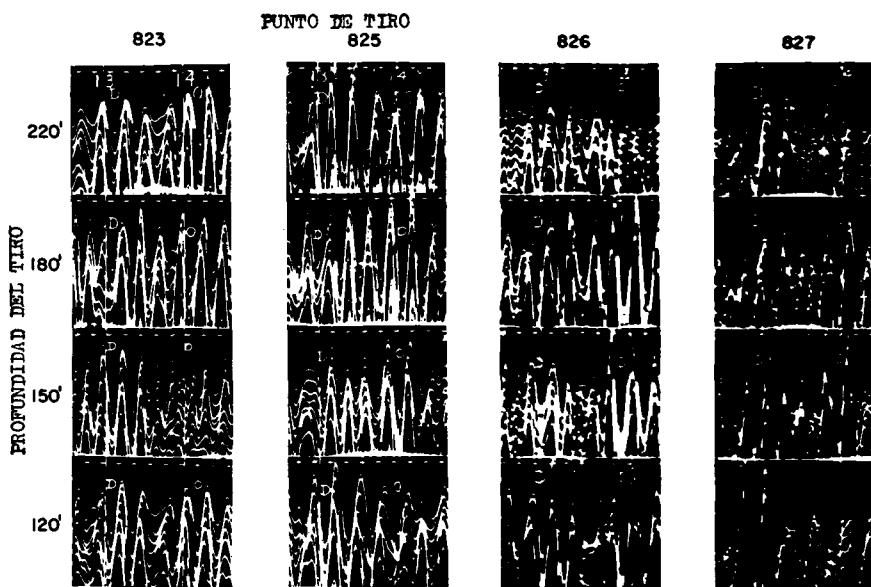


Figura 4.—Ejemplo del efecto de los reflejos secundarios sobre el carácter de los reflejos observados. (Bibliografía 3).

T E O R I A

Una carga de material explosivo colocada en un pozo puede considerarse como formada por una serie de pequeñas cargas situadas una a continuación de otra, que explotan con diferencias de tiempo que son iguales a la separación que existe entre cada elemento, dividida por la velocidad de detonación.

En la Figura 5 se muestra una columna explosiva que se ha supuesto formada por un número M de pequeñas cargas elementales espaciadas uniformemente la distancia ΔZ y situadas en una línea vertical. Se ha supuesto también que el medio que rodea a la carga es homogéneo e isótropo y que propaga la energía elástica con la velocidad V_f , mientras que la velocidad de detonación de la columna explosiva es V_e .

La explosión de cada una de las cargas elementales da origen a una onda elástica que, bajo la forma de un pulso transitorio cuya amplitud es función del tiempo, se propaga en todas direcciones a través del medio que rodea a la carga.

Suponiendo que la explosión se iniciara en la parte superior de la columna explosiva, cada una de las cargas detonaría a intervalos de tiempo $\Delta Z/V_e$; sin embargo, la explosión tendría lugar cada vez a mayor profundidad.

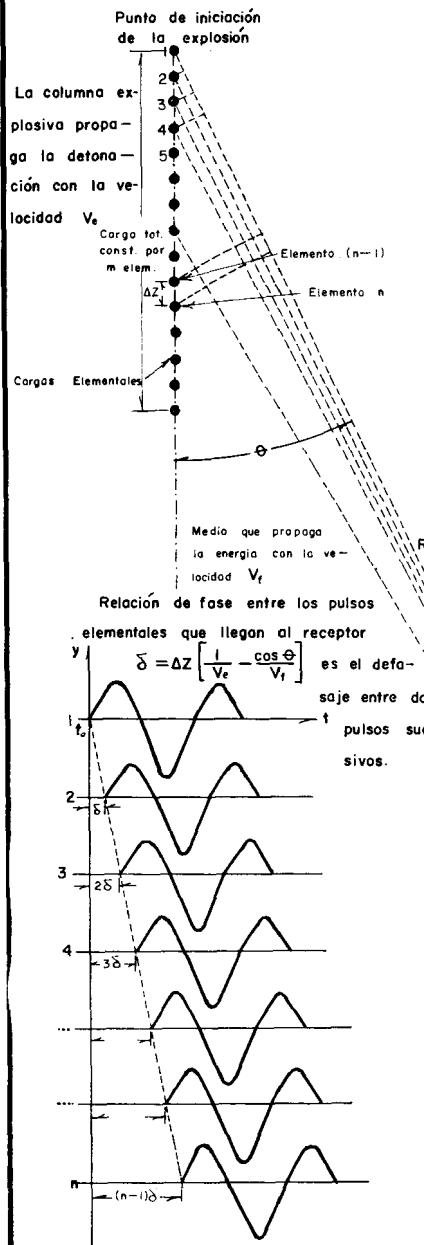
Imaginando que un detector sísmico estuviera situado en el punto que se indica en la Figura 5, a una distancia R suficientemente grande de la carga para que el ángulo Θ se pudiera suponer constante para todos los puntos de ella, el detector recibiría una sucesión de pulsos a intervalos de tiempo que valdrían

$$\Delta Z/V_e = \Delta Z \cos \Theta/V_f$$

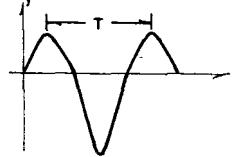
tal como se indica en la Figura 5.

Imaginemos también que el tiempo empieza a contar desde el momento en que detona la primera de las cargas. Entonces la onda que es originada por su explosión tiene que viajar la distancia $\overline{1-R}$, o sea el radio vector R para llegar al receptor, invirtiendo en ello el tiempo R/V_f .

CARGA DISTRIBUIDA INCREMENTOS FINITOS



Hipótesis: Cada carga elemental produce un pulso elemental de la forma:



$$\begin{aligned} y &= \text{amplitud} & t &= \text{tiempo} \\ T &= \text{periodo aparente} & y &= f(t) \text{ exp. matemática o gráfica definitoria del pulso} \end{aligned}$$

Tiempos de llegada de los pulsos elementales al receptor situado en el punto R , de coordenadas polares (R, Θ)

Elemento	Tiempo
1	$\frac{R}{V_f}$
2	$\frac{\Delta Z + R - \Delta Z \cos \Theta}{V_f}$
3	$\frac{2 \Delta Z + R - 2 \Delta Z \cos \Theta}{V_f}$
4	$\frac{3 \Delta Z + R - 3 \Delta Z \cos \Theta}{V_f}$
.....
n	$\frac{(n-1) \Delta Z + R - (n-1) \Delta Z \cos \Theta}{V_f}$
.....

RECEPTOR

La expresión matemática del pulso resultante que se observaría en el punto receptor es:

$$Y = \sum_{n=1}^{n=m} f \left[t - \frac{R}{V_f} + \frac{(n-1) \Delta Z - (n-1) \Delta Z \cos \Theta}{V_f} \right]$$

ó haciendo $t_0 = \frac{R}{V_f}$

$$Y = \sum_{n=1}^{n=m} f \left[t - t_0 + (n-1) \Delta Z \left(\frac{1}{V_e} - \frac{\cos \Theta}{V_f} \right) \right]$$

FIGURA 5

Transcurrido el tiempo $\Delta Z/V_e$, ocurre la explosión de la segunda carga, dando origen a otro pulso. Este segundo pulso tiene que recorrer ahora la distancia $\overline{2-R}$ para llegar al receptor, empleando el tiempo $2-R/V_f$ en viajarla. Examinando la Figura 5, se observa que la distancia $\overline{2-R}$ es más corta que la $\overline{1-R}$ en el valor de la proyección de la distancia ΔZ sobre el radio vector R .

Entonces, el tiempo en que llega el segundo pulso al receptor, contado desde el origen arriba mencionado, es:

$$\Delta Z/V_e + (R - \Delta Z \cos \Theta) /V_f$$

La explosión de la tercera carga ocurre al cabo del tiempo $2\Delta Z/V_e$, y el pulso correspondiente tiene que viajar la distancia $\overline{3-R}$, que es menor que el radio vector R en dos veces la proyección sobre él de la distancia ΔZ . Entonces, el pulso número 3 se recibirá en el detector en el tiempo:

$$2\Delta Z/V_e + (R - 2\Delta Z \cos \Theta) /V_f$$

y continuando así sucesivamente, se podría escribir el tiempo para cada una de las cargas. Para el elemento enésimo, el tiempo de llegada del pulso sería el anotado en el renglón n de la Figura 5.

De lo anterior, es evidente que el intervalo de tiempo entre dos pulsos sucesivos vale

$$\Delta Z/V_e - \Delta Z \cos \Theta /V_f ,$$

tal como se había indicado arriba.

Este es el valor del intervalo designado con δ en la misma Figura 5. En la parte izquierda de ella, están dibujadas las ondas con referencia a un origen $t_0 = R/V_f$, que es precisamente el tiempo que tarda en llegar el primer pulso al receptor.

Dado que la forma y duración de la onda generada por la explosión de cada elemento de la carga es igual para todos ellos, la expresión gráfica o analítica que la representa está indicada en la parte superior derecha de la Figura 5.

De acuerdo con el principio físico de la superposición de efectos, la señal total que se registraría en el instrumento receptor es igual a la suma de las señales parciales producidas por cada elemento, por lo cual, al estar la carga formada por un número m de ellos, la señal resultante sería

$$Y = \sum_{n=1}^m f [t - t_o + (n-1) \Delta Z (1/V_e - \cos \Theta/V_f)] \quad (1)$$

Esta fórmula hace ver claramente que la amplitud de la onda resultante es función de la forma del pulso, de la longitud y el número de las cargas que forman la columna explosiva, de las velocidades V_e y V_f , y de la dirección que se considere.

Si fuera V_e igual a V_f , y se considerara la dirección en que el ángulo Θ vale cero, o sea la vertical hacia abajo, la señal total sería igual a m veces la señal de un elemento de carga.

Pero no siendo ese el caso general, y por estar además las señales elementales defasadas entre sí a intervalos de tiempo que son diferentes en distintas direcciones, la amplitud de la onda resultante es siempre, con esa única excepción (la dirección vertical hacia abajo), menor que la suma aritmética de las amplitudes de las ondas componentes.

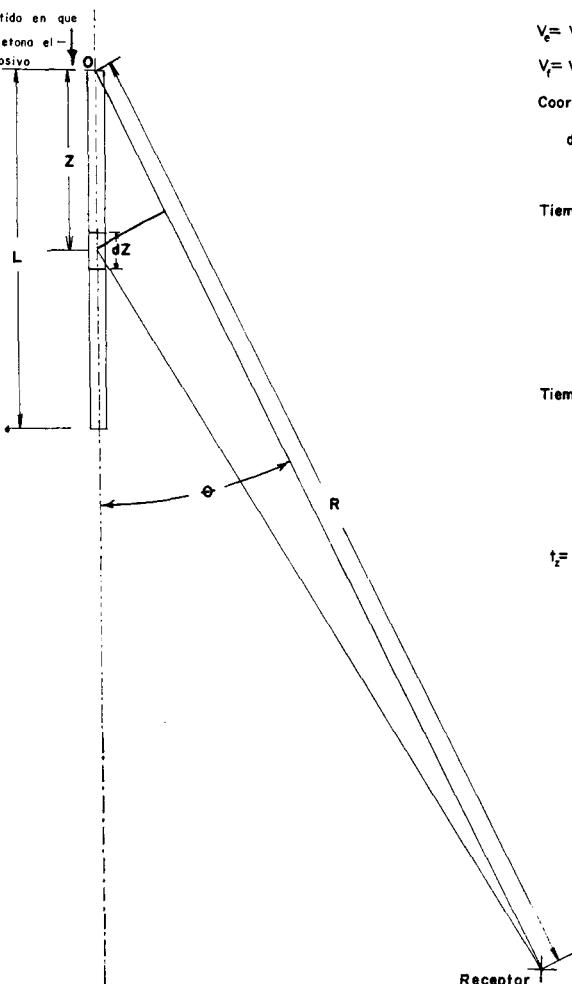
En la dirección vertical hacia arriba el ángulo O vale 180° y su coseno es igual a menos uno, lo que se traduce en un aumento del defasamiento entre las diferentes ondas y como consecuencia una amplitud menor para la onda resultante en esa dirección.

Si se conocen la forma del pulso elemental, y las velocidades del explosivo y de la formación, por medio de la fórmula (1) puede calcularse el efecto direccional de una carga distribuida linealmente.

Si la carga es continua, en vez de estar formada por cargas discretas (ver la Figura 6), habrá que reemplazar el signo de sumar de la expresión

CARGA DISTRIBUIDA CONTINUA

Sentido en que
se detona el -
explosivo



v_e = Velocidad de detonación del explosivo

v_f = Velocidad de la formación

Coordenadas del punto receptor (R, θ), siendo: $R \gg L$

Tiempo de propagación del pulso generado por el elemento explosivo situado en el punto O :

$$t_0 = \frac{R}{v_f}$$

Tiempo de propagación del pulso generado por el elemento explosivo dZ situado a la distancia Z de el punto O en el que se inició la detonación

$$t_z = \frac{Z}{v_e} + \frac{R - Z \cos \theta}{v_f} = \frac{R}{v_f} + Z \left[\frac{1}{v_e} - \frac{\cos \theta}{v_f} \right]$$

Si cada unidad de longitud de explosivo produce una onda elemental de valor $y=f(t)$, entonces la onda resultante en el punto receptor es:

$$Y = \int_0^L f \left[t - t_0 + Z \left(\frac{1}{v_e} - \frac{\cos \theta}{v_f} \right) \right] dZ$$

FIGURA 6

anterior por el signo integral, la cual se puede resolver por métodos gráficos o numéricos aproximados.

Se comprende que por medio de un tratamiento matemático similar se podrían estudiar otros casos de cargas distribuidas que no estuvieran sobre una línea recta, sino sobre alguna cierta curva.

Como dato interesante se hace notar que la fórmula (1) es precisamente la que describe de un modo cuantitativo el efecto llamado Doppler que es válido para toda clase de ondas, y que consiste en el cambio de la frecuencia y de la amplitud que se observa en el punto receptor cuando hay movimiento relativo entre una fuente emisora de ondas y el receptor, o movimiento del medio transmisor intermedio como es el caso cuando se transmite el sonido por el aire y éste se mueve, aun cuando la fuente de sonido y el receptor estén fijos.

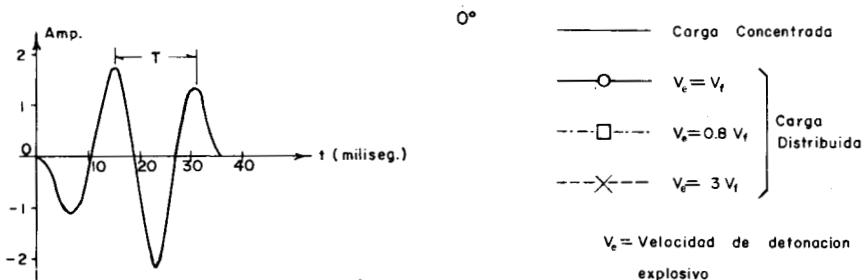
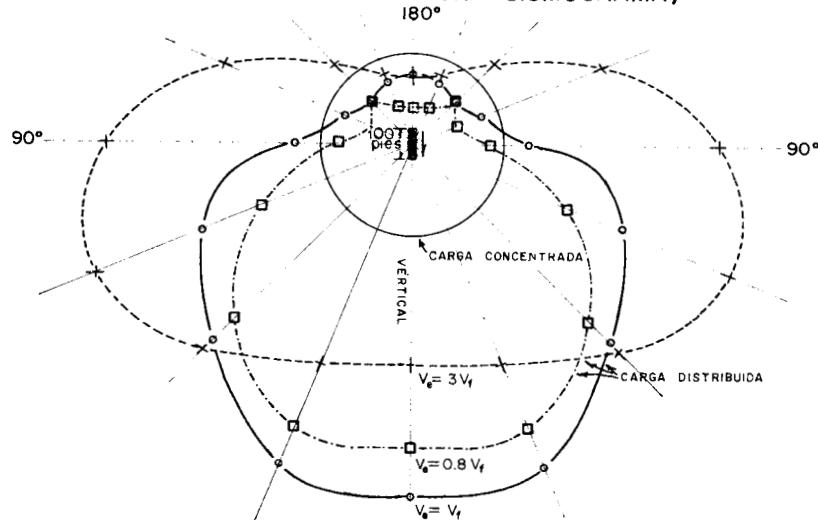
En las figuras 7, 8 y 9 que siguen se presentan los resultados que se obtuvieron aplicando la teoría anterior a tres casos teóricos de cargas distribuidas linealmente.

En cada una de ellas aparecen indicados los valores de los parámetros que se usaron, o sean la longitud de la carga, la velocidad de la formación y la descripción gráfica del pulso elemental. Se tomó como variable independiente la velocidad de la columna explosiva y , asignándole sucesivamente diferentes valores, se calculó la onda resultante para cada una de las direcciones que se indican en los diagramas polares de la distribución de la amplitud máxima del pulso resultante. Esos diagramas fueron construidos llevando como radios, en esas direcciones, magnitudes proporcionales a los valores máximos de la amplitud de cada una de las ondas resultantes, habiendo medido ésta desde la cresta hasta el fondo del valle contiguo.

El diagrama de la Figura 7 fue calculado usando un pulso cuyas características fueron tomadas de un sismograma real. Su período es de 18 milisegundos, y su duración total de 35. El caso se calculó suponiendo que la carga ocupaba una longitud total de 100 pies, o sean 30.5 metros.

Al aplicar la fórmula (1), se supuso que el pulso elemental era causado por la explosión de cada 10 pies de carga, por lo que el número de pulsos componentes fue 10. Entonces se calcularon las ondas resultantes para valores del ángulo cada 22.5° , y para las relaciones de V_e / V_f indicadas.

DIAGRAMA POLAR DE LA DISTRIBUCION DE AMPLITUD
DEL PULSO RESULTANTE
(PULSO TOMADO DE UN SISMOGRAMA)



Pulso Elemental que se supone causado

por cada 10 pies de carga

T = Periodo aparente = 18 miliseg.

λ = Longitud de onda aparente

$$= V_f \times T = 8000 \times 0.018 = 144 \text{ pies}$$

$$K = \text{Longitud relativa de la carga} = \frac{L}{\lambda} = \frac{100}{144} = 0.7$$

o sea que: L = 0.7λ en donde

$$L = \text{Longitud de la carga} = \underline{100 \text{ pies}}$$

$$N = 10 \text{ Cargas}$$

V_d = Velocidad de detonación del explosivo

V_f = Velocidad de propagación sísmica del medio que envuelve a la carga

FIGURA 7

Se observa que mientras el diagrama polar para la carga concentrada es un círculo, ya que es obvio que la onda resultante tiene en ese caso la misma amplitud en todas las direcciones alrededor de la carga, las curvas que corresponden a cargas distribuidas tienen radios variables cuya magnitud depende del ángulo Θ . Desde luego, todas ellas tienen un eje de simetría vertical, debido a que el coseno de un ángulo negativo tiene igual valor que para el ángulo medido en sentido positivo.

Se ve que el diagrama polar para el explosivo cuya velocidad de detonación es igual a tres veces la velocidad de la formación, tiene una forma achataada hacia abajo y alargada en dirección horizontal. Como los radios vectores de dicho diagrama son proporcionales a la amplitud de la onda, es claro que para esa velocidad del explosivo la mayor radiación de energía ocurre en una dirección inclinada unos 20° hacia abajo con respecto a la horizontal.

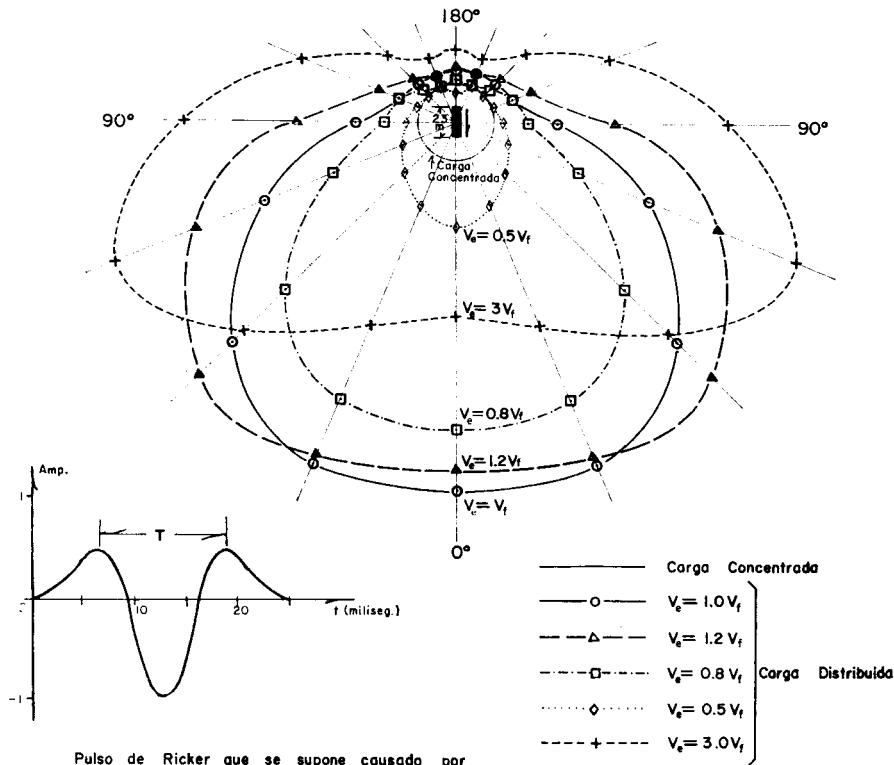
Se observa en las otras dos curvas, que los radios más grandes están dirigidos hacia abajo y comprendidos dentro de un ángulo de aproximadamente 40° de abertura, habiendo además, un acortamiento de los radios dirigidos hacia arriba, todo lo cual significa que el efecto direccional es más pronunciado para las velocidades de detonación bajas. Se observa que el explosivo cuya velocidad es 20% menor que la de la formación, es el que menor cantidad de energía radia hacia la superficie.

En la Figura 8 se presenta otro ejemplo de diagrama polar, calculado para un pulso elemental de la forma que dedujo el Dr. Norman Ricker en su investigación sobre la forma de la perturbación sísmica que se origina por la explosión de una carga de dinamita, y de las leyes de su propagación. Sus características están indicadas en la misma Figura 8. El cálculo de la amplitud de la onda resultante se hizo suponiendo que la longitud total de la carga era de 23 metros, y que el pulso elemental era causado por la detonación de cada 2.3 metros.

Las curvas fueron calculadas para las siguientes velocidades relativas de la columna explosiva: $V_e/V_f = 3$;

1. 2; 1.0, 0.8, y 0.5.

DIAGRAMA POLAR DE LA DISTRIBUCION DE AMPLITUD
DEL PULSO RESULTANTE
(CALCULADO PARA EL PULSO DE RICKER)



Pulso de Ricker que se supone causado por cada 2.3 metros de carga.

$$T = \text{Período aparente} = 11.5 \text{ miliseg.}$$

$$\lambda = \text{Longitud de onda aparente}$$

$$= V_f \times T = 2000 \times 0.0115 = 23 \text{ metros}$$

$$K = \text{Longitud relativa de la carga}$$

$$= \frac{L}{\lambda} = \frac{23}{23} = 1, \text{ o sea que } L = \lambda$$

$$L = \text{Longitud de la carga} = 23 \text{ metros}$$

$$N = 10 \text{ Cargas}$$

FIGURA 8

Para comparación, está también trazada la curva de amplitudes para el caso de que la carga hubiera estado concentrada en su centro y que es, desde luego, un círculo como en el caso precedente.

Es evidente que el diagrama polar o lóbulo para $V_e/V_f = 3$, también tiene el radio más grande en una dirección inclinada aproximadamente 20° con la horizontal. En el resto de las curvas, es obvio que los radios mayores son los que están dirigidos hacia abajo y que los que apuntan hacia arriba decrecen al mismo tiempo que la relación V_e/V_f .

Sin embargo, se hace notar que aunque los lóbulos para las dinamitas de baja velocidad siguen siendo alargados hacia abajo, presentan una disminución casi general de los radios en todas las direcciones, tal como se nota especialmente en las curvas $V_e = 0.8 V_f$, y $V_e = 0.5 V_f$.

Esto se debe a que hay una cancelación parcial de la amplitud debida a que aumentan las diferencias de tiempo entre la explosión de cada elemento cuando su velocidad es muy baja, aunque se conserva la cualidad direccional.

Las características que se manifiestan en la Figura 9, que se calculó considerando 5 elementos de la carga, son similares. Es otro caso que se calculó para una columna explosiva con longitud igual a la mitad de la longitud de onda del mismo impulso de la Figura 8.

En la Figura 10 se exhiben todas las formas de la onda resultante que se calcularon para la construcción de las curvas polares de la Figura 9. En la parte superior están trazados los lóbulos de radiación separadamente para los diferentes valores de la relación V_e/V_f , y en las columnas verticales la onda calculada para cada una de las direcciones que se señalan.

Examinando las ondas, se nota que se modifica la forma de la onda, aumentando su período aparente y duración total, siendo esta peculiaridad más notoria en las direcciones orientadas hacia arriba del plano horizontal.

Esto último constituye justamente la consecuencia del efecto Doppler, en el caso de onda transitoria.

Con el objeto de poder representar de una manera cuantitativa la propiedad direccional de las cargas lineales, y su dependencia con la velocidad de detonación, o lo que es equivalente, con la relación V_e/V_f , se definió

**DIAGRAMA POLAR DE LA DISTRIBUCION DE AMPLITUD
DEL PULSO RESULTANTE**

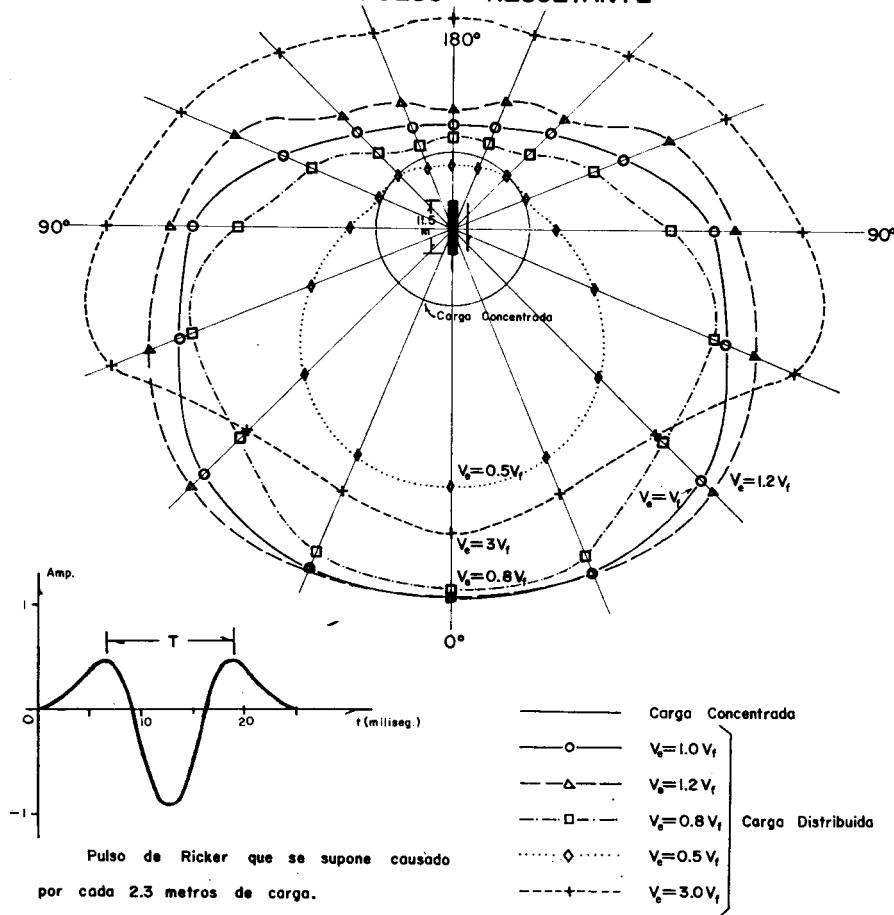


FIGURA 9

**DIAGRAMA POLAR DE LA RADIACION DE ENERGIA Y FORMA DE LA ONDA
EN DIFERENTES DIRECCIONES**

CALCULADOS PARA EL PULSO DE RICKER, L = 11.6 METROS N = 5 CARGAS

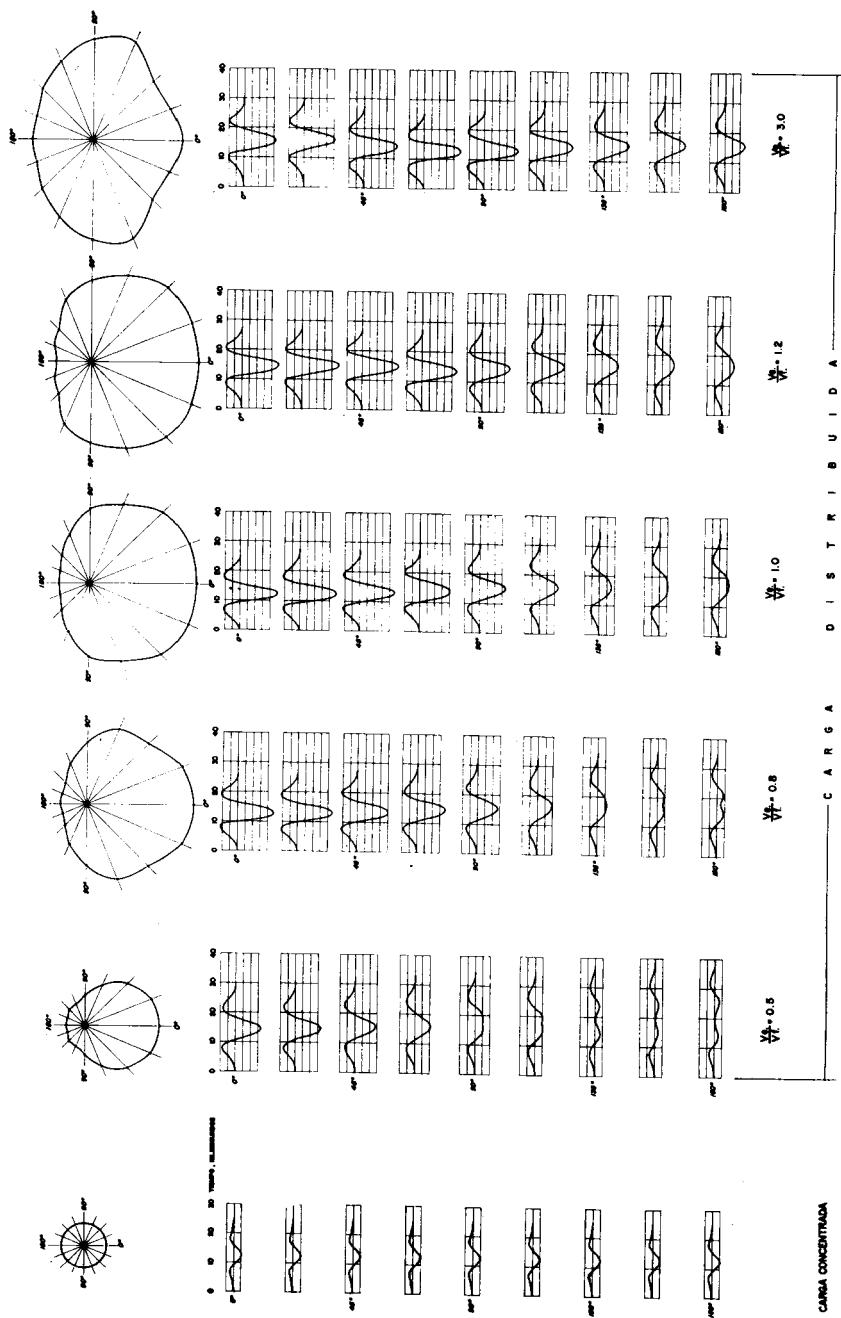


FIG. 10

la directividad vertical de la manera que se indica en la Figura 11. En ella aparecen graficados los valores que se calcularon para la directividad contra los de la relación V_e/V_f para las tres cargas estudiadas en las figuras 7, 8 y 9.

El examen de estas curvas revela lo siguiente:

- 1o.—Que todas manifiestan un valor máximo.
- 2o.—Que ese máximo ocurre para valores de la relación V_e/V_f comprendidos entre 0.6 y 1.0.
- 3o.—Que la directividad crece con la longitud de la columna explosiva tal como se ve comparando las curvas de puntos triangulares y la de cruces que corresponden a la misma forma del pulso elemental. (En el caso particular en que se ha supuesto una carga elemental de longitud fija, el aumento es proporcional al número de las cargas).

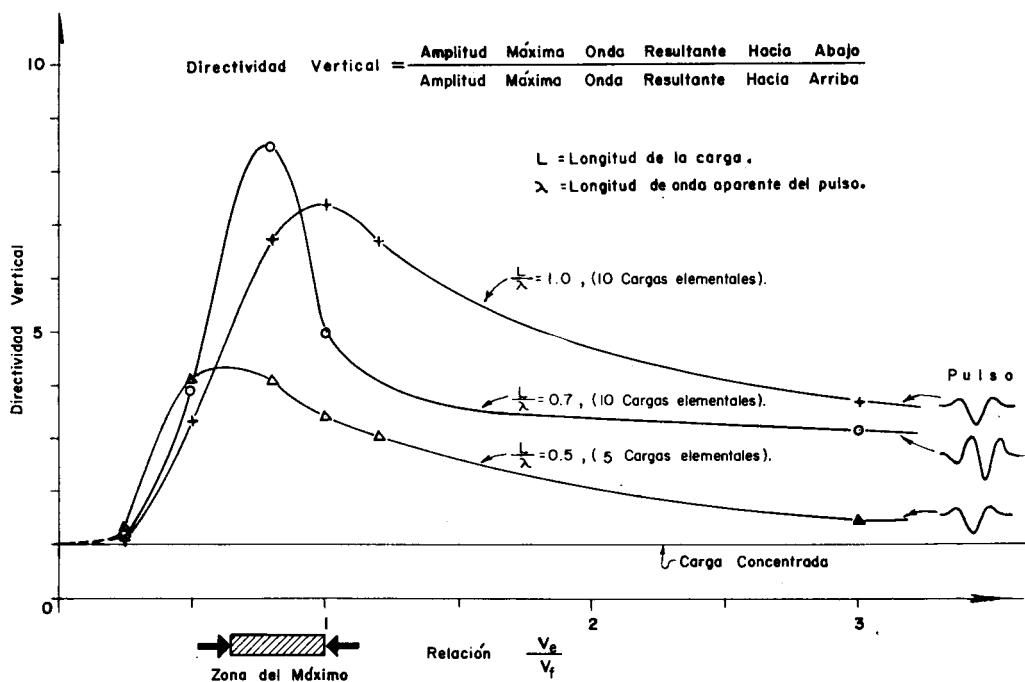


FIGURA 11 DIRECTIVIDAD VERTICAL

4o.—Que la directividad de la carga explosiva y la relación V_e/V_f que produce el máximo, dependen de la forma del pulso.

(Debe notarse que el pulso de Ricker al pasar por el sistema detector-amplificador, sufre una modificación en su forma que tiende a hacerlo aparecer como un pulso más largo que lo es en realidad, lo que se dice comúnmente que se debe a la cola del filtro. Por eso se considera más apropiado considerar el caso de la onda Ricker, que el de la onda tomada del registro).

En la Figura 12 se presentan varios diagramas polares de directividad que fueron obtenidos experimentalmente por los Dres. Martner y Silverman. En el esquema de arriba se muestra la disposición de los detectores de tres componentes que fueron fijados en el interior de pozos y a profundidades tales que resultaron ubicados en un círculo cuyo radio era de 125 pies, medidos desde el centro de la columna explosiva. Las cargas columnares que usaron tuvieron una longitud total de 100 pies, con explosivos de las diferentes velocidades que se indican en la figura. Los diagramas polares fueron construidos tomando como radio la amplitud total de la señal, determinada a partir de las tres componentes que se registraron en cada uno de los detectores. Es evidente que los lóbulos tienen características similares a las que se vieron en las figuras 7, 8 y 9, aún cuando están más alargados debido a que las observaciones se hicieron muy cercanas al pozo de tiro.

Hay otra manera de evidenciar de un modo gráfico el efecto direccional de las cargas distribuidas linealmente y es por la aplicación del Principio de Huygens. En las figuras que siguen, 13 a 19, se aplicó dicho Principio a una carga formada por cinco elementos, suponiéndole sucesivamente diferentes velocidades de detonación. En la Figura 13 se ven ondas elementales para una sucesión de intervalos de tiempo, en el caso de que la velocidad de detonación fuera infinita.

De esta figura es obvio que la dirección de máxima radiación es perpendicular al eje de la carga, ya que el avance de las ondas en esa dirección es simultáneo. Un equivalente práctico aproximado de esta situación se tendría al detonar una carga larga de dinamita sísmica corriente dentro de una formación de muy baja velocidad, por ejemplo la capa intemperizada cuya velocidad es del orden de 500 m/seg. En tal caso, la relación V_e/V_f tendría un valor aproximado de 10, y la dirección de máxima emisión de energía formaría un ángulo de unos 6° con la horizontal. Se estima que este efecto direccional en el plano horizontal es una de las causas de que se tenga poca amplitud y una relación alta de la señal al ruido cuando los tiros se hacen en la capa intemperizada.

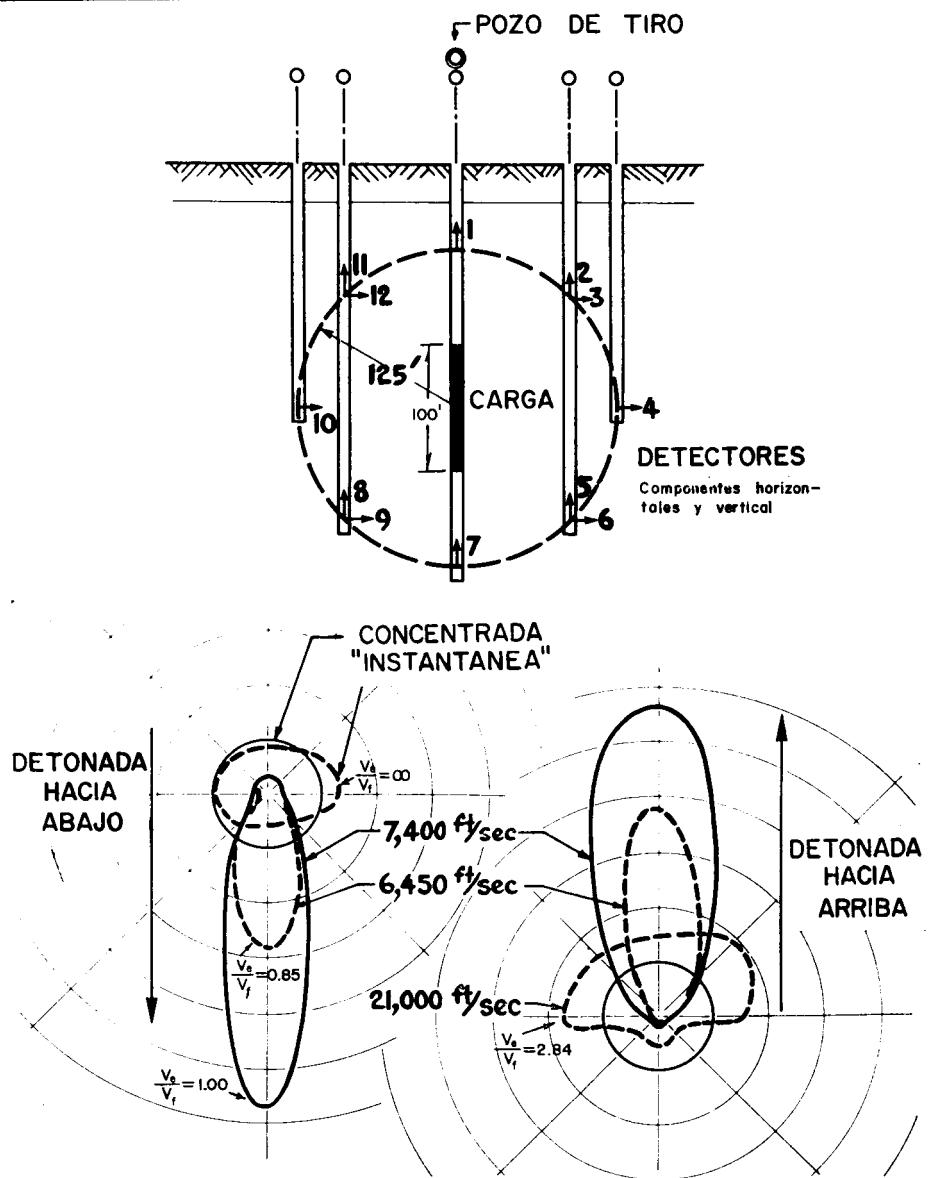
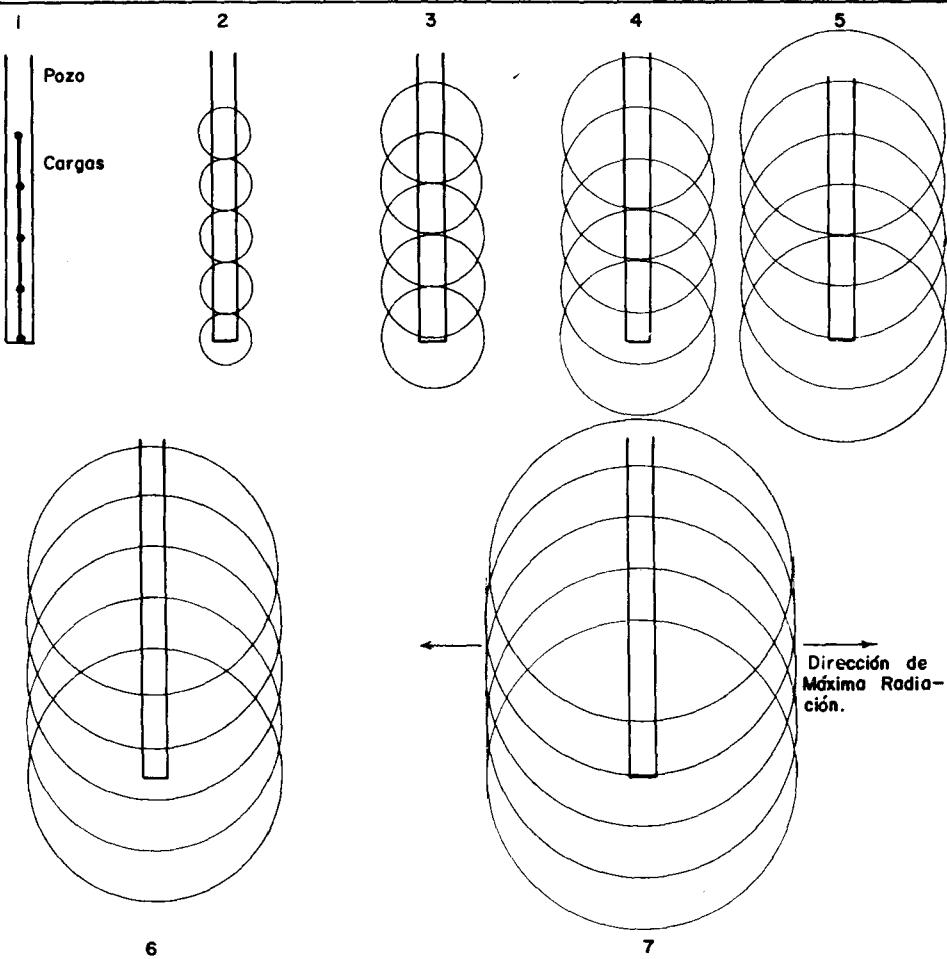


FIGURA 12 DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL DIAGRAMA POLAR DE DIRECTIVIDAD

(BIBLIOGRAFIA 2)



APLICACION DEL PRINCIPIO DE HUYGENS A UNA DISPOSICION VERTICAL DE CARGAS

Caso en que las cargas detonan simultaneamente, equivalente a :

$$V_0 = \infty$$

FIGURA 13

En la Figura 14 se ve el caso de que el explosivo tuviera una velocidad igual a tres veces la de la formación, observándose que la tangente común a las ondas elementales está inclinada con respecto al eje de la carga. La dirección de máxima energía es normal a esa tangente común y tiene una inclinación de 19.5° con respecto al plano horizontal.

En la Figura 15 se presenta el caso en que la relación $V_e/V_f = 2$. La dirección de máxima radiación es entonces de 30° .

En la Figura 16 se muestra el caso de que la velocidad del explosivo es 20% mayor que la velocidad de la formación. El Ángulo vale 57° .

La Figura 17 corresponde al caso de que la velocidad del explosivo fuera igual a la velocidad de la formación.

Se observa que entonces todas las ondas componentes viajan en fase hacia abajo y que la tangente común forma un ángulo de 90° con el eje de la carga, constituyendo el caso límite de existencia de la superficie envolvente de las ondas componentes. A este respecto se hace notar que esta figura y las precedentes, desde la 13, son secciones verticales que en el espacio corresponden a un cuerpo de revolución de forma cilíndrica o cónica, cuyos extremos rematan en hemisferios.

Una particularidad interesante de las figuras 13 hasta la 16, es que la onda que ocupa la posición más adelantada hacia abajo, es la que corresponde a la carga elemental que explotó en último lugar.

Esto quiere decir, que siempre que se usan explosivos con velocidad de detonación mayor que la velocidad de la formación, la primera energía que llega a los horizontes reflejantes profundos, es la generada por la dinamita del fondo del pozo.

En las Figuras 18 y 19 se presenta el caso que la velocidad de detonación es el 80% de la velocidad de la formación. Se observa que las ondas ya no tienen tangente común y que hacia abajo viajan con el mínimo defasamiento, mientras que hacia arriba presentan la máxima separación.

Por consiguiente, la vertical hacia abajo es la dirección de máxima radiación, del mismo modo que lo era en el caso $V_e/V_f = 1$.

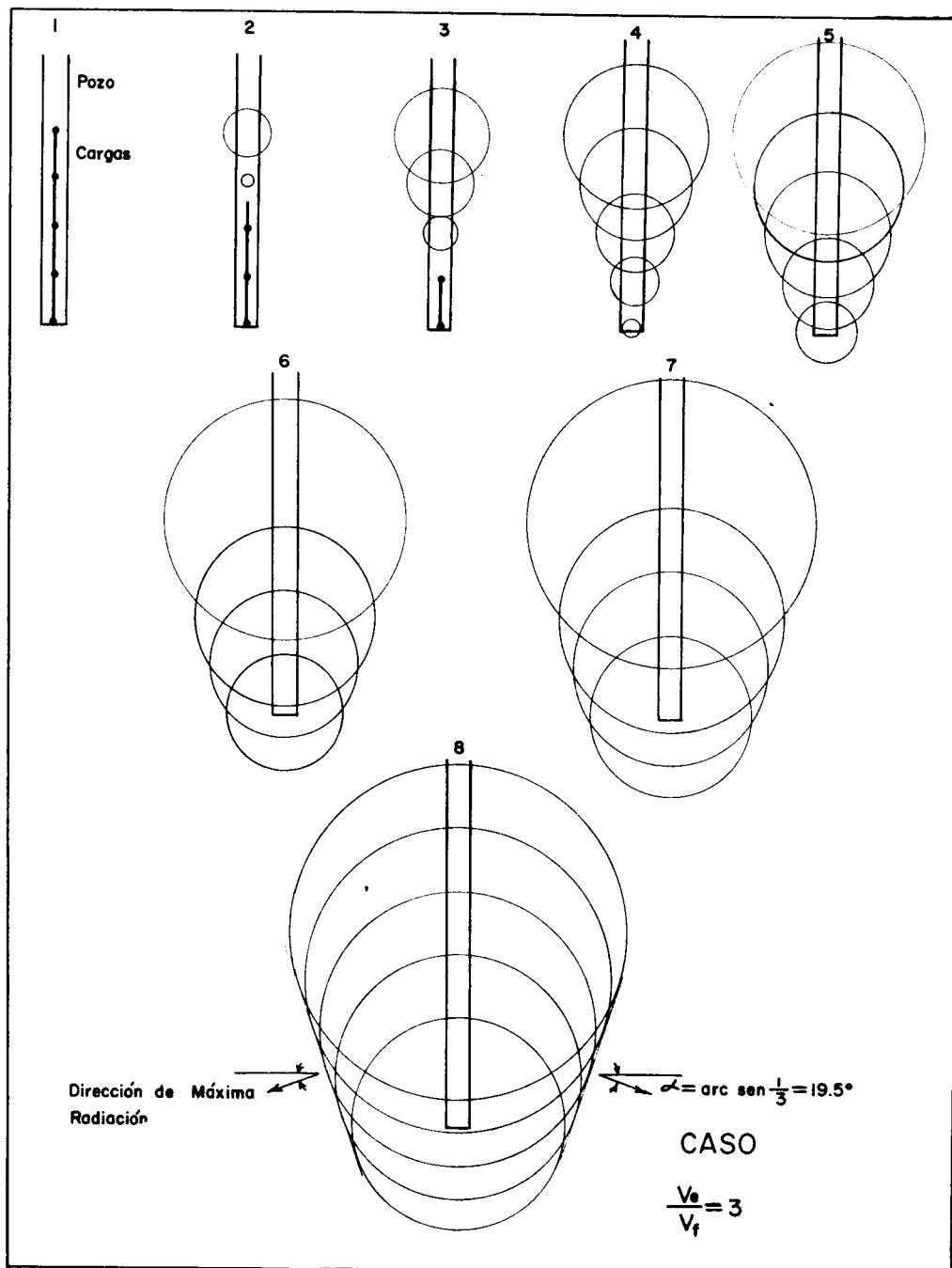


FIGURA 14

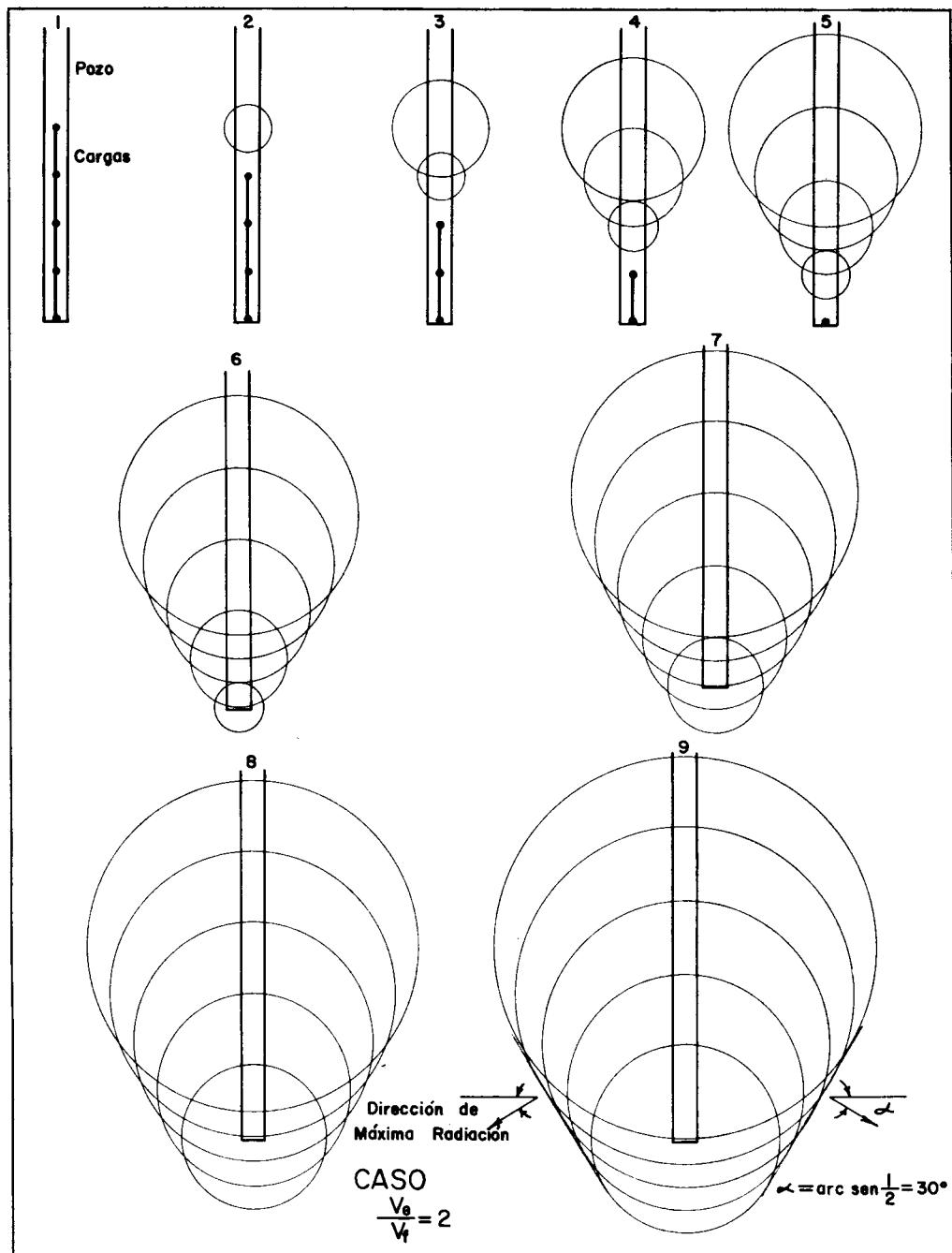


FIGURA 15

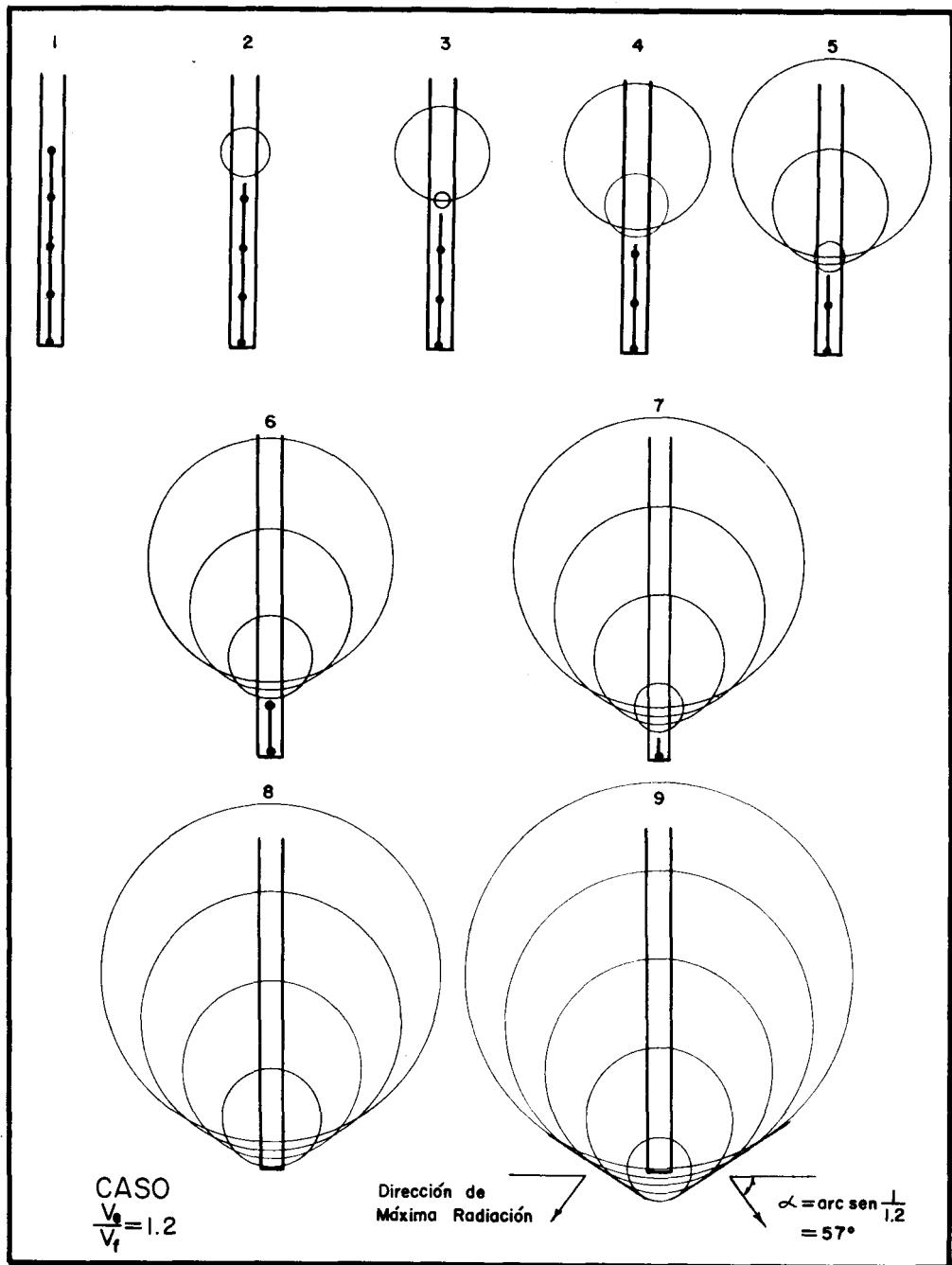


FIGURA 16

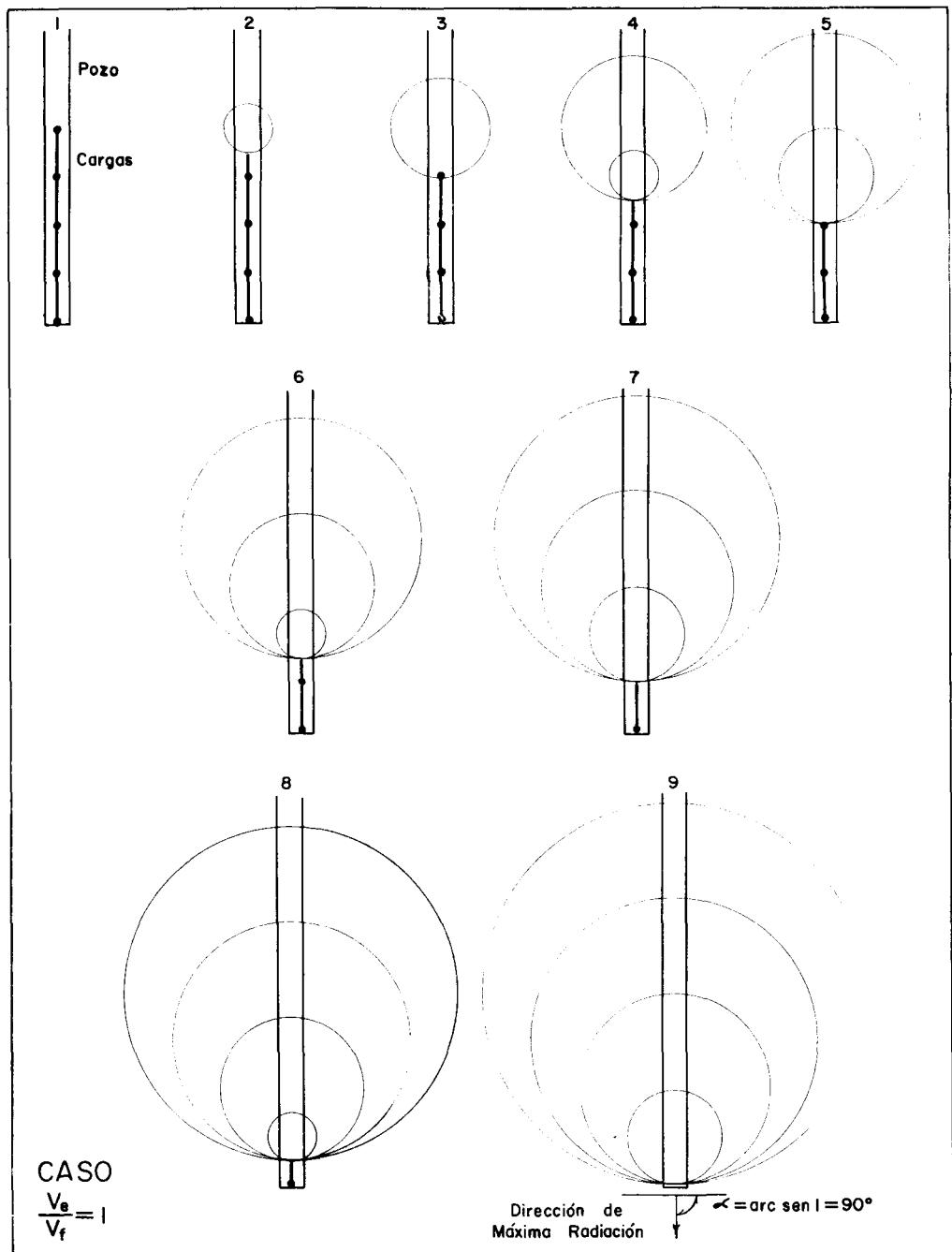


FIGURA 17

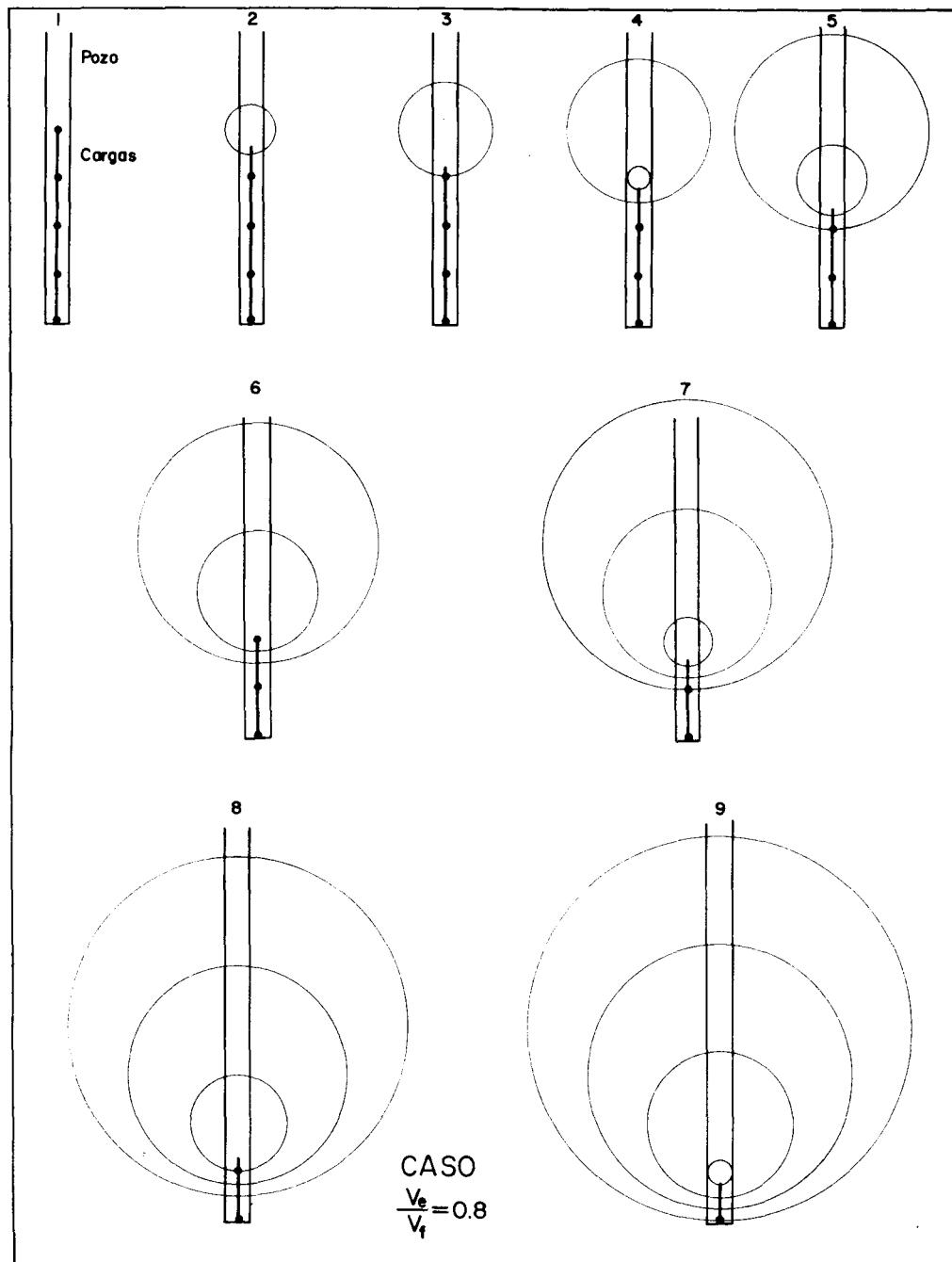


FIGURA 18

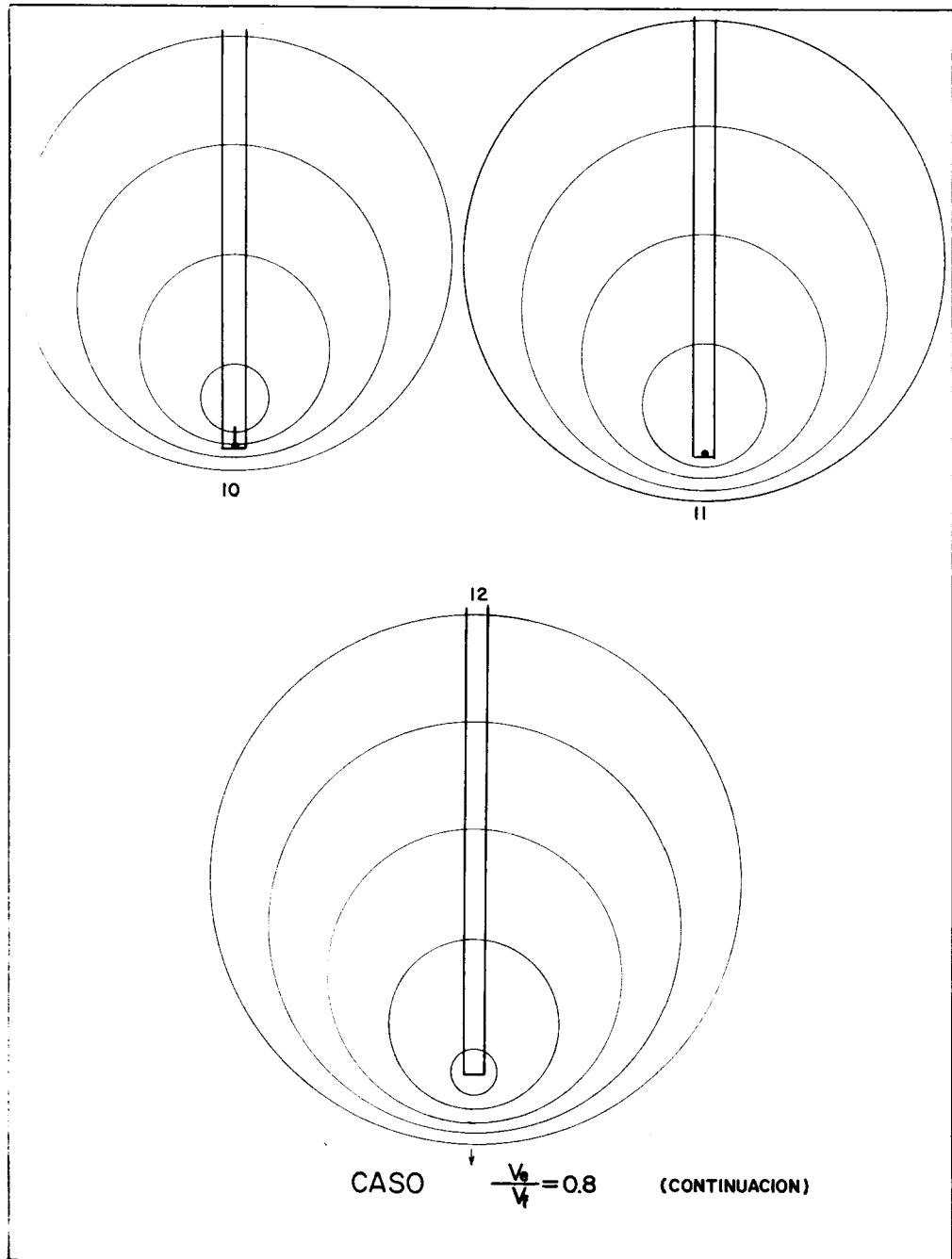


FIGURA 19

En la Figura 20, que es una síntesis de esta serie de placas de frentes de onda, se presentan los casos siguientes: $V_e/V_f = 3, 2, 1$ y 0.8 construidos para el mismo tiempo transcurrido desde la iniciación de la explosión.

Es obvia la modificación de la forma de la envolvente de las ondas parciales y la inclinación sucesiva de su tangente (recuérdese que en el espacio corresponde a la superficie lateral del cuerpo envolvente) al disminuir la relación V_e/V_f .

Cuando las cargas se explotan desde el fondo hacia arriba del pozo, todas las figuras anteriores se aplican, solo que invertidas.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES

Como resultado de los ejemplos presentados, se deduce que las cargas formadas por columnas de explosivos, tienen un efecto direccional que es dependiente de su longitud y de su velocidad de detonación y que alcanza su valor máximo en la dirección del eje en el sentido de la detonación cuando la velocidad de la dinamita es alrededor del 80% de la velocidad de la formación.

A continuación se presentan algunos sismogramas tomados de la literatura publicada sobre el tema y que ilustran, de manera evidente, el efecto de la propiedad direccional de las cargas lineales.

En la Figura 21 se ven dos sismogramas en los que se compara el efecto direccional en el plano horizontal, de una carga columnar y una concentrada. Los valores escritos en la parte central indican la relación entre la amplitud de la onda refractada y la del reflejo que está encerrado dentro del círculo. Se nota que mientras ese conciente vale 0.56 para la carga distribuida, en el otro registro vale 3.94; lo que significa que la proporción de energía radiada en el plano horizontal con respecto a la radiada en el vertical, es mayor para el caso de la carga puntual que para el de la carga alargada.

En la Figura 22 se ven dos sismogramas obtenidos con cargas distribuidas. En el primero la detonación fue iniciada en la parte alta de la columna explosiva, en el segundo la detonación fue de abajo hacia arriba. Se ve que en el primero es mayor la amplitud de los reflejos primarios que la de los secundarios, mientras que en el segundo la condición es precisamente la contraria, tal como era de esperarse considerando la inversión del sentido del efecto direccional.

DIRECCION DE LA ENERGIA MAXIMA SEGUN LA RELACION $\frac{V_e}{V_f}$

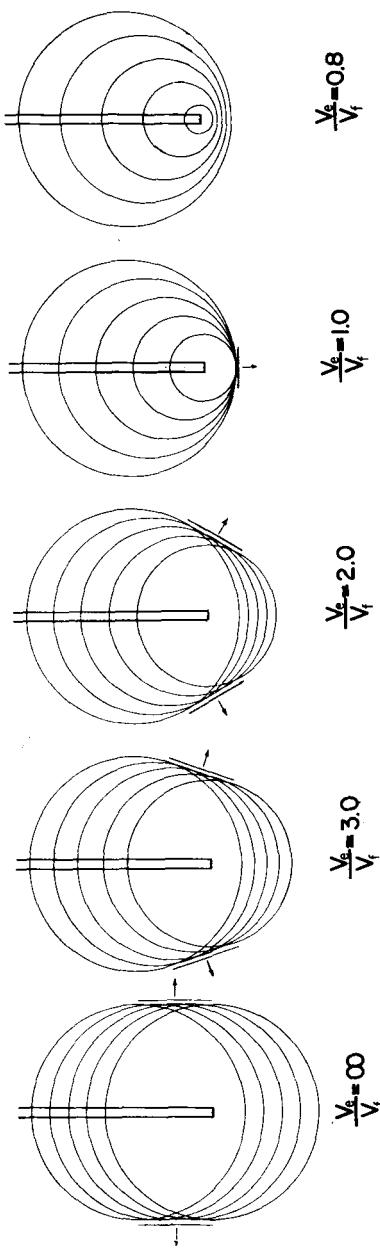
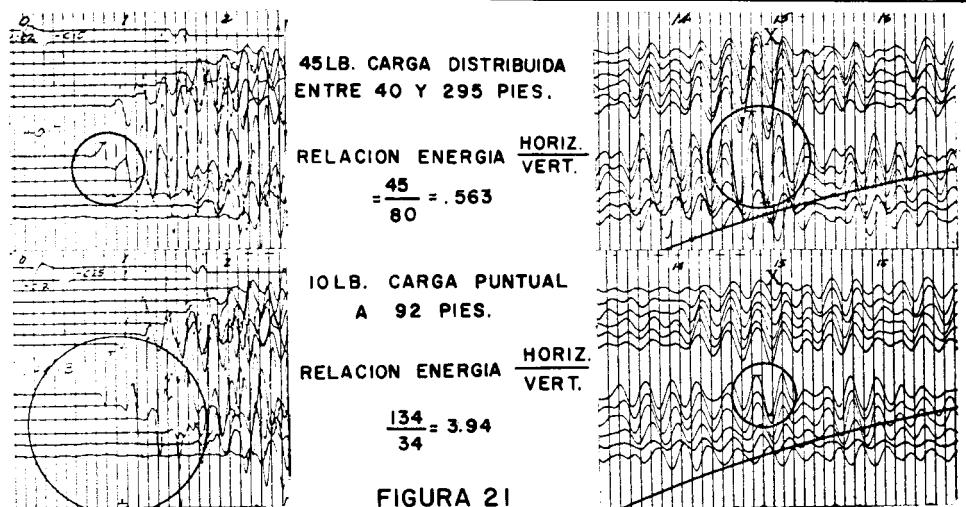


TABLA DE VALORES DEL ANGULO α EN
QUE LA RADICACION DE ENERGIA ES MAXIMA
CARGA

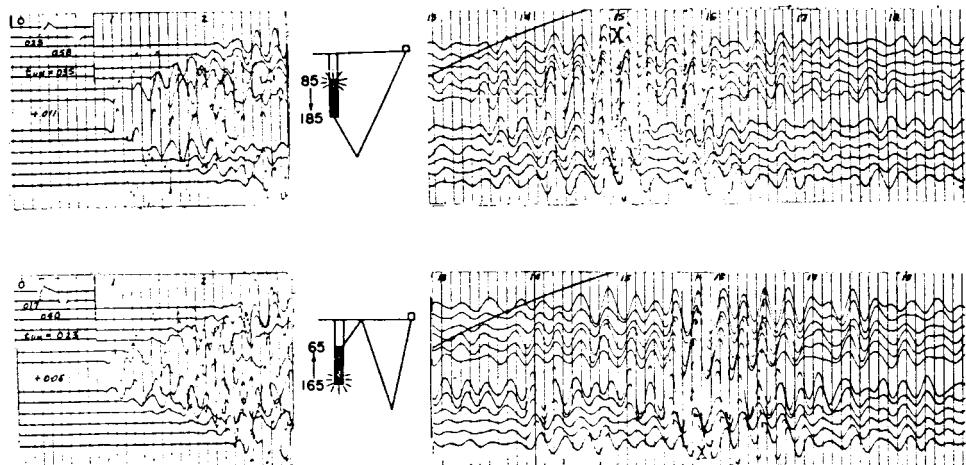
V_e/V_f	0°	3°	2°	1°
α	0°	19.5°	30°	90°

----- NORMAL

FIG. 20



REGISTROS QUE MUESTRAN LAS CARACTERISTICAS DIRECCIONALES DE UNA CARGA COLUMNAR EN COMPARACION CON LAS DE UNA CARGA PUNTUAL.



EJEMPLO DEL EFECTO DIRECCIONAL DE LAS CARGAS

En la Figura 23 se ve que el registro central contiene tanto los reflejos primarios como los secundarios, mientras que los sismogramas tomados con carga distribuidas muestran un debilitamiento de los reflejos secundarios o

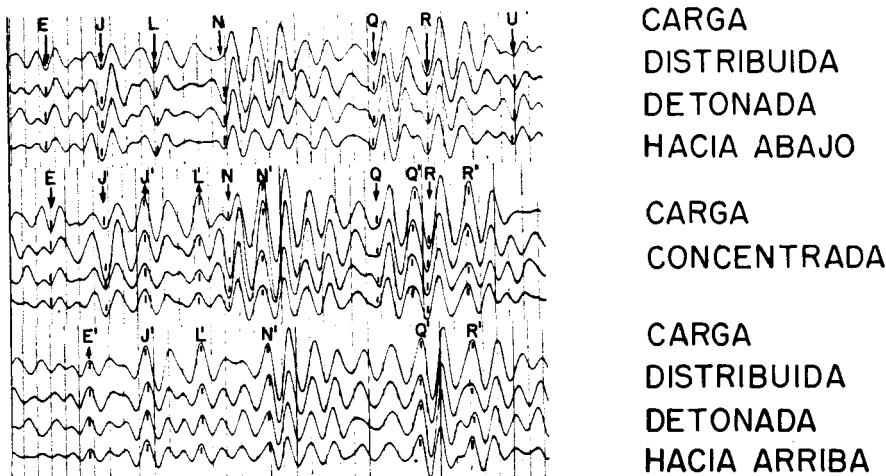


Figura 23.—Efecto direccional de las cargas. Nótese que al detonar la carga de abajo hacia arriba se refuerzan los reflejos fantasma designados con las letras primas. (Bibl. 2).

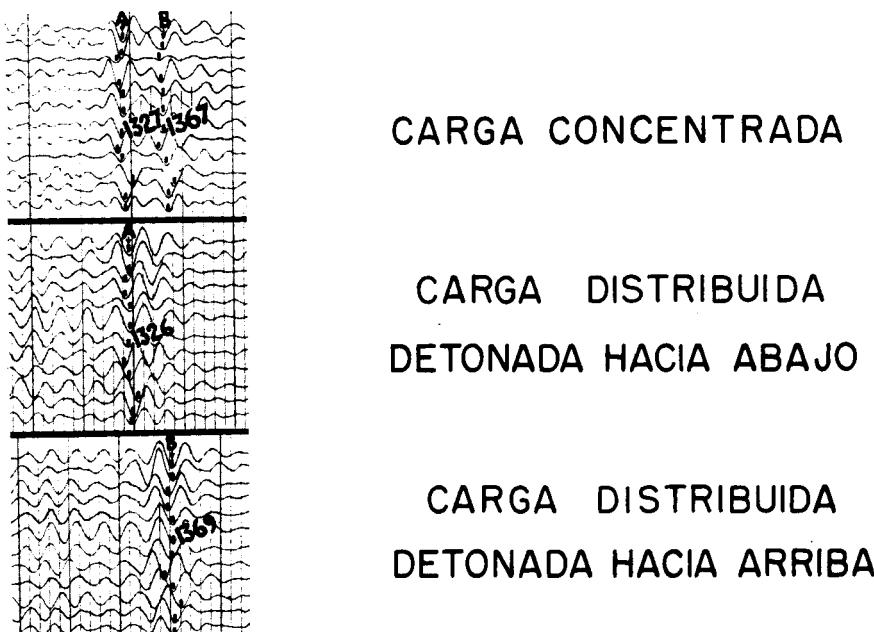
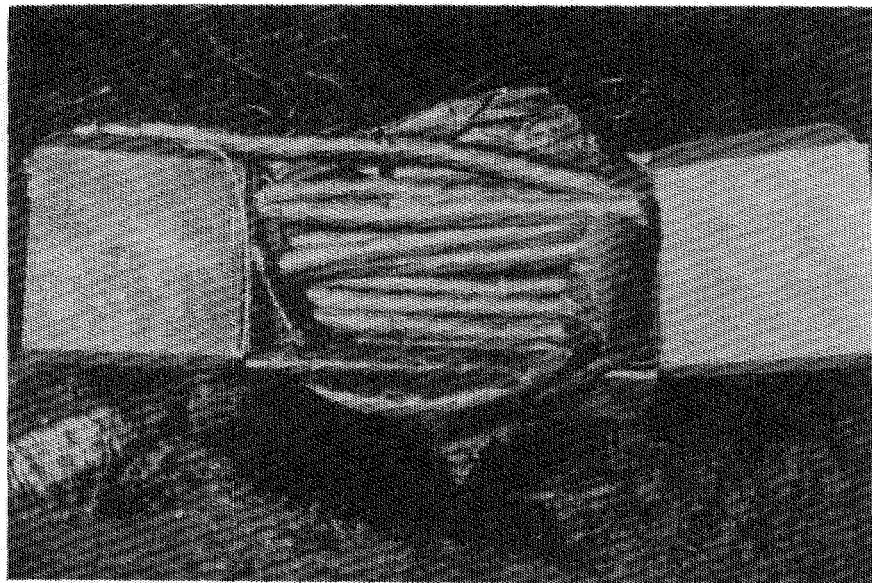


Figura 24.—Efecto Direccional de las Cargas (Bibliografía 2).

primarios, dependiendo del sentido en que se realizó la detonación de la columna explosiva. (Obsérvense en particular los reflejos J y N , y sus fantomas J' y N'). En la Figura 24 se nota con toda claridad el mismo efecto.

DISPOSITIVOS DE CARGAS DISTRIBUIDAS

En la Figura 25 se muestra un tipo especial de explosivo que ha sido denominado "Salchicha", y que consiste en una columna continua de pequeños cartuchos de explosivos de baja velocidad de detonación, que están contenidos dentro de un tubo de plástico flexible. Es fabricado en longitudes de aproxi-



Ejemplo de una carga continua fabricada
por la Hercules Powder Company.

FIGURA 25

madamente 90 pies y con velocidades que van desde 6,500 hasta 13,500 pies por segundo.

En las Figuras 26 y 27 se ilustra otro tipo de carga distribuida, que consiste en la unión mecánica de varias unidades de explosivos en lata, tal como Nitramon o Vibronite, entre las que se intercalan unidades de "atraso" explosivas.

Estas unidades llamadas "Elcord", están formadas por tubos de cartón que contienen cordón explosivo enrollado en hélice, con un tiempo fijo de detonación.

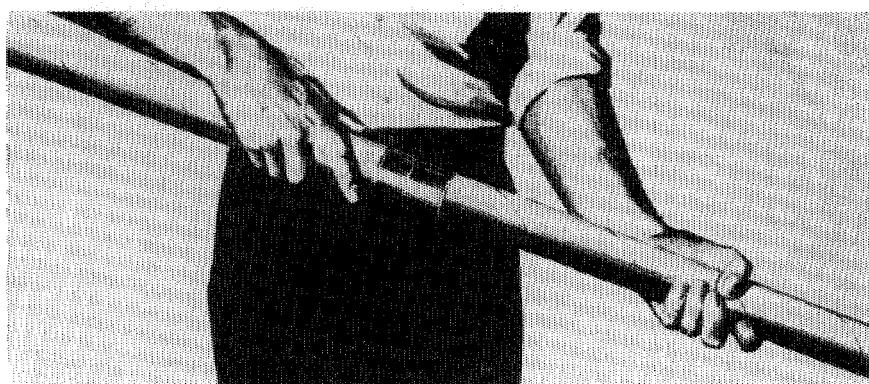
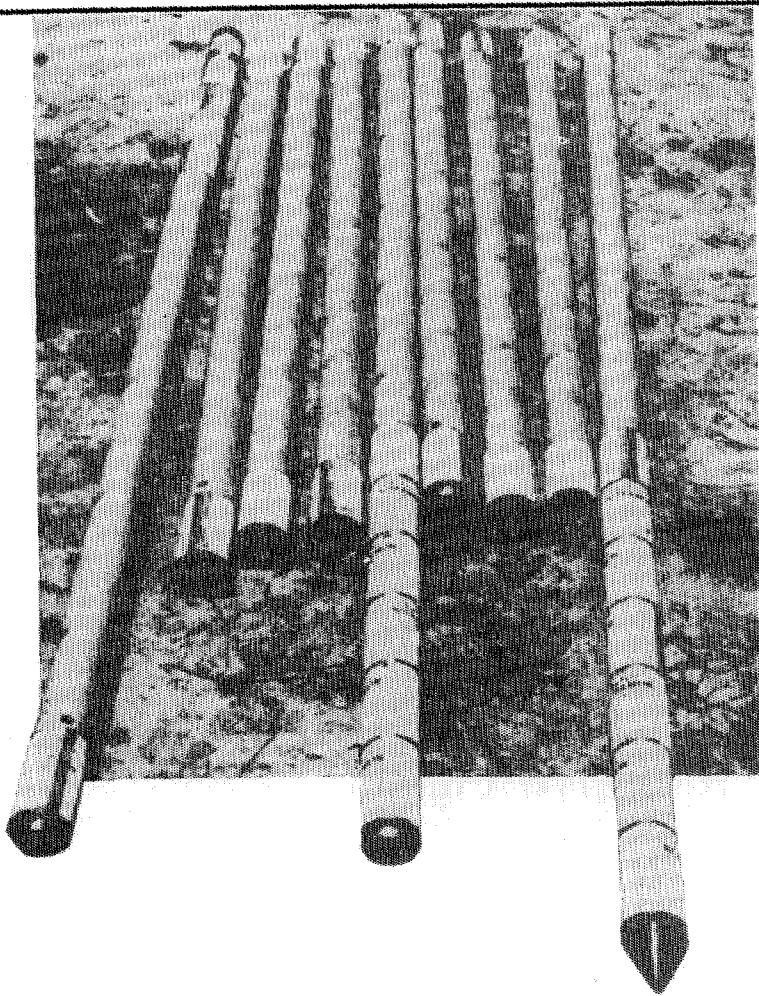


Figura 26.—Ajuste de la longitud de una Unidad de Atraso "Elcord", de la Dupont.

La velocidad de la columna explosiva formada por Nitramon y Elcord se ajusta variando la longitud y el número de las unidades de atraso que se intercalan entre las latas de Nitramon. Las unidades Elcord son fabricadas para diferentes tiempos de detonación, teniendo una longitud mínima de 1.50 metros, que puede extenderse hasta 2.70 metros.

En las Figuras 28 y 29 se muestra otro tipo de unidad de atraso, llamada "Palo de Escoba", que fue diseñada también para usarse conjuntamente con explosivos en latas.

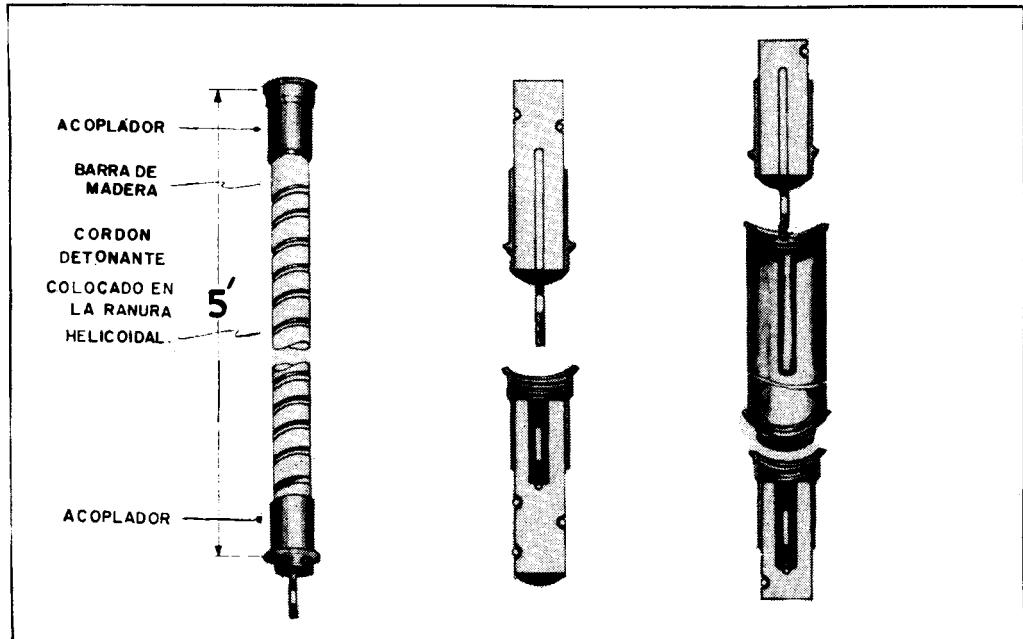


Unidades de Atrezo "Ecord" y latas de "Nitramon" S, necesarias para formar una carga completa.

Los 15 latas de Nitramon S y 9 unidades "Ecord", al ser ensamblados resultan en una carga de 15 libras con longitud de 51 pies. La detonación se provoca por medio de un iniciador de "Nitramon" S con un fulminante colocado en la parte superior de la carga (izquierda arriba).

FIGURA 27

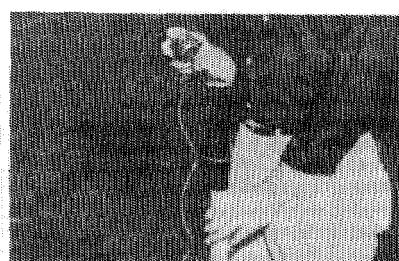
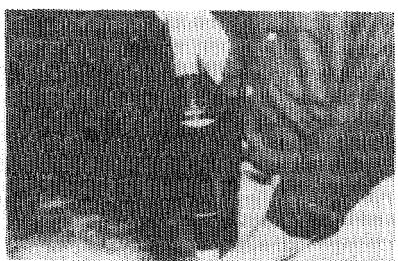
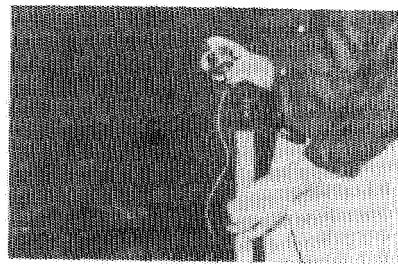
La Figura 29 ilustra la manera de ensamblarla. El control de la velocidad de las unidades se obtiene por los fabricantes variando el diámetro de la barra y el paso de la ranura en que está colocado el cordón detonante, produciendo así unidades de diferentes velocidades de detonación.



UNIDAD "PALO DE ESCOBAS" Y MANERA DE ACOPLARLA CON OTRA UNIDAD, O CON UNA LATA DE EXPLOSIVO.

FIGURA 28

En la Figura 30 se enseña otro tipo de construcción de carga distribuida, en el que también se usa material explosivo en latas, junto con detonadores sensibles a la presión que son activados por el paso de la onda sísmica a medida que ésta se propaga hacia abajo. La figura muestra que los detonadores van provistos de un fulminante. La carga queda cebada y lista para el tiro cuando los fulminantes son conectados a una caja de tiro especial.



PREPARACION DE UNA CARGA DISTRIBUIDA FORMADA POR
UNIDADES "PALO DE ESCOBIA" Y EXPLOSIVO EN LATAS.

Figure tomada de "BROOMSTICK DISTRIBUTED CHARGE" by S.T. Mortner
and D. Silverman.

FIGURA 29

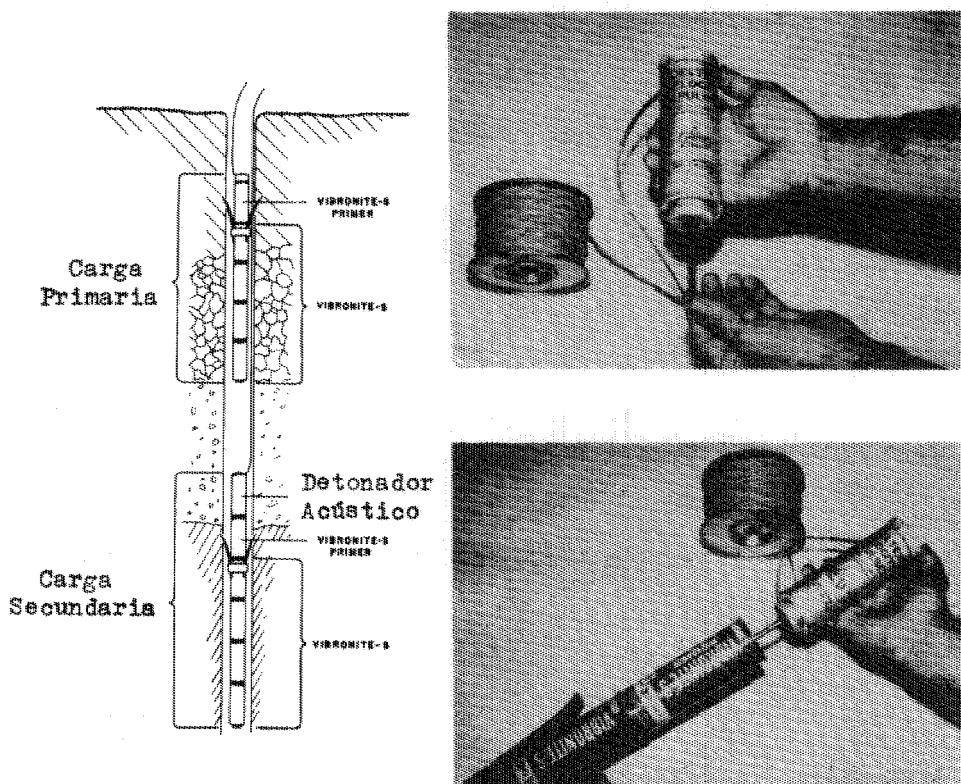


Figura 30.—DETONADORES ACÚSTICOS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue preparado por sugerición y bajo la dirección del Ing. Antonio García Rojas, Gerente de Exploración de Petróleos Mexicanos. El autor manifiesta su agradecimiento a todas las personas del Departamento Geofísico que de diversas maneras le ayudaron a la realización del mismo, así como a la "Society of Exploration Geophysicists" que amablemente autorizó la reproducción de varias ilustraciones que han aparecido en su Boletín. Igualmente a la Compañía Davis Equipment, Inc., de Tulsa.

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

- 1.—Hammond, Joseph W., and Hawkins, James E.: "Getting the Most Out of Present Seismic Instruments".—Geophysics, Vol. XXIII, 1958.
- 2.—Martner, S. T., and Silverman, D.: "Broomstick Distributed Charge", Printed through the courtesy of Davis Equipment, Inc., Tulsa, Oklahoma.
- 3.—Musgrave, A. W., Ehlert, G. W., Nash, D. M. Jr.: "Directivity Effect of Column Charges".—Geophysics, Vol. XXIII, 1958.
- 4.—Page, L.: "Introduction to Theoretical Physics".—D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1935.
- 5.—Ricker, Norman: "The Form and Laws of Propagation of Seismic Wavelets".—Geophysics, Vol. XVIII, 1953.
- 6.—Van Melle, F. A., and Weatherburn, K. R. "Ghost Reflections Caused by Energy Initiated Above the Level of the Shot".—Geophysics, Vol. XVIII, 1953.
- 7.—White, J. E.: "Transient Behavior of Patterns".—Geophysics, Vol. XXIII, 1958.
- 8.—Watson, W.: "Curso de Física".—Editorial Labor, Barcelona, 1925.

EL ACOPLAMIENTO DE LA ENERGIA EXPLOSIVA A LA ROCA *

Por *Harry R. Nicholls* **

(Traducido por el Ing. *Daniel Gutiérrez*) ***

Resumen

Se investigaron dos tipos de acoplamiento del explosivo a la roca: geométrico y por impedancia. Se demuestra que las amplitudes de las deformaciones generadas por una explosión dentro de un pozo de tiro varían con la carga y con las dimensiones del pozo. También se demuestra que las amplitudes de deformación y la energía de deformación en la roca dependen de las propiedades del explosivo y de las del medio que rodea al pozo. Se hacen notar las diversas divergencias respecto de las predicciones basadas en la teoría acústica.

INTRODUCCION

La amplitud del movimiento de partícula o, en términos generales, la energía impartida al medio que rodea a una explosión, es de importancia fundamental en todos los trabajos donde se realizan explosiones, sea en minería o en exploraciones sísmicas. Muchas de las ideas que aquí se presentan no son

* Trabajo presentado en la 31a. Reunión Anual de la SEG, efectuada el 8 de Noviembre de 1961 en la ciudad de Denver.

** Del Laboratorio de Investigaciones de Física Aplicada, Bureau of Mines, U. S. Department of the Interior, College Park, Md.

*** Gerencia de Exploración, Petróleos Mexicanos.

nuevas, y la mayoría de los geofísicos han dedicado al menos algún pensamiento al problema del acoplamiento del explosivo a la formación. El "Bureau of Mines" de Estados Unidos de América, como parte continuada de un programa sobre investigación de explosiones, ha estudiado dos tipos de acoplamiento: geométrico y por impedancia. De estos estudios han resultado algunos conceptos y valores numéricos de los cuales se pueden sacar conclusiones, aunque indican también que la investigación debe continuar.

Se ha demostrado que dos tipos de acoplamiento, geométrico y por impedancia, afectan a la magnitud de las señales sísmicas generadas al detonar una carga de explosivos dentro de un pozo. Para cargas cilíndricas, se define el acoplamiento geométrico como cien veces la relación entre el diámetro de la carga y el diámetro del pozo. El acoplamiento por impedancia es igual a la razón de la impedancia característica del explosivo a la del medio.

La impedancia característica del explosivo se define como el producto de la densidad de carga por la velocidad de detonación. Análogamente, la impedancia característica de la formación es igual al producto de la densidad de la misma por su velocidad de propagación para ondas longitudinales.

LOCALIDADES DONDE SE REALIZARON LAS PRUEBAS

El señor T. C. Atchison (1961) publicó los resultados de las pruebas de acoplamiento geométrico que fueron realizadas en la formación caliza Columbus, en la cantera de la "National Lime and Stone Co.", ubicada cerca de Bucyrus, Ohio. Dicha caliza tenía un peso específico de 2.6 y velocidad de 14,000 pies/seg.

Las pruebas de acoplamiento por impedancia (Nicholls et al., 1960) fueron realizadas en cooperación con la Comisión de la Energía Atómica de los Estados Unidos, como parte del Proyecto COWBOY. La localidad de prueba fue una mina subterránea operada por la Cía. Salera Carey, ubicada cerca de Winnfield, Louisiana. La sal tenía un peso específico de 2.2 y velocidad sísmica de 14,400 pies/seg.

INSTRUMENTOS

Para medir la deformación del medio se emplearon medidores de deformación de un tipo que fue descrito con anterioridad por Obert y Duvall, en

1949. Estos instrumentos consistieron de un elemento medidor de la deformación formado por un alambre resistivo que se encontraba montado en una corta longitud de un núcleo de $2\frac{1}{8}$ pulgadas. Tanto los medidores como sus cables fueron blindados eléctricamente y a prueba de humedad. Fueron colocados a la profundidad adecuada dentro de cada pozo de medición, y orientados apropiadamente para medir la deformación radial horizontal, habiendo sido finalmente cementados en su lugar. Los núcleos para la fabricación de los medidores y el cemento usado para fijarlos fueron seleccionados entre los que poseían propiedades físicas tan parecidas como fue posible a las de la roca en la localidad de la prueba.

Un medidor de velocidad de partícula, semejante a los sismodetectores, pero con una curva de respuesta plana con la frecuencia, desde 8 a 2,000 cps, fue usado para fines comparativos en las pruebas de acoplamiento por impedancia. Bajo las condiciones de la prueba, las cuales serán descritas adelante, deformación y velocidad de partícula están ligadas por la ecuación:

$$\epsilon = v/C , \quad (1)$$

en la que

ϵ = deformación

v = velocidad de partícula, y

C = velocidad sísmica longitudinal.

Se usaron dos tipos de equipo registrador. En las pruebas de acoplamiento geométrico se usaron películas individuales en cámaras de tambor giratorio para registrar la deflexión de las trazas osciloscópicas que eran excitadas por las señales procedentes de cada uno de los medidores de deformación (Atchison et al, 1956). En las pruebas de acoplamiento por impedancia, se usó para la reproducción un equipo de cinta magnética de frecuencia modulada, con un oscilógrafo de registro directo (Nicholls et al, 1960). La curva de respuesta contra frecuencia del sistema de tambor, incluidos los medidores de deformación, fue plana desde 5 hasta 20,000 cps, y la curva análoga del sistema de cinta magnética, incluyendo también los medidores de deformación, fue plana desde 10 hasta 10,000 cps.

Los sistemas instrumentales completos, inclusive los medidores de deformación, fueron seleccionados de manera que permitieran la reproducción fiel de las señales sísmicas para su análisis. La curva de respuesta plana cubrió la banda de las investigaciones de campo. Tampoco se utilizó el control automático de ganancia.

ACOPLAMIENTO GEOMETRICO

Procedimiento experimental

Se perforaron dos líneas de pozos para hacer los tiros y para colocar los medidores (Atchison, 1961). Los pozos fueron verticales y con profundidad de unos 30 pies. La profundidad de cada pozo fue ajustada de tal manera que el centro de las cargas y los medidores de deformación quedaran en un plano horizontal común.

Los pozos para los medidores tuvieron un diámetro de tres pulgadas, y los pozos de tiro un diámetro de $1\frac{5}{8}$ a 6 pulgadas. En la Figura 1 se muestra la sección vertical de uno de los arreglos de pozos.

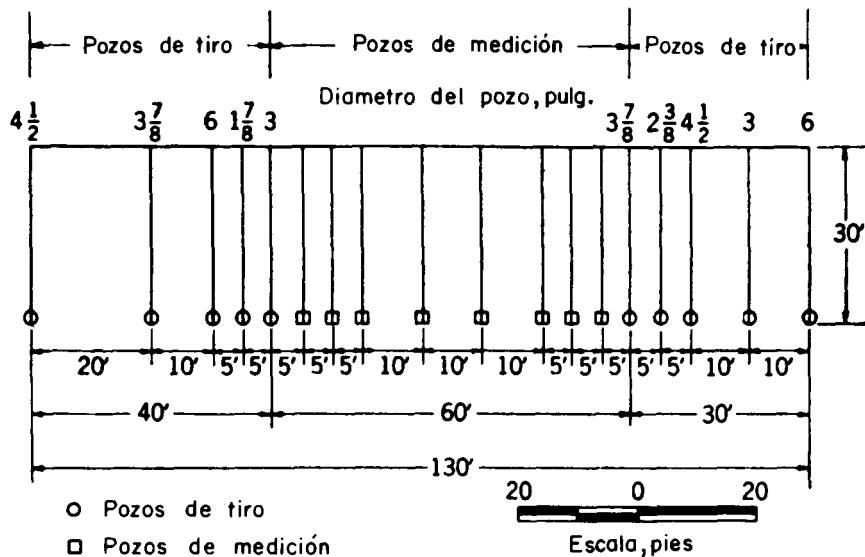


FIG. 1 Sección vertical típica – arreglo para acoplamiento geométrico

Se explotó un total de 18 tiros para estudiar cuatro condiciones de acoplamiento.

La tabla 1 muestra las magnitudes de las cargas, los diámetros de los pozos, y el porcentaje de acoplamiento. Se eliminó el efecto debido a la forma de la carga, mediante el recurso de mantener constante la relación longitud/diámetro (8 en el caso que se discute). Todas las cargas fueron de dinamita-gelatina de alta velocidad con peso específico 1.4 y velocidad de detonación de 18,000 pies/seg.

T a b l a 1

CONFIGURACION DE LA CARGA Y POZO DE TIRO

Carga y Dimensiones del Pozo			
Diámetro de la carga (pulgadas)	1 7/8	3	4 1/2
Longitud de la carga (pies)	1.25	2.00	3.00
Peso de la carga (libras)	2.1	8.5	29.0
Acoplamiento* (%)			
100	1 7/8	3	4 1/2
78	2 3/8	3 7/8	6
65	3	4 1/2	
49	3 7/8	6	

*—Se define el acoplamiento como la relación del diámetro de la carga al del pozo, multiplicada por cien.

Las cargas para los tiros totalmente acoplados se hicieron con varios cartuchos cortos expansibles que se colocaron dentro del pozo y fueron apisonados hasta llenar completamente el fondo del pozo.

En los tiros desacoplados, se usó un solo cartucho rígido, del diámetro y longitud apropiados, el cual fue centrado dentro del pozo mediante espaciadores de cartón que se colocaron a cada extremo de la carga. Al proceder de este modo resultó un espacio de aire anular y simétrico alrededor de la carga. Para contener el tiro se puso arena en la cima de cada carga. La profundidad de las cargas, 30 pies, fue suficiente para evitar la rotura de la roca superficial. El orden en que se realizaron los tiros fue desde los pozos exteriores hacia los que contenían a los medidores, con el objeto de evitar el registro de señales que de otra manera habrían sido propagadas a través de rocas fracturadas.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Trabajos anteriores y el análisis dimensional demuestran que en tiros perfectamente acoplados, la deformación es proporcional a la raíz cúbica de la carga y por lo tanto, para normalizar los resultados para una carga unitaria, la distancia debe ser dividida por la raíz cúbica del peso de la carga siempre y cuando se mantengan constantes la ferma y densidad de la misma.

Lo anterior significa que para dos tiros con diferente magnitud de carga se produce la misma amplitud de desplazamiento (o velocidad de partícula), a la misma distancia según la escala normalizada, cuando la distancia normalizada es igual al valor de la distancia dividida entre la raíz cúbica del peso de la carga.

Los datos indican que el acoplamiento tiene cierto efecto sobre la escala normalizada. Sin embargo, el efecto primordial del acoplamiento geométrico sobre la amplitud de la deformación puede ser determinado si se emplea esa escala normalizada dependiente de la raíz cúbica de la carga. La Figura 2 muestra las gráficas de la amplitud del desplazamiento contra la distancia normalizada, para acoplamientos de 100 y 50 por ciento. Se confeccionaron gráficas análogas para acoplamientos de 78 y 65 por ciento, y se ajustaron líneas rectas a cada una, por el método de los mínimos cuadrados.

Los métodos estadísticos no mostraron diferencias significativas para las pendientes. Se calculó una pendiente media, la cual se dibujó a través de los datos correspondientes a cada acoplamiento.

La Figura 2 muestra estas líneas para acoplamientos de 100 y 50 por ciento.

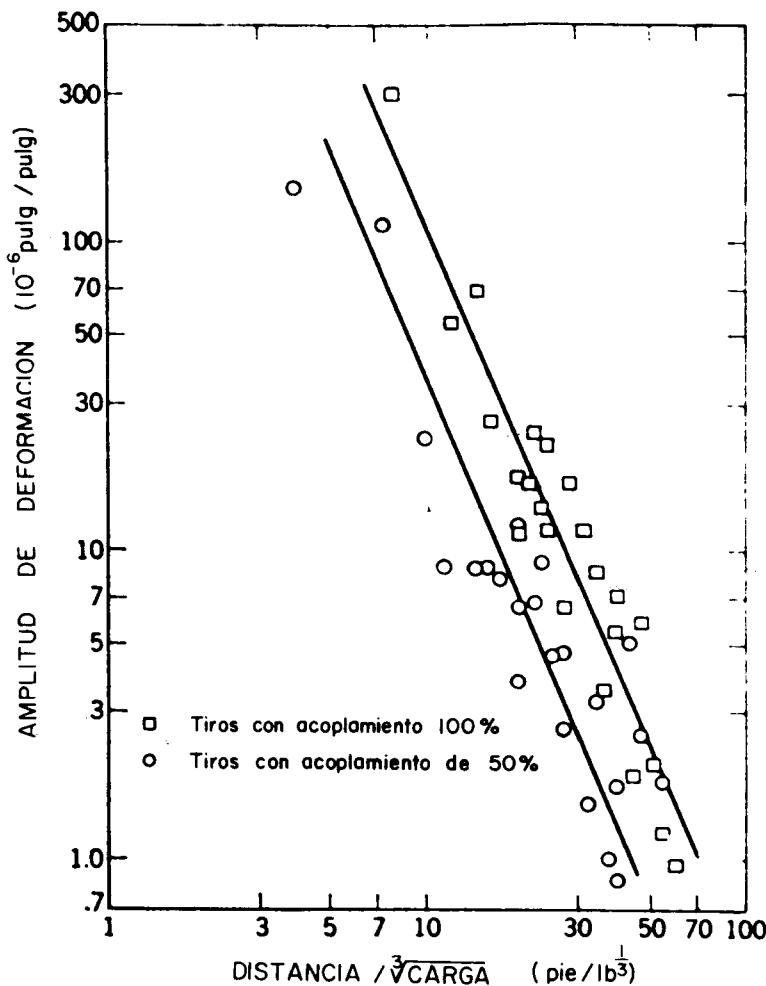


FIG. 2 Amplitud de la deformación vs distancia / $\frac{3}{\text{V}}\text{carga}$

La Figura 3 muestra las amplitudes de deformación relativas para las cuatro condiciones de acoplamiento. Las amplitudes, expresadas como porcientos de las amplitudes a pleno acoplamiento, fueron graficadas contra el acoplamiento.

La relación de dependencia es lineal en coordenadas log-log, con una pendiente aproximada de 1.5. Por lo tanto, la amplitud de deformación es aproximadamente proporcional a la potencia 1.5 de la relación entre el diámetro de la carga y el diámetro del pozo.

Las dimensiones de las cargas y pozos de tiro análogas a aquellas que prevalecen en la práctica de la exploración representarían acoplamientos de 78 y 65 por ciento, esto es, para cargas de 3 pulgadas dentro de pozos de $3\frac{7}{8}$ y $4\frac{1}{2}$ de pulgada, respectivamente.

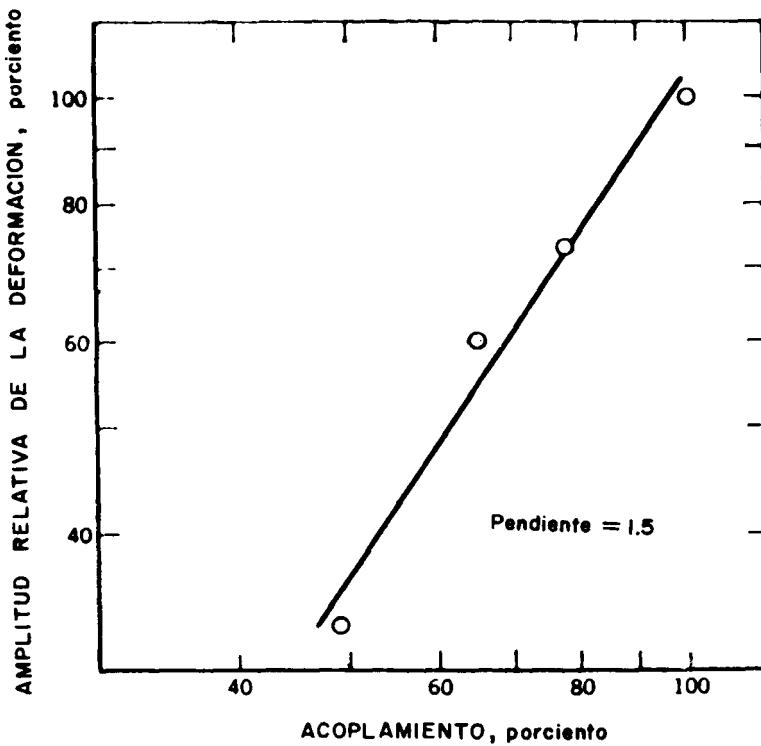


FIG. 3 Porciento de acoplamiento

Los resultados mostrados en la Figura 3 indican que las amplitudes relativas son 72 y 55 por ciento de la amplitud de los tiros perfectamente acoplados. Las consideraciones energéticas son aún más desfavorables, porque la

energía es proporcional al cuadrado de la amplitud del desplazamiento. Elevando al cuadrado los números 72 y 55, llegamos a las energías relativas de 50 y 30 por ciento, comparadas con las energías transmitidas a la formación en tiros totalmente acoplados.

El efecto causado en el acoplamiento geométrico cuando se rodea la carga por un espacio anular de fluido, tierra o arena, no fue estudiado. Parece razonable suponer que si al hacer el tiro el espacio anular estuviera lleno de aire, ello resultaría en la condición más mala que normalmente pudiera encontrarse. Los resultados también hicieron parecer razonable el que se trate de lograr un perfecto acoplamiento, independientemente de las condiciones que rodean a la carga.

El alto grado de acoplamiento geométrico que se logra con los explosivos del tipo de nitrato de amonio puede explicar en parte los éxitos recientes obtenidos con el uso de tales explosivos.

ACOPLAMIENTO POR IMPEDANCIA

Procedimiento Experimental.

Se perforó en la sal un arreglo lineal de pozos verticales para hacer los tiros y para colocar los medidores, a profundidades de 25 pies (Nicholls et al, 1960). Se instalaron varios medidores de deformación y un solo medidor de velocidad de partícula, en una serie de pruebas que tuvo un total de 24 tiros. En la Figura 4 se muestra un plano del área de las pruebas. Todos los pozos tuvieron un diámetro de tres pulgadas, y la profundidad también fue ajustada de manera que los centros de los medidores y de las cargas quedaran en un mismo plano horizontal. Se detonaron tres cargas en cada uno de los ocho pozos de tiro.

Se explotó una carga inicial de dos libras; entonces la cavidad resultante fue limpiada, medida y vuelta a cargar de manera que la segunda carga llenara completamente la cavidad. Este procedimiento se repitió para el tercer tiro. Para evitar la presencia de una cavidad entre el pozo de tiro y los medidores, los tiros se hicieron en orden desde los pozos extremos hacia el centro del arreglo. Los resultados que se obtuvieron de la repetición de tiros en los pozos no indicaron diferencias apreciables respecto de los tiros iniciales.

En la tabla 2 se muestran las propiedades de los cuatro explosivos que se emplearon.

TABLA 2.—PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS *

Tipos y símbolo del explosivo	Densidad ρ lb/pie ³	Velocidad de detonación medida C pies/seg.	Impedancia Característica (ρC) e lb·seg./pulg ³	Relación de impedancias, explosivo a roca (ρC) e/ ρC) r	Presión de detonación P 10 ⁶ lb/pulg ²	Parámetro de Mortero Balístico NRT 10 ³ lb·pie/lb	Energía Total NRT/(\gamma-1)
Gelatina de Alta							
Velocidad, 60% de potencia por peso							
HVG 60	89	20,200	32.3	.92	1,65	350	1,750
Semi-gelatina, con potencia volumétrica de 45%							
SG 45	69	15,300	19.0	.54	.83	350	1,520
TNT Granular							
TNT	62	15,900	16.7	.48	.75	320	1,600
Dinamita de Amonio Permisible							
AD-P	44	9,200	7.3	.21	.23	350	1,400

* Las propiedades de AD-P, SG 45, HVG 60 provienen de estudios anteriores del Bureau. Para el TNT, se midió g, C fue proporcionada por la Dependencia de Explosivos, del Bureau of Mines, Pittsburgh, y las propiedades restantes fueron calculadas.

Es evidente que los explosivos difieren bastante en cuanto a densidad, velocidad de detonación, y presión de detonación, aunque la energía aprovechable por libra de explosivo (indicada en las dos últimas columnas) es muy parecida. Se empleó un diseño factorial para la selección del explosivo a disparar en cada pozo, y para la determinación, ya se tratara de la primera, segunda, o tercera carga del pozo. La finalidad del diseño factorial fue hacer fortuitos los efectos debidos a variaciones en la masa de la sal, en las distancias de pozo a medidor, y en los tiros repetidos dentro de los mismos pozos. Los pesos de las cargas variaron entre 2 y 40 libras.

Se determinó la impedancia característica de la sal, que resultó ser 35 lb-seg/pulg³. Las relaciones de las impedancias del explosivo a la roca se dan en la tabla 2.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Para cada explosivo se graficó la deformación (una cantidad normalizada), contra la distancia normalizada, $R/W^{1/3}$, donde R es igual a la distancia pozo de tiro-medidor, y $W^{1/3}$ es la raíz cúbica del peso de la carga. Se usó esta normalización para eliminar las diferencias de peso de las cargas.

La Figura 5 muestra los resultados que se obtuvieron para los explosivos HVG 60 y AD-P. Los métodos estadísticos indican que se pueden trazar líneas individuales para cada explosivo, y que tales líneas tienen una pendiente común. Para comparación, se muestran los valores de la deformación calculados a partir de los datos de la velocidad de partícula.

Se obtuvieron curvas análogas para los otros explosivos, SG 45 y TNT.

El análisis estadístico permite usar dos ecuaciones del siguiente tipo:

$$\epsilon = K \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^n \quad \dots \dots \quad (2)$$

en donde:

ϵ = deformación compresiva máxima

K = constante de interceptación de la deformación, y

n = pendiente de la curva de regresión.

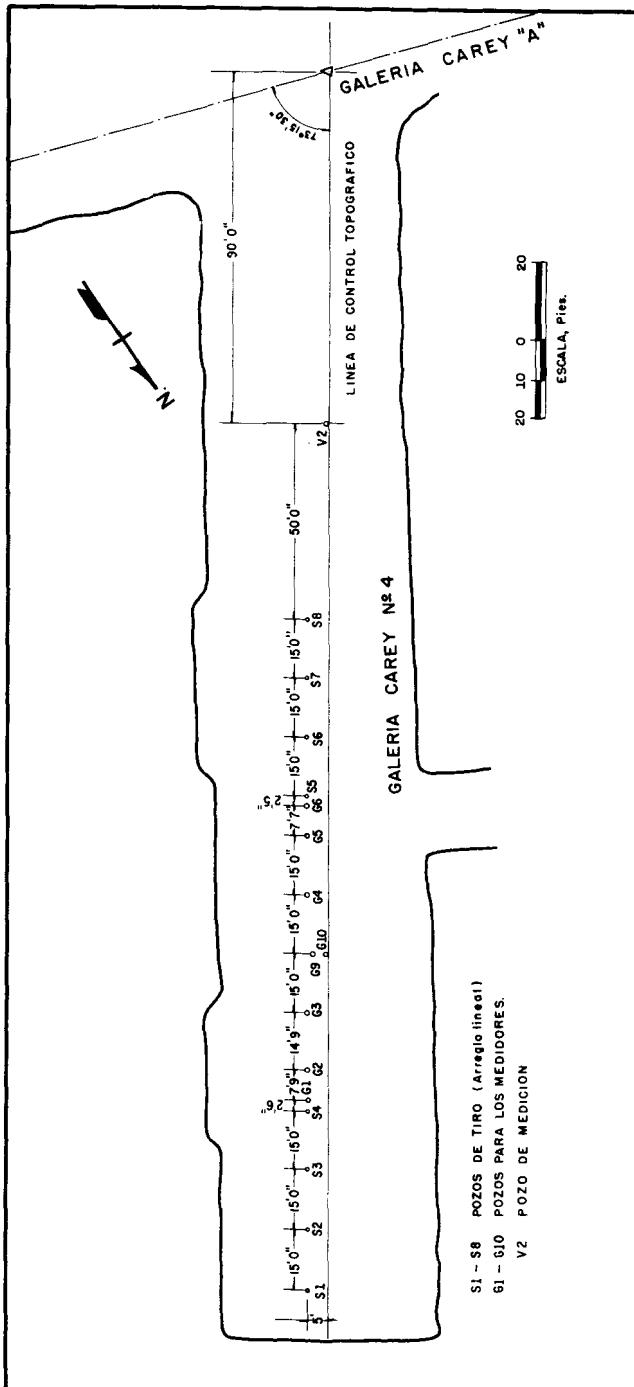
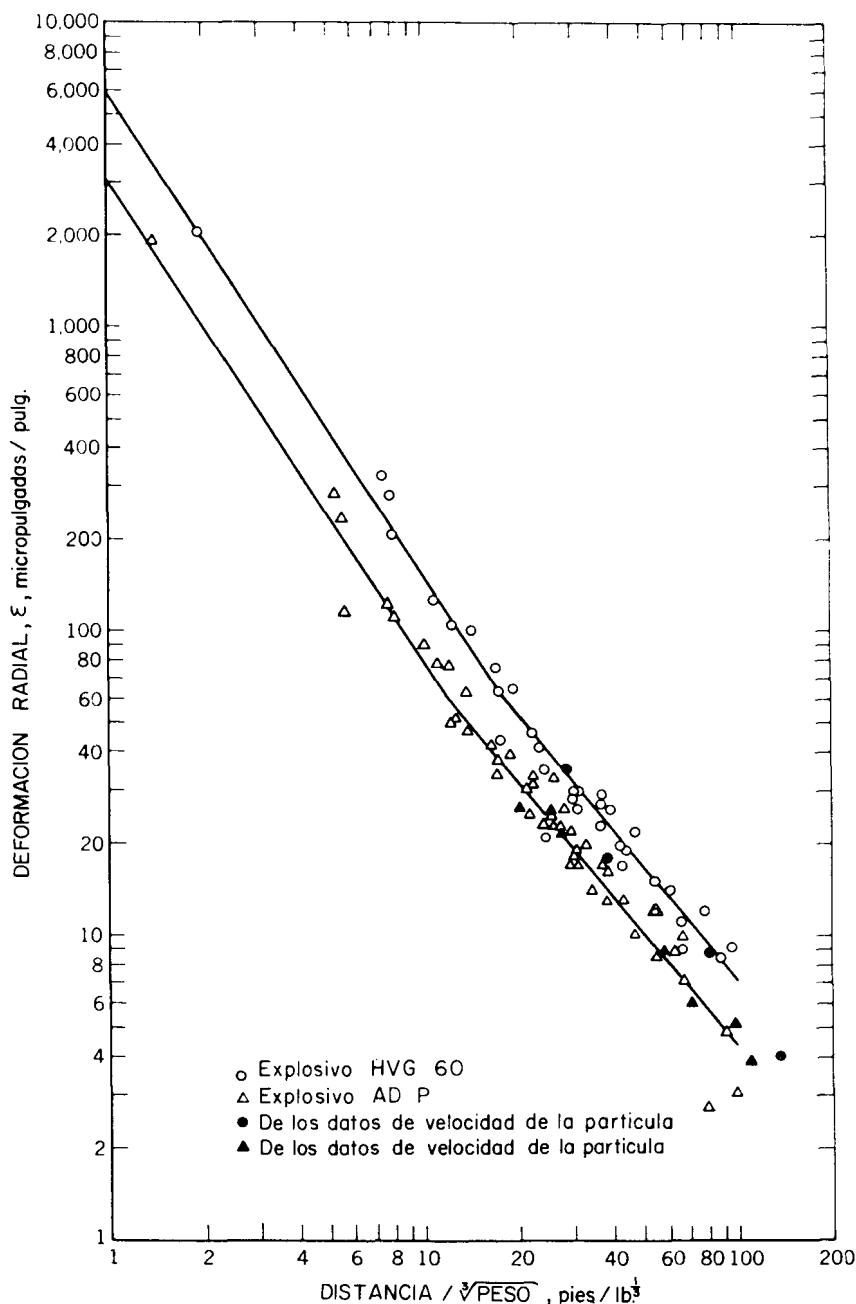


Figura 4 – PLANO del área de las pruebas de acoplamiento por impedancia.

Figura 5 Esfuerzo vs distancia / $\sqrt[3]{\text{peso}}$

T a b l a 3

CONSTANTES DE LA LEY DE PROPAGACION DE LA
DEFORMACION, Y DESVIACIONES STANDARD

Explosivo	Rango de $R/W^{1/3}$	Exponente		Intercepción	
		n	S_n	K	SK
AD—P	1—11	—1.57	± .068	3,020	+ 390
					— 350
	11—100	—1.25	± .031	1,360	+ 150
					— 140
TNT	3—11	—1.57	± .068	4,250*	
	11—100	—1.25	± .031	1,830	+ 220
					— 190
SG 45	1—16	—1.57	± .068	5,490	+ 920
					— 790
	16—100	—1.25	± .031	2,180	+ 260
					— 230
HVG 60	1—18	—1.57	± .068	5,820	+ 1,030
					— 870
	18—100	—1.25	± .031	2,240	+ 270
					— 240

* Intercepción estimada, debido a insuficiencia de los datos.

El cambio aparente de la pendiente se traduce en valores más altos de K y de n para los datos cercanos. La tabla 3 da las constantes de intercepción, pendientes y desviaciones standard para las leyes de propagación de la deformación para cada uno de los explosivos. La energía de deformación radial fue calculada a partir de la relación:

$$E_a = \frac{\rho C^3}{2} \int_0^t \epsilon_r^2 \cdot dt \quad \dots \dots (3)$$

en donde:

E_a == Energía total de deformación radial por unidad de área,

C == velocidad longitudinal de propagación,

ϵ_r == deformación radial,

t == tiempo,

ρ == densidad.

E_a fue entonces medido según escala de $W^{1/3}$ y graficada como función de $R/W^{1/3}$. La propagación de la energía de deformación radial por unidad de área puede representarse por medio de ecuación:

$$E_a / W^{1/3} = K (R/W^{1/3})^b \quad \dots \dots (4)$$

en donde:

K == constante de interceptación de la energía de deformación,

b == exponente de extinción de la energía de deformación.

Esta vez también los métodos estadísticos permitieron el uso de una pendiente común para todos los explosivos. La cantidad limitada de datos para las distancias cortas permitieron la presentación de los datos de energía solamente sobre las distancias normalizadas comparables que produjeron la pendiente

más pequeña para los datos de la deformación. La Figura 6 muestra una gráfica de la energía de deformación contra distancias medias en la escala normalizada, para HVG 60 y AD-P. Para comparación, se muestra la energía de deformación calculada de la velocidad de partícula. Se obtuvieron gráficas análogas para los otros dos explosivos. Los datos para pequeñas distancias normalizadas, aunque estén indicados, no fueron usados en los cálculos porque indicaron una pendiente mayor. Si no hay ensanchamiento del pulso, la pendiente de la energía de deformación, b , debería ser el doble de la pendiente de deformación, n , porque la energía de deformación es proporcional a la amplitud de deformación elevada al cuadrado. Una comparación de la pendiente de la energía, —2.34, y la pendiente de la deformación, —1.25, indica que hay alguna absorción y ensanchamiento del pulso a medida que viaja hacia el exterior.

La Tabla 4 da las constantes de propagación de la energía de deformación. La interceptación de la energía total fue calculada para comparación con los resultados previos reportados en forma semi-logarítmica. H representa la energía total por libra de explosivo a la distancia normalizada de uno, la cual, para la mayoría de los tipos de rocas se aproxima al radio de la cavidad equivalente mencionado por Sharpe (1942) y otros.

La solución teórica al problema de un pulso de presión aplicado a una cavidad esférica en un medio elástico (Duvall, 1953) demuestra que:

$$\epsilon = \alpha \frac{P_m}{\rho C^2}, \quad (5)$$

en la que

ϵ = amplitud de la deformación radial.

P_m = presión aplicada en el medio,

ρ = densidad de la roca y,

C = velocidad de ondas longitudinales de la roca.

α = indica proporcionalidad (N. del T.)

T a b l a 4

 CONSTANTES DE PROPAGACION DE LA ENERGIA
 DE DEFORMACION

Explosivo	Rango de la Distancia Escalada $R/W^{1/3}$	Intercepción de la energía Unitaria $Ea/W^{1/3}$	Energía Total H^* 10^3 lb-pie/lb	Pendiente de la energía b
AD-P	11—100	1,010	12.69	-2.34
TNT	11—100	1,650	20.73	-2.34
SG 45	16—100	2,340	29.41	-2.34
HVG 60	18—100	2,550	32.04	-2.34

$$H^* = 4\pi (R/W^{1/3})^2 \cdot (Ea/W^{1/3}) \quad \text{en la que } R/W^{1/3} = 1 .$$

Considerando la magnitud de la carga, la distancia recorrida, y la atenuación, se puede escribir la ecuación (5) como sigue:

$$\epsilon = \alpha \left(\frac{P_m}{\rho C^2} \right) \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^n , \quad (6)$$

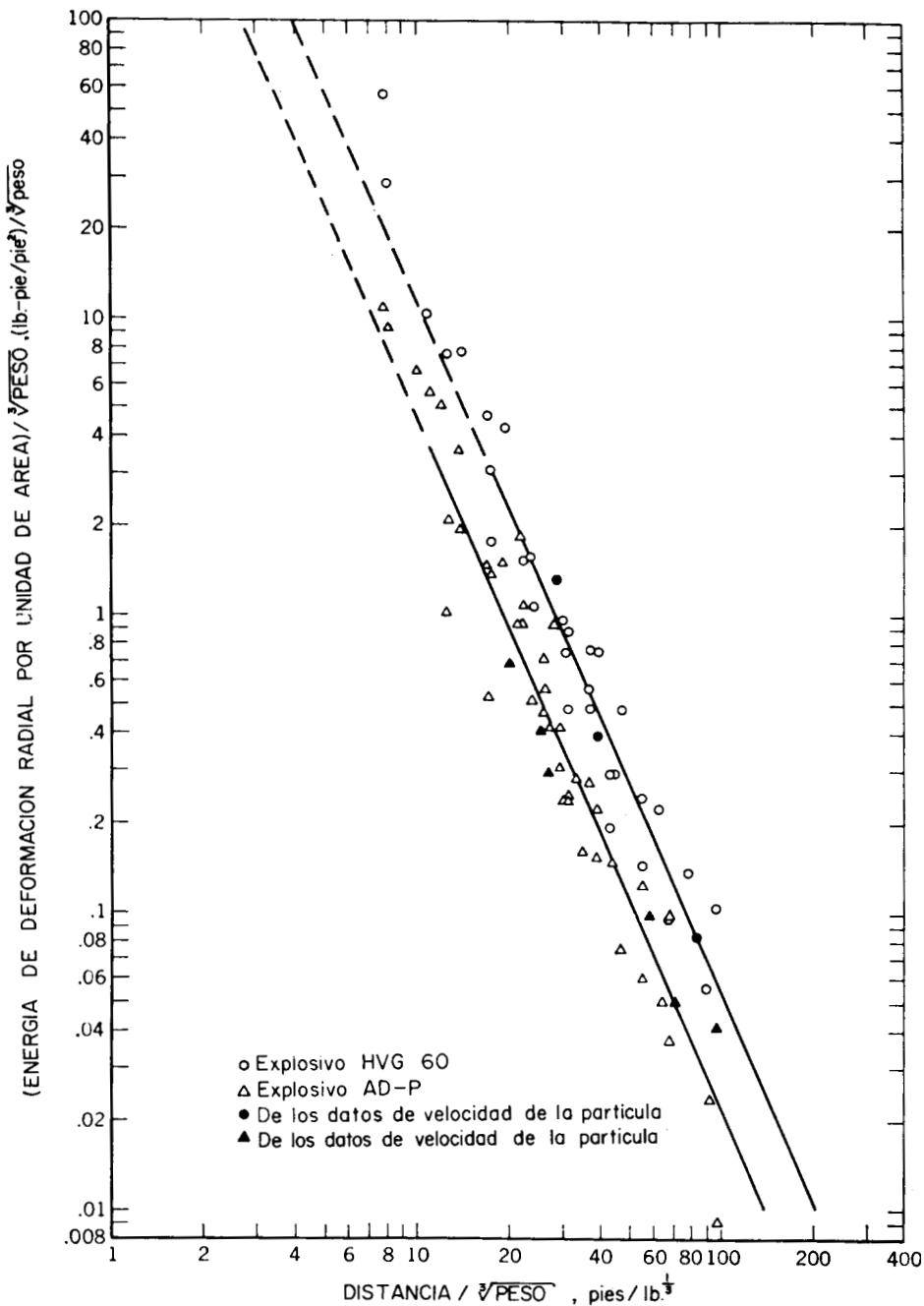
donde

$R/W^{1/3}$ = distancia normalizada,

n = exponente o pendiente de la línea de regresión.

Esta ecuación es análoga a la ley de propagación de la deformación (ecuación 2). Como todos los ensayos fueron realizados en el mismo tipo de roca, ρC^2 fue constante. Por lo tanto, combinando las ecuaciones (2) y (6) resulta:

$$K = A P_m, \quad (7)$$

Figura 6. Energía de deformación / $\sqrt[3]{\text{peso}}$ vs Distancia / $\sqrt[3]{\text{peso}}$

en la que

K = constante de interceptación de la deformación,

P_m = presión aplicada en el medio, y

A = una constante.

Si se supone que la presión de detonación iguala a la presión o esfuerzo en la pared de la cavidad, una gráfica de la constante de interceptación de la máxima deformación, K , contra la presión de detonación P , debería ser lineal. La Figura 7 muestra gráficamente que la relación entre K y P es una línea curva. Por consiguiente, el esfuerzo en el medio, en la pared de la cavidad, debe diferir de la presión de detonación si la deformación ha de ser directamente proporcional al esfuerzo en la ecuación (7). El efecto de la relación de la impedancia característica del explosivo a la de la roca puede usarse para hacer lineal la relación esfuerzo-deformación de la Figura 7.

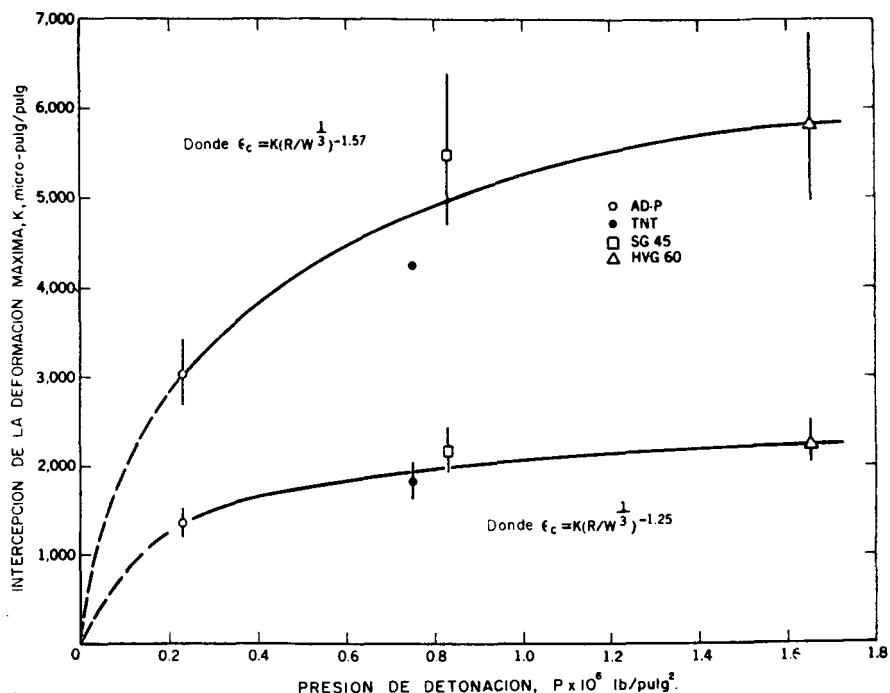


Figura 7 Deformación máxima vs presión de detonación.

En primera aproximación, debería esperarse que existiera la siguiente relación en la pared de la cavidad:

$$K = A P f \left[\frac{(\rho C)_e}{(\rho C)_r} \right], \quad (8)$$

en la que

A = una constante,

K = interceptación de la deformación máxima.

P = presión de detonación,

ρ = densidad del explosivo o de la roca,

C = velocidad de detonación del explosivo o velocidad de propagación longitudinal de la formación,

$(\rho C)_e$ = impedancia característica del explosivo,

$(\rho C)_r$ = impedancia característica de la formación, y

$f [(\rho C)_e / (\rho C)_r]$ = función de la razón de la impedancia característica del explosivo a la de la formación.

El producto de P y f en la ecuación (8) representa el esfuerzo producido en la pared del agujero. La función f relaciona la presión del gas en la cavidad con el esfuerzo sobre la roca en la pared de la cavidad. Puede hacerse una determinación empírica de f al graficar K/P en función de $(\rho C)_e / (\rho C)_r$, del modo que se indica en la Figura 8.

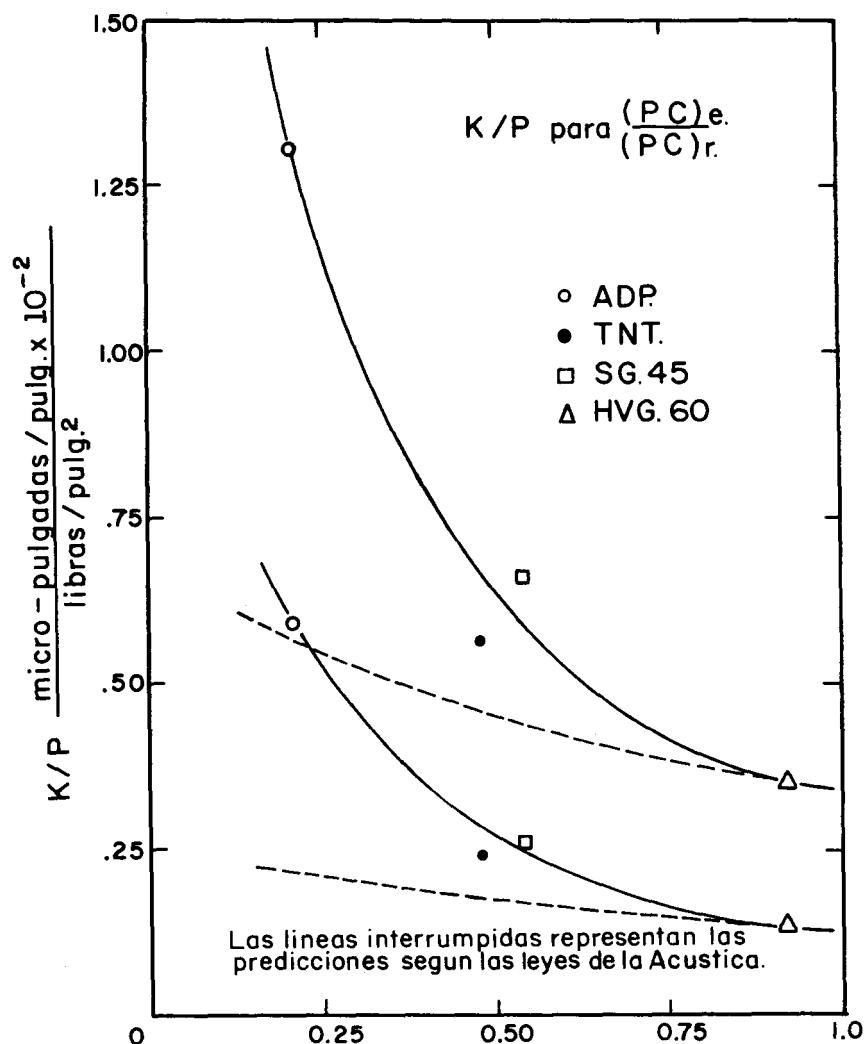


FIG. 8 — Deformacion maxima (presion de deformacion) Vs. relacion de impedancias caracteristicas.

Las curvas interrumpidas representan la ecuación de la teoría elástica que dice:

$$\frac{K/P}{1 + \frac{(\rho C)_e}{(\rho C)_r}} = \frac{2}{z} \quad (9)$$

Es interesante notar que el efecto de la razón de impedancia característica es más intenso que la sencilla relación que se deduce de la teoría elástica. Las curvas de la Figura 8 permiten el cálculo del esfuerzo en el medio para cada explosivo. Si la razón de impedancia característica es uno, se supone que el esfuerzo en el medio es igual a la presión de detonación. Si la razón es menor que uno, se supone que el esfuerzo en el medio es mayor que la presión de detonación. Por consiguiente, el esfuerzo en el medio puede ser calculado mediante la siguiente ecuación, usando los valores de las curvas de la Figura 8:

$$P_m = P \frac{(K/P)_{z=a}}{(K/P)_{z=1}} \quad (10)$$

en la que

P_m = esfuerzo en el medio,

P = presión de detonación,

z = relación entre las impedancias características,

$(K/P)_{z=a}$ = valor de K/P tomado de la curva, donde $a=z$ representa el valor de z para cada explosivo, y

$(K/P)_{z=1}$ = valor de K/P tomado de la curva, donde $z=1$.

Para cada una de las curvas, el esfuerzo en el medio para cada explosivo está calculado por medio de la ecuación (10) y graficado contra K en la Figura 9.

Las líneas rectas trazadas a través de estos puntos y el origen indican que la deformación dinámica es directamente proporcional al esfuerzo en el medio.

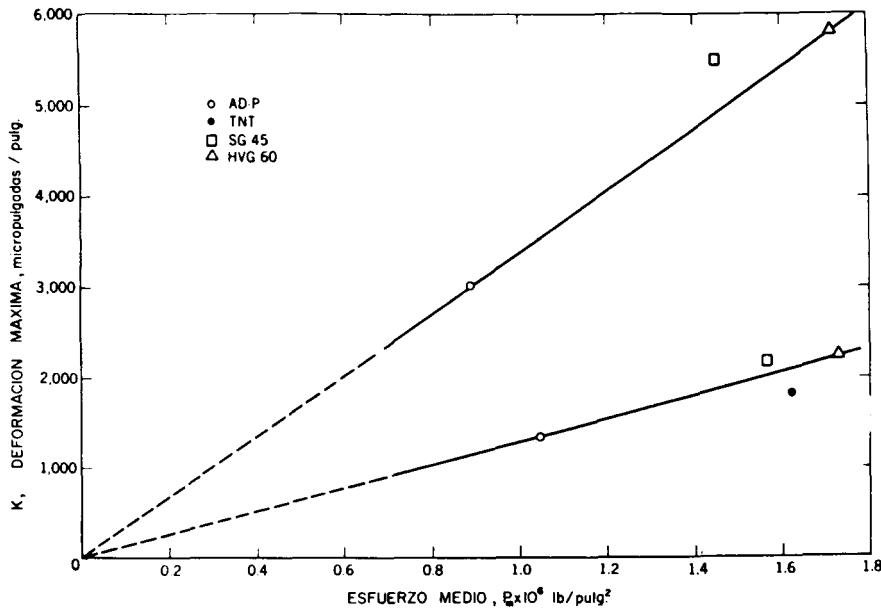


Figura 9 Deformación máxima vs esfuerzo medio

Los resultados relativos a la energía de deformación indican también que la igualación de impedancia entre explosivo y roca es de primera importancia en las consideraciones energéticas. El parámetro de mortero balístico, NRT (Tabla 2), en el que N es el número de moles de los productos gaseosos de la detonación por unidad de peso del explosivo, R la constante del gas, y T la temperatura de detonación, se acepta generalmente como una medida relativa de la energía explosiva. Si se grafica la energía de deformación radial total por libra de explosivo, H , como función de NRT para los explosivos usados en la sal (Figura 10), no existe correlación. Esto no es muy sorprendente, porque la energía transferida a la formación es función no sólo de la energía explosiva, sino también de la roca. Si se considera el efecto de la equiparación de la impedancia característica sobre la energía transferida a la formación, al graficar H/NRT tomado de la Tabla 5, contra la relación de las impiden-

cias características, $(\rho C)_e / (\rho C)_r$, existe una buena correlación (véase la Figura 11). Es evidente que los explosivos que poseen impedancias características que igualan más de cerca a la impedancia de la roca, transfieren más energía a la formación.

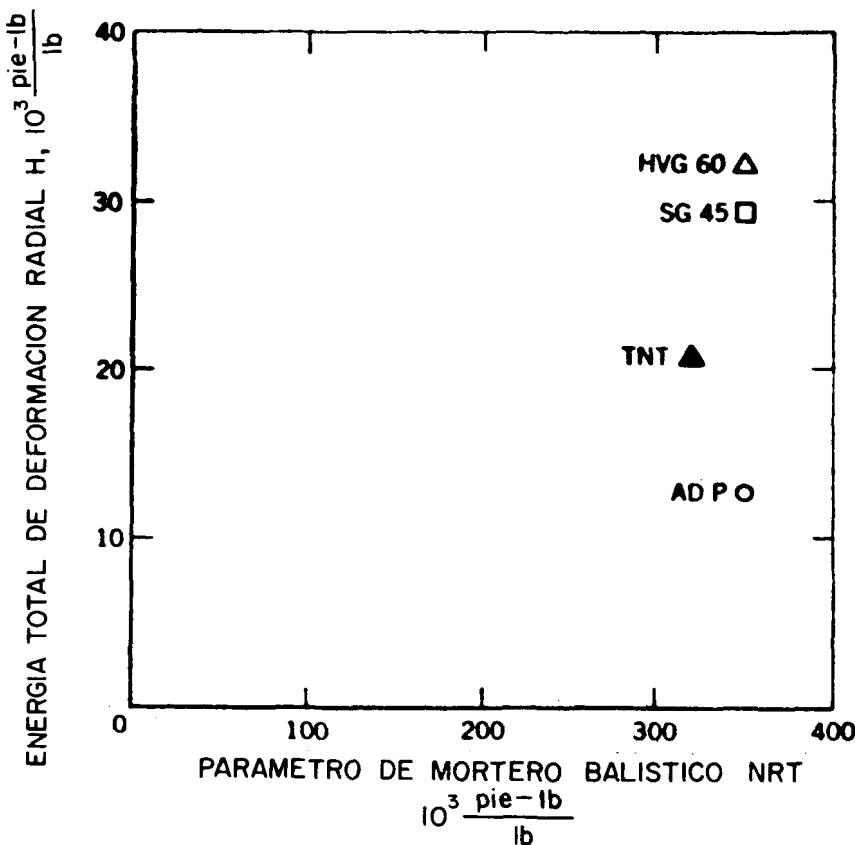


FIG. 10 Energía de deformación vs energía explosiva

La energía total del explosivo puede ser calculada de $NRT/\gamma - 1$, en la que γ es la relación de los calores específicos. El porcentaje calculado de la energía explosiva transferida a la roca puede entonces expresarse como la relación H a $NRT/\gamma - 1$. Como se ve en la Tabla 5, la energía de deformación representa de 0.9 a 1.9 por ciento de la energía disponible. Dado que la ener-

gía de deformación representa solo la energía potencial en la roca, la energía total transferida a ésta es aproximadamente de 1.8 a 3.7 por ciento de la energía disponible en el explosivo. Investigaciones anteriores (Fogelson et al, 1959) han indicado que de 10 a 18 por ciento de la energía disponible ha sido transferida a la roca en el caso del granito. Como las intercepciones de la energía de deformación no son calculables para las mediciones cercanas en la sal, no es posible dar valores absolutos. Basándose enteramente en las dos intercepciones para el caso de la sal (Tabla 3), no es difícil concluir que una transferencia de energía de 10 a 20 por ciento es más realista que las cifras de 1.8 a 3.7 por ciento dadas arriba.

T a b l a 5

ENERGIA DE DEFORMACION RELATIVA TRANSFERIDA
A LA FORMACION

Explosivo	Relación de Impedancias Características $(\rho C)e/(\rho C)r$	$H/NRT \times 100$ por ciento	$H/NRT / (\gamma - 1) \times 100$ por ciento
AD-P	.21	3.63	.91
TNT	.48	6.48	1.30
SG 45	.54	8.40	1.94
HVG 60	.92	9.15	1.83

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

La máxima amplitud sísmica o energía es generada en una roca por la detonación de una carga explosiva cuando el diámetro de ésta es igual al del agujero y la impedancia característica del explosivo es igual a la de la formación.

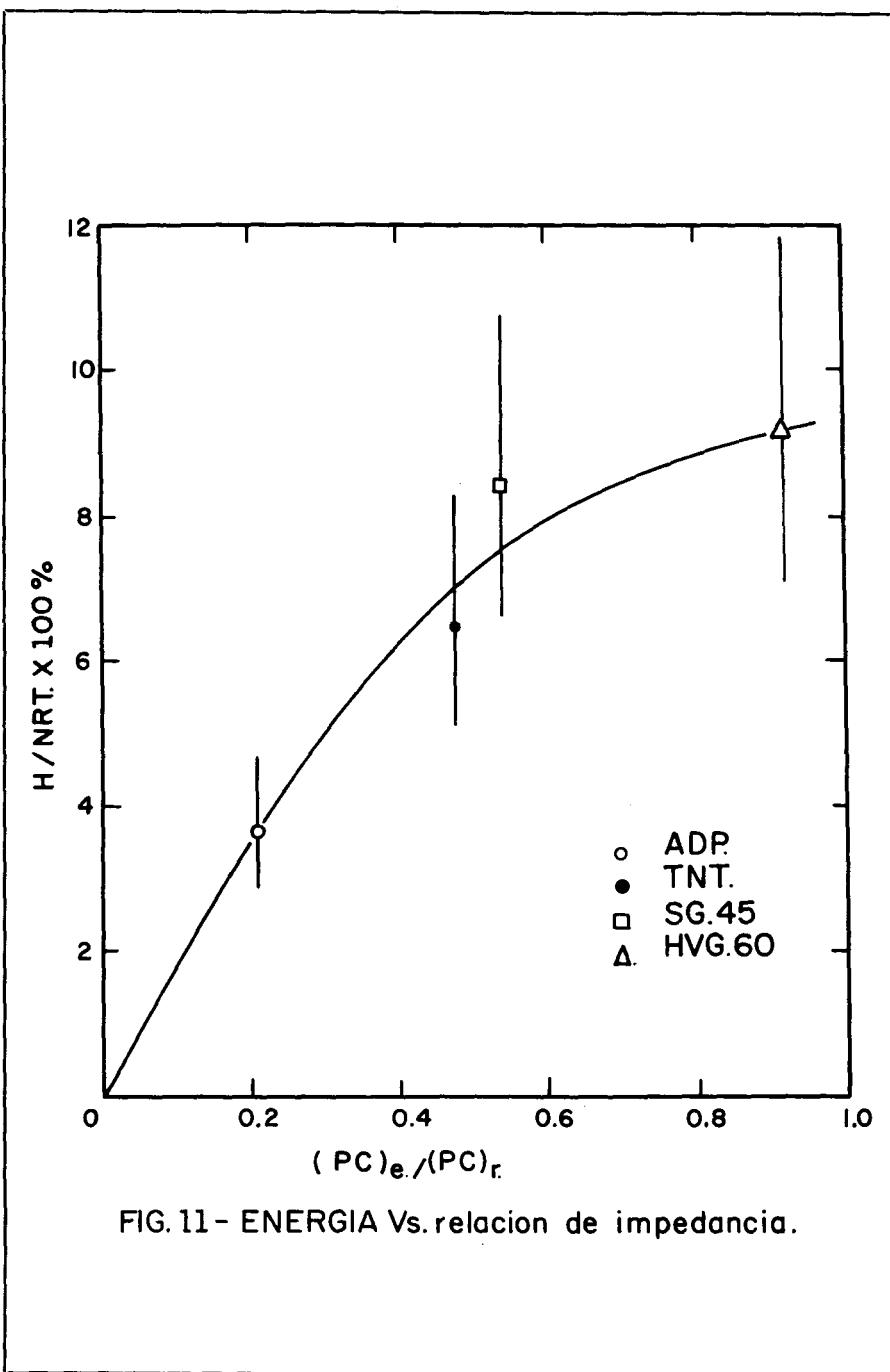


FIG. 11 - ENERGIA Vs. relacion de impedancia.

R E F E R E N C I A S

Atchison, T. C., 1961, The effect of coupling on explosive performance: Quarterly of the Colorado School of Mines, v. 56, n. 1, pp. 164-170.

_____, Duvall, W. I., and Obert, L., 1956, Mobile laboratory for recording blasting and other transient phenomena: Bureau of Mines R. I. 5197, 22 pp.

Duvall, W. I., 1953, Strain wave shapes in rock near explosions: Geophysics, v. 11, n. 3 pp. 310-323.

Fogelson, D. E., Duvall, W. I., and Atchison, T. C., 1959, Strain energy in explosion-generated strain pulses: Bureau of Mines R. I. 5514, 17 pp.

Nicholls, H. R., Hooker, V. E., and Duvall, W. I., 1960, Dynamic rock mechanics investigations: Bureau of Mines Report on Project COWBOY, 45 pp.

Obert, L. and Duvall, W. I., 1949, A gage and recording equipment for measuring dynamic strain in rock: Bureau of Mines R. I. 4581, 11 pp.

Sharpe, Joseph A., 1942, The production of elastic waves by explosion pressures, I. Theory and empirical field observations: Geophysics, v. 18, n. 2, pp. 144-154.

“METODO GRAFICO PARA ANALIZAR REGISTROS DE VELOCIDAD”

Por: *C. R. Davis.* Sheil Oil Co., Midland, Tex. *)

Traducido por: *Jorge R. Lazo.* **))

Este método se ha aplicado con provecho en varios pozos. Los ejemplos que aquí se incluyen demuestran que, el método gráfico: (1) estipula información negativa, (2) localiza petróleo en ausencia de otros datos positivos, (3) confirma el descubrimiento de petróleo llevado a cabo por otros medios.

La introducción de registros de velocidades acústicas, tales como los proporcionados por Schlumberger Well Surveying Corp's Sonic log y por Lane Wells Co.'s Acoustilog, eliminó algunos de los problemas inherentes a los registros neutrónicos. Estos registros de velocidad de dos detectores están casi libres de la influencia del diámetro del pozo, del lodo de perforación, de la posición de la sonda, y del efecto de capas delgadas y de estratos adyacentes.

Desafortunadamente los registros de velocidades acústicas no se pueden obtener en un rango tan amplio de condiciones como sucede con los registros neutrónicos, y tienen sus propios inconvenientes para la determinación de porosidades. Dos de estos últimos factores son: el efecto sobre la respuesta del registro de velocidad debido a diferencias litológicas, y el efecto debido a la presión diferencial entre la presión hidrostática y la de yacimiento. Sin embargo, por medio de la combinación del registro de velocidad con un buen registro de resistividad, se reducen la mayoría de estos efectos adversos.

*) Publicado en inglés en “Oil and Gas Journal”. Vol. 58, No. 40, Octubre 3, 1960.

**) Gerencia de Exploración, Petróleos Mexicanos.

Determinación de Porosidad.—Se ha encontrado la porosidad, a partir de los registros de velocidades acústicas, por su correlación con las velocidades de las ondas longitudinales. La siguiente es la fórmula más común para efectuar esta correlación según la propuso Wyllie en la llamada relación de tiempos promedio:

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (1)$$

en donde:

t = intervalo de tiempo de tránsito, en microsegundos por pie.

V = velocidad medida, en pies por segundo.

V_f = velocidad del líquido intersticial, en pies por segundo.

V_m = velocidad del grano constituyente de la roca, en pies por segundo.

ϕ = porosidad fraccional.

Una velocidad registrada de 12,000 pies por segundo en una arenisca limpia ($V_m = 18,000$ pies por segundo) con una V_f promedio de aproximadamente 5,000 pies por segundo correspondería, por consiguiente, a una porosidad de 19% :

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{\phi}{V_m} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{(1/V - 1/V_m)}{(1/V_f - 1/V_m)} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{(1/12,000 - 1/18,000)}{(1/5,000 - 1/18,000)}$$

$$\phi = 19\%$$

Las gráficas se han construido para simplificar el cálculo y para lo cual se han determinado los valores promedio de V_m para diferentes tipos de rocas. En su aplicación más simple, todo lo que se necesita para encontrar la porosidad, es el conocimiento del tipo de roca. A partir de esto se escoge una velocidad matriz promedio y la porosidad se determina en una gráfica.

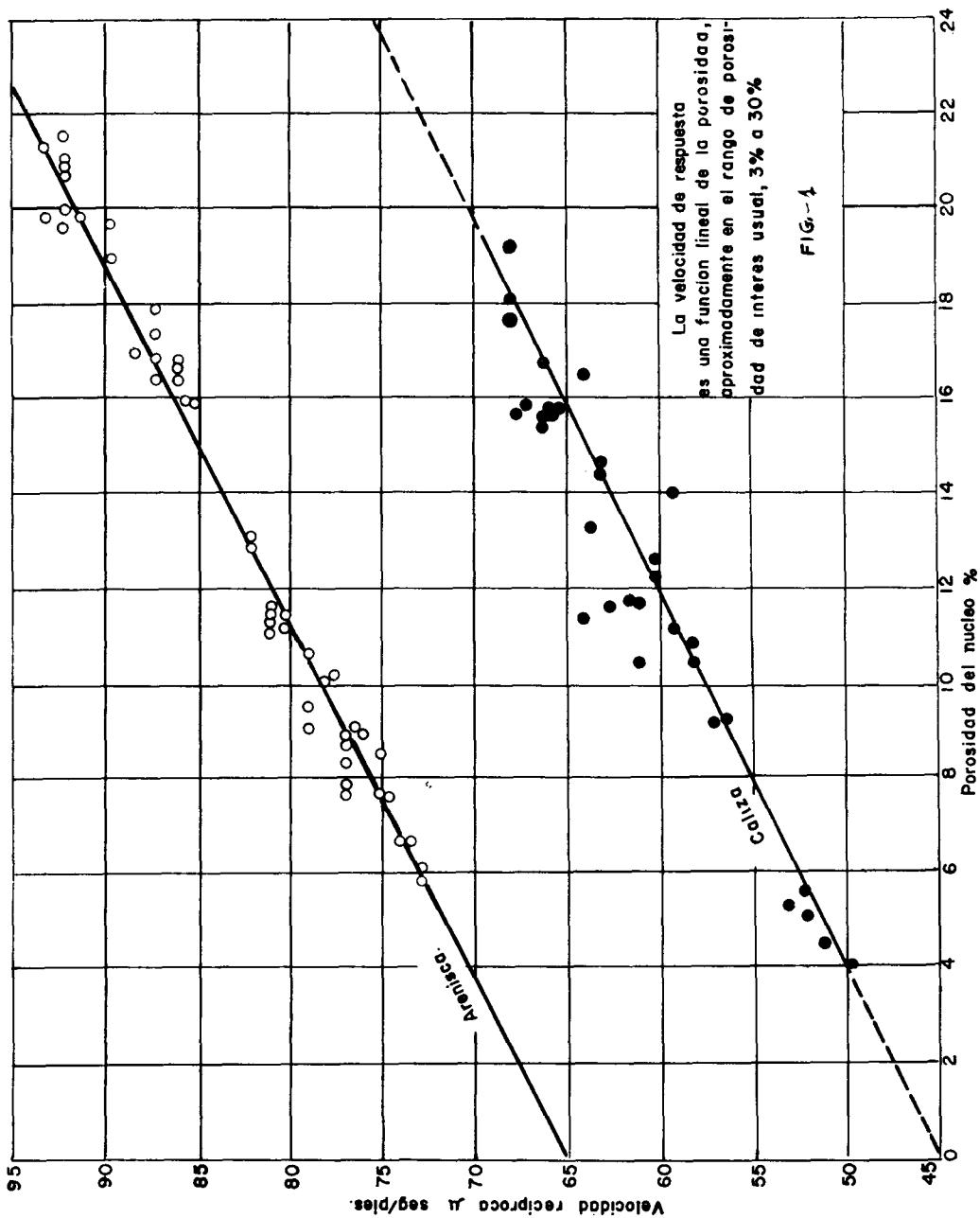
Es evidente que la ecuación de tiempos promedio es inadecuada, puesto que, la velocidad de la onda acústica, se relaciona con otros factores además de la velocidad matriz y la del líquido. No se intentará aquí la explicación de las ondas acústicas complejas. En lugar de ello se presenta un método gráfico para la aplicación de registros de velocidades con ejemplos. Este método demuestra ser un buen medio de usar los actuales registros de velocidades cuando se desconoce la velocidad matriz de la roca.

POROSIDAD VS. VELOCIDAD

La relación entre la respuesta del registro acústico y la porosidad es lineal o casi lineal dentro del rango de interés usual, digamos de un 3 a un 30%.

Se han graficado las porosidades de los núcleos contra las respuestas de los registros en numerosos ejemplos publicados por las compañías que los efectúan. En tales casos se ha visto que la mayor parte de la información es lineal. La Figura 1 ilustra una relación típica de areniscas y calizas. Si la mejor línea entre los puntos, tales como los de la figura 1, es una línea recta, no se necesita ninguna prueba adicional de linealidad.

La serie de núcleos de calizas de la figura 1 es de un pozo de explotación abandonado en Upton County, Texas. La serie de núcleos de areniscas es de un pozo productor en la arena Yates en Winkler County, Texas. La velocidad matriz en la figura 1 es de solamente 15,400 pies por segundo, la cual varía notablemente del valor promedio de 18,000 dado en ocasiones por Schlumberger. Si no se dispone de la información de núcleo, y se ha usado el valor



promedio para calibrar los registros, podría haber un error, en la determinación de la porosidad, por lo menos de un 5%. Esto demuestra la importancia de conocer con precisión la velocidad matriz aplicable.

(N. del T.: Para el caso anterior en que la velocidad matriz cambia de 18,000 pies/seg. a 15,400 pies/seg. el porcentaje de porosidad varía de 19% a 13%).

VELOCIDAD MATRIZ

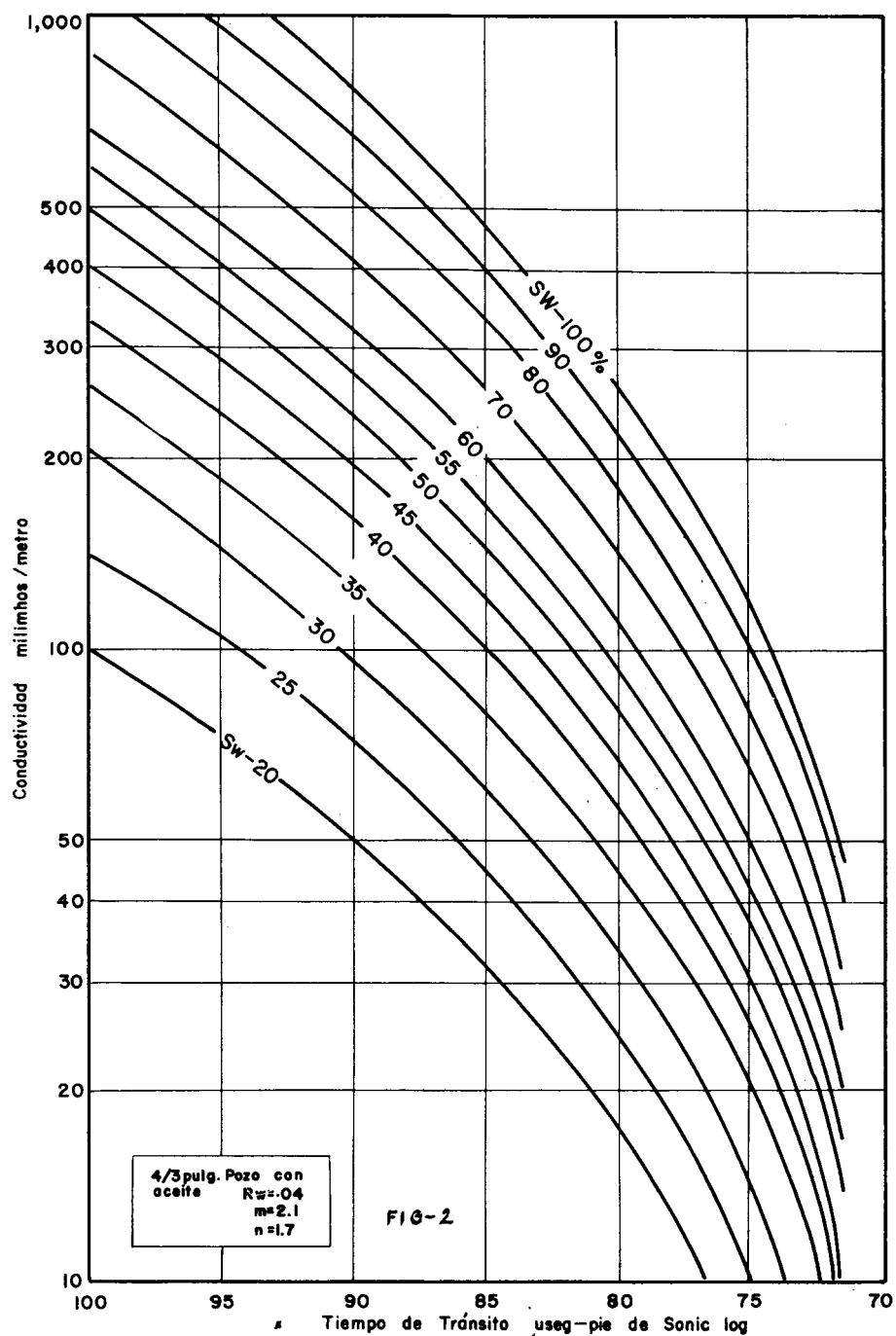
No es correcto escoger un valor promedio de velocidad matriz para interpretar un registro. La tabla 1 muestra el amplio rango que tienen las velocidades matrices.

Wyllie y otros autores han proporcionado información experimental concerniente a la relación entre la velocidad y la porosidad en areniscas; ésta ha sido resumida y discutida recientemente por Pickett y Talbot. Esta información sugiere que la relación porosidad-velocidad no es perfectamente lineal y que, especialmente en el rango de muy baja porosidad, no se debe esperar linealidad. En consecuencia, las "velocidades matrices" obtenibles de la figura 1 por extrapolación de la información de núcleo hasta la porosidad cero, no son velocidades matrices verdaderas sino velocidades seudomatrices o "velocidades matrices extrapoladas". Por lo consiguiente, el conocimiento de la velocidad matriz apropiada es de primordial importancia en la interpretación del registro de velocidades, aunque sabemos que, probablemente, no encontraremos la velocidad matriz verdadera a partir de una extrapolación lineal de la información del núcleo.

Para la mayor parte de los trabajos de interpretación la mejor solución parece ser el aprovechamiento de extrapolaciones lineales de la información conocida. Estas "velocidades matrices extrapoladas" pueden determinarse a partir de la información del núcleo y por medios gráficos. Son convenientes y de práctica aplicación e introducen sólo un pequeño error.

METODO GRAFICO

Durante algunos años ha sido común graficar la respuesta de los registros radioactivos contra las respuestas de los registros de resistividad sobre papel logarítmico. Tales gráficas son convenientes para mostrar cambios en la saturación del agua.



Con el advenimiento de los registros de velocidades acústicas se intentó un método de análisis similar usando el registro de velocidad en lugar del registro neutrónico.

La Figura 2 muestra una gráfica de curvas de saturación de agua empleada por la Shell Oil Co en 1958 para el campo Scarborough en el Oeste de Texas. Las líneas de la figura 2 son curvas y fueron determinadas con saturaciones de agua conocidas a partir de núcleos tomados en aceite.

La Figura 3 se graficó en un tipo de papel gráfico más útil que el papel semilogarítmico. Este papel se emplea para situar la raíz cuadrada de la recíproca de la resistividad verdadera sobre la ordenada contra la recíproca de la velocidad sobre la abscisa.

El desarrollo de este tipo de gráfica se le acredita a James E. Berry y a A. T. Hingle de la Socony Mobil Oil Co., Inc.

Para aplicar el papel se escoge un intervalo acuífero conocido, de preferencia en la misma formación y muy próximo al intervalo en discusión. Los valores de resistividad se sitúan directamente sobre la ordenada y los valores correspondientes al intervalo de tiempo de tránsito, tomados del registro de velocidad, se sitúan sobre la abscisa. En una zona de agua deberá resultar una línea recta, véase la figura 3.

Se le pueden dar cuatro aplicaciones a esta línea recta:

1.—La línea puede ser extrapolada hasta la abscisa en donde la resistividad es infinita, la porosidad es cero y el tiempo de tránsito indicado es la recíproca de la velocidad matriz ($1/V_m$).

2.—Una vez conocida V_m la abscisa se puede calibrar en términos de porosidad, de preferencia por medio de información empírica, Figura 1, o por datos publicados, Figura 4.

3.—La resistividad del agua en la formación R_w se puede obtener o comprobar. Si se supone a " m " igual a 2.0. en la relación de Archie:

$$\phi^m F = 1$$

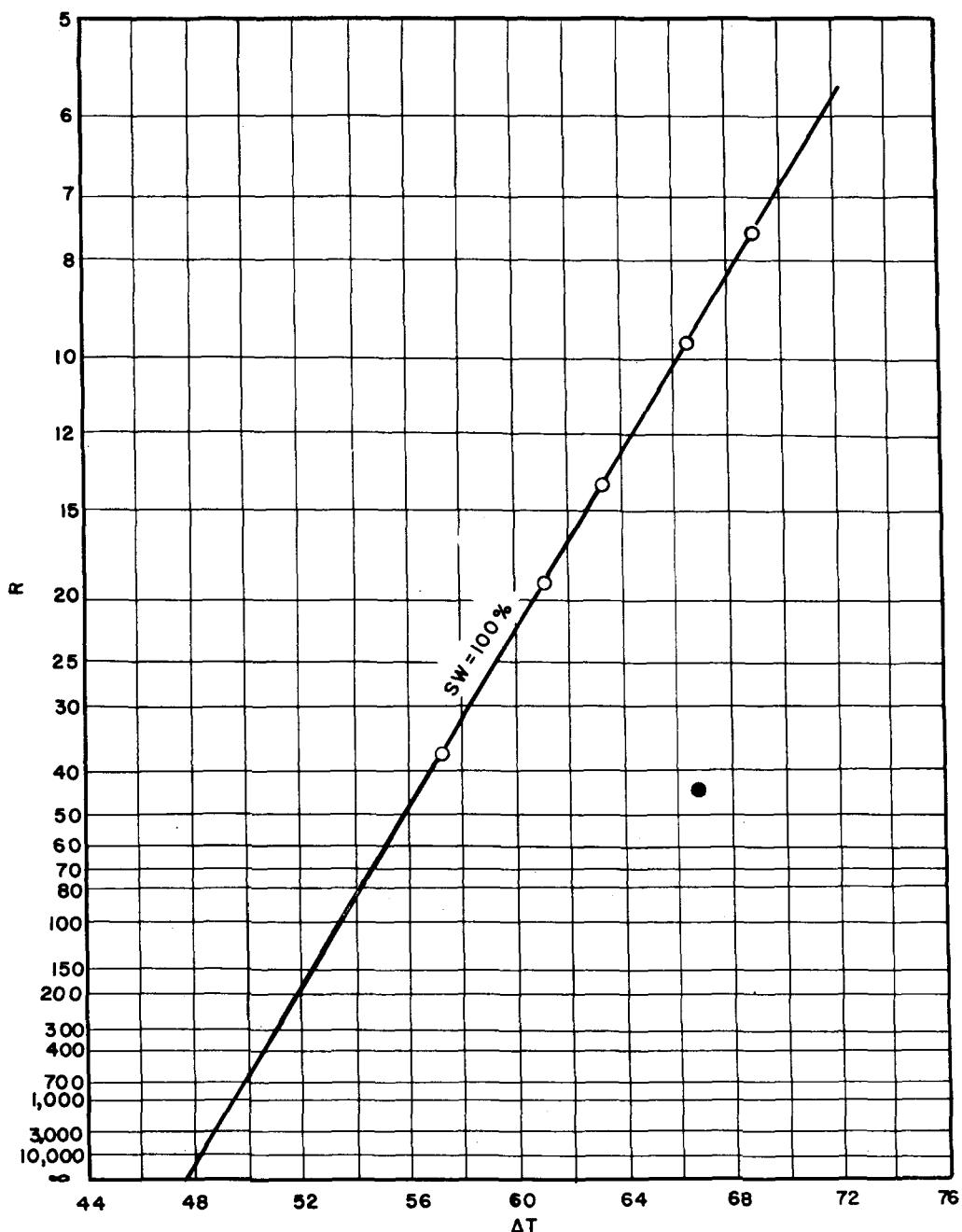


FIG - 3

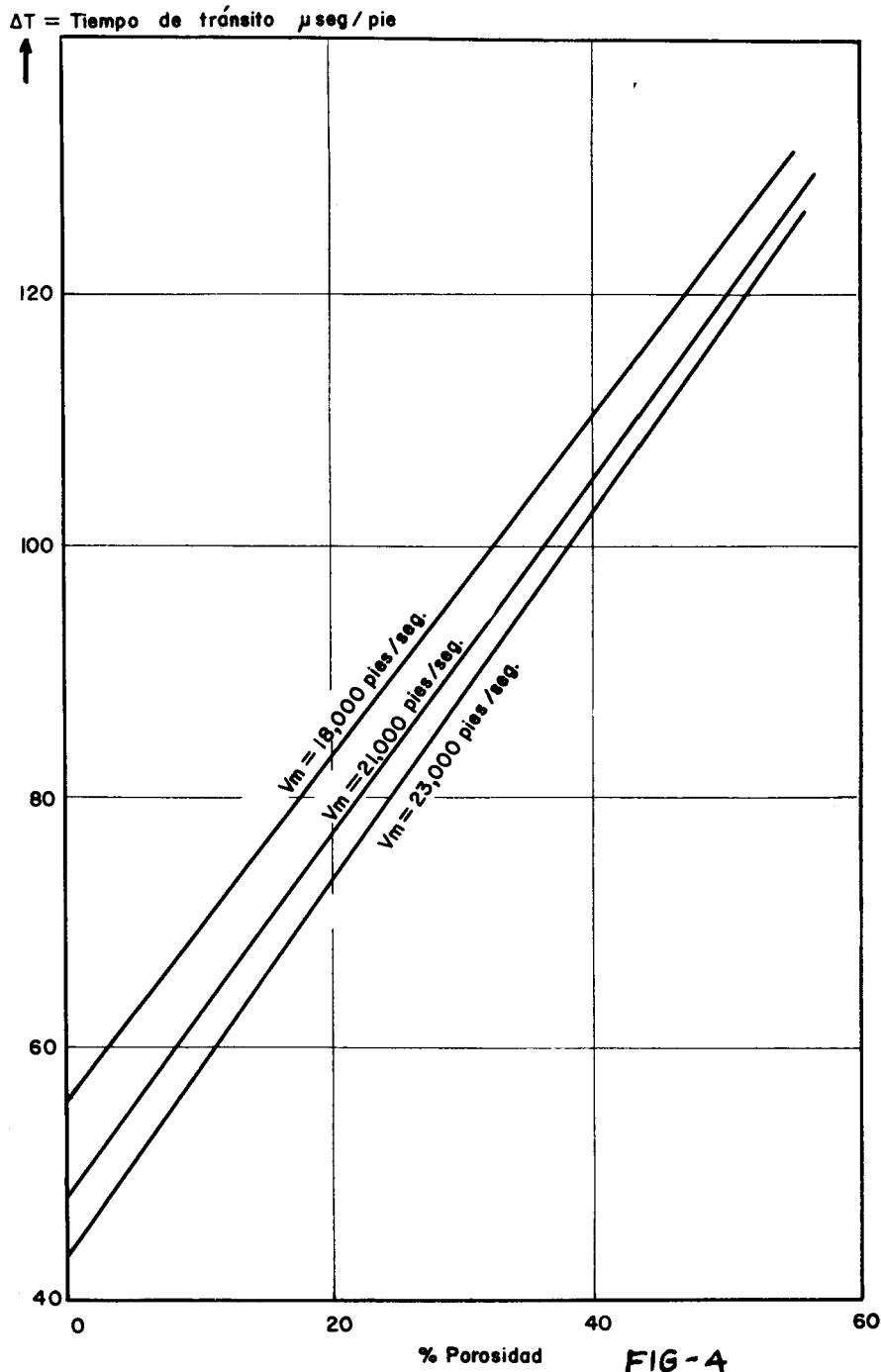


FIG - 4

entonces, para una porosidad de 10%, el factor de resistividad de formación F , será igual a 100. El valor R_o sobre la curva correspondiente a una porosidad del 10% será por consiguiente igual a 100 R_w . Por ejemplo, en la figura 3 la intercepción sobre la abscisa es de 47.5 microsegundos por pie, lo cual corresponde a una velocidad matriz extrapolada de 21,000 pies por segundo. La Figura 4 muestra que, para un 10% de porosidad, corresponde un tiempo de tránsito de 61. En la curva de la figura 3 se observa que, para un tiempo de tránsito de 61, R_o es de 10 ohm — m, y R_w deberá ser de 0.19 ohm — m.

4.—Si un punto cae considerablemente abajo de la línea R_o , tal como el punto negro de la figura 3, puede suponerse que tenga alguna saturación de aceite debido a que su resistividad es notablemente más alta que R_o para esa porosidad.

Ahora ya pueden situarse sobre la figura 3 las líneas que representan saturaciones de agua menores del 100%. Cada línea intersectará la abscisa en el punto $1/V_m$; la intersección de cada línea con la vertical correspondiente a 61 microsegundos por pie, puede determinarse por medio de la tabla 2 la cual se hizo a partir de la ecuación 4, suponiendo “n” igual a 1.8 (un valor dado por los análisis de núcleos de muchas formaciones del Oeste de Texas):

$$\overline{S_w}^n = R_t/R_o$$

LIMITACIONES

El método gráfico sólo puede dar valores cualitativos de saturación de agua si no está presente una zona conocida de agua para definir con precisión la línea de 100% de saturación de agua. El valor de la resistividad del agua en la formación, encontrado por otros medios, deberá confirmarlo la gráfica antes descrita.

Una seria limitación del método gráfico es el estar restringido a un tipo uniforme de roca. Si el tipo de roca varía apreciablemente, dentro de la zona de interés, las propiedades acústicas variarán dentro de esa zona. Además de ésto el método está limitado por las mismas condiciones restrictivas que limitan el uso del registro de velocidad entre las que se incluyen el gas libre

en la formación y la porosidad "vugular" (vuggy rock). El gas libre puede ser la causa de un registro de velocidad errático; la porosidad "vugular" puede dar por resultado valores altos de saturación de agua.

E J E M P L O S

El primer y más importante objeto de la interpretación de registros es el de localizar zonas productoras de gas y petróleo. Para lograrlo el intérprete debe buscar de preferencia una anomalía más que un valor absoluto de porosidad o de saturación de agua. Wyllie ha expresado este mismo pensamiento en forma más elocuente:

"Hay la idea muy generalizada de que la interpretación de registros es "buena" solamente si se obtienen resultados en términos de un X por ciento de porosidad y de un Y por ciento de saturación de agua. Tales son los términos de los ingenieros. La interpretación de un registro, en su fase exploratoria, es buena si conduce a arenas de aceite o gas que no han sido pasadas por alto. Cuando se desconocen la extensión, la permeabilidad, y el mecanismo productor de un campo, es académico tratar de calcular con toda precisión la porosidad y la saturación".

Los primeros tres ejemplos que siguen se tomaron de pozos de exploración. En ellos se muestra cómo se usó el método gráfico en el Oeste de Texas para: (1) estipular información negativa; (2) descubrir aceite en ausencia de otra información positiva; (3) confirmar la presencia de aceite indicada por otros medios. Los últimos tres ejemplos se tomaron de un campo petrolero ya establecido y muestran cómo este método puede ayudar a aislar zonas de agua presentes en el grueso de la columna de aceite.

Ejemplo 1.—Recientemente, en un pozo de exploración en Glasscock County, Texas, se encontraron manifestaciones de aceite en la formación Clear Fork en el intervalo comprendido de 2,790 a 2,920 pies. Se usó para esta profundidad una barrena de 11 pulgadas sin lograrse una buena perforación por lo que se prefirió el registro sónico para porosidad en lugar del registro neutrónico. La prueba de formación recuperó muy poco lodo para ser diagnosticado, y los registros se corrieron inmediatamente después de penetrado el intervalo productor de hidrocarburos así que no había ninguna zona acuífera conocida debajo de la zona de interés.

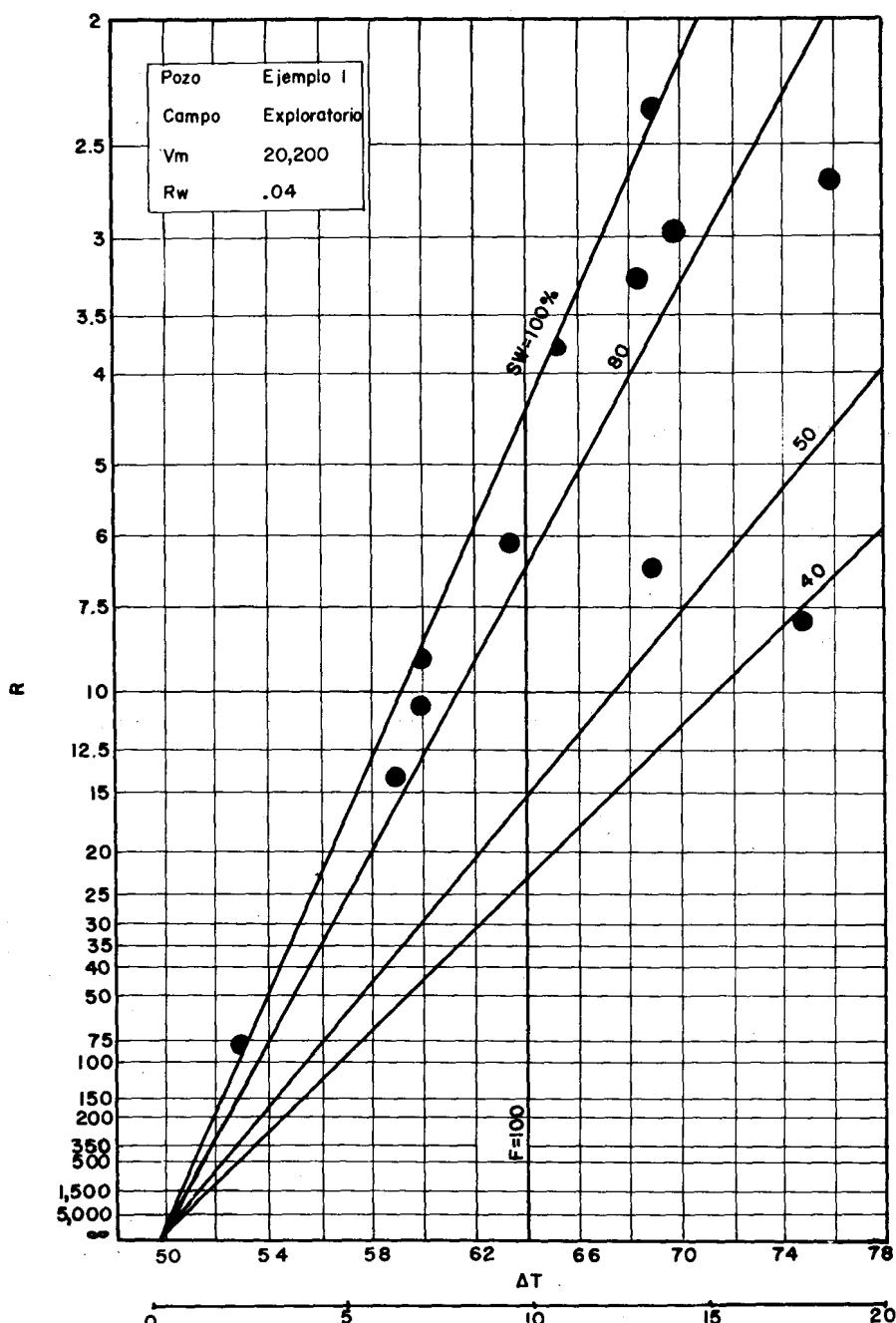


FIG - 5

Los valores registrados no corregidos se situaron directamente en la gráfica de la figura 5. Como el registro se corrió solamente pocas horas después de perforada la formación Clear Fork no se hizo corrección por invasión. Se usaron cuatro puntos para establecer la línea R_o y la velocidad matriz de 20,200 pies por segundo. La resistividad del agua en la formación, tomada de la curva de potencial natural, fue de 0.04 ohm — m. Este valor fue casi confirmado por la gráfica: R_o a un 10% de porosidad fue 4.3 ohm — m, y R_w fue, por lo consiguiente, de 0.043 ohm — m.

Solamente una zona de 4 pies mostró tener una saturación de agua menor de 50% por lo que no se intentó terminar el pozo en esta formación.

Ejemplo 2.—Este ejemplo se refiere a cierta clase de condiciones poco comunes e ilustra con claridad la utilidad del método de interpretación. La formación es la ligeramente radioactiva arenisca Queen cerca de Monahans, Texas.

La figura 7 muestra el juego de registros corridos en este pozo. Antes de 1960 nunca se evaluó debidamente la arena Queen en esta área por las siguientes razones: (1) La mayoría de los pozos se perforaron antes de que estuvieran en disponibilidad los registros de velocidad de corta distancia y los registros de resistividad localizada (focused); (2) la arena es arcillosa y pobremente consolidada por lo que no se encontraron manifestaciones de aceite en las muestras de canal; (3) la arena debe fracturarse antes de ponerse en producción.

Con el advenimiento de los registros sónico y lateral combinados, de las técnicas modernas de fracturación, y del método de análisis gráfico, se tuvieron a la mano los elementos necesarios para descubrir el campo Monahans Queen. La Figura 6 muestra la anómala saturación de agua descubierta por el método gráfico. Después del tratamiento de fracturación por agua el pozo produjo 199 barriles de aceite con 326 barriles de agua en 24 horas en la prueba inicial de producción en Enero de 1960.

Ejemplo 3.—Este ejemplo es una notable anomalía de saturación de agua en un yacimiento dolomítico. La Figura 8 se hizo con registros tomados en el pozo descubridor del campo TXL Wolfcamp. Dicha formación produjo una pequeña cantidad de aceite en la “prueba de formación” y el descubrimiento se confirmó con la gráfica. Este pozo se terminó en Diciembre de 1959, produciendo 184 barriles de aceite por día con 2 barriles de agua.

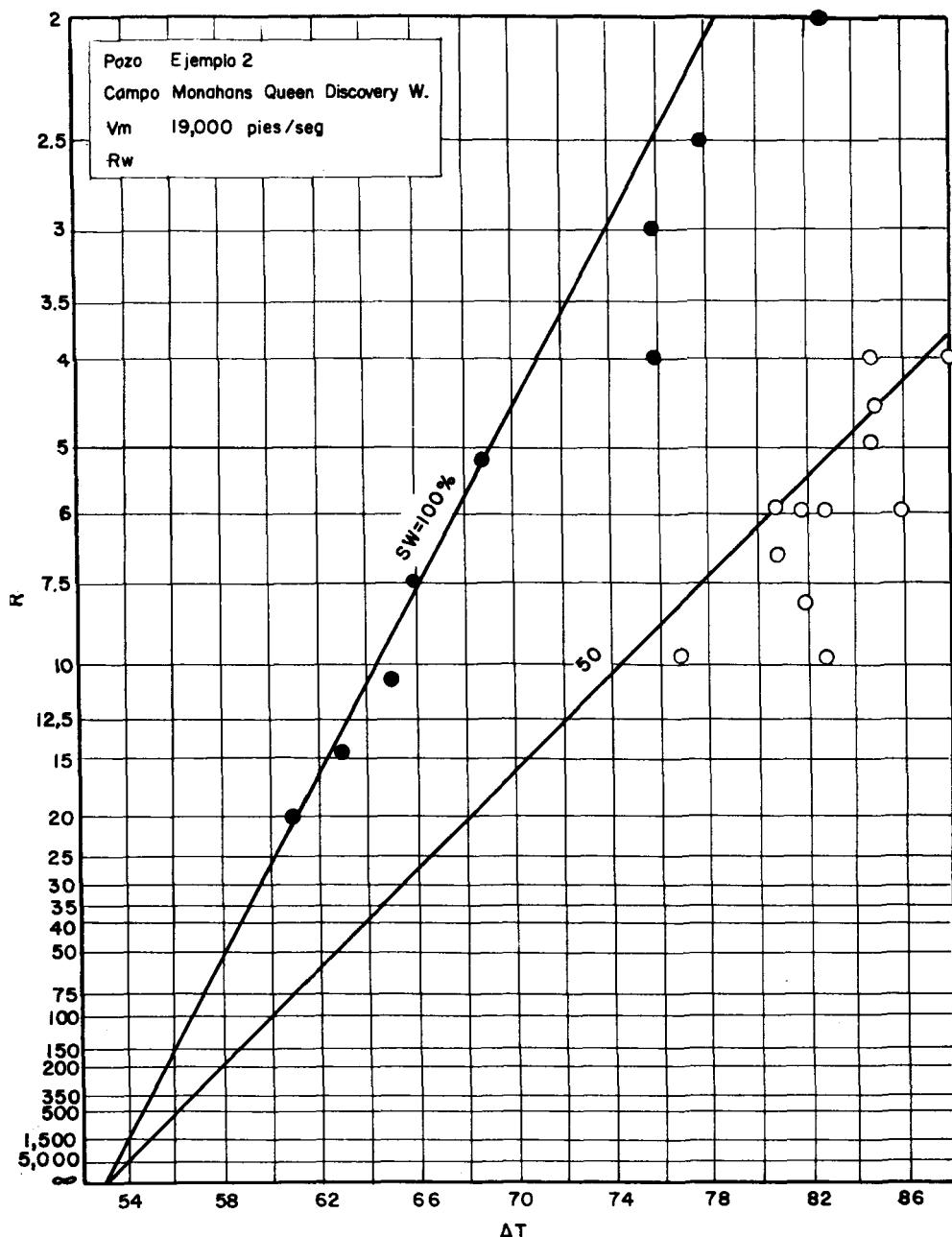
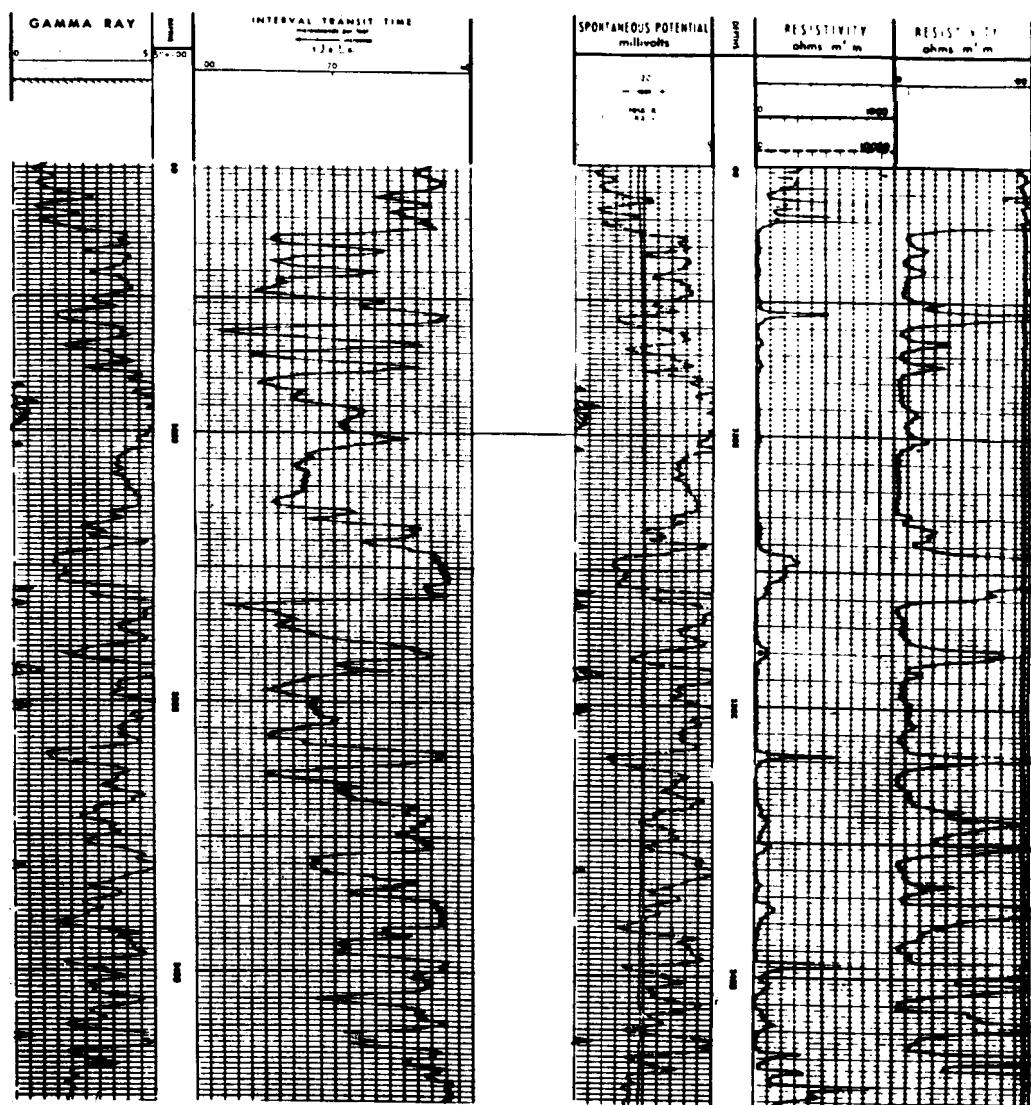


FIG-6



LOG SUITE RUN on Monahans, Tex., well of Example 2. Modern log techniques have enabled the evaluation of the shaly, unconsolidated Queens sand. Fig. 7.

FIG-7

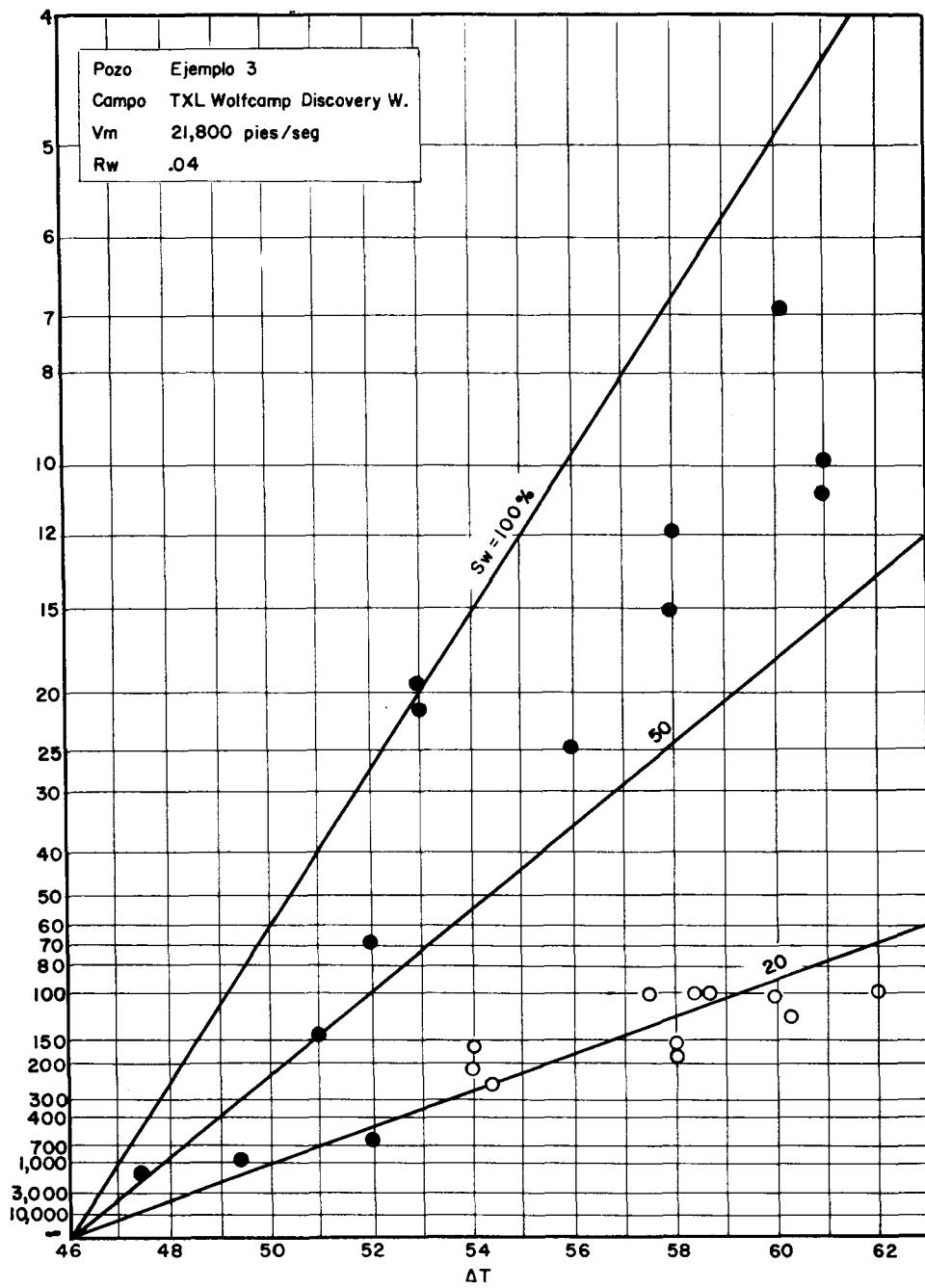


FIG - 8

Ejemplo 4.—Este ejemplo se tomó de un campo en donde, el valor conocido de la resistividad del agua en la formación, se usa para establecer la malla de líneas de saturación. La formación es la dolomita Grayburg, la cual contiene arena, yeso, y anhidritas en forma de filamentos irregulares y como minerales diseminados en la dolomita. Se presentan numerosas vetillas porosas sin una distribución ordenada de zonas de aceite y agua. La variedad de minerales presentes a menudo ocasiona un cambio aparente de la velocidad matriz en las gráficas; aún así, las gráficas de velocidad contra resistividad son, hasta el momento, el método más satisfactorio de separar zonas de aceite de zonas de agua.

Para este tipo de roca, a partir del análisis del núcleo, se ha determinado un valor “ m ” de 2.2; en consecuencia, el papel se trazó de acuerdo a este valor. La tabla 3 presenta los valores de respuesta del registro sónico y del registro lateral los cuales están graficados en la figura 9.

Una vez que se situaron los puntos se trazó la línea R_o valiéndose de los más bajos valores de respuesta del registro sónico y de la resistividad del agua en la formación conocida. No se hizo corrección por efecto de invasión en el registro lateral, sin embargo, se sabe que tales correcciones podrían disminuir los valores de saturación de agua dados por la gráfica. Se perforaron todas las zonas con aparentes saturaciones de agua de 50% o menores y porosidades de 5% o mayores, indicadas por los puntos claros de la figura 9. Este pozo produjo 238 barriles por día de aceite con 3% de agua en la prueba inicial de producción.

Ejemplo 5.—Presentamos ahora un segundo pozo de la misma área pero perforado más bajo estructuralmente que el pozo del ejemplo 4. El análisis gráfico se condujo del mismo modo que el anterior. La tabla 4 da los valores de los registros sónico y lateral. Se escogieron los intervalos de perforación siguiendo el mismo método anterior y se comparó la gráfica con la de la figura 9. La figura 10 reveló un porcentaje más alto de saturación de agua que el de la figura 9 de donde se dedujo una producción de agua algo mayor. La producción inicial fue de 144 barriles de aceite por día cortado con un 14% de agua.

Ejemplo 6.—Este pozo fue en realidad el primero de los tres pozos (ejemplos 4, 5 y 6) que quedó terminado en la dolomita Grayburg. Se tomó un núcleo de la sección productora y se analizó en un laboratorio comercial.

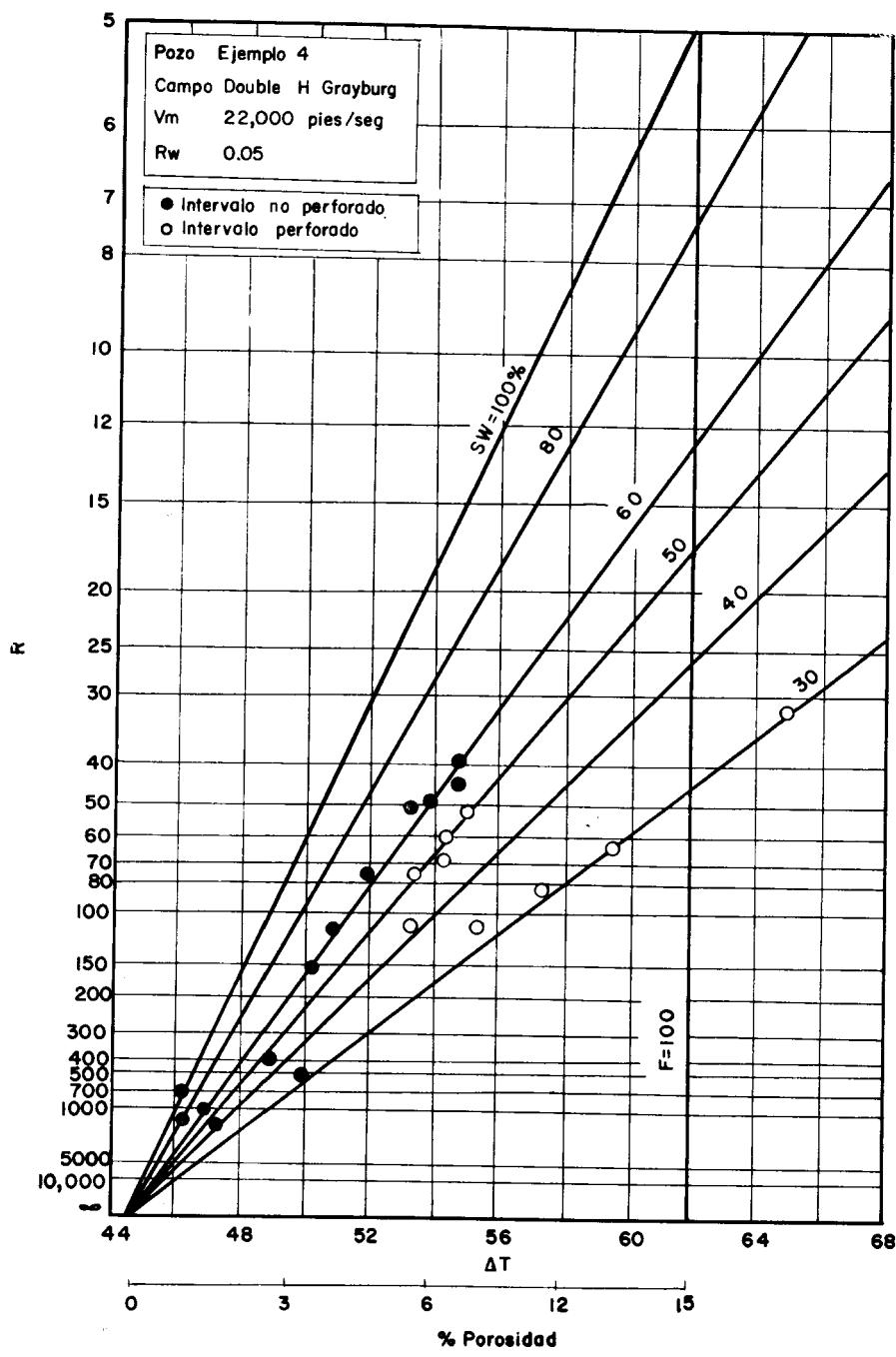


FIG-9

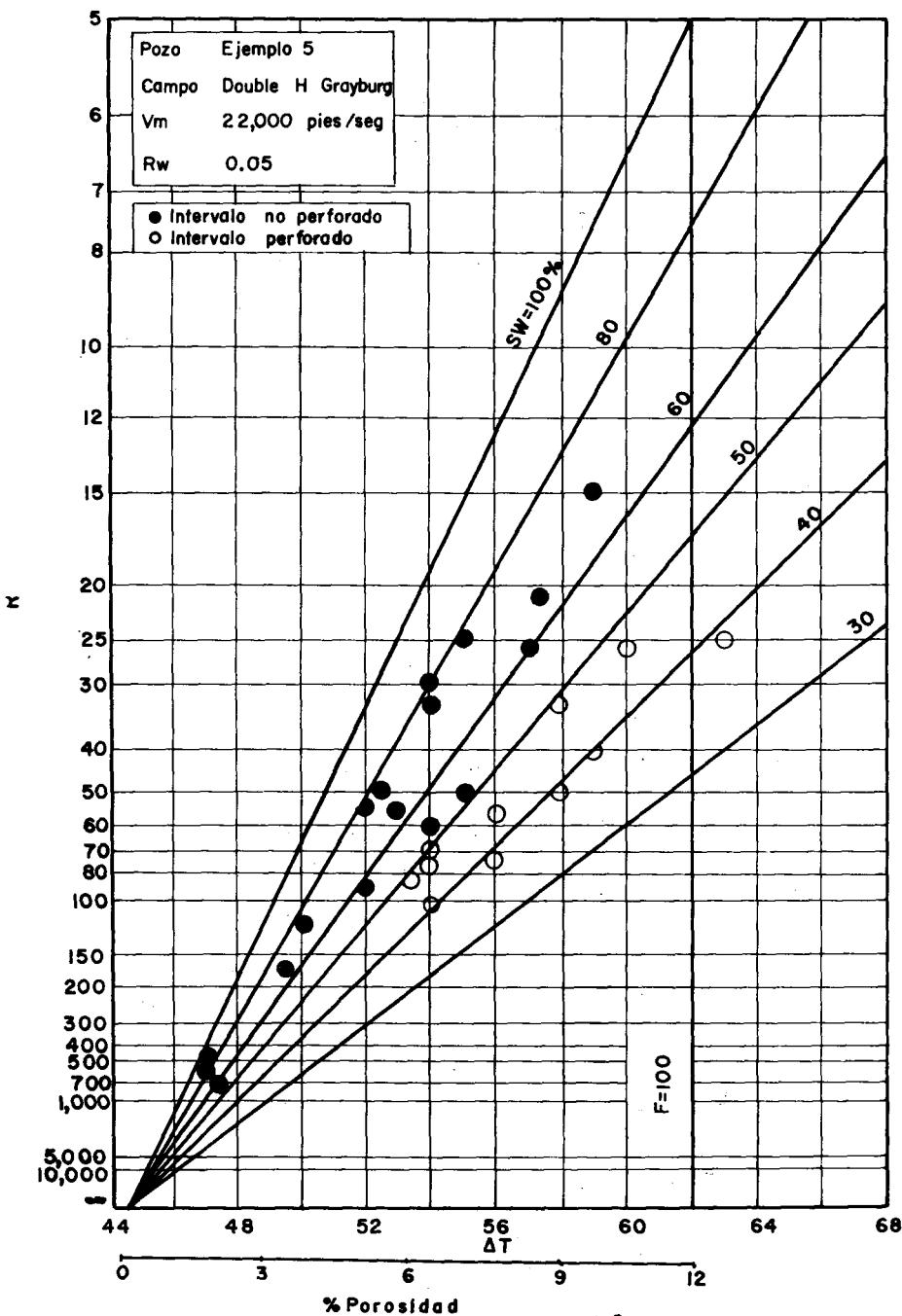


FIG - 10

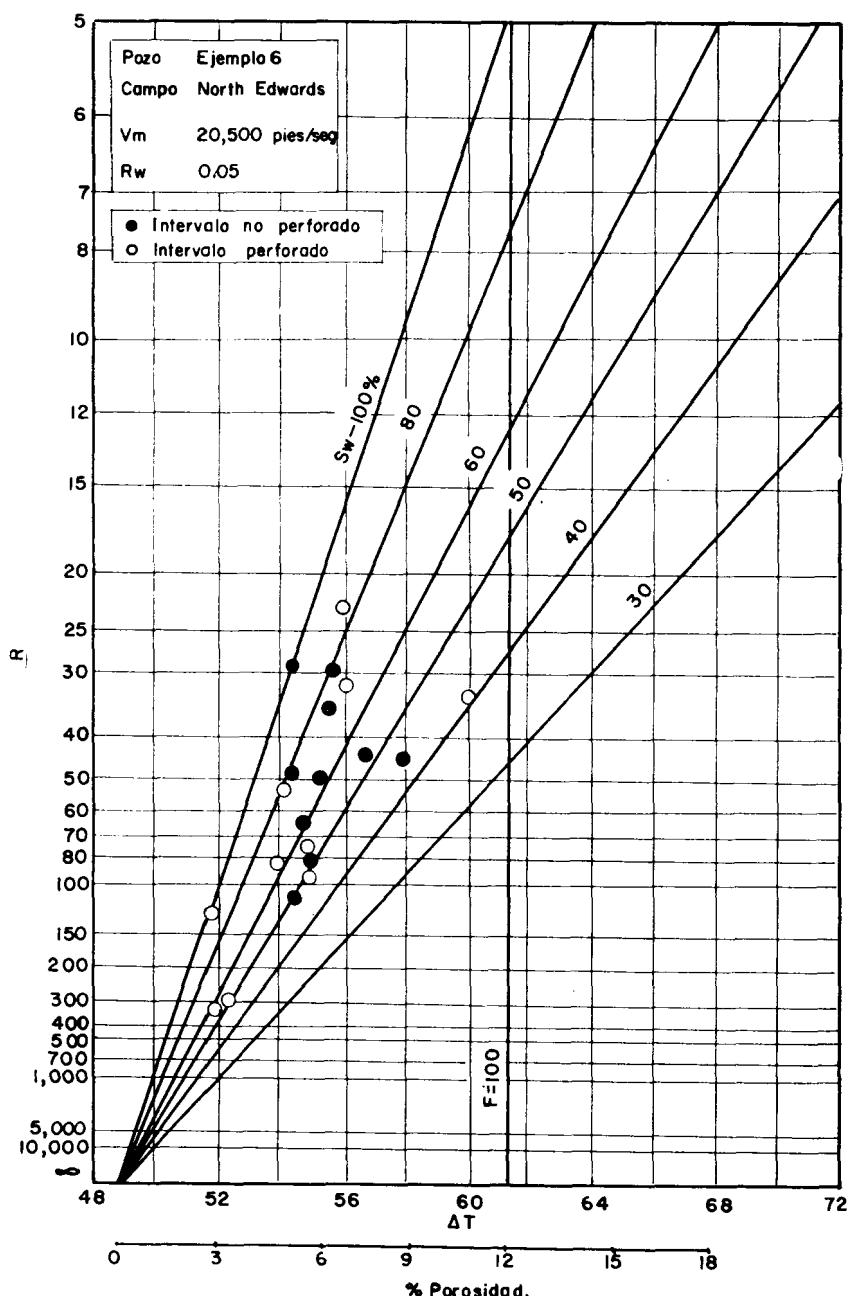


FIG - 11

La figura 12 es una gráfica de porosidad de núcleo completo contra la respuesta del registro sónico. Se efectuó un análisis gráfico de los registros similar a los anteriores. Para este caso, la velocidad matriz extrapolada se tomó de la relación de la figura 11, y la resistividad del agua en la formación se tomó del agua producida, por lo que la línea R_o se estableció bien. Los valores registrados se tabularon en la tabla 5 y se situaron en la figura 11. A pesar de lo adecuado del núcleo, y del registro en disponibilidad, los intervalos perforados se escogieron sin aprovechar ningún análisis cuantitativo de los registros. Como se muestra en la figura 11 los intervalos perforados incluyen algunas zonas de alta saturación de agua mientras que, algunas zonas atractivas, no fueron desarrolladas. Este pozo produjo 30 barriles diarios de aceite y 150 de agua. El método de análisis gráfico probablemente hubiera llevado a cabo un resultado mejor tomando en cuenta la similitud de este pozo con los dos anteriores. Este ejemplo esclarece que había un auténtico peligro de alta producción de agua en los dos pozos de los ejemplos anteriores de no haber existido la técnica para determinar las zonas productoras de agua.

CONCLUSIONES

El método de graficar un registro de velocidad acústica contra uno de resistividad localizada es uno de los avances dentro del campo de la interpretación que ha dado por resultado el descubrimiento de nuevos yacimientos petrolíferos y, en campos ya antiguos, nuevas zonas productoras de petróleo. Los nomogramas, los registros gráficos y las correlaciones empíricas son a menudo desdeñados por buenos intérpretes y con buenas razones, pero el método aquí descrito tiene muchos aspectos de valiosa consideración:

1.—El método es independiente de la porosidad. Como la respuesta del registro de velocidad, con relación a la porosidad, es casi lineal, las saturaciones de agua se pueden evaluar aún sin estimar la porosidad.

2.—En un pozo no nucleado donde el valor de la velocidad matriz extrapolada se desconoce, puede ésta determinarse gráficamente.

3.—Si se sabe que una parte de la formación analizada es acuosa, el método gráfico no requiere un conocimiento previo de la resistividad del agua en la formación. Inversamente, si se conoce la resistividad del agua en la formación, no se necesita que la zona acuífera esté presente. Si no se dispone de ninguno de estos datos puede, aún así, hacerse la interpretación cualitativamente, de donde, la zona de saturación de aceite, aparecerá como una anomalía.

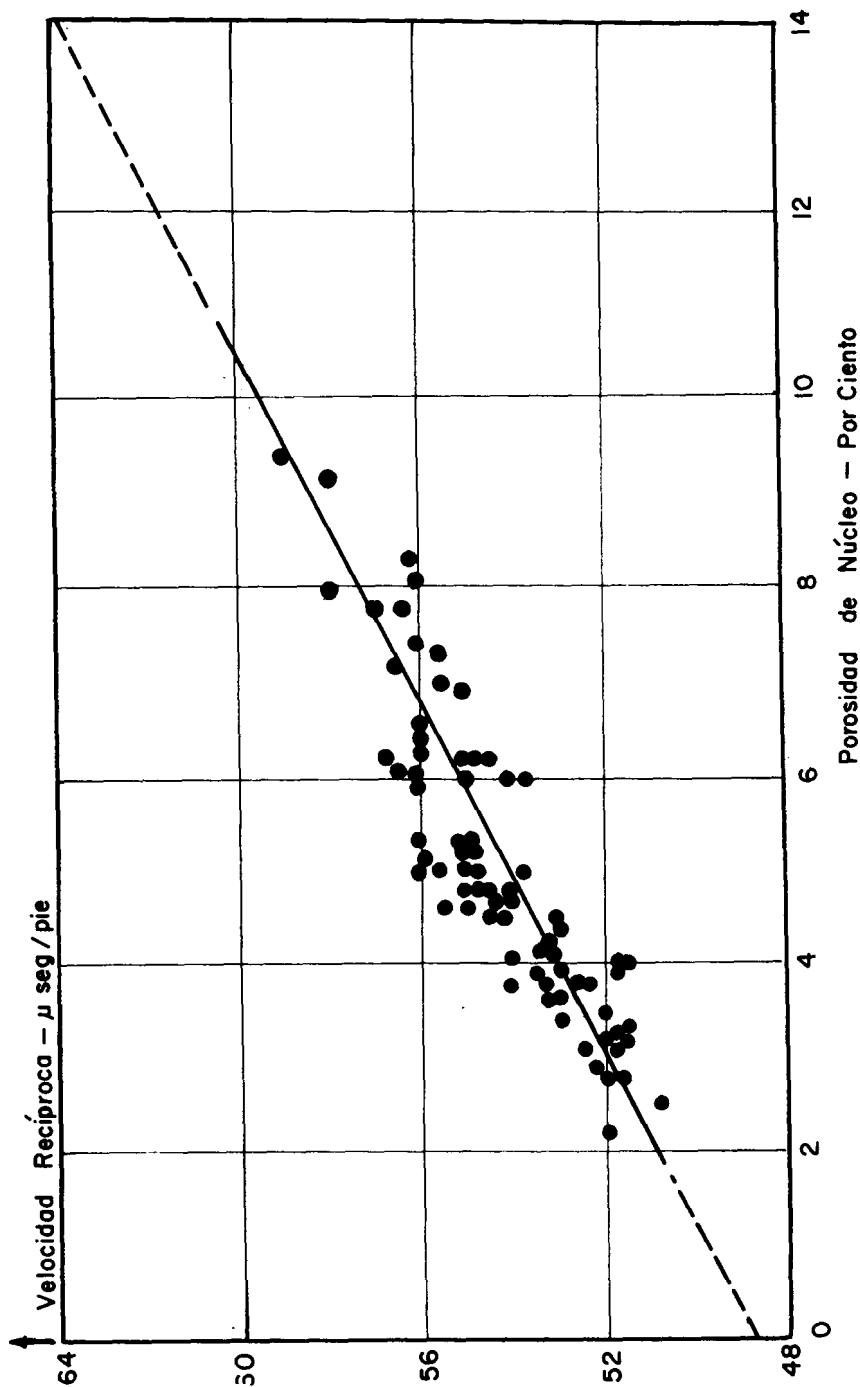


FIG. - 12

4.—La gráfica tiende a eliminar errores en la calibración de la sonda. Si se corren sondas de registros de velocidad diferentes, y los registros respectivos muestran una diferencia de respuesta uniforme, se obtiene una velocidad matriz extrapolada diferente, pero, los valores de saturación de agua, son idénticos.

5.—En los pozos de exploración de las regiones costeras se puede, frecuentemente, por medio de un rápido vistazo a los registros, eliminar muchos miles de pies de lutitas de una más amplia evaluación. En regiones de calizas un pozo de exploración puede perforar solamente formaciones de calizas, y un cuidadoso examen de miles de pies de sección de calizas, pie por pie, es, ciertamente, una labor tediosa. La gráfica de las respuestas de los registros es una forma rápida de evaluar formaciones potentes.

6.—El intérprete de registros ha cumplido con una gran parte de su responsabilidad si nunca pasa por alto una zona sencilla productora de hidrocarburos. La mejor aplicación del método gráfico es la de separar zonas con hidrocarburos de zonas sin ellos. Pueden adicionarse otros usos a la gráfica además de los ya propuestos en este estudio; Schlumberger sugiere situar dos valores de resistividad por cada tiempo de tránsito, uno de un dispositivo de investigación somero y otro de un dispositivo profundo. Con un lodo recientemente filtrado este método establecerá la máxima línea de resistividad que puede atribuirse a la invasión por filtración de lodo. Para los hidrocarburos resultarán, por ende, resistividades mayores que ésta. Se pueden entrever con facilidad aplicaciones más amplias; sin embargo, se deberá tomar cuidado de no convertir un excelente método cualitativo en un mediocre método cuantitativo.

R E F E R E N C I A S

- 1.—M. R. J. WYLLIE, "The Fundamentals of Electric Log Interpretation": Academic Press, Inc., New York, 1957.
- 2.—M. P. TIXIER, R. P. ALGER, C. A. DOH, "Sonic Logging": T P 8063 Jour. of Pet. Tech., May 1959.
- 3.—G. R. PICKETT and M. E. TALBOT, "The Use of Acoustic Logs in Petrophysical Evaluations of Sandstones": Shell Development Co. E P R Report 531, Houston, March 1959.
- 4.—M. R. J. WYLLIE, "Log Interpretation in Sandstone Reservoirs": Paper presented at the twenty-ninth annual international meeting, Society of Exploration Geophysicists, Los Angeles, Nov. 9-12, 1959.

T A B L A S

Tabla 1.—Valores de velocidades sónicas típicas y sus correspondientes tiempos de tránsito de varios materiales.

Material:	Velocidad Sónica (pies/segundo)	Tiempo de Tránsito (μ seg./pie)
Aceite	4,300	232
Agua (lodo)	5,000 — 5,300	200 — 189
“Neopreno”	5,300	189
Lutitas	6,000 — 16,000	167 — 62.5
Roca salina	15,000	66.7
Areniscas	Hasta — 18,000	55.6
Anhidrita	20,000	50.0
Carbonatos	21,000 — 23,000	47.6 — 43.5
Dolomitas	24,000	42

Tabla 2.—Cálculo de R_t a partir de la ecuación 4.

% Saturación agua	n	Relación de Resistividad	R_t a 10% de porosidad (ohm-m)
100	1.8	1.0	19
80	1.8	1.5	28.5
60	1.8	2.5	47.5
50	1.8	3.5	66.5
40	1.8	5.2	98.8
30	1.8	8.7	165.3

Tablas 3, 4 y 5.—Point = punto; Depth (ft.) = profundidad en pies; Laterolog value (ohm-m) = valores del registro lateral en ohms por metro; Sonic-log value (microseconds per foot) = valores del registro sónico en microsegundos por pie; Water saturation from Fig. 9, 10, 11 (per cent) = por ciento de saturación de agua tomado de las figuras 9, 10, 11.

FIGURAS

Figura 1.—La respuesta del registro de velocidad es una función lineal de la porosidad o casi ello dentro del rango de porosidad de interés usual: 3 al 30%.

Reciprocal Velocity μ Sec./Ft. = Recíproca de la velocidad en microsegundos por pie.

Sandstone = arenisca

Limestone = caliza

Core Porosity — Per Cent = Por ciento de porosidad de núcleo.

Figura 2.—La conductividad contra el intervalo de tiempo de tránsito de la arenisca Yates en el campo Scarborough, muestra una gráfica no lineal. Se usan coordenadas semilogarítmicas.

Figura 3.—Coordenadas especiales hacen lineal la gráfica conductividad — tiempo de tránsito para una saturación de agua constante. La ordenada es la raíz cuadrada de la recíproca de la resistividad verdadera. La abscisa es la recíproca de la velocidad.

Figura 4.—Gráfica de porosidad para registros sónicos que muestra al tiempo de tránsito como una función del porcentaje de porosidad.

Figura 5.—Gráfica de velocidad — resistividad para el ejemplo 1, de un pozo de exploración en Glasscock County, Texas. La ordenada es la raíz cuadrada de la recíproca de la resistividad verdadera.

Figura 6.—Saturación de agua anómala del pozo del ejemplo 2 que fue descubierto por el método gráfico. La ordenada es la raíz cuadrada de la recíproca de la resistividad verdadera.

Figura 7.—Juego de registros tomados en Monahans, Tex., pozo del ejemplo 2. Las técnicas modernas de registros han permitido la evaluación de la arcillosa e inconsolidada arena Queens.

Depths == profundidades.

Interval Transit Time == intervalo de tiempo de tránsito.

Microseconds per foot == microsegundos por pie.

Increases == incrementos.

Spontaneous Potential == potencial natural.

Millivolts == milivoltios.

Resistivity == resistividad.

Ohms m^2/m == ohms por metros cuadrados por metro.

Figura 8.—Pozo descubridor del campo TXL Wolfcamp, ejemplo 3, que fue confirmado por la gráfica. La ordenada es la raíz cuadrada de la recíproca de la resistividad verdadera.

Figura 9.—Se usó una ordenada corregida para situar la información del ejemplo 4, tomada de un pozo de la dolomita Grayburg. El análisis del núcleo mostró un valor “ m ” de 2.2. En consecuencia la ordenada es la raíz 2.2 de la recíproca de la resistividad verdadera.

Nonperforated interval == intervalo no perforado.

Perforated interval == intervalo perforado.

Figura 10.—Un porcentaje mayor de saturación de agua fue indicado por el segundo pozo en la dolomita Grayburg del ejemplo 5. El valor “ m ” usado en la correlación fue de 2.2.

Figura 11.—Intervalos perforados en un pozo del campo North Edwards del ejemplo 6 el que incluye algunos pozos con alta saturación de agua. El valor de “ m ” para la correlación es de 2.2.

Figura 12.—La porosidad de núcleo completo en función de la recíproca de la velocidad; pozo del ejemplo 6.

NUEVOS SOCIOS

ING. JORGE BESQUIN (*Socio Fundador*).
Av. Juárez No. 119 Desp. 53.
México 1, D. F.

ING. ALFONSO GUTIERREZ LOPEZ (*Socio Fundador*).
Av. Juárez No. 119 Desp. 53.
México 1, D. F.

DR. SIGMUND HAMMER.
P. O. Box 2038.
Pittsburgh 30, Pennsylvania, U. S. A.

SRITA. MA. GUADALUPE PEREZ RUIZ.
Tehuantepec No. 38-B.
México 7, D. F.

MARIO SALINAS GALINDO.
Calle Canales No. 3440.
Nuevo Laredo, Tamps.

ERNEST M. HALL NICHOLS, Jr.
2424 Branard Street.
Houston 6, Texas, E. U. A.

NUEVOS SOCIOS

VERRIER FAURIE GEORGES.

C. P. 1515.

Luanda, Angola.

West Postuguese, Africa.

CARL H. SAVIT.

Western Geophysical Co. of America.

933 North La Brea Avenue.

Los Angeles 38, Cal. U. S. A.

G. FREDERICK SHEPHERD.

Laite 101 A.

2929 Cedar.

Spring Road.

Dallas 19, Texas.

RAYMOND G. COX STREET.

2424 Branard Street.

Houston 6, Texas, U. S. A.

Dr. LUIS AGUILERA LAFFAYA.

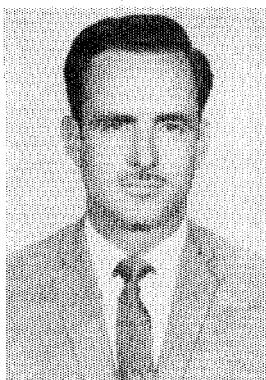
Escuela de Minas y Metalurgia,

Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela.

Caracas, Venezuela.

JORGE LAZO PEÑA ALFARO



Socio activo de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración. Nació en México, D. F., el 7 de Diciembre de 1928.

Diplomado por: "National Schools", Sucursal en México, D. F. (Radio construcción y reparación), en 1945; "Academia Cinematográfica de México" (Sonido), en 1947; "Escuela Mexicana de Radiocomunicación", en 1949; "IBM de México" (Customer Engineering), en 1951.

En 1954 observador "Junior" para National Geophysical Co., de Dallas, Tex. En 1955 ayudante de observador en PEMEX ZNE; posteriormente observador y calculista. Actualmente adscrito al Departamento de Geofísica (reinterpretación) en Monterrey, N. L.

ANTONIO DEZA SUAREZ

Terminó estudios de la carrera de Ingeniería de Comunicaciones, Eléctricas y Electrónicas en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de la Ciudad de México, el año de 1954.

Desde el inicio de la carrera profesional, en el año de 1951, trabaja con Petróleos Mexicanos, habiendo sido calculista y observador en brigadas sismológicas de la Superintendencia en Monterrey, N. L., y actualmente trabaja en las oficinas de Procesado Magnético en la Gerencia de Exploración.



DANIEL GUTIERREZ GUTIERREZ

Hizo sus estudios en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, los que terminó el año 1941, habiendo obtenido el título de Ingeniero Electricista.

Ingresó al Departamento de Exploración de Petróleos Mexicanos en 1943, habiendo desempeñado los puestos de observador, calculista e ingeniero especialista. De 1957 a 1959 trabajó con Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, y de 1960 a 1961 con el Instituto Cubano del Petróleo. Actualmente es Geofísico de la Gerencia de Exploración de Petróleos Mexicanos.

PERFORACIONES, S. A.

**CONTRATISTA DE PERFORACION
EXPLORATORIA DESDE 1950 PARA**

PETROLEOS MEXICANOS

SECRETARIA DE MARINA

CONSTRUCTORA MALTA, S. A.

NATIONAL SOIL SERVICES, CO.

**CIA. FUNDIDORA DE FIERRO
Y ACERO DE MONTERREY, S. A.**

Y PARTICULARES

AVENIDA JUAREZ No. 119 - 5o. PISO

Teléfonos: 21-37-25 y 21-36-42

MEXICO 1, D. F.

...SISMOLOGIA... GRAVIMETRIA... GEOQUIMICA...
MAGNETOMETRIA... ...SUE*
...PROCESADO DE DATOS MAE**

A R E A S :

Grandes o pequeñas, marinas o terrestres.

PROBLEMAS:

Técnicos u operacionales.

INFORMACION:

Superficial o profunda.

F O R M A :

Utilizando los métodos y equipos más modernos compatibles con áreas y presupuestos.

**GEOPHYSICAL SERVICE
INCORPORATED**

**Exchange Bank Bldg.,
100 Exchange Park North,
DALLAS 35, TEXAS.
Tel. Fleetwood 7-4311**

**Avenida Juárez No. 119,
Despacho 42,
Tels. 46-37-20 - 21-74-67
MEXICO 1, D. F.**

*** Seismic Underwater Exploder.**

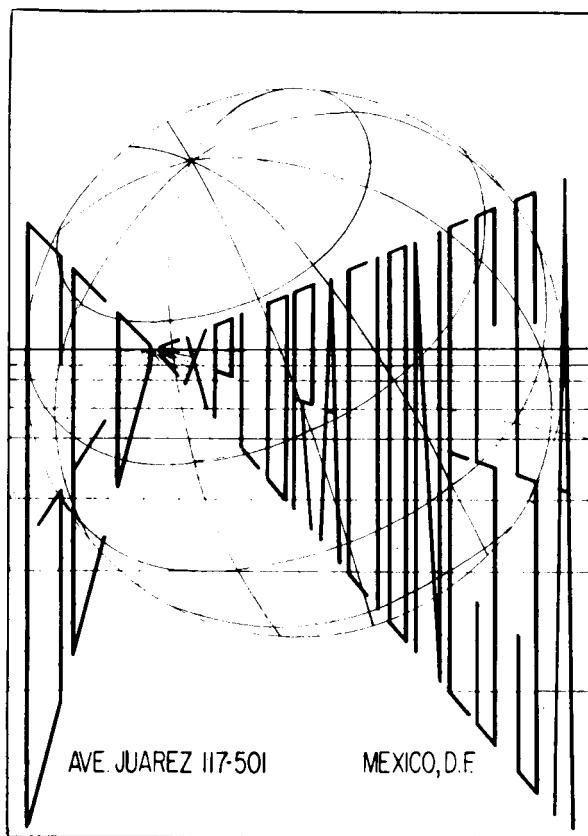
**** Multiple Analyzer Eliminator.**

S E R V I C I O S

GEOFISICOS

GEOLOGICOS

FOTOGEOLOGICOS



TEL. 46 - 11 - 81

GEOHIDROLOGICOS

RADIOACTIVOS

TOPOGRAFICOS

S O C I O S

\$ 100.00

N O S O C I O S

\$ 150.00



ADQUIERA UD. LOS VOLUMENES NUMEROS
I - II Y III CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS
DE 1960-1961 Y 1962 EMPASTADOS EN KERATOL
CON SUS INICIALES GRABADAS EN ORO.

PEDIDOS A LA
ASOC. MEX. DE GEOF. DE EXPL.

EXPLORACIONES, S. A.



ITURBIDE No. 36 DESP. 201

TEL. 10 - 15 - 64

MEXICO 1, D. F.

CURSO DE SISMOLOGIA APLICADA

Por el Ing. V. A. OLHOVICH



En las principales librerías
o directamente en la

ASOCIACION MEXICANA DE GEOFISICOS DE EXPLORACIONES

Estimado Socio:

Agradeceremos a Ud. su cooperación enviándonos Artículos para nuestro Boletín, o bien Comentarios o Sugerencias que nos permitan seguir adelante con nuestra publicación.