

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**GENERACIÓN DE MAPAS DE ILUMINACIÓN SÍSMICA
EN MODELOS DE VELOCIDADES TRIDIMENSIONALES
A PARTIR DE UN TRAZADOR DE RAYOS DE DOS
PUNTOS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
por el Br. Bryson Rosales José Manuel

Caracas, junio de 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GENERACIÓN DE MAPAS DE ILUMINACIÓN SÍSMICA EN MODELOS DE VELOCIDADES TRIDIMENSIONALES A PARTIR DE UN TRAZADOR DE RAYOS DE DOS PUNTOS

Tutor académico: Ing. José M. Cavada

Tutor Industrial: Ing. Jhonny Calderón

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
por el Br. Bryson Rosales José Manuel

Caracas, junio de 2006

Caracas, 30 de noviembre de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Bryson R. José M. titulado:

**GENERACIÓN DE MAPAS DE ILUMINACIÓN SÍSMICA
EN MODELOS DE VELOCIDADES TRIDIMENSIONALES
A PARTIR DE UN TRAZADOR DE RAYOS DE DOS
PUNTOS**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. (nombre y apellido)

Prof. (nombre y apellido)

Jurado

Jurado

Ing. José M. Cavada

Ing. Jhonny Calderón

Tutor Académico

Tutor Industrial

DEDICATORIA

A mi bella hija Grace Alejandra

AGRADECIMIENTOS

Ante todo le doy gracias a Dios por una nueva oportunidad de vida para cumplir las metas anheladas desde siempre.

A la Universidad Central de Venezuela por haberme brindado la oportunidad de tomar conocimientos que me han permitido desenvolvimiento y crecimiento como persona.

A los tutores de éste trabajo Ing. Jhonny Calderón e Ing. José Manuel Cavada por su apoyo incondicional y amistad brindada.

A PDVSA-Intevep por la oportunidad de haber realizado este trabajo bajo su tutela, en especial a Lic. José Ricardo Plata, Ing. Asdrubal Ovalles, Ing. Juan Roomer, Ing. Raul Cova y demás miembros del CPDG por su valiosa colaboración y amistad.

A Ph.d. Andrey Ortega por su valiosa colaboración y disposición en la realización de este trabajo.

A mis padres Marbella y José Manuel, su apoyo ha sido incondicional, así como, a mis hermanos y familiares, porque todos ustedes son los responsables del logro de haber culminado esta etapa de la vida.

A Luisa Alejandra, en realidad, en estas líneas no se puede expresar lo grande y especial que has sido en mi vida. Gracias.

A Guillermo y Luisa Cristina, por el apoyo, la colaboración y la confianza prestada por todos estos años.

Al famoso grupo 5 Daniela, Werner, Daniel y Rafael, así como a todos los que integramos el Campo 2002, cumplir la tarea con uds. fue un placer.

A los compañeros de sala en Intevep en especial a Tatiana Rodriguez y Veronica Carmona, por su incondicional colaboración y amistad.

A mis amigos y sus familias. Javier y Julio Valls, Jarrizon Laguado, Hendrik Nieto, Juan Carlos Garcia, Gabriel Requena, y todos los que han estado conmigo en todos estos años.

Porque en la aventura de escalar hasta esta meta, ha sido junto a su compañía. A todos Gracias.

Bryson R., José M.

**GENERACIÓN DE MAPAS DE ILUMINACIÓN SÍSMICA
EN MODELOS DE VELOCIDADES TRIDIMENSIONALES
A PARTIR DE UN TRAZADOR DE RAYOS DE DOS
PUNTOS**

**Tutor Académico: Ing. José M. Cavada. Tutor Industrial: Ing. Jhonny
Calderón. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Geología, Minas y Geofísica. 2006, 73 p.**

Palabras Claves:

Modelado sísmico, rayo sísmico, trazado de rayo, mapas de iluminación sísmica

RESUMEN

El modelado sísmico es una técnica que permite simular la propagación de las ondas en el subsuelo. Uno de los métodos para realizar modelado es el trazado de rayos, el cual toma el punto máximo del frente de onda para formar una línea que contiene las características de comportamiento de la onda conocida como rayo sísmico. La herramienta para trazado de rayos que se utilizó, modela todas las posibles trayectorias que hay entre una fuente y un receptor. Sin embargo, no es capaz de identificar ni visualizar rayos de tiempo mínimo de recorrido, a fin que sea capaz de hacerlo se realizaron algoritmos de complementación que permiten obtener dichos rayos a partir de los datos suministrados por el trazador.

Por otro lado, generalmente los estratos en el subsuelo, son modelados bajo condiciones emitidas por estructuras geológicas, por lo que se requieren herramientas que permitan el más óptimo manejo de los datos, a fin de, realizar observaciones y representaciones de interfases para resolver problemas en la iluminación de zonas de interés.

La estrategia consistió en tomar los datos de superficies de interfases en modelos de velocidades para representarlos en visualización 3D, que permitió tener una mayor manipulación y observación en las estructuras. A su vez, por medio de los conceptos emitidos por la ley de Snell de reflexión y el principio de Fermat, se determinó y visualizó rayos que representan frentes de onda de tiempo mínimo. Combinando la representación de interfases en 3D con los rayos de tiempo mínimo, se realizó una herramienta de programa que permite obtener mapas de iluminación sísmica en modelos de velocidades tridimensionales e isotrópicos.

INDICE GENERAL

| | Pagina |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. 1. Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1. 2. Objetivo general | 4 |
| 1. 2. 1. Objetivos específicos | 4 |
| 1. 3. Justificación | 4 |
| MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2. 1. Introducción | 6 |
| 2. 2. Concepto de onda | 6 |
| 2. 3. Tipos de onda..... | 7 |
| 2. 3. 1. Ondas de compresión | 7 |
| 2. 3. 2. Ondas de cizallamiento | 7 |
| 2. 3. 3. Ondas superficiales | 8 |
| 2. 3. 3. 1. Ondas Love | 8 |
| 2. 3. 3. 2. Ondas Rayleigh..... | 8 |
| 2. 4. Ecuación de onda | 9 |
| 2. 5. Principio de propagación de onda | 10 |
| 2. 6. Ley de Snell..... | 11 |
| 2. 7. Principio de Fermat | 14 |
| 2. 8. Vector gradiente..... | 17 |

| | |
|---|---------------|
| 2. 8. 1. Plano tangente y recta normal a una superficie..... | 17 |
| 2. 9. Modelado sísmico | 22 |
| 2. 10. Trazado de rayos | 22 |
| 2. 11. Aspectos básicos de adquisición de datos sísmicos..... | 24 |
| 2. 11. 1. Línea fuente..... | 25 |
| 2. 11. 2. Línea receptora..... | 25 |
| 2. 11. 3. Dirección Línea y Traza (In-line y Cross-line)..... | 25 |
| 2. 11. 4. Plantilla (Template)..... | 26 |
| 2. 11. 5. Path (pista) | 26 |
| 2. 11. 6. Celda unitaria (Box)..... | 27 |
| 2. 11. 7. CMP bin | 28 |
| 2. 11. 8. Super bin | 28 |
| 2. 11. 9. Punto medio (Midpoint)..... | 28 |
| 2. 11. 10. Cobertura (fold)..... | 29 |
| 2. 11. 11. Apertura de migración..... | 29 |
| METODOLOGÍA | 30 |
| 3. 1. Introducción | 30 |
| 3. 2. Método..... | 30 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 36 |
| 4. 1. Introducción | 36 |
| 4. 2. Resultados de identificación en modelos de velocidad..... | 36 |
| 4. 3. Resultados generales de rayos de tiempo mínimo de recorrido..... | 38 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 53 |

| | |
|--|-----------|
| Conclusiones | 53 |
| Recomendaciones | 55 |
| BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS | 56 |
| APÉNDICE A | 59 |
| Programa para identificación de interfases de velocidad..... | 59 |
| APÉNDICE B | 62 |
| Programa para cálculo de vectores normales a la superficie de interfase de velocidad | 62 |
| APÉNDICE C | 64 |
| Programa para identificación de rayo de tiempo mínimo de recorrido con subrutina para ordenar los datos | 64 |
| APÉNDICE D..... | 69 |
| Programa para visualizar rayos de tiempo mínimo y mapas de iluminación sísmica | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pagina |
|---|--------|
| Figura 1. Comportamiento de las ondas compresionales (Tomado de Pereira, 2002). | 7 |
| Figura 2. Comportamiento de las ondas de cizallamiento (Tomado de Tomado de Pereira, 2002). | 7 |
| Figura 3. Comportamiento de las ondas Love (Tomado de “La investigación sismológica en Venezuela”). | 8 |
| Figura 4. Comportamiento de las ondas Rayleigh (Tomado de “La investigación sismológica en Venezuela”). | 8 |
| Figura 5. Diagrama para demostración de la Ley de Snell (Tomado de Villasuso, 2003) | 12 |
| Figura 6. Gráfico de parámetros para la explicación | 14 |
| Figura 7. Superficie elipsoidal con plano tangente y vector normal en el punto $P(x_0, y_0, z_0)$ | 18 |
| (Tomado de Maple) | 18 |
| Figura 8. Términos de medición 3D (Tomado de Corsen 2002). | 26 |
| Figura 9. Definición de Xmin (tomado de Corsen 2000) | 27 |
| Figura 10. Términos de medición 3D punto medio común (Tomado de Corsen 2002). | 28 |
| Figura 11. Conceptos de cobertura y apertura de migración. (Tomado de Corsen 2002) | 29 |
| Figura 12. Ejemplo de modelo de velocidades con sus celdas de nodos, la malla color naranja pertenece a los nodos con cambio de velocidad | 31 |
| Figura 13. Ejemplo de vectores normales a una superficie en cada nodo | 32 |
| Figura 14. Ejemplo de comportamiento de la rutina que determina los rayos de trayectoria mínima en un modelo de velocidades isotropico | 34 |
| Figura 15. Diagrama de procesos para mapas de iluminación sísmica a partir de un trazador de rayos. | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Modelo de velocidades realizado por UNIF2 y generada por XIMAGE. | 37 |
| Figura 17. Modelo de velocidades identificado por nodos y visualizado con MATLAB..... | 37 |
| Figura 18. Interfase de interés, las flechas indican el vector gradiente en cada nodo. | 38 |
| Figura 19. Modelo de velocidades con la respuesta de disparo generada por el trazador de rayos..... | 39 |
| Figura 20. Modelo de velocidades con geometría de una fuente y seis receptores, mapa de iluminación por nodos. | 40 |
| Figura 21. Modelo de velocidades con geometría de una fuente y ocho receptores colocados en una misma línea..... | 41 |
| Figura 22. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y doce receptores colocados de modo intercalado para mejor cobertura repetida en el centro. | 42 |
| Figura 23. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y doce receptores colocados de modo intercalado para cobertura de nodos comunes en el centro. | 42 |
| Figura 24. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y treinta y seis receptores colocados para mejor cobertura de nodos comunes en el centro..... | 43 |
| Figura 25. Modelo de velocidades con geometría de cinco fuentes y treinta y seis receptores para incrementar el número de nodos iluminados..... | 44 |
| Figura 26. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores..... | 45 |
| Figura 27. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores con mapa por celdas iluminadas. | 45 |
| Figura 28. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores con mapa de cobertura por celda (bin) realizado en un paquete comercial bajo los mismos parámetros que los de la fig. 27..... | 46 |
| Figura 29. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por nodos. | 47 |
| Figura 30. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por celda (bin)..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 31. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por celda (bin), realizado con un paquete comercial. | 48 |
| Figura 32. Modelo de velocidades realizado con UNIF2. | 48 |
| Figura 33. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal. | 49 |
| Figura 34. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas. | 50 |
| Figura 35. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas (vista frontal). | 51 |
| Figura 36. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas. | 51 |
| Figura 37. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación realizado en un paquete comercial. | 52 |

INTRODUCCIÓN

En la identificación de estructuras en el subsuelo, es importante la propuesta de un modelo inicial del medio en estudio, el cual será modificado posteriormente debido a la variación de las condiciones con las que se va encontrando el grupo investigador. Se vale de todas las herramientas necesarias para presentar un modelo final lo más cercano posible a la estructura geológica. Esto requiere la construcción de modelos sintéticos para evaluar diversas técnicas, entre ellas, la adquisición de datos sísmicos, donde es necesario determinar, entre otras cosas, la cobertura que presenta una geometría propuesta (Laurain and Vinje, 2001, Matzuoka and Ezaka, 1992). Por otro lado, a través del modelado se puede realizar una interpretación de los resultados para enfrentar y resolver situaciones en la etapa de planificación antes que se presenten en la etapa de adquisición de datos en campo.

En el momento que se genera un campo de ondas bajo la superficie por medio de una fuente, éstas son transmitidas y viajan por los medios que comprende el subsuelo sin retorno alguno; sin embargo, parte del frente de ondas se refleja y es conocido como la repuesta sísmica de un evento. Uno de los retos que trata el modelado sísmico es el cálculo de la respuesta para una geometría de adquisición en un modelo planteado (Suarez, 2002). El trazado de rayo es una técnica para simular la trayectoria de los frentes de onda transmitidos de una fuente a un receptor el cual se utiliza entre otras aplicaciones, para predecir la iluminación de una geometría y modificar los patrones necesarios para optimizar los resultados.

PDVSA - INTEVEP cuenta con un trazador de rayos que se aplica para el cálculo de tablas de tiempo en migración de datos sísmicos, así como herramientas para realizar modelos de velocidad sintéticos. Sin embargo, el trazador de rayos como fue creado para la aplicación descrita anteriormente no presenta la posibilidad de determinar rayos de tiempo mínimo de trayectoria; en lugar de eso, presenta todas las trayectorias de recorrido posibles en una interfase de velocidad. Por ende se toma la

información que genera el trazador de rayos y con la aplicación del Principio de Fermat y la ley de Snell de reflexión se identifican y visualizan los rayos de tiempo mínimo de recorrido. Por otra parte, Intevp presenta herramientas para construcción de modelos de velocidades sintéticos pero sin un visualizador que permita observar la imagen en tres dimensiones. Por lo que se identifican, en primera instancia, los puntos que forma la superficie de interfase en el modelo, para así generar mapas de iluminación en tres dimensiones que permitan observar los nodos y las celdas de la superficie en los cuales los rayos representan la trayectoria mínima de recorrido.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1. 1. Planteamiento del problema

En un modelo geológico es importante representar una geometría de adquisición antes de ser desarrollada en campo, por lo que se generan mapas de iluminación sísmica que permiten identificar una probable posición de la reflexión de las ondas, en este caso a través de una aproximación por trazado de rayos.

En este sentido muchas veces los mapas de iluminación sísmica se ven afectados por la complejidad geológica de los modelos de velocidades, donde no se puede llegar a distinguir claramente las interfases presentes. Por otro lado, los rayos que representan los frentes de onda deben cumplir las condiciones de tiempo mínimo descritas por el Principio de Fermat y la Ley de Snell. Las trayectorias de rayo entre fuente y receptor se obtienen mediante un algoritmo que genera tablas de tiempo para migración sísmica, el cual calcula todos los tiempos posibles entre una fuente y un receptor para una interfase definida, uno de los objetivos de este trabajo es representar el rayo de tiempo mínimo de recorrido entre un par fuente receptor de acuerdo con las leyes de reflexión.

El siguiente trabajo contiene, en una primera parte, la explicación de un algoritmo que permite visualizar las interfases en un modelo isotropo de velocidades 3D y que además calcula los valores de los vectores normales en los planos de las celdas que componen dicha interfase; en una segunda parte, se determina, entre todos los tiempos de viaje posibles en un par fuente-receptor, el tiempo mínimo de recorrido de acuerdo con el Principio de Fermat y la ley de Snell de reflexión, por último con los datos obtenidos anteriormente se generan mapas de iluminación sísmica 3D que permiten visualizar la cobertura de una distribución de fuentes y receptores en la superficie de interés.

1. 2. Objetivo general

Generar mapas de iluminación sísmica 3D utilizando un trazador de rayos de dos puntos en modelos de velocidades tridimensionales isótropos.

1. 2. 1. Objetivos específicos

- Generar un programa que permita obtener la posición exacta, de las interfases de interés presentes en un modelo de velocidades.
- Elaborar un programa que permita obtener el valor del vector normal por cada nodo que comprende la superficie de cada interfase en un modelo de velocidades.
- Generar un programa que permita determinar los rayos sísmicos que identifiquen tiempo mínimo de recorrido de un frente de onda cumpliendo las condiciones descritas en la Ley de Snell, a partir de datos en tablas de tiempo de viaje generadas por un trazador de rayos.
- Generar mapas de iluminación sísmica en 3D

1. 3. Justificación

El proyecto presenta la realización de un programa de visualización con datos suministrados por un trazador de rayos de dos puntos, que se utiliza para generar tablas de tiempo aplicadas a la migración sísmica. La idea es aprovechar los datos que presenta el algoritmo de construcción de rayos, los cuales representan la trayectoria de propagación de los frentes de onda en un modelo de velocidades, y elaborar una herramienta de software, que aplicada al los resultados obtenidos del trazador de rayos de dos puntos, permita visualizar mapas de iluminación sísmica en 3D. Por otro lado si se comprende la complejidad de los cálculos que implica la realización de un trazador de rayos, así como el tiempo en procesos de computación, se entiende que se aprovechan los datos para dos importantes aplicaciones como son: la migración sísmica y los mapas de iluminación.

La investigación presenta una fundamental importancia en la comprensión de aspectos como la teoría del rayo como representación de trayectorias de propagación de ondas y leyes de reflexión y refracción en una superficie, entre otros conceptos, que permitirá diseñar una aplicación, que será de suma ayuda en el modelado de datos sísmicos.

Los mapas de iluminación sísmica permiten visualizar las reflexiones de los frentes de ondas por medio de segmentos de recta en un modelo geológico para una geometría de adquisición previa a la toma de datos en campo, diseñando estrategias óptimas por medio de la distribución de fuentes, receptores, offset, tamaño de celda, entre otros parámetros, para lograr alcanzar de manera satisfactoria la estructura geológica de interés.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. 1. Introducción

Los mapas de iluminación sísmica permiten representar gráficamente las reflexiones de los frentes de onda, generados por una fuente a través de una herramienta de modelado como lo es el trazador de rayos. En virtud de comprender lo anterior se parte de dos maneras fundamentales para explicar la propagación de las ondas, una de ellas es el concepto del rayo de la óptica geométrica, el cual se puede definir como el vector perpendicular al plano tangente de la superficie que representa el frente de onda, en el cual se sustentan el principio de Fermat, con esto se puede explicar la trayectoria del rayo que puede verse afectada por reflexión o refracción según el medio de propagación.

Por otra parte, el otro concepto fundamental, se basa en la naturaleza propia de la onda como propagación de una perturbación, necesario para explicar, entre otras, las propiedades de difracción, interferencia, transmisión de energía y polarización.

2. 2. Concepto de onda

Una onda es una perturbación que se propaga en un medio sin involucrar el movimiento neto del material. El movimiento ondulatorio supone únicamente el transporte de energía y de cantidad de movimiento (Sheriff, 2002).

La sísmica involucra dos tipos de ondas internas: las ondas longitudinales o de compresión llamadas ondas P y las ondas transversales o de cizallamiento llamadas ondas S. Así mismo las ondas superficiales desarrollan dos tipos principales, las ondas Love (similares a las ondas transversales) y las ondas Rayleigh (ondas longitudinales elípticas retrógradas).

2. 3. Tipos de onda

2. 3. 1. Ondas de compresión

Estas ondas se caracterizan porque a su paso, el movimiento de las partículas se realiza en la misma dirección en la que ella se propaga, son también llamadas ondas primarias o irrotacionales (Sheriff, 2002).

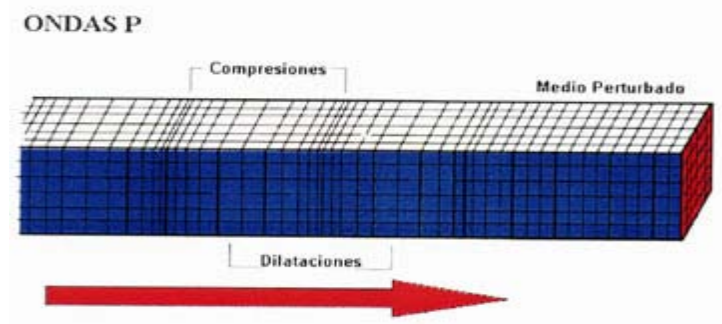


Figura 1. Comportamiento de las ondas compresionales (Tomado de Pereira, 2002).

2. 3. 2. Ondas de cizallamiento

Estas ondas se caracterizan porque a su paso en un medio isotrópico, el movimiento de las partículas se realiza en dirección ortogonal a la que ella se propaga. Son también llamadas ondas de corte o equivolumentales (Sheriff, 2002).

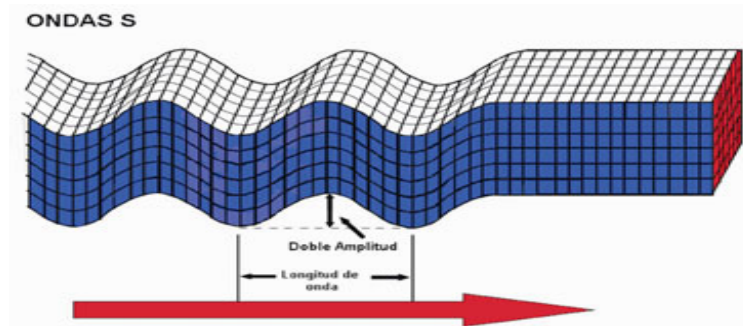


Figura 2. Comportamiento de las ondas de cizallamiento (Tomado de Tomado de Pereira, 2002).

2. 3. 3. Ondas superficiales

2. 3. 3. 1. Ondas Love

Estas ondas se propagan similar a las ondas de cizallamiento, haciendo vibrar a las partículas en planos paralelos a la superficie en sentido ortogonal a la propagación para un medio isotrópico, pero sin movimiento vertical (Sheriff, 2002).

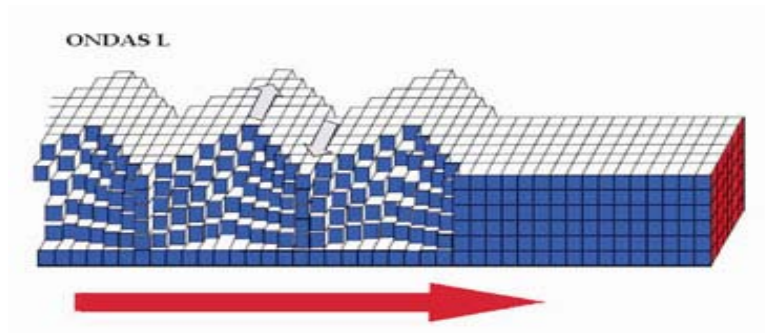


Figura 3. Comportamiento de las ondas Love (Tomado de “La investigación sismológica en Venezuela”).

2. 3. 3. 2. Ondas Rayleigh

Estas ondas se propagan haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección a la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos y verticales simultáneamente en un semiespacio homogéneo (Sheriff, 2002).

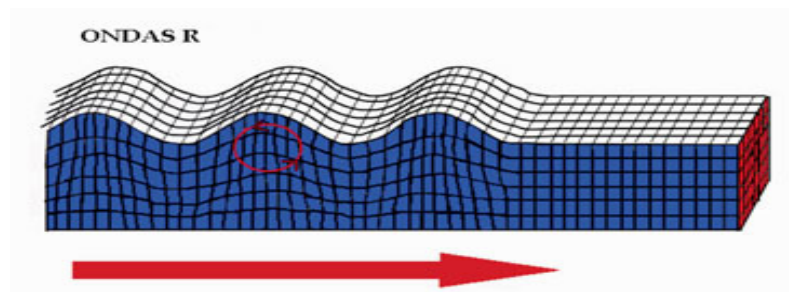


Figura 4. Comportamiento de las ondas Rayleigh (Tomado de “La investigación sismológica en Venezuela”).

2. 4. Ecuación de onda

Es una ecuación que relaciona el tiempo y el espacio dependientes de una perturbación que puede propagarse como una onda. En coordenadas rectangulares x , y , z , se define como

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{V^2} \right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

Donde ψ representa el desplazamiento de la onda (presión, rotación, dilatación, etc.) y V representa la velocidad de la onda (Sheriff, 2002).

Aster and Bilek (2003) explican que para un sistema no dispersivo (donde todas las frecuencias de excitación se propagan a una misma velocidad), la fórmula de ondas armónicas o sinusoidal de desplazamiento, viene asociada a una amplitud A , como una función espacio - tiempo y viene dada por:

$$u_y(x, t) = A \text{sen}(kx - \omega t) = A \text{sen}(kx - kct) \quad (2)$$

Donde $k=2\pi/\lambda = \omega/c$ es el número de onda para una perturbación, la longitud de onda viene dada por λ , $\omega=2\pi*f$ (frecuencia definida en ciclos/unidad de tiempo), y c que corresponde a la velocidad de fase. Se puede entonces, construir la ecuación de onda unidimensional a partir de:

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = -k^2 c^2 A \text{sen}(kx - kct) \quad (3)$$

Y

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = -k^2 A \text{sen}(kx - kct) \quad (4)$$

Así, la constante proporcional entre las dos segundas derivadas parciales es justamente c^2 , entonces:

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (5)$$

La cual es la ecuación de onda escalar unidimensional.

2.5. Principio de propagación de onda

La propagación de las ondas sísmicas viene descrita por la ecuación de la onda, esta ecuación viene derivada de la relación entre la tensión, elasticidad y las leyes de Hook y Newton. La segunda ley de Newton en una dimensión está dada por:

$$\frac{\partial}{\partial z} P = -\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} U_z \quad (6)$$

Donde P es la presión acústica, U_z representa el desplazamiento y ρ es la densidad de masa. La fórmula $F=m \cdot a$ se reconoce en esta ecuación y describe que la fuerza que actúa sobre cierta masa es proporcional a la aceleración que adquiere dicha masa. La ley de Hook se describe como:

$$\frac{\partial}{\partial z} U_z = -\kappa P \quad (7)$$

Donde κ es el factor de compresibilidad con el cual están relacionados el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y la deformación (cambio de forma o dimensión en un cuerpo). El módulo de volumen es el inverso de la compresibilidad y viene dado por:

$$k = 1 / \kappa \quad (8)$$

combinando estas ecuaciones se obtiene la ecuación de onda acústica:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P = -w(t)\delta(z) \quad (9)$$

Donde $w(t)$ es la señal de fuente y v es la velocidad de onda que a su vez se puede definir como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho\kappa}} = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (10)$$

La ecuación de onda es principalmente utilizada para modelado e inversión de ondas sísmicas. Esto nos muestra que la velocidad de la onda depende de la densidad y la compresibilidad del medio.

2. 6. Ley de Snell

Sears, et al (2004) explican que cuando un rayo que viaja en un medio se encuentra en una frontera que conduce a otro medio, parte o la totalidad del rayo incidente se refleja en el primer medio. Si se considera un rayo de luz que viaja en el aire y que incide a cierto ángulo sobre una superficie plana, los rayos incidente y reflejado forman ángulos θ_1 y θ_2 sobre una recta normal a la superficie, en este sentido hay dos condiciones si el rayo se refleja los ángulos, θ_1 y θ_2 son iguales, en cambio si el rayo entra en el segundo medio, se dice que el rayo se refracta y el ángulo de incidencia se mide bajo la siguiente relación

$$n_1 * \text{Sen}(i) = n_2 * \text{Sen}(r) \quad (11)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción al cociente entre la velocidad de la luz c en el vacío y la velocidad V del medio.

Lo descrito anteriormente se puede observar la figura 5, donde se muestran dos medios y un frente de ondas representado por un rayo perpendicular. El frente de ondas AB que avanza en el medio 1 empieza a tocar el medio 2 en el punto A , en el medio 2 se propaga más lentamente, mientras en el medio 1 en un tiempo " t " avanza una distancia BM , en el medio 2 avanza AN .

Si V_1 es la velocidad en el medio 1 y V_2 la velocidad en el medio 2

$$n_1 = \frac{c}{V_1} \quad (12)$$

$$n_2 = \frac{c}{V_2} \quad (13)$$

$$BM = V_1 * t \quad (14)$$

$$AN = V_2 * t \quad (15)$$

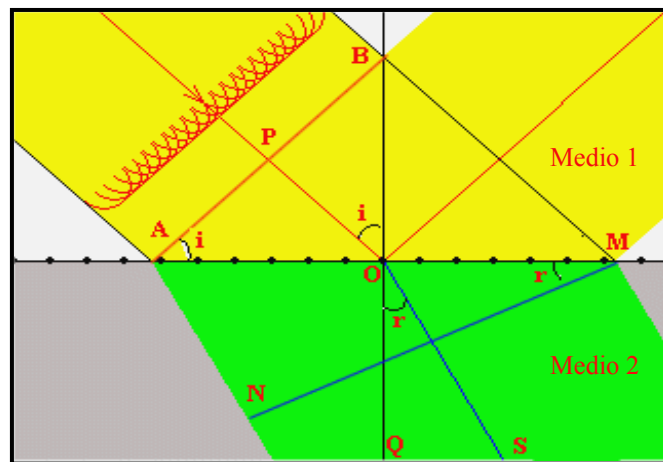


Figura 5. Diagrama para demostración de la Ley de Snell (Tomado de Villasuso, 2003)

El rayo es perpendicular al frente de las ondas y la normal es perpendicular a la superficie de separación entre los medios.

En la figura 5 se observa que el ángulo "i" (ángulo de incidencia) es igual al ángulo BMA , por tener los ángulos BMA y POB los lados perpendiculares.

El ángulo de refracción "r" es igual al ángulo AMN por tener los ángulos QOS y AMN los lados perpendiculares.

Por la definición de seno se tiene que:

$$\text{Sen}(i) = \frac{BM}{MA} \quad (16)$$

$$\text{Sen}(r) = \frac{AN}{MA} \quad (17)$$

Dividiendo $\text{Sen}(i)$ entre $\text{Sen}(r)$ se obtiene que:

$$\frac{\text{Sen}(i)}{\text{Sen}(r)} = \frac{V_1}{V_2} \quad (18)$$

$$\frac{\text{Sen}(i)}{\text{Sen}(r)} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (19)$$

Y se concluye que:

$$n_1 * \text{Sen}(i) = n_2 \text{Sen}(r) \quad (20)$$

Se debe tomar en cuenta lo siguiente para la reflexión total:

- Si $V_1 > V_2$ el ángulo $\theta_1 > \theta_2$ el rayo refractado se acerca a la normal.
- Si $V_1 < V_2$ el ángulo $\theta_1 < \theta_2$ el rayo refractado se aleja de la normal.

En el segundo caso, para un ángulo límite θ_c el ángulo de refracción es $\theta_2 = \pi/2$

$$\text{Sen}(\theta_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (21)$$

El ángulo límite es aquel ángulo incidente para el cual el rayo refractado emerge tangente a la superficie de interfase entre los dos medios. Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, el seno del ángulo de refracción resulta mayor que la unidad. Esto indica, que las ondas que inciden con un ángulo mayor que el límite no

pasan al segundo medio, sino que son reflejados totalmente en la superficie de separación (Villasuso, 2003)

$$\frac{\text{Sen}(i)}{\text{Sen}(r)} = \frac{\frac{BM}{MA}}{\frac{AN}{MA}} = \frac{BM}{AN} = \frac{V_1 * t}{V_2 * t} \quad (22)$$

2.7. Principio de Fermat

En 1658 Fermat fue más allá de la descripción del fenómeno y dio una explicación de la ley de la reflexión y la refracción, es decir, la dedujo de otra más básica que no puede ser demostrada por lo cual se le llama “principio”

“La trayectoria de un rayo que va de un punto a otro es la correspondiente al tiempo mínimo”.

Villasuso (2003) explica lo anterior a partir del gráfico de la figura 2, el cual nos va a indicar los parámetros para dar una explicación matemática del Principio.

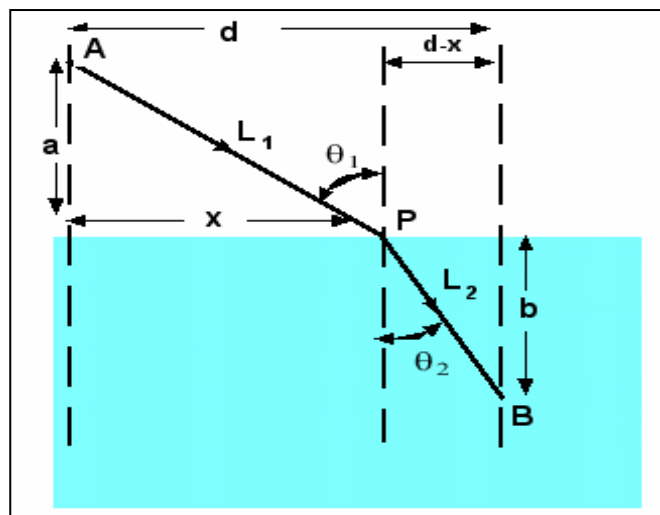


Figura 6. Gráfico de parámetros para la explicación matemática del Principio de Fermat (tomado de Villasuso, 2003)

El medio superior tiene de índice de refracción n_1 y el otro medio n_2 . La velocidad de la luz es c y la velocidad en cada medio V_1 y V_2

$$n_1 = \frac{c}{V_1} \quad (23)$$

$$n_2 = \frac{c}{V_2} \quad (24)$$

L_1 es la distancia recorrida en el medio 1 y L_2 la recorrida en el medio 2. El tiempo que tarda el rayo en recorrer el camino total AB es t

$$t = \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2} = \frac{L_1}{\frac{c}{n_1}} + \frac{L_2}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_1 * L_1}{c} + \frac{n_2 * L_2}{c} \quad (25)$$

Cuando el rayo va por el camino en que se encuentra el punto P el camino recorrido será mínimo y por el teorema de Pitágoras sabemos que las distancias L_1 y L_2 tomarán los siguientes valores:

$$L_1^2 = a^2 + x^2 \quad (26)$$

$$L_2^2 = b^2 + (d - x)^2 \quad (27)$$

La derivada del tiempo con respecto a la distancia debe ser cero para el mínimo de la función tiempo en relación con la distancia. De todos los caminos posibles, el elegido por el rayo, tanto en la reflexión como en la refracción, será aquel en el que emplea un tiempo mínimo.

Por lo tanto:

$$\frac{dt}{dx} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \left(n_1 * \frac{dL_1}{dt} + n_2 * \frac{dL_2}{dt} \right) \quad (29)$$

Sustituyendo los valores de L_1 y L_2 y derivando la función se tiene que:

$$2L_1 \frac{dL_1}{dx} = 2x \quad (30)$$

$$2L_2 \frac{dL_2}{dx} = 2(d-x)(-1) \quad (31)$$

Resultando su derivada con valor x/L_1 que es justamente el seno del ángulo:

$$\frac{dL_1}{dx} = \text{Sen}(\theta_1) \quad (32)$$

$$\frac{dL_2}{dx} = -\frac{d-x}{L_2} = -\text{Sen}(\theta_1) \quad (33)$$

$$n_1 \frac{dL_1}{dt} + n_2 \frac{dL_2}{dt} = 0 \quad (34)$$

Para llegar a la siguiente ecuación

$$n_1 * \text{Sen}(\theta_1) + n_2 * (-\text{Sen}(\theta_2)) = 0 \quad (35)$$

$$n_1 * \text{Sen}(\theta_1) = n_2 * \text{Sen}(\theta_2) \quad (36)$$

Esto demuestra que el rayo, cuando va de un lugar a otro, e incluso cuando cambia de medio, siempre va por el camino donde emplea menos tiempo, incidiendo y saliendo con los ángulos descritos por la ley de Snell.

2. 8. Vector gradiente

Dada una función de n variables, su vector gradiente es el vector formado por las n derivadas parciales primeras. A todo punto del plano se le puede asociar un vector gradiente evaluando las derivadas parciales en dicho punto, de esta forma se construye lo que se conoce como campo gradiente, que no es más que el conjunto de puntos del plano con sus respectivos vectores gradientes asociados (Thomas y Finney, 1999).

Matsuoka y Ezaka (1992) plantean que el vector gradiente tiene dos importantes propiedades que le hacen muy útil en el método de resolución geométrica:

- Una primera propiedad es que en cada punto indica la dirección de crecimiento de la función.
- La segunda propiedad es que siempre en cada punto es ortogonal a las curvas de nivel. Lo que significa que dicho vector forma un ángulo de 90 grados con las rectas tangentes de las curvas de nivel

$$\text{grad } z = \nabla z = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (37)$$

El gradiente indica el sentido de crecimiento más rápido de una función en un punto dado. La derivada direccional tiene su valor máximo en el sentido del gradiente y coincide con su módulo:

$$\left(\frac{\partial z}{\partial \vec{V}} \right)_{max} = |\text{grad } z| = \sqrt{(z_x)^2 + (z_y)^2} \quad (38)$$

2. 8. 1. Plano tangente y recta normal a una superficie

El plano tangente en un punto $P(x_0, y_0, z_0)$ sobre una superficie $f(x, y, z)$ es el plano que pasa por el punto P normal al gradiente de la superficie en el punto P .

La recta normal en un punto $P(x_0, y_0, z_0)$ sobre una superficie $f(x, y, z)$ es la recta que pasa por el punto P paralela al gradiente de la superficie en el punto P . (Thomas, 1999)

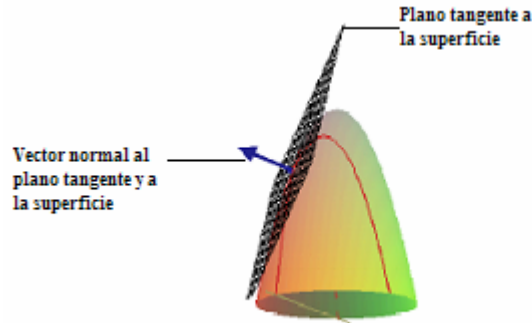


Figura 7. Superficie elipsoidal con plano tangente y vector normal en el punto $P(x_0, y_0, z_0)$
(Tomado de Maple)

Para encontrar una ecuación para el plano tangente y la recta normal a una superficie $z = f(x, y)$ en un punto $P(x_0, y_0, z_0)$ donde $z_0 = f(x_0, y_0)$, primero se observa que la ecuación $z = f(x, y)$ es equivalente a $f(x, y) - z = 0$. La superficie $z = f(x, y)$ es por tanto la superficie de nivel cero de la función $F(x, y, z) = f(x, y) - z$. Las derivadas parciales de F son:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x}(f(x, y) - z) = f_x - 0 = f_x \quad (39)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y}(f(x, y) - z) = f_y - 0 = f_y \quad (40)$$

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z}(f(x, y) - z) = 0 - 1 = -1 \quad (41)$$

la fórmula:

$$F_x(P)(x - x_0) + F_y(P)(y - y_0) + F_z(P)(z - z_0) = 0 \quad (42)$$

para el plano tangente a la superficie de nivel P se reduce por lo tanto a (Thomas and Finney, 1999)

$$f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0) - (z - z_0) = 0 \quad (43)$$

si se ordena la ecuación entonces:

$$(z - z_0) = f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0) \quad (44)$$

La ecuación de la recta normal será:

$$\frac{(x - x_0)}{f_x(x_0, y_0)} = \frac{(y - y_0)}{f_y(x_0, y_0)} = -(z - z_0) \quad (45)$$

Por otra parte Ojeda (1993) explica un modo de obtener un vector ortogonal a otros dos vectores por medio de su producto vectorial el cual es el principio aplicado para el caso de encontrar los vectores ortogonales a una superficie compuesta por un mallado irregular en cada uno de los puntos que la comprenden.

Sean a y b dos vectores no paralelos, con representación en componentes

$$a = a_1i + a_2j + a_3k \quad (46)$$

$$b = b_1i + b_2j + b_3k \quad (47)$$

el objetivo es encontrar los valores de p_1, p_2, p_3 tales que:

$$a \times b = p_1i + p_2j + p_3k \quad (48)$$

el vector $a \times b$ es perpendicular a ambos vectores, entonces:

$$(a \times b) \cdot a = p_1a_1 + p_2a_2 + p_3a_3 = 0 \quad (49)$$

$$(a \times b) \cdot b = p_1 b_1 + p_2 b_2 + p_3 b_3 = 0 \quad (50)$$

este sistema por si solo tiene muchas soluciones:

$$p_1 a_1 + p_2 a_2 + p_3 a_3 = 0 \quad (51)$$

$$p_1 b_1 + p_2 b_2 + p_3 b_3 = 0 \quad (52)$$

las infinitas soluciones al sistema anterior vienen dadas por:

$$p_1 = \frac{(a_2 b_3 - a_3 b_2) p_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (53)$$

$$p_2 = \frac{(a_3 b_1 - a_1 b_3) p_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (54)$$

estas soluciones se pueden escribir de manera simétrica como:

$$\frac{p_1}{a_2 b_3 - a_3 b_2} = \frac{p_2}{a_3 b_1 - a_1 b_3} = \frac{p_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = \lambda \quad (55)$$

siendo λ la constante por hallar, se necesita la condición de la magnitud del producto vectorial:

$$|a \times b|^2 = |a|^2 |b|^2 \sin^2 \theta = |a|^2 |b|^2 - |a|^2 |b|^2 \cos^2 \theta \quad (56)$$

$$|a \times b|^2 = |a|^2 |b|^2 - (a \cdot b)^2 \quad (57)$$

esta ecuación traducida a sus componentes será:

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - (a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3)^2 \quad (58)$$

y de la ecuación anterior se tiene que:

$$\frac{p_1}{a_2b_3 - a_3b_2} = \frac{p_2}{a_3b_1 - a_1b_3} = \frac{p_3}{a_1b_2 - a_2b_1} = \lambda \quad (59)$$

con lo que podemos obtener:

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = \lambda^2 \left[(a_2b_3 - a_3b_2)^2 + (a_3b_1 - a_1b_3)^2 + (a_1b_2 - a_2b_1)^2 \right] \quad (60)$$

y anteriormente se observaba que:

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - (a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3)^2 \quad (61)$$

Desarrollando estas igualdades se obtiene que $\lambda^2 = 1$ con lo que se puede concluir que $\lambda = 1$ se corresponde a un sistema de orientación positiva y $\lambda = -1$ corresponde a un sistema de orientación negativa.

Para $\lambda = 1$ se tiene que:

$$\frac{p_1}{a_2b_3 - a_3b_2} = \frac{p_2}{a_3b_1 - a_1b_3} = \frac{p_3}{a_1b_2 - a_2b_1} = 1 \quad (62)$$

con lo que se puede calcular los valores de p_1, p_2 y p_3

$$p_1 = a_2b_3 - a_3b_2 \quad (63)$$

$$p_2 = a_3b_1 - a_1b_3 \quad (64)$$

$$p_3 = a_1b_2 - a_2b_1 \quad (65)$$

Y se concluye que:

$$a \times b = (a_2b_3 - a_3b_2)i + (a_3b_1 - a_1b_3)j + (a_1b_2 - a_2b_1)k \quad (66)$$

2. 9. Modelado sísmico

El modelado sísmico es una técnica que permite simular la propagación de ondas en la tierra. Carcione and Hermat (2002) explican que el objetivo es predecir el sismograma que se obtendrá a partir de una geometría de adquisición suponiendo una posible estructura del subsuelo. Los modelos pueden ser elaborados con problemas de estratigrafía o de estructuras geológicas que permiten generar herramientas para un mejor desempeño en las distintas fases del manejo de los datos sísmicos.

Suarez (2002) explica que a través del modelado sísmico es posible realizar observación, representación y forma de las estructuras en estudio, para que por medio de la experiencia del operador se pueda resolver una situación planteada. Por otro lado permite mejorar, entre otros, los métodos sísmicos de reflexión, cuando su capacidad se ve limitada por estructuras con altos contrastes de velocidad, debido a la presencia de estructuras como cadenas de fallas, plegamientos o capas con altos buzamientos, dando como resultado una mejor imagen para ser interpretada.

2. 10. Trazado de rayos

Es un método de modelado sísmico que se utiliza para el estudio de propagación de las ondas desde una fuente hasta un receptor, se aplica en la localización y estudio de estructuras determinando las trayectorias del rayo a través del modelo donde existen variaciones de velocidad (Sheriff, 2002). Para Arroyo et al (2003) el trazado de rayos en tres dimensiones permite a quienes planifican un levantamiento, visualizar los efectos de otros obstáculos y evaluar una solución simplificada unidimensional (1D) o bidimensional (2D), para resolver un determinado problema de sísmica de pozo o la necesidad de adquisición de un perfil sísmico completo en determinado modelo.

El trazado de rayos se basa en que el rayo es una trayectoria, que contiene la dirección de la propagación de la onda. El principio de Fermat gobierna la geometría

de la trayectoria (Yang, 2003). En computación gráfica el concepto de trazado de rayo es: "una técnica para crear imágenes realistas bajo el cálculo de trayectorias, tomando por entrada de rayo de luz el ojo del observador en distintos ángulos"(dic). En la Sismología, el trazado de rayos se basa en el concepto de energía sísmica de alta frecuencia seguido de la trayectoria determinada por las ecuaciones de trazado de rayo. Físicamente, estas ecuaciones describen cuanta energía continúa en la misma dirección hasta ser refractada debido a variaciones de velocidad (Vidale, 1988).

Con éste método se pueden calcular los tiempos de llegada de las reflexiones de trazas en punto común de reflexión en cada uno de los puntos de control del modelo. Para cada colección de trazas, el tiempo de llegada real del reflector más somero se compara con los tiempos de llegada estimados y se utiliza la velocidad que mejor nivela los tiempos de llegada reales para la actualización del modelo (Albertin, 2002).

Entre otros se destacan dos métodos posibles para el estudio del trazado de rayos; por una parte se tiene el método de disparo (shooting method) el cual se fundamenta en la utilización de la ecuación del rayo, muchas veces tomada del principio de Fermat. Se basa en tener un punto de partida o emisor y un punto de llegada o receptor, se selecciona un conjunto de ángulos de partida posibles para el rayo y se utiliza la ecuación del rayo para determinar las trayectorias en cada uno de los ángulos posibles hasta llegar al receptor o una cercanía permitida a él (Vernaes, 2002).

Yang (2003) explica que el método de doblamiento (bending method), también basado en el principio de Fermat, realiza un arreglo entre los dos puntos (emisor y receptor), toma una trayectoria estimada entre ellos y la perturba hasta satisfacer un criterio mínimo de tiempo de viaje del rayo. Clarke and Jannaud (1994) comentan que una de las dificultades de este método es obtener la trayectoria inicial; sin embargo, por lo general se toma una línea desde la fuente al punto reflector y otra línea desde el reflector hacia el receptor para dar inicio a las perturbaciones necesarias que describirán la trayectoria final.

Um and Thurber (1987) plantean y explican un método eficiente en tiempo de cálculo, con el que realizan un trazador de rayos, donde una suposición de la trayectoria se perturba, para satisfacer directamente el principio de Fermat de tiempo estacionario, se utiliza una ecuación analítica de minimización por segmentos para calcular la perturbación, explotando las propiedades de curvatura de trayectoria.

A su vez Um and Thurber explican que el esquema de perturbación de tres puntos se extiende sucesivamente por todo los puntos a lo largo de la trayectoria. El método se basa en que los puntos se buscan simultáneamente desde dos puntos extremos hacia el punto medio de la trayectoria. Este procedimiento es adoptado e iterativamente ejecutado hasta que converge el tiempo de viaje de la trayectoria.

De ésta manera se obtiene un trazador de rayos de dos puntos basado en un procesamiento aproximado de perturbaciones de trayectoria capaz de encontrar tiempos de viaje y trayectorias correctas en modelos con variación de velocidad.

2. 11. Aspectos básicos de adquisición de datos sísmicos

La adquisición de datos sísmicos se puede definir como la generación y grabado de ondas sísmicas con fines de estudios del subsuelo. Por medio de una configuración fuentes y receptores, las ondas viajan por los distintos estratos, las cuales son grabadas por los receptores permitiendo generar una aproximación de la posición de los estratos para estudios geocientíficos.

En el ciclo de vida económico de un reservorio de hidrocarburo, los costos asociados con la adquisición de datos sísmicos son parte importante en un proyecto y los resultados previos de los costos pueden observarse de manera inmediata. Esto muchas veces genera presión para reducir gastos generados por la adquisición sísmica. Schneider (1990) comenta que en la mayoría de las áreas son muchos los beneficios de un levantamiento 3D, pero que hay algunas zonas donde un levantamiento 2D bien

realizado puede mostrar muy buena información. A continuación se realizará una definición de conceptos necesarios en la adquisición de datos sísmicos 3D.

2. 11. 1. Línea fuente

Se define como la línea a lo largo de la cual se colocan los puntos fuente de manera regular con una separación, por lo general, dos veces la dimensión del bin en la dirección normal a las líneas de receptores (figura 8). Con esto se asegura que cada fuente estará asociado a un punto medio sin incluir los de su fuente previa en la línea. La distancia entre las líneas es llamada intervalo entre líneas de fuente (SLI por sus siglas en inglés), éstas junto con la distancia de separación entre las fuentes definen la densidad de puntos fuente (Oria, 2001).

2. 11. 2. Línea receptora

Se define como la línea donde son colocados los receptores a intervalos constantes, con una usual separación de dos veces la dimensión de las líneas del (CMP bin) (figura 8). Se acostumbra a colocar los cables de grabación a lo largo de estas líneas y de ser necesario se fijan los receptores para la grabación de datos. La distancia entre las sucesivas líneas de receptores se le llama intervalo entre línea de receptores (RLI por sus siglas en inglés). El método de posición de las líneas de fuentes y receptores puede variar, sin embargo una de las geometrías mas utilizadas es líneas de fuentes y receptoras ortogonales entre si. (Corsen et al, 2002).

2. 11. 3. Dirección Línea y Traza (In-line y Cross-line)

La dirección de líneas (in-line) se refiere a la dirección paralela a la línea de receptores. Por su parte la dirección de traza (cross-line) se refiere a la dirección ortogonal a la línea de receptores (figura 8).

2. 11. 6. Celda unitaria (Box)

En mediciones de levantamientos 3D ortogonales, éste término se aplica para un área limitada por dos líneas de fuente adyacentes y dos líneas de receptores adyacentes (figura 9). Usualmente representa el área más pequeña de una medición 3D que contiene una completa medición estadística del levantamiento (dentro de un área de amplia-cobertura o full-fold). En una medición ortogonal, el punto medio (midpoint bin) localizado exactamente en el centro de la celda unitaria, contribuye para muchos pares fuente - receptor. De todos los offset mínimos en todos los puntos medios común (CMP bin), el mínimo desplazamiento (offset) en el bin perteneciente al centro de la celda unitaria tiene el mayor X_{\min} (Corsen, 2002). En este mismo sentido, se define X_{\max} como el máximo desplazamiento (offset) registrado, el cual depende directamente de la estrategia de disparo y del tamaño de la pista (path). De hecho, usualmente tiene por longitud, la mitad del tamaño del valor diagonal de la pista (path). Por otro lado, el X_{\min} define el mínimo desplazamiento mas largo en el levantamiento que debe ser registrado en el bin y se encuentra en el centro de la caja (box) (figura 9).

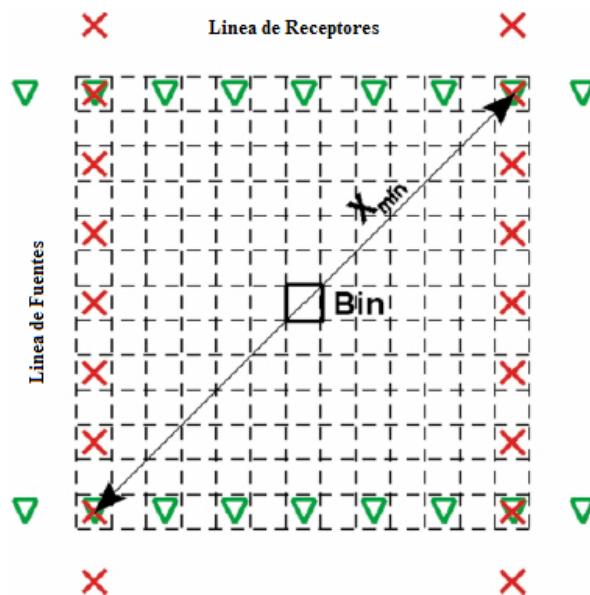


Figura 9. Definición de X_{\min} (tomado de Corsen 2002)

2. 11. 7. CMP bin

Corsen (2002) define el CMP bin, como una pequeña área rectangular que usualmente tiene dimensiones de $(SLI/2)*(RLI/2)$. Todos los puntos medios que se encuentran dentro de esta área se consideran pertenecientes al mismo punto medio común (por su siglas en inglés CMP). En otras palabras todas las trazas que se encuentran en el mismo bin serán agrupadas en un CMP y contribuyen con la cobertura (figura 10).

2. 11. 8. Super bin

Este término se aplica a un grupo de puntos medios común (CMP bins) vecinos (figura 10). Se utiliza generalmente para determinar velocidades, soluciones de estática residual, atenuación múltiple, y algunos otros algoritmos de atenuación de ruido (Corsen, 2002).

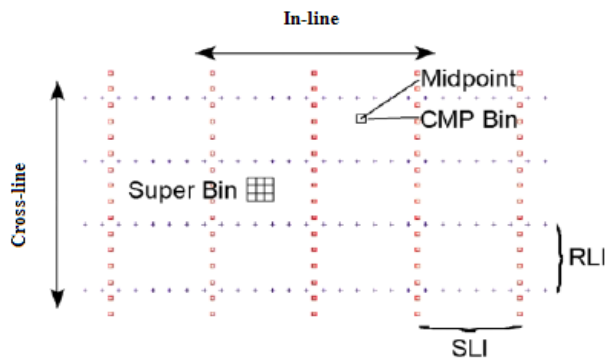


Figura 10. Términos de medición 3D punto medio común (Tomado de Corsen 2002).

2. 11. 9. Punto medio (Midpoint)

Sheriff (2002) lo define como el punto medio entre una fuente y un receptor. Por otro lado Corsen (2002) explica que cada fuente genera tantos puntos medios (midpoint) como receptores se coloquen en la pista (path). Los puntos medios (midpoints) a

menudo se encontrarán dispersos, a su vez pueden, pero no necesariamente, formar un mallado regular.

2. 11. 10. Cobertura (fold)

Se define como el número de puntos medios (midpoints) que son agrupados dentro de un CMP bin. Aunque se obtiene una cobertura promedio para un levantamiento, la cobertura varía en distintos bins y varía también para offset diferentes (Corsen, 2002).

2. 11. 11. Apertura de migración

Se define como el ancho de área que necesita ser adicionada en la medición 3D para permitir propiedades de migración para un evento buzante en profundidad, sin embargo esta área no es necesariamente la misma en toda la superficie. Por otro lado la calidad de las imágenes logradas por una migración 3D en función a la apertura de migración, es una ventaja importante sobre un levantamiento 2D ver fig.11 (Corsen, 2002)

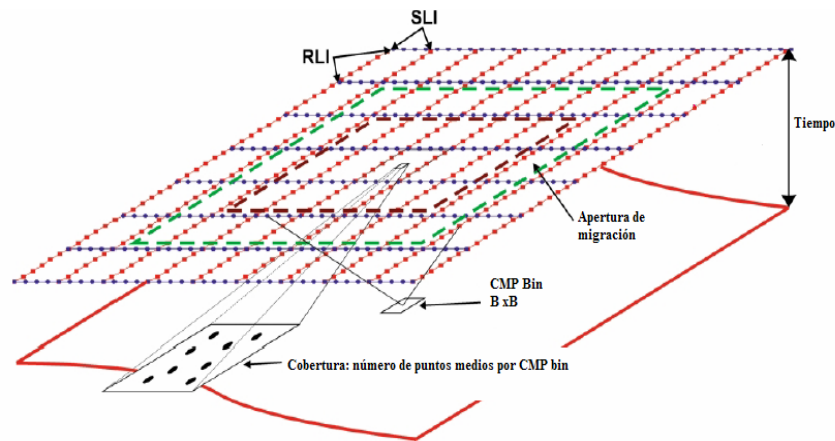


Figura 11. Conceptos de cobertura y apertura de migración. (Tomado de Corsen 2002)

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3. 1. Introducción

En el presente capítulo se describe como se realiza la ubicación e identificación exacta de las interfases de un modelo de velocidades con respecto a la lectura que toma el trazador de rayos sobre el modelo, con esto la herramienta tendrá datos de la ubicación de los puntos de interés. A partir del resultado generado con lo anterior y junto al calculo de gradiente en cada punto del mallado de interfase se obtiene datos para encontrar puntos de iluminación sísmica con respecto a una disposición de fuentes y receptores.

3. 2. Método

- Revisión bibliográfica para la comprensión de conceptos fundamentales que fueron aplicados para el cumplimiento de los objetivos trazados. Entre otras cosas es necesario tener presente lo siguiente:

- Principio de Fermat: La trayectoria de un rayo que va de un punto a otro es la correspondiente al tiempo mínimo
- Ley de Snell: para que la trayectoria de un rayo sea de tiempo mínimo, en la reflexión, es necesario que los ángulos de incidencia y reflexión sean iguales.
- En un modelo cada uno de los valores de velocidad que conforman la matriz, pertenecen a un único punto o nodo de posición en el mallado.
- La recta normal en un punto, sobre una superficie, es la recta que pasa por el punto, paralela al gradiente de la superficie en ese punto. El vector gradiente indica la dirección de crecimiento y decrecimiento de una función y es paralelo a la recta normal, lo que indica un comportamiento exacto en cada punto de la superficie.

Se realizó la construcción de varios modelos de velocidades homogéneos e isotrópicos con distintos comportamientos de interfase para realizar pruebas de las rutinas. Para esto se utilizó el programa UNIF2 con el que se generó archivos con el contenido de cada uno de los modelos asignando las profundidades y los valores de velocidad por cada plano XZ correspondiente y realizando una captura de datos de cada plano en un solo archivo en formato binario para obtener el cubo del modelo, en cuanto a la imagen se puede presentar de dos modos distintos, por medio de los visualizadores XIMAGE y XMOVIE, ambos permiten ver la imagen en 2D, el primero puede presentar uno o todos los planos XZ del modelo, del mismo modo la segunda herramienta presenta una película que avanza en la dirección del eje Y donde se puede observar el comportamiento 3D del modelo.

- Se generó una rutina que permite identificar en un modelo, donde hay variaciones de velocidad indicando los puntos que comprenden la interfase. Si se entiende que los modelos de velocidades se comportan como celdas de datos, el principio será la revisión de dichas celdas para buscar cuales son las que están en el límite entre un cambio de valores e identificarlas por el nodo al que pertenece (Fig. 12).

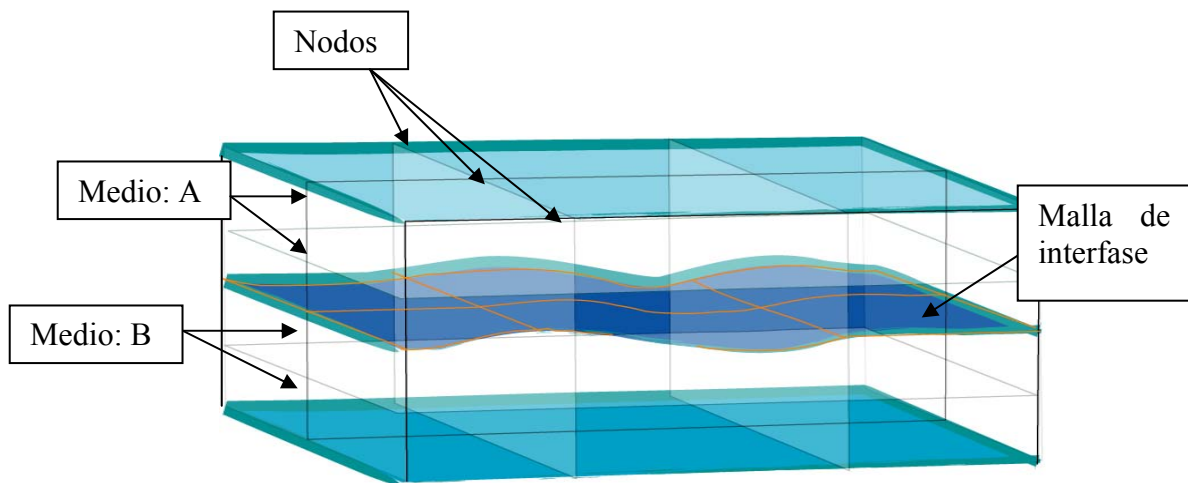


Figura 12. Ejemplo de modelo de velocidades con sus celdas de nodos, la malla color naranja pertenece a los nodos con cambio de velocidad.

Realizando una revisión por profundidades ordenadas y abscisas, se almacenan los valores de nodos si existen cambios de velocidad en caso contrario se descartan, con lo que se obtiene una salida de datos que contiene la superficie aproximada formada por la interfase de velocidad en un modelo, en el caso que sean varias interfases permite identificarlas con número, así pues, en un modelo de varias interfases se puede trabajar con la superficie de interés. Todo con la finalidad de que el trazador de rayos conozca la información de ubicación de la superficie de cambio de velocidad, con la misma secuencia en el mallado que él aplica para la lectura del modelo, en la línea de la generación de los rayos.

- Por medio del concepto de vectores normales al plano y aplicando la ecuación (66) demostrada en el capítulo 2 se realizó una rutina en Matlab que calcula los vectores normales a una superficie dada. Utilizando los puntos hallados anteriormente para la interfase, se genera una malla y en cada vértice o punto se calculan los vectores normales a la superficie. (Fig. 13)

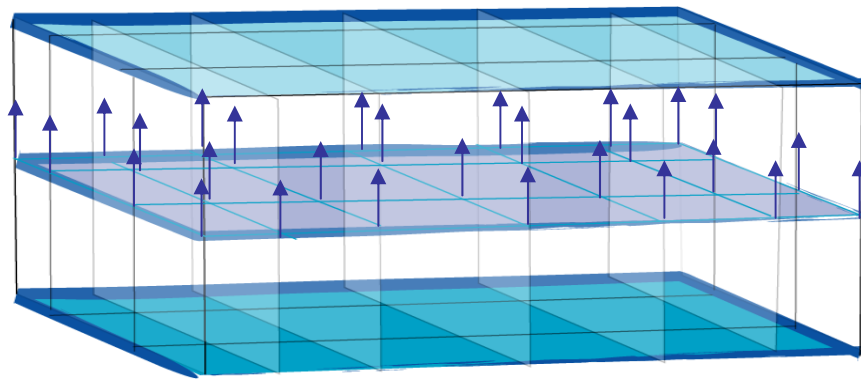


Figura 13. Ejemplo de vectores normales a una superficie en cada nodo.

- Se revisó la aplicación de trazador de rayos, para comprensión de su funcionamiento, la cual será aplicada a los modelos de velocidad, a fin de realizar pruebas necesarias. Esto incluyó revisión de lectura de origen de la herramienta, con el objetivo de entender el principio con que trabaja la aplicación para la generación de

las tablas de tiempo que se utilizan en la migración en profundidad, y el manejo de las condiciones del programa con la realización de distintas pruebas, con el objetivo de obtener todos los rayos posibles en una interfase de velocidad.

- La herramienta Matlab permitió, generar rutinas de visualización y operaciones necesarias con superficies, tiene importantes aplicaciones de llamada directa que cumplen funciones específicas, por esto será utilizada en la observación y cálculos necesarios relacionados con la interfase. Se realizó una rutina de visualización para verificar los datos obtenidos, la primera parte recibe los respectivos valores x,y,z de cada punto de la interfase y los grafica, con lo que se puede observar el comportamiento de los puntos de cambio de velocidad por medio de las propiedades mallas descritas anteriormente. La segunda parte permite observar tanto las interfases de velocidad como todos los rayos posibles para la superficie en estudio generados por el trazador de rayos.

- Se realizó una rutina que permite determinar, del archivo generado por el trazador de rayos, las llegadas de tiempo mínimo de recorrido basado en la ley de Snell de reflexión y en el principio de Fermat.

Tomando en cuenta que los rayos generados por el trazador, se escriben como una composición de un número de segmentos cuyo valor es descrito en los datos del programa, se procede a la lectura de estos datos, archivando el último segmento por rayo para ser llevado a su módulo de vector

$$|v| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (67)$$

una vez que se obtiene los valores de los vectores de cada rayo, tanto de incidencia como de reflexión, se realiza el cálculo de ángulo entre cada uno de ellos y los vectores normales a la superficie, adquiridos y previamente archivados, bajo el concepto de ángulo entre vectores

$$\cos \theta = \frac{a \times b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (68)$$

con estos datos se procede a una comparación en cada punto de la superficie para determinar cuales de estos nodos ha tenido rayos con valores de ángulo iguales en incidencia y reflexión, estos cumplen lo descrito por la ley de Snell (Capítulo 2), lo que será una primera manera de seleccionar los rayos de interés entre una fuente y un receptor. Por otro lado se procede a la suma de los segmentos que los componen, para así determinar la longitud de viaje y tomar el rayo de menor recorrido a partir de los datos obtenidos anteriormente, reafirmando con el principio de Fermat, la iluminación en un nodo con reflexión exacta en interfases planas. En la figura 14 se puede observar el comportamiento del programa donde los segmentos en color negro representan posibles trayectorias de mínimo recorrido con el cálculo de ángulo de incidencia y reflexión, los segmentos en color rojo representan las trayectorias de mínimo recorrido a partir del cálculo de la distancia de los segmentos que componen el rayo.

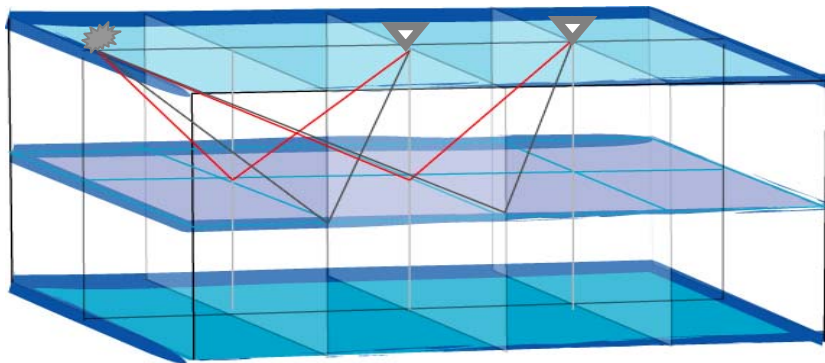


Figura 14. Ejemplo de comportamiento de la rutina que determina los rayos de trayectoria mínima en un modelo de velocidades isotropico

- Se realizó una rutina con la ayuda de Matlab que permite observar todos los datos obtenidos de los programas realizados anteriormente, donde se visualiza la superficie

(o las superficies) que representa el cambio de velocidad, la línea fuente, la línea de receptores, los nodos y los bins iluminados en la interfase, representando la cobertura de la geometría modelada, así como los respectivos rayos de tiempo mínimo, todo esto para generar los mapas de iluminación sísmica en un modelo de velocidades tridimensionales.

Se presenta a continuación un diagrama de procesos para obtener los mapas de iluminación sísmica a partir de un trazador de rayos de dos puntos.

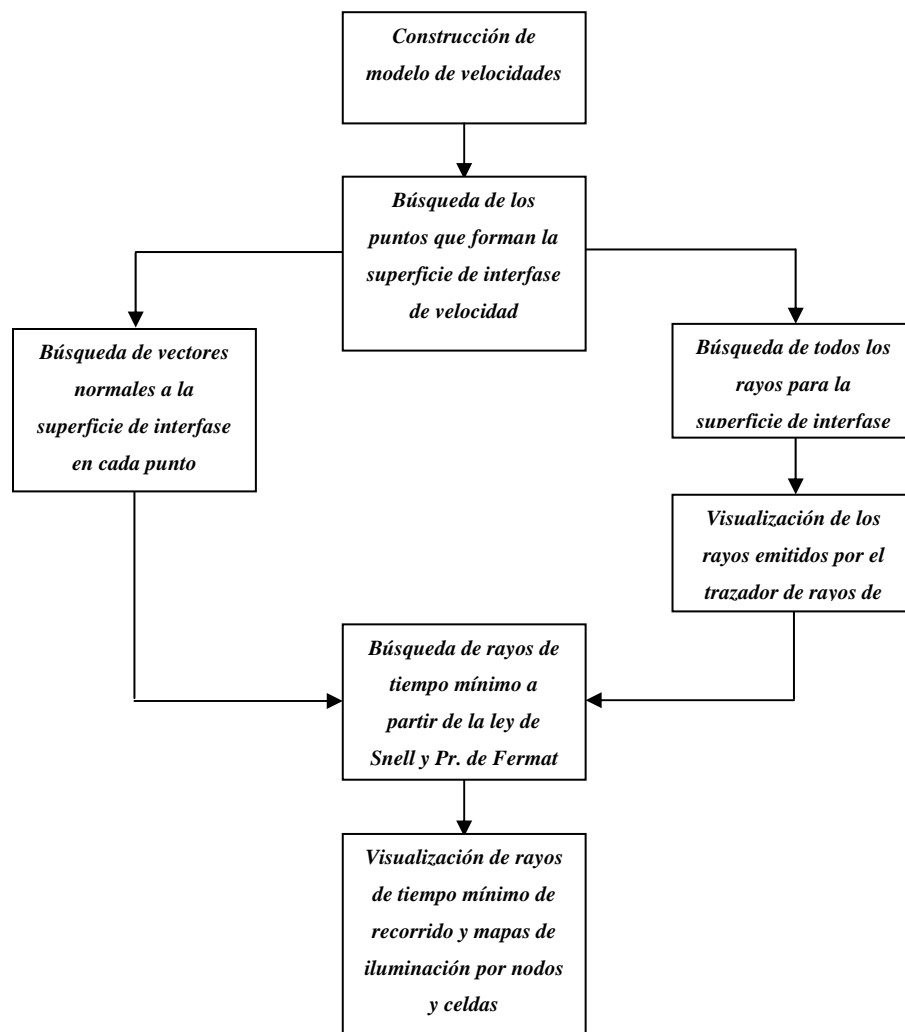


Figura 15. Diagrama de procesos para mapas de iluminación sísmica a partir de un trazador de rayos.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4. 1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de pruebas realizadas en modelos de velocidad isotrópico con distintas distribuciones de fuentes y receptores que permitan visualizar la trayectoria del rayo y su nodo de iluminación. En algunos casos los resultados obtenidos son comparados con mapas realizados en un paquete comercial, dicho paquete permite obtener mapas de cobertura por trazado de rayos a partir de un método rápido y suficientemente confiable para aplicaciones en campo, aunque no sigue el mismo método que el trazador de rayos que se utilizó para este trabajo, son comparables los resultados debido al nivel de confiabilidad que posee el programa en la industria.

4. 2. Resultados de identificación en modelos de velocidad

En la figura 16 se presenta el primer modelo de velocidades con interfases planas a profundidades de 200, 500 y 800 metros y valores de velocidad de 1500, 1800, 2100 y 2400 m/s respectivamente, con 15 planos en el eje Y, la discretización es de 10 metros en cada uno de los ejes, se realizó por medio de la herramienta UNIF2 y visualizado por XIMAGE.

La idea de identificar los nodos donde se presenta cambios de velocidad es para generar una superficie y poder observar la interfase en 3D, por medio de Matlab se grafica dicha interfase y se presenta en la figura 17. Con este resultado comienza la construcción de un visualizador 3D para una importante aplicación como el trazador de rayos. La escritura de los archivos de salida contienen las coordenadas X, Y, Z de los puntos con los valores de nodos dentro del modelo, en secuencia lógica con la lectura que realiza el trazador de rayos al cubo de velocidades.

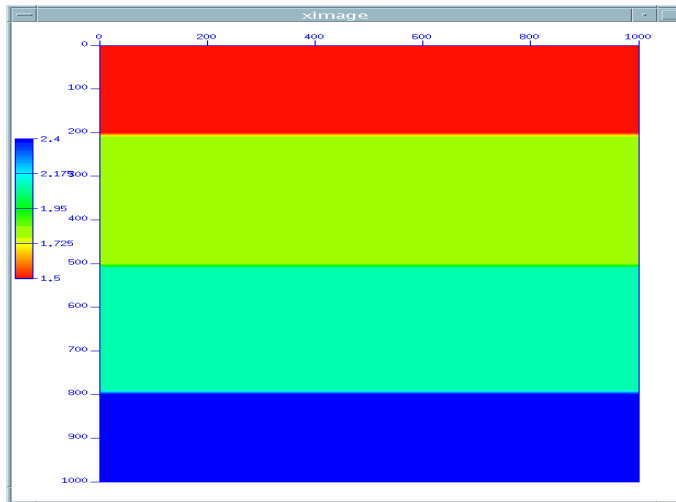


Figura 16. Modelo de velocidades realizado por UNIF2 y generada por XIMAGE.

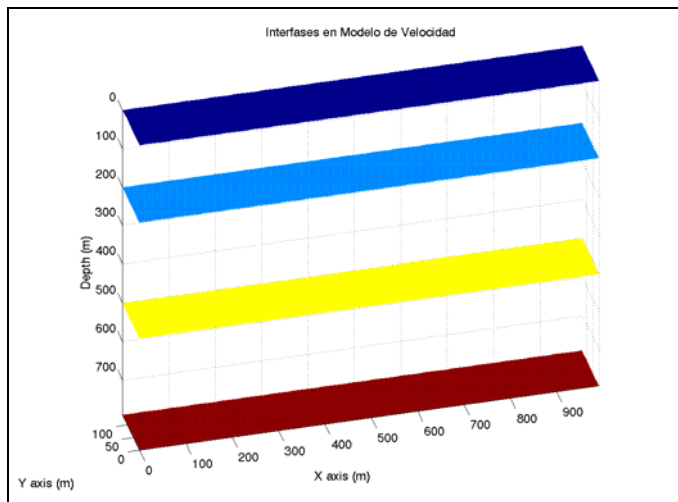


Figura 17. Modelo de velocidades identificado por nodos y visualizado con MATLAB

A partir de los datos obtenidos anteriormente se selecciona la interfase de interés para realizar el cálculo de los valores de vectores normales a la superficie en cada nodo, se observa en la figura 18 el comportamiento de vectores normales en una interfase plana, donde se obtiene un resultado óptimo para que, junto con la respuesta generada por el trazador de rayos, se realice el cálculo de ángulos de incidencia y reflexión por nodo.

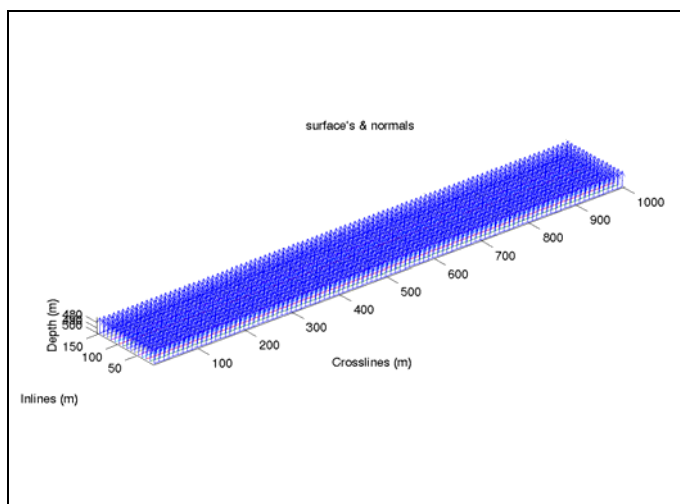


Figura 18. Interfase de interés, las flechas indican el vector gradiente en cada nodo.

Se dispararon geometrías de adquisición para comprobar la operatividad de los algoritmos, en la figura 19 se observa la respuesta dada por el trazador de rayos para dos fuentes y doce receptores, en general el programa modela rayos para todo el cubo de velocidades y arroja como respuesta los rayos que pertenecen a los nodos de la interfase de interés lo cuales son dados como datos de entrada para la clasificación de los rayos de tiempo mínimo. El análisis del trazador de rayos tiene mucha importancia debido a que genera rayos en todos y cada uno de los puntos del modelo, lo que permite tener una mayor posibilidad de generar respuesta en estructuras de mayor complejidad.

4. 3. Resultados generales de rayos de tiempo mínimo de recorrido

Se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo de velocidades de interfases planas mostrado en la figura 17 con distintas geometrías de prueba, las primeras imágenes muestran mapas de cobertura por nodo, los rayos presentados se calcularon, por comparación del valor de los ángulos de incidencia y reflexión, así como también por el cálculo de la menor distancia entre posibles rayos de tiempo mínimo.

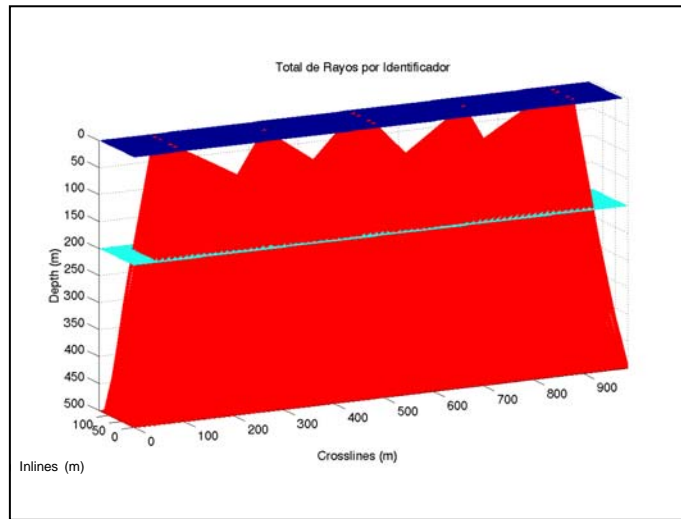


Figura 19. Modelo de velocidades con la respuesta de disparo generada por el trazador de rayos

La figura 20 presenta una distribución con una fuente en el centro del modelo, ubicada en las coordenadas (500,70) y 2 líneas de receptores separadas 600 m, con tres receptores separados cada 20 m, dirigidos a la primera interfase del modelo, la imagen muestra que los criterios de comparación del valor de ángulo de incidencia con el valor de ángulo de reflexión y cálculo de distancia por cada rayo, se comportan satisfactoriamente en interfases de velocidad con superficie plana.

Los nodos que se observan en el mapa inferior, de la figura 20, dependen del tamaño de la discretización del modelo debido a que el valor del recuadro posee sus dimensiones, la escala muestra el número de llegadas que hay en cada nodo.

Una de las pruebas importantes en este tipo de herramientas es la disposición de fuentes y receptores en la misma línea para ver el comportamiento ya que, debido a que la interfase es una superficie plana, el resultado son nodos que coinciden con los puntos medios (midpoints) entre fuente y receptor, a su vez, pertenecen al plano XZ en donde esta colocada la geometría. En la figura 21 se observa la disposición de una fuente y ocho receptores de forma lineal pertenecientes al mismo plano.

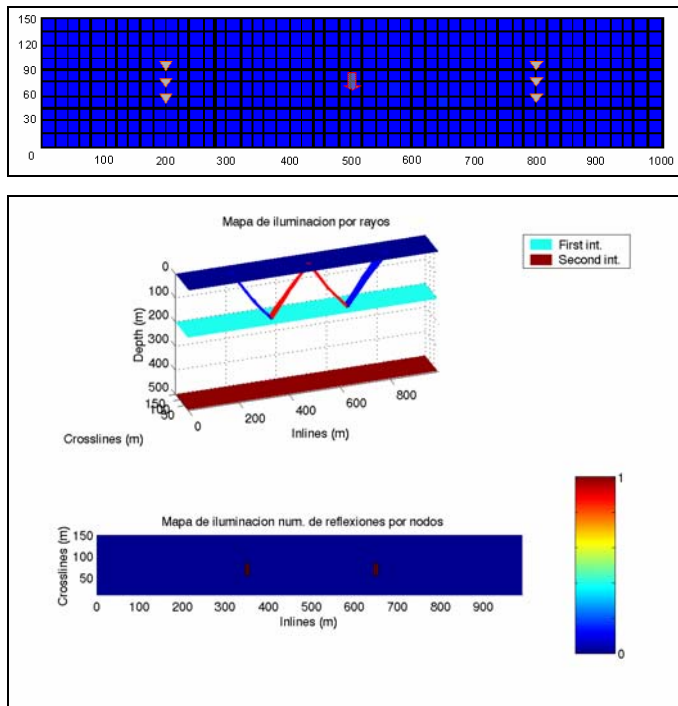


Figura 20. Modelo de velocidades con geometría de una fuente y seis receptores, mapa de iluminación por nodos.

La figura 22 muestra una geometría de adquisición la cual, debido a su disposición de fuentes y receptores, permite obtener un nodo iluminado 2 veces. Ya que el propósito es llegar a visualizar mapas de cobertura que permitan observar la cantidad de llegadas que hay en un nodo, y posterior a esto, observar la cobertura por celdas iluminadas según su definición.

Conforme con el resultado obtenido en la geometría ilustrada en la figura 22 para la primera interfase, se procedió a realizar un proceso de modelado en la segunda interfase, los resultados se pueden apreciar en la figura 23 donde se observa que, al igual que en la primera interfase, los nodos iluminados coinciden con los puntos medios (midpoints), esto es debido a que el modelo de velocidades es isotrópico y la interfase en estudio es plana, esto permite observar que en un modelo isotrópico, el punto de fuente, el punto de reflexión y el punto receptor forman un plano en donde esta contenido el rayo de tiempo mínimo de trayectoria.

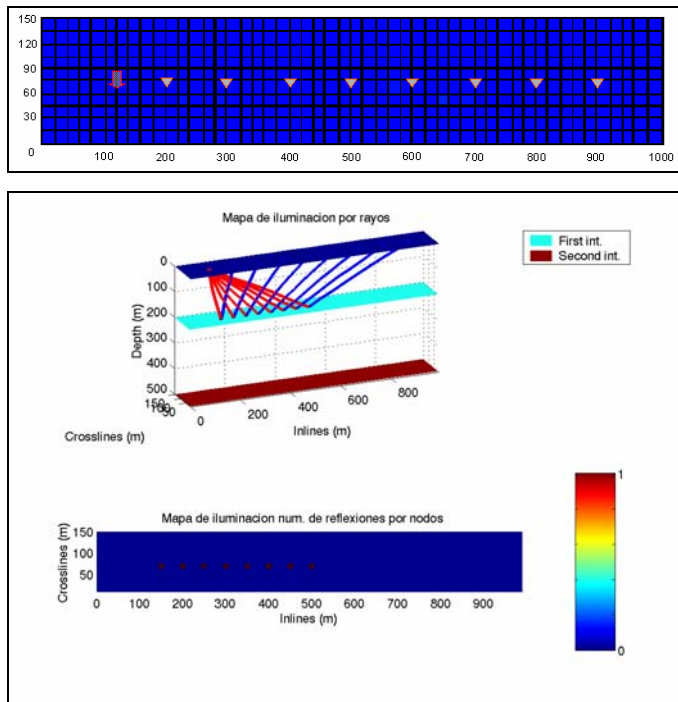


Figura 21. Modelo de velocidades con geometría de una fuente y ocho receptores colocados en una misma línea.

La geometría utilizada para los resultados ilustrados en las figuras 22 y 23, comprenden de una línea de fuentes que consta de dos fuentes separadas cada 500 m, y tres líneas de receptores separadas cada 500 m, que consta de cuatro receptores, dos de ellos con espacio de 20 m y dos con espacio de 40 m.

La figura 24 presenta una disposición similar a la presentada en la figura 23, con una cantidad mayor de receptores. El valor de cobertura máxima no varía debido a que no se incrementa el número de fuentes, por otra parte, hay un incremento de nodos iluminados por la cantidad de receptores que se ha agregado. El fin de obtener mayores llegadas de nodos comunes y observar el comportamiento de los mapas de iluminación.

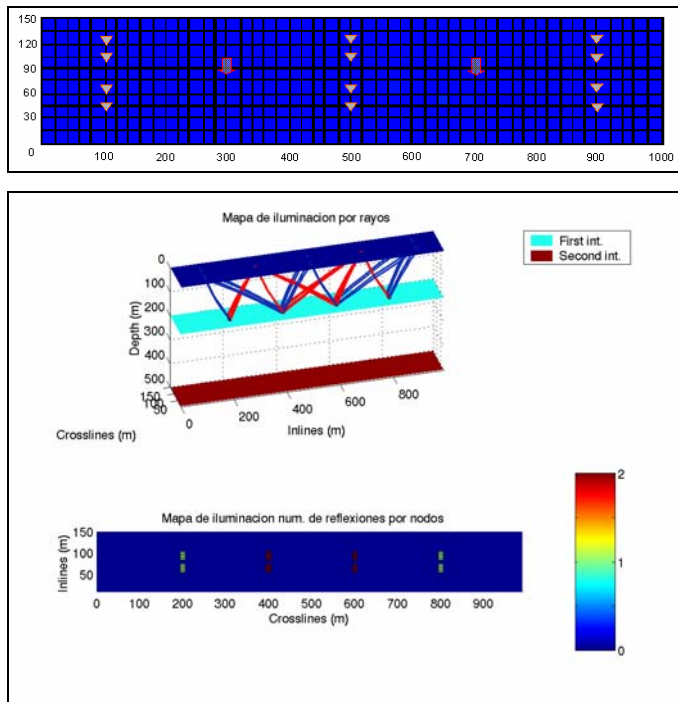


Figura 22. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y doce receptores colocados de modo intercalado para mejor cobertura repetida en el centro.

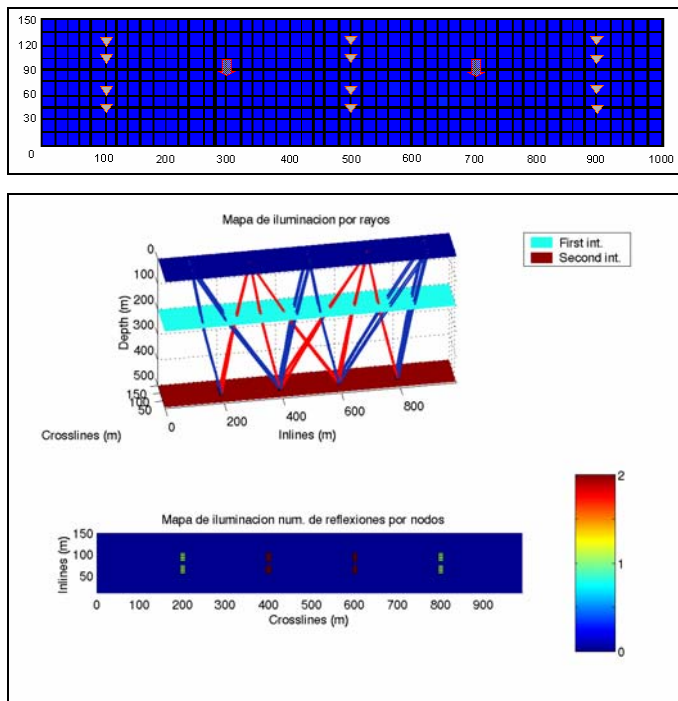


Figura 23. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y doce receptores colocados de modo intercalado para cobertura de nodos comunes en el centro.

La geometría utilizada para el resultado en la figura 24 posee una línea de fuentes que consta de dos fuentes separadas 500 m, y nueve líneas de receptores separadas cada 100 m que consta de cuatro receptores separados 100 m, dos receptores separados cada 20 m y dos receptores separados 40 m.

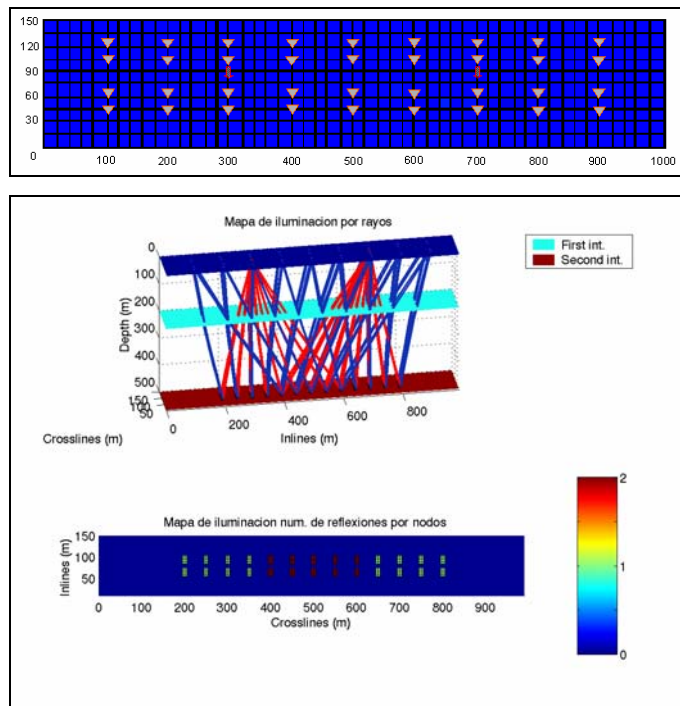


Figura 24. Modelo de velocidades con geometría de dos fuentes y treinta y seis receptores colocados para mejor cobertura de nodos comunes en el centro.

Para el resultado presentado en la figura 25 se incrementa el número de fuentes en la línea, ahora la separación es de 100 m con 5 fuentes. Dicha línea se dispuso paralela a las líneas de receptores que consta de 9 fuentes separadas cada 100 m, con nueve líneas de receptores separadas cada 100 m, que consta de 2 receptores separados cada 20 m y 2 receptores separadas 40 m.

En este ejemplo, debido que se incrementa el número de nodos iluminados, se puede presentar un mapa de cobertura por celda (bin), donde se agrupa una cantidad de puntos de reflexión dentro de un recuadro con dimensiones que dependen

directamente de la disposición que presenta la geometría de adquisición. Sin embargo, el valor de la celda puede llegar depender de factores como el tamaño del objetivo en estudio, la resolución lateral o el valor de la frecuencia máxima debido a un buzamiento en el caso de estructuras geológicas. En estos casos se toma el menor valor de celda calculado.

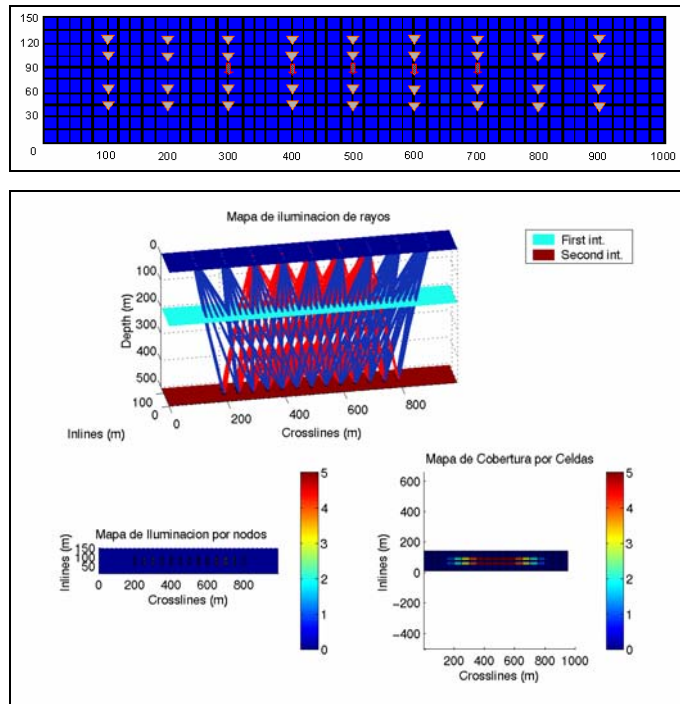


Figura 25. Modelo de velocidades con geometría de cinco fuentes y treinta y seis receptores para incrementar el número de nodos iluminados.

La figura 26 muestra una geometría de adquisición ortogonal, con una línea de fuentes perpendicular a las líneas de receptores, dicha línea comprende de 2 fuentes separadas cada 40 m. A su vez, se dispuso de 3 líneas de receptores comprendida por 20 receptores separados cada 40 m. El mapa de iluminación que se aprecia en la figura 26 es por nodos iluminados. El objetivo es presentar una geometría que ilumine de manera uniforme la segunda interfase del modelo de velocidades planteado en la figura 17, para así poder comparar los resultados con los obtenidos, con la misma geometría, en el paquete comercial.

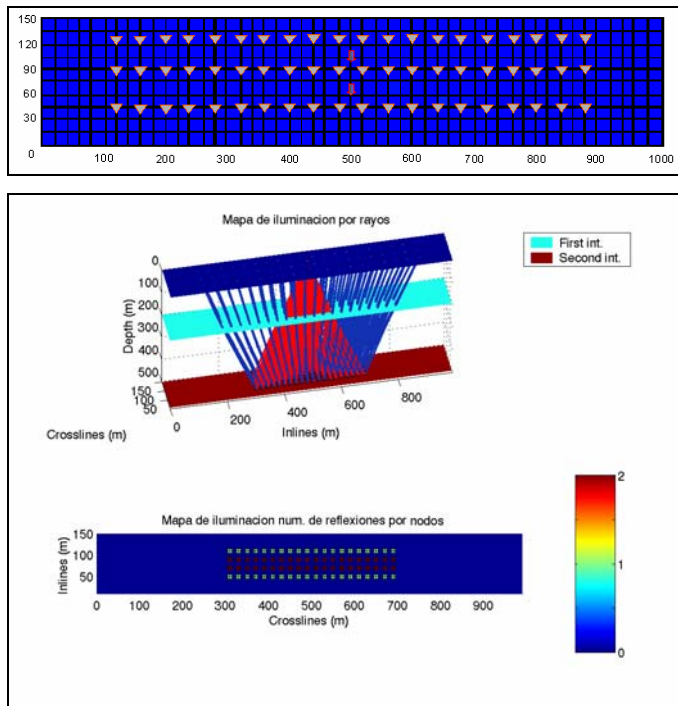


Figura 26. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores.

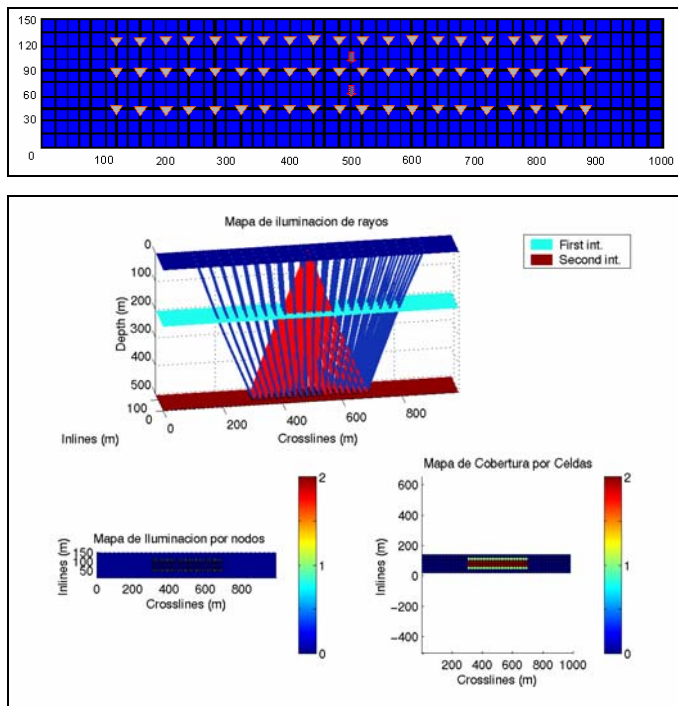


Figura 27. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores con mapa por celdas iluminadas.

El valor de la celda (bin) para la geometría presentada en la figura 27 es de 20 x 20 m. En este caso se utilizó el paquete comercial, para generar el mapa de iluminación sísmica, con las mismas características y dimensiones que se muestran en el modelo presentados en la figura 28. En la comparación de ambos resultados, se puede observar la similitud de los mapas, lo que implica en modelos de velocidades con interfase de superficie plana, aunque los criterios para modelar el rayo que practican ambos programas son distintos, el resultado genera mapas de iluminación similares.

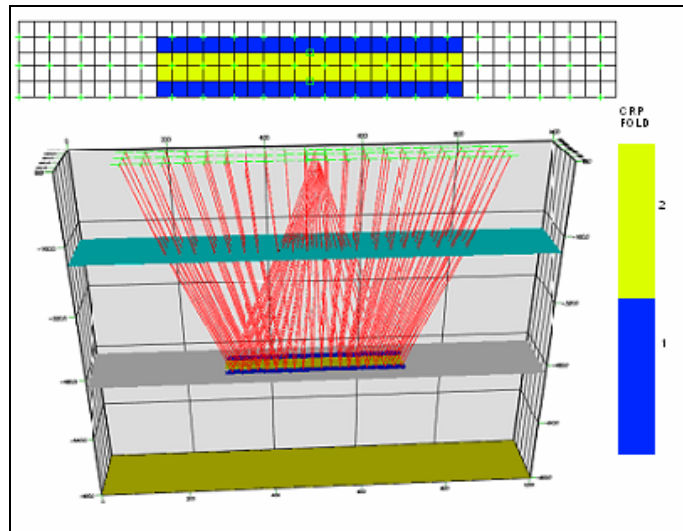


Figura 28. Modelo de velocidades con geometría de 2 fuentes y 60 receptores con mapa de cobertura por celda (bin) realizado en un paquete comercial bajo los mismos parámetros que los de la fig. 27.

En línea de lo anterior se agregan 4 fuentes al modelo de velocidades a partir de la geometría ya disparada para buscar una mayor cantidad de nodos iluminados y un incremento en el valor de cobertura por celda (bin) (figuras 29 y 30). Esta geometría realizada con el paquete comercial, indica una cobertura que posee su máximo valor en el centro del modelo como se observa en la figura 31, la herramienta de software realizada, en modelos de velocidades de interfase plana, tiene el mismo resultado que el paquete comercial, esto indica un avance en el desarrollo de una herramienta de visualización importante en el modelado sísmico, tomando en cuenta que se ha realizado dentro de una compañía de desarrollo tecnológico para la industria petrolera.

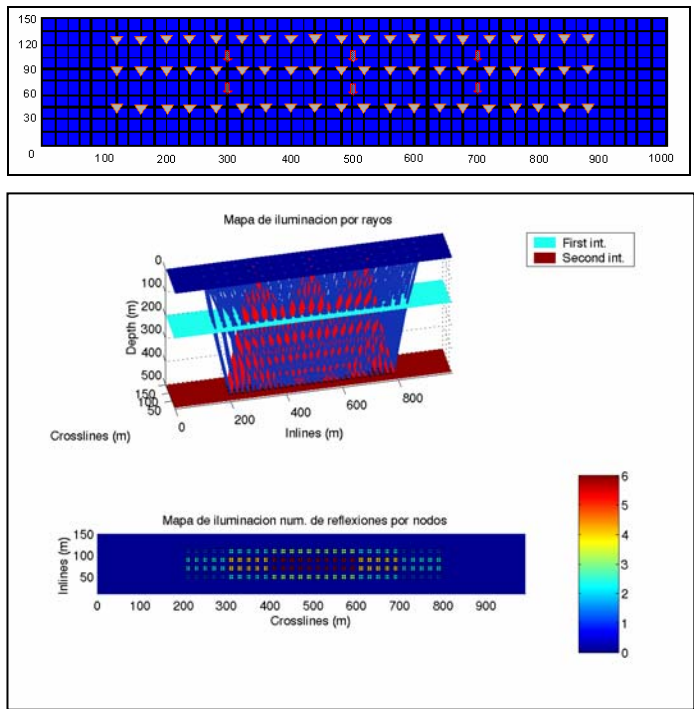


Figura 29. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por nodos.

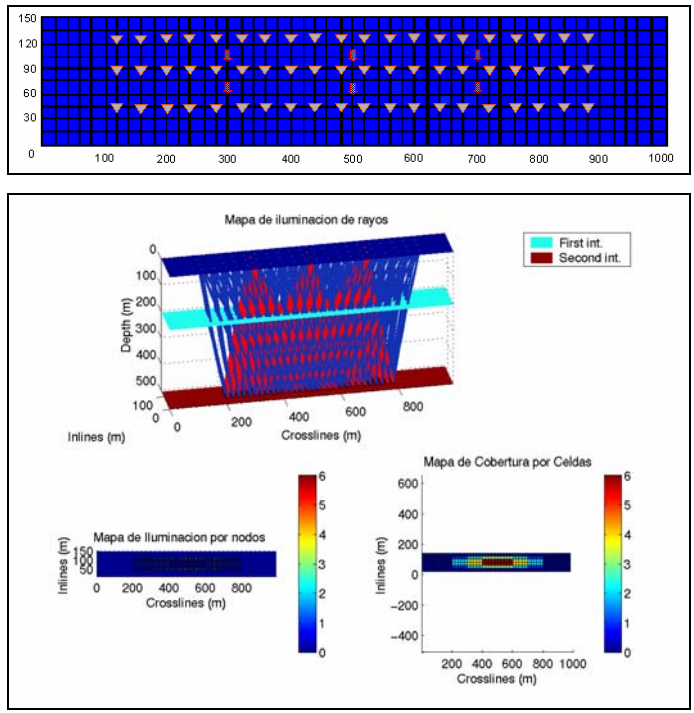


Figura 30. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por celda (bin).

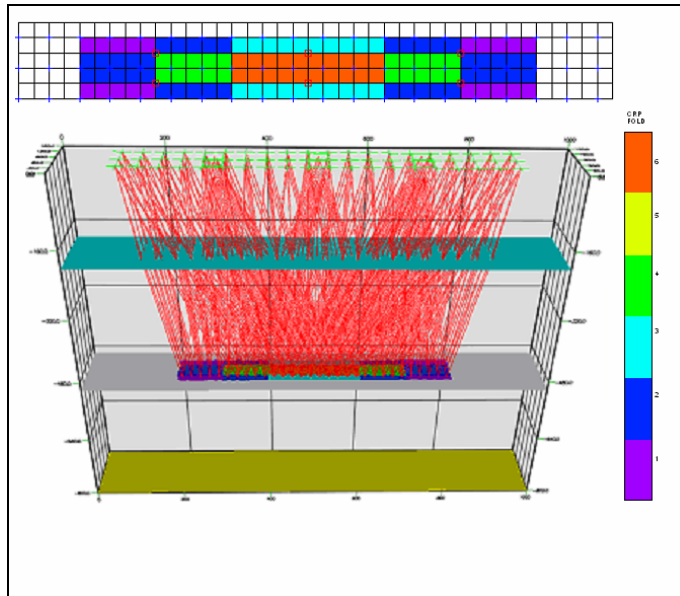


Figura 31. Modelo de velocidades con geometría de 6 fuentes y 60 receptores con mapa de iluminación por celda (bin), realizado con un paquete comercial.

En la búsqueda de comparaciones entre las herramientas del paquete comercial y la visualización a partir de un trazador de rayos de dos puntos, se procedió a realizar un modelo de velocidades con una superficie de cambio de velocidad donde presente una estructura irregular, de modo de observar el comportamiento de modelado de rayos en ambos programas (figura 32).

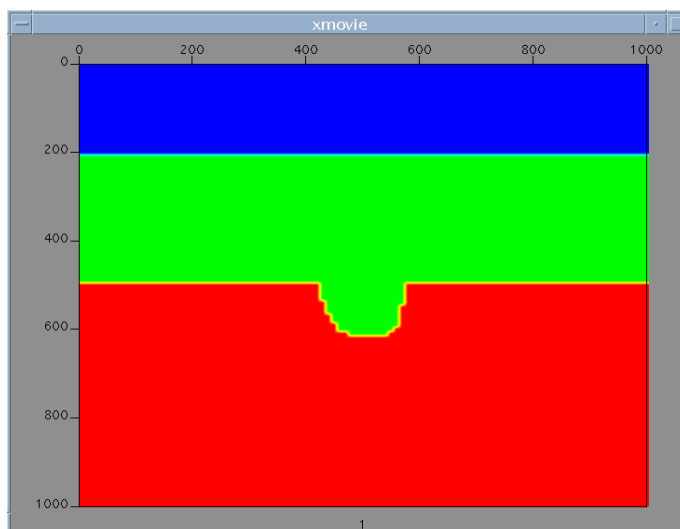


Figura 32. Modelo de velocidades realizado con UNIF2.

En primera instancia se procedió a la identificación de los puntos que componen las distintas interfases, el modelo de velocidades realizado se puede observar en la figura 33, con dos interfases, una plana y otra con una estructura similar a un sinclinal a profundidades de 200 y 500 m. Los valores de velocidad varían entre 1500, 1800 y 2100 m/s respectivamente, con 15 planos en el eje Y, y discretización de 10 metros en cada uno de los ejes, se realizó por medio del programa UNIF2.

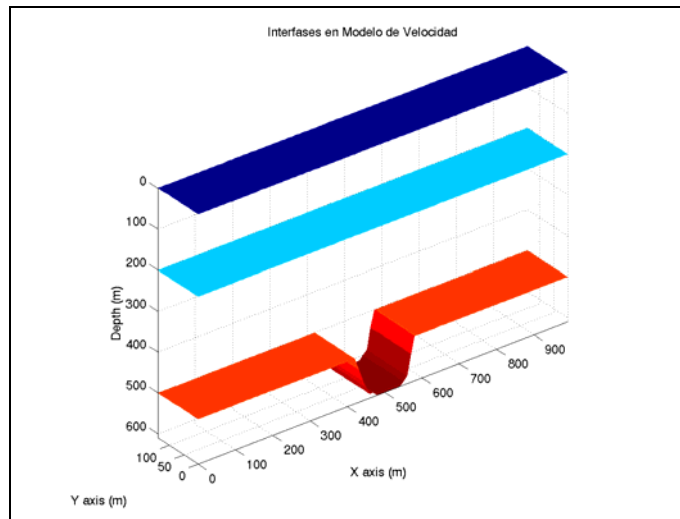


Figura 33. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal.

La geometría de adquisición aplicada es rectangular y viene dada por tres líneas de fuente perpendicular a las líneas de receptores, que comprenden de 2 fuentes separadas cada 40 m en el eje Y (crosslines) y cada 200 m en el eje X (inlines). A su vez, se dispuso de 3 líneas de receptores comprendida por 20 receptores separados cada 40 m (figura 34).

Por su parte también, la figura 34 presenta el resultado de la iluminación para un sinclinal, donde se puede apreciar reflexiones dentro de la estructura, obteniendo información que no se puede obtener con el paquete comercial.

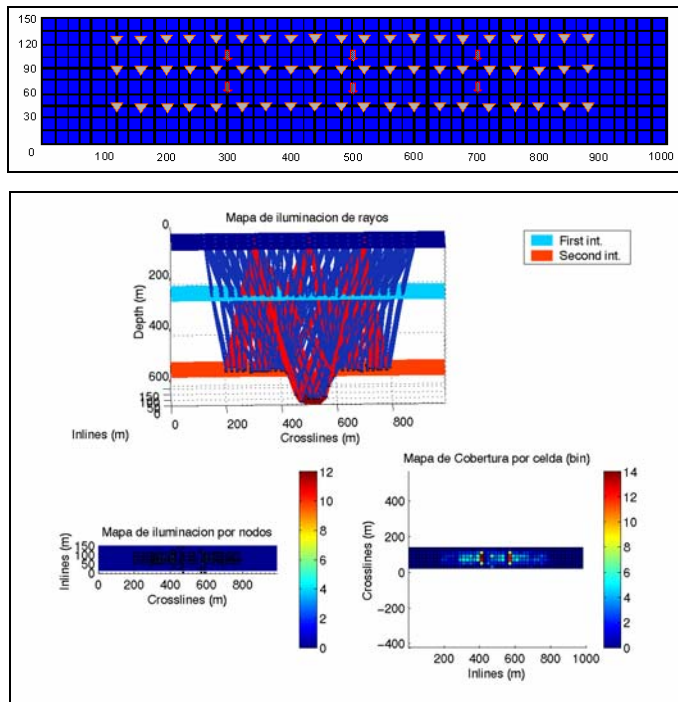


Figura 34. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas.

El trazador de rayos del paquete comercial esta basado en el cálculo de tiempos de un modo práctico, que permite tener una versatilidad para ser funcional en campo, esto debido a que el programa se puede manejar en base a un PC. Sin embargo, aunque es una herramienta bastante confiable, no posee la capacidad de generar rayos en estructuras complejas, como se observa en la figura 37. Por su parte, el trazador de rayos utilizado para realizar éste trabajo esta basado en el cálculo de los rayos por cada nodo que comprende el modelo de velocidades, permitiendo obtener una respuesta en estructuras de mayor complejidad geológica como un sinclinal.

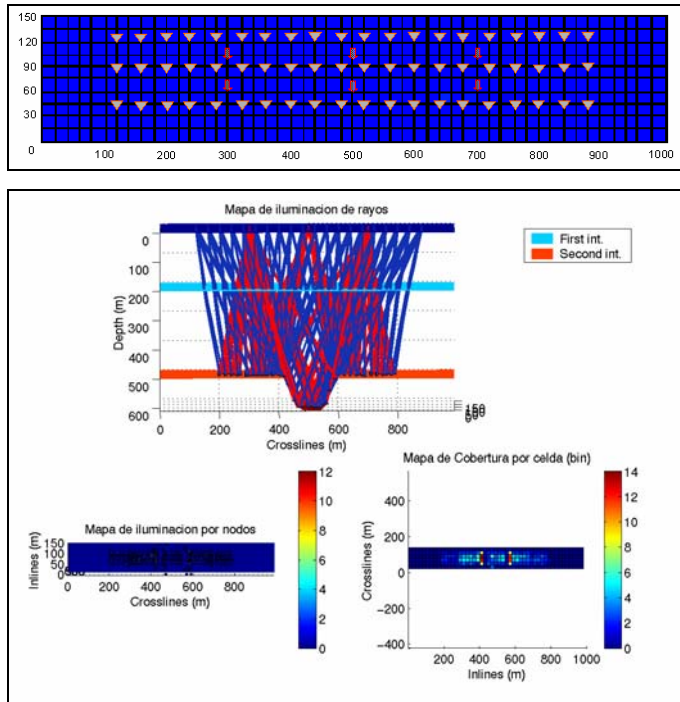


Figura 35. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas (vista frontal).

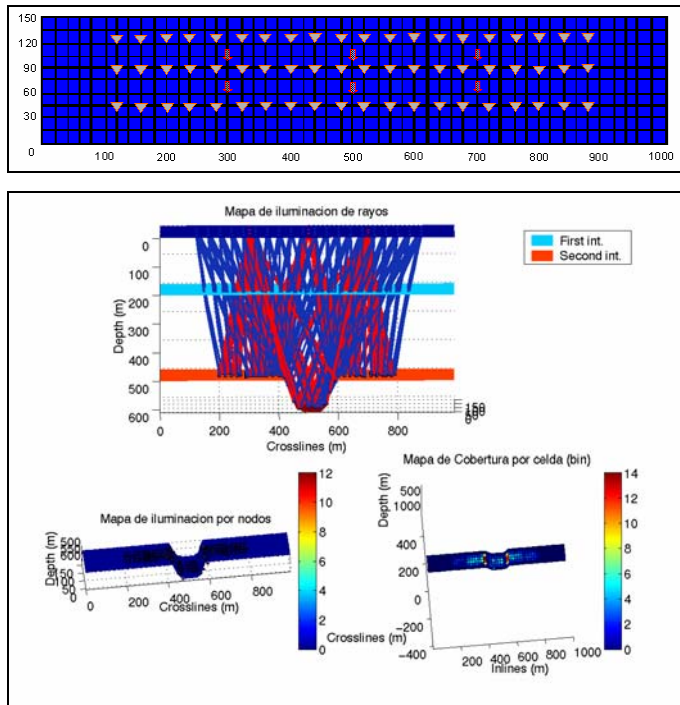


Figura 36. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación por nodos y celdas.

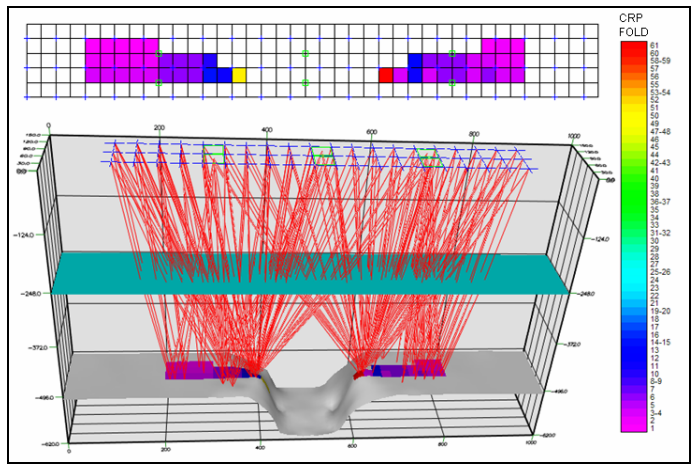


Figura 37. Modelo de velocidades con interfase en presencia de un sinclinal con mapas de iluminación realizado en un paquete comercial.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se desarrollaron mapas de iluminación sísmica en modelos de velocidades tridimensionales e isotropos, por medio de una rutina que permite visualizar interfases de velocidades y rayos que representan tiempo mínimo entre una fuente y un receptor, a partir del resultado obtenido con un trazador de rayos de dos puntos.
- Con la revisión del modelo por profundidades, abscisas y ordenadas, se desarrolló un programa que permite identificar los puntos que forman las superficies de interfase de velocidad en sus coordenadas x,y,z , así como también, por sus valores de nodo para visualizar el modelo de velocidades en tres dimensiones e identificar en el trazador de rayos la interfase de interés hacia donde esta dirigida la iluminación.
- Bajo el concepto de vector normal a una superficie en un punto, se generó una rutina que permite obtener los vectores normales por cada nodo que comprende la superficie, con el fin, de realizar una comparación de los ángulos de incidencia y reflexión en el momento de determinar rayos de tiempo mínimo entre una fuente y un receptor.
- Por medio de la ley de Snell de reflexión y el principio de Fermat se realizó un programa que permite identificar rayos de tiempo mínimo entre una fuente y un receptor, con lo que se complementa una importante herramienta como lo es el trazado de rayos de dos puntos, para visualizar mapas de iluminación sísmica en modelos de velocidades 3D.

- Debido a la aproximación utilizada por el trazador de rayos de dos puntos, se obtuvo una zona con mayor iluminación en comparación con los mapas realizados con un paquete comercial en modelos que simulan un sinclinal. Por otro lado, en superficies planas ambas herramientas legan a los mismos resultados.
- Se presentó el inicio de una herramienta de suma importancia en la aplicación de modelado sísmico, bajo la complementación de una aplicación desarrollada en PDVSA-Intevep en el apoyo a la investigación y desarrollo de aplicaciones dentro de la industria petrolera nacional.

Recomendaciones

- Probar los programas generados en modelos de mayor tamaño y complejidad, a fin de complementar los criterios que permitan obtener rayos de tiempo mínimo de recorrido en cualquier estructura.
- Continuar la investigación a fin de poder generar mapas de iluminación sísmica, aplicados a modelos de velocidades heterogéneos.
- Desarrollar una rutina que permita generar superficies con mayor eficiencia para que las interfases de velocidad se puedan modelar con mayor exactitud.
- Desarrollar la investigación con el fin de obtener una herramienta que permita generar modelado sísmico, con todos los atributos posibles, de mayor confiabilidad que los paquetes comerciales.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Albertin, U. (2002) La era de las imágenes en escala de profundidad. Oilfield Review. Slb, (Verano 2002). 2-17.
- Arrollo y otros. (2003) Excelentes datos sísmicos de pozo: Oilfield Review. Slb, (Verano 2003). 2-23
- Aster, R. and S. Bilek (2003) The seismic wave equation. NMT Geophysics. GEOP. 523.
- Carcione, J. and G. Hermat (2002) Seismic modeling. Geophysics, 67 (4). 1304-1325.
- Cervený, V., A. Molotkov, I. Psencik (1977) Ray method in seismology. Universidad de Karlova Press, Praga, Czechoslovakia.
- Clarke, R. and L. Jannaud (1995) 3D Zero offset and common shot ray tracing with multiple arrivals. PSI 1995, reporte anual, Instituto frances de Petroleo, Pau, Francia. 155-172.
- Corsen, A., M. Galbraith, J. Peirce (2002) Planning Land 3-D Seismic Surveys. Soc. Expl. Geophysics, (Geophysical developments series; no. 9)
- Laurain, R. and V. Vinje (2001) PreStack Depth Migration and illumination maps, SEG Int'l Exposition and Annual Meeting, San Antonio, Texas, September 9-14.
- Matlab versión 6, Licencia con derechos reservados, perteneciente a PDVSA Intevep.

- Matsuoka, T. and T. Ezaka (1992) Ray tracing using reciprocity. *Geophysics*, 57 (2).p 326-333.
- Ojeda M. (1993) *Cálculo para la Ingeniería I*, Editorial Agura, Málaga, España.
- Oria, D. (2001) *Planificación, diseño y ejecución de un levantamiento sísmico terrestre: Programa de formación de nuevos empleado PDVSA Exploración y Producción*.
- Ortega A. (2004) *Trazador de rayos de dos puntos, algoritmo con derechos reservados, perteneciente a PDVSA Intevep*.
- Pereira, Z. (2002) *La investigación sísmológica en Venezuela. Publicación realizada por FUNVISIS*.
<http://www.funvisis.gov.ve/>
- Schneider, L. (1990) *Seismic data acquisition, The state of the art in 1990, (interview). Geophysics, The Leading Edge of Exploration*. 9: 37-40.
- Sears, F., M. Zemansky, H. Young (2004): *Física Universitaria*. 1ra. Edición, Editorial Pearson Educación, Mexico.
- Sheriff, R. E. (2002) *Encyclopedic dictionary of applied geophysics: 4ta. Edición, Soc. Expl. Geophysics*.
- Suarez. G. (2002) *Diseño de levantamiento sísmico en el área de Macal usando modelado sísmico. Proyecto de grado. Dpto. de Ciencias de la tierra. Universidad Simón Bolívar. Caracas – Venezuela*.

- Thomas, G. y R. Finney (1999) Cálculo de varias variables, 9ª.edición, Addison Wesley Longman de México.
- Um, J. and C. Thurber (1987) A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. B.S.S.A. 77: 972-986.
- Vernaez, G. (2002) Optimización de un trazador de rayos sísmico con técnicas de globalización y herramienta de visualización: Tesis de maestría. Dpto. de Computación, Universidad Central de Venezuela. Caracas - Venezuela.
- Vidale, J. E. (1988) Finite - difference calculation of travel time, B.S.S.A. 78: 2062 - 2076.
- Villasuso, J. (2003) Física interactiva, Método de Demostración de la Ley de Snell,
http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/reflex_Refrac/Demostr_Snell.htm
- Yang, W. (2003) A basical study on two - point seismic ray tracing: NMT Geophysics, GEOP 523.
- <http://www.dictionaty.reference.com/>

APÉNDICE A

Programa para identificación de interfases de velocidad

Lenguaje fortran77

```
c *****
c Programa para identificar interfases de velocidades a partir de
c
c modelos generados en formato binario
c
c *****
c
c El siguiente programa recibe el archivo en formato binario del
c
c modelo de velocidades tridimensional generado con UNIF2 e identifica
c
c los puntos que forma la superficie de interfase de velocidad
c
c *****
c
c Realizado por Jose M. Bryson R. Para Trabajo Especial de Grado
c
c Bajo la tutoria de Ing. Jhonny Calderon
c
c Derechos Reservados: Universidad Central de Venezuela / PDVSA-Intevep
c
c *****
c
c include'paramts.par'
c
c declaracion de arreglos
c
c character*200 filepar,filelevel,fileout,filegrd
c integer ngrid(maxnv,maxny,maxnx),nvel(maxnv,maxny),
c * ntotal(maxnv),ntotalt(maxnv),nint(maxnx),
c * nprof(maxnv,maxny,maxnx),nxlines(maxnv,maxny,maxnx),
c * nylines(maxnv,maxny,maxnx)
c real v(mnz,maxnx,maxny),vt(maxnv)
c
c write(*,*)'Defina archivo de parametros'
c read(*,(a200))filepar
c write(*,*)'Defina interface de interes'
c read(*,*)ninterfase
c
c open(10,file=filepar)
c
c read(10,(a200))filelevel
c read(10,(a200))fileout
c read(10,(a200))filegrd
c read(10,*)nx,ny,nz,norder
c read(10,*)numv
c do i=1,numv
c read(10,*)vt(i)
c enddo
c
c close(10)
c
```

```

c      abriendo archivo de velocidades
c
c      open(10,file=filelevel,access='direct',
* form='unformatted',recl=nz)
c
c      do i=1,ny
c      do j=1,nx
c      read(10,rec=(i-1)*nx+j)(v(k,j,i),k=1,nz)
c      enddo
c      enddo
c      write(*,*)'pase'
c
c      close(10)
c
c      inicializando las variables
c
c      do j=1,ny
c      do k=1,nx
c      nint(k)=0
c      nvel(k,j)=0
c      do m=1,numv
c      ngrid(m,j,k)=0
c      nprof(m,j,k)=0
c      nylines(m,j,k)=0
c      nxlines(m,j,k)=0
c      ntotal(m)=0
c      ntotalt(m)=0
c      enddo
c      enddo
c      enddo
c
c      comparando valores de velocidad y cal.de grid
c
c      do i=1,ny
c      do j=1,nx-1
c      do k=1,nz
c      m=1
c      do n=1,numv
c      if(v(k,j,i).ne.v(k+1,j,i))then
c      if(v(k,j,i).eq.vt(n))then
c      nint(j)=m
c      nvel(n,i)=n
c      ngrid(n,i,j)=(k-1)*nx+j
c      nprof(n,i,j)=(k-1)
c      nxlines(n,i,j)=j
c      nylines(n,i,j)=i
c      m=m+1
c      endif
c      endif
c      enddo
c      enddo
c      enddo
c      enddo
c
c      max=1
c      do i=1,numv
c      do j=1,ny
c      if(nvel(i,j).gt.max)max=nvel(i,j)
c      enddo
c      enddo
c
c      write(*,*)'max=',max,ninterfase
c
c      if(ninterfase.eq.-1)then
c      min=1
c      max=max
c      ncapas=max

```



```

else
  min=ninterfase
  max=ninterfase
  ncapas=1
endif
c
  write(*,*)'max=',min,max
c
  ntt=0
  do k=min,max
  do j=1,nx
  do m=1,nint(j)
  if(ngrid(k,j,m).ne.0)then
  ntotal(k)=ny*(nx-1)
  endif
  enddo
  enddo
  enddo
c
  open(10,file=fileout)
  open(20,file=filegrd)
c
  write(20,*)ncapas
c
  do k=min,max
  write(10,*)k,ny,norder
  write(20,*)k,ntotal(k)
  do j=1,ny
  do i=1,nx-1
  do m=1,nint(j)
  if(ngrid(k,j,i).ne.0)then
  write(10,*)nprof(k,j,i),nxlines(k,j,i),j
  write(20,*)ngrid(k,j,i)
  endif
  enddo
  enddo
  enddo
  enddo
c
  stop
  end

```



```

fclose(fid);
%
[u,h,v]=surfnorm(xn,yn,zn);
%
i=1;
for j=1:ninlines
    for k=1:(nx)
        x(i)=u(k,j);
        y(i)=h(k,j);
        z(i)=v(k,j);
        i=i+1;
    end
end
%
fiarc=fopen('VectoresNormales.txt','w');
fprintf(fiarc,'%ft %ft %ft\n',[x;y;z]);
%
quiver3(xn,yn,zn,u,h,v,0.5)
set(gca,'Zdir','reverse')
xlabel('Crosslines (m)')
ylabel('Inlines (m)')
zlabel('Depth (m)')
grid on
axis equal
title('surface`s & normals')
%
%
```

APÉNDICE C

Programa para identificación de rayo de tiempo mínimo de recorrido con subrutina para ordenar los datos

Lenguaje fortran77

```
C
C *****
C Programa para identificar los rayos de tiempo minimo de recorrido
C *****
C
C El siguiente programa recibe el archivo de rayos lo ordena, e
C identifica los rayos de tiempo minimo de recorrido por medio
C de la comparacion de los rayos con los vectores normales a la
C superficie y el calculo de distancia de los segmentos que
C componen al rayo.
C *****
C
C Realizado por Jose M. Bryson R. Para Trabajo Especial de Grado
C Bajo la tutoria de Ing. Jhonny Calderon
C
C Derechos Reservados: Universidad Central de Venezuela / PDVSA-Intevep
C *****
C
C include'param.par'
C
C character*200 fileray,filegrd,raymin
C real dists(mnray,nsrc),distr(mnray,nrec),vny(mnray),vnx(mnray),
C * vnz(mnray),vdsx(mnray,nsrc),vdsy(mnray,nsrc),vdsz(mnray,nsrc),
C * vdrx(mnray,nrec),vdry(mnray,nrec),vdrz(mnray,nrec),
C * rayosx(nsgm,mnray,nsrc),rayosy(nsgm,mnray,nsrc),
C * rayosz(nsgm,mnray,nsrc),rayorz(nsgm,mnray,nrec),
C * rayorx(nsgm,mnray,nrec),rayory(nsgm,mnray,nrec),
C * angles(mnray,nrec,nsrc),angler(mnray,nrec,nsrc),
C * vtnx(mnray,nrec),vtny(mnray,nrec),vtnz(mnray,nrec),
C * mvds(mnray,nsrc),mvdr(mnray,nrec),angdif(mnray,nrec,nsrc),
C * x(ntotal),y(ntotal),z(ntotal),nn(ntotal),vangle(mnray,nrec),
C * distsr(mnray,nrec,nsrc)
C
C integer m(mnray,nrec,nsrc),r(nrec,nsrc)
C
C write(*,*)'Defina archivo de rayos'
C read(*,(a200))fileray
C write(*,*)'Defina numero de int., rayos x int, sgmt.x rayo,tol'
C read(*,*)nint,nrays,nsegments,tol
C write(*,*)'Defina numero de ids. de fuente y receptor'
C read(*,*)nids,nidr
C write(*,*)'Defina archivo de gradientes'
C read(*,(a200))filegrd
C write(*,*)'Defina nombre para archivo de salida'
C read(*,(a200))raymin
```

```

c
c   Inicializando variables
c
do i=1,nids
do j=1,nidr
do k=1,nrays
mvds(k,i)=0.0
mvdr(k,j)=0.0
m(k,j,i)=0.0
r(j,i)=0.0
dists(k,i)=0.0
distr(k,j)=0.0
distrs(k,j,i)=0.0
enddo
enddo
enddo
c
c   Lectura y vectorizacion de cada rayo (fuente,receptor)
c
write(*,*)'ingreso_srt'
c
call orden_R(nids,nidr,nrays,nsegments,fileray,filetmp)
c
open(20,file='rayos_R.tmp')
do i=1,nids
do j=1,nrays
do p=1,nsegments
read(20,*)x(p),y(p),z(p),nn(p)
enddo
do p=1,nsegments
dists(j,i)=dists(j,i)+
* sqrt((x(p)-x(p-1))**2+(y(p)-y(p-1))**2+(z(p)-z(p-1))**2)
rayosx(p,j,i)=x(p)
rayosy(p,j,i)=y(p)
rayosz(p,j,i)=z(p)
enddo
do p=nsegments,nsegments
vdsx(j,i)=x(p)-x(p-1)
vdsy(j,i)=y(p)-y(p-1)
vdsz(j,i)=z(p)-z(p-1)
* mvds(j,i)=-sqrt((x(p)-x(p-1))**2+(y(p)-y(p-1))**2+
(z(p)-z(p-1))**2)
enddo
enddo
enddo
c
do i=1,nidr
do j=1,nrays
do p=1,nsegments
read(20,*)x(p),y(p),z(p),nn(p)
enddo
do p=1,nsegments
distr(j,i)=distr(j,i)+
* sqrt((x(p)-x(p-1))**2+(y(p)-y(p-1))**2+(z(p)-z(p-1))**2)
rayorx(p,j,i)=x(p)
rayory(p,j,i)=y(p)
rayorz(p,j,i)=z(p)
enddo
do p=nsegments,nsegments
vdrx(j,i)=x(p)-x(p-1)
vdry(j,i)=y(p)-y(p-1)
vdrz(j,i)=z(p)-z(p-1)
* mvdr(j,i)=-sqrt((x(p)-x(p-1))**2+(y(p)-y(p-1))**2+
(z(p)-z(p-1))**2)
enddo
enddo
enddo

```

```

c
close(20)
c
c   Lectura del archivo que contiene los gradientes de la interfase
c
open(10,file=filegrd)
c
do j=1,nrays
  read(10,*)vnx(j),vny(j),vnz(j)
enddo
c
do i=1,nids
  do j=1,nidr
    do p=1,nint
      do q=1,nrays
        vtnx(q,p)=vnx(q)
        vtny(q,p)=vny(q)
        vtinz(q,p)=vnz(q)
      enddo
    enddo
  enddo
enddo
c
close(10)
c
c   Calculo de los angulos entre gradientes y rayos fuente-receptor
c
do i=1,nids
  do j=1,nidr
    do k=1,nint
      do l=1,nrays
        *
        angles(l,j,i)=(acos((vtnx(l,k)*vdsx(l,i)+(vtny(l,k)*
          vdsy(l,i)+(vtinz(l,k)*vdsz(l,i)/mvds(l,i))))*180/pi
c
        *
        angler(l,j,i)=(acos((vtnx(l,k)*vdrx(l,j)+(vtny(l,k)*
          vdry(l,j)+(vtinz(l,k)*vdrz(l,j)/mvdz(l,j))))*180/pi
        enddo
      enddo
    enddo
  enddo
enddo
c
c   Discretizacion por similitud de angulos
c
ray=0
do i=1,nids
  do j=1,nidr
    do p=1,nrays
      angdif(p,j,i)=abs(angles(p,j,i)-angler(p,j,i))
c
      if(angdif(p,j,i).le.tol)then
        m(p,j,i)=p
        if(m(p,j,i).eq.p)then
          if(angles(p,j,i).ne.0.and.angler(p,j,i).ne.0)then
            ray=ray+1
            write(664,*)i,j,m(p,j,i),angles(p,j,i),angler(p,j,i)
          endif
        endif
      endif
c
    enddo
  enddo
enddo
c
c   Discretizacion por distancia minima de recorrido del rayo
c
do i=1,nids
  do j=1,nidr

```

```

dt=10000
do p=1,nrays
  if(p.eq.m(p,j,i))then
    distsr(m(p,j,i),j,i)=dists(m(p,j,i),i)+
*   distr(m(p,j,i),j)
    if(distsr(m(p,j,i),j,i).lt.dt)then
      dt=distsr(m(p,j,i),j,i)
      r(j,i)=p
      write(775,*)i,j,p,dt,distsr(m(p,j,i),j,i)
    endif
  endif
enddo
enddo
enddo

C
C   Escritura de archivo de salida
C
open(10,file=raymin)
C
write(10,*)(nids*nidr),nsegments
C
do i=1,nids
  do j=1,nidr
    if(r(j,i).ne.0.0)then
      do l=1,nsegments
        write(10,*)r(j,i),rayosx(l,r(j,i),i),
*       rayosy(l,r(j,i),i),rayosz(l,r(j,i),i)
      enddo
      do l=1,nsegments
        write(10,*)r(j,i),rayorx(l,r(j,i),j),
*       rayory(l,r(j,i),j),rayorz(l,r(j,i),j)
      enddo
    endif
  enddo
enddo
enddo

C
stop
end

C
C *****
C   Subrutina aplicada en el Programa para identificacion de
C   rayo de tiempo minimo de recorrido
C *****
C
C -----
C   subroutine orden_R(nids,nidr,nrays,nsegments,fileray)
C -----
C
C   include'param.par'
C
C   real xn(ntotal),yn(ntotal),zn(ntotal),
*   x(ntotal),y(ntotal),z(ntotal),
*   nn(ntotal)
C
C   character*200 fileray
C
C   open(10,file=fileray)
C   open(20,file='rayos_R.tmp')
C
C   nid=nids+nidr
C   total=(nid*nrays*nsegments)
C   q=1
C   do l=1,nid
C   do p=1,total

```

```
read(10,*)xn(p),yn(p),zn(p),nn(p)
if(q.eq.nn(p))then
x(p)=xn(p)
y(p)=yn(p)
z(p)=zn(p)
write(20,*)x(p),y(p),z(p),nn(p)
endif
enddo
rewind(10)
q=q+1
enddo
write(*,*)'listo'
c
      close(10)
close(20)
return
end
c
c
```


APÉNDICE D

Programa para visualizar rayos de tiempo mínimo y mapas de iluminación sísmica

```
% *****
%   Visualizador para rayos de tiempo minimo a a partir de Raytracing
% *****
%
%   El siguiente programa recibe el archivo de rayos de tiempo minimo
%   junto con el archivo que contiene el Modelo de Velocidades y grafica
%   los Mapas de Iluminacion sismica por nodos y por celdas iluminadas
% *****
%
%   Realizado por Jose M. Bryson. Para Trabajo Especial de Grado
%   Bajo la tutoria de Ing. Jhonny Calderon
%   Derechos Reservados: Universidad Central de Venezuela / PDVSA-Intevep
% *****
%
clf
clear all;
filelevel='Puntos_de_Modelo_de_Velocidades.out';
nlayers=n°interfases;
nlayer=n° interfase de interes;
nx=n° muestras en X;
dx=Discretización X;
dy=Discretización Y;
dz=Discretización Z;
bnx=Tamaño_de_bin_X;
bny=Tamaño_de_bin_y;
raymin='salida programa_anterior.sal';
nini=1;
ninc=1;
%
% reading input velocity field
%
fid=fopen(filelevel);
%
% plotting input velocity field
%
subplot(2,2,1:2)
for i=1:nlayers
    rpath=fscanf(fid,'%f %f %f\n',3);
    ninlines=rpath(2);
    for j=1:ninlines
        for k=1:nx-1
            rpath=fscanf(fid,'%f %f %f\n',3);
            zn(k,j)=rpath(1)*dz;
            xn(k,j)=(rpath(2)-1)*dx;
            yn(k,j)=(rpath(3)-1)*dy;
            cn(k,j)=(i);
        end
    end
end
```

```

end
surf(xn,yn,zn);
if i==1
    hold
end
end
%
% plotting adquisition surface (simul)
%
[x,y,z]=meshgrid(1:10:((nx-1)*dx),1:10:((ninlines+1)*dy),0);
surf(x,y,z);
colormap(jet);
caxis(caxis);
legend('First int.','Second int.');
```

```

shading flat
%
% reading input raymin file
%
fid=fopen(raymin);
%
rpath=fscanf(fid,'%f %f\n',2);
nrays=rpath(1);
ns=rpath(2);
%
for j=1:nrays
    for k=1:ns
        rpath=fscanf(fid,'%f %f %f %f\n',4);
        xs(k,j)=rpath(2)*1000.0;
        ys(k,j)=rpath(3)*1000.0;
        zs(k,j)=rpath(4)*1000.0;
    end
    for k=1:ns
        rpath=fscanf(fid,'%f %f %f %f\n',4);
        xr(k,j)=rpath(2)*1000.0;
        yr(k,j)=rpath(3)*1000.0;
        zr(k,j)=rpath(4)*1000.0;
    end
    for k=ns:ns
        xp(j)=rpath(2)*1000;
        yp(j)=rpath(3)*1000;
        zp(j)=rpath(4)*1000;
    end
end
%
mp=sortrows([zp' xp' yp'],[1 2 3]);
%
% searching points with more than one arrival
%
kio=[0 0 0];
conp=0;
while i<nrays
    [zk dk]=find(mp(:,1)==mp(i,1));
    j=min(zk);
    while j<max(zk)
        [zj dj]=find(mp(min(zk):max(zk),2)==mp(j,2));
        k=min(zj);
        while k<=max(zj)
            [zi di]=find(mp(min(zj):max(zj),3)==mp(k,3));
            if(length(zi)>1)
                conp=conp+1;
                kio=[kio;mp(i,1) mp(j,2) mp(k,3)];
                con(conp)=length(zi);
            end
            k=max(zi)+min(zj)+1;
        end
        j=max(zj)+1;
    end
end

```

```

i=max(zk)+1;
end
%
kio=kio(2:length(kio(:,1)),:);
za=kio(:,1);
xa=kio(:,2);
ya=kio(:,3);
%
% plot arrival points
%
for j=1:nrays
[xb,yb,zb]=meshgrid((xp(j)-(dx/2)):dx/2:(xp(j)+(dx/2)),...
    (yp(j)-(dy/2)):dy/2:(yp(j)+(dy/2)),zp(j));
cb=meshgrid((xp(j)-(dx/2)):dx/2:(xp(j)+(dx/2)),...
    (yp(j)-(dy/2)):dy/2:(yp(j)+(dy/2)),zp(j));
surf(xb,yb,zb,ones(size(cb))*150);
end
%
for j=1:conp
[xba,yba,zba]=meshgrid((xa(j)-(dx/2)):dx/2:(xa(j)+(dx/2)),...
    (ya(j)-(dy/2)):dy/2:(ya(j)+(dy/2)),za(j));
cba=meshgrid((xp(j)-(dx/2)):dx/2:(xp(j)+(dx/2)),...
    (yp(j)-(dy/2)):dy/2:(yp(j)+(dy/2)),za(j));
surf(xba,yba,zba,ones(size(cba))*con(j));
end
%
%
% plotting user-selected rays
%
for i=nini:ninc:nrays
plot3(xs(1:ns,i),ys(1:ns,i),zs(1:ns,i),'r-','linewidth',2)
end
%
for i=nini:ninc:nrays
plot3(xr(1:ns,i),yr(1:ns,i),zr(1:ns,i),'-','linewidth',2,'color',[20/255 50/255 180/255])
end
%
xlabel('Crosslines (m)')
ylabel('Inlines (m)')
zlabel('Depth (m)')
set(gca,'Zdir','reverse')
axis equal
title('Mapa de iluminacion de rayos')
%
%
% Interphase of arrival
%
subplot(2,2,3)
fid=fopen(filelevel);
%
for i=1:nlayers
rpath=fscanf(fid,'%f %f %f\n',3);
nl=rpath(1);
ninlines=rpath(2);
for j=1:ninlines
for k=1:nx-1
rpath=fscanf(fid,'%f %f %f\n',3);
if(nl==nlayer)
zn(k,j)=rpath(1)*dz;
xn(k,j)=(rpath(2)-1)*dx;
yn(k,j)=(rpath(3))*dy;
cn(k,j)=(i-i);
end
end
end
end
surf(xn,yn,zn,cn);
%if i==1

```

```

% hold
%end
end
hold
shading flat
%
%   Cover's Map
%
for j=1:nrays
    [xba,yba,zba]=meshgrid((xp(j)-(dx/2)):dx/2:(xp(j)+(dx/2)),...
        (yp(j)-(dy/2)):dy/2:(yp(j)+(dy/2)),zp(j));
    cba=meshgrid((xp(j)-(dx/2)):dx/2:(xp(j)+(dx/2)),...
        (yp(j)-(dy/2)):dy/2:(yp(j)+(dy/2)),zp(j));
    surf(xba,yba,zba,ones(size(cba))*1);
end
%
for j=1:conp
    [xb,yb,zb]=meshgrid((xa(j)-(dx/2)):dx/2:(xa(j)+(dx/2)),...
        (ya(j)-(dy/2)):dy/2:(ya(j)+(dy/2)),za(j));
    cb=meshgrid((xa(j)-(dx/2)):dx/2:(xa(j)+(dx/2)),...
        (ya(j)-(dy/2)):dy/2:(ya(j)+(dy/2)),za(j));
    surf(xb,yb,zb,ones(size(cba))*con(j));
end
caxis([0,max(con)])
colorbar
xlabel('Crosslines (m)')
ylabel('Inlines (m)')
zlabel('Depth (m)')
set(gca,'Zdir','reverse')
axis equal
title('Mapa de iluminacion por nodos')
%
%   BIN MAP (test)
%
subplot(2,2,4)
%
%
[X,Y]=meshgrid(1:bnx:(nx*dx),1:bny:((ninlines+1)*dy));
[XI,YI,ZI] = griddata(xn,yn,zn,X,Y);
hold
arriv=[xp' yp' zp'];
[bi bj]=size(X);
i=1;
j=1;
%
for i=1:bi
    for j=1:bj
        cuenta=0;
        for k=1:length(arriv(:,1))
            if arriv(k,1)>X(i,j) & arriv(k,1)<X(i,j+1) & arriv(k,2)>Y(i,j) & arriv(k,2)<Y(i+1,j)
                cuenta=cuenta+1;
            end
        end
        fold(i,j)=cuenta;
    end
end
%
surf(XI,YI,ZI,fold)
colorbar
axis equal
%
%
colormap(jet);
xlabel('Inlines (m)')
ylabel('Crosslines (m)')
zlabel('Depth (m)')
set(gca,'Zdir','reverse')

```

```
title('Mapa de Cobertura por celda (bin)')  
axis equal  
%
```