



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán
Ciencias de la Tierra

**MÓDULOS ELÁSTICOS EFECTIVOS EN
FUNCIÓN DE LOS MINERALES CON DATOS
DE REGISTROS DE POZO Y CUBO DE
VELOCIDADES**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

JOSÉ ADRIÁN CORTÉS CUAMATZI

ASESOR:

Dr. Gerardo Ronquillo Jarillo



México, DF.

Junio 2011

**MÓDULOS ELÁSTICOS EFECTIVOS EN
FUNCIÓN DE LOS MINERALES CON
DATOS DE REGISTROS DE POZO Y CUBO
DE VELOCIDADES**

José Adrián Cortés Cuamatzi

Contenido

	Pág.
Lista de Figuras	ix
Resumen	xiii
Abstract	xiv
Introducción	1
Capítulo I. Análisis de propiedades petrofísicas en registros geofísicos de pozo	4
I.1. Registro Sónico.....	4
I.2 Registro RHOB.....	5
I.3 Registro NPHI.....	6
I.4 Registro GR.....	7
I.5 Poisson.....	8
I.6 Formulas empíricas en función de porosidad efectiva, velocidad de onda compresional y densidad.....	10
Capítulo II. Fundamentos en medios efectivos para la estimación de módulos elásticos en función de los minerales y sus propiedades	14
II.1 Modulo elástico efectivo de mezclas micro-inhomogeneas.....	14
II.2 Estimación del módulo volumétrico efectivo en función del contenido de minerales.....	22
II.3 Estimación del módulo de corte efectivo en función del contenido de minerales.....	23
Capítulo III. Estimaciones de minerales con base a registros geofísicos de pozo	25
III.1 Fundamentos para estimación de minerales con base a los registros de pozo (porosidad efectiva, densidad y sónico).....	25
III.2 Estimación de minerales.....	30

Capítulo IV. Análisis de picado denso de velocidades antes de apilar	50
IV.1 Marco teórico.....	50
IV.2 Picado de velocidades.....	63
IV.3 Cubo de velocidades.....	72
IV.4 Estimación de densidades, porosidad con base en cubo de velocidades y registros de pozo.....	77
IV.5 Calibración de pozos y su aplicación en la estimación de módulos elásticos en función de minerales.....	80
Conclusiones	87
Recomendaciones	88
Referencias	89
Apéndice A	91

Lista de Figuras

Capítulo I

1.1. Muestra de un registro sísmico.....	5
1.2. Muestra de un registro de densidad.....	6
1.3. Muestra de un registro de porosidad de neutrón.....	7
1.4. Muestra de un registro de rayos Gamma.....	8
1.5. Muestra aplicación de una fuerza a un cuerpo.....	9
1.6. Tabla de propiedades de arenas poco consolidadas.....	10
1.7. Grafica de densidad en función de velocidad de onda P.....	11
1.8. Grafica de velocidad de onda P en función de porosidad.....	12

Capítulo III

3.1. a) La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3). b) La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$].....	25
3.2. Elipsoide triaxial en el cual sus dos componentes horizontales y una vertical son de diferentes dimensiones.....	26
3.3. a) Elipsoide oblató. b) Elipsoide prolato.....	30
3.4. Ventana de introducción de datos dt, ds, rho, porosidad y GR para la generación del archivo “ <i>entrada.dat</i> ”.....	31
3.5. Imagen de calcita a $2 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	33
3.6. Imagen de calcita a $200 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	33
3.7. Imagen de dolomita obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	34
3.8. Imagen de cuarzo a $2 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	34
3.9. Imagen de cuarzo a $4 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	35
3.10. Imagen de arcilla de la familia caolinita a $500 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	35
3.11. Imagen de arcilla de la familia clorita a $5 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	36
3.12. Imagen de arcilla de la familia illita a $100 \mu\text{m}$ obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	36
3.13. Imagen muestra impregnación de hidrocarburos en calcita y cuarzo a $300 \mu\text{m}$. Obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	37
3.14. Imagen muestra impregnación de hidrocarburos en carbonato de calcio a $100 \mu\text{m}$. Obtenida por microscopio electrónico de barrido.....	37
3.15. Menú principal del programa módulos elásticos efectivos.....	39
3.16. Introducción de módulos en GPa para tres minerales distintos en el programa Módulos Elásticos Efectivos.....	40
3.17. Tabla de propiedades físicas de minerales.....	40
3.18. Ventana que permite seleccionar un archivo .LAS para graficar y poder visualizarlo.....	42
3.19. Archivo de salida con los módulos elásticos efectivos y minerales generado por el programa módulos elásticos efectivos.....	42

3.20. Muestra las opciones para graficar el registro de pozo.....	43
3.21. Pozo uno con módulos efectivos y minerales.....	45
3.22. Pozo uno con dos zonas de interés.....	46
3.23. Diagrama de flujo del programa módulos elásticos efectivos.....	47
3.24. Diagrama de flujo del programainvermarkov.....	48

Capítulo IV

4.1. Geometría NMO para un reflector horizontal.....	50
4.2. CMP Gather con un rango de apertura de 0 a 3.1 Km.....	51
4.3. Corrección NMO (ecuación (4.2)). (a) Antes y (b) después de aplicar corrección (NMO).....	52
4.4. CMP gather con una velocidad de 2264 m/s.....	53
4.5. NMO para un modelo de capas horizontales.....	54
4.6. Graficando offset vs velocidad, cada traza en el gather (a) es un apilado de las trazas del CMP Gather (b) usando una velocidad de corrección NMO constante....	56
4.7. Graficando offset vs velocidad, cada traza en el gather.....	56
4.8. Análisis de velocidades aplicado a (izquierda) CMP gather; (derecha) espectro de velocidades en el cual los colores oscuros representan los valores de velocidad para los reflectores del CMP gather.....	59
4.9. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8.....	60
4.10. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8 (panel izquierdo) y su espectro de velocidad (panel central).....	61
4.11. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8 (panel izquierdo) y su espectro de velocidad (panel central) con el incorrecto picado de velocidades.....	62
4.12. Grupo de CMP gathers con 58 trazas cada uno.....	66
4.13. CMPgather con su espectro de semblanza.....	67
4.14. CMP gather con 58 trazas picado correctamente, izquierda (antes de aplicar corrección NMO) derecha (después de corrección NMO).....	68
4.15. Grupo de CMP gathers con un mal picado de velocidades mostrando bajas velocidades.....	69
4.16. Grupo de CMP gathers con corrección NMO.....	70
4.17. Diagrama de picado de velocidades.....	71
4.18. Cubo de velocidades y dos timeslice (corte en tiempo) con diferentes escalas de colores.....	72
4.19. Cubo de velocidades.....	73
4.20. Cubo de velocidades con inline y crossline.....	74
4.21. Cubo de velocidades. a) Time slice a 1 segundo. b) Time slice a 2 segundos..	75
4.22. Cubo de velocidades. a) Time slice a 3 segundos. b) Time slice a 1471 ms mostrando zona de baja velocidad (color rojo) y zona con velocidades medias (color verde).....	76
4.23. Cross-plot de velocidad de onda P (V_p) contra densidades. El color azul corresponden a las densidades del Pozo 1 y la línea de color blanco corresponde a las densidades calculadas a partir de V_p	77
4.24. Cross-plot de densidades. Color rojo representa densidades de 1.58gr/cm^3 - 2.45gr/cm^3 . Color amarillo representa densidades de 2.5gr/cm^3 - 2.72gr/cm^3	78
4.25. a) Cubo de densidades. b) Inline. c) Crossline.....	79

4.26. a) Cubo con densidades bajas. b) Crossline con densidades bajas.....	79
4.27. Cubo de porosidad efectiva.....	80
4.28. Ventana TTI en ms del programa Módulos Elásticos Efectivos.....	81
4.29. Pozo1 en escala de tiempo en milisegundos.....	82
4.30. Cubo de velocidades y minerales de pozo1.....	82
4.31. Cubo de velocidades y modulo volumétrico efectivo de pozo1.....	83
4.32. Cubo de velocidades y módulo de corte efectivo de pozo1.....	83
4.33. Cubo de tiempo de transito de onda P y S que abarcan la zona 1 y 2.....	84
4.34. Cubo de densidad y porosidad efectiva que abarcan la zona 1 y 2.....	84
4.35. Cubo de contenido de calcita que abarca la zona 1 y 2 del pozo1.....	85
4.36. Cubo de contenido de cuarzo que abarca la zona 1 y 2 del pozo1.....	86
4.37. Cubo de contenido de arcilla que abarca la zona 1 y 2 del pozo1.....	86

Agradecimientos

Gracias a mis padres, hermanos y a mi familia que me han brindado su apoyo siempre.

Igualmente, a mis amigos, compañeros y maestros con quienes compartí este maravilloso tiempo en la ESIA TICOMÁN.

Agradezco a SENER-CONACYT por darme la oportunidad de ser su becario.

Gracias al Instituto Mexicano del Petróleo por facilitarme sus instalaciones y permitirme ingresar a la industria petrolera.

Un muy especial agradecimiento al Dr. Gerardo Ronquillo por todo el apoyo, paciencia y enseñanza vertidos en mi formación académica, sin los cuales no hubiese sido posible lograr este estudio. Gracias por permitirme ser su asesorado y brindarme oportunidades de estudio y laborales.

Finalmente, pero no por ello, menos importante, a mis sinodales.

¡Muchas Gracias!

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo obtener la proporción relativa de componentes minerales y magnitud de los módulos elásticos en medios efectivos en la caracterización de yacimientos areno arcillosos con base en datos de registros geofísicos de pozo y cubo de velocidades. Para lo cual, se hace necesario para la solución de este objetivo desarrollar los fundamentos básicos relacionados con registros geofísicos de pozo, medios efectivos y sismología de reflexión. En esta investigación para obtener la distribución relativa de componentes minerales en un medio poroso areno arcillo se aplicó el método auto consistente el cual soluciona problemas estáticos y dinámicos de la física de materiales compuestos.

Las etapas de la investigación comprendió: 1) Edición de datos de los registros geofísicos de pozo; 2) Proporción relativa de los distintos minerales en un medio poroso isotrópico; 3) Se desarrolló e implanto un software para la estimación de módulos elásticos efectivos en función de la proporción variable de contenido de minerales; 4) Correlación y calibración de los minerales y módulos elásticos efectivos con datos de laboratorio (núcleos) y registro de pozo; 5) Obtención de cubo de velocidades de las ondas longitudinales (ondas P) y su calibración con registros sísmicos; 6) Estimación de cubo de porosidad, densidad y velocidad de la onda sísmica de corte (onda S) con fórmulas empíricas y el cubo de velocidades de ondas longitudinales (ondas P); 7) Cubo de distribución de propiedades de minerales; 8) Correlación e integración de resultados.

Se desarrolló una metodología no convencional integral para la estimación de las proporciones relativas de minerales y módulos efectivos, que integra datos petrofísicos y sísmicos, que contribuye complementariamente a la caracterización estática de yacimientos areno arcillosos y rocas carbonatadas.

Abstract

The present study aims to obtain the relative proportions of mineral components and magnitude of elastic modulus on effective medium in a sandy clay reservoir characterization based on geophysical well logs and velocity cube. For this purpose, it is necessary for the solution of this objective to develop the basic fundamentals related to geophysical well logs, effective medium and reflection seismology. In this research to obtain the relative distribution of mineral components in a porous medium sandy clay was applied self-consistent method which solves static and dynamic problems of physics of composite materials.

The stages of the investigation included: 1) Editing geophysical data well, 2) relative proportion of different minerals in a isotropic porous medium, 3) was developed and implemented a software for estimating effective elastic moduli in terms variable proportion of the mineral content, 4) Correlation and calibration of minerals and effective elastic moduli with laboratory data (cores) and well log; 5) Obtaining velocity cube of longitudinal waves (P waves) and calibration with sonic logs; 6) Estimation of porosity cube, density and seismic shear wave velocity (S wave) with empirical formulas and velocity cube of longitudinal waves (P waves), 7) Cube distribution of mineral properties; 8) Correlation and integration of results.

Was developed an unconventional integral methodology to estimate the relative proportions of mineral and effective moduli, integrating petrophysical and seismic data, which additionally contributes to the static reservoir characterization sandy clay and carbonate rocks.

Introducción

En la industria petrolera el objetivo más importante es la ubicación de zonas de interés económico petrolero. En geofísica esto se realiza mediante el uso de varios métodos y en especial el método sísmico y el uso de registros de pozo. El desarrollo de nuevas metodologías empleando datos sísmicos y de registro de pozo hace posible contar con mejores modelos de velocidad, densidad y porosidad que mejoren la caracterización estática de yacimientos. En este marco, el objetivo de esta tesis es la estimación de las proporciones relativas de minerales y módulos elásticos en medios efectivos y su distribución 3-D con datos petrofísicos y con datos sísmicos.

Teniendo como base el conocimiento de los fundamentos básicos de registros de pozo, podremos comprender con mayor claridad los registros de pozo de tiempo de tránsito, densidad, porosidad y rayos gamma; y así asociar las mediciones de la herramienta del registro a determinadas litologías (Johnson and Pile, 2002; Serra, 1984).

Los métodos micromecánicos están ampliamente difundidos en la aplicación de la descripción de las propiedades elásticas efectivas de materiales compuestos. Al no contar con información acerca de la microestructura de la roca, se usan los registros de pozo aplicando el método autoconsistente para la determinación general de los módulos elásticos de los materiales isotrópicos (Ronquillo et al., 2010).

Para la estimación de minerales en un medio poroso isotrópico se editaron los datos de registros de pozo de porosidad, densidad y sísmico. En función de la porosidad se determinó la velocidad de onda P y S y los espacios porosos fueron tomados como modelos de elipsoides (Markov et al., 2006; Levin and Álvarez, 2007).

Usando los datos de los registros de pozo anteriormente mencionados se estimó la proporción variable de minerales usando el programa invermarkov cuyos fundamentos están basados en el método auto consistente. Se desarrolló un software para la estimación de módulos elásticos efectivos en función de la proporción variable de minerales. Así

mismo se realizó la edición de datos de registros de pozo. Así como correlación y calibración con datos de laboratorio, crossplot, análisis de zonas de interés e incorporación de tiempo de tránsito integrado (TTI) a los pozos.

En otro contexto para la estimación de minerales y módulos efectivos se realizó un picado de velocidades denso en CMP's de datos sísmicos de reflexión 3-D, cada 25 metros con un intervalo de muestro de un milisegundo. Esto con la finalidad de tener un correcto modelo de velocidades el cual depende de una apropiada relación señal-ruido en los datos sísmicos de entrada y en picar correctamente los espectros de semblanza (Adler and Brandwood, 1999; Fomel, 2009; Yilmaz, 2001). El cubo de velocidades generado fue calibrado con los registros sísmicos de los pozos. A partir del cubo de velocidades de ondas longitudinales (ondas P) y formulas empíricas se estimaron cubos de tiempo de tránsito de onda P y S, densidad y porosidad (Mavko, 2009). Con los datos de los cubos mencionados anteriormente se obtuvieron cubos de la distribución de minerales en zonas de interés usando el método auto consistente (Markov et al., 2006).

Se obtuvieron cubos de proporción variable de calcita, cuarzo y arcilla de la zona de interés 1 y 2. Se correlacionó la proporción variable de minerales obtenida con registros de pozo y la proporción variable de minerales obtenida con cubo de velocidades; el cuarzo se presentó como el mineral con mayor proporción de contenido en la zona de interés 1 y 2.

Concluyendo que se desarrolló para la solución del objetivo principal de la tesis una metodología no convencional integral al adaptar el programa invermarkov (Markov et al., 2006) para poder estimar la proporción variable de minerales en yacimientos arenos arcillosos y desarrollar el software Módulos Elásticos Efectivos para la estimación de medios efectivos en función de la proporción relativa de minerales. Así mismo como la validación de la metodología desarrollada en datos de registros geofísicos de pozo y en datos sísmicos. La metodología desarrollada contribuye complementariamente en la caracterización estática de yacimientos arenos arcillosos y rocas carbonatadas.

CAPÍTULO I

Análisis de propiedades petrofísicas en registros geofísicos de pozo

Capítulo I

Análisis de propiedades petrofísicas en registros geofísicos de pozo

I.1. Registro Sónico

El registro sónico mide el tiempo de tránsito en las rocas (Δt), esto es la capacidad que tienen de transmitirse las ondas de sonido al pasar por una formación, geológicamente esta varía con la textura de las rocas y litología, que es principalmente la porosidad (Johnson and Pile, 2002).

El objetivo de la herramienta del registro sónico es registrar el tiempo que tarda en viajar el pulso de sonido entre el transmisor y el receptor. La medición del pulso es la onda P o compresional que es el primer arribo, en el cual la vibración de las partículas es en dirección del movimiento.

La herramienta del registro sónico transmite frecuencias desde el origen entre 10-40 kHz (kilo Hertz) ó 10,000-40,000 ciclos por segundo.

Las unidades del registro sónico son microsegundos por pie $\mu s / ft$, el rango del tiempo de tránsito (Δt) más común está entre $40 \mu s / ft$ y $140 \mu s / ft$. La velocidad es el recíproco del tiempo de tránsito del sónico ($1/\Delta t$) y sus unidades son m/seg.

El tiempo de tránsito integrado (TTI) es registrado simultáneamente, representa un tiempo derivado por la velocidad promedio registrado en la formación y viene integrada la profundidad vertical en los intervalos en milisegundos.

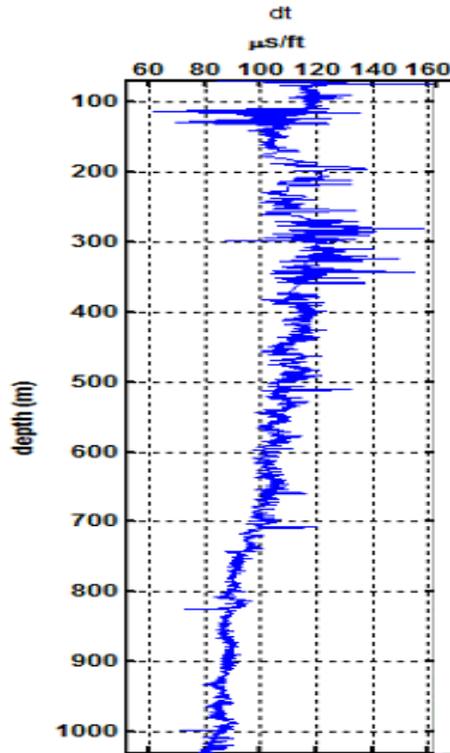


Figura 1.1. Muestra de un registro sísmico. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

I.2 Registro RHOB

El registro de densidad RHOB o RHOZ registra indirectamente la densidad de la roca en formaciones constantes. El valor total es una función de la densidad de los minerales de la roca (matriz) y el volumen de los fluidos encerrados (Johnson and Pile, 2002).

El registro es acompañado por una curva de Calibración (Caliper) indicando el diámetro del agujero y el enjarre, también incluye un registro de tensión de cable y se puede correr combinado con el Neutrón.

Normalmente tiene escala lineal entre 1.95 y 2.95 g/cm³. La profundidad de investigación es de aproximadamente 30 cm, similar a su definición vertical. Algunas veces la herramienta de densidad es afectada por las condiciones del agujero.

El registro de densidad sirve para obtener límite de capas, espesores, volumen de arcilla y en combinación con el registro de neutrón es indicador de presencia de gas.

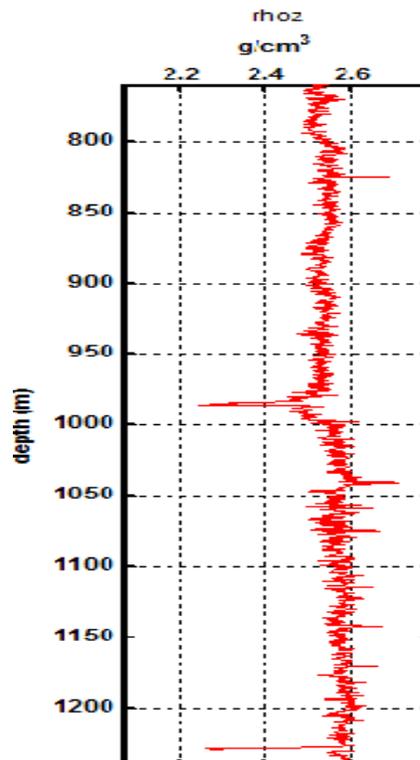


Figura 1.2. Muestra de un registro de densidad. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

I.3 Registro NPHI

El registro de porosidad NPHI se basa en la medición de concentraciones de hidrógenos que se encuentran en los fluidos, así como el gas. Posee una fuente de neutrones, los cuales colisionan con los hidrógenos presentes en los poros de la roca (Johnson and Pile, 2002).

La herramienta también posee un receptor que mide los neutrones dispersos liberados en las colisiones. La herramienta se llama CNL. Sirve para estimar la porosidad neutrónica de las rocas (NPHI). Si el registro neutrónico es alto indica alta índice de neutrones, y si es bajo indica bajo índice de neutrones. Se lee de derecha a izquierda. La unidad de medida es en fracción o en %, con un rango de valores que va desde -0.15 a 0.45 (-15 a 45 %). El

registro de neutrón por lo general esta calibrado en roca caliza. Los factores que afectan la medición del registro de neutrón son la rugosidad de la pared del pozo, el diámetro de pozo y el lodo que contiene bentonita.

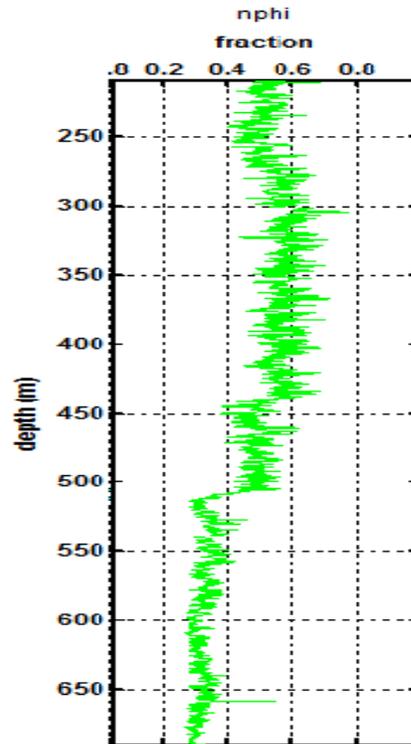


Figura 1.3. Muestra de un registro de porosidad de neutrón. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

I.4 Registro GR

La radiación natural de las formaciones proviene de las tres familias de elementos presentes en las rocas: Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K). El decaimiento de estos genera la emisión continua de los rayos gama naturales y son medidas utilizando un detector adecuado dentro del pozo. Por ejemplo un detector de centelleo con una longitud de 20 a 30 cm genera un pulso eléctrico por cada Rayo Gama observado, el parámetro reconocido es el número de pulsos por segundo registrados por el detector. Cuando la curva está próxima a los valores menores de la pista representan a una zona permeable (Serra, 1984).

La escala es de 0 a 100 ó 0 a 150 y sus unidades son API (American Petroleum Institute), es definida como 1/200 de la respuesta generada por un calibrador patrón constituido por una formación artificial que contiene cantidades bien definidas de uranio, torio y potasio, mantenida por el API.

La curva SGR (Standard Gamma Ray) es la contribución total de las tres familias de elementos en unidades API. La curva CGR (Computed Gamma Ray) que es GR sin Uranio representa la contribución del torio y el potasio en unidades API y facilita el cálculo de arcillosidad (las lutitas frecuentemente no contienen Uranio).

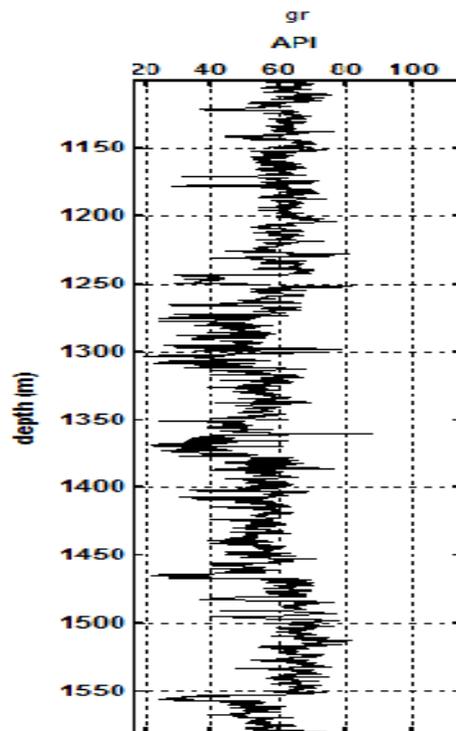


Figura 1.4. Muestra de un registro de rayos Gamma. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

I.5 Poisson

El coeficiente de Poisson (denotado mediante la letra griega σ) es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico

lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente (L) y se adelgaza (W) en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Si sobre el cuerpo de la Figura 1.5 se aplica una fuerza de tracción en dirección x se produce un alargamiento relativo ε_x en esa dirección y un acortamiento relativo ε_y y ε_z en las dos direcciones transversales, definiéndose el coeficiente de Poisson como:

$$\sigma = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$$

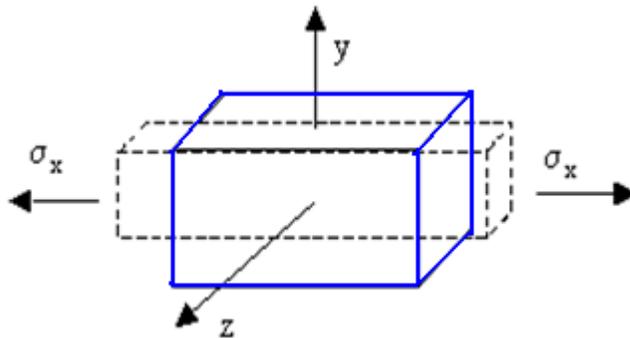


Figura 1.5. Muestra aplicación de una fuerza a un cuerpo.

El coeficiente de Poisson varía de 0 a 0.5. El coeficiente de Poisson para fluidos tiene un valor de 0.5 y para sólidos un valor de 0.25.

I.6 Formulas empíricas en función de porosidad efectiva, velocidad de onda compresional y densidad

Una formula empirica es una expresion matematica que sintetiza, por medio de regresiones, correlaciones u otro medio numérico, una serie resultados observados en diversos ensayos.

Las formulas empíricas que a continuación se presentan han sido deducidas experimentalmente para distintas litologías con el objetivo de obtener densidad en función de la velocidad de propagación de onda P, porosidad en función de la velocidad de propagación de la onda P y velocidad de onda P en función de densidad y porosidad (Mavko, 2009).

La aplicación correcta de las formulas empíricas depende de conocer las características litológicas de la zona; ya que cada tipo de litología tiene formulas empíricas distintas; por ejemplo litologías que presentan dolomita, caliza, arenas poco consolidadas, arenas con alta porosidad.

Para arenas poco consolidadas se tienen los siguientes propiedades mostradas acontinuacion en la Figura 1.6.

	Minimo	Maximo	Promedio	Desviación estándar
Vp (km/s)	3.46	4.79	3.80	0.24
Vs (km/s)	1.95	2.66	2.16	0.15
Vp/Vs	1.68	1.88	1.75	0.13
Porosidad	0.02	0.32	0.18	0.08
Densidad (g/cm ³)	2.12	2.69	2.33	0.13
Impedancia 10 ⁶ (kg/m ³)(m/s)	7.57	9.98	8.57	0.67

Figura 1.6. Tabla de propiedades de arenas con alta porosidad (Tomada de: Mavko, 2009)

En arenas poco consolidadas para la obtención de densidad empírica a partir de la velocidad de onda compresional P se usa la ecuación $\rho = 1.498 + 0.224V_p$ como se muestra en la Figura 1.7.

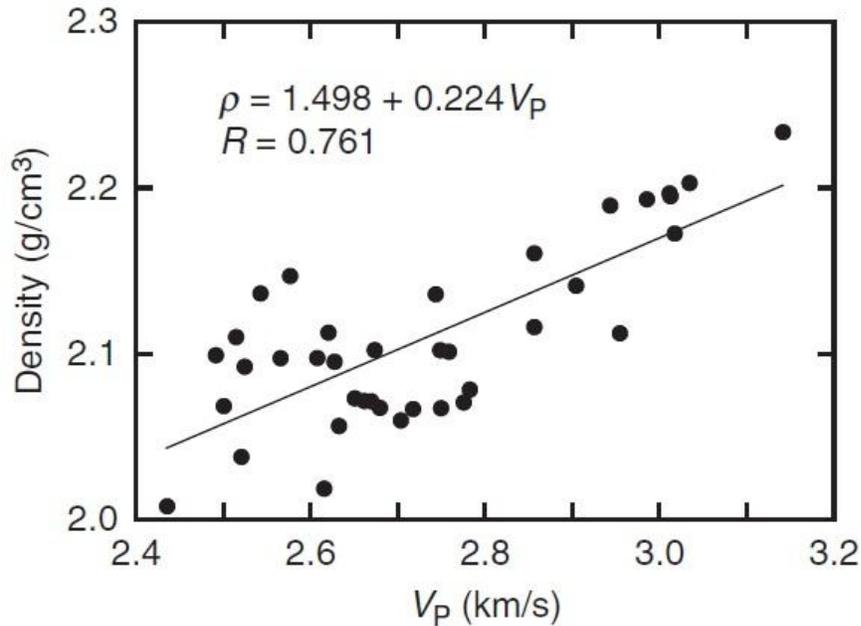


Figura 1.7. Grafica de densidad en funcion de velocidad de onda P (Tomada de: Mavko, 2009).

Para la obtención de porosidad en funcion de velocidad de onda P se usala ecuación $\phi = -\frac{V_p-3.7}{3.4}$ como se muestra en la Figura 1.8.

El cambio de los coeficientes de las formulas empiricas permite la obtención de un mejor resultado al compararlo con los datos de registro de pozo y los datos obtenidos apartir de las formulas empiricas.

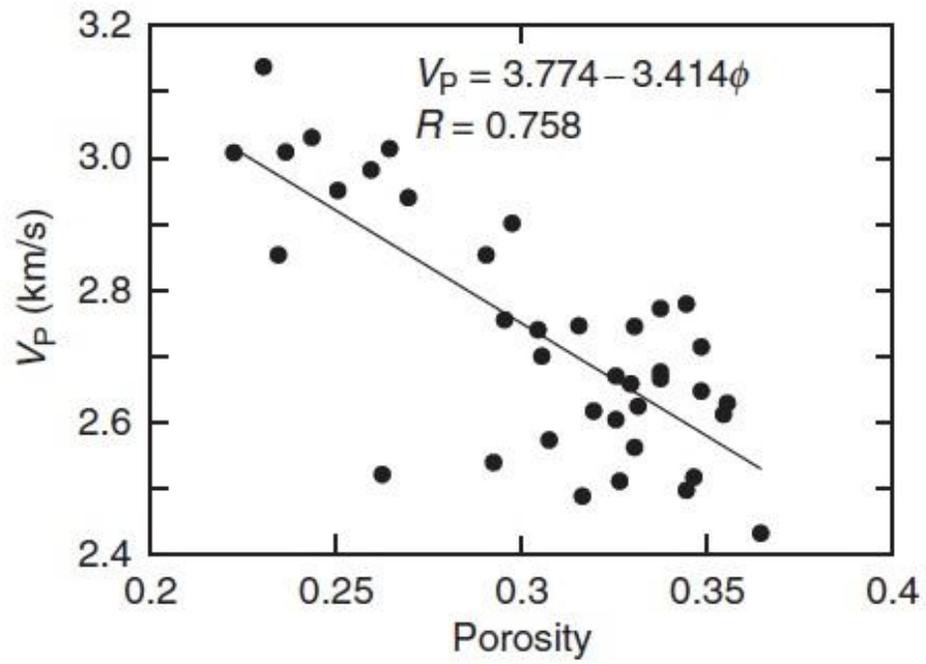


Figura 1.8. Grafica de velocidad de onda P en función de porosidad(Tomada de: Mavko, 2009).

CAPÍTULO II

**Fundamentos en medios efectivos para
la estimación de módulos elásticos en
función de los minerales y sus
propiedades**

Capítulo II

Fundamentos en medios efectivos para la estimación de módulos elásticos en función de los minerales y sus propiedades

II.1 Modulo elástico efectivo de mezclas micro-inhomogeneas

Los métodos micromecánicos tienen una amplia aplicación en la descripción de las propiedades elásticas efectivas de materiales compuestos. En una aplicación práctica en geomecánica los enfoques basados en el método auto consistente son los más populares (Ronquillo et al., 2010).

La aplicación de estos métodos en mecánica de rocas está plenamente justificada cuando existe información acerca de la microestructura (la talla media y las formas de los poros y las inclusiones de varios minerales y su distribución en el espacio, por ejemplo). Al mismo tiempo esta información detallada, no está a menudo disponible en la práctica.

Se uso un método para la determinación general de los módulos elásticos de los materiales isotrópicos micro-inhomogéneos ya que es ideal en la ausencia de la información detallada mencionada anteriormente.

El método es muy simple en la realización y se basa en una hipótesis única sobre la dependencia de una función de correlación de dos puntos construido sobre la fluctuación de las características del material de la distancia entre estos puntos. Esta suposición que significa la falta de "orden cerrado" en la micro-estructura del material ("material perfectamente desordenada"), nos permite sumar la serie de Neumann y encontrar las expresiones explícitas para los módulos elásticos efectivos de materiales micro-inhomogéneos.

Se aplicó este método para la predicción general de los módulos elásticos efectivos de una mezcla de varios componentes elásticos. Las expresiones explícitas son obtenidas de los módulos elásticos de bulk y de corte de materiales isotrópicos multicomponente (Levin and Álvarez, 2007).

Las propiedades elásticas efectivas de mezclas multicomponente:

Se considera un medio elástico de múltiples componentes con un número arbitrario de componentes en el que es imposible distinguir entre la matriz y las inclusiones (mezcla desordenada).

La mezcla se encuentra bajo la acción exterior de la relación deformación-esfuerzo. Con la ecuación de Hooke para esta mezcla se puede escribir en forma:

$$\sigma_{ij}(x) = C_{ijkl}(x)\varepsilon_{kl}(x) \quad (2.1)$$

Aquí $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}(x)$ son los tensores de esfuerzo y deformación correspondientemente, $C_{ijkl}(x)$ es el tensor del módulo elástico, tomando el valor constante de C_{ijkl}^r donde el punto $x(x_1, x_2, x_3)$ está en una región ocupada por r -n componentes ($r=1, 2, \dots$). Para el material con el tensor de la microestructura al azar $C_{ijkl}(x)$ es una función al azar de coordenadas.

Consideremos el presente volumen V de la mezcla. Este volumen debe contener un número suficientemente grande de heterogeneidades para ser considerado como macroscópicamente homogéneo, es decir, las dimensiones lineales de este volumen deben ser mucho mayores que las de las heterogeneidades y la distancia entre ellos. Al mismo tiempo, el esfuerzo externo (o deformación) cambia este volumen, y por lo tanto se puede ignorar.

En otras palabras, el volumen representativo puede ser considerado como un "macro-punto" en la mezcla micro-heterogénea.

Denotando la operación promedio sobre el volumen representativo V obteniendo a partir de (2.1):

$$\langle \sigma_{ij}(x) \rangle = \langle C_{ijkl}(x) \rangle \langle \epsilon_{kl}(x) \rangle + \langle C'_{ijkl}(x) \epsilon'_{kl}(x) \rangle \quad (2.2)$$

Aquí la fluctuación del valor promedio:

$$f'(x) = f(x) - \langle f(x) \rangle \quad (2.3)$$

La fluctuación del campo de deformación debe ser una función lineal de su valor medio. Si se introduce un tensor de cuarto orden $\Lambda_{ijkl}(x)$ es posible reescribir:

$$\epsilon'_{ij}(x) = \Lambda_{ijkl}(x) \langle \epsilon_{kl}(x) \rangle \quad (2.4)$$

Sustituyendo esta expresión en (2.2) obtenemos:

$$\langle \sigma_{ij}(x) \rangle = C_{ijkl}^* \langle \epsilon_{kl}(x) \rangle \quad (2.5)$$

Donde C^* es el tensor de los módulos elásticos efectivos de la mezcla. Este tensor es definido por la expresión:

$$C_{ijkl}^* = \langle C_{ijkl}(x) \rangle + \langle C'_{ijpq}(x) \Lambda_{pqkl}(x) \rangle \quad (2.6)$$

Por lo tanto, el problema del cálculo de los módulos elásticos efectivos de la mezcla considerada es transformado al determinado tensor $\Lambda_{ijkl}(x)$.

En ausencia de fuerzas de cuerpo en la ecuación de equilibrio, de la teoría lineal elástica heterogénea se puede escribir como:

$$\partial_j [C_{ijkl}(x) \epsilon_{kl}(x)] = 0, \partial_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

Podemos reescribir esta ecuación en la forma:

$$\partial_j \langle C_{ijkl}(x) \rangle \varepsilon'_{kl}(x) = -\partial_j [C'_{ijkl}(x) \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle + C'_{ijkl}(x) \varepsilon'_{kl}(x)] \quad (2.8)$$

El tensor $C_{ijkl}(x)$ se puede considerar como función aleatoria ergódica. Esto significa que su promedio de volumen coincide con el promedio de la realización en conjunto y es el tensor con componentes constantes. Denotaremos este tensor de área como:

$$\langle C_{ijkl}(x) \rangle = C_{ijkl}^0 = \text{const} \quad (2.9)$$

El campo de deformación es ergódico sólo para un campo constante externo aplicado al medio. Este campo externo es $\varepsilon_{ij}^0 = \text{const}$. Si el desplazamiento $u_i^0(x)$ dado en la superficie S de el volumen V tiene la forma $u_i^0(x) = \varepsilon_{ij}^0 x_j$, el valor medio de la deformación en este volumen de la mezcla es igual a $\varepsilon_{ij}^0 = \text{const}$.

$$\langle \varepsilon_{ij}(x) \rangle = \frac{1}{2V} \int_V \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dx = \frac{1}{2V} \int_S (u_i^0 n_j + u_j^0 n_i) dS = \varepsilon_{ij}^0 \quad (2.10)$$

Esta propiedad se mantiene para una región V que ocupa todo el espacio. La ecuación (2.8) ahora toma la forma:

$$\partial_j C_{ijkl}^0 \varepsilon_{kl}(x) = -\partial_j [C'_{ijkl}(x) \varepsilon_{kl}^0 + C'_{ijkl}(x) \varepsilon'_{kl}] \quad (2.11)$$

El lado derecho de esta ecuación se puede considerar como una cierta distribución de las fuerzas de cuerpo en el medio con módulos elásticos constantes (determinista) C^0 . En este caso, podemos transformar la ecuación (2.11) en la ecuación integral equivalente (Levin and Álvarez, 2007):

$$\varepsilon'_{ij}(x) = \int_V \partial_j G_{ik}(x - x') \partial'_l [C'_{klm,n}(x') \varepsilon_{mn}^0 + C'_{klmn}(x') \varepsilon'_{mn}(x')] dx' \quad (2.12)$$

Aquí $G_{ik}(x)$ es la función de Green del operador $\partial_j C_{ijkl}^0 \partial_l$ para la región V . Despreciando los efectos del límite se puede considerar la región V para ser lo suficientemente grande como para reemplazar esta función por la función de Green para un medio sin límites.

Sustituyendo la relación (2.4) en la ecuación. (2.12) se obtiene:

$$\Lambda_{ijkl}(x) \varepsilon_{kl}^0(x) = \int_V G_{ik}(x - x') \partial_j' \partial_l' [C'_{klmn}(x') \varepsilon_{mn}^0 + C'_{klmn}(x') \Lambda_{mnr s}(x') \varepsilon_{rs}^0] dx' \quad (2.13)$$

Como se mencionó anteriormente ε_{ij}^0 es un tensor constante, como sigue:

$$\Lambda_{ijkl}(x) = \int_V G_{ik}(x - x') \partial_j' \partial_l' [C'_{klmn}(x') + C'_{klmn}(x') \Lambda'_{rsmn}(x')] dx' \quad (2.14)$$

Con la ayuda de esta ecuación y algunas suposiciones adicionales acerca de la microestructura del medio, es posible determinar el valor $\langle C'_{ijkl}(x) \Lambda_{mnkl}(x) \rangle$ y el tensor del módulo elástico efectivo (ver ecuación (2.6))

Si, se multiplica ambos lados de la ecuación (2.14) por $C'_{ijkl}(x)$ y se hace la operación promedio en ambos lados de esta ecuación. El resultado puede ser escrito en la forma:

$$\langle C_{ijrs}(x) \Lambda_{rsmn}(x) \rangle = \int_V G_{rk}(\mathbf{R}) \partial_s \partial_l F_{ijrs}^{klmn}(\mathbf{R}) d\mathbf{R}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}, \quad (2.15)$$

donde es denotado:

$$F_{ijrs}^{klmn}(\mathbf{R}) = \langle C'_{ijrs}(\mathbf{x}) [C'_{klmn}(\mathbf{x} + \mathbf{R}) + C'_{klpq} \Lambda_{pqmn}(\mathbf{x} + \mathbf{R})] \rangle \quad (2.16)$$

para un material macroscópicamente isotrópico:

$$C_{ijkl}^0 = K_0 E_{ijkl}^1 + 2\mu_0 E_{ijkl}^2 \quad (2.17)$$

donde κ_0 es el modulo elástico de bulk, μ_0 es el modulo elástico de corte, y es denotado:

$$E_{ijkl}^1 = \delta_{ij}\delta_{kl}, \quad E_{ijkl}^2 = I_{ijkl} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}, \quad I_{ijkl} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{lj} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (2.18)$$

para un medio isotrópico la función de Green $G_{ik}(x)$ tiene la forma:

$$G_{ik}(\mathbf{R}) = \frac{1}{R} G_{ik}(\theta, \varphi) \quad (2.19)$$

$$G_{ik}(\theta, \varphi) = \frac{1}{8\pi\mu_0} [(2 - \kappa_0)\delta_{ik} + \kappa_0 n_i n_k], \quad (2.20)$$

$$n_i = \frac{R_i}{R}, \quad R = |\mathbf{R}|, \quad \kappa_0 = \frac{3\kappa_0 + \mu_0}{3\kappa_0 + 4\mu_0}$$

La mezcla de n componentes isotrópicos:

Se consideró un material micro-homogéneo conteniendo n componentes homogéneos e isotrópicos con concentraciones de volumen p_r , módulo elástico de bulk K_r y modulo elástico de corte μ_r ($r=1, 2, \dots, n$) (Levin and Álvarez, 2007).

Es conveniente reescribir el tensor P de la forma:

$$P_{ijkl} = \frac{1}{9K_p} E_{ijkl}^1 + \frac{1}{2\mu_p} E_{ijkl}^2 \quad (2.21)$$

donde:

$$K_p = K_0 + \frac{4}{3}\mu_0(2.22)$$

$$\mu_p = \frac{5\mu_0(3k_0+4\mu_0)}{6\mu_0(k_0+2\mu_0)}(2.23)$$

$$k_0 = \sum_{r=1}^n p_r K_r(2.24)$$

$$\mu_0 = \sum_{r=1}^n p_r \mu_r(2.25)$$

tomando en cuenta las relaciones:

$$\langle AC \rangle = \sum_{r=1}^n p_r K_r \left(1 + \frac{K'_r}{K_p}\right)^{-1} E^1 + 2 \sum_{r=1}^n p_r \mu_r \left(1 + \frac{\mu'_r}{\mu_p}\right)^{-1} E^1(2.26)$$

$$\langle A \rangle^{-1} = \frac{1}{3} \sum_{r=1}^n p_r \left(1 + \frac{K'_r}{K_p}\right)^{-1} E^1 + 2 \sum_{r=1}^n p_r \left(1 + \frac{\mu'_r}{\mu_p}\right)^{-1} E^1(2.27)$$

donde:

$$K'_r = K_r - \sum_{r=1}^n p_r K_r(2.28)$$

$$\mu'_r = \mu_r - \sum_{r=1}^n p_r \mu_r(2.29)$$

$$\sum_{r=1}^n p_r = 1(2.30)$$

Para esta mezcla se obtuvo:

$$C_{ijkl}^* = K^* E_{ijkl}^l + 2\mu_r E_{ijkl}^2 \quad (2.31)$$

En esta expresión son determinados el módulo elástico efectivo de bulk K^* y el módulo elástico efectivo de corte μ^* :

$$= \sum_{r=1}^n p_r K_r \left(1 + \frac{K'_r}{K_p}\right)^{-1} \left[\sum_{r=1}^n p_r \left(1 + \frac{K'_r}{K_p}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2.32)$$

K^* Es el módulo volumétrico efectivo.

$$\mu^* = \sum_{r=1}^n p_r \mu_r \left(1 + \frac{\mu'_r}{\mu_p}\right)^{-1} \left[\sum_{r=1}^n p_r \left(1 + \frac{\mu'_r}{\mu_p}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2.33)$$

μ^* Es el módulo de corte efectivo.

II.2 Estimación del módulo volumétrico efectivo en función del contenido de minerales

La estimación del módulo volumétrico efectivo en función del contenido variable de minerales se realizó a partir de la obtención de la ecuación (2.32).

Por ejemplo para calcular el modulo volumétrico efectivo para dos distintos minerales, se debe de considerar la ecuación (2.22) de la forma:

$$K_p = p_1 K_1 + p_2 K_2 + \frac{4}{3}(p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2) \quad (2.34)$$

A partir de la ecuación (2.28) se desarrolla para dos minerales

$$K'_1 = p_2(K_1 - K_2) \quad (2.35)$$

$$K'_2 = -p_1(K_1 - K_2) \quad (2.36)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.34), (2.35) y (2.36) en la ecuación (2.32) se obtiene

$$K^* = \frac{\frac{p_1 K_1}{1 + \frac{K'_1}{K_p}} + \frac{p_2 K_2}{1 - \frac{K'_2}{K_p}}}{\frac{p_1}{1 + \frac{K'_1}{K_p}} + \frac{p_2}{-\frac{K'_2}{K_p}}} \quad (2.37)$$

La ecuación (2.37) representa el modulo volumétrico efectivo en función del contenido de dos minerales distintos.

Con la obtención de la solución de las ecuaciones para obtener el modulo volumétrico efectivo se realizó el programa *Módulos Elásticos Efectivos* que obtiene el modulo volumétrico efectivo hasta para cuatro minerales distintos (Figura 3.23).

II.3. Estimación del módulo de corte efectivo en función del contenido de minerales

A partir de la ecuación (2.23) se obtiene el modulo de corte efectivo en función del contenido variable de minerales. Para el ejemplo de dos minerales distintos se considera la ecuación (2.23) obteniendo:

$$\mu_p = \frac{5(p_1\mu_1+p_2\mu_2)(3(p_1K_1+p_2K_2)+4(p_1\mu_1+p_2\mu_2))}{6((p_1\mu_1+p_2\mu_2)+2(p_1\mu_1+p_2\mu_2))} \quad (2.38)$$

Considerando la ecuación (2.29) para dos minerales distintos se obtiene:

$$\mu'_1 = p_2(\mu_1 - \mu_2) \quad (2.39)$$

$$\mu'_2 = -p_1(\mu_1 - \mu_2) \quad (2.40)$$

Al sustituir la ecuación (2.38), (2.39) y (2.40) en la ecuación (2.33) se obtiene:

$$\mu^* = \frac{\frac{p_1\mu_1}{1+\frac{\mu'_1}{\mu_p}} + \frac{p_2\mu_2}{1-\frac{\mu'_2}{\mu_p}}}{\frac{p_1}{1+\frac{\mu'_1}{\mu_p}} + \frac{p_2}{-\frac{\mu'_2}{\mu_p}}} \quad (2.41)$$

Siendo la ecuación (2.41) el módulo de corte efectivo en función del contenido de dos minerales distintos.

Ya obtenida las solución de las ecuaciones para el modulo efectivo de corte en función del contenido de minerales se elaboró el programa *Módulos Elásticos Efectivos* para calcular el módulo de corte efectivo hasta para cuatro minerales distintos (Figura 3.23).

CAPÍTULO III

**Estimaciones de minerales con base a
registros geofísicos de pozo**

Capítulo III

Estimaciones de minerales con base a registros geofísicos de pozo

III.1 Fundamentos para estimación de minerales con base a los registros de pozo (porosidad efectiva, densidad y sísmico)

La estimación de minerales basada en la información de registros geofísicos de pozo es realizada utilizando los registros de porosidad, densidad y sísmico. Para la estimación de minerales en un medio poroso isotrópico con fracturas o vugulos como inclusiones, se encuentran muy pocos métodos con los cuales se pueda hacer este cálculo de minerales, y el método auto consistente es el más prometedor.

En muchos casos en el proceso de inversión petrofísica es necesario calcular las velocidades de la onda P y S en función de la porosidad y las propiedades de los minerales. Las ecuaciones empíricas como la ecuación de promedio de tiempo o la ecuación RHG obtenida para una única mineralogía homogénea no puede ser aplicada en este caso de minerales mezclados; especialmente, para formaciones carbonatadas cuando la matriz sólida frecuentemente contiene múltiples minerales y puede contener una mezcla de dolomita y calcita (Figura 3.1) (Markov et al., 2006).

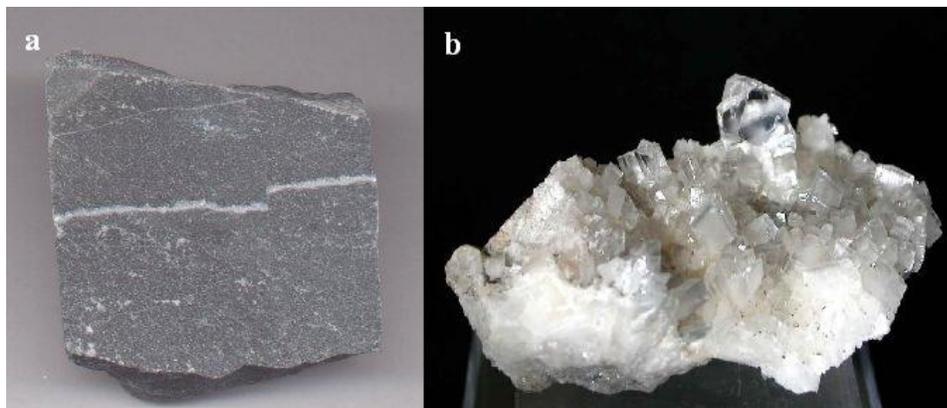


Figura 3.1. a) La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3). b) La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$].

Se realizó la determinación de la velocidad de onda P y S usando la variante simétrica de la aproximación del medio efectivo (effective medium approximation EMA), esto se realiza para relacionar la velocidad de la onda P y S con la porosidad; al final estas velocidades obtenidas con el método EMA son comparadas con las velocidades del registro de pozo para verificar su fiabilidad. Cada componente del medio es considerado como un elipsoide triaxial (Figura 3.2).

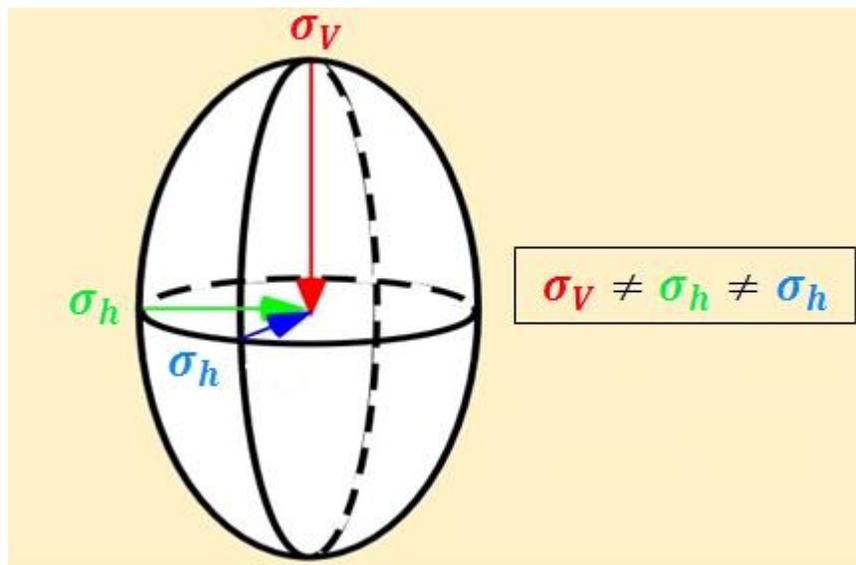


Figura 3.2. Elipsoide triaxial en el cual sus dos componentes horizontales y una vertical son de diferentes dimensiones.

La proporción de aspectos de granos y los poros como elipsoides son introducidos en función de la porosidad. Esta técnica consiste en los siguientes pasos:

- (1) determinación de la proporción del poro y de grano en función de la porosidad.
- (2) cálculo de las velocidades elásticas para una concentración de un componente mineral y porosidad dada.

Esta técnica relaciona las velocidades de onda P y S a la porosidad en el caso de formaciones carbonatadas con múltiples minerales.

El modelo aplicado presenta un medio isótropo homogéneo compuesto por N componentes: granos sólidos y poros saturados con un fluido. Para este modelo se consideró que el aspecto de proporción de los elipsoides de los granos sólidos y los poros saturados de agua son funciones de la porosidad. La introducción del variado aspecto de proporción de los elipsoides está basado en la suposición de que la microestructura de las rocas porosas (distribución de tamaño de poro y su conexión con otros poros) para altas y bajas porosidades son diferentes. El aspecto de proporción de los esferoides es determinado por un procedimiento de inversión.

Para este modelo se usó el método simétrico EMA el cual resuelve el problema de homogenización para sistemas multicomponente. El elemento individual de cada componente como un poro o grano fue aproximado por un elipsoide.

Las ecuaciones generales del método EMA para las propiedades elásticas del medio compuesto por N componentes se obtuvieron por (Korringa et al., 1979; Berryman, 1980, 1992; Norris, 1985):

$$\sum_{i=1}^N C_i (L_i - L^*) T^{(i)} = 0 \quad (3.1)$$

donde C_i es una concentración volumétrica del i-n componente ($\sum C_i = 1$) donde la sumatoria de la concentración volumétrica de los componentes debe ser igual a uno, L^* es el tensor elástico del medio efectivo, L_i es el tensor elástico del i-n componente, y $T^{(i)}$ es el tensor de Wu (Wu, 1966).

Para inclusiones isotrópicas los componentes del tensor L_i son definidas como:

$$L_{ijklm} = K_i \delta_{jk} \delta_{lm} + \mu_i (\delta_{jl} \delta_{km} + \delta_{jm} \delta_{kl} - \frac{2}{3} \delta_{jk} \delta_{lm}), \quad (3.2)$$

donde K_i y μ_i son los módulos de bulk y de corte de i-n componentes, δ_{ij} es la delta de Kronecker. El tensor $T^{(i)}$ relaciona el tensor de deformaciones dentro de los elementos individuales de i-n componentes.

Para el medio compuesto por componentes isotrópicos distribuidos arbitrariamente, el sistema (3.1) puede ser presentado como:

$$\sum_{i=1}^N C_i (K_i - K^*) P_i = 0,$$

(3.3)

$$\sum_{i=1}^N C_i(\mu_i - \mu^*) Q_i = 0$$

donde K^* y μ^* son el módulo de bulk y de corte para el medio efectivo, P y Q son factores geométricos (Berryman, 1980, 1992), y el índice i en P y Q indican que los factores son para una inclusión de un material i con módulos auto consistentes.

Los factores geométricos P y Q para inclusiones elipsoidales de aspectos de proporción arbitrarios están dados por:

$$P_i = \frac{1}{3} T_{jjll}^{(i)}, \quad (3.4)$$

$$Q_i = \frac{1}{5} (T_{jljl}^{(i)} - P_i),$$

donde el tensor T_{ijkl} , se refiere al campo lejano de deformación a la deformación dentro de la inclusión elipsoidal (Wu, 1966; Berryman, 1980), dan los escalares pertinentes para calcular P y Q como:

$$T_{iijj} = \frac{3F_1}{F_2}, \quad (3.5)$$

$$T_{ijij} - \frac{1}{3} T_{iijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4 F_5 + F_6 F_7 - F_8 F_9}{F_2 F_4},$$

Donde:

$$F_1 = 1 + a(1.5(f + t) - r(1.5 * f + 2.5 * t - 1.33333))$$

$$F_2 = 1 + a(1 + 1.5(f + t) - r(1.5f + 2.5t)) + b(3 - 4r) + \frac{a}{2} (a + 3b)(3 - 4r)(f + t - r(f - t + 2t^2)),$$

$$F_3 = 1 + a(1 - (f + 1.5t) + r(f + t)),$$

$$F_4 = 1 + \frac{a}{4} (f + 3t - r(f - t)),$$

$$F_5 = a(r(f + t - 1.33333) - f) + bt(3 - 4r), \quad (3.6)$$

$$F_6 = 1 + a(1 + f - r(f + t)) + b(1 - t)(3 - 4r),$$

$$F_7 = 2 + \frac{a}{4}(3f + 9t - r(3f + 5t)) + bt(3 - 4r),$$

$$F_8 = a\left(1 - 2r + \frac{f}{2}(r - 1) + \frac{t}{2}(5r - 3)\right) + b(1 - t)(3 - 4r),$$

$$F_9 = a((r - 1)f - rt) + bt(3 - 4r),$$

Con a , b y r están dadas por:

$$a = \frac{\mu_i}{\mu_m} - 1,$$

$$b = \frac{1}{3} \left(\frac{K_i}{K_m} - \frac{\mu_i}{\mu_m} \right), \quad (3.7)$$

$$r = \frac{1 - 2\nu_m}{2(1 - \nu_m)},$$

La función t y f están dadas por:

$$t = \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1)^{3/2}} \left(\alpha(\alpha^2 - 1)^{1/2} - \cosh^{-1} \alpha \right), \quad (3.8)$$

Para esferoides achatados por los polos (oblato):

$$t = \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} \left(\cos^{-1} \alpha - \alpha(a^2 - 1)^{1/2} \right),$$

Cuando $\alpha < 1$ para elipsoides achatados por los polos (oblato), y $\alpha > 1$ para elipsoides que tienen el eje de los polos más grande que el diámetro ecuatorial (prolato)

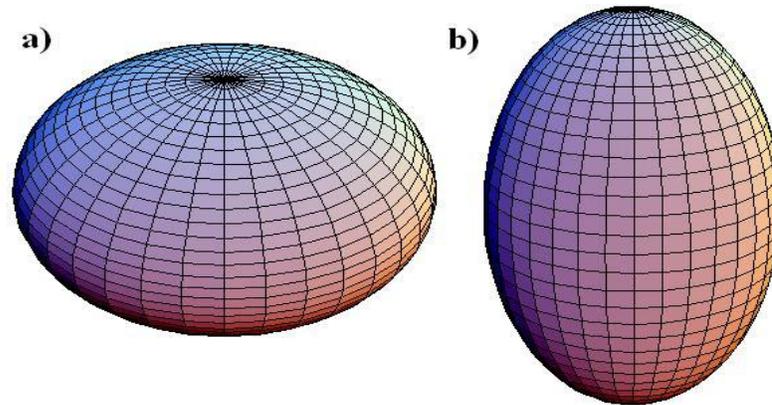


Figura 3.3. a) *Elipsoide oblato.* b) *Elipsoide prolato*

Para inclusiones de fluido se tiene $\mu = 0$. Las cavidades secas pueden ser modeladas estableciendo los módulos de la inclusión a cero. Los coeficientes P y Q en la ecuación (3.4) dependen de la forma de la inclusión (proporción de aspectos del elipsoide). Se asumió que la proporción de aspectos del elipsoide de la matriz de granos sólidos y poros sea igual. La proporción de aspectos del elipsoide ha sido definida por el tipo de litología de la roca bajo condiciones de minimización de la declinación de velocidad de la onda compresional obtenida del modelo EMA de datos experimentales de la velocidad de la onda compresional y la dependencia de porosidad.

Por ejemplo, la proporción de aspecto del elipsoide, igual a 0.17, es obtenida para roca caliza consolidada en condiciones naturales a una profundidad mayor a 200m y para dolomitas es 0.146(Markov et al., 2006).

III.2 Estimación de minerales

La estimación proporción variable de minerales es realizada empleando los datos de registros de pozo; estos datos son introducidos en el programa *invermarkov*(Figura 3.24) elaborado por M. Markov el cual calcula la lentitud acústica para una matriz porosa isotrópica empleando el método auto consistente(Markov et al., 2006).

Los datos a ingresar al programa son conformados por dos archivos de entrada:

Calbr.dat

entrada.dat

Los datos de entrada para el programa invermarkov son:

dt(n) datos de los tiempos de transito de la onda P de N fase de compuestos.

ds(n) datos de los tiempos de transito de la onda S de N fase de compuestos.

rho(n) datos de densidad de N fase de compuestos.

alf(n) datos de arreglo métrico (modelo de esferoides).

c(n) datos de fracción de volumen de N fase de compuestos.

n es el número de compuestos.

El archivo de *entrada.dat* se genera a partir de la introducción del número de columna de los registros dt, ds, rho, porosidad y GR del registro de pozo (*archivo .LAS*) tal y como se muestra en la Figura 3.4. La columna de datos GR es utilizada para la corrección de efecto de arcilla y obtención de porosidad efectiva.



Figura 3.4. Ventana de introducción de datos dt, ds, rho, porosidad y GR para la generación del archivo “entrada.dat”.

Ejemplo del formato del archivo *entrada.dat*:

c(n)

profundidad	dt	ds	rho	ϕ_e
1400.4036	82.7478	162.8974	2.4129	0.098282443

La densidad (**rho**), tiempos de tránsito para la onda P (**dt**) y onda S (**ds**) son obtenidos de los datos del registro geofísico de pozo. Los datos para **alf** son introducidos a partir de un archivo de entrada “Calibr.dat” que especifica la relación métrica de cada compuesto y las propiedades de los minerales con los que se va a trabajar; ϕ_e corresponde a los datos de porosidad efectiva calculados a partir del registro de porosidad deneutrón NPFI y del registro GR.

Ejemplo del formato del archivo *Calbr.dat*:

```
5
44.5 80. 2.87 0.17
47.5 90. 2.72 0.17
55. 91.5 2.65 0.16
95. 180. 2.3 0.05
187. 30000. 1. 0.17
4. 2. 1. 2.
```

La estructura del archivo *Calbr.dat* es la siguiente:

alf					
Fila	Compuesto	dt	ds	rho	(modelo de esferoides)
arreglo métrico					
2	Dolomita	44.5	80	2.87	0.17
3	Calcita	47.5	90	2.72	0.17
4	Arenisca	55	91.5	2.65	0.16
5	Arcilla	95	180	2.3	0.05
6	H2O	187	3000	1	0.17

A continuación se muestran imágenes obtenidas por microscopio electrónico de barrido que muestran elementos minerales característicos de la zona donde se obtuvieron los pozos, este tipo de minerales fueron los que se estimaron utilizando el programa *invermarkov*.

Carbonatos

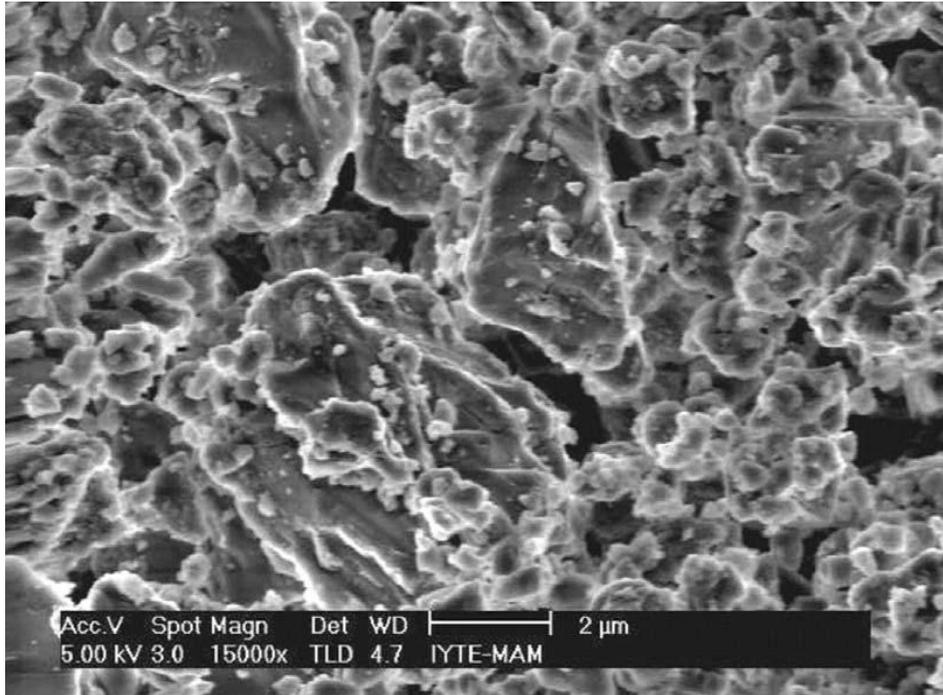


Figura 3.5. Imagen de calcita a 2 μm obtenida por microscopio electrónico de barrido.

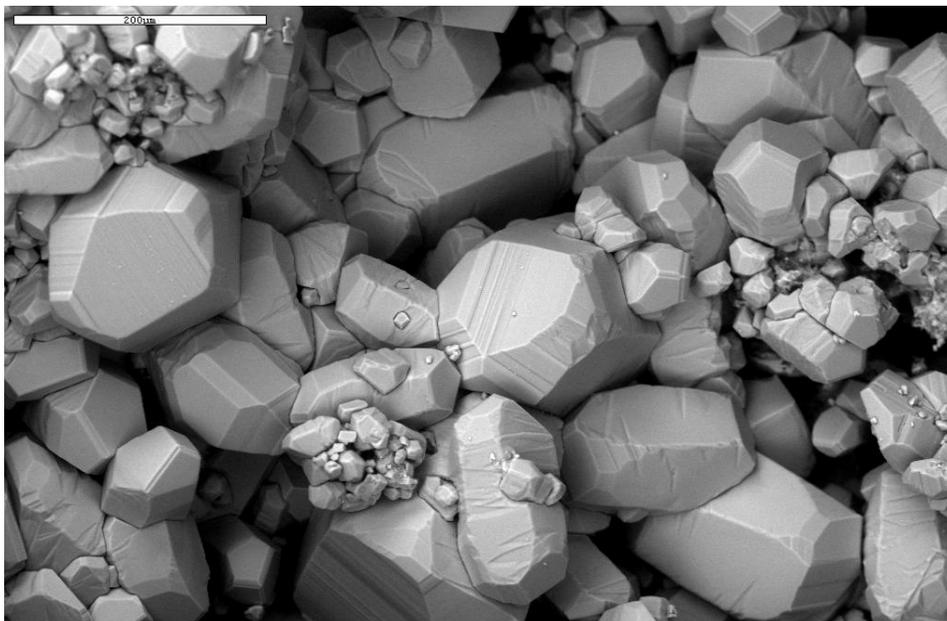


Figura 3.6. Imagen de calcita a 200 μm obtenida por microscopio electrónico de barrido.

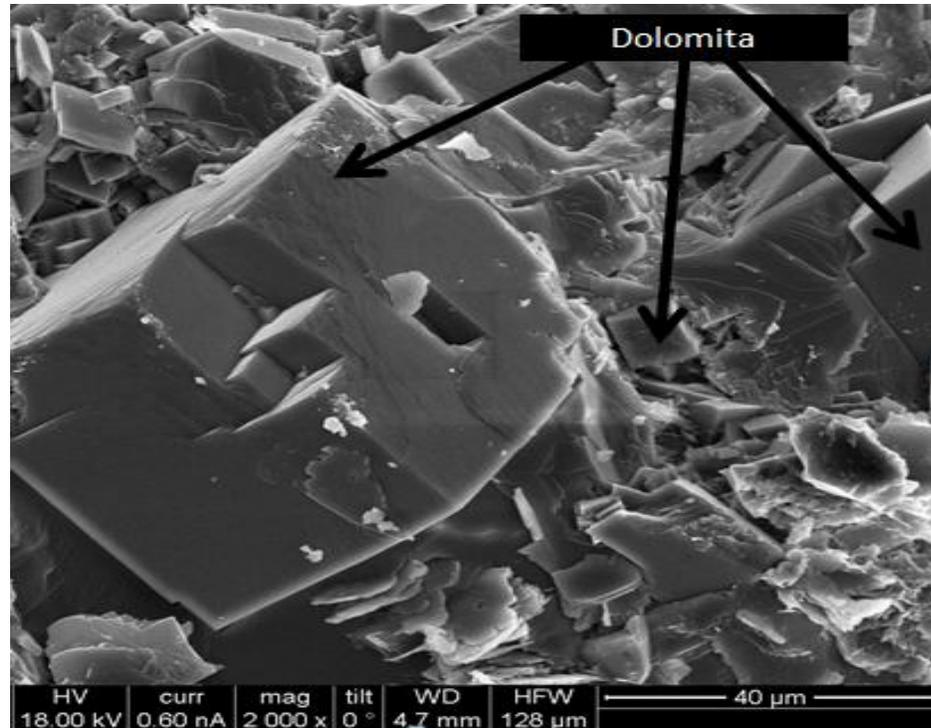


Figura 3.7. Imagen de dolomita obtenida por microscopio electrónico de barrido.

Silicatos

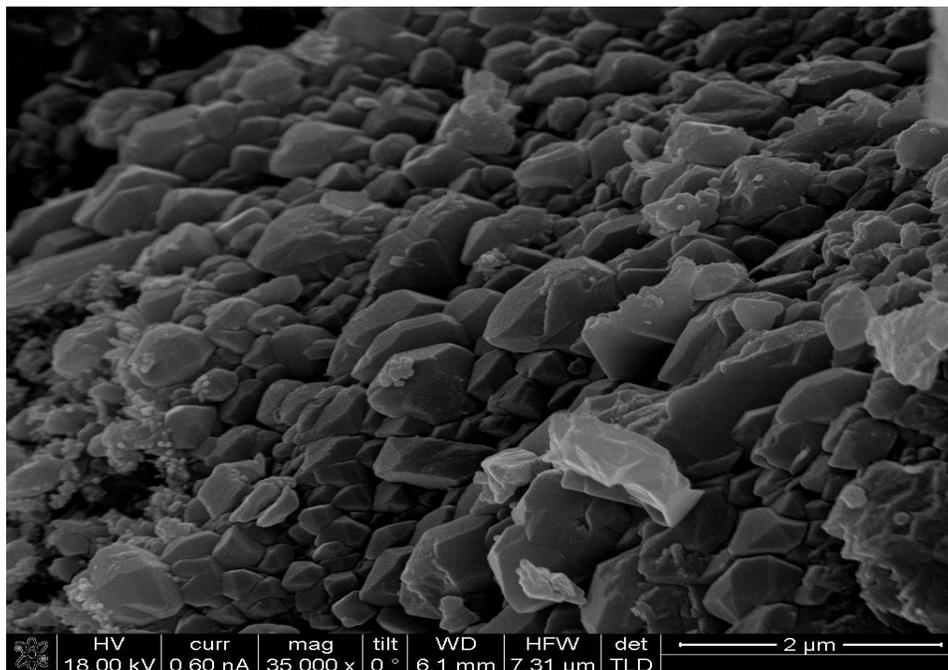


Figura 3.8. Imagen de cuarzo a 2 µm obtenida por microscopio electrónico de barrido.

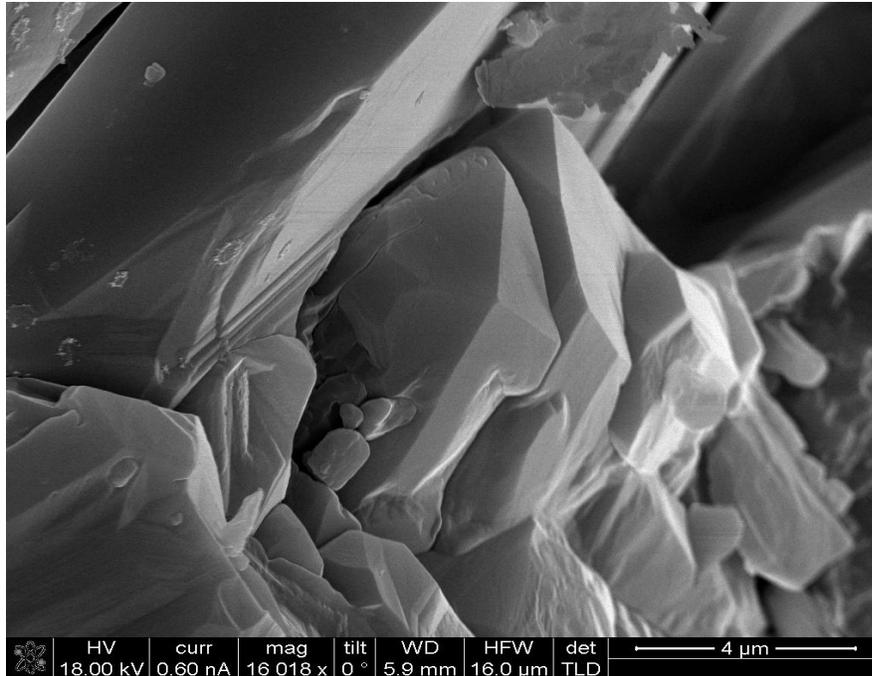


Figura 3.9. Imagen de cuarzo obtenida por microscopio electrónico de barrido.

Arcillas

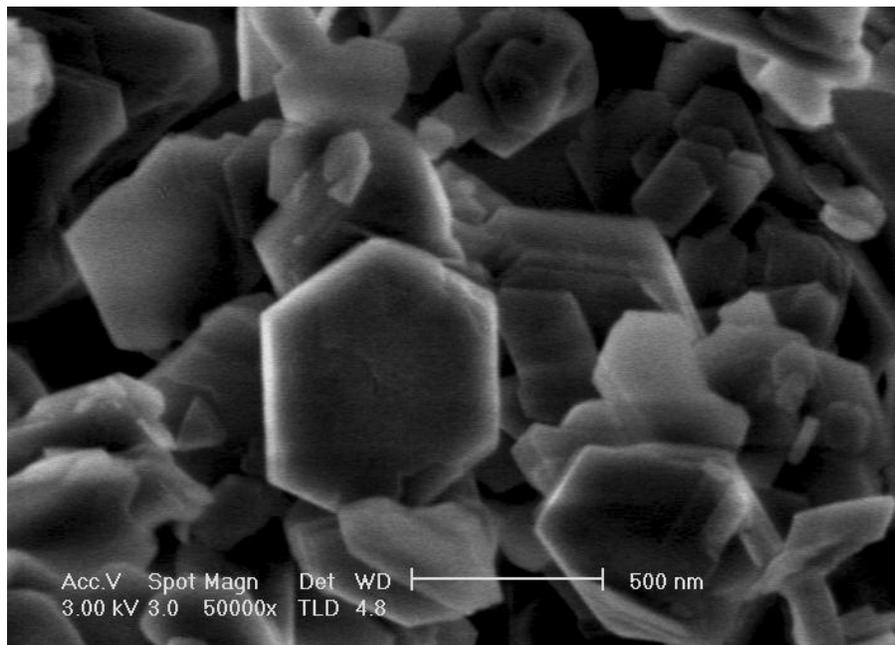


Figura 3.10. Imagen de arcilla de la familia caolinita obtenida por microscopio electrónico de barrido.

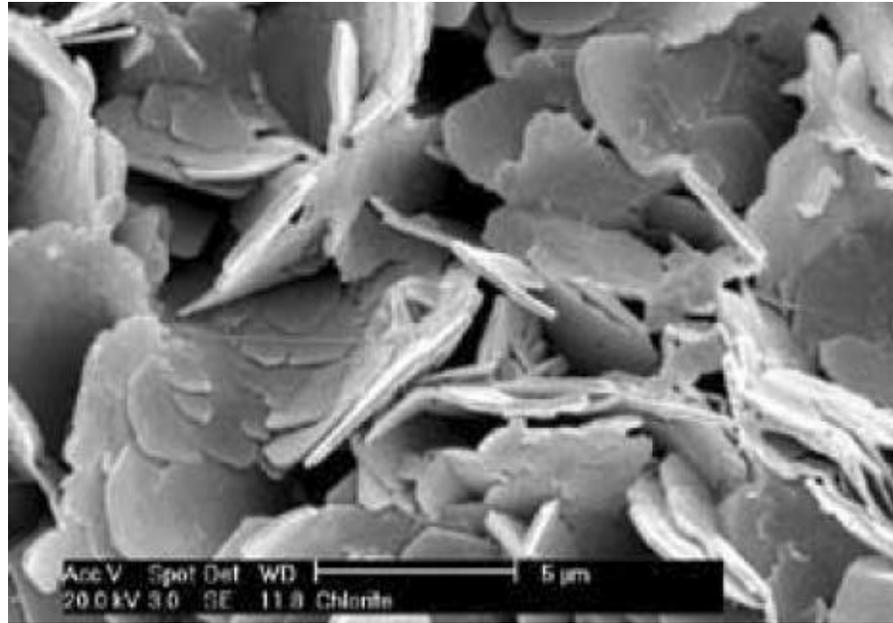


Figura 3.11. Imagen de arcilla de la familia clorita obtenida por microscopio electrónico de barrido.

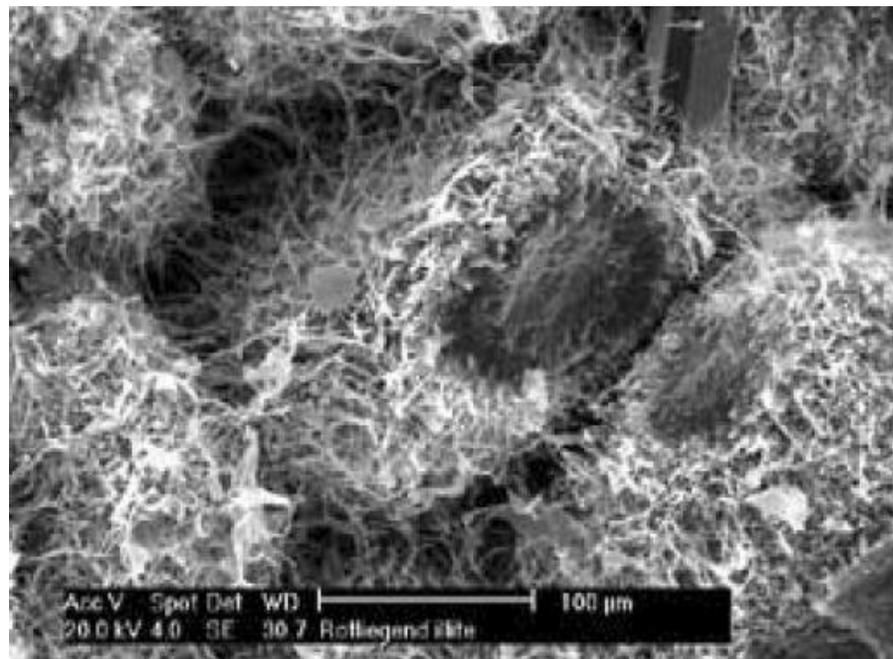


Figura 3.12. Imagen de arcilla de la familia illita obtenida por microscopio electrónico de barrido.

Impregnación de Hidrocarburos

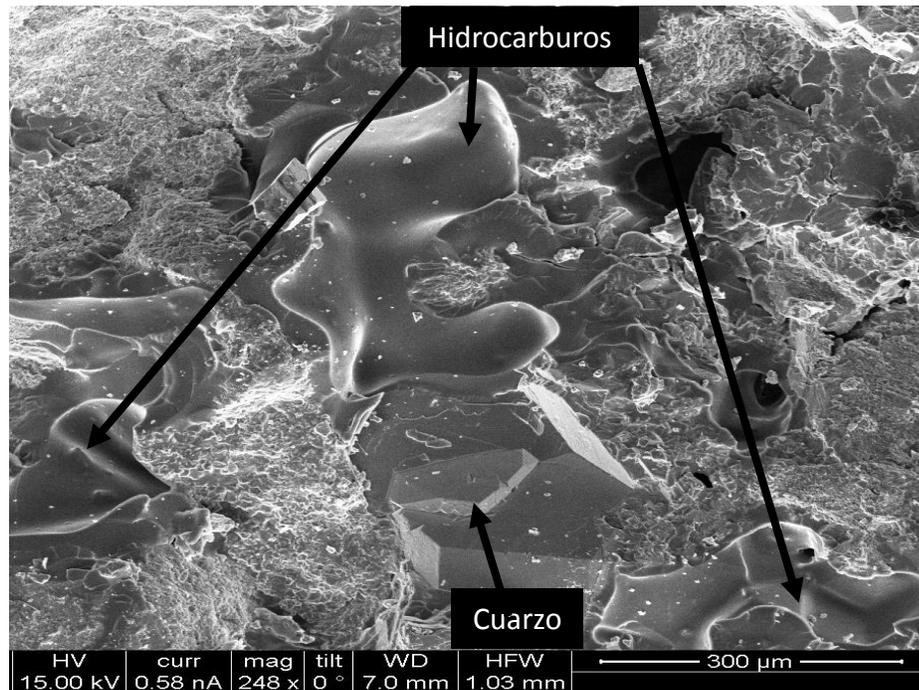


Figura 3.13. Imagen muestra impregnación de hidrocarburos en calcita y cuarzo. Obtenida por microscopio electrónico de barrido.

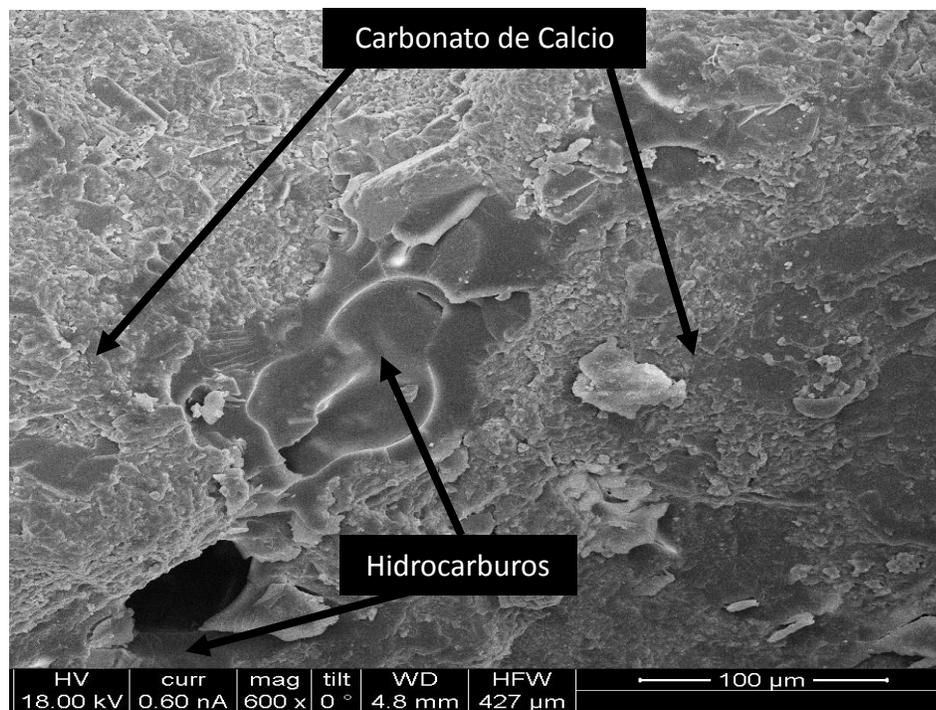


Figura 3.14. Imagen muestra impregnación de hidrocarburos en carbonato de calcio. Obtenida por microscopio electrónico de barrido.

El archivo *Calbr.dat* debe ser editado acuerdo a las propiedades físicas de los minerales con los cuales se trabajara. El dato **ds** para H2O en este caso debe ser un valor alto ya que no hay registro de velocidad de propagación de onda S en el agua; el programa *invermarkov* maneja de esta forma el parámetro de entrada para **ds**.

La primera columna son los datos de tiempo de transito de la onda P; la segunda columna son los datos de tiempo de transito de la onda S; la tercera columna son los datos de densidad y la cuarta columna son los datos de relación métrica (modelo de esferoides) de cada compuesto. La séptima fila “4. 2. 1. 2.” son los pesos que se le asignan a cada propiedad física (tiempos de tránsito, densidad y modelo de esferoides).

El uso de los pesos para cada compuesto es empleado en la siguiente ecuación:

$$F_{cont} = W_1(V_{pm} - V_{pcalc})^2 + W_2(V_{sm} - V_{scalc})^2 + W_3(\rho_c - \rho_m)^2 + W_4(Conct - 1)^2 \quad (3.9)$$

Línea de código en el programa *invermarkov* que emplea los datos de los pesos de los compuestos:

$$F = F + WP(1)*(DTP-dvvp)**2 + wp(2)*(dts-dvvs)**2 + wp(3)*(RO_c-ROM)**2 + wp(4)*(ConcT-1.)**2$$

El archivo de salida del programa *invermarkov* es “OutputDat.dat” que contiene el siguiente formato:

profundidad	c(1)	c(2)	c(3)	c(4)	dvvp	dtp	dvvs	dts
1400.099	.001	.001	.001	.775	83.445	83.588	158.579	158.291

dvvp es el tiempo de transito de la onda P para el compuesto.

dtp es el tiempo de transito de entrada.

dvvs es el tiempo de transito de la onda S para el compuesto.

dts es el tiempo de transito de entrada.

c(n) representa la fracción de volumen de cada compuesto.

La sumatoria de **c(n)** más la porosidad debe ser aproximado a $1, \sum_1^n C_i \approx 1$

Una vez calculado la fracción de volumen $c(\mathbf{n})$ de cada compuesto mediante el programa *invermarkov*, se realizó el cálculo del módulo volumétrico efectivo y el módulo de corte efectivo para los pozos empleando el programa de *módulos elásticos efectivos* (Apéndice A) el cual calcula los módulos elásticos efectivos utilizando como datos de entrada los valores de fracción de volumen previamente obtenidos $c(\mathbf{n})$ los cuales son referenciados como p_r en las ecuaciones (2.32) y (2.33); el módulo volumétrico K_r y de corte μ_r de cada compuesto introducidos en las ecuaciones (2.32) y (2.33).

Ejemplo de cálculo del módulo volumétrico efectivo K^* y módulo de corte efectivo μ^* para tres minerales utilizando el programa *módulos elásticos efectivos* (Figura 3.23) a partir de los registros del pozo:

Del menú principal del programa se selecciona la opción *tres minerales* la cual realiza el cálculo de módulos elásticos efectivos para tres minerales distintos.



Figura 3.15. Menú principal del programa módulos elásticos efectivos.

Una vez seleccionada la opción *tres minerales*, se introducen los módulos volumétrico y de corte de cada mineral (Figura 3.16); se debe introducir los módulos de cada mineral acorde a la litología de la región donde los datos de registros geofísicos fueron obtenidos. Para

conocer las propiedades físicas de cada mineral se emplea las tablas(Figura 3.17) del menú **Tablas** la cual contiene información detallada de cada mineral (Mavko, 2009).

```

----- Datos de Entrada -----
-----

Modulo Volumetrico del mineral 1:94.9
Modulo Volumetrico del mineral 2:76.8
Modulo Volumetrico del mineral 3:37

Modulo de corte del mineral 1:45.6
Modulo de corte del mineral 2:32
Modulo de corte del mineral 3:44
    
```

Figura 3.16. Introducción de módulos en GPa para tres minerales distintos en el programa Módulos Elásticos Efectivos.

	Bulk modulus	Shear modulus	Density (g/cc)	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)	Pisson. Ratio
CLAYS						
Kaolinite	1.5	1.4	1.58	1.44	0.93	0.14
Gulf Clays (Han)	25	9	2.55	3.81	1.88	0.34
Gulf Clays (Tosaya)	21	7	2.6	3.41	1.64	0.35
Mixed Clays				3.41	1.63	
CARBONATES						
Calcite	76.8	32	2.71	6.64	3.44	0.32
Dolomite	94.9	45.6	2.87	7.34	3.96	0.30

Figura 3.17. Tabla de propiedades físicas de minerales.

Ya que se introdujeron los datos de los módulos elásticos de los minerales, el programa calcula los módulos efectivos; creando un archivo de salida en formato “.LAS” el cual corresponde al formato de registros de pozo. El nuevo archivo de salida creado contiene la siguiente información:

#MNEMONIC.UNIT	API CODE	: CURVE DESCRIPTION
#-----	-----	-----
DEPTH	.M	: Measured Depth
K*	. UNKNOWN	: Modulo volumetrico efectivo
u*	. UNKNOWN	: Modulo de corte efectivo
Calcita	.% UNKNOWN	: compuesto uno
Cuarzo	.% UNKNOWN	: compuesto dos
Arcilla	.% UNKNOWN	: compuesto tres
ntp	.us/ft UNKNOWN	: DT:registro
nts	.us/ft UNKNOWN	: DS:calculado

El archivo de salida contiene ocho columnas correspondientes a la **profundidad**, modulo volumétrico efectivo K^* , módulo de corte efectivo μ^* , porcentaje de mineral uno (% **Calcita**), porcentaje de mineral dos (% **Cuarzo**), porcentaje de mineral tres (% **Arcilla**), tiempo de transito de onda P (**ntp**) del registro de pozo y tiempo de transito de onda S (**nts**) obtenida a partir de formula empírica en función de (**ntp**).

Una vez creado el nuevo archivo de salida para su visualización se selecciona la opción **Cargar Pozo** del menú del programa Módulos Elásticos Efectivos (Figura 3.15) a continuación se desplegara una ventana para seleccionar el archivo a graficar (Figura 3.18).

La opción **Cargar Pozo** sirve para graficar cualquier tipo de datos de registros de pozo con extensión “.LAS”; no necesariamente grafica los archivos generados por el programa módulos elásticos efectivos.

En la Figura 3.19 se muestra graficado el archivo de salida en formato “.LAS”. Es posible efectuar cambios a las propiedades graficas de cada registro; por ejemplo el color de línea, grosor de línea y otras opciones más como se muestra en la Figura 3.20.

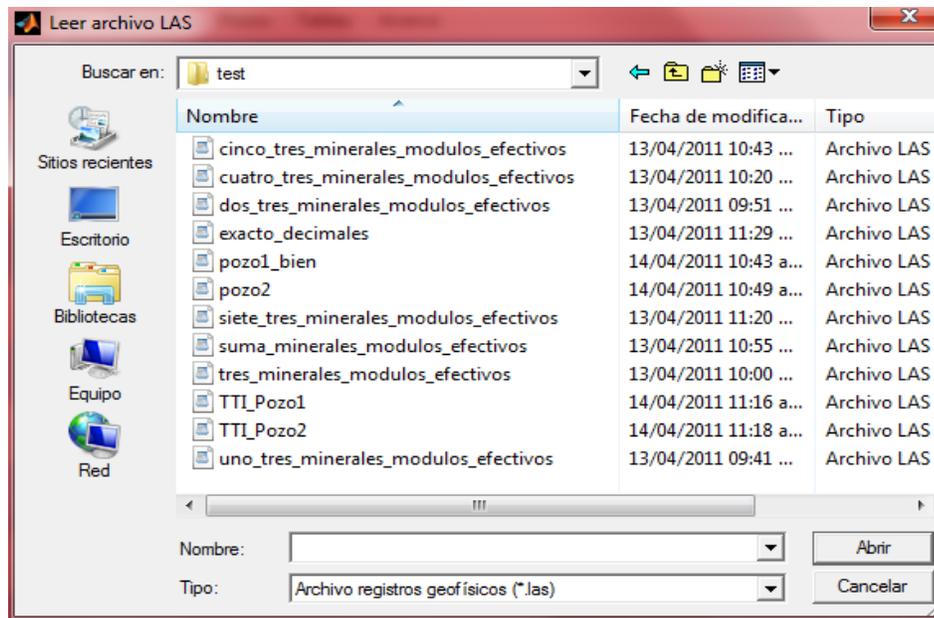


Figura 3.18. Ventana que permite seleccionar un archivo .LAS para graficar y poder visualizarlo.

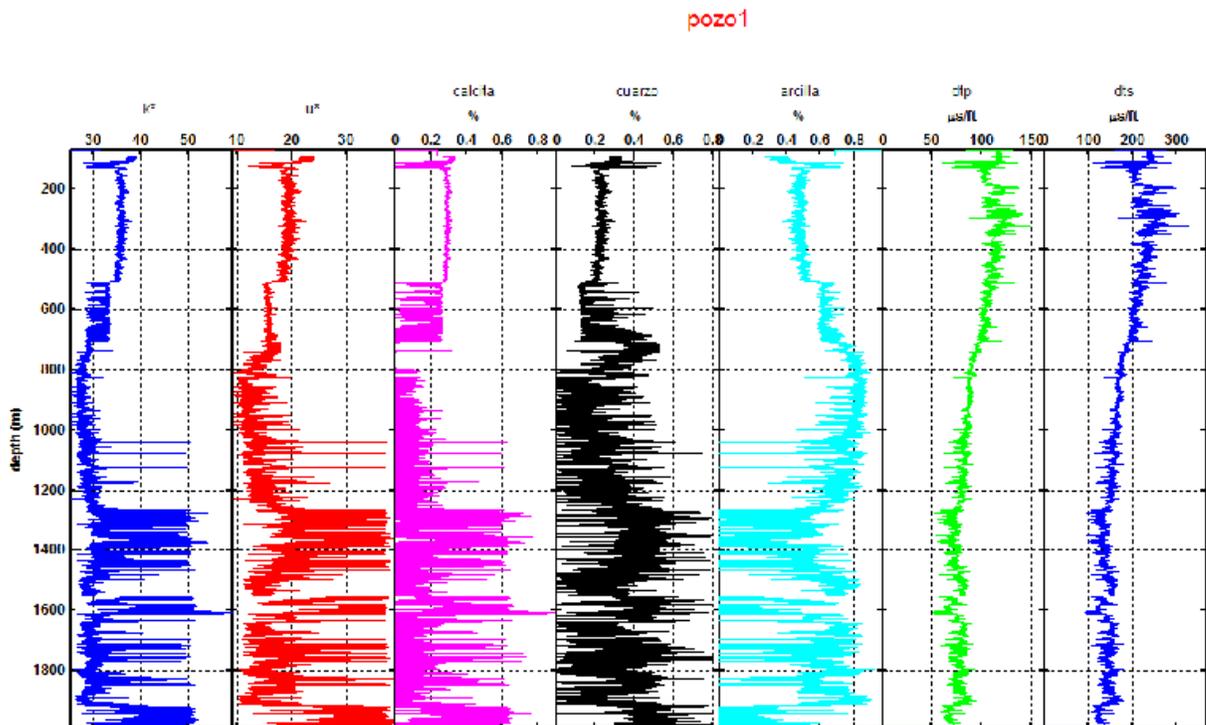


Figura 3.19. Archivo de salida con los módulos elásticos efectivos y minerales generado por el programa módulos elásticos efectivos. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

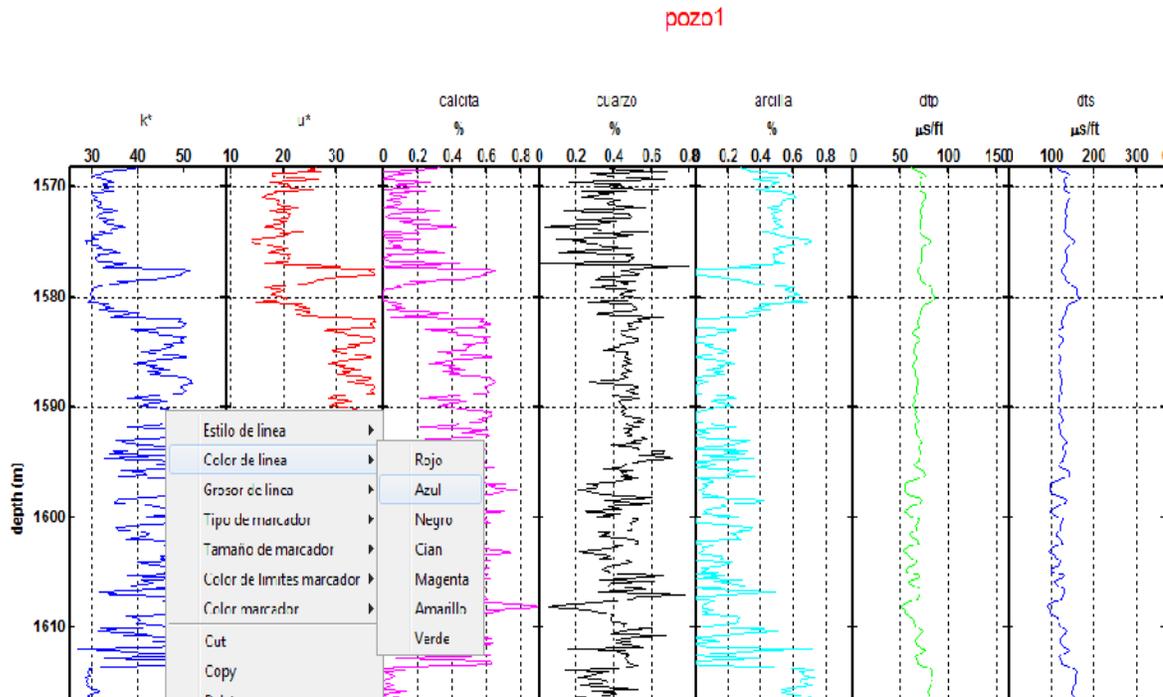


Figura 3.20. Muestra las opciones para graficar el registro de pozo. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

A continuación se presenta el análisis del pozo uno con módulos elásticos efectivos y contenido de minerales calculados con los programas **invermarkov** y *módulos elásticos efectivos*.

El pozo uno se muestra en la Figura 3.21. El primer carril de color azul corresponde al módulo volumétrico efectivo K^* , el segundo carril de color rojo muestra el módulo de corte efectivo μ^* , el tercer carril color magenta muestra el contenido de calcita, el cuarto carril color negro muestra el contenido de cuarzo y el quinto carril color cian muestra el contenido de arcilla.

En la Figura 3.22 del pozo uno se presentados zonas. En la zona 1 de intervalo de 1553 a 1560 metros, se muestra un mayor contenido de cuarzo, la calcita corresponde al segundo mineral con mayor fracción de volumen y en menor cantidad de volumen se presenta la arcilla con valores muy bajos casi nulos. Analizando los módulos efectivos se observó un valor aproximado de $45-50K^*$ y para el módulo de corte efectivo un valor aproximado de $30-40\mu^*$, relacionando los valores de los módulos efectivos se obtuvo que los minerales a los que corresponden estos valores son cuarzo con calcita (Mavko, 2009).

En la zona 2 del intervalo de 1582 a 1595 metros se observa una mayor fracción de volumen de cuarzo, la calcita se encuentra en segundo lugar de contenido de volumen y la arcilla presenta valores cercanos a cero. Los módulos efectivos observados tienen valores aproximados de $40-50K^*$ y $30-40\mu^*$ (Mavko, 2009), relacionando los valores de los módulos efectivos observados se deduce que corresponden a cuarzo con calcita.

La zona 1 y 2 contienen muy bajo porcentaje de contenido de arcilla y presentando un dominio de contenido el cuarzo. Estas zonas se consideran limpias y dado que se presentan valores de incrementación de contenido de cuarzo la zona 1 y 2 puede presentar una buena porosidad y permeabilidad donde presencia de hidrocarburos es muy probable.

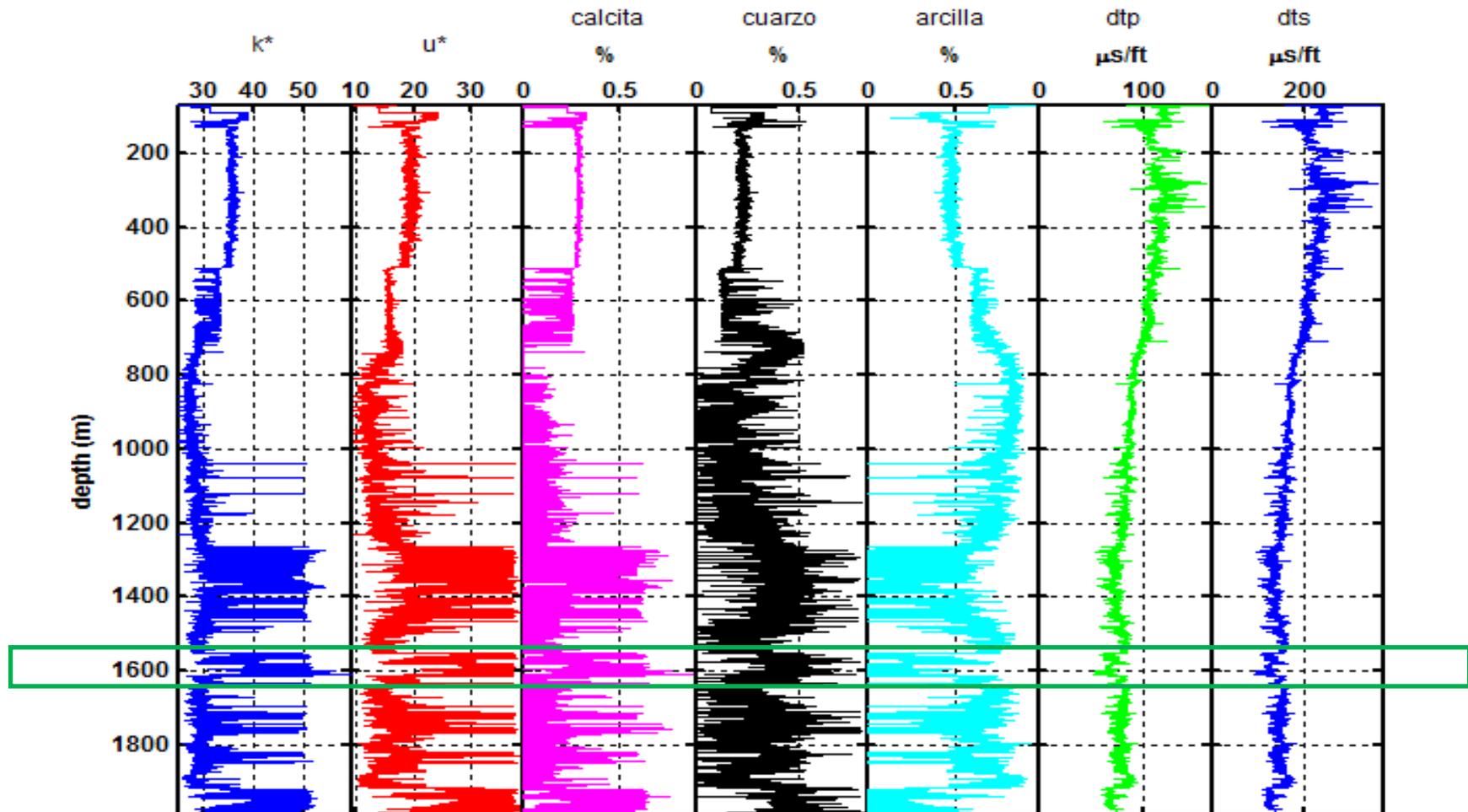


Figura 3.21. Pozo uno con magnitud de módulos efectivos y proporción variable de minerales. De izquierda a derecha: módulo volumétrico efectivo (color azul), módulo de corte efectivo (color rojo), porcentaje de calcita (color magenta), porcentaje de cuarzo (color negro), porcentaje de arcilla (color cian), tiempo de transito onda P (color verde) y tiempo de transito onda S (color azul). El rectángulo verde contiene la zona de análisis del intervalo de 1553 m a 1610 m. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

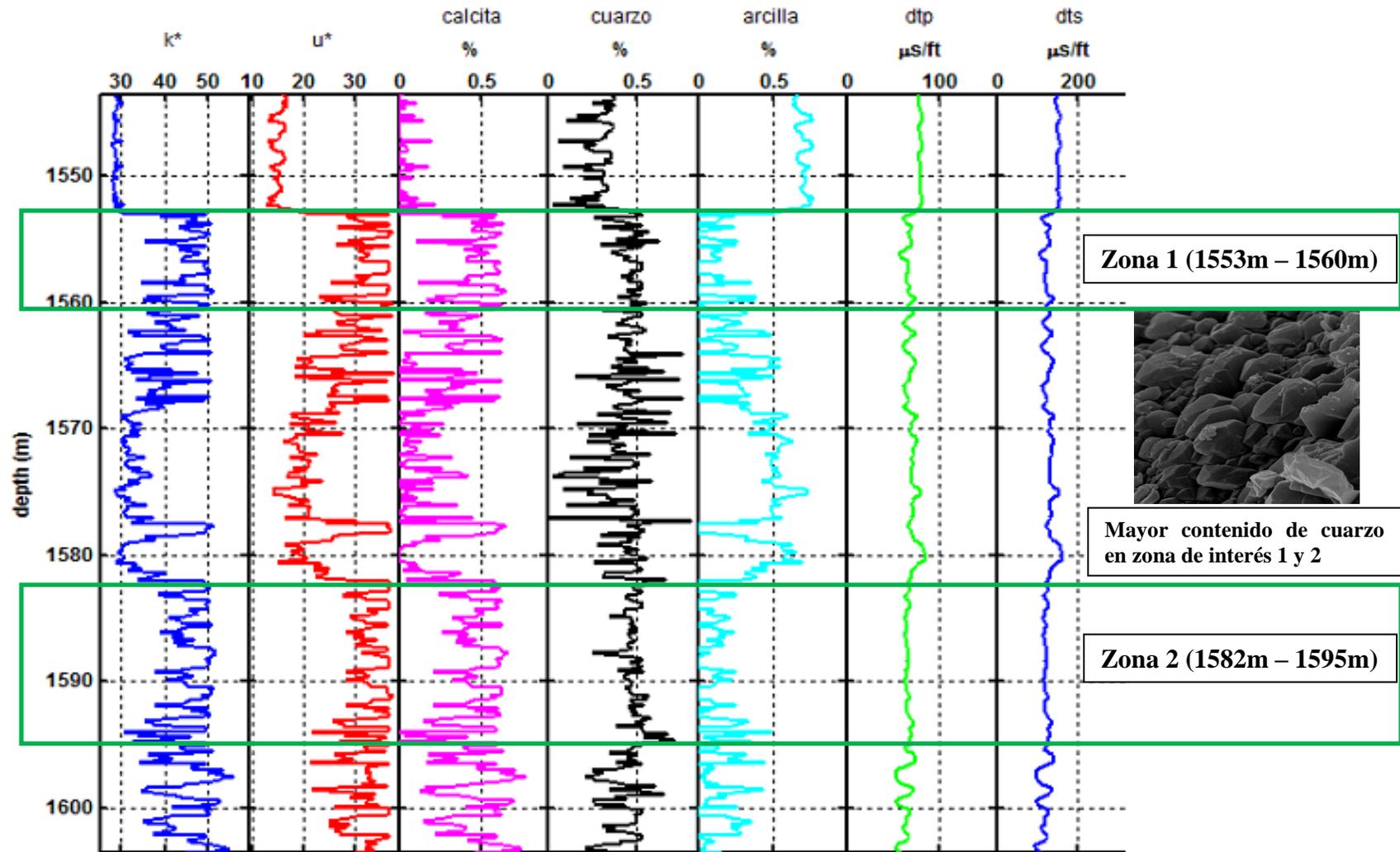


Figura 3.22. Pozo uno con dos zonas de interés. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

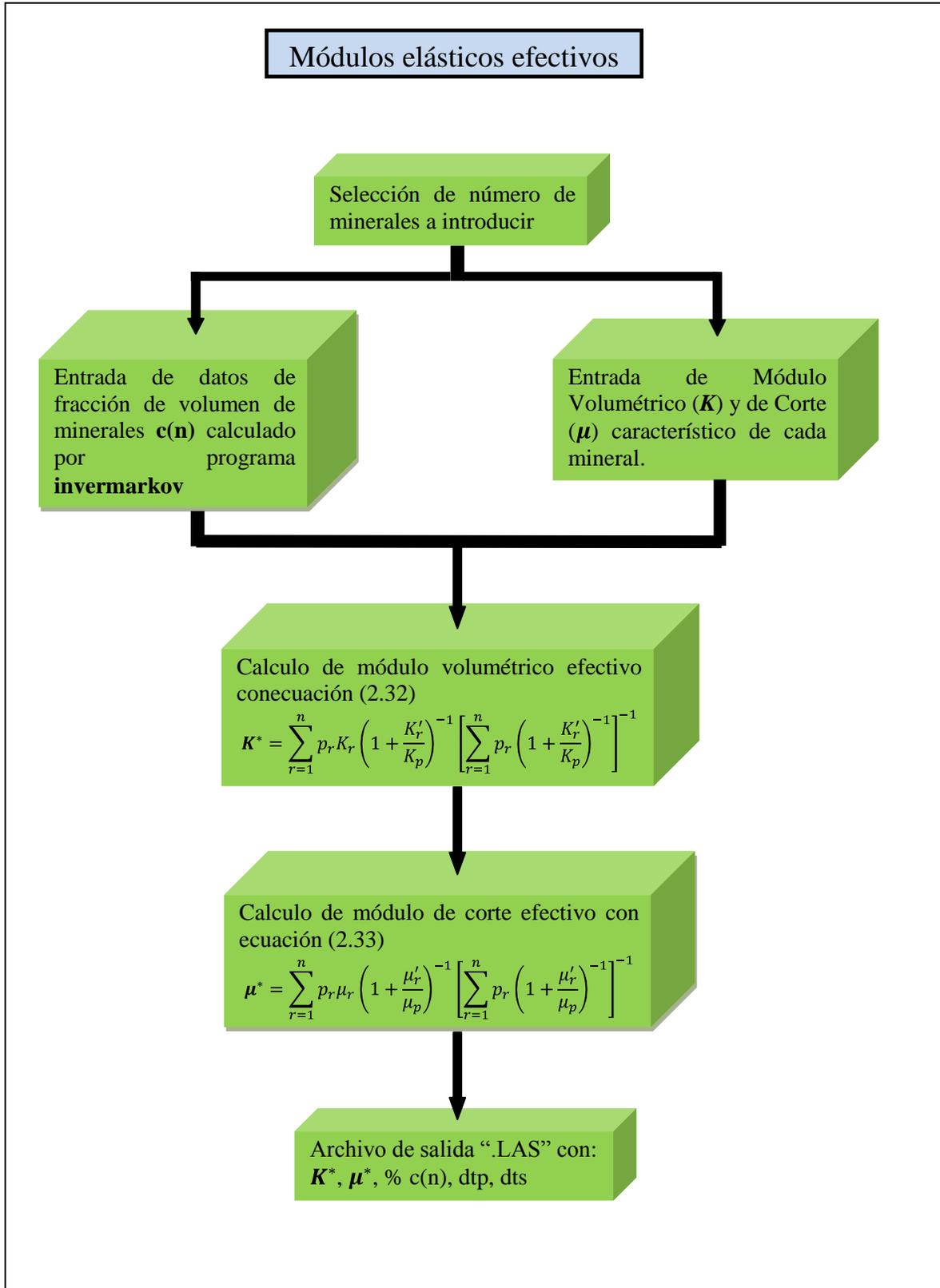


Figura 3.23. Diagrama de flujo del programa módulos elásticos efectivos.

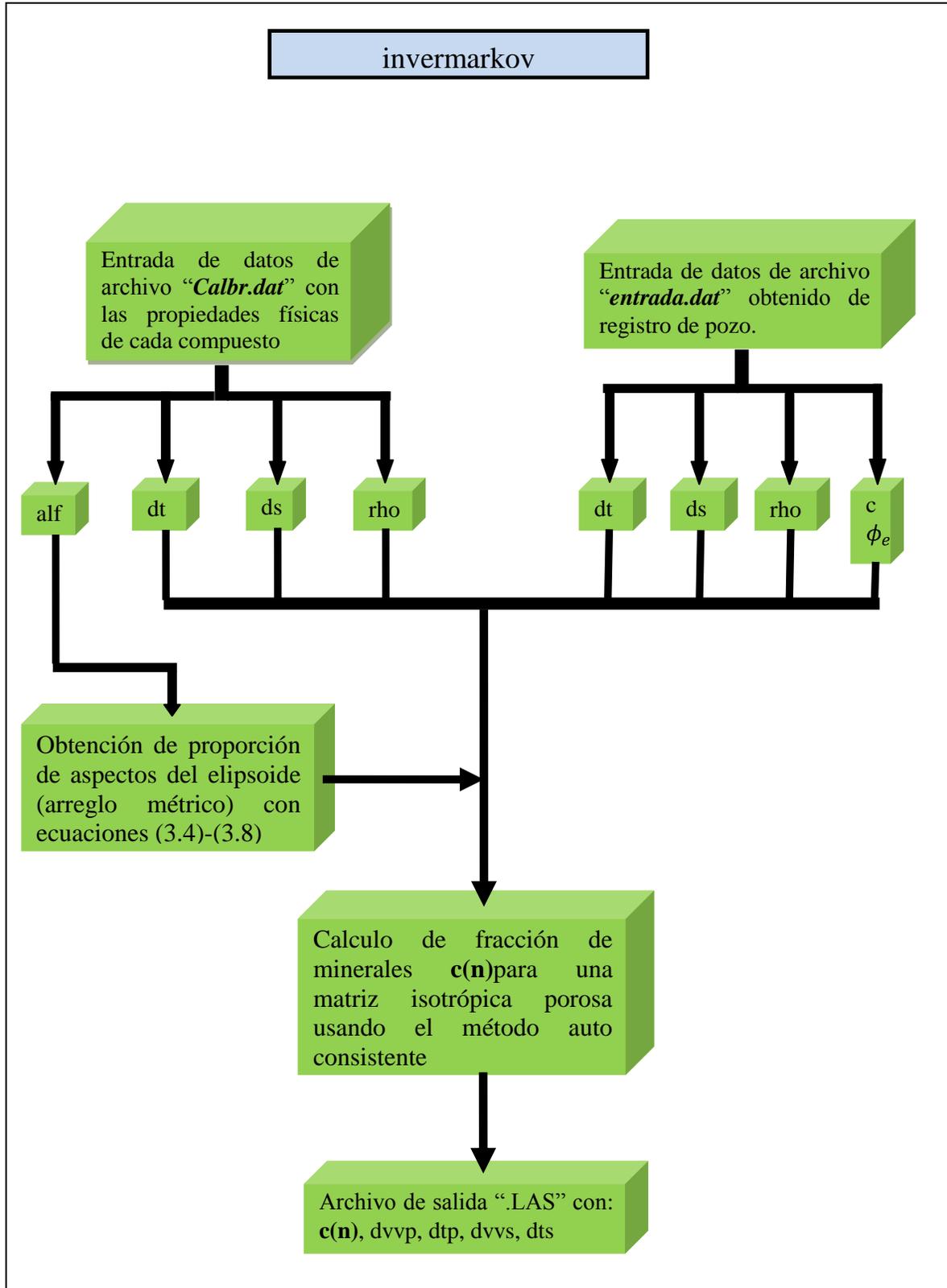


Figura 3.24. Diagrama de flujo del programa *invermarkov*.

CAPÍTULO IV

**Análisis de picado denso de velocidades
antes de apilar**

Capítulo IV

Análisis de picado denso de velocidades antes de apilar

IV.1 Marco teórico

Un registro sísmico representa una medición directa del tiempo que tarda en viajar una onda (tiempo de transito) desde la formación a los detectores. Por otra parte, los datos sísmicos, proporcionan una medida indirecta de la velocidad. Basado en estos dos tipos de información, la exploración sísmica deriva en un largo número de diferentes tipos de velocidad, como la velocidad de intervalo, aparente, promedio, rms, instantánea, grupo, sobre tiempo normal (NMO), apilado, y velocidades de migración. Sin embargo, la velocidad más confiable derivada de la información sísmica es la velocidad que genera el mejor apilado (Ozdogan Yilmaz et al., 1987).

A partir de los datos sísmicos se determinan las velocidades usando la corrección por sobre tiempo normal (Normal Moveout). La Figura 4.1 muestra el caso de una capa horizontal. Para un punto medio M, el tiempo de viaje $t(x)$ a lo largo de la trayectoria del rayo desde la posición de disparo (S) al punto en profundidad (P) y luego hasta la posición del receptor (R). Usando el teorema de Pitágoras, la ecuación de tiempo de viaje en función de la distancia tiempo receptor (offset) es:

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v^2}, \quad (4.1)$$

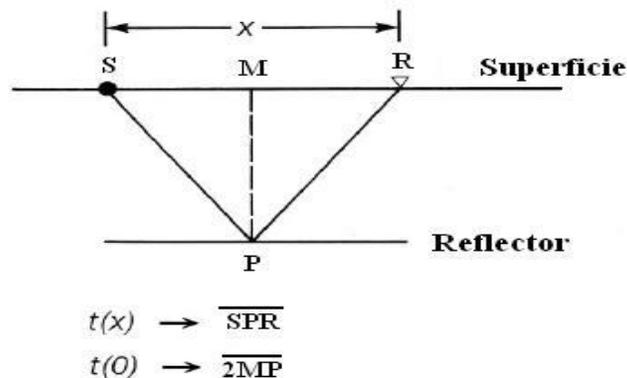


Figura 4.1. Geometría NMO para un reflector horizontal.

donde x es la distancia entre la fuente y el receptor (offset), v es la velocidad de propagación de ondas en el medio (supuesto homogéneo) que se encuentra sobre el reflector y $t(0)$ es el tiempo de viaje para apertura (offset)=0. La proyección en superficie del punto iluminado (P) se encuentra en el punto medio entre S y R, condición que solo ocurre para el caso de reflectores horizontales. La ecuación 4.1 describe una hipérbola en el plano de tiempo doble de viaje versus offset.

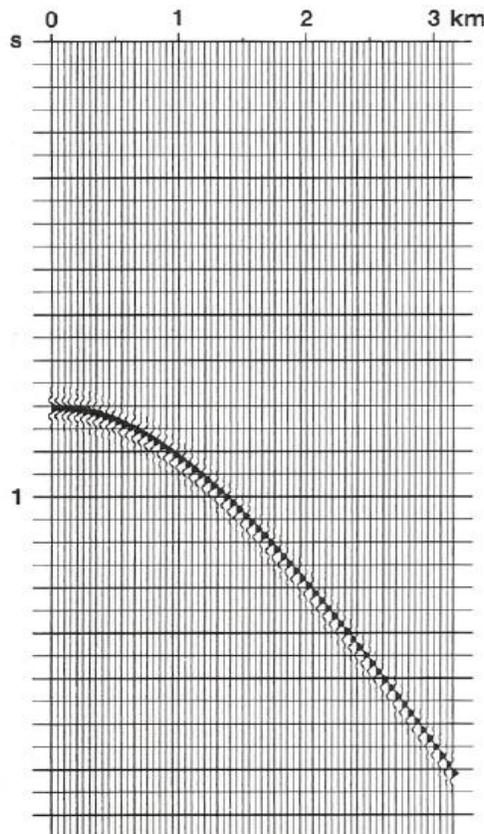


Figura 4.2. CMP Gather con un rango de apertura de 0 a 3.1 Km.

La Figura 4.2 representa un conjunto de trazas correspondientes a las trayectorias del rayo asociadas con cada par fuente-receptor para el mismo punto en superficie (CMP), este conjunto de trazas se denomina CMP gather. El rango de aperturas fuente-receptor en la Figura 4.2 es de 0 a 3150 m, con una separación de 50 m entre cada traza. La velocidad del medio arriba del reflector es 2264 m/s.

Corrección sobretiempo normal (NMO)

La diferencia entre el tiempo doble de viaje en un offset dado $t(x)$ y el tiempo doble de viaje para offset nulo $t(0)$ es llamada *Normal Moveout (NMO)* ($\Delta t_{NMO}(x) = t(x) - t(0)$). La corrección NMO consiste en cambiar el tiempo de viaje $t(x)$ a $t_{NMO}(x) = t(x) - \Delta t_{NMO}(x)$. Obviamente esto da como resultado $t_{NMO}(x) = t(0)$.

La corrección NMO para una apertura x se define como la diferencia entre $t(x)$ y $t(0)$. Para un solo reflector podemos utilizar la ecuación 4.2 para obtener:

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{x}{vt(0)} \right)^2} - 1 \right\}, \quad (4.2)$$

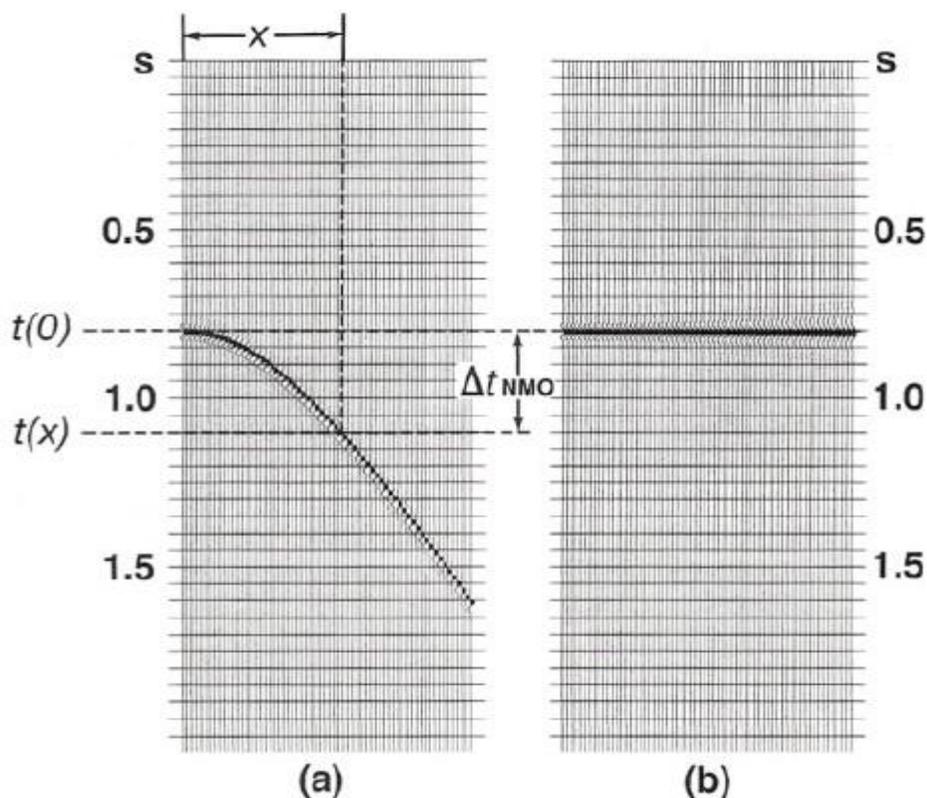


Figura 4.3. Corrección NMO (ecuación (4.2)). (a) Antes y (b) después de aplicar corrección (NMO).

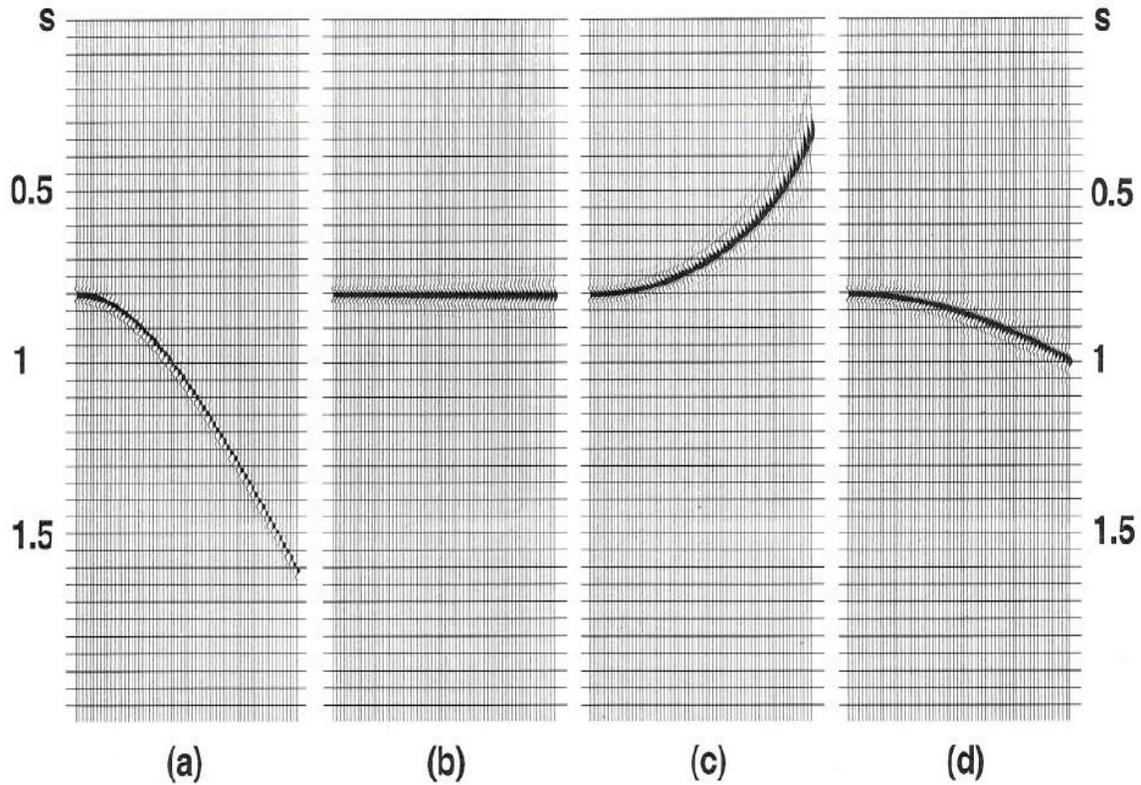


Figura 4.4. (a) CMP gather con una velocidad de 2264 m/s; (b) gather corregido por NMO usando la apropiada velocidad de sobre tiempo; (c) sobrecorrección debido a la baja velocidad (2000 m/s) usada en la ecuación (4.2); (d) subcorrección debido a la alta velocidad (2500 m/s) usada en la ecuación (4.2) (Tomada de: Yilmaz, 1987).

si la apertura es “mucho menor” que la profundidad (z_0) se puede llevar a cabo una expansión en series de Taylor alrededor de $x=0$. Lo que arroja el resultado aproximado:

$$\Delta t_{NMO} \approx \frac{x^2}{2t_0v^2}, \quad (4.3)$$

En el caso de un subsuelo estratificado de N capas horizontales el tiempo doble de viaje hasta el N-ésimo reflector está dado por:

$$t^2(x) = C_0 + C_1x^2 + C_2x^4 + C_3x^6 + \dots, \quad (4.4)$$

Donde C_0 es el tiempo doble de viaje hasta el N-ésimo reflector a lo largo de una trayectoria de incidencia normal (offset 0). $C_1 = 1/v_{rms}^2$, la velocidad cuadrática media está dada por:

$$v_{rms} = \frac{1}{t_0} \sum_{t=i}^N v_t^2 \Delta t_i, (4.5)$$

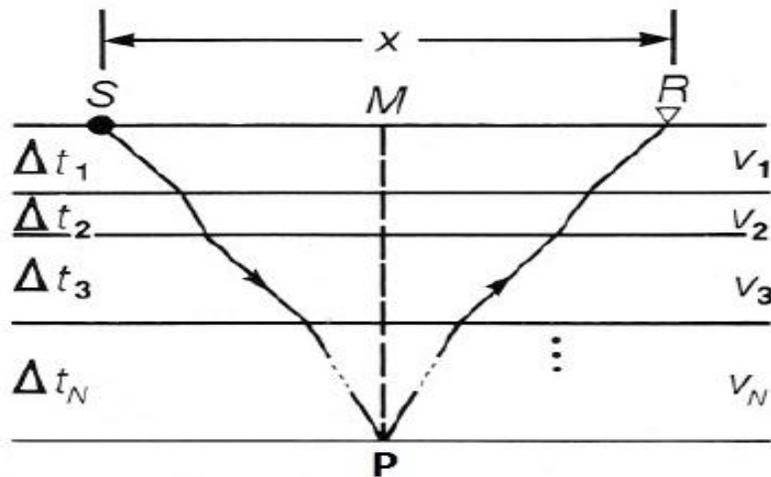


Figura 4.5. NMO para un modelo de capas horizontales (geometría para la ecuación (4.4)).

y los coeficientes que acompañan a las potencias superiores de la apertura fuente receptor son funciones más complicadas de los espesores y velocidades de las capas.

En la aproximación de apertura pequeña es posible cortar la serie hasta el segundo orden en x para obtener finalmente:

$$t^2(x) \approx t_0 + \frac{x^2}{v_{rms}^2}, (4.6)$$

Este resultado implica que, en el límite pequeñas aperturas comparadas con la profundidad del reflector objetivo, las trayectorias de los eventos de reflexión en el CMP gather son hiperbólicas, lo que permite utilizar la fórmula de corrección sobre tiempo normal (NMO) aproximada:

$$\Delta t_{NMO} = \frac{x^2}{2t_0 v_{sqr}^2}, \quad (4.7)$$

El problema de estimación del valor de la velocidad de apilamiento para cada reflector es denominado análisis de velocidades y será comentado a continuación.

Análisis de velocidad

El CMP gather de la Figura 4.6(a) contiene una simplehipérbola de reflexión de una interfaz horizontal, la velocidad del medio arriba del reflector es 3000 m/s. Suponga que este gather es corregido por NMO y apilado usando un rango de velocidades constantes desde 2000 a 4300 m/s. La Figura 4.6(b) despliega las trazas apiladas resultantes para cada velocidad perteneciente al rango mencionado, y se encuentran graficadas en un plano de velocidad versus tiempo doble tiempo de viaje para offset cero. Esto es llamado el espectro de velocidades.

Podemos ver que la máxima amplitud luego del apilamiento ocurre con una velocidad de 3000 m/s. Por lo tanto esta debe ser la velocidad que tiene que usarse para corregir el evento del CMP gather (Yilmaz et al., 1987).

Un CMP gather asociado con un modelo de capas es mostrado en la Figura 4.7(a), Basado en las amplitudes apiladas, las siguientes selecciones para la función de velocidad de apilamiento son hechas a partir del espectro de velocidades (Figura 4.7 b): 2700, 2800 y 3000 m/s. Estas selecciones corresponden a los tres eventos, superficial, medio y profundo respectivamente (Yilmaz et al., 1987).

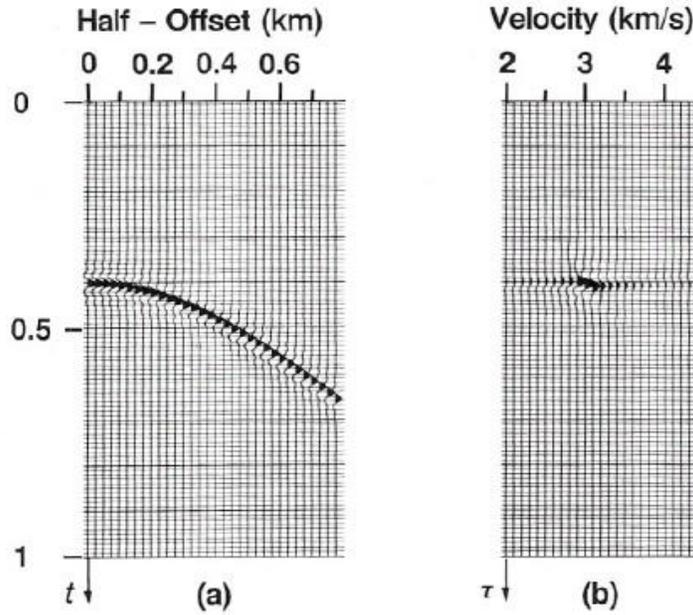


Figura 4.6. Graficando offset vs velocidad, cada traza en el gather (a) es un apilado de las trazas del CMP Gather (b) usando una velocidad de corrección NMO constante (Tomada de: Yilmaz et al., 1987).

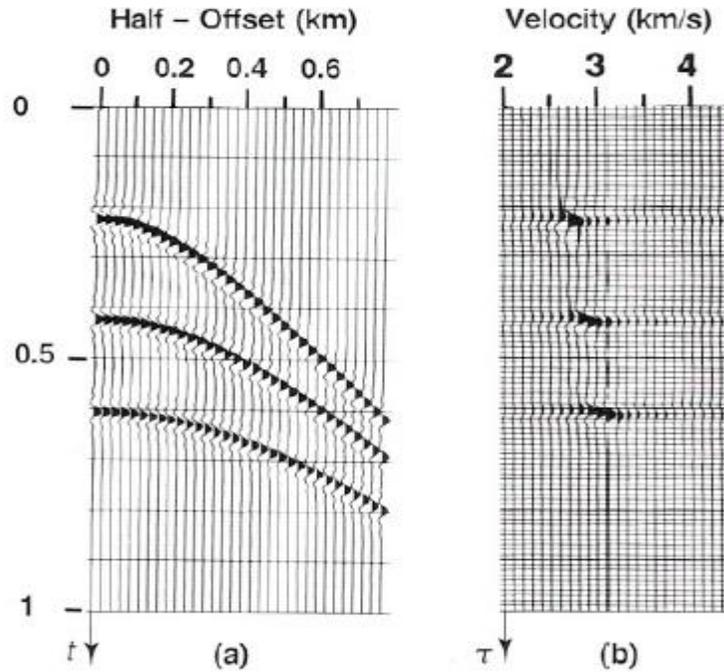


Figura 4.7. Graficando offset vs velocidad, cada traza en el gather (b) es un apilado de las trazas del CMP Gather (a) usando una velocidad de corrección NMO constante (Tomada de: Yilmaz et al., 1987).

Las cantidades desplegadas en los espectros de velocidades de las Figuras 4.6(b) y 4.7(b) son las amplitudes apiladas. Cuando la relación señal-ruido (S/N) de los datos de entrada es pobre, las amplitudes apiladas pueden no ser las mejores. Lo ideal en el análisis de velocidad es hacer selecciones correspondientes a la mejor coherencia de la señal a lo largo de la trayectoria hiperbólica sobre la extensión completa del CMP gather.

Considere un CMP gather con un solo evento (Figura 4.2). La amplitud apilada es definida como:

$$S_t = \sum_{i=1}^M f_i, t(i), \quad (4.8)$$

Donde $f_i, t(i)$ es el valor de amplitud en la traza i a un tiempo doble de viaje $t(i)$ y M es el número de trazas en el CMP gather. El tiempo doble de viaje $t(i)$ a lo largo de la hipérbola es:

$$t(i) = \left[t^2(0) + \frac{x_i^2}{v_{st}^2} \right]^{1/2}, \quad (4.9)$$

La amplitud de apilamiento normalizada es definida como:

$$NS = \frac{|S_t|}{\sum_i |f_i, t(i)|}, \quad (4.10)$$

El rango de NS es $0 \leq NS \leq 1$. La ecuación anterior implica que la coherencia como es definida aquí, es la amplitud apilada normalizada.

Otra cantidad que es usada en el cálculo de espectros de velocidades es la no normalizada suma de la crosscorrelación (unnormalized crosscorrecation sum) dentro de una ventana de tiempo que sigue el patrón correspondiente a la hipérbola apilada a través del CMP gather.

La expresión para la no normalizada suma de la crosscorrelación está dada por:

$$CC = \frac{1}{2} \{ [\sum_{i=0}^M f_{i,t(i)}]^2 - \sum_{i=0}^M f_{i,t(i)}^2 \} = \frac{1}{2} \sum_t [S_t^2 - \sum_t f_{i,t(i)}^2], \quad (4.11)$$

Donde CC puede ser interpretado como un medio de la diferencia entre la energía de salida y la energía de entrada de la sección. Una forma normalizada de CC es otro atributo que a menudo es usado en el cálculo de espectros de velocidad y está dado por la siguiente ecuación:

$$NCC = \frac{2}{M(M-1)} \sum_t \sum_{k=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-k} \frac{f_{i,t(i)} f_{i+k,t(i+k)}}{[\sum_t f_{i,t(i)}^2 \sum_t f_{i+k,t(i+k)}^2]^{1/2}}, \quad (4.12)$$

La energía normalizada se la suma de la crosscorrelación (energy-normalized crosscorrelation sum) está dada por la ecuación:

$$ECC = \frac{2}{(M-1)} \frac{CC}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}^2}, \quad (4.13)$$

El rango de ECC es $-[1/(M-1)] < ECC \leq 1$. Finalmente, semblanza, que es el cociente entre la energía de salida y de entrada normalizado esta dada por:

$$NE = \frac{1}{M} \frac{\sum_t S_t^2}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}^2}, \quad (4.14)$$

La siguiente ecuación muestra la relación entre NE y ECC:

$$ECC = \frac{1}{M-1} (M \cdot NE - 1), \quad (4.15)$$

El rango de NE es $0 \leq NE \leq 1$

El espectro de velocidades en la actualidad no es desplegado como se muestra en las Figuras 4.6(b) y 4.7(b). Se usa un mapa de contornos a colores.

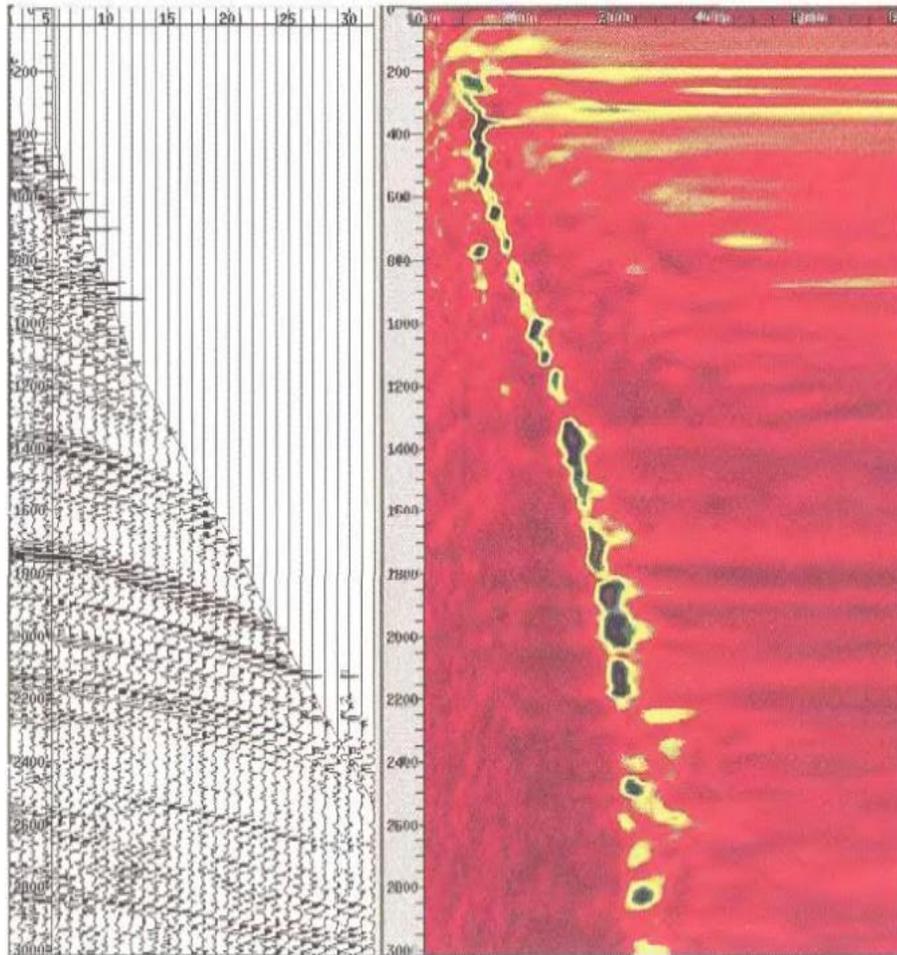


Figura 4.8. Análisis de velocidades aplicado a (izquierda) CMP gather; (derecha) espectro de velocidades en el cual los colores oscuros representan los valores de velocidad para los reflectores del CMP gather. (Tomada de: Yilmaz, 2001).

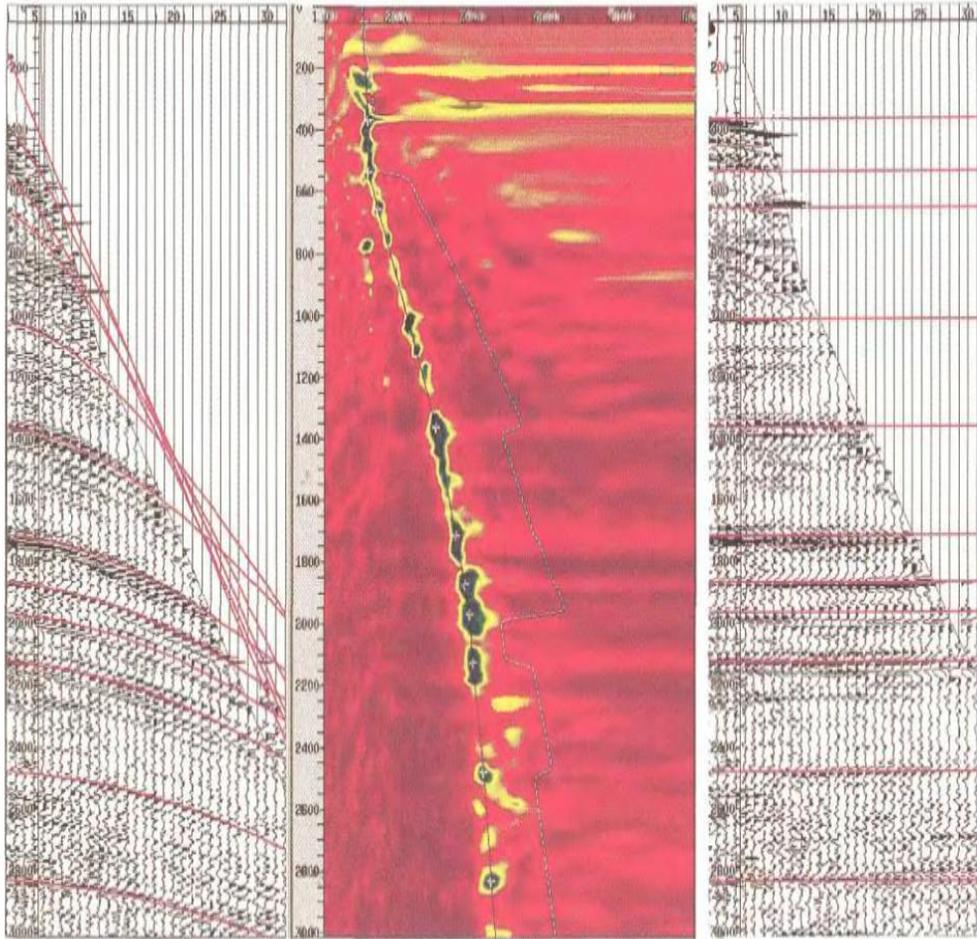


Figura 4.9. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8 (panel izquierdo) y su espectro de velocidad (panel central) con el picado de velocidades denotado con la marca + coincidente con los picos de semblanza. El panel derecho muestra el CMP gather después de la corrección de sobre tiempo normal (NMO) con las correctas velocidades seleccionadas (Tomada de: Yilmaz, 2001).

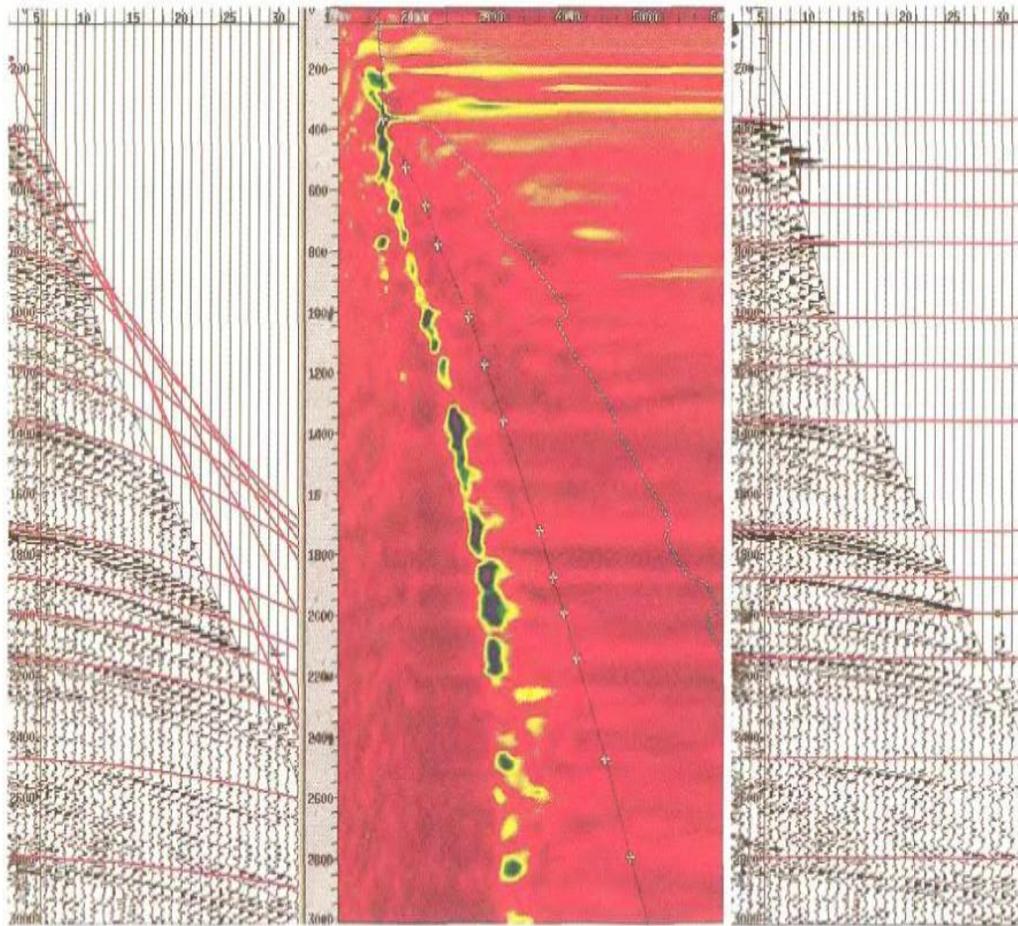


Figura 4.10. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8 (panel izquierdo) y su espectro de velocidad (panel central) con el incorrecto picado de velocidades denotado con la marca +. El panel derecho muestra el CMP gather después de la corrección de sobre tiempo normal (NMO), y se observa una subcorrección de eventos causada por las erróneas altas velocidades seleccionadas (Tomada de: Yilmaz, 2001).

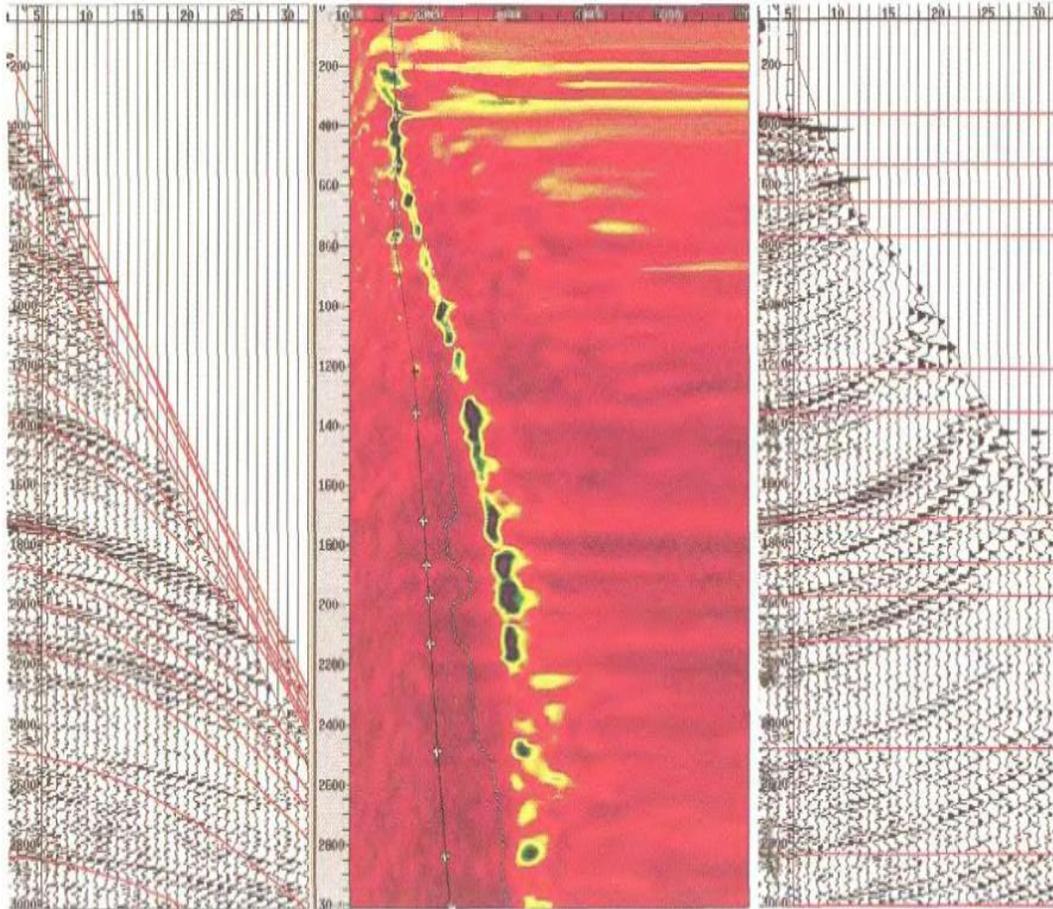


Figura 4.11. El mismo CMP gather presentado en la figura 4.8 (panel izquierdo) y su espectro de velocidad (panel central) con el incorrecto picado de velocidades denotado con la marca +. El panel derecho muestra el CMP gather después de la corrección de sobre tiempo normal (NMO), y se observa una subcorrección de eventos causada por las erróneas bajas velocidades seleccionadas (Tomada de: Yilmaz, 2001).

El picado de velocidades se realizó mediante graficas que muestran el valor de semblanza utilizando la degradación de colores referenciados a una escala. A continuación se presentara más a detalle el picado de velocidades.

IV.2 Picado de velocidades

Uno de los métodos más utilizados para realizar un análisis de velocidad a partir de datos sísmicos es el picado de velocidades. De aquí se derivan varios tipos de medidas de coherencia que pueden ser usados como atributos en el cálculo de espectros de velocidad. Para este trabajo se utiliza un atributo conocido como semblanza. La semblanza es el grado de energía de la traza de salida (traza apilada) y la energía media de las trazas de entrada (Adler and Brandwood, 1999; Fomel, 2009).

En resumen, lo que se hace en un picado de velocidades, es calcular cada cierto número de muestras temporales de un CMP gather, el valor de semblanza para un rango de velocidades convenientemente ajustado (Yilmaz, 2001).

El archivo generado será visualizado en un mapa que muestre el valor de semblanza para cada punto (V_{stk} , t). Donde V_{stk} es la velocidad de apilamiento y t es el tiempo en el CMP gather. La velocidad correspondiente al valor máximo de semblanza para un evento en particular representa la velocidad que mejor apila tal evento.

Mediante el paquete Seismic Unix se realizó un ejemplo de picado de velocidades a partir de un CMP gather (Figura 4.13) mediante el uso del comando **suvelan** el cual se describe a continuación.

El comando **suvelan** calcula el espectro de semblanza para las velocidades de apilamiento de un CMP gather.

La sintaxis del comando **suvelan** es la siguiente:

suvelan < infile [ingreso de parámetros opcionales] > outfile

La variable **infile** es el archivo de entrada, el cual es un CMP gather en formato SU.

Parámetros a ingresar:

nv=100 Número de velocidades

dv=1.0 Intervalo de muestreo de las velocidades

fv=1000.0 Primera velocidad

Lo que se define mediante nv , dv y fv es el rango de velocidades para las cuales se calculara el valor de semblanza. Este rango debe ser ajustado tomando en cuenta las velocidades máxima y mínima que posiblemente se puedan encontrar.

El parámetro dv (intervalo de muestreo de las velocidades) está relacionado con la precisión del método, esto porque a medida que dv se hace máspequeño, la distancia entre las velocidades para las cuales se calculara la semblanza se hace menor, lo cual nos va a permitir obtener una mayor exactitud de los valores calculados.

Ooutfile es el archivo de salida de los valores de semblanza. Es decir, un valor para cada punto ($Vstack$, t), donde $Vstack$ es la velocidad de apilamiento; t es el tiempo del CMP gather.

El siguiente script hace uso del comando **suvelan** del software SeismicUnix. El script **suvelan** efectúa un análisis de velocidades mediante la obtención del espectro de semblanza de un CMP gather.

Ejemplo de uso del script **suvelan**:

```
#!/bin/sh
```

```
suvelan <CMP100 nv=100 dv=1.0 fv=1000.0 > e_semlanza
```

Una buena relación señal-ruido de los datos de entrada es un factor de importancia para la obtención de un buen campo de velocidades. Para poder realizar un picado de velocidad de alta densidad se utiliza software que realice un picado de velocidades automático, este proceso consiste en analizar las velocidades sísmicas gathers por gathers en un intervalo de tiempo muy pequeño.

Con la entrada de CMP gathers (Figura 4.12) y un campo de velocidades inicial se generó un análisis y un picado denso de velocidades de manera automática. El picado de velocidades se realizó a un intervalo de muestreo de 1 ms.

Se realizó una corrección NMO a los CMP gathers (Figura 4.14), esto para corregir la hipérbola de reflexión y tener alineamientos horizontales en los CMP gathers una vez corregidos por NMO (Figura 4.16). Cada CMP gather consistió en un total de 58 trazas.

Se realizaron varias pruebas para poder entender el funcionamiento del picado de velocidades en el momento de seleccionar las áreas de mayor concentración de energía en el espectro de semblanza. En pruebas donde se hizo un mal picado de velocidades se obtuvo velocidades bajas o altas que no son las correctas (Figura 4.15).

En la Figura 4.17 se muestra un simple diagrama de procesos aplicados a los CMP gathers para obtener el cubo de velocidades.

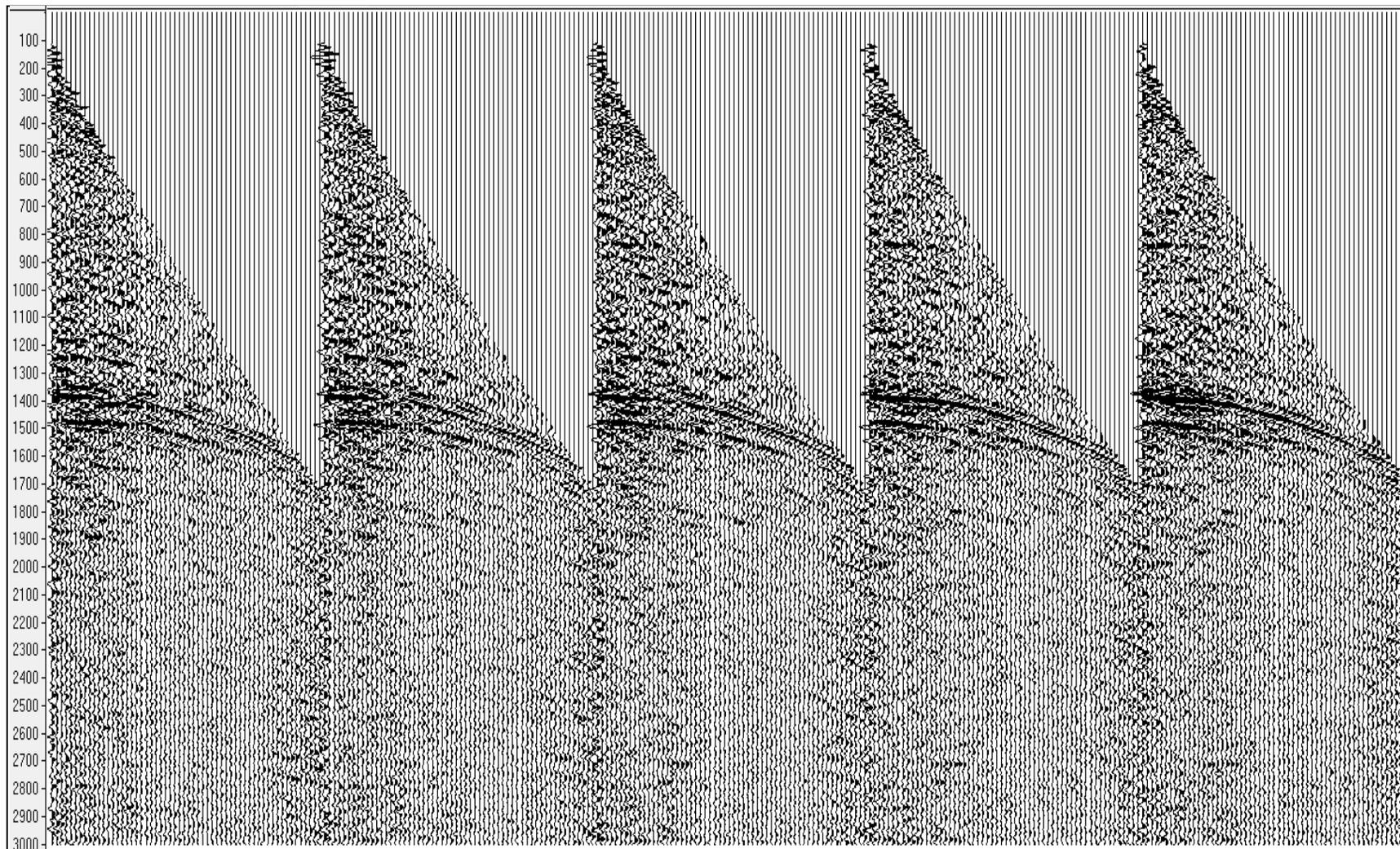


Figura 4.12. Grupo de CMP gathers con 58 trazas cada uno. Visualizados en SeisView.

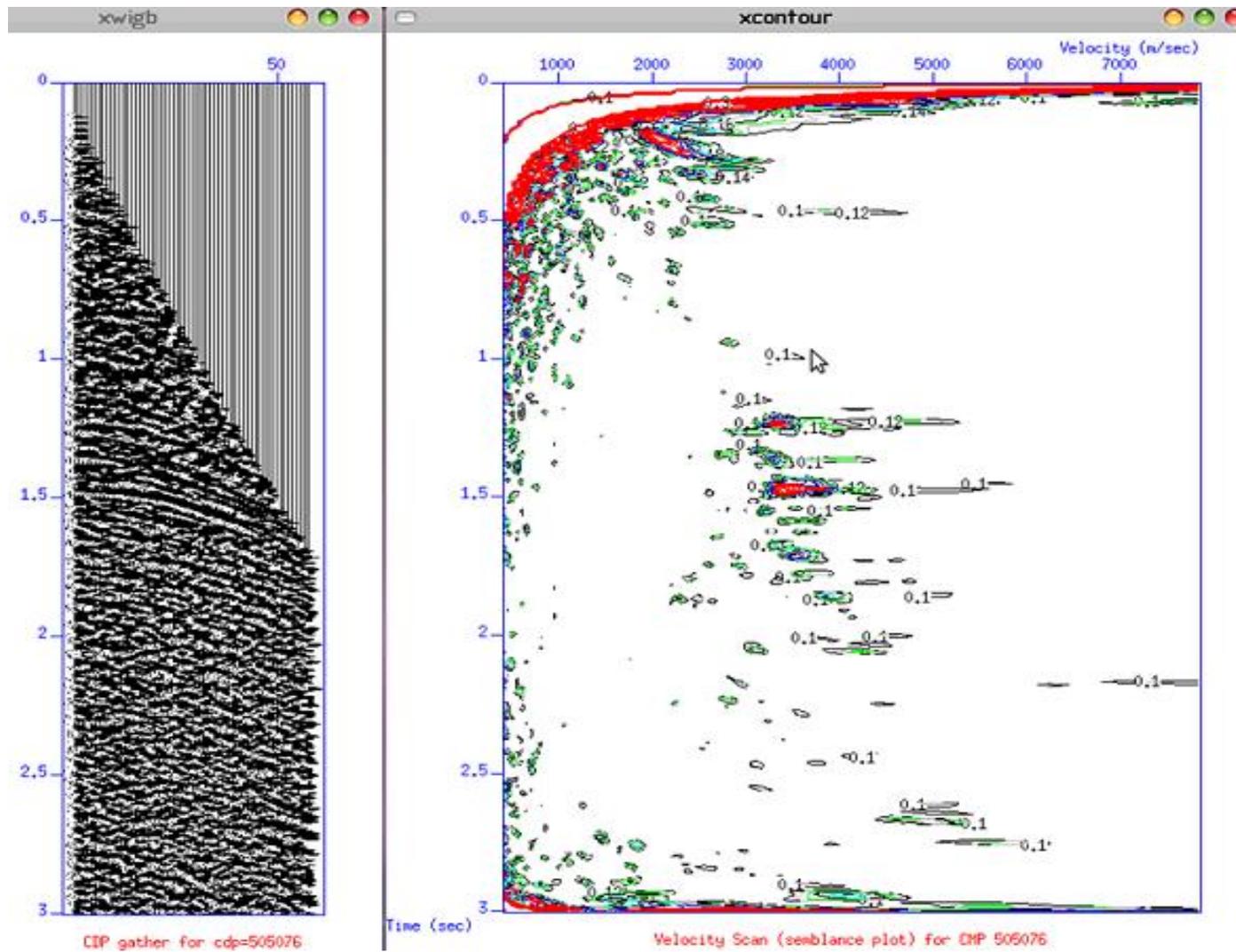


Figura 4.13. CMP gather con su espectro de semblanza. Realizado en Seismic Unix.

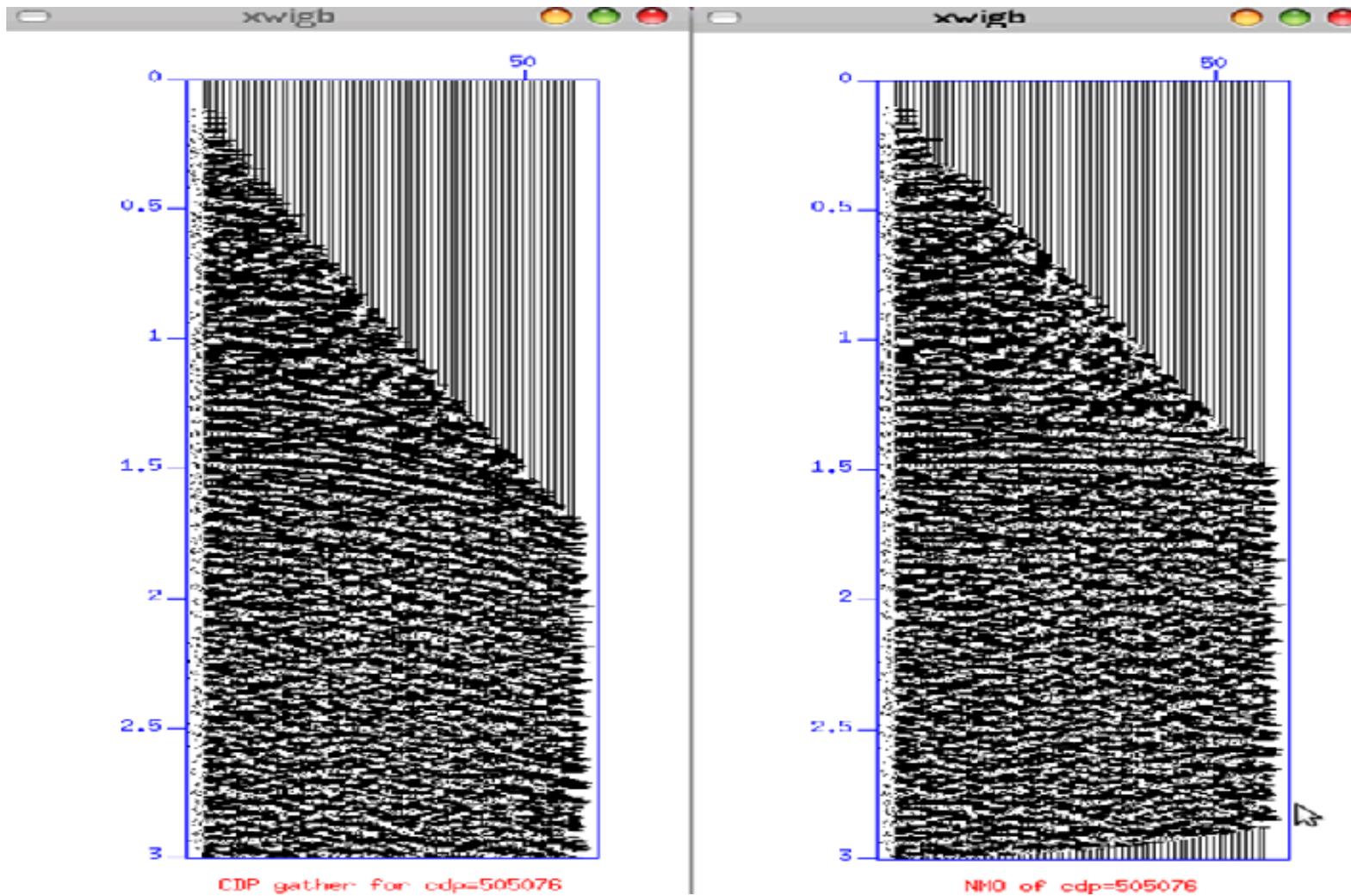


Figura 4.14. CMP gather con 58 trazas picado correctamente, izquierda (antes de aplicar corrección NMO) derecha (después de corrección NMO). Realizado en Seismic Unix.

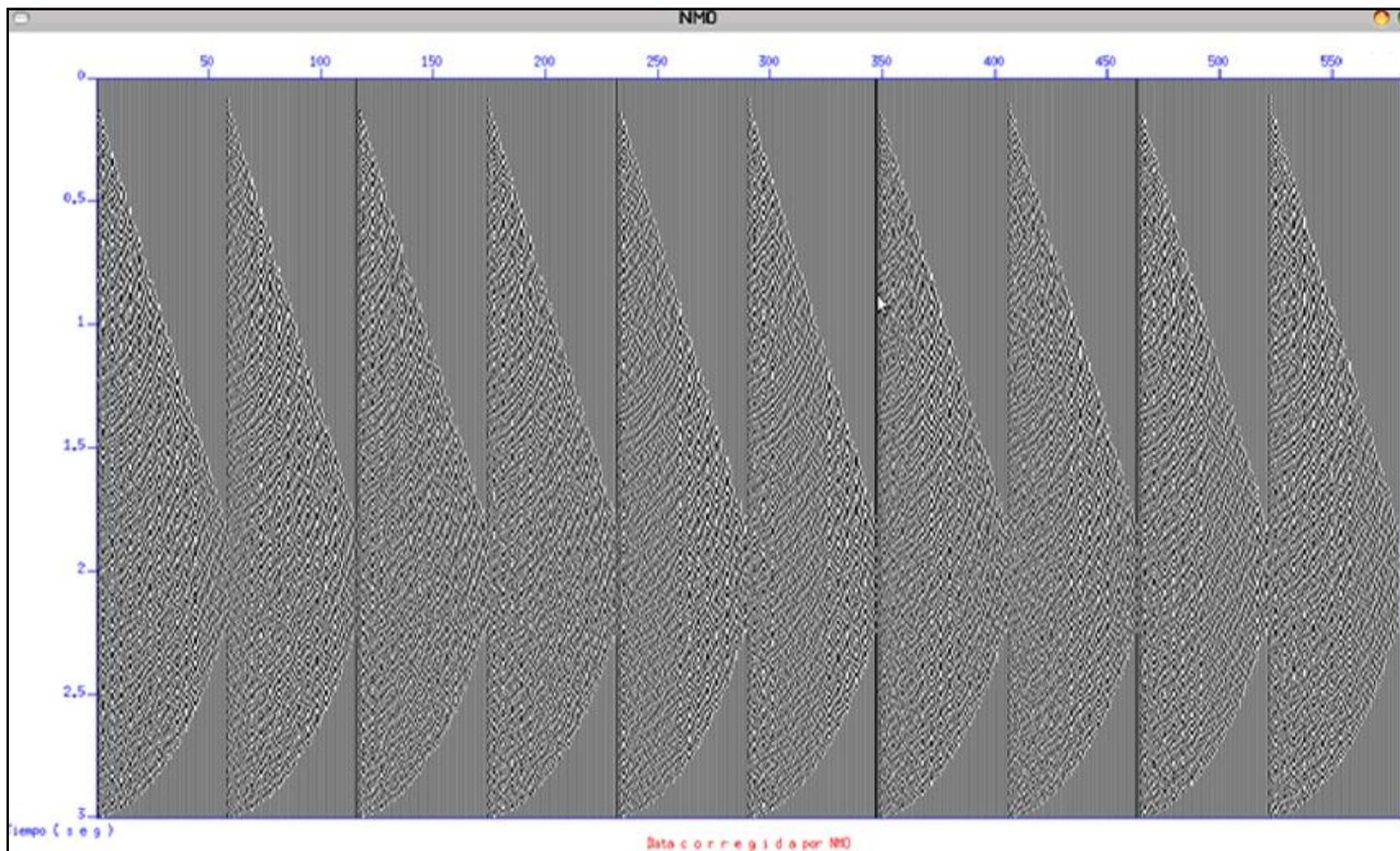


Figura 4.15. Grupo de CMP gathers con un mal picado de velocidades mostrando bajas velocidades. Realizado en Seismic Unix.

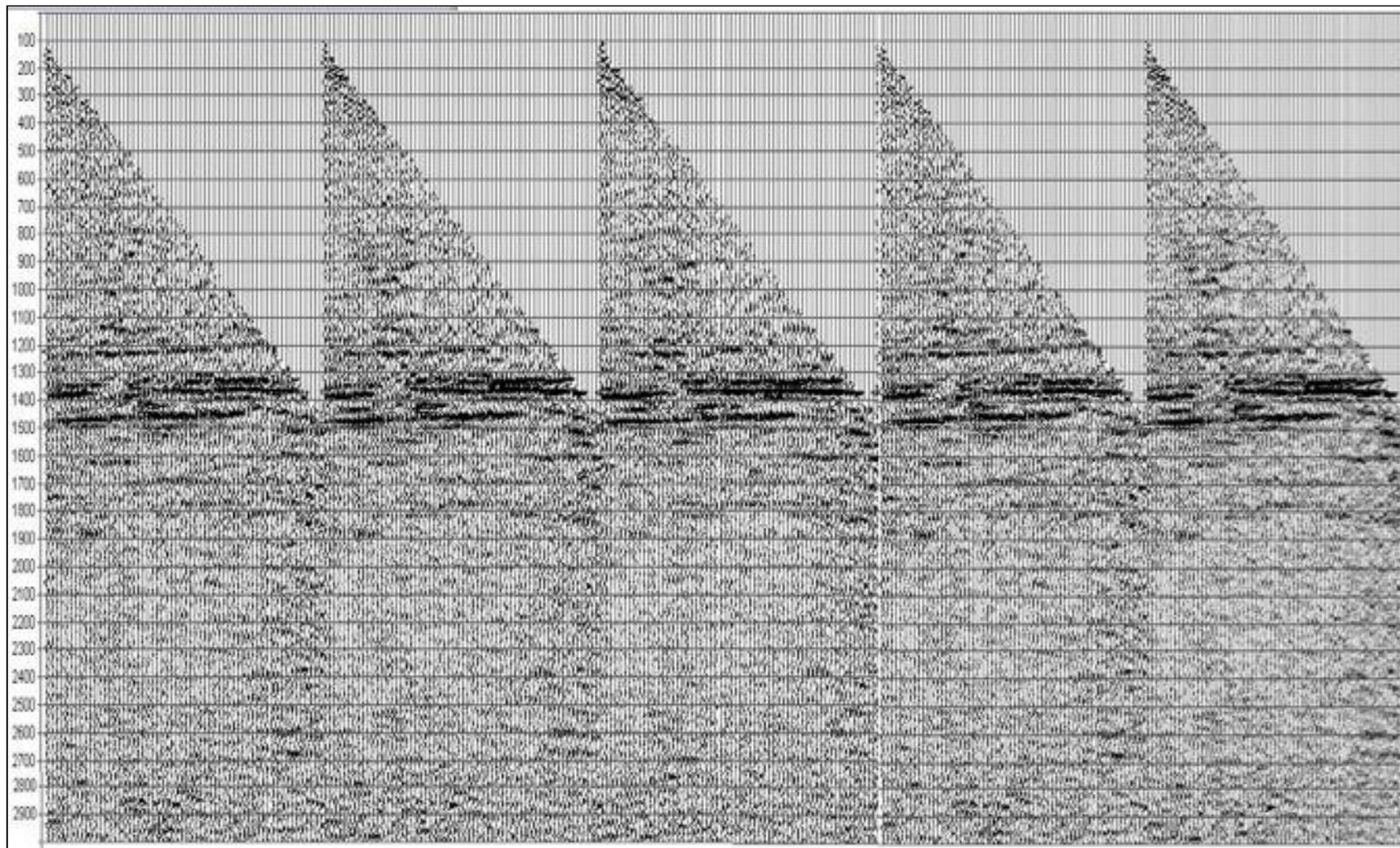


Figura 4.16. Grupo de CMP gathers con corrección NMO. Visualizados en SeisView.

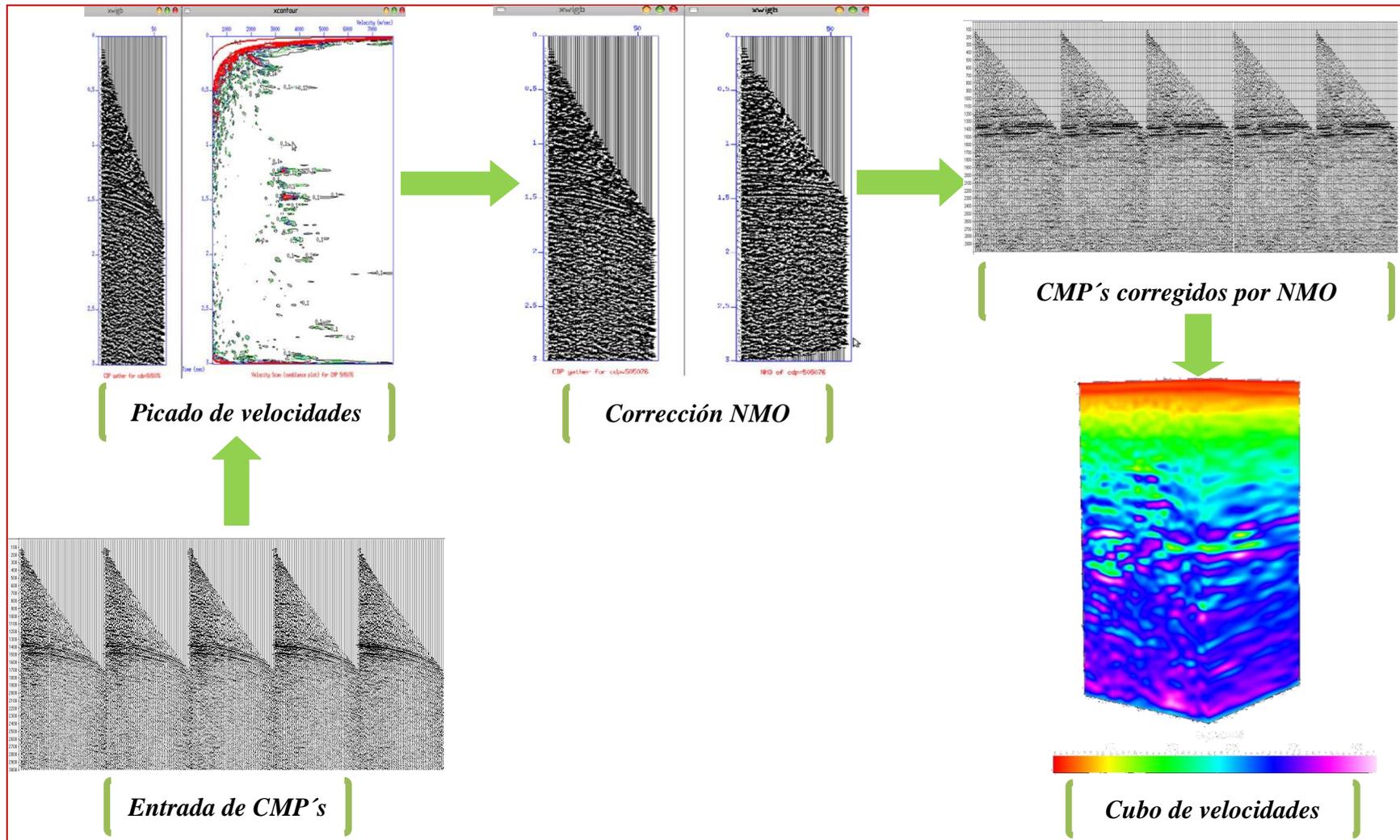


Figura 4.17. Diagrama de picado de velocidades.

IV.3 Cubo de velocidades

Después que se realizó el picado de velocidades denso a un intervalo de muestreo de 1 ms y cada 25 metros, se obtuvo el cubo de velocidades. El cubo muestra en tiempo, una imagen de la forma del subsuelo mostrando rasgos estructurales a partir de la relación que guardan las velocidades con una litología en particular.

En la Figura 4.19 se muestran el cubo de velocidades obtenido a partir de un picado de velocidades denso a un intervalo de 1ms y análisis cada 25 metros. Las velocidades incrementan conforme a la profundidad. El cubo de velocidades no muestra estructuras tales como anticlinales o sinclinales. Las velocidades bajas denotadas por color rojo y naranja corresponden a la parte somera del cubo y las zonas con mayor velocidad denotadas por color púrpura se encuentran en la parte profunda del cubo.

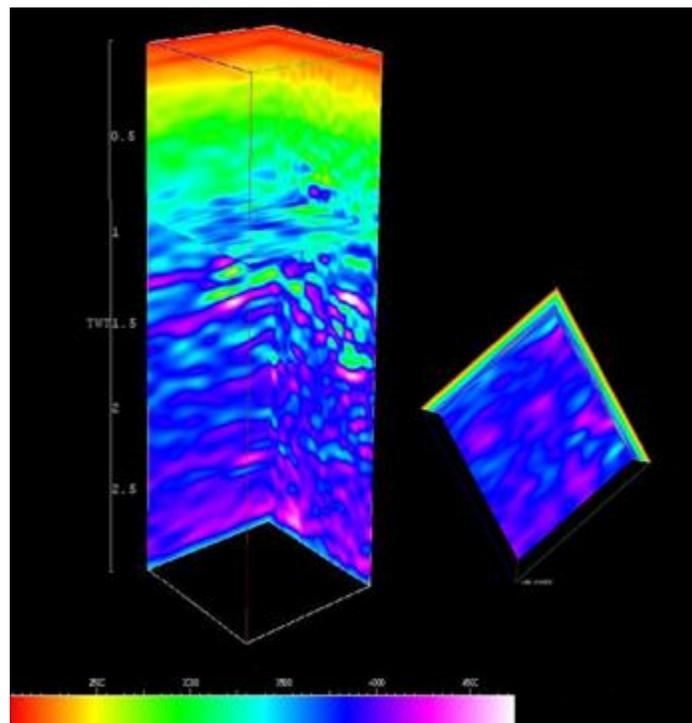


Figura 4.18. Cubo de velocidades con timeslice (corte en tiempo). Visualizados con el software Paradigm GOCAD.

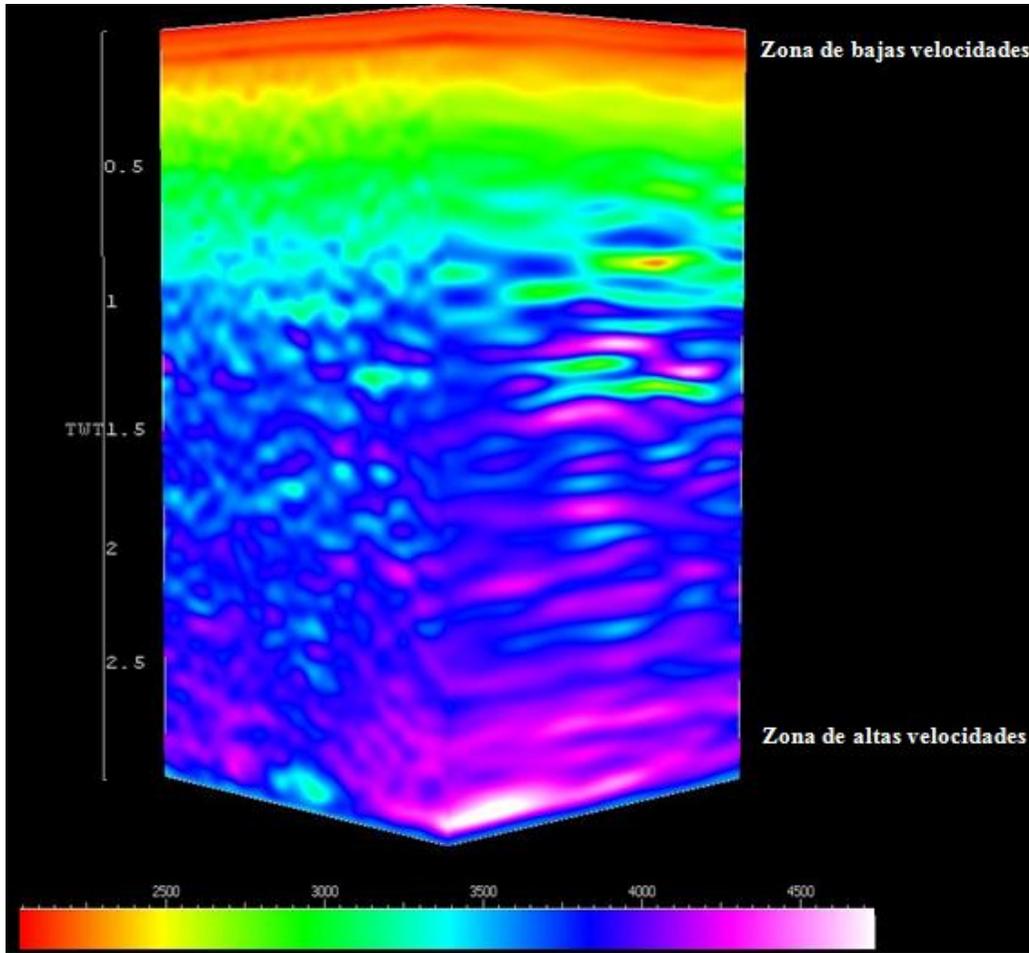


Figura 4.19. Cubo de velocidades. Visualizado con el software Paradigm GOCAD.

En la Figura 4.20 se muestra una anomalía de velocidades, se presentan bajas velocidades denotadas por color rojo que no concuerdan con las velocidades en aquel intervalo de tiempo. En la parte superior de la anomalía de bajas velocidades se encuentra una estructura con altas velocidades color purpura.

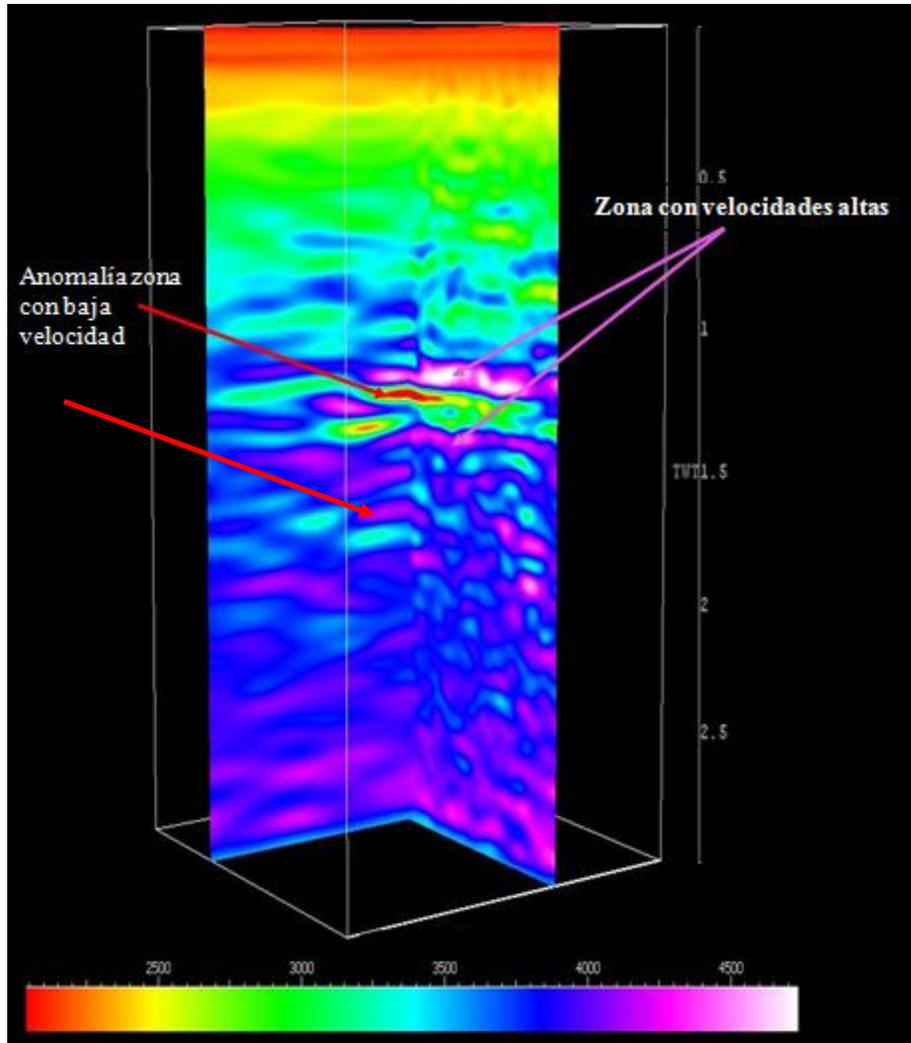


Figura 4.20. Cubo de velocidades con inline y crossline. Visualizados con el software Paradigm GOCAD.

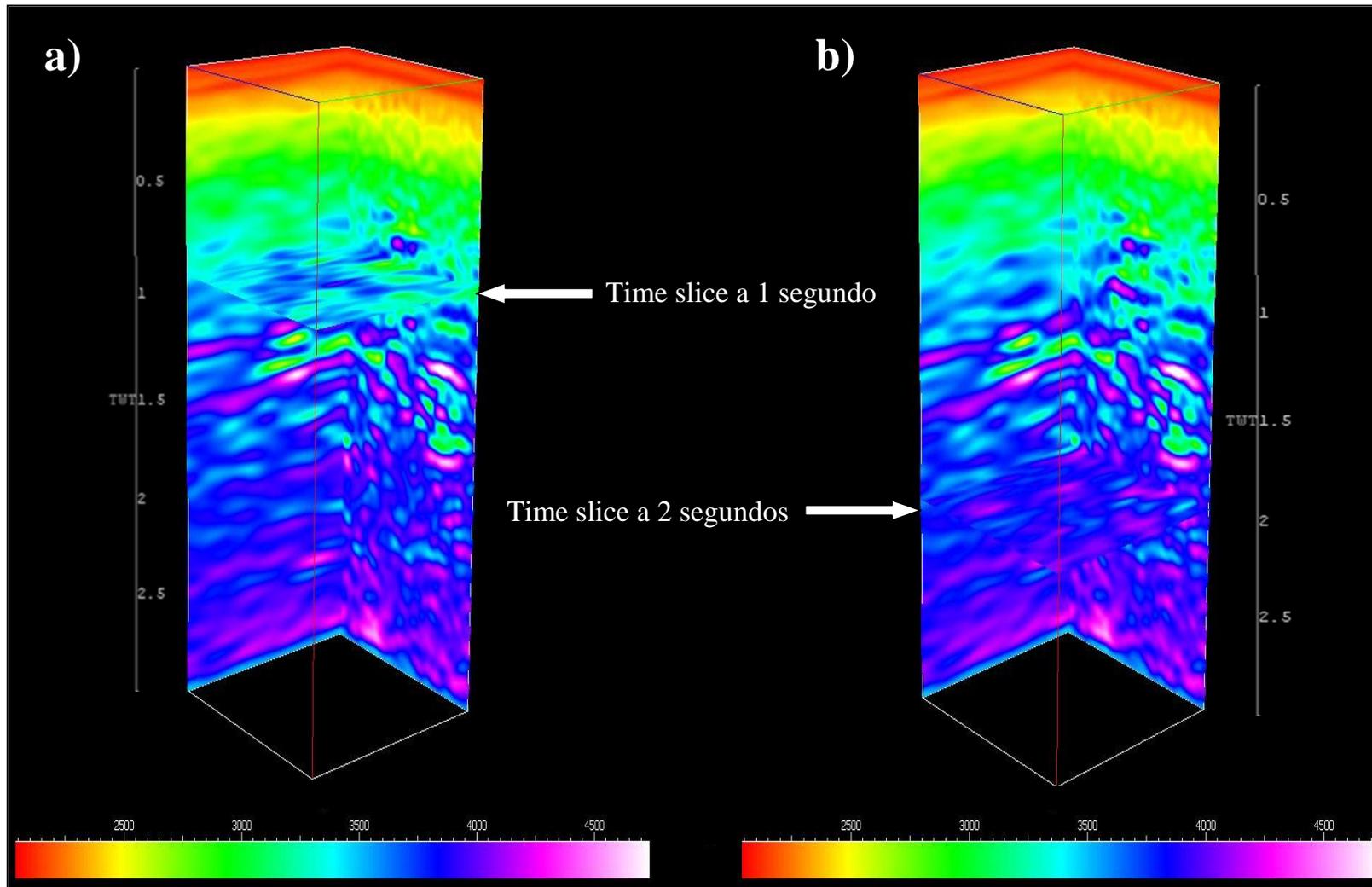


Figura 4.21. Cubo de velocidades. a) Time slice a 1 segundo. b) Time slice a 2 segundos. Visualizados con el software Paradigm GOCAD.

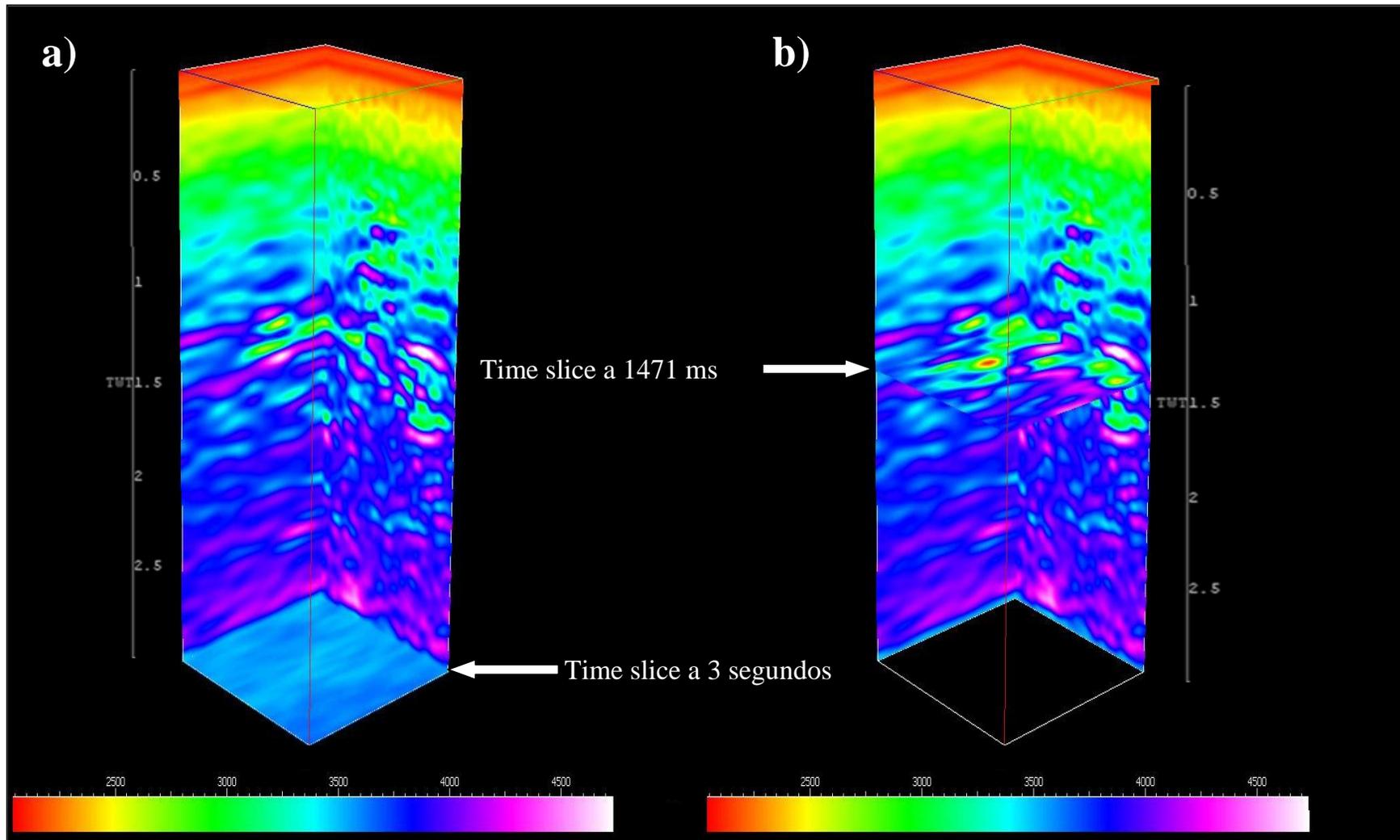


Figura 4.22. Cubo de velocidades. a) Time slice a 3 segundos. b) Time slice a 1471 ms mostrando zona de baja velocidad (color rojo) y zona con velocidades medias (color verde). Visualizados con el software Paradigm GOCAD.

IV.4 Estimación de densidades, porosidad con base en cubo de velocidades y registros de pozo.

Los cubos de densidad y porosidad se obtuvieron a partir del cubo de velocidades y registros de pozo.

El cubo de densidades fue calculado empleando formulas empíricas en función de la velocidad de propagación de onda P (cubo de velocidades). Los coeficientes usados en la formula empírica para obtener el cubo de densidades fueron calibrados en función de los pozos hasta obtener una buena correlación entre las densidades del registro geofísico y las densidades empíricas calculadas.

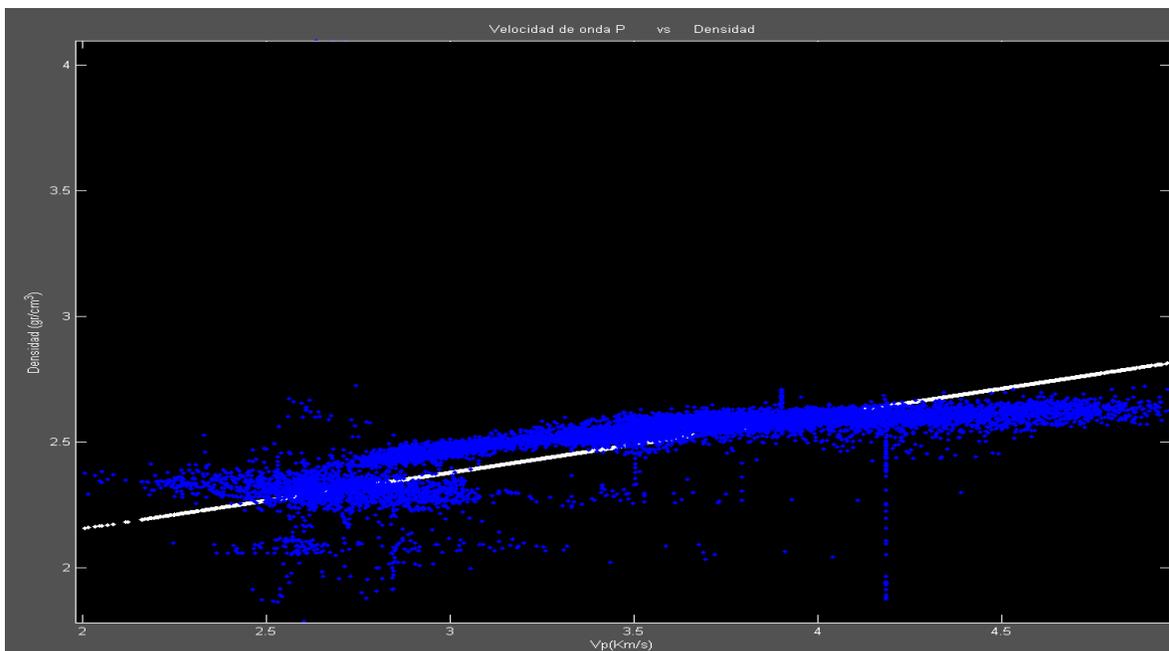


Figura 4.23. Cross-plot de velocidad de onda P (V_p) contra densidades. El color azul corresponden a las densidades del Pozo 1 y la línea de color blanco corresponde a las densidades calculadas a partir de V_p . Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

La Figura 4.23 muestra una buena correlación respecto a las densidades del pozo 1 y las densidades calculadas.

La Figura 4.24 muestra densidades del Pozo 1 en dos colores. El color rojo corresponde a densidades bajas, el color amarillo representa densidades medias y altas. Se observan densidades del rango de 1.58 gr/cm^3 a 2.72 gr/cm^3 . Para densidades menores a 2.6 gr/cm^3 la velocidad de propagación de onda P corresponde al intervalo de 2 Km/s a 3.2 Km/s, estos valores indican contenido de arcilla y arcilla con arena. Para densidades mayores a 2.6 gr/cm^3 la velocidad de propagación de onda P corresponde al intervalo de 3.3 Km/s a 5 Km/s, estos valores indican contenido de arena y caliza.

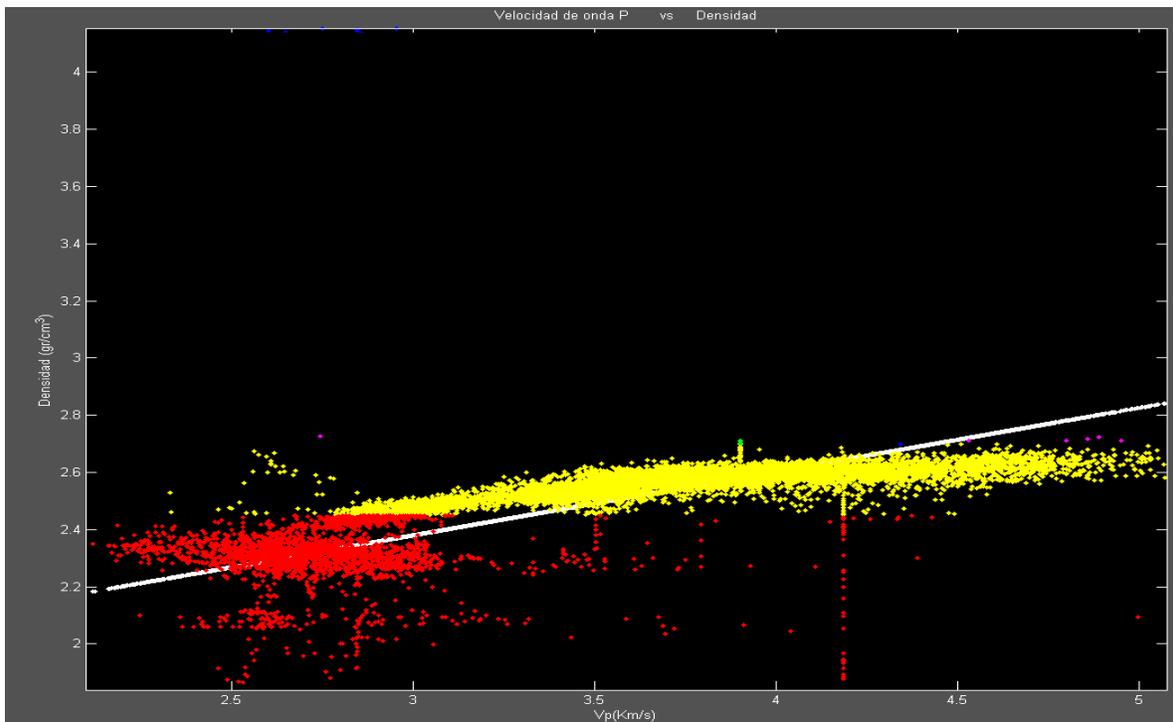


Figura 4.24. Cross-plot de densidades. Color rojo representa densidades de 1.58 gr/cm^3 - 2.45 gr/cm^3 . Color amarillo representa densidades de 2.5 gr/cm^3 - 2.72 gr/cm^3 . Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

En la Figura 4.25 muestra el cubo de densidades. En la Figura b) correspondiente a una inline con una anomalía; se observan densidades bajas de color azul fuerte rodeadas de densidades medias con color rojo.

La Figura c) corresponde a una crossline con anomalías en la que se observan densidades bajas de color azul fuerte y encima de ellas densidades altas de color rojo y blanco.

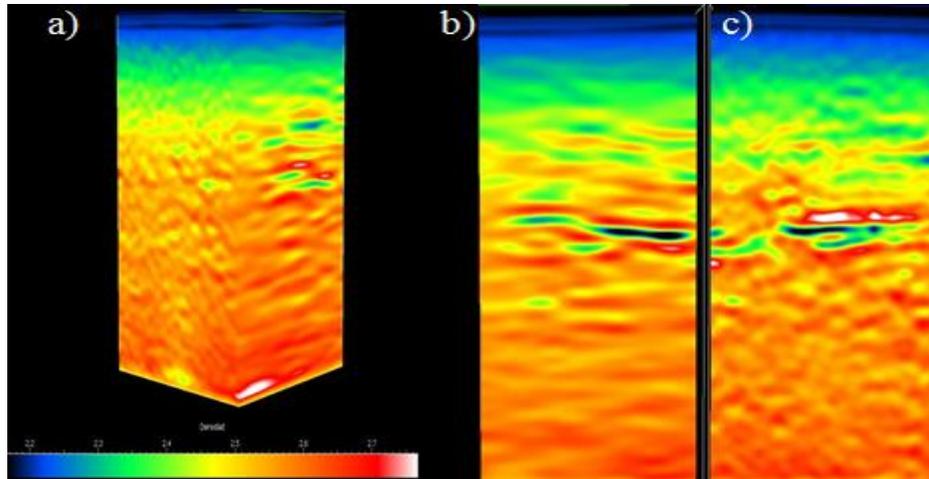


Figura 4.25. a) Cubo de densidades. b) Inline. c) Crossline. Visualizado con el software Paradigm GOCAD.

En la Figura 4.26 se observa el cubo de densidades visualizando solo las densidades bajas menores a 2.5 gr/cm^3 . En el centro de la Figura a) y b) se observan cambios litológicos con densidades bajas menores a 2.3 gr/cm^3 correspondientes a cuerpos arcillosos.

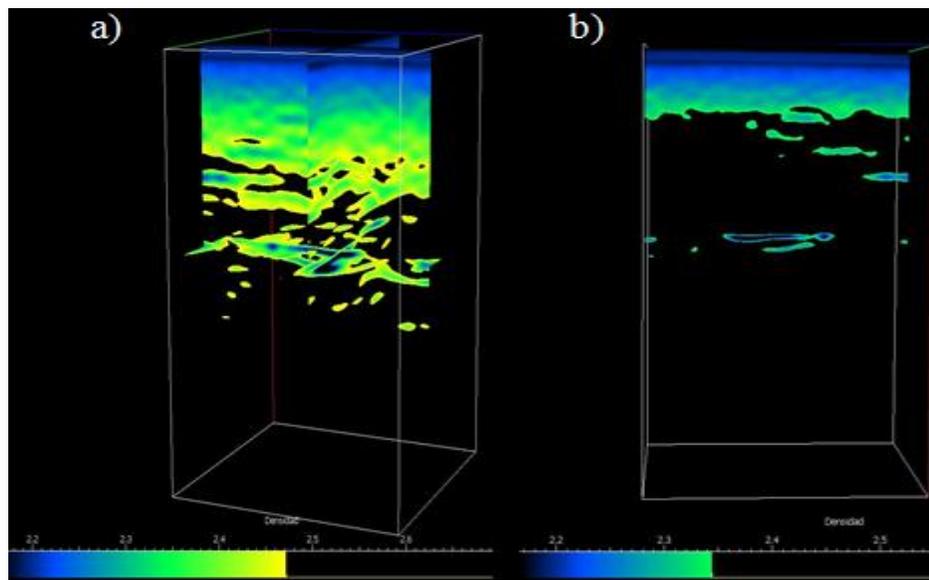


Figura 4.26. a) Cubo con densidades bajas. b) Crossline con densidades bajas. Visualizado con el software Paradigm GOCAD.

El cubo de porosidad (Figura 4.27) se obtuvo a partir del cubo de velocidades mediante la relación de velocidad y porosidad empleada en una fórmula empírica. La fórmula empírica fue calibrada a partir de los registros de pozo.

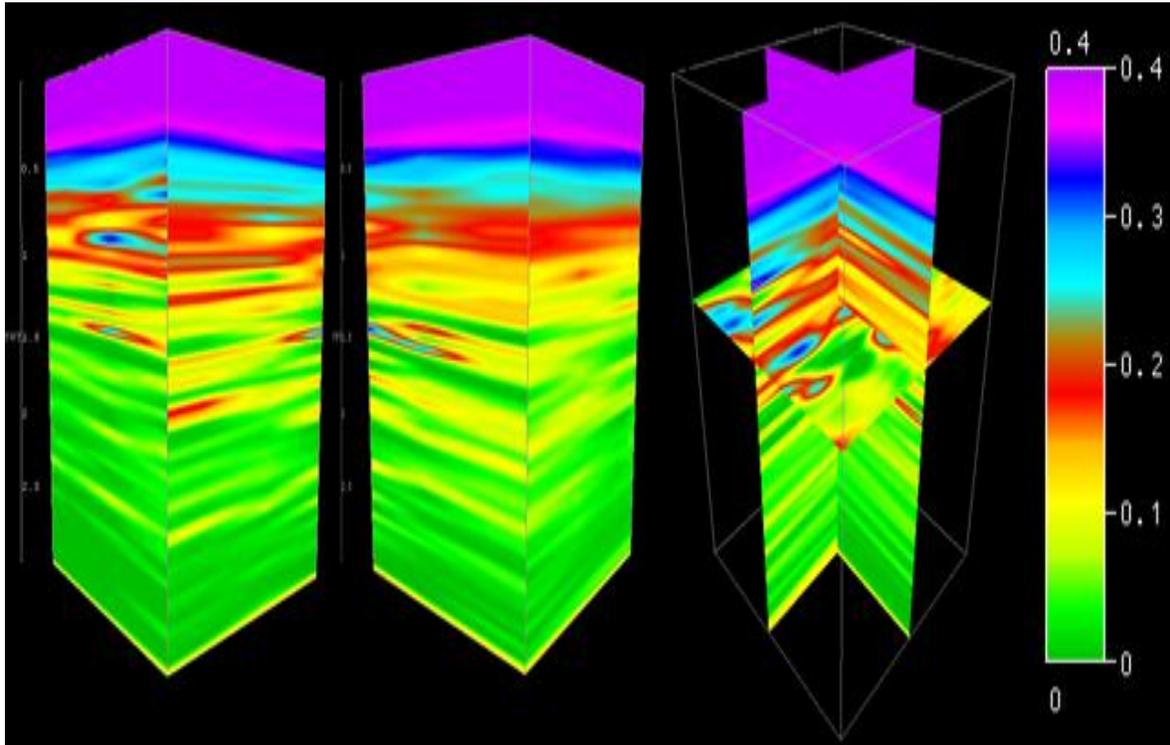


Figura 4.27. Cubo de porosidad. Visualizados con el software OpendTect.

IV.5 Calibración de pozos y su aplicación en la estimación de módulos elásticos en función de minerales

Los cubos sísmicos utilizados se encontraron en escala de tiempo y los registros de pozo en escala de profundidad. Se incorporó el tiempo de tránsito integrado (TTI) doble a los registros de pozo para poder ser incorporados a los cubos sísmicos. El TTI doble se obtuvo a partir del tiempo de tránsito del registro de pozo.

La incorporación de TTI al registro de pozo se realizó empleando la ventana de *TTI en ms* del programa Módulos Elásticos Efectivos (Figura 4.28). En la venta *TTI en ms* introduce el archivo de registro de pozo (.LAS) y se indica el número de columna que contiene la información de tiempo de tránsito (dt); las variables *C1* y *C2* son utilizadas para calibrar el TTI.

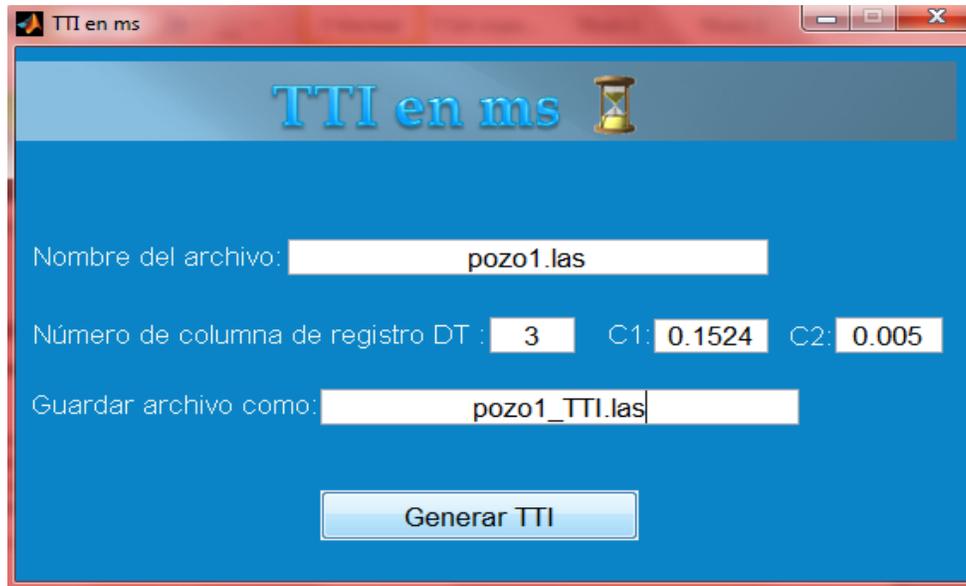


Figura 4.28. Ventana *TTI en ms* del programa *Módulos Elásticos Efectivos*.

En el archivo (.LAS) generado se le agrego el TTI en milisegundos y la velocidad en metros sobre segundo (Figura 4.29). En la Figura 4.30 se presenta el cubo de velocidades y su correlación con la velocidad del pozo1; se observó una buena correlación de velocidades. En la Figura 4.31y 4.32se observa la calibración de el modulo volumétrico y de corte efectivo en función del contenido de minerales con el cubo de velocidades. El modulo volumétrico efectivo presento valores de 25 a 45 GPa y el módulo de corte efectivo valores de 10 a 35 GPa.

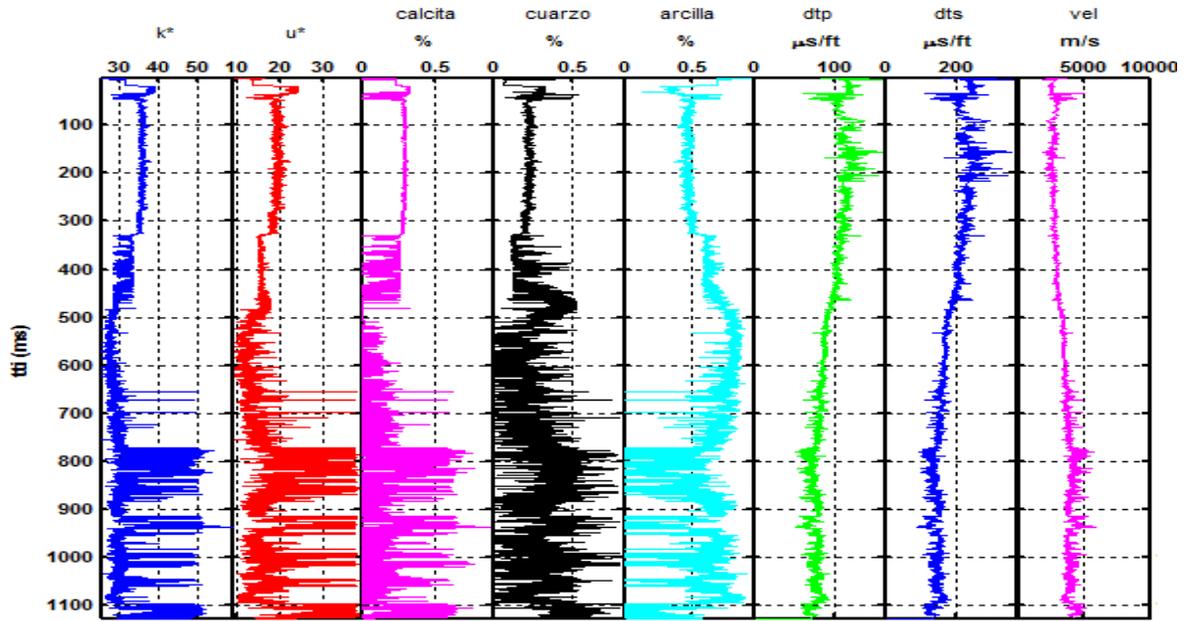


Figura 4.29. Pozo1 en escala de tiempo en milisegundos. Visualizado en el software Módulos Elásticos Efectivos.

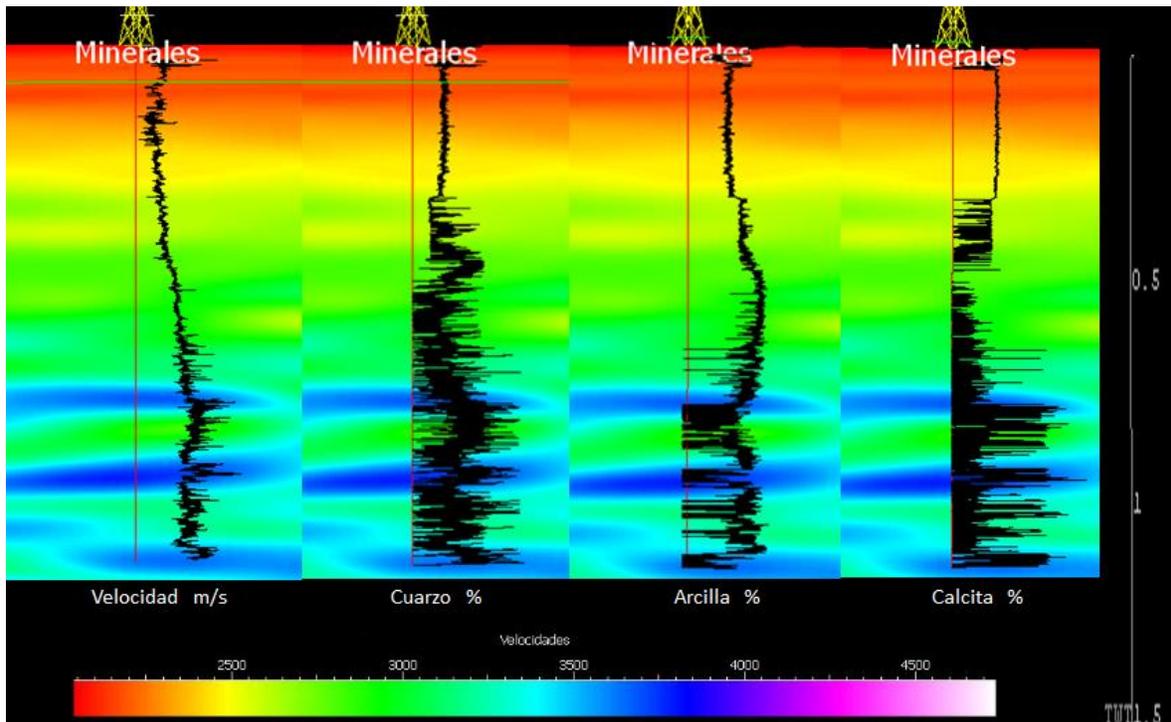


Figura 4.30. Cubo de velocidades y contenido variable de minerales de pozo1. Visualizado en el software Paradigm GOCAD.

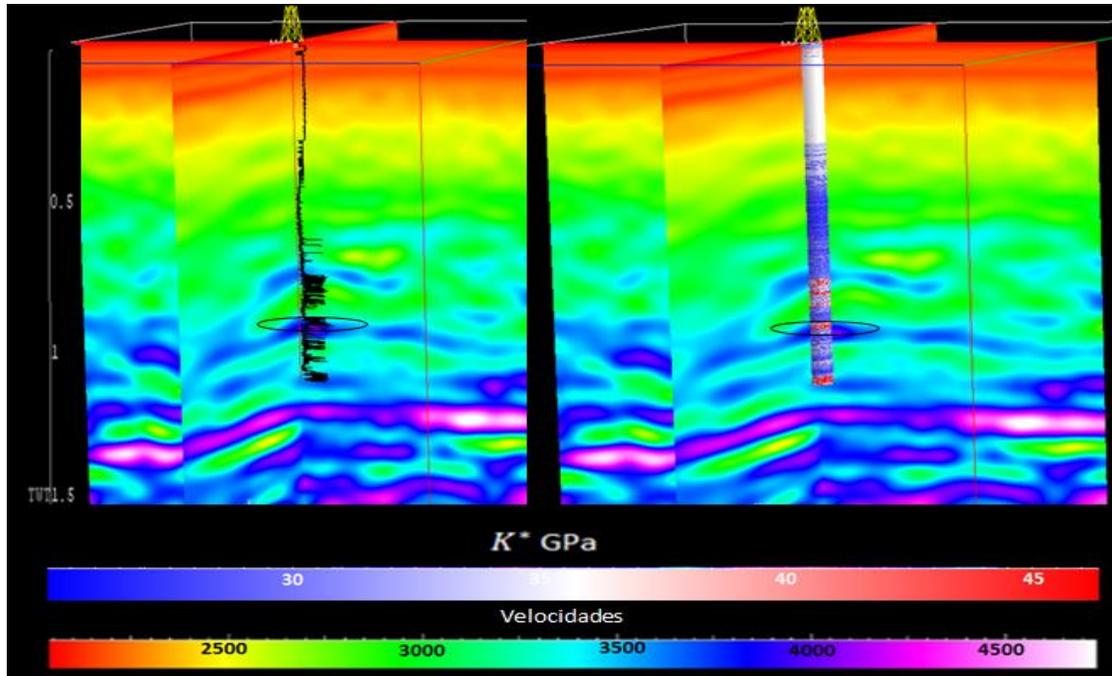


Figura 4.31. Cubo de velocidades y magnitud de modulo volumétrico efectivo del pozo1. El ovalo color negro muestra la zona 1 y 2. Visualizado en el software Paradigm GOCAD.

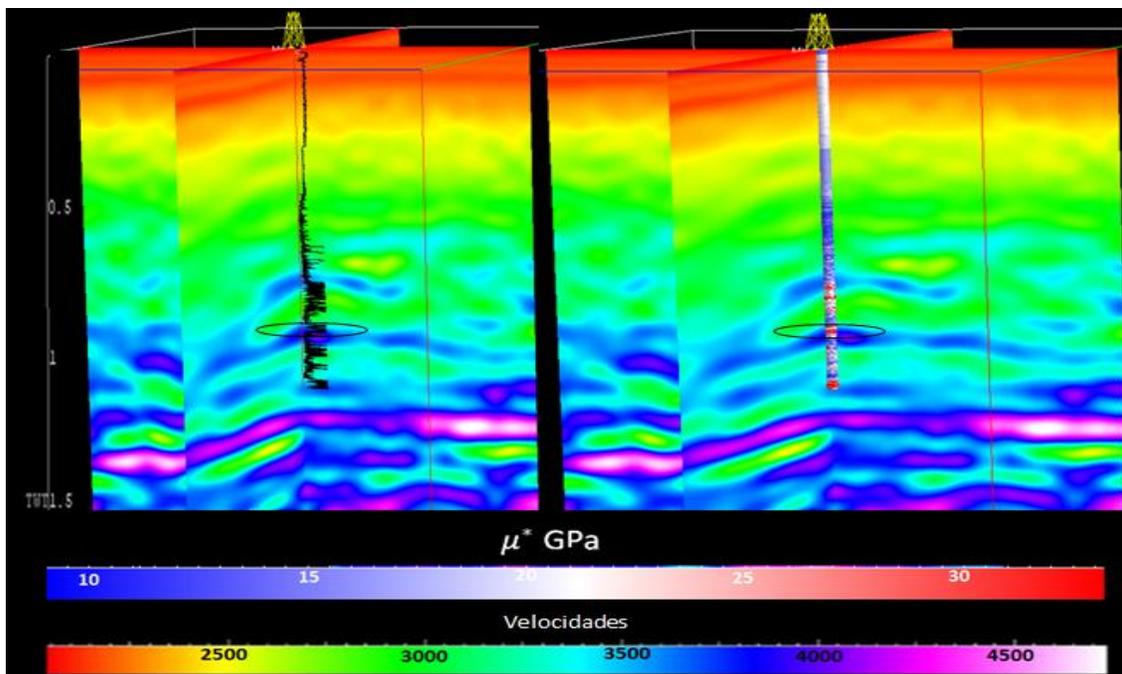


Figura 4.32. Cubo de velocidades y magnitud de módulo de corte efectivo del pozo1. El ovalo color negro muestra la zona 1 y 2. Visualizado en el software Paradigm GOCAD.

De la zona 1 y 2 (Figura 3.22) se obtuvieron cubos de tiempo de transito de onda P y S (Figura 4.33), densidad y porosidad (Figura 4.34). Los cubos fueron editados en formato *ascii* para poder ser ingresados al programa *invermarkov* con el cual se obtuvieron los minerales. Una vez que se obtuvo el contenido de minerales a partir de los cubos, se editó la información en formato *ascii* y se obtuvieron cubos de minerales en formato *sgy* (Figuras 4.35-4.37).

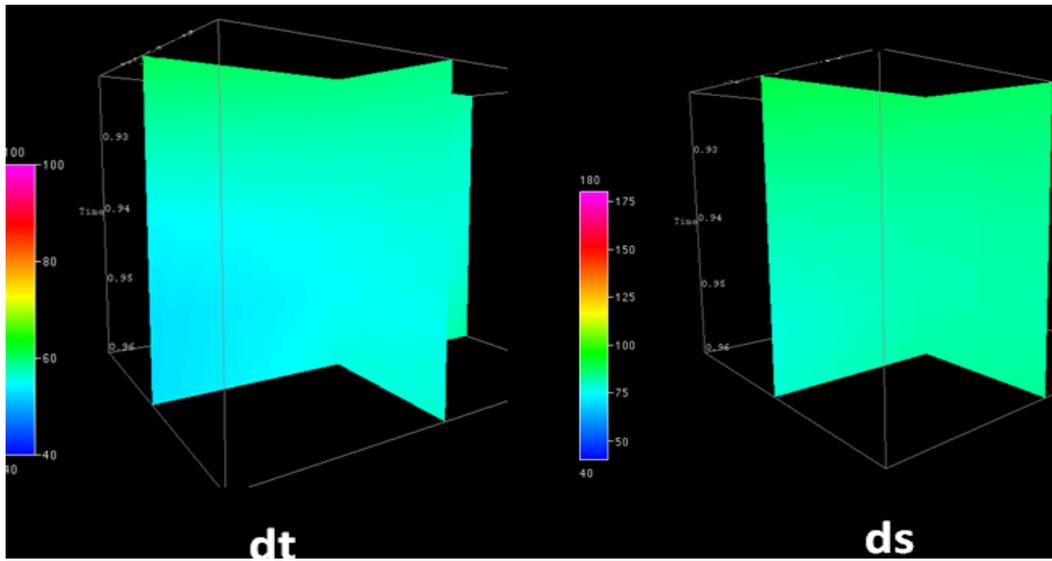


Figura 4.33. Cubo de tiempo de transito de onda P y S que abarcan la zona 1 y 2. Visualizados con el software OpendTect.

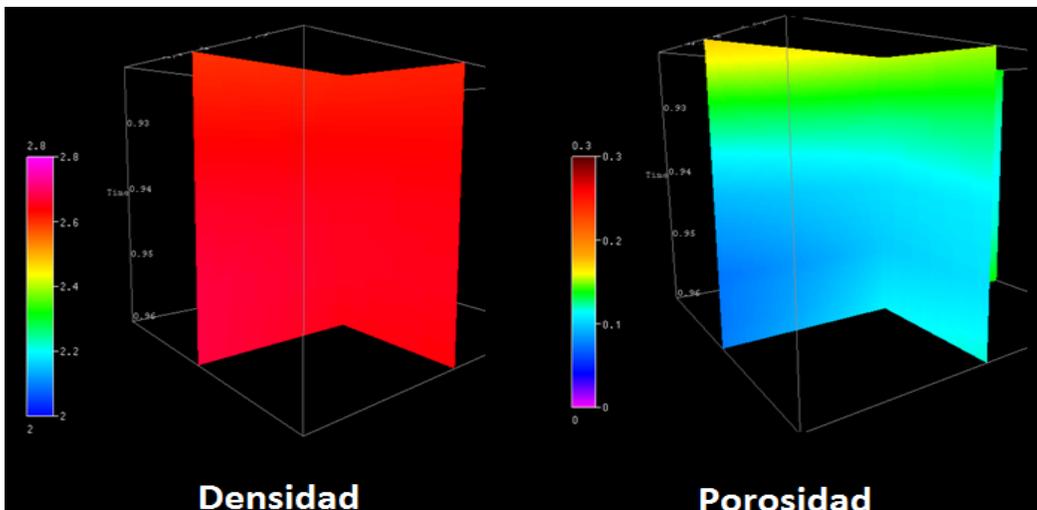


Figura 4.34. Cubo de densidad y porosidad que abarcan la zona 1 y 2. Visualizados con el software OpendTect.

Los cubos distribución de minerales se encuentran ubicados en la zona 1 y 2 (Figura 3.22). La zona 1 y 2 mostraron un mayor contenido de distribución de cuarzo y en segundo lugar se presentó el contenido de distribución de calcita y en cantidades casi nulas se presentó la arcilla. Al compararse los datos del contenido variable de minerales obtenidos a partir del pozo1 con los datos de los cubos de distribución de minerales se encontró que la información se correlaciona respecto a un mayor contenido de cuarzo (Figura 4.36) y valores casi nulos para la arcilla (Figura 4.37).

El cubo de distribución de calcita (Figura 4.35) varió poco respecto al pozo1 al mostrar el contenido variable de calcita. Se obtuvo una buena correlación entre los cubos de distribución de minerales y contenido variable de minerales del pozo1 respecto a la zona 1 y 2.

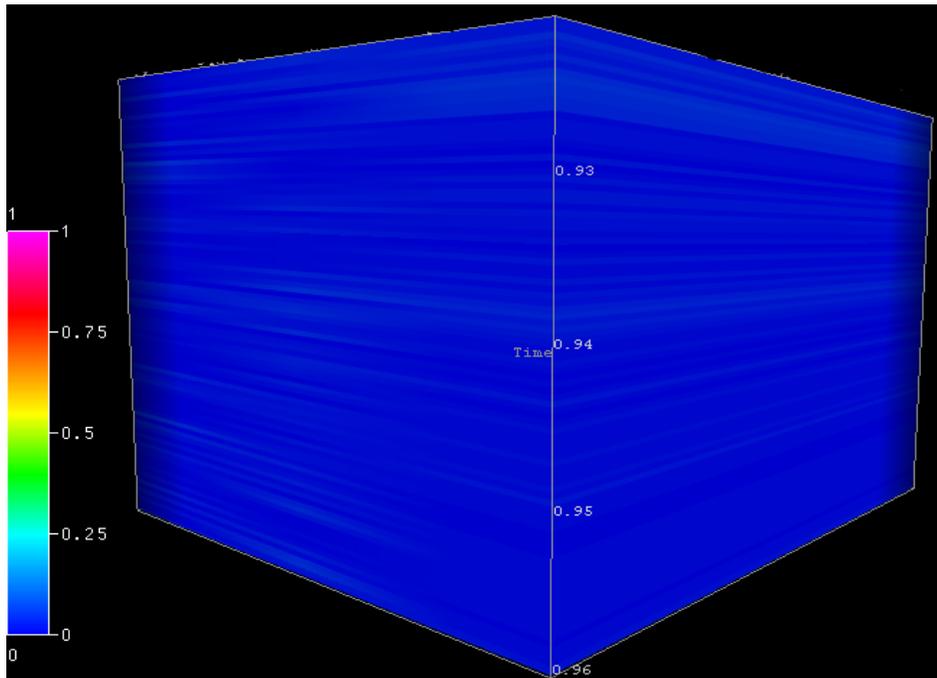


Figura 4.35. Cubo de distribución de calcita que abarca la zona 1 y 2 del pozo1. Visualizado con el software OpendTect.

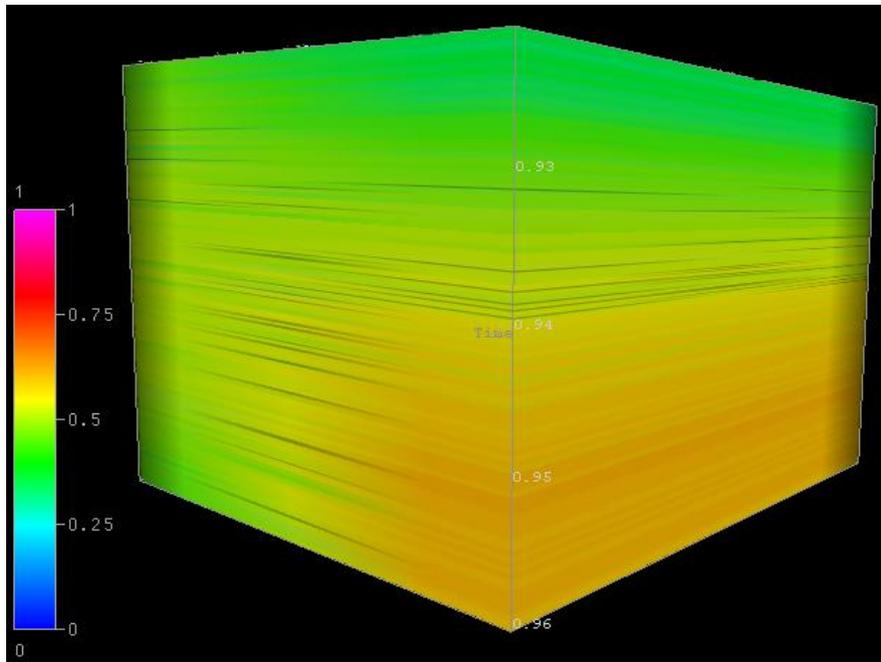


Figura 4.36. Cubo de distribución de cuarzo que abarca la zona 1 y 2 del pozo1. Visualizado con el software OpendTect.

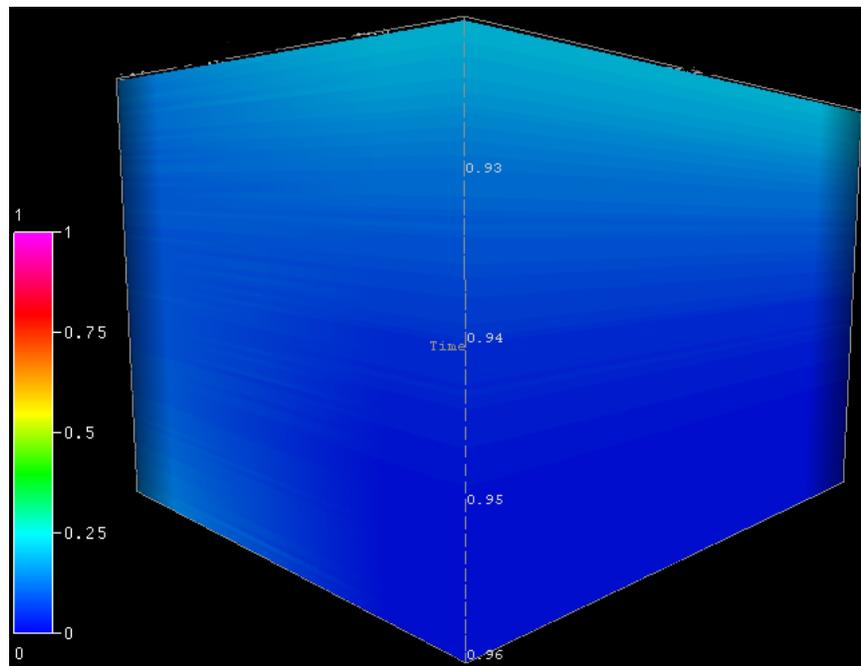


Figura 4.37. Cubo de distribución arcilla que abarca la zona 1 y 2 del pozo1. Visualizado con el software OpendTect.

Conclusiones

Se alcanzó el objetivo de estimar las proporciones relativas de minerales y módulos elásticos en medios efectivos con datos petrofísicos y con datos sísmicos.

Resultado certera la selección del método auto consistente para la obtención de información de la microestructura de la roca. El entendimiento de los fundamentos teóricos relacionados con las diversas propiedades petrofísicas son básicos y determinantes al trabajar en medios efectivos. Los datos de registro de pozo considerados se relacionaron con mediciones directas de tiempo de tránsito, densidad y porosidad.

Se desarrollaron funciones contenidas en el programa Módulos Elásticos Efectivos para realizar la edición de datos de los registro de pozo. Esto con el fin de obtener una correcta estimación de proporción variable de minerales.

Los módulos efectivos mostraron valores concordantes al contenido variable de minerales de cada zona de los pozos analizados. Los módulos volumétrico y de corte efectivos se calcularon en función de la proporción variable de minerales usando el software Módulos Elásticos Efectivos. Así mismo el software desarrollado mostro ser de suma importancia al realizar la calibración y correlación con datos de laboratorio, croosplots, incorporación de TTI y análisis de zonas de interés.

El cubo de velocidades fue calibrado con los registros sónicos de los pozos y mostro una buena correlación en la disminución y aumento de velocidad característico de cada litología asociada.

Se obtuvieron cubos de la distribución de los minerales con el método auto consistente. Los cubos de distribución de minerales fueron comparados con la proporción variable de minerales obtenida con registro de pozo y mostraron tener correlación.

Fue importante realizar una correcta interpretación de los resultados de módulos elásticos efectivos y contenidos de minerales para la ubicación de zonas con un buen contenido de cuarzo donde puede haber impregnación de hidrocarburos.

Recomendaciones

La edición de datos de los registros geofísicos de pozo proporcionara una apropiada estimación de contenido variable de minerales y magnitud de módulos elásticos efectivos.

La calibración de fórmulas empíricas con registros geofísicos de pozo será significativa para la obtención de cubos de densidad y porosidad.

La estimación de cubos de distribución variable de minerales y magnitud de módulos efectivos en usando el formato sgy disminuirá el tiempo de obtención de los cubos; ya que la obtención de cubos empleando datos en formato ascii requiere de un mayor tiempo.

Agregar más funciones al software Módulos Elásticos Efectivos que permitan realizar más operaciones con los registros geofísicos de pozo.

Referencias

- Adler, F., and S. Brandwood, 1999, *Robust estimation of dense 3-D stacking velocities from automated picking*: 69th Ann. Internat. Mtg, Soc. Of Expl. Geophys., 1162-1665.
- Berryman, J.G., 1980, *Long wavelength propagation in composite elastic media*, J.Acoust. Soc. Am., 68, 1809-1831.
- Berryman, J.G., 1992, *Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity*, J.Acoust. Soc. Am., 91, 551-571.
- David E. Johnson, Kathryne E. Pile. *Well Logging in Nontechnical Language*, 2nd Edition, 2002
- Gerardo Ronquillo Jarillo, Tatiana Chichina, Juan José Valencia Islas, Enrique Coconi Morales. *Física de rocas para la caracterización de yacimientos arenos-arcillosos*, proyecto D.00259, pp 1-191, 2010.
- Korringa, J., Brown R.J.S, Thompson D.D., and Runge R.J., 1979, *Self-consistent imbedding and the ellipsoidal model for porous rocks*, J. Geophysics. Res., 84, 5591-5598.
- M. Markov, E. Kazatchenko, and A. Mousatov., 2006, *Copressional and shear wave velocities in multicomponent carbonate media as porosity functions*, Trans. SPWLA, 47th Annual Logging Symposium, paper P.
- Mavko, G., T. Mukerji, and J. Dvorkin, 2009, *The rock physics handbook. Tools for seismic analysis in porous media*, 525 pp., Cambridge University press.
- Norris, A.N., 1985, *A differential scheme for the effective moduli of composites*, Mechanics of Materials, 4, 1-16.
- S. Fomel., 2009, *Velocity analysis using AB semblance*, Published in Geophysical Prospecting, v. 57, 311-321.
- Oberto, Serra. *Fundamentals of well-log interpretation*. Ed. Elsevier Science Publishers B.V, 1984
- Valery M. Levin, Juan M. Álvarez-Tostado, *Effective Poroelastic Properties of Transversely Isotropic Porous Medium with Aligned Spheroidal Inhomogeneities*. *Letters in Fracture and Micromechanics*, pp 86-91, 2007.

- Wu, T.T., 1966. The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material. *Int. J. Solids Structures*, 2, 1–8.
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*: Society of Exploration Geophysicists, *Investigations in Geophysics*, 10.
- Yilmaz, O, Stephen M. Doherty, *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists (1987).

Apéndice A

```
%          PROGRAMA DE MODULOS ELASTICOS EFECTIVOS
%
% Programa que calcula módulos elásticos efectivos en función del
% contenido variable de minerales; el calculo se realiza hasta para
%cuatro minerales distintos.

%////////////////////////////////////
%          Menu principal
%////////////////////////////////////

function varargout = Menu(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Menu_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Menu_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Menu_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

introduccion
pause(3);
%----- Imagen fondo 1
fondo=imread('fondo_menu','bmp');
fondo=uint8(fondo);
Img=image(fondo,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off','YDir','reverse',...
      'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));

%----- Imagen fondo 2
fondo_dos=imread('fondo_menu2','bmp');
fondo_dos=uint8(fondo_dos);
Img=image(fondo_dos,'Parent',handles.axes2);
set(handles.axes2,'Visible','off','YDir','reverse',...
      'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));
```

```
function varargout = Menu_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% -----
function Menu_principal_Callback(hObject, eventdata, handles)
pause(3);
close introduccion

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function cargar_pozo_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc
    %----- Cargar Pozo para graficar
    pozo=read_las_file;
    l_plot(pozo);

function boton_tabla_datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
    tabla_modulos(1)

function Menu_acerca_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Menu_tablas_Callback(hObject, eventdata, handles)

function submenu_tabla_uno_Callback(hObject, eventdata, handles)
    tablauno

function submenu_tabla_dos_Callback(hObject, eventdata, handles)
    tablados

function submenu_tabla_tres_Callback(hObject, eventdata, handles)
    tablatres

function submenu_tabla_cuatro_Callback(hObject, eventdata, handles)
    tablacuatro

function Menu_pozos_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Submenu_vizualizar_pozo_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%----- Cargar Pozo para graficar
    pozo=read_las_file;
l_plot(pozo);

function Submenu_convertir_pozo_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Menu_minerales_Callback(hObject, eventdata, handles)

function subsubmenu_convertir_segundos_Callback(hObject, eventdata,
handles)

function subsubmenu_convertir_milisegundos_Callback(hObject, eventdata,
handles)

nueve_cols

function Submenu_inversion_min_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Sub_Submenu_Preparar_para_InverMarkov_Callback(hObject,
eventdata, handles)
    Preparar_datos_InverMarkov

function Sub_Submenu_InverMarkov_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Sub_Submenu_Modulos_Elasticos_E_Callback(hObject, eventdata,
handles)

function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function sub_submenu_tres_minerales_Callback(hObject, eventdata, handles)

function sub_submenu_cuatro_minerales_Callback(hObject, eventdata,
handles)
```

```
%////////////////////////////////////
```

```
%La siguiente función edita los registros geofísicos de pozo
%para ingresar los datos al programa invermarkov
%////////////////////////////////////
```

```
function varargout = Preparar_datos_InverMarkov(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', 'gui_OpeningFcn', ...
                  @Preparar_datos_InverMarkov_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  'gui_OutputFcn', ...
                  @Preparar_datos_InverMarkov_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Preparar_datos_InverMarkov_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);
%----- Imagen fondo 1
fondo=imread('preparar_inverMarkov','bmp');
fondo=uint8(fondo);
Img=image(fondo,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off','YDir','reverse',...
      'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));

function varargout = Preparar_datos_InverMarkov_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function Intro_entrada_IAS_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Intro_entrada_IAS_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Intro_dt_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Intro_dt_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Intro_ds_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Intro_Rho_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Intro_Rho_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Intro_PorosidadE_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Intro_PorosidadE_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Intro_GR_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Intro_GR_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

nombre=(get(handles.Intro_entrada_LAS_textbox,'String'));
%-----
%----- Leer Archivo -----

[header, data]=hdrload(nombre);

if nargin<1
    error('La función requiere un argumento de entrada.');
```

elseif ~ischar(nombre)
error('La entrada debe ser un nombre de archivo.');

end

fid=fopen(nombre);
if fid==-1
error('El archivo no se encontró o el acceso fue negado.');

end

```

no_lines=0;
max_line=0;

ncols=0;

data=[];

line=fgetl(fid);
if ~ischar(line)
    disp('Alerta: el archivo no contiene encabezado.')
end;
[data, ncols, errmsg, nxtindex]=sscanf(line, '%f');

while isempty(data)||(nxtindex==1)
    no_lines=no_lines+1;
    max_line=max([max_line, length(line)]);

    eval(['line', num2str(no_lines), '=line;']);
    line=fgetl(fid);
    if ~ischar(line)
disp('Alerta: el archivo no contiene encabezado.')
break
    end;
    [data, ncols, errmsg, nxtindex]=sscanf(line, '%f');
end

data=[data; fscanf(fid, '%f')];
fclose(fid);

header=char(' '*ones(no_lines, max_line));
for i=1:no_lines
    varname=['line' num2str(i)];

    if eval(['length(' varname ')~=0'])
        eval(['header(i, 1:length(' varname '))=' varname ';']);
    end
end

eval('data=reshape(data, ncols, length(data)/ncols)';', '');

%-----
%-----

datos=zeros();

dt_col=str2num(get(handles.Intro_dt_textbox,'String'));
ds_col=str2num(get(handles.Intro_ds_textbox,'String'));
rho_col=str2num(get(handles.Intro_Rho_textbox,'String'));
porosidad_col=str2num(get(handles.Intro_PorosidadE_textbox,'String'));
GR_col=str2num(get(handles.Intro_GR_textbox,'String'));

```

```

%////////////////////////////////// Indice de arcilla //////////////////////////////////
    GRmin=300;
    GRmax=data(1,GR_col);
for j=1:length(data)
    if(data(j,GR_col)<0)
        GRlog=100;
    else
        GRlog=data(j,GR_col);
    end

    if(GRlog<GRmin)
        GRmin=GRlog;
    end
    if(data(j,GR_col)>GRmax)
        GRmax=data(j,GR_col);
    end
end

%//////////////////////////////////
for j=1:length(data)
%Calculo de Vp apartir de dt(tiempo de transito onda P)
dt=data(j,dt_col);

    if(ds_col==0)

        Vp=(1/(dt*.000001))* .3048;
VpKm=Vp/1000;
        %Calculo de Vs apartir de Vp mediante la relación Vs=-
0.31459+0.61088Vp
        %para Areniscas con una pobre porosidad.
Vs=-0.31459+(0.61088*VpKm);
        if (dt<0)
            dt=0;
            ds=0;
        else
            ds=.3048/((Vs*1000)*.000001);
        end
    else
        ds=data(j,ds_col);
    end
    densidad=data(j,rho_col);

nphi=data(j,porosidad_col);
if(nphi<0)
    nphi=0;
end
%////////////////////////////////// Porosidad Efectiva //////////////////////////////////
    GRlog=data(j,GR_col);
    Ish=(GRlog-GRmin)/(GRmax-GRmin);
%Vsh=0.33*(2^(2*Ish))-1;
    %porefectiva=nphi*(1-Vsh);
    porefectiva2=nphi*(1-Ish);
%//////////////////////////////////
    if (densidad<0)
        densidad=0;
    end
end

```

```
end

    datos(j,1)=data(j,1);
datos(j,2)=dt;
    datos(j,3)=ds;
    datos(j,4)=densidad;
    datos(j,5)=porefectiva2;

end
salida=(get(handles.Intro_archivo_salida_textbox,'String'));
dlmwrite(salida,datos,'delimiter','\t','precision',6,'-append');

function Intro_archivo_salida_textbox_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Intro_archivo_salida_textbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Tiempo de Transito Integrado (TTI)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function varargout = nueve_cols(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @nueve_cols_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @nueve_cols_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function nueve_cols_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;
```

```
guidata(hObject, handles);

%----- Imagen fondo 1
fondo=imread('TTI_nueve','bmp');
fondo=uint8(fondo);
Img=image(fondo,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off','YDir','reverse',...
      'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));

function varargout = nueve_cols_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
%-----
%-----
%           Agregar TTI a Registro Geofísico
%-----
%f1=str2double(get(handles.intro_archivo_LAS,'String'));
nombre=(get(handles.intro_archivo_LAS,'String'));
disp(nombre)

[header, data]=hdrload(nombre);

if nargin<1
error('La función requiere un argumento de entrada.');
```

```
elseif ~ischar(nombre)
    error('La entrada debe ser un nombre de archivo.');
```

```
end

fid=fopen(nombre);
if fid==-1
error('El archivo no se encontró o el acceso fue negado.');
```

```
end

no_lines=0;
max_line=0;

ncols=0;

data=[];

line=fgetl(fid);
if ~ischar(line)
    disp('Alerta: el archivo no contiene encabezado.')
```

```
end;
[data, ncols, errmsg, nxtindex]=sscanf(line, '%f');
```

```
while isempty(data)|| (nxtindex==1)
    no_lines=no_lines+1;
    max_line=max([max_line, length(line)]);

    eval(['line', num2str(no_lines), '=line;']);
    line=fgetl(fid);
    if ~ischar(line)
disp('Alerta: el archivo no contiene encabezado.')
break
    end;
    [data, ncols, errmsg, nxtindex]=sscanf(line, '%f');
end

data=[data; fscanf(fid, '%f')];
fclose(fid);

header=char(' '*ones(no_lines, max_line));
for i=1:no_lines
    varname=['line' num2str(i)];

    if eval(['length(' varname ')~=0'])
        eval(['header(i, 1:length(' varname '))=' varname ';'']);
    end
end

eval('data=reshape(data, ncols, length(data)/ncols)';', '');

%-----
disp('Total de columnas del registro: '),disp(ncols);%Total de columnas
disp('es el total de filas del registro'),disp(length(data)); %Total de
filas
disp('Ultima fila con texto encontrado'),disp(no_lines);

datos=zeros();

C1=str2double(get(handles.intro_C1,'String')); %eso284=0.1524
eso284=0.1524    eso534=0.125
C2=str2double(get(handles.intro_C2,'String')); %eso284=0.005
eso288=0.09    eso534=0.09
Tms=0;
columna_DT=str2num(get(handles.intro_num_columna_DT,'String'));
for j=1:length(data)

    dt=data(j,columna_DT);
    if(dt<0)
        dt=1;% Valor 1 usado para evitar resultado inf "infinito" 0/0
    end

    Tmsm=(dt*3.28)/1000;
```

```
Tms=Tms+(Tmsm*C1);
Tms_Doble=Tms*2;
%TTIs=C2+(Tms/1000);
%TTIsdoble=TTIs*2;
velocidad=(1/Tmsm)*1000;

%----- 2 Columnas -----
if(ncols==2)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=velocidad;
end

%----- 3 Columnas -----
if(ncols==3)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=velocidad;
end

%----- 4 Columnas -----
if(ncols==4)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=velocidad;
end

%----- 5 Columnas -----
if(ncols==5)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=velocidad;
end

%----- 6 Columnas -----
if(ncols==6)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=velocidad;
end

%----- 7 Columnas -----
if(ncols==7)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
```

```
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=velocidad;
end
```

```
%----- 8 Columnas -----
if(ncols==8)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=velocidad;
end
```

```
%----- 9 Columnas -----
if(ncols==9)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=velocidad;
%datos(j,11)=TTIsdoble;
end
```

```
%----- 10 Columnas -----
if(ncols==10)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=data(j,10);
datos(j,11)=velocidad;
end
```

```
%----- 11 Columnas -----
if(ncols==11)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
```

```
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=data(j,10);
datos(j,11)=data(j,11);
datos(j,12)=velocidad;
end
%----- 12 Columnas -----
if(ncols==12)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=data(j,10);
datos(j,11)=data(j,11);
datos(j,12)=data(j,12);
datos(j,13)=velocidad;
end

%----- 13 Columnas -----
if(ncols==13)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=data(j,10);
datos(j,11)=data(j,11);
datos(j,12)=data(j,12);
datos(j,13)=data(j,13);
datos(j,14)=velocidad;
end

%----- 14 Columnas -----
if(ncols==14)
datos(j,1)=Tms_Doble;
datos(j,2)=data(j,2);
datos(j,3)=data(j,3);
datos(j,4)=data(j,4);
datos(j,5)=data(j,5);
datos(j,6)=data(j,6);
datos(j,7)=data(j,7);
datos(j,8)=data(j,8);
datos(j,9)=data(j,9);
datos(j,10)=data(j,10);
```

```
    datos(j,11)=data(j,11);
    datos(j,12)=data(j,12);
    datos(j,13)=data(j,13);
    datos(j,14)=data(j,14);
    datos(j,15)=velocidad;
end
end
%linea1=('-----');
%linea2=('          TTI Doble en ms');
%linea3=('-----');
nombre_salida=(get(handles.intro_nombre_archivo_salida,'String'));
dlmwrite(nombre_salida,header,'delimiter','');
dlmwrite(nombre_salida,datos,'delimiter','\t','precision',6,'-append');
```

```
%////////////////////////////////////
%////////////////////////////////////
```

```
function intro_archivo_IAS_Callback(hObject, eventdata, handles)
function intro_archivo_IAS_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function intro_num_columna_DT_Callback(hObject, eventdata, handles)
function intro_num_columna_DT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function intro_nombre_archivo_salida_Callback(hObject, eventdata,
handles)
function intro_nombre_archivo_salida_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function intro_C1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function intro_C1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```

end

function intro_C2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function intro_C2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Crear Figura
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function figure_handle=lfigure

global PARAMS4PROJECT S4M WF

run_presets_if_needed

figure_handle=figure;
set(figure_handle,'Position',S4M.landscape,'PaperPosition',[0.8 0.8 10.0
6.35], ...
    'PaperOrientation','landscape')
axis_handle=gca;
bgGray
figure_export_menu
if ~isyes(S4M.figure_labels)
    if nargin == 0
        clear figure_handle
    end
    return
end

h=axes('Position',[0 0 1 1],'Visible','off');

if ~isempty(S4M.plot_label)
    txt=strrep(S4M.plot_label,'\_', '#&%');
    txt=strrep(txt,'_', '\_');
    txt=strrep(txt,'#&%', '\_');
else
    txt='';
end

if ~isempty(PARAMS4PROJECT) && isfield(PARAMS4PROJECT,'name') &&
~isempty(txt)
    txt={strrep(PARAMS4PROJECT.name, '_','\_');txt};

elseif ~isempty(WF) && ~isempty(txt)
    txt={strrep(WF.name, '_','\_');txt};
end

try
    text(0.88,0.025,S4M.time,'FontSize',7);

```

```
catch
end
try
    text(0.02,0.025,txt,'FontSize',7);
catch
end

set(h,'HandleVisibility','off');

axes(axis_handle);
set(axis_handle,'Position',[0.08,0.11,0.90,0.72],'FontName',S4M.font_name);

if nargin == 0
    clear figure_handle
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Graficar lineas de registros
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function aux=l_plot1(wlog,varargin)

if ~istype(wlog,'well_log')
    error(' First input argument must be a well log')
end

if length(wlog) > 1
    error(' Log structure must have length 1 --- must not be an array')
end

param.curves=[];
param.figure='new';
param.orient='portrait';
param.colors={'r','b','g','c','m','k','y'};
param.linewidth=0.5;
param.lloc='BestOutside';
param.depths=[wlog.first,wlog.last];
param.tracking='yes';
param.scale=[];

param=assign_input(param,varargin);

if iscell(param.depths)
    param.depths=cell2mat(param.depths);
end

if isempty(param.curves)
    str=wlog.curve_info(2:end,1);
    [idx,ok] = mylistdlg(str,{'promptstring','Select one or more curves:'},...
        {'selectionmode','multiple'},...
        {'previous','l_plot1','l_plot'}, ...
```

```
        {'name','Cuamatzi: l_plot1'});
    if ~ok
        return
    else
        param.curves=wlog.curve_info(idx+1,1);
    end
end

if ~iscell(param.curves)
    param.curves={param.curves};
end
if iscell(param.curves{1})
    param.curves=param.curves{1};
end

if length(param.curves) == 1 && strcmp(param.curves, '*')
    param.curves=wlog.curve_info(2:end,1)';
end

index=find(wlog.curves(:,1) >= param.depths(1) & wlog.curves(:,1) <=
param.depths(2));
if isempty(index)
    error([' Log has no values in requested depth/time range: ', ...
        num2str(param.depths)])
end

index1=curve_indices(wlog,param.curves);
index2=index1(index1>0);
if isempty(index2)
    disp(' None of the requested curve mnemonics exists; hence, no plot
has been created.')
    return
end

param.curves=param.curves(index1>0);
ncurves=length(index2);

units=wlog.curve_info(index2,2);

same_units=all(ismember(units,units{1}));

irregular=0;    illogical=0;

if isempty(param.scale)
    if same_units
        scale=false;
    else
        scale=true;
    end
else
    scale=isyes(param.scale);
end

ier=0;
```

```
if ~iscell(param.colors)
    param.colors={param.colors};
end
ncol=length(param.colors);
if ncurves > ncol
    alert([' Only ',num2str(ncol),' curve colors defined; ', ...
        'hence not all ',num2str(ncurves),' displayed'])
    ncurves1=ncol;
else
    ncurves1=ncurves;
end

ltext1=cell(1,ncurves1);
ltext2=cell(1,ncurves1);

if strcmp(param.figure,'new')
    font_size=10;
    if strcmpi(param.orient,'portrait')
        figure_handle=pfigure;
    else
        figure_handle=lfigure;
    end
    set(figure_handle,'DoubleBuffer','on');
    axis_handle=gca;
    set(axis_handle,'FontSize',font_size);
    if ncurves1 > 1
        hold on
    end

options_menu_handle=uimenu(figure_handle,'Label','Options','ForegroundColor','b','Tag','options_menu');

else
    figure_handle=gcf;
    axis_handle=gca;
end

for ii=1:ncurves1
    idx=index2(ii);
    if ~strcmpi(wlog.curve_info(idx,2),'logical') &&
~strcmpi(wlog.curve_info(idx,2),'bool')
        irregular=1;
        if scale
            temp=wlog.curves(index,idx);
            mint=min(temp);
            maxt=max(temp);

            % Figure out how many digits to display
            nDigits1=no_of_digits(abs(mint),5);
            nDigits2=no_of_digits(abs(maxt),5);

            temp=((temp-mint)+eps/2)/((maxt-mint)+eps);
            plot(temp,wlog.curves(index,1),param.colors{ii},'LineWidth', ...
                param.linewidth)
```

```

        ltext1{ii}=[mnem2tex(param.curves{ii}),': '];
        ltext2{ii}=[num2str(mint,nDigits1),' - ',num2str(maxt,nDigits2),
...
                ' ',units2tex(l_gu(wlog,param.curves{ii}))];
    else
plot(wlog.curves(index,idx),wlog.curves(index,1),param.colors{ii}, ...
    'LineWidth',param.linewidth)
    ltext1{ii}=[mnem2tex(param.curves{ii}),': '];

    end
    hold on

    else % Logical curves
        x=wlog.curves(index,idx);
        y=wlog.curves(index,1);
        ya=(y(1:end-1)+y(2:end))*0.5;
        lya=length(ya);
        iidx=reshape([1:lya;1:lya],1,2*lya);
        yy=[y(1);y(1);ya(iidx);y(end);y(end)];
        xx=[0;x(iidx);x(end);x(end);0];
        dxx=diff(xx);
        idx1=find(dxx ~= 0);
        idx2=unique([idx1;idx1+1]);

        fill([0;xx(idx2);0],[yy(1);yy(idx2);yy(end)],param.colors{ii},'EdgeColor'
        , 'none');
        ltext1{ii}=mnem2tex(param.curves{ii});
        ltext2{ii}='0 - 1 (logical)';
    end

end

linemenu
if ier == 1
    disp([' Available curves: ',cell2str(wlog.curve_info(2:end,1))])
end

if same_units
    xlabel(units2tex(wlog.curve_info{idx,2}));
else
    xlabel('Units are curve-dependent')
end

ylabel(info2label(wlog.curve_info(1,:)));

pos=get(axis_handle,'Position');
set(axis_handle,'YDir','reverse','XAxisLocation','top', ...
    'Position',[pos(1),pos(2)-0.04,pos(3),0.8])

if irregular && illogical
    alert(' Legend will be wrong if logical curves were not last on the
list')
end

```

```
if scale
    ltext1=[char(ltext1),char(ltext2)];
end

legend(ltext1,'Location',param.lloc)

grid on
zoom on
box on
hold off

mytitle(mnem2tex(wlog.name))

if strcmp(param.figure,'new') && strcmp(param.tracking,'yes')
    initiate_2d_tracking_item(options_menu_handle,{'x','n/a','x'}, ...
        wlog.curve_info(1,:))
end

if nargin > 0
    aux.figure_handle=figure_handle;
    aux.axis_handle=axis_handle;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Leer archivo .LAS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function wlog=read_las_file(filename,varargin)

run_presets_if_needed

param.section=[];

param=asigna_entrada(param,varargin);

if ~isempty(param.section)
    param.section=cadenas(param.section,',');
end

if nargin == 0 || isempty(filename);
    [fid,filename]=abrir('rt','.las');
else
    [fid,filename]=abrir('rt',filename);
end

tlines=textscan(fid,'%s','delimiter','\n');
fclose(fid);
tlines=tlines{1};
bool=~cellfun(@isempty,tlines);
tlines=tlines(bool);
bool=cellfun(@isempty,regexp(tlines,'^#'));
```

```
tlines=tlines(bool);

' ');
tlines(1)=temp(1);
if strcmpi(tlines{1}, '~VERSION')
    comp=separador(tlines{2});
    if strcmp(comp{1}, 'VERS')
        if str2double(comp{2}) == 3
            wlog=lineador2(tlines(3:end), param);

            elseif str2double(comp{2}) == 2
                wlog=lineador1(tlines(3:end));

            elseif str2double(comp{2}) == 1.2
                warning(warnid, 'LAS-file version is 1.2')

            else
                error(['Unknown LAS-file version ', comp{2}])
            end
        end
    end
else
    error(['The file specified, "', filename, '" is not a LAS file.'])
end

wlog=clean_up_well_log(wlog);

function wlog=clean_up_well_log(wlog)

fields={'wellname', 'country', 'county', 'state', 'api', 'wellid', ...
        'location', 'field', 'company', 'service', 'date'};

lfields=length(fields);
bool=false(1, lfields);

for ii=1:lfields
    try
        txt=wlog.(fields{ii});
        if isempty(txt) || ~isempty(findstr('unknown', lower(txt)))
            bool(ii)=true;
        end
    catch
        end
end

if any(bool)
    wlog=rmfield(wlog, fields(bool));
end
```

```
%////////////////////////////////////
%                               Colores de registro geofísico
%////////////////////////////////////

function aux=l_plot(wlog,varargin)

global S4M

aux.figure_handle=[];

if ~istype(wlog,'well_log')
    error(' First input parameter must be a well log')
end
if length(wlog) > 1
    error(' Log structure must have length 1 --- must not be an array')
end

param.annotation='mnemonic';
param.axis_scaling='';
param.axis_limits='tight';
param.color='b';
param.curves='';
param.depths=[wlog.first,wlog.last];
param.figure='new';
param.linewidth=0.5;
param.orient=[];
param.xll='top';

param=asigna_entrada(param,varargin);

if ~isempty(param.axis_scaling)
    alert('Parameter "axis_scaling" is obsolete. Please use "axis_limits"
instead.')
    param.axis_limits=param.axis_scaling;
end

if iscell(param.depths)
    param.depths=cell2num(param.depths);
end

if isempty(param.curves)
    if S4M.deployed || length(dbstack) < 2

        str=wlog.curve_info(2:end,1);
        [idx,ok] = mylistdlg(str,{'promptstring','Select one or more
curves:'},...
                            {'selectionmode','multiple'},...
                            {'previous','l_plot','l_plot1'}, ...
                            {'name','Cuamatzi: l_plot'});
```

```
    if ~ok
        if nargout == 0
            clear aux
        end
        return
    else
        param.curves=wlog.curve_info(idx+1,1);
    end
else
    param.curves=wlog.curve_info(2:end,1);
end
end

if strcmp(param.annotation,'mnemonic')
    idescr=1;          % Curve mnemonics used as subplot titles
else
    idescr=3;          % Curve descriptions used as subplot titles
end

if ~iscell(param.curves)
    param.curves={param.curves};
end

ncurves=length(param.curves);

if ncurves > 12
    alert('The maximum number of curves that can be displayed is 12')
    ncurves=12;
end
if ncurves == 1 && strcmp(param.curves, '*')
    param.curves=wlog.curve_info(2:end,1)';
    ncurves=length(param.curves);
end

aux.figure_handle=[];

if strcmp(param.figure,'new')
    if isempty(param.orient)
        if ncurves > 4
            param.orient='landscape';
        else
            param.orient='portrait';
        end
    end
end

if strcmpi(param.orient,'landscape')
    figure_handle=lfigure;
    font_size=(60/max([7.5,ncurves]))+1;      elseif
strcmpi(param.orient,'portrait')
    figure_handle=pfigure;
    font_size=(40/max([5,ncurves]))+1;      else
    alert([' Unknown figure orientation (' ,param.orient, ')'])
end
end
```

```

options_menu_handle=uimenu (figure_handle, 'Label', 'Options', 'ForegroundColor', 'b', 'Tag', 'options_menu');

    bgGray

else
    font_size=10;
    figure_handle=gcf;
end
index=find(wlog.curves(:,1) >= param.depths(1) & wlog.curves(:,1) <=
param.depths(2));

if isempty(index)
    error([' Log has no values in requested depth/time range: ', ...
        num2str(param.depths)])
end
ier=0;

tracking_button=true;

if ncurves > 1
    switch param.orient
    case 'landscape'
        mysuptitle(mnem2tex(wlog.name), {'factor',1})
    case 'portrait'
        mysuptitle(mnem2tex(wlog.name), {'factor',0.5})
    end
else
    mytitle(mnem2tex(wlog.name))
end

if ncurves > 1
    hh=mysubplot(1,ones(1,ncurves));
else
    hh=gca;
end

for ii=1:ncurves
    axes(hh(ii))
    pos=get(hh(ii), 'Position');
    set(hh(ii), 'FontSize', font_size, 'Position', [pos(1), pos(2) -
0.04, pos(3), 0.75]);
    [idx, ier]=curve_index1(wlog, param.curves{ii});
%-----
%Linea prueba de color agregada
%-----
--
    %Siendo la coordenada Y=wlog.curves(index,idx(1)): Esto es los valores
%numericos de la curva espedificada
    if(ii==1)
param.color='b';
    end
    if(ii==2)
        param.color='r';
    end
end

```

```

if(ii==3)
    param.color='m';
end
if(ii==4)
    param.color='k';
end
if(ii==5)
    param.color='c';
end
if(ii==6)
    param.color='g';
end
if(ii==7)
    param.color='b';
end
if(ii==8)
    param.color='r';
end
if(ii==9)
    param.color='m';
end

%-----
if isempty(idx)
    disp([' Requested curve mnemonic "',param.curves{ii},' " not
available'])
    ier=1;
elseif length(idx) > 1
    error([' More than one curve with mnemonic
"',param.curves{ii},' "'])
else
    if ~strcmpi(wlog.curve_info(idx(1),2),'logical') && ...
        ~strcmpi(wlog.curve_info(idx(1),2),'bool') % Regular curves
        plot(wlog.curves(index,idx(1)),wlog.curves(index,1),param.color,
...
            'LineWidth',param.linewidth)

        try
            axis(param.axis_limits)
        catch
            disp(['Unknown value for "axis_limits":
"',param.axis_limits,','.'])
        end

    else % Logical curves
        x=wlog.curves(index,idx(1));
        y=wlog.curves(index,1);
        ya=(y(1:end-1)+y(2:end))*0.5;
        lya=length(ya);
        iidx=reshape([1:lya;1:lya],1,2*lya);
        yy=[y(1);y(1);ya(iidx);y(end);y(end)];
        xx=[0;x(iidx);x(end);x(end);0];
        dxx=diff(xx);

```

```

        idx1=find(dxx ~= 0);
        idx2=unique([idx1;idx1+1]);

fill([0;xx(idx2);0],[yy(1);yy(idx2);yy(end)],param.color,'EdgeColor','none');
    end

initiate_2d_tracking_item(options_menu_handle,wlog.curve_info(idx(1),:),
...
                        wlog.curve_info(1,:),tracking_button)
tracking_button=false;

set(hh(ii),'XAxisLocation','top')
title(mnem2tex(wlog.curve_info{idx,idescr}));
units=wlog.curve_info{idx,2};
if ncurves > 1
    if ~strcmpi(units,'n/a')
        xlabel(units2tex(wlog.curve_info{idx,2}));
    end
else
    if ~strcmpi(units,'n/a')
        xlabel([strrep(wlog.curve_info{idx,idescr},'_','\_'),' (' ,units2tex(wlog.curve_info{idx,2}),' ) ']);
    else
        xlabel(strrep(wlog.curve_info{idx,idescr},'_','\_'));
    end
end
set(hh(ii),'YDir','reverse')
if strcmpi(wlog.curve_info{1,2},'n/a')
    dunits='';
else
    dunits=[' (' ,units2tex(wlog.curve_info{1,2}),' ) '];
end
if ii == 1
    ylabel([wlog.curve_info{1,idescr},dunits])
end
if ii > 1 && ii < ncurves
    set(hh(ii),'YtickLabel','')
end
if ii == ncurves && ii ~= 1
    set(hh(ii),'YAxisLocation','right')
    ylabel([wlog.curve_info{1,idescr},dunits])
end
end
end
grid

make_axes_bold(hh(ii))

end

if ier == 1
    disp([' Available curves: ',cell2str(wlog.curve_info(2:end,1))])
end

% zoom

```

```

if length(hh) > 1
    axes(hh(1))
    linkaxes(hh,'y')
else
    zoom on
end

axis_label_location(hh,param.xll,'both')

linemenu

if nargin > 0
    aux.figure_handle=figure_handle;
    aux.axis_handles=hh;
else
    clear aux
end

%////////////////////////////////////
%                               Módulos Efectivos
%////////////////////////////////////

n=1;
while (n~=5)

disp('-----')
disp('-----')
disp('                               Módulos Elásticos Efectivos')
disp('-----')
disp('-----')
fprintf('\n\n')
disp('----- Menu -----')
disp('-----')
disp('          1) 2 Minerales')
disp('          2) 3 Minerales')
disp('          3) 4 Minerales')
disp('          4) Tabla de módulos, densidades, velocidades y razón
de Poisson')
disp('          5) Salir')
fprintf('\n')

%---- selección de opción a evaluar en el menú
n=input('Seleccione una opción:');

% Se evalúa el numero de opción seleccionado en el menú

switch lower(n)
    case 1
        % Para el caso uno se calcula módulos elásticos efectivos en
        % función del contenido de dos minerales

```

```

clc
disp(' 2 Minerales - Modulo Volumétrico Efectivo-- En constricción
1')
disp('----- Datos de Entrada -----
-')
disp('-----')
fprintf('\n\n')
%----- Ingreso de datos de entrada para el Problema Directo
%----- P1,P2,M1,M2,K1,K2 -----
% P1 y P2 corresponde al porcentaje de cada mineral; la suma de
% ambos minerales debe ser 1. Los módulos elásticos son ingresados
% en giga pascales.

P1=input('Porcentaje % del mineral 1:');
P2=input('Porcentaje % del mineral 2:');
K1=input('Modulo Volumétrico del mineral 1:');
K2=input('Modulo Volumétrico del mineral 2:');
M1=input('Modulo de corte del mineral 1:');
M2=input('Modulo de corte del mineral 2:');
%-----

% Los datos de entrada son ingresados a las funciones:
% volumetrico_efectivo y corte_efectivo

volumetrico_efectivo(P1,P2,K1,K2,M1,M2)
corte_efectivo(P1,P2,K1,K2,M1,M2)

case 2
% Para el caso dos se calcula módulos elásticos efectivos en
% función del contenido de tres minerales

clc
disp(' 3 Minerales ')
disp('----- Datos de Entrada -----
-')
disp('-----')
fprintf('\n\n')
%----- Ingreso de datos de entrada para el Problema Directo
%----- P1,P2,P3,M1,M2,M3,K1,K2,K3 -----
P1=input('Porcentaje % del mineral 1:');
P2=input('Porcentaje % del mineral 2:');
P3=input('Porcentaje % del mineral 3:');
K1=input('Modulo Volumétrico del mineral 1:');
K2=input('Modulo Volumétrico del mineral 2:');
K3=input('Modulo Volumétrico del mineral 3:');
M1=input('Modulo de corte del mineral 1:');
M2=input('Modulo de corte del mineral 2:');
M3=input('Modulo de corte del mineral 3:');

% P1, P2 y P3 corresponde al porcentaje de cada mineral; la suma de
% los tres minerales debe ser 1. Los módulos elásticos son
% ingresados en giga pascales.
%-----

```

```

% Los datos de entrada son ingresados a las funciones:
% volumetrico_tres_efectivo y corte_tres_efectivo

volumetrico_tres_efectivo(P1,P2,P3,K1,K2,K3,M1,M2,M3)
corte_tres_efectivo(P1,P2,P3,K1,K2,K3,M1,M2,M3)

case 3
% Para el caso tres se calcula módulos elásticos efectivos en
% función del contenido de cuatro minerales

clc
disp(' 4 Minerales ')
disp('----- Datos de Entrada -----
-')
disp('-----')
fprintf('\n\n')
%----- Ingreso de datos de entrada para el Problema Directo
%----- P1,P2,P3,P4,M1,M2,M3,M4,K1,K2,K3,K4 -----
P1=input('Porcentaje % del mineral 1:');
P2=input('Porcentaje % del mineral 2:');
P3=input('Porcentaje % del mineral 3:');
P4=input('Porcentaje % del mineral 4:');
K1=input('Modulo Volumétrico del mineral 1:');
K2=input('Modulo Volumétrico del mineral 2:');
K3=input('Modulo Volumétrico del mineral 3:');
K4=input('Modulo Volumétrico del mineral 4:');
M1=input('Modulo de corte del mineral 1:');
M2=input('Modulo de corte del mineral 2:');
M3=input('Modulo de corte del mineral 3:');
M4=input('Modulo de corte del mineral 4:');

%P1, P2, P3 y P4 corresponde al porcentaje de cada mineral; la suma
% de los cuatro minerales debe ser 1. Los módulos elásticos son
% ingresados en giga pascales.
%-----

% Los datos de entrada son ingresados a las funciones:
% volumetrico_cuatro_efectivo y corte_cuatro_efectivo

volumetrico_cuatro_efectivo(P1,P2,P3,P4,K1,K2,K3,K4,M1,M2,M3,M4)
corte_cuatro_efectivo(P1,P2,P3,P4,K1,K2,K3,K4,M1,M2,M3,M4)

case 4

clc
disp(' Tabla de módulos, densidades, velocidades y razón de
Poisson')

```

```

% Muestra una pantalla con la tabla de módulos,
% densidades, velocidades Vp-Vs y razón de poisson
% correspondientes a diferentes litologías

%Llama función módulos
tabla_modulos(n)

case 5
% Opción cinco para terminar el programa

disp(' Salir 5')
clc
    otherwise
disp('Opción invalida')
%Limpia pantalla
clc

end
end

% Funciones empeladas para el calculo de módulos elásticos efectivos:

% Funciónvolumetrico_efectivo
function modulo_volumetrico=volumetrico_efectivo(P1,P2,K1,K2,M1,M2)
    clc
    disp('-----')
    disp('Los datos de entrada son:')
    disp('-----')
    fprintf('\n')
    format longG
    name='%'; p1=P1; p2=P2; m1=M1; m2=M2; k1=K1;k2=K2;
    str=sprintf('mineral 1=%s%d // modulo corte 1=%d GP // modulo
volumetrico 1=%d GP', name, p1, m1, k1);
    disp(str);
    str=sprintf('mineral 2=%s%d // modulo corte 2=%d GP // modulo
volumetrico 2=%d GP', name, p2, m2, k2);
    disp(str);
    disp('-----')
    disp('-----')
    disp('-----')

% La entrada de datos para los módulos elásticos efectivos es en GP
% Se convertirá a Pa usando la equivalencia de 1GP=1000000000Pa
% 1Pa=1N/m**2=1Kg/m.s**2

k1=k1*1000000000;
k2=k2*1000000000;
m1=m1*1000000000;
m2=m2*1000000000;

%----- kp=k0+4/3 (m0)
kp=(p1*k1)+(p2*k2)+((4/3)*(p1*m1)+(p2*m2));% Bien

```

```

%-----k1=p2 (k1-k2)
kr1=p2*(k1-k2);
%-----k2=-p1 (k1-k2)
kr2=-p1*(k1-k2);
KK=(( (p1*k1) / (1+ (p2*(k1-k2)) / (kp))) + (p2*k2) / (1- (p1*(k1-
k2)) / (kp)))) / ((p1) / (1+ (p2*(k1-k2)) / (kp))) + (p2) / (1- (p1*(k1-
k2)) / (kp)));
disp('modulo volumétrico')
disp(KK)
disp(KK/1000000000)

%Función corte_efectivo

function modulo_corte=corte_efectivo(P1,P2,K1,K2,M1,M2)

format longG
p1=P1; p2=P2; m1=M1; m2=M2; k1=K1;k2=K2;

k1=k1*1000000000;
k2=k2*1000000000;
m1=m1*1000000000;
m2=m2*1000000000;

%----- mp=(5m0*(3k0+4m0)) / (6*(ko+2mo))
m0=(p1*m1)+(p2*m2); % Bien
k0=(p1*k1)+(p2*k2);
mpnum=(5*m0)*( (3*k0)+(4*m0));
mpden=6*(k0+(2*m0));
mp=mpnum/mpden;
disp('Modulo de corte efectivo')
%----- mr1, mr2 -----
mr1=p2*(m1-m2);
mr2=-p1*(m1-m2);
Mnum=( (p1*m1) / (1+(mr1/mp))) + (p2*m2) / (1-(mr2/mp)));
Mden=( (p1) / (1+(mr1/mp))) + (p2) / (1-(mr2/mp)));
MM=Mnum/Mden;
disp(MM/1000000000);disp('Gpa')

% Función volumetrico_tres_efectivo

function
modulo_volumetrico_tres=volumetrico_tres_efectivo(P1,P2,P3,K1,K2,K3,M1,M2
,M3)

disp('-----')
disp('Los datos de entrada son:')
disp('-----')
fprintf('\n')
format longG
name='%'; p1=P1; p2=P2; p3=P3; m1=M1; m2=M2; m3=M3; k1=K1; k2=K2;
k3=K3;
str=sprintf('mineral 1=%s%d // modulo corte 1=%d GP // modulo
volumetrico 1=%d GP', name, p1, m1, k1);

```

```

disp(str);
str=sprintf('mineral 2=%s%d // modulo corte 2=%d GP // modulo
volumetrico 2=%d GP', name, p2, m2, k2);
disp(str);
str=sprintf('mineral 3=%s%d // modulo corte 3=%d GP // modulo
volumetrico 3=%d GP', name, p3, m3, k3);
disp(str);
disp('-----')
disp('-----')
disp('-----')

%----- kp=k0+4/3(m0)
kp=(p1*k1)+(p2*k2)+(p3*k3)+((4/3)*((p1*m1)+(p2*m2)+(p3*m3))); % Bien
%-----k1=p2(k1-k2)
kr1=(p2*(k1-k2)+(p3*(k1-k3)));
%disp(kr1/1000000000)
%-----k2=-p1(k1-k2)
kr2=(p1*(k2-k1)+(p3*(k2-k3)));
% disp(kr2/1000000000)
kr3=k3-k2-(p3*(k3-k2))-(p1*(k1-k2));

KK=(( (p1*k1)/(1+(kr1/kp)))+( (p2*k2)/(1+(kr2/kp)))+( (p3*k3)/(1+(kr3/kp)) ))
/(( (p1)/(1+(kr1/kp)))+( (p2)/(1+(kr2/kp)))+( (p3)/(1+(kr3/kp)) ));
disp('modulo volumétrico efectivo')
disp(KK)

% Funcion corte_tres_efectivo

function
modulo_corte_tres=corte_tres_efectivo(P1,P2,P3,K1,K2,K3,M1,M2,M3)

format longG
p1=P1; p2=P2; p3=P3; m1=M1; m2=M2; m3=M3; k1=K1;k2=K2; k3=K3;

%----- mp=(5m0*(3k0+4m0))/(6*(ko+2mo))
m0=(p1*m1)+(p2*m2)+(p3*m3); % Bien
k0=(p1*k1)+(p2*k2)+(p3*k3);
mpnum=(5*m0)*((3*k0)+(4*m0));
mpden=6*(k0+(2*m0));
mp=mpnum/mpden;
disp('Modulo de corte efectivo')
%----- mr1, mr2 -----
mr1=(p2*(m1-m2)+(p3*(m1-m3)));
mr2=(p1*(m2-m1)+(p3*(m2-m3)));
mr3=(p1*(m3-m1)+(p2*(m3-m2)));

Mnum=((p1*m1)/(1+(mr1/mp)))+( (p2*m2)/(1+(mr2/mp)))+( (p3*m3)/(1+(mr3/mp)) )
;
Mden=((p1)/(1+(mr1/mp)))+( (p2)/(1+(mr2/mp)))+( (p3)/(1+(mr3/mp)) );
MM=Mnum/Mden;
disp(MM);disp('Gpa')

% Función volumetrico_cuatro_efectivo

```

```

function
modulo_volumetrico_cuatro=volumetrico_cuatro_efectivo(P1,P2,P3,P4,K1,K2,K
3,K4,M1,M2,M3,M4)

    disp('-----')
    disp('Los datos de entrada son:')
    disp('-----')
    fprintf('\n')
    format longG
    name='%'; p1=P1; p2=P2; p3=P3; p4=P4; m1=M1; m2=M2; m3=M3; m4=M4;
k1=K1; k2=K2; k3=K3; k4=K4;
    str=sprintf('mineral 1=%s%d // modulo corte 1=%d GP // modulo
volumetrico 1=%d GP', name, p1, m1, k1);
    disp(str);
    str=sprintf('mineral 2=%s%d // modulo corte 2=%d GP // modulo
volumetrico 2=%d GP', name, p2, m2, k2);
    disp(str);
    str=sprintf('mineral 3=%s%d // modulo corte 3=%d GP // modulo
volumetrico 3=%d GP', name, p3, m3, k3);
    disp(str);
    str=sprintf('mineral 4=%s%d // modulo corte 4=%d GP // modulo
volumetrico 4=%d GP', name, p4, m4, k4);
    disp(str);
    disp('-----')
    disp('-----')

    %----- kp=k0+4/3 (m0)

kp=(p1*k1)+(p2*k2)+(p3*k3)+(p4*k4)+((4/3)*((p1*m1)+(p2*m2)+(p3*m3)+(p4*m4
)));;% Bien
    %-----k1=p2 (k1-k2)
    kr1=(p2*(k1-k2))+(p3*(k1-k3))+(p4*(k1-k3));

    %-----k2=-p1 (k1-k2)
    kr2=(p1*(k2-k1))+(p3*(k2-k3))+(p4*(k2-k4));
    kr3=(p1*(k3-k1))+(p2*(k3-k2))+(p4*(k3-k4));
    kr4=(p1*(k4-k1))+(p2*(k4-k2))+(p3*(k4-k3));

KK=(( (p1*k1) / (1+(kr1/kp))) + ( (p2*k2) / (1+(kr2/kp))) + ( (p3*k3) / (1+(kr3/kp))) +
( (p4*k4) / (1+(kr4/kp))) ) / ( (p1) / (1+(kr1/kp))) + ( (p2) / (1+(kr2/kp))) + ( (p3) / (1
+(kr3/kp))) + ( (p4) / (1+(kr4/kp))) );
    disp('modulo volumétrico efectivo')
    disp(KK)

%Función corte_cuatro_efectivo

```

```

function
modulo_corte_cuatro=corte_cuatro_efectivo(P1,P2,P3,P4,K1,K2,K3,K4,M1,M2,M
3,M4)

format longG
    p1=P1; p2=P2; p3=P3; p4=P4; m1=M1; m2=M2; m3=M3; m4=M4; k1=K1; k2=K2;
k3=K3; k4=K4;

    %----- mp=(5m0*(3k0+4m0))/(6*(k0+2m0))
    m0=(p1*m1)+(p2*m2)+(p3*m3)+(p4*m4);
k0=(p1*k1)+(p2*k2)+(p3*k3)+(p4*k4);
    mpnum=(5*m0)*((3*k0)+(4*m0));
    mpden=6*(k0+(2*m0));
mp=mpnum/mpden;
disp('Modulo de corte efectivo')
%----- mr1, mr2 -----
    mr1=(p2*(m1-m2)+(p3*(m1-m3)+(p4*(m1-m4)));
    mr2=(p1*(m2-m1)+(p3*(m2-m3)+(p4*(m2-m4)));
    mr3=(p1*(m3-m1)+(p2*(m3-m2)+(p4*(m3-m4)));
    mr4=(p1*(m4-m1)+(p2*(m4-m2)+(p3*(m4-m3)));

Mnum=((p1*m1)/(1+(mr1/mp)))+(p2*m2)/(1+(mr2/mp))+(p3*m3)/(1+(mr3/mp))
+(p4*m4)/(1+(mr4/mp));

Mden=((p1)/(1+(mr1/mp)))+(p2)/(1+(mr2/mp))+(p3)/(1+(mr3/mp))+(p4)/(1
+(mr4/mp));
MM=Mnum/Mden;
    disp(MM);disp('Gpa')

% Tabla de módulos elásticos, densidades, velocidades y razón de Poisson
% Función tabla_modulos

% Función tabla_modulos

function ans_tabla=tabla_modulos(a)

%Recolecta información de la pantalla
scrsz=get(0,'screensize');

%Establece la figura de ventana
fig=figure;
set(fig,'Position',[scrsz(3)/2 (scrsz(4)/2-225) 700 500],'Name','
Tabla de modulos elasticos, densidades, velocidades y razon de
Poisson','windowstyle','modal');
set(gcf,'menubar','none','numbertitle','off','resize','off','color',[0.92
5 0.914 0.847]);
%set an information text

```

MÓDULOS ELÁSTICOS EFECTIVOS EN FUNCIÓN DE LOS MINERALES CON DATOS DE REGISTROS DE POZO Y CUBO DE VELOCIDADES

```

uicontrol(gcf,'style','text','position',[20 230 650 258],...
    'backgroundcolor',[0.925 0.914 0.847],'foregroundcolor',[0
0 1],...
    'string',...
    {...
    '
Density          Vp          Bulk          Shear
(g/cc)          (Km/s)      modulus      Pisson.'...
                (Km/s)      modulus      modulus
                (Km/s)      Ratio'...
    '
    '...
    'CLAYS'...
    '...
    'Kaolinite          1.5          1.4
    1.58          1.44          0.93          0.14'...
    'Gulf Clays          25          9
    2.55          3.81          1.88          0.34'...
    '(Han)'...
    'Gulf Clays          21          7
    2.6          3.41          1.64          0.35'...
    '(Tosaya)'...
    'Mixed Clays
    3.41          1.63'...
    '...
    'CARBONATES'...
    '...
    'Calcite          76.8          32
    2.71          6.64          3.44          0.32'...
    'Dolomite          94.9          45.6
    2.87          7.34          3.96          0.30'...
    '...
    'CUAMATZI'},'fontsize',10,'horizontalalignment','left');

```