

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE CAMPO PARA LA ADQUISICION 3D DE DATOS SISMICOS

Patricia M. Gauzellino¹, Ángel F. Queizán², Jose Herskovits³ y Federico G. E. Späth⁴

¹Depto. de Geofísica Aplicada, Fac. de Cs. Astro. y Geofísicas, UNLP. gauze@fcaglp.unlp.edu.ar

²Fac. de Ingeniería, UNLP y UTN Reg. La Plata. aqueizan@frlp.utn.edu.ar

³Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil. jose@optimize.ufrj.br

⁴Fac. de Cs. Astro. y Geofísicas, UNLP. fedes@carina.fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Las etapas de adquisición, procesamiento e interpretación de los datos sísmicos en la exploración de hidrocarburos están estrechamente relacionadas. Los errores cometidos en la determinación de los parámetros de campo para la registración de los datos, difícilmente puedan ser subsanados por el procesamiento y por lo tanto, terminan condicionando a la interpretación. Dado que la mejor elección de los parámetros del tendido sísmico es la que logra el propósito de la exploración geofísica minimizando costos y tiempo en la captura y procesamiento de los datos, el presente trabajo aborda esta problemática como un proceso de optimización. La idea es hallar el mínimo de una función objetivo que representa los costos de un relevamiento terrestre 3D para un tendido ortogonal, sujeta a restricciones operacionales (movimientos de fuentes y receptores) y requerimientos geofísicos (suma o fold, offset y azimutes). Los resultados se obtienen mediante la aplicación del algoritmo: FAIPA (Feasible Arc Interior Point Algorithm), pudiendo comparar esta técnica con otros procedimientos similares ya publicados.

Palabras clave: sísmica-adquisición-parámetros de campo-optimización.

ABSTRACT

3D seismic survey design in hydrocarbon exploration is related to processing and interpretation. In this paper, we invite to recommend survey design parameters, based on an optimization method such as the FAIPA (Feasible Arc Interior Point Algorithm). The seismic data has to achieve the geophysical objective and satisfy geophysical and operational constraints (fold, offset, azimuths, shots and receivers moved/day, etc.) while minimizing the cost and time of acquisition and processing. 3D design examples illustrate the implementation of iterative algorithm and allows compare with another published optimization methods.

Keywords: seismic-acquisition-field parameters-optimisation.

INTRODUCCION

Un relevamiento sísmico de reflexión permite obtener características estructurales y/o estratigráficas del subsuelo. Las ondas sísmicas se generan a partir de una fuente, viajan por el subsuelo, se reflejan en interfaces con diferentes impedancias acústicas (impe-

dancia = densidad x velocidad del medio) y arriban a los receptores, importando los tiempos de llegada de los distintos eventos reflejados. Se trabaja ordenando la información de los registros sísmicos de manera de agrupar sus trazas en CMP-gathers, que tienen en común el mismo punto medio entre una fuente y un receptor (Common Mid-Point) y que corres-

ponde a la ubicación en superficie del punto común profundo de reflexión (Common Depth Point) para un modelo del subsuelo con reflectores horizontales o casi horizontales. Se espera que la suma de todas las trazas que integran el CMP-gather conformen una traza de la sección sísmica ("stack") donde las reflexiones se refuerzan y los ruidos se atenúen. Se llama "fold" o "suma" al número de trazas que tienen el mismo CMP. Descripción y desarrollo de estas técnicas sísmicas de prospección pueden encontrarse en Yilmaz (2001) y Anstey (1990).

Puesto que los errores cometidos en la determinación de los parámetros de campo para la registración de los datos difícilmente puedan ser subsanados por el procesamiento y terminan condicionando a la interpretación, el objetivo de este estudio es analizar el diseño de adquisición 3D como un problema de optimización, es decir, minimizar costos y tiempo en la captura y procesamiento de los datos y lograr el blanco geofísico de la prospección cumpliendo restricciones operacionales (movimientos de fuentes y receptores) y requerimientos geofísicos (suma o fold, offset y azimut). La optimización pretende ser una herramienta matemática y de fácil implementación computacional que ayude al geofísico en la recomendación de parámetros de diseño de adquisición y bajo ningún concepto modificará su experiencia como especialista en el tema, ver Hornman y Vermeer (2000).

El artículo se organiza presentando la terminología básica relacionada con tendidos de adquisición 3D, luego se propone la función objetivo que representa el costo total del relevamiento indicando restricciones geofísicas y operacionales. Paso seguido se describe el algoritmo de optimización para finalizar con la aplicación del mismo a algunos ejemplos concretos y comparación con resultados ya publicados.

CONCEPTOS BASICOS EN RELEVAMIENTO 3D

En el presente trabajo, los parámetros de campo se determinaran para una geometría de adquisición ortogonal, es decir, las líneas de receptores (paralelas entre sí) y formando ángulo recto con las líneas de fuentes (también paralelas entre sí). La Figura 1 muestra los principales elementos de una registración 3D donde "ILF" e "ILR" son las distancias entre líneas de fuentes y líneas de receptores, respectivamente. En estas líneas (siguiendo un camino o abriendo una picada) los receptores y las fuentes se disponen regularmente, siendo "IR" e "IF" estas distancias constantes. ILF junto con IF determinan cuantas fuentes puntuales hay por kilómetro cuadrado que se indica "NF". El "patch" se refiere al rectángulo que contiene al conjunto de receptores (varias líneas paralelas de receptores) que reciben la señal desde una fuente puntual. Varias fuentes pueden tener el mismo patch y éste se va desplazando sobre el área del relevamiento según las ubicaciones de las fuentes. En particular, las estaciones receptoras activas y los puntos de fuente asociados, determinan la "template". En la Figura 2 puede verse en detalle los parámetros involucrados en una celda unidad o "box", que es el área delimitada por dos líneas de receptores adyacentes y dos líneas de fuentes adyacentes. En geometría ortogonal, el "CMP bin" o "bin" es una pequeña área que está en el centro del box recibiendo contribución de muchos pares fuente-receptor. Todas las trazas que pertenecen a un bin tendrán el mismo CMP y serán sumadas contribuyendo al "fold". Generalmente, se especifica un fold promedio, ya que varía de bin a bin y para diferentes distancias fuente-receptor ("offset"). Para determinación de velocidades, cálculo de estáticas residuales, atenuación de múltiples y ruidos, se puede trabajar con un grupo de CMP bins vecinos, llamado "Super

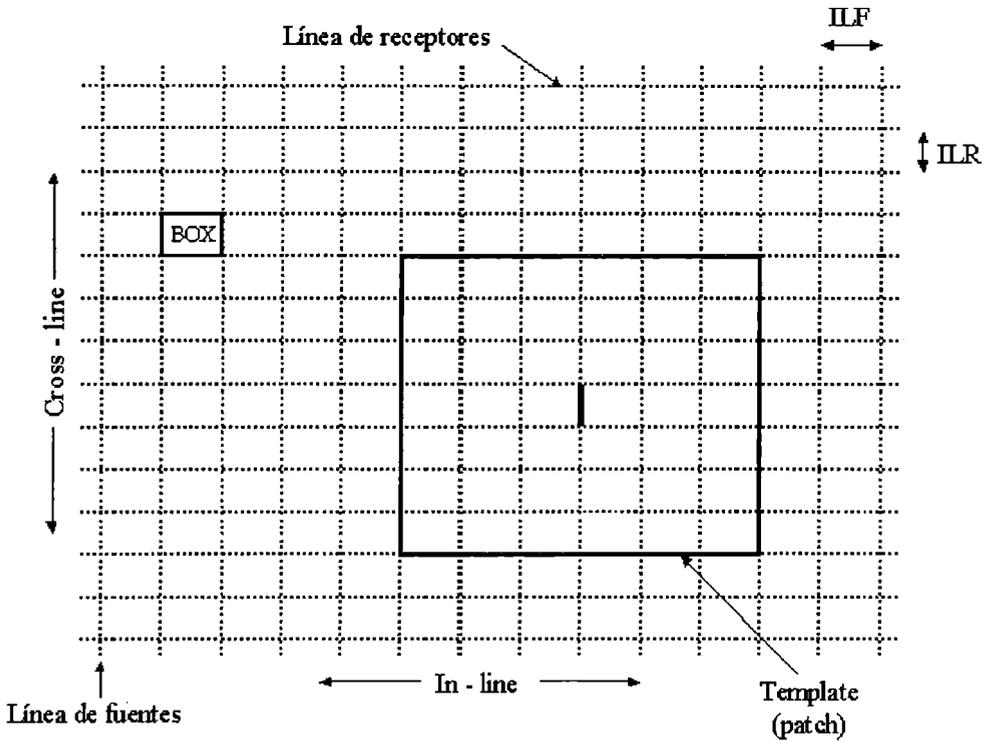


Figura 1. Terminología de un tendido 3D

Bin". La Figura 2, mostrando fuentes, receptores y bins en un box se completa con el offset mínimo mayor, " X_{min} ". Para registrar reflexiones someras es necesario contar con X_{min} pequeños mientras que para alcanzar

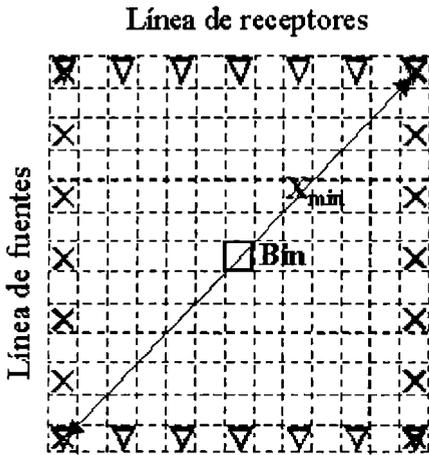


Figura 2. Definición de X_{min}

reflectores profundos se debe determinar " $X_{máx}$ ", que es el offset máximo registrado relacionado con las dimensiones del patch y la forma de activar las fuentes. Los libros de Stone (1994), Cordsen *et al.* (2000) y Vermeer (2002) pueden ser considerados una referencia obligatoria en esta temática.

Para una mejor comprensión del trabajo, en la Tabla 1 se presenta seguidamente la nomenclatura utilizada, donde la primer columna contiene las variables de diseño, la segunda columna los parámetros que intervienen como datos del problema y la tercer columna los costos y la función objetivo.

PROBLEMA DE OPTIMIZACION

La función objetivo: costo del relevamiento.

La función objetivo representa el costo total de la adquisición/km². Siguiendo la formulación

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el trabajo.

ILF = distancia (intervalo) entre líneas de fuentes	CRmax = n° máximo de recept. disponibles	C1 = costo administrativo y de permisos
ILR = distancia (intervalo) entre líneas de receptores	Rmax = n° máximo de recept. movidos/día	C2 = costo por fuente
IR = intervalo entre receptores	Fmax = n° máximo de fuentes/día	C3 = costo por estaca receptora
IF = intervalo entre fuentes	F = fold o suma en el CMP gather	C4 = costo de limpieza por ILF
NR = número (n°) de receptores	Bin = tamaño del bin in-line	C5 = costo de limpieza por ILR
NLR = n° de líneas de receptores	Bcross = tamaño del bin cross-line	C6 = costo de perforación
NF = n° de fuentes/ km ²	Xmin = offset mínimo más grande	C7 = costo de personal/día
NFD = n° de fuentes movidas/día	Xmax = offset máximo	C8 = costo de equipos/día
NRD = n° de recept. movidos/día	Xin = offset máximo in-line	C9 = costo de procesamiento
NFE = n° de fuentes entre ILR	Xcross = offset máximo cross-line	f = costo total/ km ²
NRE = n° de recept. Entre ILF		
NRL = n° de recept. por línea		
MLR = ½ NLR (tendido simétrico)		

propuesta por Morrice *et al.* (2001), se expresa:

$$f = C_1 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$$

donde C₁ representa el costo administrativo y de permisos por km² que pueden necesitarse para ingresar en un área determinada. Los restantes sumandos indican:

- Costo debido al número de fuentes y estacas de estaciones receptoras siendo C₂ el costo por fuente y C3 el costo por estaca de recepción,

$$f_1 = \frac{C_2}{IF \cdot ILF} + \frac{C_3}{IR \cdot ILR}$$

- Costo de limpieza del terreno donde C₄ y C₅ son los gastos por km para las líneas de fuentes y de receptores, respectivamente,

$$f_2 = \frac{C_4}{ILF} + \frac{C_5}{ILR}$$

- Costo de perforación por Km², C₆, si la fuente es un explosivo,

$$f_3 = \frac{C_6}{IF \cdot ILF}$$

- Costo de personal siendo C₇ el gasto promedio por día y costo de equipos con C₈ representando el gasto de equipos por canal receptor y por día. NFD representa el número de disparos por día y NR el número de receptores activos,

$$f_4 = \frac{(C_7 + C_8 \cdot 1.5 \cdot NR) \cdot NF}{NFD}$$

- Costo de procesamiento, determinado por C₉ que estima dicho costo por traza, el fold, F y las dimensiones del bin “in-line”, Bin y del bin “cross-line”, Bcross.

$$f_5 = \frac{F \cdot C_9}{B_{in} \cdot B_{cross}}$$

Restricciones debidas a la geometría

Al asumir un tendido partido y simétrico se deben cumplir las siguientes relaciones:

$$BIN = B_{in} \cdot B_{cross} = \frac{IF}{2} \cdot \frac{IR}{2}$$

$$MLR = \frac{NLR}{2}$$

Determinación de los parámetros de campo para la adquisición 3D de datos sísmicos.

que hará la cantidad de líneas de receptores par en el tendido partido,

$$ILR = NFE \cdot IF$$

que establece la distancia entre líneas de receptores como un múltiplo del intervalo entre las fuentes siendo NFE el número de posiciones de disparos entre las líneas de receptores,

$$ILF = NRE \cdot IR$$

análoga a la anterior donde NRE es el número de estacas de recepción entre las líneas de fuentes y finalmente, una restricción en igualdad verificando la misma cantidad de canales por línea activas de receptores,

$$NR = NLR \cdot NRL$$

donde NRL indica los canales activos por línea de receptores activos.

Restricciones geofísicas

Observando la Figura 2 se obtiene

$$X_{\min}^2 \geq ILF^2 + ILR^2$$

donde el signo indica que de todas las distancias fuente-receptor de un box, debe considerarse la mayor de todas ellas, esto es el offset mínimo más grande.

El número de disparos por km² puede ser estimado en función del fold deseado para el bin, las dimensiones del bin y el número de receptores vivos, como

$$NF = \frac{F}{NR \cdot B_{in} \cdot B_{cross}}$$

Offsets máximos en ambas direcciones, “X_{in}” y “X_{cross}”, permiten restringir azimutes mediante:

$$X_{in} \leq \frac{NR \cdot IR}{NLR \cdot 2} - \frac{IR}{2}$$

y

$$X_{cross} \leq \frac{NLR \cdot ILR}{2} - \frac{IF}{2}$$

Además, el tendido de la Figura 3, de Stone (1994), permite expresar el offset máximo, X_{máx}, como

$$X_{\max}^2 \leq \left(\frac{NLR \cdot ILR}{2} - \frac{IF}{2} \right)^2 + \left(\frac{NR \cdot IR}{NLR \cdot 2} - \frac{IR}{2} \right)^2$$

Restricciones operacionales

Si se llama “F_{máx}” al número máximo de disparos por día y “R_{máx}” al número máximo de canales receptores movidos por día, entonces deberá cumplirse:

$$NFD \leq F_{\max}$$

$$NRD \leq R_{\max}$$

Además, si “CR_{máx}” es la cantidad de canales receptores disponibles, será

$$1.5 \cdot NR \leq CR_{\max}$$

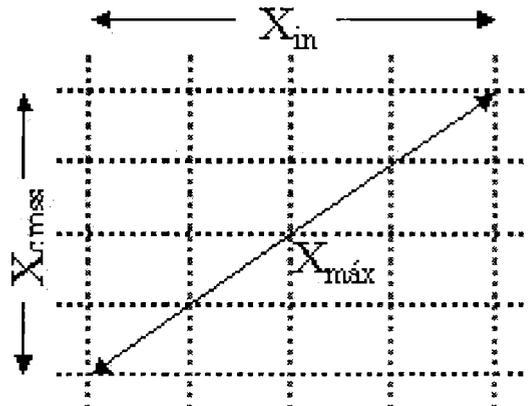


Figura 3. Definición de Xmax

indicando que la cantidad total de canales es una vez y media la cantidad necesaria de canales para cubrir el patch activo o vivo (ver expresión para f_4).

Por último, puede escribirse el número de canales receptores que debe moverse en relación al número de disparos por día como:

$$\frac{NRD \cdot ILR \cdot IR}{NFD \cdot ILF \cdot IF} = 1$$

ALGORITMO DE OPTIMIZACION

Nuestro problema está dentro del contexto de un problema de programación no lineal, los cuales tienen la forma

$$\begin{aligned} & \text{Min}_x \{f(x)\} \\ & \text{subjeto a } g(x) \leq 0 \\ & \text{y } h(x) = 0 \end{aligned}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, f es la función objetivo $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, g es el conjunto de las inecuaciones $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ y h es el conjunto de ecuaciones $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$. Se asume que f , g y h son continuas y sus derivadas también.

El algoritmo FAIPA, ver Herskovits *et al.* (2005):

Parámetros definidos: $\varphi > 0, \alpha \in (0,1)$ y

$r > 0, r \in \mathbb{R}^p$ siendo δ constante arbitraria, α factor de avance y r vector de penalización.

Datos iniciales: $\lambda > 0$ y $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ simétrica y definida positiva.

$\underline{x} \in \mathbb{R}^n$ es un punto factible.

Paso 1) Cálculo de la dirección d

Se obtiene (d_0, λ_0, μ_0) y (d_1, λ_1, μ_1) por medio de la resolución de los sistemas lineales.

Siendo $\Xi = \text{diag}(\bar{\epsilon})$, $G(x) = \text{diag}(g_i(x))$ y $\bar{\epsilon}, i$ los multiplicadores de Lagrange.

Si $d_0 = 0$ stop.

Si $r_i \leq \|\mu_{0i}\|$ se hace $r_i > \|\mu_{0i}\|$ $i =$

1,2,...,p

Definimos la función

$$\phi(x,r) = f(x) + r^t \text{sgn}[h(x)]h(x)$$

Si $d_1^t \nabla \phi(x,r) > 0$ entonces

$$\rho = \inf \left[(\varphi) \|d_0\|^2; (\alpha-1) d_0^t \nabla \phi(x,r) / d_1^t \nabla \phi(x,r) \right]$$

Si no $\rho = \varphi \|d_0\|^2$

Finalmente el cálculo de la dirección es

$$d = d_0 + \rho d_1$$

Paso 2) Cómputo de la dirección de descenso en arco.

Se define $\tilde{w}_i^J = g_i(x+d) - g_i(x) - \nabla g_i^t d$ y

$$\tilde{w}_i^E = h_i(x+d) - h_i(x) - \nabla h_i^t d \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

y se calcula \tilde{d} y $\tilde{\lambda}$ mediante la resolución del sistema de ecuaciones lineales

$$\begin{cases} B\tilde{d} + \nabla g(x)\tilde{\lambda} + \nabla h(x)\tilde{\mu} = 0 \\ \Lambda \nabla g^t(x)\tilde{d} + G(x)\tilde{\lambda} = -\lambda \tilde{w}_i^J \\ \nabla h^t(x)\tilde{d} = -\mu \tilde{w}_i^E \end{cases}$$

Paso 3) Búsqueda a lo largo del arco.

Encontrar un paso t que satisfaga un criterio de búsqueda aplicado a $\phi(x,r)$ tal que las restricciones cumplan

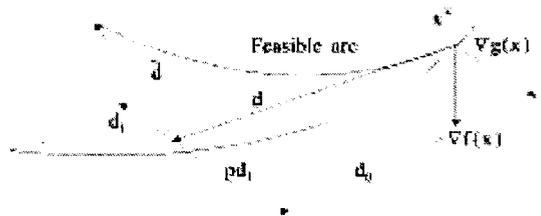


Figura 4. Arco de búsqueda en FAIPA

Determinación de los parámetros de campo para la adquisición 3D de datos sísmicos.

$$g_i(x+td+t^2\bar{d}) < 0 \text{ if } \bar{\lambda}_i \geq 0 \text{ o}$$

$$g_i(x+td+t^2\bar{d}) < g_i(x)$$

Paso 4) Se actualiza

$x=x+td+t^2\bar{d}$ y se definen los nuevos valores

$\lambda > 0, \mu > 0$ y la matriz \underline{B} simétrica y definida positiva.

Se vuelve al paso 1).

El arco usado en el algoritmo está representado en Figura 4.

RESULTADOS

Los algoritmos se aplican para estimar determinados parámetros de adquisición usando explosivos como fuente de energía, de

Tabla 2. Datos del problema de optimización. Costos en U\$A y distancias en km.

$C_1 = 5000$	$B_{in} = 0.025$
$C_2 = 45$	$B_{cross} = 0.025$
$C_3 = 45$	$F = 30$
$C_4 = 55$	$X_{in} = 2$
$C_5 = 55$	$X_{cross} = 1.5$
$C_6 = 100$	$X_{m\acute{a}x} = 2$
$C_7 = 10000$	$X_{m\acute{i}n} = 0.6$
$C_8 = 3$	$F_{m\acute{a}x} = 160$
$C_9 = 0.01$	$R_{m\acute{a}x} = 300$
$f [U\$/km^2] = 19730$	$CR_{m\acute{a}x} = 2000$

Tabla 3. Variables de diseño iniciales y finales para diferentes algoritmos de optimización.

Variables de diseño iniciales	Morrice <i>et al.</i> (2001)	FAIPA (2006)
ILF = 0.4	ILF = 0.5	ILF = 0.5
ILR = 0.4	ILR = 0.3	ILR = 0.3
IR = 0.05	IR = 0.05	IR = 0.05
IF = 0.05	IF = 0.05	IF = 0.05
NR = 960	NR = 1200	NR = 1200
NLR = 10	NLR = 10	NLR = 12
NF = 50	NF = 40	NF = 40
NFD = 150	NFD = 160	NFD = 159
NRD = 200	NRD = 266	NRD = 265
NFE = 8	NFE = 6	NFE = 6
NRE = 8	NRE = 10	NRE = 10
NRL = 96	NRL = 120	NRL = 100
MLR = 5	MLR = 5	MLR = 6

manera que el valor de la función costo (U\$A/km²) sea mínimo y quede asegurado el objetivo geofísico motivo de la prospección mediante restricciones de diseño y de operaciones de campo. Los datos del problema se indican en la Tabla 2. Los valores iniciales, los resultados finales alcanzados por Morrice *et al.* (2001) y FAIPA de las variables de diseño, se muestran respectivamente en las columnas uno, dos y tres de la Tabla 3. Las longitudes se expresan en kilómetros. La función costo llega a un valor de $f=18095.76$ U\$A/km² en 27 iteraciones, relevando 4 km² por día y a $f=18447.55$ U\$A/km² para Morrice. Ambos dispositivos (patches) son viables y tienen idéntica distribución del fold, la diferencia está en la distribución de azimut y offsets. Actualmente se favorecen los tendidos que muestrean espacialmente el campo de manera más homogénea, es decir azimut y valores de offsets parecidos. La propuesta de FAIPA cumple mejor esto último, con un dispositivo “más cuadrado” y no privilegiando la dirección in-line como sugiere Morrice.

Una nueva corrida de FAIPA permitiendo 170 disparos por día redujo el valor de f a

Tabla 4. Variables de diseño finales para fuente superficial y tamaño del bin condicionado por velocidad, frecuencia y buzamiento.

Fuentes en superficie	Bin función de velocidad, frecuencia y buzamiento
ILF = 0.5	ILF = 0.5
ILR = 0.4	ILR = 0.3
IR = 0.05	IR = 0.06
IF = 0.05	IF = 0.06
NR = 1080	NR = 960
NLR = 10	NLR = 12
NF = 44	NF = 32
NFD = 160	NFD = 160
NRD = 180	NRD = 256
NFE = 8	NFE = 5
NRE = 9	NRE = 8
NRL = 108	NRL = 80
MLR = 5	MLR = 6
$f = 14076.30$	$f = 15240.20$

17872.70 U\$A/km², aumentó “ $R_{\text{máx}}$ ” y no modificó sustancialmente el valor de las variables geofísicas como era esperado. Otros dos ejemplos con el mismo conjunto de valores iniciales suponen fuente superficial y tamaño del bin considerando velocidad de stacking (2500 m/s), frecuencia máxima (80 Hz) y pendiente máxima (30°) esperadas. Las variables de diseño se muestran en las columnas 1 y 2 de la Tabla 4.

La fuerte caída en la función de costo que se observa en la primer columna de Tabla 4, se debe a la eliminación de los costos de perforación. En la segunda columna de la Tabla, se ve un aumento en el tamaño del bin por lo que el costo disminuye y el tendido es capaz de conservar el fold con reflector buzante.

Se desea destacar que “no existe algoritmo de optimización universal”, Nocedal y Wright (1999). FAIPA forma parte del conjunto de algoritmos modernos de punto interior que presentan la ventaja de que los puntos factibles alcanzados en cada iteración son puntos de la región de diseño (aunque no óptimos), llegando al final del procedimiento a un punto óptimo. Es aplicable al diseño de dispositivos ya que encuentra una solución viable, responde a lo esperado en los distintos ejemplos presentados y el tiempo de cómputo es realmente muy corto.

Agradecimientos: Los autores desean expresar su agradecimiento a los geofísicos Daniel Lorenzo y Claudio Cardama por sus valiosos comentarios en el problema geofísico.

REFERENCIAS

Anstey, N.A. 1990. The Reflection Process. GP203, Exploration Geophysics. IHRDC, Boston.
Cordson, A., M. Galbraith and J. Peirce. 2000. Planning Land 3-D Seismic Surveys. Geophysical Developments N9, Soc. Expl. Geophys.
Herskovits, J., P. Mappa, E. Goulart and C.M. Mota Soares. 2005. Mathematical programming

models and algorithms for engineering design optimization. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, 194:3244-3268.
Hornman, K. and G. Vermeer. 2000. Introduction to 3D design problem. 3D seismic survey design: a solution. First Break, 18(5):161-185.
Stone, D.S., 1994. Designing seismic surveys in two and three dimensions. Geophysical References No 5, Soc. Expl. Geophys.
Morrice, D., A. Kenyon and C. Beckett. 2001. Optimizing operations in 3-D land seismic surveys. Geophysics, 66:1818-1826.
Nocedal, J. and S. Wright. 1999. Numerical optimization. Springer-Verlag, New York.
Vermeer, G.J.O. 2002. 3-D seismic survey design. Soc. Expl. Geophys.
Yilmaz, O. 2001. Seismic Data Analysis. Investigations in Geophysics N10, Soc. Expl. Geophys.