

Creación de una Comunidad para el Desarrollo Colectivo de Software Libre para Migración de Datos Sísmicos

Juan Carlos Galeano Estrella, Sebastián Roa Prada
Maestría en Software Libre Universidad Autónoma de Bucaramanga
Bucaramanga, Colombia
jgaleano872@unab.edu.co
sroa@unab.edu.co

Abstract—There are times when the market price of oil does not meet the extraction costs, which makes it necessary to reduce, or even stop, crude production in a vast number of oil fields worldwide. This reduction in production results in lower investments in exploration activities. Therefore, it is necessary to optimize costs, reduce expenses and decrease the uncertainty in the exploration activities, especially when the resources for exploration are scarce due to low oil prices. This work proposes the creation of an open knowledge community to encourage the development of free software applications, focused on the analysis of seismic data for hydrocarbon prospecting, as an alternative to reduce the uncertainty, and consequently, the costs of oil exploration activities. This community facilitates the collaborative development by anyone interested in the subject and does not have restrictions on access to the code. To start the community, an application composed of several libraries is developed, which main objective is to carry out the post-stacked seismic migration by the Kirchhoff method. This piece of software features the functionality to read and export files written in the standard SEG-Y binary format, and to generate seismic images. The application has a user manual and graphic interface to facilitate its use.

Keywords - migration, seismic, seismogram, Kirchhoff, oil.

Resumen—Hay momentos en que el precio del mercado de petróleo no cubre los costos de extracción, lo que hace necesario reducir o incluso detener la producción de crudo en una gran cantidad de campos petrolíferos en todo el mundo. Esta reducción en la producción resulta en una menor inversión en actividades de exploración. Por lo tanto, es necesario optimizar los costos, reducir los gastos y disminuir la incertidumbre en las actividades de exploración, especialmente cuando los recursos para la exploración son escasos debido a los bajos precios del petróleo. Este trabajo propone la creación de una comunidad de conocimiento abierto para fomentar el desarrollo de aplicaciones de software libre, enfocadas en el análisis de datos sísmicos para la prospección de hidrocarburos, como una alternativa para reducir la incertidumbre y en consecuencia, los costos de las actividades de exploración petrolera. Esta comunidad facilita el desarrollo colaborativo por parte de cualquier persona interesada en el tema y no tiene restricciones de acceso al código. Para iniciar la comunidad se desarrolla una aplicación compuesta por varias bibliotecas, cuyo principal objetivo es llevar a cabo la migración sísmica post-apilada por el método de Kirchhoff. Esta pieza de software presenta la funcionalidad para leer y exportar archivos escritos en el formato binario estándar

SEG-Y, y para generar imágenes sísmicas. La aplicación tiene un manual de usuario e interfaz gráfica para facilitar su uso.

Palabras clave - migración, sísmica, sismograma, Kirchhoff, petróleo.

I. Introducción

La variación de precio del petróleo trae momentos en los que el bajo costo del barril obliga a reducir o incluso detener la producción de crudo en una gran cantidad de campos petrolíferos en todo el mundo. Esta reducción en la producción resulta en una menor inversión en actividades de exploración. Por lo tanto, es necesario optimizar los costos, reducir los gastos y disminuir la incertidumbre propia de las actividades de exploración, especialmente cuando los recursos para la exploración son escasos debido a los bajos precios del petróleo. Se inicia el proyecto con la búsqueda de soluciones que sean modificables, y por lo tanto adaptables a las necesidades y a las circunstancias del momento, ya sea hablando en términos de características físicas del terreno, condiciones climáticas o datos propios de las lecturas de datos sísmicos. Actualmente se tiene que el software libre es la mejor alternativa para tomar lugar en la solución a estas necesidades, y mucho mejor si es complementado por medio de una comunidad, que permita desarrollo y crecimiento colectivo.

De acuerdo a esto se observa la oportunidad en la creación e implementación de una comunidad dedicada al continuo desarrollo de aplicaciones libres, cuyo objetivo sea el apoyo al área del análisis de datos sísmicos para la prospección de hidrocarburos. Que brinde soluciones a las necesidades actuales del campo de la exploración, favoreciendo el desarrollo de conocimientos colectivos aportados por cualquier persona interesada en el tema. Sea un estudiante con poca experiencia o un profesional experto en este campo, si se encuentran interesados en el tema, pueden aportar su tiempo y conocimientos para el avance del mismo. También es necesario que el código fuente de cada aplicación desarrollada pueda ser modificado y mejorado libremente. Esta es una propuesta que permite no sólo la generación

de nuevo conocimiento, sino que favorece en gran medida a la exploración y explotación de hidrocarburos.

Para dar un inicio funcional a la comunidad se desarrolla una primera versión de un software cuyo objetivo principal es realizar el proceso de migración sísmica, por lo cual se inicia definiendo y analizando el proceso correspondiente a la sísmica por reflexión. Se parte de la adquisición de datos por medio de una fuente generadora de ondas y geófonos. Estos datos se recogen en cintas o discos duros dependiendo del sistema de registro y de los instrumentos disponibles [1]. Luego los datos se transforman en un archivo binario SEG-Y. El paso siguiente es aplicar un conjunto de procesos para análisis de datos con el fin de mejorar la calidad y reducir el ruido. Para finalizar el proceso se aplica la migración sísmica, buscando corregir a la ubicación real los puntos reflectores y los ángulos de buzamiento, éste es el proceso en el cual se centra el algoritmo y el software desarrollado.

Se analizan las opciones existentes para aplicar al proceso de migración con el fin de establecer la mejor alternativa y se aprecia la necesidad de incluir librerías para observar los resultados por medio de la creación de imágenes sísmicas, y para el manejo de los datos, por medio de la lectura y escritura de archivos en formato binario SEG-Y.

II. Características de la Comunidad

Una comunidad de software libre permite un ambiente de cooperación abierta a toda la red, en donde cualquier persona con intereses comunes puede participar, ya sea ofreciendo la disponibilidad del código fuente para estudiarlo y continuar con el desarrollo de las aplicaciones, o apoyando a los desarrolladores con conocimientos específicos en el tema. Pero es claro que su éxito también depende de que se establezcan algunas características que permitan la comunicación y regulen el funcionamiento de la comunidad. Dando respuesta a estas características se debe crear una lista de correo y un repositorio remoto.

A. Lista de Correo

A pesar de ser una comunidad especialmente enfocada en el análisis de datos sísmicos hacia la prospección de hidrocarburos, es libre y por lo tanto no presenta exigencias de ningún tipo para el registro, ingreso, utilización o aporte por parte de sus miembros. Sin embargo, toda comunidad requiere control de sus actividades, por lo tanto exige la creación de un grupo como lista de correos que regule su funcionamiento, identifique modificaciones o fallos, documente las actualizaciones y principalmente que brinde soporte en su funcionamiento.

B. Repositorio Remoto

También se debe contar con un sistema de control de versiones y un repositorio remoto con el fin de garantizar la disponibilidad del código fuente para cualquier persona que lo requiera, así como el acceso a sus diferentes versiones y el historial de modificaciones. Una característica muy importante que ofrece un repositorio remoto para la comunidad libre es la posibilidad de realizar pruebas y corrección de errores en todas las diferentes versiones de sistemas operativos y hardware disponibles. Esto debido a que cada participante de la comunidad presenta características de hardware y software diferentes, pero el desarrollo se presenta bajo las mismas condiciones.

III. Software de la Comunidad

Como ya se dijo antes, el objetivo de la comunidad es el desarrollo y soporte de software libre para el análisis de datos por medio de la migración sísmica, y para dar inicio a este objetivo, se desarrolla la primera aplicación de este tipo como se describe a continuación.

La aplicación consiste en la solución al problema de migración sísmica post-apilada por el método de Kirchhoff. Se compone de cuatro librerías, cada librería desarrolla un paso del proceso. La primera lee datos reales ingresados por medio de un archivo binario SEG-Y, la segunda aplica el proceso de migración, la tercera exporta los resultados a otro archivo binario SEG-Y, y la cuarta crea las imágenes sísmicas según los datos antes y después de la migración. Las librerías se desarrollaron en lenguaje JAVA bajo licencia GPLv3.

A. Librería para Lectura de SEG-Y

El formato generalizado para el almacenamiento de datos sísmicos que utilizan las empresas dedicadas a la toma de datos y/o análisis sísmico, el más aceptado en la industria de la exploración sísmica y el recomendado por la sociedad de exploración geofísica es SEG-Y [2]. Consiste en un formato binario organizado que brinda el acceso a los datos de forma ordenada, segura y ágil. Algunas características muy importantes para entender el sistema binario en el que se encuentran almacenados los datos del formato SEG-Y son el tamaño de datos que posee el encabezado del documento, el encabezado de cada traza y sus datos correspondientes. La información necesaria para entender dicho formato se encuentra en el manual SEG-Y [3].

El algoritmo realizado para la lectura del archivo consiste en leer cada byte y agruparlos de a 2 o 4, con el fin de formar un número natural. Este proceso se realiza de acuerdo al orden en que se han almacenado los datos, generalmente, y para este caso, se utiliza el formato big-endian. El formato big-endian es el más común para este tipo de archivo y se describe en la figura 1.

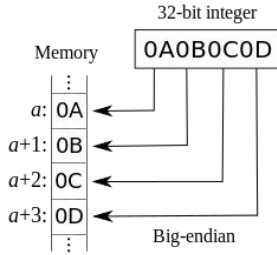


Fig. 1. Formato big-endian

El proceso de lectura y conversión de los datos almacenados en un archivo SEG-Y consiste en conocer los grupos de bytes que contienen la información del proyecto, de tal forma que se definan los grupos de valores que corresponden a la posición indicada de la siguiente manera:

Tabla 1 Descripción de un archivo binario SEG-Y

Byte Inicial	Byte Final	Contenido
0	3200	Encabezado en forma de texto, escrito en formato EBCDIC.
3221	3222	Número de datos por traza.
3225	3226	Formato en el que se encuentran los datos.
3227	3228	Fold.
3513	3520	Número de trazas.
3601		Inicio de datos para cada traza.
0	240	Encabezado de la traza.
241	...	Contenido de la traza, su tamaño depende del número de datos por traza.

Conociendo estas posiciones se pueden agrupar los bytes correspondientes a cada valor de cada traza y se aplica un algoritmo simple para la conversión de los bytes a números naturales, obteniendo así cada uno de los datos que formarán a cada una de las trazas del archivo.

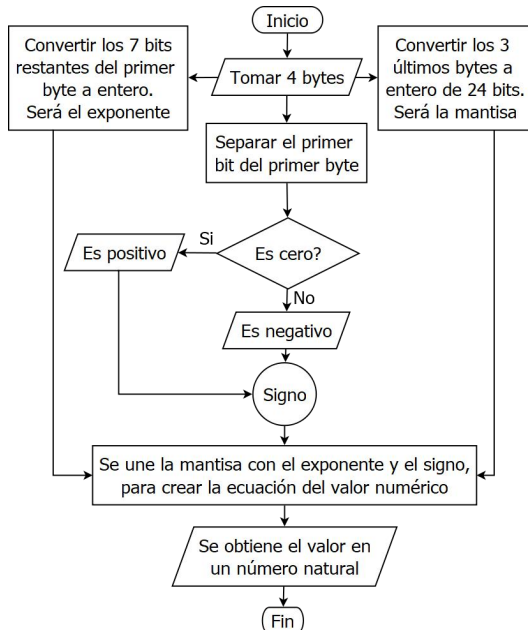


Fig. 2. Algoritmo para conversión de big-endian

Finalmente se organizan los datos en un arreglo de enteros en dos dimensiones, en donde se encuentran todas las trazas y los datos de cada una.

B. Librería para Migración

Para entender el objetivo de la migración sísmica es necesario describir el proceso de análisis de datos sísmicos. El método de análisis de datos sísmicos más utilizado actualmente es el de reflexión.

El método de reflexión se divide en tres etapas, pre-apilado, apilado y post-apilado:

El pre-apilado consiste en el reordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos de punto reflector común o CMP (CommonMidPoint). Seguidamente se aplica un algoritmo de deconvolución, el cual es usado para aumentar la resolución temporal de las reflexiones, de tal forma que se reduzca el ruido y se aumente la calidad de los datos. Luego se aplica un algoritmo para realizar correcciones dinámicas (NMO), el cual transforma la trayectoria hiperbólica de los eventos de reflexión en una línea horizontal que da forma a cada traza. Finalmente se aplica un algoritmo de análisis de velocidad, el cual tiene efecto sobre los conjuntos de punto reflector común con el fin de mejorar la relación señal/ruido.

La etapa del apilado consiste en sumar las trazas que tienen un mismo punto reflector, con el fin de obtener una sección sísmica que servirá para representar una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo y con desplazamiento u "offset" igual a cero, como puede observarse en la Fig. 3.

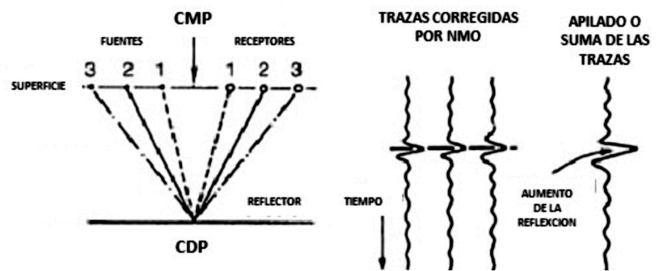


Fig. 3. Apilado de trazas para un mismo CMP[4].

La etapa final es la de post-apilado, la cual inicia con un algoritmo que nuevamente convolucionará las trazas. Este proceso es necesario para corregir las pérdidas y eliminar el ruido generado durante el apilado en frecuencias altas y bajas. Por último se aplica el proceso de migración.

La migración sísmica es un proceso que se hace necesario al momento de corregir la ubicación real de los reflectores, lo que se analiza por medio de las condiciones de la imagen, de los vectores,

los puntos de reflexión y los ángulos de buzamiento, con el fin de obtener mejores recursos gráficos al momento de realizar el análisis de resultados. Un ejemplo de los resultados obtenidos con la migración se observa en la Fig. 4.

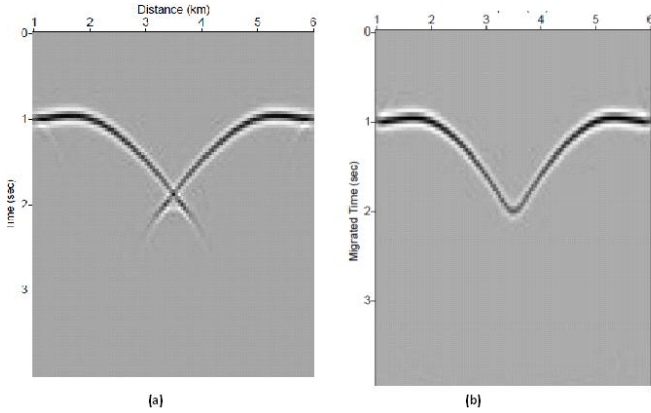


Fig. 4. Corrección de la ubicación real de los reflectores por medio de la migración sísmica [5]

La migración es un proceso que como se dijo antes corrige la ubicación real de los reflectores, por lo tanto, puede aplicarse antes o después del apilado. Sin embargo, su aplicación durante el post-apilado genera menor uso de recursos debido a que la cantidad de trazas se reduce significativamente durante el proceso de apilado.

El proceso de migración se basa en la solución integral de la ecuación escalar de ondas (3):

$$A = \frac{\cos\theta}{r^2} P_{entrada} \left(x_{entrada}, \tau = 0, t - \frac{r}{v_{rms}} \right) \quad (1)$$

$$B = \frac{\cos\theta}{v_{rms} r} \frac{\partial}{\partial r} P_{entrada} \left(x_{entrada}, \tau = 0, t - \frac{r}{v_{rms}} \right) \quad (2)$$

$$P_{salida}(x, \tau, t) = \frac{1}{2\pi} \int [A + B] dx \quad (3)$$

En donde $P_{salida}(x, \tau, t)$ se refiere al campo propagado para cualquier posición (x, τ) , donde x es la distancia horizontal en la superficie en unidades de longitud y τ es la distancia vertical o profundidad. $P_{entrada}(x_{entrada}, \tau = 0, t)$ se refiere a la sección de incidencia normal, medida en superficie.

Entonces:

θ : Se refiere al ángulo de incidencia de la onda.

v_{rms} : es la velocidad RMS en un punto (x, τ)

$$r = [(x_{entrada} - x)^2 + \tau^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

t : es el tiempo de la muestra en segundos, representado por los siguientes dos casos:

- Si la sección esta apilada con distancia fuente-receptor igual a cero, entonces:

$$t = \left[t_0^2 + \left(\frac{x}{2v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

- Si los datos están en CMP entonces:

$$t = \left[\left(\frac{t_0^2}{4} + \frac{x_s^2}{v^2} \right)^2 + \left(\frac{t_0^2}{4} + \frac{x_r^2}{v^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

t_0 : es el tiempo donde se tomó la muestra, es medido en segundos y corresponde a la sección en donde la distancia fuente-receptor es igual a cero.

v : Velocidad media de la traza en la posición de distancia fuente-receptor igual a cero.

x_s : Distancia de la fuente a su posición en distancia fuente-receptor igual a cero.

x_r : Distancia del receptor a su posición en distancia fuente-receptor igual a cero.

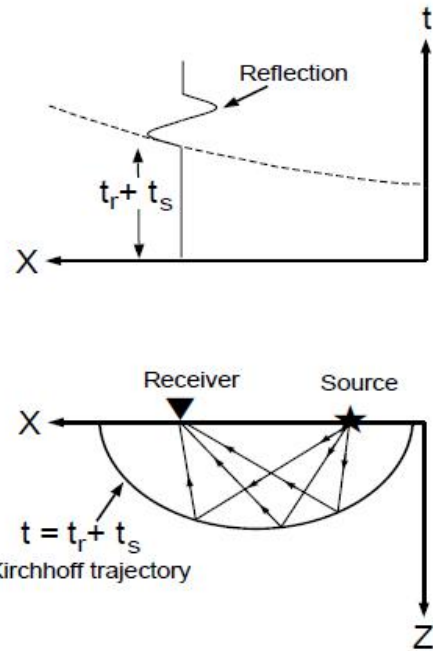


Fig. 5. Velocidad media constante, Trayectoria Kirchhoff en tiempo de viaje[6].

Actualmente existen diferentes métodos y ecuaciones para realizar la migración, pero el método más aceptado debido a la calidad de sus resultados y a la amplitud máxima de ángulos de buzamiento es el método basado en la solución a la ecuación de onda por medio de la ecuación de Kirchhoff.

Según Vásquez [7], este método se basa en la suma de las difracciones, y consiste en generar y colapsar hiperboloides de difracción de máxima convexidad y curvatura. La sumatoria depende de la velocidad, pero antes de ser aplicada se le debe añadir a cada valor un factor de escala y cambio de fase. Esto hace de la migración un proceso que toma bastante tiempo y tiene alto consumo de recursos, especialmente si se realiza antes del apilado. En este caso se trabaja con un algoritmo de migración sísmica por el método Kirchhoff para post-apilado, lo que simplifica el uso de recursos.

El algoritmo desarrollado se inicia apoyándose en el algoritmo de Jon F. Clarebout, publicado en 1997 [5], y se basa en la ecuación de la relación círculo-hipérbola (7). Al reemplazar la variable τ , por z en la ecuación (8), se asemeja a su equivalente de la profundidad en una gráfica en 2D. Posteriormente se despeja el tiempo, formando así la ecuación (9), que es el equivalente a la conversión de la profundidad al tiempo. Finalmente se aplican los resultados a la ecuación (10) para obtener el número de traza que se debe corregir.

$$t^2 = \tau^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (7)$$

$$\tau = z_0 + dz \cdot nt \quad (8)$$

$$t = \sqrt{(z_0 + dz \cdot nt)^2 + \left(\frac{x-y}{v}\right)^2} \quad (9)$$

$$ntc = 0.5 + \frac{t - t_0}{dt} \quad (10)$$

En donde:

- z_0 : Profundidad inicial (m).
- dz : Distancia vertical (m).
- nt : Número de traza de la iteración.
- ntc : Número de traza que se debe corregir.

El algoritmo desarrollado inicia con la lectura de los datos requeridos en el proceso, por lo tanto se lee el archivo de propiedades y cargan los valores de dx, dt, t_0 , y de velocidad media. Esto quiere decir que se debe contar con estos valores dependiendo de cada archivo o proyecto. En caso de no contar con estos datos, existe la posibilidad de utilizar los valores predeterminados. Los valores predeterminados se obtuvieron por medio de pruebas con varios archivos de datos en forma de ensayo y error. Estos valores funcionaron en la mayoría de casos y se establecieron por medio de la observación de las imágenes obtenidas en cada caso.

Tabla II
Valores predeterminados experimentalmente

Variable	Valor
dx	0.04
dt	0.04
t_0	1.0
<i>velocidad media</i>	0.1

El proceso continúa realizando iteraciones en tres niveles que “barren” cada traza y cada dato de cada traza, con el fin de hallar los valores de las posiciones que se van a utilizar en la sumatoria de Kirchhoff; creando finalmente un nuevo arreglo de trazas en donde cada valor ha sido sometido al problema de la inversión sísmica.

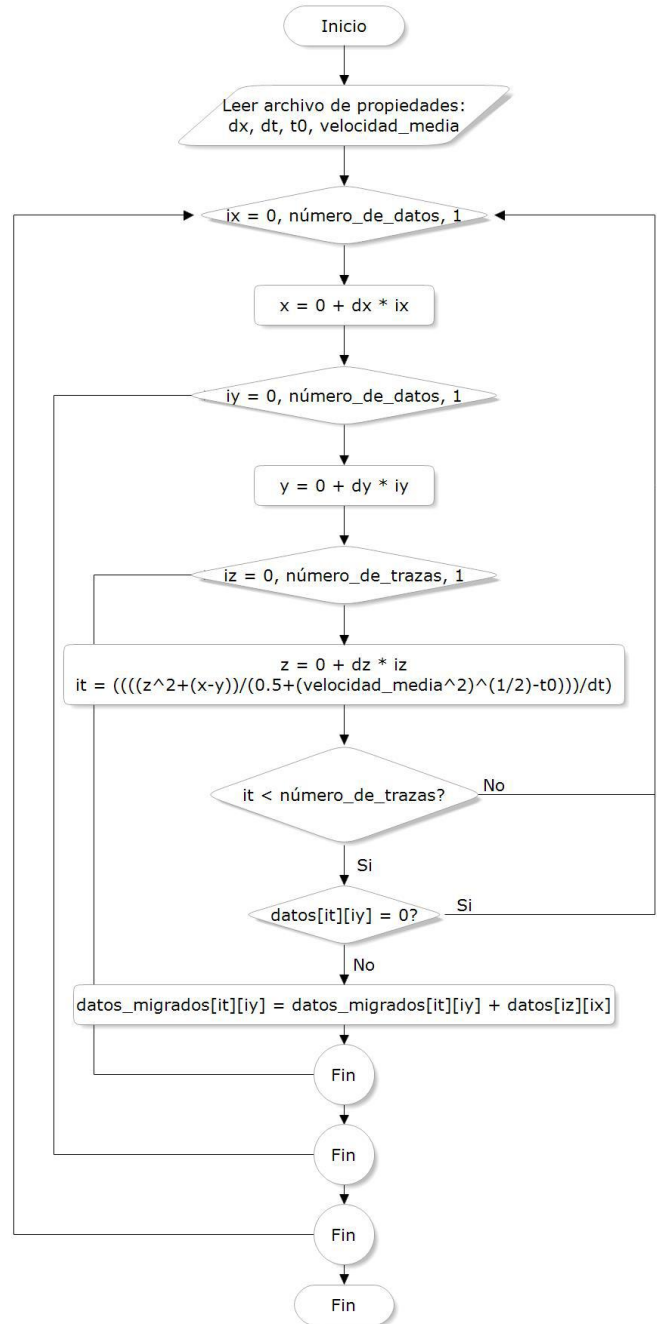


Fig. 6. Algoritmo desarrollado con base en el de Jon F. Clarebout, publicado en 1997[5]

C. Librería para Generación de Imágenes

Al finalizar el proceso se cuenta con los datos ordenados en trazas. La generación de imágenes es necesaria para poder evaluar los

resultados del proceso. Por lo tanto, se desarrolla una librería cuya finalidad es graficar un arreglo en dos dimensiones.

El arreglo tiene valores negativos que corresponden al tiempo de entrada de la onda antes de la reflexión. Estos datos se grafican hacia la izquierda. Los datos positivos corresponden al tiempo que le toma a la onda volver a salir después de la reflexión. Estos datos por su parte se grafican hacia la derecha.

IV. Resultados

La lista de correos se crea por medio de un grupo de listas de correo de Google, bajo el nombre de “SegYSeismicProcessor”, en donde se permite el ingreso de cualquier persona, así como realizar publicaciones y ver todos los temas disponibles sin restricciones. El grupo puede encontrarse en la dirección: <https://groups.google.com/a/unab.edu.co/d/forum/seg-y-seismic-group>.

El repositorio se crea en la plataforma para desarrollo colaborativo “GitHub” como repositorio público, con licencia GPLv3, el cual puede encontrarse en el enlace: <https://github.com/jucagal/SegY-Seismic-Processor>. La aplicación se desarrolló en lenguaje Java con los algoritmos descritos y se sube al repositorio.

Como análisis de resultados se observa en la Fig. 7 la imagen de los datos leídos en el archivo SEG-Y sin ningún tipo de mejora y en la Fig. 8 los datos después de aplicar el proceso de migración sísmica. Pueden apreciarse varios cambios muy notables. En especial, se pueden observar reducciones en los ángulos de buzamiento, haciendo ver zonas con mayor reflectividad. También pueden observarse aumentos en las amplitudes de las trazas.

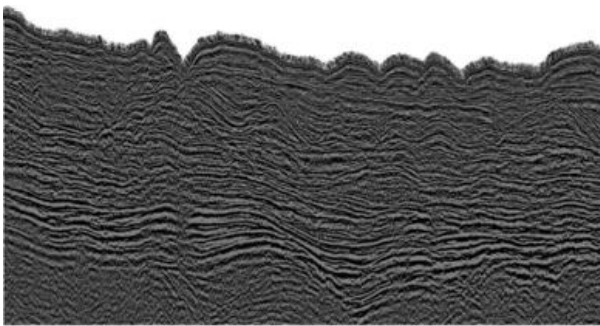


Fig. 7. Imagen de los datos leídos (antes de la migración).

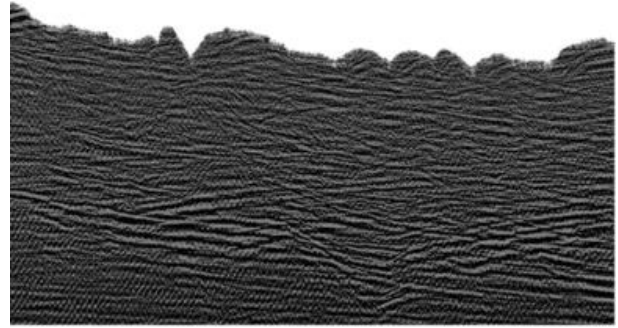


Fig. 8. Imagen después de la migración.

V. Comparación de Resultados

Se realizó un análisis a modo comparativo con el fin de validar los resultados presentados por las aplicaciones que realizan procesos similares. Para este caso se realiza la comparación de los resultados de la migración sísmica post-apilado, y de una lista de aplicaciones se observa que únicamente dos aplicaciones realizan el proceso en cuestión, Madagascar [8] y CWP/SU [9]. Sin embargo Madagascar se basa en las librerías de migración que tiene CWP/SU, por lo que únicamente se compara con los resultados de éste último.

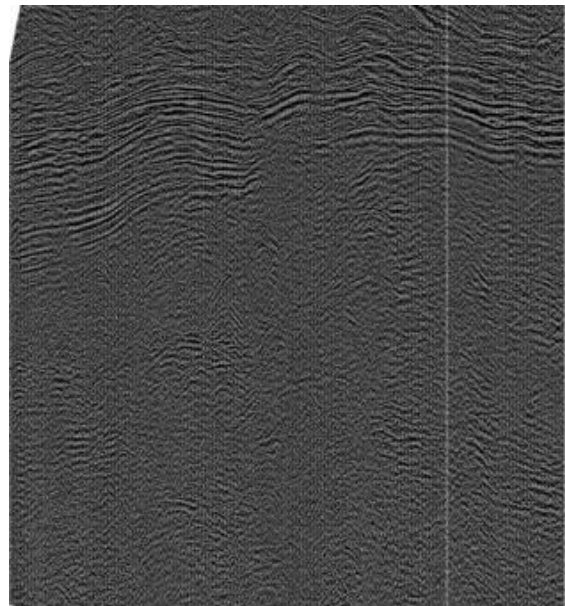


Fig. 9. Resultados antes de la migración con el algoritmo desarrollado.

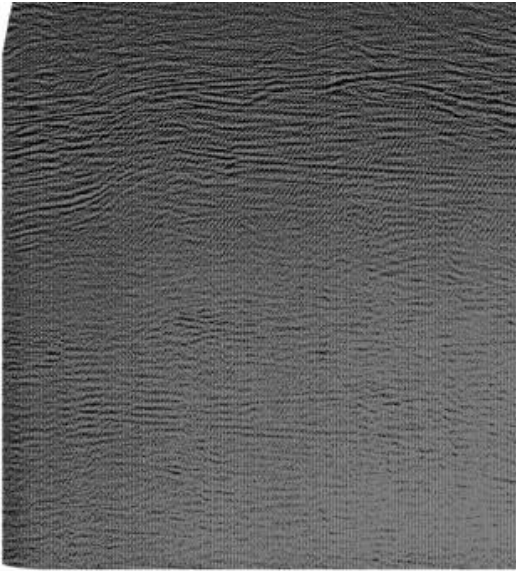


Fig. 10. Resultados después de la migración con el algoritmo desarrollado.

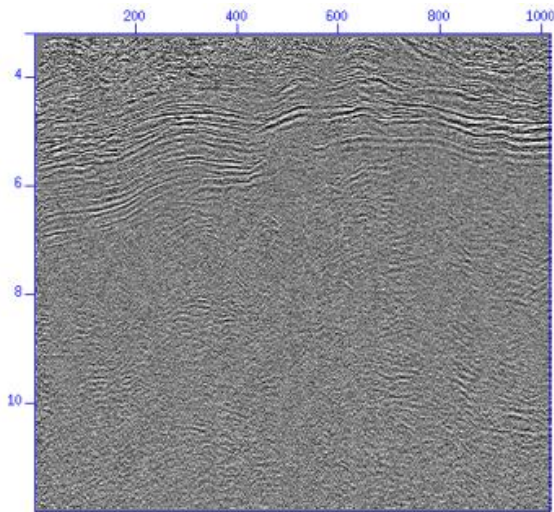


Fig. 11. Resultados antes de la migración con CWP/SU.

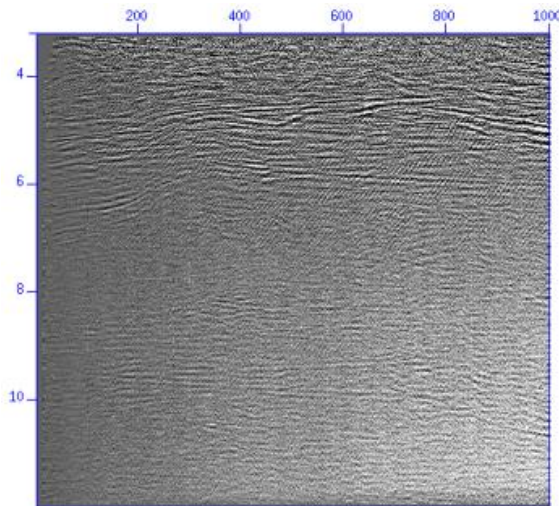


Fig. 12. Resultados después de la migración con CWP/SU.

En la Fig. 9 se presenta la imagen obtenida por medio del algoritmo de lectura desarrollado sin ningún tipo de mejora o proceso adicional. En la Fig. 10 se puede observar la imagen con los resultados de la migración aplicando el algoritmo desarrollado. En la Fig. 11 se aprecia la imagen obtenida por medio del software CWP/SU luego de aplicar la conversión del formato SEG-Y a SU, es decir solamente con la lectura de los datos (los valores horizontales corresponden al número de traza y los verticales a la profundidad en tiempo). En la Fig. 12 se encuentra la imagen luego de aplicar la migración en CWP/SU (los valores horizontales corresponden al número de traza y los verticales a la profundidad en tiempo). Finalmente pueden apreciarse coincidencias entre las imágenes migradas de ambas aplicaciones (Fig. 10 y Fig. 12). Algunas similitudes se observan en las amplitudes de las trazas, en la ubicación de los puntos reflectores, en los aumentos de ángulos de buzamiento y también se observan similitudes en las zonas con mayor reflectividad.

Cabe destacar que la aplicación del proceso de migración con los dos programas tomó un tiempo aproximado de 20 minutos, correspondientes a las primeras 1000 trazas del archivo SEG-Y utilizado. Sin embargo, se aprecia mayor complejidad al realizar el proceso por medio de CWP/SU, teniendo en cuenta que se debe aplicar un proceso consecutivo para cumplir con la migración:

- Convertir el archivo binario SEG-Y a SU por medio de “segymread”.
- Crear la tabla de velocidades por medio de “makevel”.
- Crear las tablas de tiempo de viaje por medio de “rayt2d”.
- Aplicar la migración por medio de “sukdmig2d”.
- Crear la imagen por medio de “suximage”.

VI. Conclusiones

Una comunidad libre favorece el desarrollo colaborativo y la generación de conocimiento, por lo que se crea la comunidad con el objetivo de apoyar el desarrollo de software para análisis de datos sísmicos, y se aporta como una primera aplicación “SegYSeismicProcessor”, la aplicación desarrollada para migración sísmica post-apilado por medio de la ecuación de Kirchhoff, con el fin de fomentar interés y aportar al desarrollo colaborativo de la comunidad.

El algoritmo de migración post-apilado plantea un proceso que mejora los resultados del análisis de datos sísmicos cuando se pretende enfocar hacia la prospección de pozos de petróleo. Por medio de este proceso es posible observar que los resultados obtenidos varían de acuerdo al tipo de dato ingresado, al ángulo de incidencia y a la velocidad media, entre otros aspectos generales, y de acuerdo a esto puede que el efecto de la migración sea reducido en algunos casos.

Es muy importante que el software tenga la capacidad de leer y escribir archivos SEG-Y para que su aplicación sea efectiva y sea aprovechable; esto porque en la actualidad existen muchas aplicaciones libres que pretenden favorecer el análisis sísmico. Sin embargo, dichas aplicaciones se encuentran enfocadas a funcionalidades específicas, o realizan la lectura de los datos sísmicos por medio de un archivo en un formato propio, no en uno generalizado o estandarizado.

Según el análisis realizado a las aplicaciones existentes, de forma comparativa se pueden resaltar muchas características diferenciadoras que lograrán el éxito del software desarrollado, dentro de ellas se pueden resaltar:

- No requiere instalación, sin embargo requiere tener instalada una máquina virtual JAVA, sistema con el que cuentan la mayoría de dispositivos y sistemas operativos.
- Cuenta con una interfaz gráfica que facilita el acceso a todas las funcionalidades del software.
- Permite leer y escribir archivos SEG-Y, un estándar generalizado para el manejo de datos sísmicos.
- Grafica los datos sísmicos antes y después de aplicar el proceso de migración sísmica.

Se observa una alta correlación entre los resultados obtenidos con el software desarrollado y los obtenidos con otro software equivalente, lo cual introduce confiabilidad al uso de este software en aplicaciones industriales reales.

Finalmente se aprecia una relación similar en el tiempo que dura el proceso en ambos software, el cual depende directamente del número de trazas a procesar. Sin embargo se observa una gran ventaja del software desarrollado en cuanto a los pasos requeridos por otro software y la complejidad para aplicar el proceso de migración.

Referencias

- [1] Y. Herrera y N. Cooper, Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia, Bogotá, Colombia Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [2] Society of Exploration Geophysicists, «Report on recommended standards for digital tape formats,» *Geophysics*, vol. 40, n° 02, pp. 344-352, 1975.
- [3] SEG Technical Standards Committee, «SEG-Y_r2.0: SEG-Y revision 2.0 Data Exchange format,» Society of Exploration Geophysicists, Houston, Texas, 2017.
- [4] H. S. Benítez R., «Evaluación de métodos de migración sísmica an del apilamiento en profundidad basados tanto en la integral de Kirchhoff como en la ecuación de onda en datos reales (Proyecto C Negro 07G 3D) (tesis de pregrado),» Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2012.
- [5] Stanford Exploration Project, «SEP,» 18 11 1997. [En línea].

Available:

http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep73/jon1.kirch/paper_html/. [Último acceso: 18 12 2017].

- [6] S. Chávez Pérez, «Enhanced Imaging of Fault Zones in Southern California From Seismic Reflection Studies,» University of Nevada, Reno, Nevada, 1997.
- [7] J. A. Vázquez, «Análisis de diferentes algoritmos de migración post-apilamiento sobre datos sísmicos bidimensionales al oeste del estado barinas (Tesis pregrado),» Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2010.
- [8] Multiple free proposals, Madagascar (Version 2.0) {Software}, Obtenido de: <http://www.ahay.org>, 2017.
- [9] Colorado School of Mines, CWP/SU: Seismic Unix (Version 44) {Software}, Obtenido de: <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/index.html>, 2007.
- [10] J. C. Bancroft, «A visual relationship between Kirchhoff migration and seismic,» CREWES Research Report - Volume 14, Calgary, Canada, 2002.
- [11] J. C. Bancroft, «Seismic Imaging: Prestack,» *Recorder (Official publication of the Canadian Society of Exploration Geophysicists)*, pp. 09-33, 2002.
- [12] E. Bonomi and G. Cabitza, "Migration of seismic data," *Journal of Statistical Physics*, pp. 703-723, 1994.
- [13] I. Gazdag y P. Sguazzero, «Migration of Seismic Data,» *Proceedings of the IEEE*, pp. 1302-1315, 1984.
- [14] R. M. Martínez Macedo, «Aplicaciones de Exploración y Producción de Petróleo y Gas en Plataformas Cluster Heterogéneas y Grid (Tesis pregrado),» Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 2008.
- [15] Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales, «RACEFN Glosario de Geología,» 26 01 2016. [En línea]. Available: http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm. [Último acceso: 08 05 2016].
- [16] Schlumberger Limited, «Oilfield Glossary en Español,» 12 06 2006. [En línea]. Available: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>. [Último acceso: 08 05 2016].
- [17] Veritas Caspian LLP, «Veritas Caspian Web,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.veritas-caspian.kz/pages/70/>. [Último acceso: 27 05 2016].
- [18] M. D. Sacchi, D. R. Velis y A. H. Cominguez, «Minimum entropy deconvolution with frequency-domain constraints,» *Geophysics*, pp. 938-945, 1994.
- [19] C. A. Linares Moreno, «Paralelización de algoritmos en plataformas distribuidas: caso de estudio en procesamiento sísmico en la industria petrolera. (Tesis de maestría),» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2014.
- [20] C. Fajardo, J. Castillo Villar y C. Pedraza, «Reducción de los tiempos de cómputo de la Migración Sísmica usando FPGAs y GPGPUs: Un artículo de revisión,» *Ingeniería y Ciencia*, p. 261-293, 2013.