

**RECONSTRUCCIÓN DE UN REGISTRO SÓNICO A PARTIR DE REGISTROS  
DE RESISTIVIDAD Y RADIATIVIDAD UTILIZANDO LAS SERIES DOBLES DE  
FOURIER PARA DATOS ESPACIADOS IRREGULARMENTE.**

**CAMILO CAMACHO LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2005**

**RECONSTRUCCIÓN DE UN REGISTRO SÓNICO A PARTIR DE REGISTROS  
DE RESISTIVIDAD Y RADIATIVIDAD UTILIZANDO LAS SERIES DOBLES DE  
FOURIER PARA DATOS ESPACIADOS IRREGULARMENTE.**

**CAMILO CAMACHO LÓPEZ**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**ARISTÓBULO BEJARANO WALLENS**

**Ingeniero de petróleos.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2005**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. ANÁLISIS ARMÓNICO</b>	3
<b>2. SERIES DE FOURIER</b>	5
<b>2.1 SERIES DOBLES DE FOURIER CON DATOS ESPACIADOS REGULARMENTE</b>	6
2.1.1 Matemáticas de las series dobles de Fourier con datos espaciados regularmente	7
<b>2.2 SERIES DOBLES DE FOURIER CON DATOS ESPACIADOS IRREGULARMENTE</b>	14
2.2.1 Matemáticas de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente	15
2.2.2 Aplicación de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente en registros eléctricos de pozos	18
<b>3. SOFTWARE: MANUAL DEL USUARIO</b>	21
<b>3.1 INTRODUCCIÓN</b>	21

<b>3.2 INICIALIZACIÓN</b>	<b>21</b>
<b>3.3 MÉTODO NUMÉRICO UTILIZADO EN LA SOLUCIÓN MATRICIAL DE LAS SERIES DOBLES DE FOURIER</b>	<b>23</b>
3.3.1 Generalidades	23
* Operaciones que no cambian el conjunto de soluciones	23
* Matriz de Gauss - Jordan	23
* Como hallar todas las soluciones	24
* Aplicaciones de Gauss- Jordan	24
* Ventajas y desventajas del método	25
<b>3.4 MENÚ PRINCIPAL</b>	<b>26</b>
3.4.1 Opción “RT, CGR y DTCO”	26
* Recuadro “1. Archivo de Excel”	28
** Opción “Datos a Cargar”	28
** Opción “Cargar”	28
** Visor móvil de registros	28
* Recuadro “2. Especificación de Valores”	29
** Valor de L:	29
** Valor de H:	29
** Opción “Ingresar $M = N$ :”	30
* Recuadro “3. Sistema de Ecuaciones”	30
** Opción “Llenar Sistema”	30
** Opción “Resolver Sistema”	31
** Opción “Exportar Sistema”	31
** Opción “Importar Sistema”	31
** Opción “Exportar Coeficientes”	32
** Visor móvil del sistema de ecuaciones	32

* Recuadro “4. Tablas de Coeficientes”	33
* Recuadro “5. Resultados”	34
** Opción “Calcular DTMO EXP”	34
** Opción “Exportar Registros”	34
* Recuadro “Ventana de Ayuda”	35
3.4.2 Opción “RT y CGR”	35
* Recuadro “1. Archivo de Excel”	36
** Opción “Datos a Cargar”	36
** Opción “Cargar”	37
* Recuadro “2.Tablas de Coeficientes”	37
* Recuadro “3. Resultados”	37
** Opción “Calcular DTMO EXP”	37
** Opción “Exportar Registros”	38
<b>4. PRUEBAS</b>	<b>39</b>
<b>4.1 PRUEBA 1</b>	<b>39</b>
4.1.1 Medida estadística utilizada para evaluar el rendimiento y la exactitud de la prueba	41
<b>4.2 PRUEBA 2</b>	<b>41</b>
4.2.1 Medida estadística utilizada para evaluar el rendimiento y la exactitud de la prueba	43
<b>4.3 PRUEBA 3</b>	<b>43</b>
<b>4.4 PRUEBA 4</b>	<b>45</b>

<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>47</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>52</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Tipos de comportamiento oscilatorio	4
<b>Figura 2.</b> Aplicación de la regla trapezoidal para obtener los coeficientes de una serie doble de Fourier	10
<b>Figura 3.</b> Comparación de registros para la PRUEBA 1	40
<b>Figura 4.</b> Comparación de registros para la PRUEBA 2	42
<b>Figura 5.</b> Comparación de registros para la PRUEBA 3	44
<b>Figura 6.</b> Comparación de registros para la PRUEBA 4	46

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A</b>	53
<b>Anexo B</b>	59
<b>Anexo C</b>	65
<b>Anexo D</b>	71

## DEDICATORIA

**A mis padres**, que son las personas más importantes de mí vida y a las cuales les debo en gran parte todo lo que soy. Gracias por su apoyo, comprensión, incondicionalidad, paciencia y cariño. Son la razón de todos mis esfuerzos. Nunca lo olviden.

**A mí abuelo**, que en paz descanse. A pocas personas he admirado y respetado tanto; el inculcarme la pasión por el conocimiento me ha guiado a realizar casi todas mis metas y de seguro a lograr las inimaginables, nunca pensé que su influencia sería tan importante. Gracias viejo querido por ser un ejemplo para mí vida.

Muy especialmente **a mí tío Fabio** y **a mí tío Carlos**, a los que quiero y respeto mucho. Siempre los tengo muy presentes en mis oraciones y espero poder retribuirles algún día todo el cariño que me han brindado.

**A mí hermanita Luisa Fernanda**, que a su corta edad se convierte en parte de mí, en parte de mis sueños y en una de las principales razones para seguir luchando en ésta vida. Te quiero mucho.

**A mí novia Melisa**, que se convirtió en mí segundo hogar, en un apoyo incondicional, en la mujer que más amo y en mí constante amiga. Con ella compartí lo incompartible, mí soledad, mí espacio, mí alma. Te amo.

**CAMILO.**

## AGRADECIMIENTOS

Muy especialmente agradezco **a la familia de mi novia (Ardila Rozo)**, todo su apoyo, su cariño, comprensión y el que me hubiesen acogido como un miembro más en su familia. Nunca voy a olvidarlo y quiero que sepan que siempre cuentan conmigo. **Gracias don Alonso, doña Amanda y Laura.**

A las personas que de un modo u otro han influido en mí vida y servido de soporte durante mí estadía en ésta hermosa ciudad. Gracias por todo. Las quiero mucho.

A mis amigos y compañeros por brindarme su apoyo.

Expreso el más sincero agradecimiento **al señor Aristóbulo Bejarano Wallens** Ingeniero de petróleos de la Universidad Industrial de Santander, director de éste proyecto por su colaboración, orientación y compromiso durante el desarrollo del trabajo.

A los docentes de la escuela de Ingeniería de Petróleos y a la Universidad Industrial de Santander por la formación profesional.

## RESUMEN

**TITULO:** RECONSTRUCCIÓN DE UN REGISTRO SÓNICO A PARTIR DE REGISTROS DE RESISTIVIDAD Y RADIACTIVIDAD UTILIZANDO LAS SERIES DOBLES DE FOURIER PARA DATOS ESPACIADOS IRREGULARMENTE.\*

**AUTOR:** CAMACHO LÓPEZ, Camilo.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Reconstrucción de Registros, Series Dobles de Fourier, Registros Eléctricos.

En éste trabajo se utilizan los fundamentos matemáticos de las series dobles de Fourier para la construcción y reconstrucción de registros eléctricos. El objetivo es dar a conocer que la utilización del ajuste de tendencia armónico por medio de las series dobles de Fourier, es apropiado para la representación de datos irregularmente espaciados como los que se obtienen en registros de pozos y con los cuales se pretenderá la construcción y reconstrucción de registros sónicos a partir de registros de resistividad y rayos gamma.

La implementación de ésta técnica de ajuste se convierte en una alternativa para el procesamiento y obtención de datos que en la actualidad no es muy conocida y aplicada dentro de la industria del petróleo. Representará en el caso de ser confiable y precisa, una técnica que facilite considerablemente el análisis y correlación de pozos, estratos, zonas y yacimientos en campos dentro o fuera de nuestro país y en los que por la innumerable cantidad de perforaciones no se pudiera estar en capacidad de correr ciertas clases de registros en cada una de ellas. Generando en las empresas encargadas de ésta área, una considerable reducción en costos de operación, mantenimiento y ahorro de tiempo, al obviarse estos procedimientos.

Para tal fin, se creó una herramienta software que permita de una manera fácil, sencilla y didáctica cumplir con los requerimientos anteriormente establecidos, y en la que se procederá a realizar el número de pruebas necesarias que encaminen a determinar si realmente satisface los estándares de calidad para los que fue concebida.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Ingenierías Físicoquímicas, Ingeniería de Petróleos, BEJARANO WALLENS, ARISTOBULO.

## SUMMARY

**TITLE:** RECONSTRUCTION OF A SONIC LOG THROUGH RESISTIVITY AND RADIOACTIVITY LOGS USING THE DOUBLE FOURIER SERIES WITH IRREGULARLY SPACED DATA.\*

**AUTHOR:** CAMACHO LÓPEZ, Camilo.\*\*

**KEY WORDS:** Logs Reconstruction, Double Fourier Series, Electric Logs.

The mathematical foundations of the double Fourier series are used in this paper for the construction and reconstruction of electric logs. The main idea is to let know that the use of the harmonic trend adjustment by means of the double Fourier series is appropriate for the representation of irregularly spaced data as those that are obtained in logs of wells and with which it will be sought the construction and reconstruction of sonic logs through resistively logs and gamma ray logs.

The implementation of this adjustment technique becomes an alternative to prosecute and obtain data that nowadays is not very well-known and applied inside the industry of the petroleum. In case of being reliable and precise, it would represent a technique that facilitates the analysis and correlation of wells considerably, strata, areas and locations in fields inside or outside of our country; and also in those that for the countless quantity of perforations you are not be able to run certain classes of logs in each. When being obviated these procedures, a considerable reduction of operation costs, maintenance and time would be created in the companies in charge of this area.

A software tool has been created to allow an easy, simple and didactics way to fulfil the requirements previously established. Moreover, you would be able to carry out the number of necessary tests that would determine if it really satisfies the standards of quality for those that it was conceived.

---

\* Grade work.

\*\* Physical-chemical Engineerings, Petroleum Engineering, BEJARANO WALLENS, ARISTOBULO.

## INTRODUCCIÓN

Generalmente, del conocimiento e interpretación de ciertos fenómenos se puede inferir si las variaciones en algunas de sus características innatas son debidas a oscilaciones periódicas; a oscilaciones compuestas, en las que hay fluctuaciones periódicas y aleatorias o a oscilaciones completamente aleatorias, desprovistas de cualquier componente periódico.

La implementación del ajuste de tendencia armónico por medio de las series de Fourier se convierte en la técnica de análisis y síntesis fundamental, y por excelencia de aquellos fenómenos en los que gran parte de su comportamiento es debido a causas que varían de alguna manera periódica y que en común con muchos otros fenómenos, como los procesos geológicos representan características que en la naturaleza son oscilatorias y varían de tal forma.

El objetivo del presente trabajo, es dar a conocer que la utilización de éste ajuste implementando series dobles de Fourier, que en realidad no son más que una expansión de las series simples y en donde una variable dependiente, se vuelve una función de las variables independientes; es apropiado para la representación de datos irregularmente espaciados como los que se obtienen en registros de pozos y con los cuales se pretenderá la construcción y reconstrucción de registros sísmicos a partir de los registros de resistividad y rayos gamma.

Esta técnica se convierte en una alternativa en el procesamiento y obtención de datos que en la actualidad no es muy conocida y aplicada dentro de la industria del petróleo y mas específicamente dentro del área de la geología del subsuelo donde se encuentran los registros de pozos como métodos subsuperficiales.

Representará en el caso de ser confiable y precisa, una técnica que facilite considerablemente el análisis y correlación de pozos, estratos, zonas y yacimientos en campos, dentro o fuera de nuestro país y en los que por la innumerable cantidad de perforaciones no se pudiera estar en capacidad de correr ciertas clases de registros en cada una de ellas. Generando en las empresas encargadas de ésta área, una considerable reducción en costos de operación, mantenimiento y ahorro de tiempo, al obviarse estos procedimientos.

Para tal fin, se pensó en el desarrollo y creación de una herramienta software que permitiera de una manera fácil, sencilla y didáctica cumplir con los requerimientos anteriormente establecidos (construcción y reconstrucción de registros), y en la que se procederá a realizar el número de pruebas necesarias y representativas que encaminen a determinar si la herramienta realmente satisface los estándares de calidad para los que fue concebida (confiabilidad y precisión).

## 1. ANÁLISIS ARMÓNICO

Muchos de los procesos geológicos y sus características en la naturaleza son oscilatorios. El plegamiento de las rocas, las variaciones en los campos magnéticos de la tierra, y las olas en los océanos son claros ejemplos de características geológicas que son oscilatorias. El análisis armónico es una técnica para el análisis y síntesis de estos fenómenos.

Hay varios estadios de análisis armónicos, todos interrelacionados. Los más simples son los métodos de suaveo, aplicables a datos que pueden ser exhibidos como curvas, como en los análisis de tiempo–tendencia (dirección). Los aplicables al análisis de curvas y superficies, y a los datos regular como irregularmente espaciados, incluyen análisis armónico con series de Fourier, análisis de autocovarianza y métodos de análisis espectral.

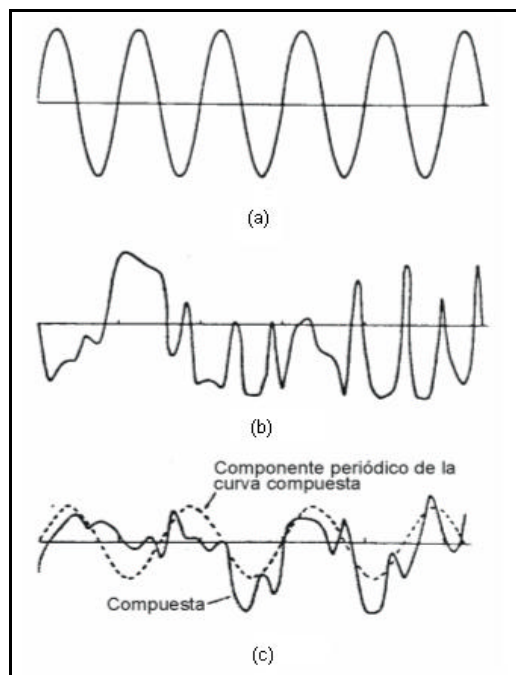
Los métodos de autocovarianza y análisis espectral no han sido extensivamente usados en geología, aunque aplicaciones significativas han sido realizadas en el análisis de sedimentos y datos geofísicos. La mayoría de las aplicaciones han sido en consideración a series de tiempo, en las cuales las variaciones de algún fenómeno con el tiempo son analizadas (por ejemplo, la altura del agua por encima de una línea base en una locación dada, en la playa durante un intervalo de tiempo, etc.). El término “series de tiempo” es ahora usado en un amplio sentido, como quiera que denota el análisis de datos que varían con respecto a cualquier otra variable que no necesariamente es el tiempo. La distancia a lo largo de un perfil puede ser sustituida por el tiempo. Además, los métodos son expandibles para tratar con mapas que representan variaciones y que puedan ser descritas por una superficie en el espacio.

Un objetivo general en el análisis armónico es la representación de fenómenos por una función o funciones que oscilan de manera periódica.

Un segundo objetivo es el de distinguir aquellos componentes en el comportamiento observado que son debidos a la oscilación periódica y aquellos que son debidos a la aleatoriedad (**Ver Figura 1**) o, en otras palabras, para distinguir “ruido” de “señal”.

**Figura 1 . Tipos de comportamiento oscilatorio.**

- a. Oscilación periódica.
- b. Oscilación aleatoria, desprovista de componente periódico.
- c. Oscilación compuesta, que contiene fluctuaciones periódicas y aleatorias.



**Fuente: PRESTON; HARBAUGH. 1965.**

## 2. SERIES DE FOURIER

Las series de Fourier son series que consisten de términos que contienen senos y cósenos. Ellas suministran una manera de representar ciertas estructuras complicadas por medio de un conjunto de simples formas de onda descritas por los términos seno y coseno, por ejemplo, un perfil topográfico de un valle podría ser considerado como una complicada forma de onda compuesta de ciclos interactuando o armónicas de varias amplitudes y períodos. Este perfil topográfico podría ser aproximado para darle cualquier exactitud según las elevaciones registradas a lo largo del perfil a un número suficiente de puntos de datos y adaptando una serie de Fourier simple a esos puntos, una curva puede ser obtenida cuya concordancia con el perfil observado depende únicamente del número de términos en la serie de Fourier y el número de puntos de datos disponibles. Los coeficientes pueden ser considerados como los dadores de un significado numérico de descripción del perfil o superficie que esta siendo estudiada, transformando los datos originales en componentes representados por los coeficientes de los términos.

Un objetivo al usar las series de Fourier es el de determinar si las variaciones en algunas características innatas pueden ser representadas por una función oscilatoria. Si una serie de Fourier suministra una buena representación de los datos observados, es posible que las fluctuaciones sean debidas a causas que varían de alguna manera periódica; si la serie de Fourier no representa los datos convincentemente, otros métodos matemáticos como el ajuste polinomial pueden ser empleados. El análisis de tendencia polinomial permite la Interpolación entre puntos de datos, y la extrapolación mas allá de los puntos de datos para distancias cortas únicamente. El análisis armónico puede permitir también la extrapolación

más allá de los puntos de datos pero puede ser usado para interpolar únicamente si métodos para datos espaciados irregularmente son utilizados.

Básicamente, la serie de Fourier suministra un medio por el cual se separan una curva (usando la serie simple), o una superficie (usando la serie doble), en un número de armónicas simples. La longitud de la onda (distancia de cresta a cresta) y la amplitud (la mitad de la altura de la parte mas baja a la cresta) son propiedades de las armónicas individuales. Aunque estas armónicas individuales son independientes una de otra, ellas pueden ser adicionadas juntas para producir curvas o superficies sumamente complicadas. Una curva o superficie puede ser descompuesta progresivamente en armónicas simples, o alternativamente, las armónicas simples pueden ser combinadas para crear una curva o superficie estrechamente cercana a la superficie observada, con tal de que hayan suficientes números de términos armónicos y de puntos de datos. Así como cualquier perfil o superficie puede ser aproximada por un polinomio de grado suficientemente alto, también puede cualquier perfil o superficie ser aproximada por una serie de Fourier con un número de términos suficientemente grande.

## **2.1 SERIES DOBLES DE FOURIER CON DATOS ESPACIADOS REGULARMENTE**

La serie doble de Fourier representa una expansión de la serie simple de Fourier en donde una variable dependiente, **Z**, se vuelve una función de dos variables independientes, **X** y **Y**. Así, las series dobles de Fourier son apropiadas para la representación de superficies en lugar de curvas. En un contexto geológico la variable dependiente, **Z**, podría representar la altura de una superficie, y **X** y **Y** podrían representar la ubicación con respecto a las direcciones este-oeste y norte-sur.

Las series dobles Fourier son particularmente útiles en el manejo de superficies en las cuales hay un aspecto de periodicidad. Ellas permiten que una superficie observada sea descompuesta en componentes armónicos en dos direcciones, las direcciones **X** y **Y**.

Los objetivos al usar las series dobles de Fourier, son en parte, similares a esos en el análisis de tendencia con polinomios convencionales. Al escoger entre varios métodos de ajuste de superficies se debería tener en cuenta que las superficies de tendencia polinomial convencional son mejor aplicadas a datos no oscilatorios, mientras que las superficies de Fourier pueden ser apropiadas para datos que reflejen fenómenos oscilatorios.

### **2.1.1 Matemáticas de las series dobles de Fourier con datos espaciados regularmente**

Las series dobles de Fourier se pueden usar como una forma del modelo lineal general cuando son utilizadas con datos espaciados regularmente en forma de una cuadrícula rectangular. Hay importantes ventajas computacionales en el uso de datos enmallados, a saber la reducción en el tiempo de cómputo y la capacidad para ajustar series con gran número de términos con relativa facilidad, una desventaja importante desde el punto de vista de los geólogos, es que los datos geológicos tienden a ser irregularmente espaciados. Algunos tipos de datos geológicos son, sin embargo, relativamente fáciles de obtener en la forma de cuadrícula, como por ejemplo los datos topográficos. En el ordenamiento de la cuadrícula de muestreo para el ajuste de la superficie de Fourier, el espaciamiento entre filas en una dirección no necesita ser el mismo que el espaciamiento entre columnas en la otra dirección, pero el espaciamiento entre columnas debe ser consistente desde el principio hasta el fin, como debe serlo el espaciamiento entre filas.

Una forma general de las series dobles de Fourier es:

$$z \cong F(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \lambda_{nm} \left( a_{nm} \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{H} + b_{nm} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{H} \right. \\ \left. + c_{nm} \cos \frac{m\pi x}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{H} + d_{nm} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{H} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$z$  = Variable dependiente en la función observada.

$F(x, y)$  = Aproximación de Fourier en el punto de la malla  $x, y$ .

$m$  = Índice del grado de términos pertenecientes a la dirección  $x$ . (Ver Figura 2).

$n$  = Índice del grado de términos pertenecientes a la dirección  $y$ . (Ver Figura 2).

$a_{nm}$  = Coeficiente del término **coseno-coseno** de grado  $n$  y  $m$ .

$b_{nm}$  = Coeficiente del término **seno-coseno** de grado  $n$  y  $m$ .

$c_{nm}$  = Coeficiente del término **coseno-seno** de grado  $n$  y  $m$ .

$d_{nm}$  = Coeficiente del término **seno-seno** de grado  $n$  y  $m$ .

$M$  = Máximo grado de términos especificados pertenecientes a la dirección  $x$ .

$N$  = Máximo grado de términos especificados pertenecientes a la dirección  $y$ .

$L$  = Mitad de la longitud de la muestra en la dirección  $x$ .

$H$  = Mitad de la longitud de la muestra en la dirección  $y$ .

$x_i$  = Valor del intervalo de muestra en la dirección  $x$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ .

$y_i$  = Valor del intervalo de muestra en la dirección  $y$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, l$ .

$\lambda_{nm} = 1/4$ ,  $m = n = 0$ .

$\lambda_{nm} = 1/2$ ,  $m = 0$ ,  $n \neq 0$ , ó  $m \neq 0$ ,  $n = 0$ .

$\lambda_{nm} = 1$ ,  $m \neq 0$ ,  $n \neq 0$ .

Los coeficientes de una serie doble de Fourier  $a_{nm}$ ,  $b_{nm}$ ,  $c_{nm}$ , y  $d_{nm}$ , pueden ser obtenidos por integración de funciones analíticas continuas,  $f(x,y)$ , si estas funciones son conocidas, empleando expresiones de la forma general:

$$a_{nm} = \frac{1}{LH} \int_{-H}^{+H} \int_{-L}^{+L} f(x, y) \cos \frac{m p x}{L} \cos \frac{n p y}{H} dx dy \quad \text{Ec. 2}$$

$$b_{nm} = \frac{1}{LH} \int_{-H}^{+H} \int_{-L}^{+L} f(x, y) \text{sen} \frac{m p x}{L} \cos \frac{n p y}{H} dx dy \quad \text{Ec. 3}$$

$$c_{nm} = \frac{1}{LH} \int_{-H}^{+H} \int_{-L}^{+L} f(x, y) \cos \frac{m p x}{L} \text{sen} \frac{n p y}{H} dx dy \quad \text{Ec. 4}$$

$$d_{nm} = \frac{1}{LH} \int_{-H}^{+H} \int_{-L}^{+L} f(x, y) \text{sen} \frac{m p x}{L} \text{sen} \frac{n p y}{H} dx dy \quad \text{Ec. 5}$$

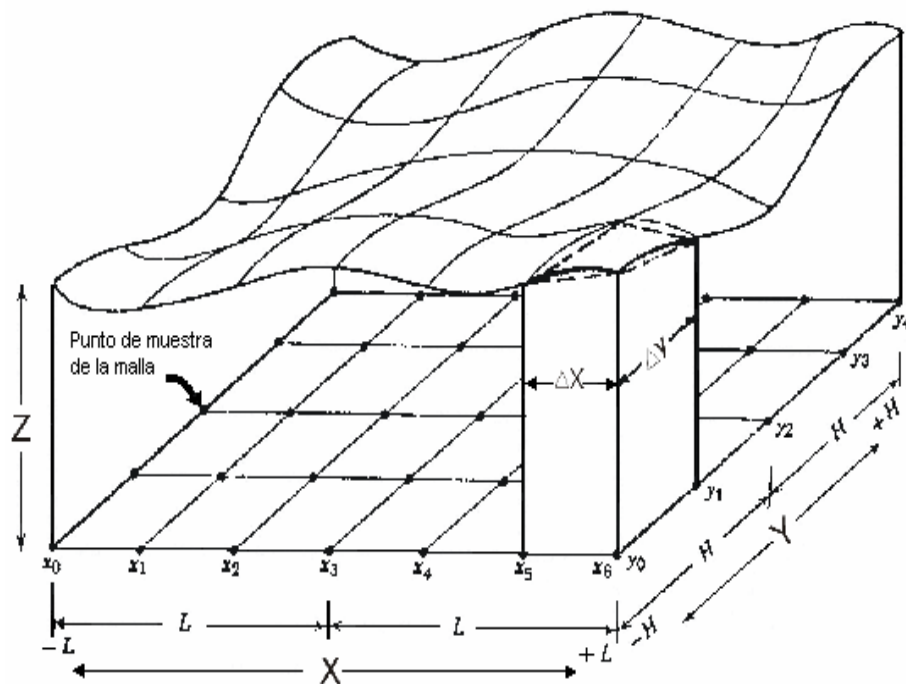
En la mayoría de las aplicaciones geológicas, sin embargo, las funciones analíticas no son conocidas, y los coeficientes de la serie doble de Fourier deben ser determinados de una superficie observada. En éste caso los coeficientes pueden ser obtenidos a través de un método de integración numérica en los cuales los volúmenes de los prismas (sólidos que tienen por bases dos polígonos y por caras laterales paralelogramos) son definidos por las celdas en la cuadrícula y las alturas de la superficie observada son sumadas. El volumen de cada prisma está directamente relacionado con su altura promedio, siendo ésta una unidad de sección transversal, de ancho  $\Delta X$  en la dirección  $X$  y de ancho  $\Delta Y$  en la dirección  $Y$  (Ver Figura 2). Los prismas, así definidos, pasan uno ú otro a través, por encima, o por debajo de la superficie actual, satisfaciendo el criterio de mínimos

cuadrados al minimizar la suma de las desviaciones cuadradas de la superficie actual desde la superficie aproximada, como la representada por el mosaico de prismas o columnas .

**Figura 2. Aplicación de la regla trapezoidal para obtener los coeficientes de una serie doble de Fourier.**

Los coeficientes son obtenidos de la suma de los volúmenes de las Columnas, las cuales son de incrementos  $\Delta x$  por  $\Delta y$  en la sección transversal, entre los límites  $-L$  a  $+L$  y  $-H$  a  $+H$ .

Únicamente se muestra una columna por simplicidad.



Fuente: PRESTON; HARBAUGH. 1965.

Las formas generales de las ecuaciones por integración numérica son:

$$a_{nm} = \frac{4}{kl} \left[ \frac{(z_{00} + z_{k0} + z_{0l} + z_{kl})}{4} \cos m\pi \cos n\pi + \sum_{j=1}^{l-1} \frac{(z_{0j} + z_{kj})}{2} \cos m\pi \cos \frac{n\pi y_j}{H} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(z_{i0} + z_{il})}{2} \cos \frac{m\pi x_i}{L} \cos n\pi + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{l-1} z_{ij} \cos \frac{m\pi x_i}{L} \cos \frac{n\pi y_j}{H} \right] \quad \text{Ec. 6}$$

$$b_{nm} = \frac{4}{kl} \left[ \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(z_{i0} + z_{il})}{2} \operatorname{sen} \frac{m\pi x_i}{L} \cos n\pi + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{l-1} z_{ij} \operatorname{sen} \frac{m\pi x_i}{L} \cos \frac{n\pi y_j}{H} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

$$c_{nm} = \frac{4}{kl} \left[ \sum_{j=1}^{l-1} \frac{(z_{0j} + z_{kj})}{2} \cos m\pi \operatorname{sen} \frac{n\pi y_j}{H} + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{l-1} z_{ij} \cos \frac{m\pi x_i}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y_j}{H} \right] \quad \text{Ec. 8}$$

$$d_{nm} = \frac{4}{kl} \left[ \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{l-1} z_{ij} \operatorname{sen} \frac{m\pi x_i}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y_j}{H} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

**i** = Índice de los puntos de muestra en la dirección **x = 0, 1, 2.....k**.

**j** = Índice de los puntos de muestra en la dirección **y = 0, 1, 2....l**.

**k** = Valor máximo del índice de los puntos de muestra de la dirección **x**.

**l** = Índice de los puntos de muestra de la dirección **y**.

**m = 0, 1, 2.....k/2** y

**n = 0, 1, 2.....l/2**.

Y los otros símbolos tienen el mismo significado que en la **Ecuación 1**.

Estas cuatro ecuaciones toman en cuenta las propiedades del método de integración. La **Ecuación 6**, para el cálculo de los coeficientes del término **coseno-coseno** ( $a_{nm}$ ) requiere que las 4 esquinas de la cuadrícula sean tratadas como un grupo por separado. Además, en ésta ecuación, los dos bordes paralelos de la cuadrícula en la dirección  $x$  (excluyendo las esquinas) son tratados como un grupo separado, como lo son los otros dos bordes paralelos en la dirección  $y$ , de nuevo excluyendo las esquinas; En la **Ecuación 7**, la cual pertenece a los coeficientes del término **seno-coseno** ( $b_{nm}$ ), los dos bordes paralelos al eje  $x$  son tratados como un grupo separado, excluyendo las esquinas; En la **Ecuación 8**, la cual pertenece a los coeficientes del término **coseno-seno** ( $c_{nm}$ ), los dos bordes paralelos al eje  $y$  son tratados como un grupo separado, excluyendo las esquinas; En la **Ecuación 9**, la cual pertenece a los coeficientes del término **seno-seno** ( $d_{nm}$ ), únicamente los valores que no están situados sobre los bordes o esquinas son considerados, debido a que los senos de los términos en los puntos de esquina o borde son cero.

En la aplicación de éste método de integración numérica el grupo de datos, obtenidos por observación de la altura de la superficie en cada punto de la muestra, debe contener un número impar de filas y un número impar de columnas en la cuadrícula (**Ver Figura 2**).

El máximo número de términos en la serie doble de Fourier que aproxima la superficie es una función del número de filas y columnas. Si hay 5 filas que pertenecen a la dirección  $y$ , por ejemplo, el máximo grado de  $n$  términos que pertenecen a esa dirección es 2. El máximo grado de  $m$  términos que pertenecen a la dirección  $x$  es regido en una forma similar. Como con la serie simple de Fourier, el método de integración numérica emplea la regla trapezoidal, pero, en lugar de calcular el área bajo la curva, entre los límites  $-L$  y  $+L$ , el método obtiene el volumen bajo la superficie cuyos límites rectangulares son  $-L$  y  $+L$ ,  $-H$  y  $+H$ .

El volumen es obtenido sumando una serie de columnas de sección transversal rectangular, la altura asignada a cada columna es obtenida de promediar las alturas de los 4 puntos de la cuadrícula que definen cada columna (**Ver Figura 2**).

.Los términos en una serie de Fourier están inversamente relacionados a la longitud del período. La longitud del período es igual a la longitud fundamental de la muestra o longitudes ( $2L$  con series simples de Fourier,  $2H$  y  $2L$  con series dobles de Fourier) dividida por el grado del término. Así la longitud del período del término armónico de grado cero es infinito, el término armónico de primer grado es igual a la longitud fundamental de la muestra, de  $-L$  a  $+L$ , o de  $-H$  a  $+H$ , el de segundo grado es igual a la mitad de la longitud fundamental de la muestra, y así sucesivamente, por ejemplo, si la longitud fundamental de la muestra es 1 milla, el término armónico de tercer grado hace referencia a una longitud del período de  $1/3$  de milla.

Relaciones entre grado, número de coeficientes, y longitudes del período son resumidas en la **Tabla 1**.

**Tabla 1. Atributos de las superficies armónicas representadas por series dobles de Fourier.**

Grado de la superficie en ambas direcciones	Número de coeficientes	Longitudes del período	
		Dirección x	Dirección y
<b>Cero (media)</b>	1	8	8
<b>Primero</b>	9	2L	2H
<b>Segundo</b>	25	L	H
<b>Tercero</b>	49	(2/3)L	(2/3)H
<b>i-ésimo</b>	$(2i + 1)^2$	$(2L)/i$	$(2H)/i$

## **2.2 SERIES DOBLES DE FOURIER CON DATOS ESPACIADOS IRREGURALMENTE**

El análisis de las series dobles de Fourier desarrollado anteriormente emplea datos que están espaciados regularmente sobre una cuadrícula rectangular. Aunque hay importantes ventajas computacionales y estadísticas en el uso de datos en cuadrículas, hay obvias desventajas ya que éstos datos geológicos tienden a ser irregularmente espaciados. Consecuentemente, la adaptación del análisis de las series dobles de Fourier para datos irregularmente espaciados representa un importante avance. Además se ha demostrado que las series dobles de Fourier pueden fácilmente ser adaptadas a datos irregularmente espaciados de una manera similar a la de las superficies polinomiales regulares.

Una segunda importante debilidad del uso de las series dobles de Fourier con puntos de datos espaciados regularmente en la forma descrita anteriormente es que la longitud de onda fundamental en una dirección en particular está gobernada únicamente por la dimensión de la cuadrícula de muestra en esa dirección. La longitud de onda fundamental puede no tener necesariamente relación a las formas de onda presentes en los datos, y, en sucesión, todas las longitudes de onda más pequeñas son fracciones regulares de la longitud de onda fundamental. Esta propiedad puede conducir a una mala interpretación porque la superficie de Fourier así ajustada representa una transformación de la información original a una serie de formas de onda en las cuales las longitudes de onda están dispuestas por las dimensiones en la cuadrícula. Para evitar o aminorar esta dificultad, se pueden utilizar métodos computacionales en los cuales no hay restricción en la escogencia de las longitudes de onda fundamental, generalmente las longitudes de onda fundamental están siendo seleccionadas para que ambas sean más grandes que las dimensiones del área que contienen los puntos de muestra. La selección de las longitudes de onda fundamental más grande que el área de muestra tiene una ventaja adicional en la que se permite la extrapolación significativa más allá del área en el cual los puntos de datos están disponibles.

### **2.2.1 Matemáticas de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente**

Las matemáticas subrayan que el ajuste de las series dobles de Fourier para datos irregularmente espaciados es similar al análisis de tendencia polinomial en el que se involucran las sumatorias para obtener elementos matriciales, seguidos por la inversión de la matriz. Al desarrollar el fondo matemático las series dobles de Fourier pueden ser expresadas en una forma general, como previamente se hizo, en la cual:

$$z \cong F(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \lambda_{nm} \left( a_{nm} \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{H} + b_{nm} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{H} \right. \\ \left. + c_{nm} \cos \frac{m\pi x}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{H} + d_{nm} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{H} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde los símbolos tienen el mismo significado que en la **Ecuación 1**.

Con los datos espaciados irregularmente, la determinación de los coeficientes de la serie, **a<sub>nm</sub>**, **b<sub>nm</sub>**, **c<sub>nm</sub>** y **d<sub>nm</sub>**, involucra la solución de una ecuación matricial (**Ecuación11**), en vez del método de integración numérica simple apropiado para datos enmallados regularmente.

Para simplificar la presentación de los elementos individuales en la ecuación matricial, la siguiente notación es usada:

$$Q_n = \cos \frac{n\mathbf{p} y}{H}$$

$$R_n = \operatorname{sen} \frac{n\mathbf{p} y}{H}$$

$$S_m = \cos \frac{m\mathbf{p} x}{L}$$

$$T_m = \operatorname{sen} \frac{m\mathbf{p} x}{L}$$

Donde:

**m** = Índice del grado de términos pertenecientes a la dirección **x**.

$$\mathbf{m} = 0, 1, 2, \dots, \mathbf{M}.$$

**n** = Índice del grado de términos pertenecientes a la dirección **y**.

$$\mathbf{n} = 0, 1, 2, \dots, \mathbf{N}.$$

Con estas abreviaciones la ecuación matricial es:

$$\begin{vmatrix}
 \sum (Q_0 S_0)^2 & \sum Q_1 S_0 Q_0 S_0 & \dots & \sum R_N T_M Q_0 S_0 \\
 \sum Q_0 S_0 Q_1 S_0 & \sum (Q_1 S_0)^2 & \dots & \sum R_N T_M Q_1 S_0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum Q_0 S_0 Q_3 T_1 & \sum Q_1 S_0 Q_3 T_1 & \dots & \sum R_N T_M Q_3 T_1 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum Q_0 S_0 R_N T_M & \sum Q_1 S_0 R_N T_M & \dots & \sum (R_N T_M)^2
 \end{vmatrix}
 \times
 \begin{vmatrix}
 a_{0,0} \\
 a_{1,0} \\
 \vdots \\
 b_{3,1} \\
 \vdots \\
 d_{N,M}
 \end{vmatrix}
 =
 \begin{vmatrix}
 \sum Z(x,y) Q_0 S_0 \\
 \sum Z(x,y) Q_1 S_0 \\
 \vdots \\
 \sum Z(x,y) Q_3 T_1 \\
 \vdots \\
 \sum Z(x,y) R_N T_M
 \end{vmatrix}
 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

**N** = Máximo grado de términos armónicos en la dirección **y**, y

**M** = Máximo grado de términos armónicos en la dirección **x**.

La **Ecuación matricial (11)** es obtenida por la expansión de la serie doble de Fourier como la que se muestra de forma general (**Ecuación 10**), de modo que todas las posibles combinaciones de términos en el rango de grados de **0** a **N** en la dirección **y** y de grados de **0** a **M** en la dirección **x**, sean representadas.

La **Ecuación matricial (11)** es válida si los puntos de datos son distribuidos regular o irregularmente. Además, su uso permite la escogencia de 2 longitudes de onda independientemente de los puntos de datos, con la estipulación de que cada longitud de onda fundamental no deba ser menor que la correspondiente dimensión del área en la cual los puntos de datos se sitúen. La longitud de onda fundamental en cada dirección puede ser definida como la longitud del período del término armónico de primer grado que pertenece a esa dirección. Si las longitudes de onda fundamental son sustancialmente más grandes que las

dimensiones de la cuadrícula, puede ser razonable extrapolar la superficie de Fourier ajustada más allá de los puntos de datos hasta los límites (pero no más allá) impuestos por las longitudes de onda fundamental que han sido escogidas.

### **2.2.2 Aplicación de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente en registros eléctricos de pozos**

Las series de Fourier pueden ser usadas para analizar y describir estratos sedimentarios en los cuales la variación de capa a capa es cíclica o periódica, los estratos sedimentarios, de común con muchos otros fenómenos naturales, no obstante, no están compuestos de componentes que representen ciclos o períodos “puros”. En vez de ello están compuestos de una mezcla de componentes periódicos y componentes aleatorios o “ruido” (**Ver Figura 1**).

El análisis armónico suministra un método de filtración. Además, de la necesidad de separar componentes aleatorios y cíclicos, puede haber necesidad de expresar una curva compleja en términos de un grupo más pequeño de números los cuales, en esencia, sirven como descripción numérica de la curva. Los coeficientes de una serie de Fourier pueden servir como estos descriptores.

Los registros eléctricos de pozos consisten de curvas continuas que representan variaciones como por ejemplo, de resistividad y de potencial espontáneo de rocas sedimentarias que han sido penetradas por el pozo, estas propiedades eléctricas están influenciadas por la litología de las rocas encontradas y por los fluidos que ellas contienen. Las curvas obtenidas en el proceso de registro pueden ser analizadas y caracterizadas por medio de las series de Fourier.

Como se mencionó anteriormente, en un contexto geológico la variable dependiente, **Z**, de las series dobles de Fourier, podría representar la altura de una superficie, y las variables **X** y **Y** podrían representar la ubicación con respecto a las direcciones este-oeste y norte-sur. En el caso particular de los registros eléctricos la variable dependiente, **Z**, y las independientes **X** y **Y**, representarán las lecturas (valores numéricos) de tres tipos de registros diferentes, por ejemplo, a la variable **Z**, se le podrían asignar las lecturas de un registro sónico y a las variables **X** y **Y**, asignarles las lecturas de un registro de resistividad y uno de potencial espontáneo. En éste orden de ideas la **Ecuación 10**, deberá transformarse para cumplir con los nuevos requerimientos que establece el estar utilizando ya no datos geológicos, como coordenadas en el espacio o datos topográficos, sino, datos de registros.

De tal forma que:

**$z_i$**  = Valor numérico del registro **z**,  **$i = 0, 1, 2, \dots, 8$** .

**$x_i$**  = Valor numérico del registro **x**,  **$i = 0, 1, 2, \dots, 8$** .

**$y_i$**  = Valor numérico del registro **y**,  **$i = 0, 1, 2, \dots, 8$** .

**m** = Índice del grado de términos pertenecientes al registro **x**.

**n** = Índice del grado de términos pertenecientes al registro **y**.

**M** = Máximo grado de términos especificados pertenecientes al registro **x**.

**N** = Máximo grado de términos especificados pertenecientes al registro **y**.

**L** = Mitad de la longitud de la muestra del registro **x**.

**H** = Mitad de la longitud de la muestra del registro **y**.

Y en donde bs demás términos conservan el mismo significado dentro de ésta ecuación.

Después de haber tenido en cuenta el nuevo ordenamiento que adquiere la **Ecuación 10**, se procede a la simplificación de los elementos individuales dentro de ésta (conversión a notación:  $\mathbf{Q}_n, \mathbf{R}_n, \mathbf{S}_m, \mathbf{T}_m$ ), para poderlos disponer de una forma matricial característica como la que presentan las series dobles de Fourier con datos irregularmente espaciados, como se muestra en la **Ecuación 11**.

Posteriormente se debe hacer uso de un método numérico de solución de matrices para obtener los coeficientes de la serie ( $\mathbf{a}_{nm}, \mathbf{b}_{nm}, \mathbf{c}_{nm}, \mathbf{d}_{nm}$ ). Habiendo obtenido la totalidad de los coeficientes, se ingresan éstos dentro de la ecuación general de las series dobles (**Ecuación 10**), junto con los pares de datos de los registros  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{y}$ , para así obtener el correspondiente dato del registro  $\mathbf{z}$ . Registro  $\mathbf{z}$  que en éste caso será experimental y que podrá servir para compararlo contra el registro  $\mathbf{z}$  original, y con el que se mostrarán las bondades de usar el ajuste por series dobles de Fourier sí, el coeficiente de correlación entre los dos registros es alto.

## 3. SOFTWARE: MANUAL DEL USUARIO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El Software **POZOSOFT**, diseñado bajo el lenguaje de programación de Visual Basic Versión 6.0, es una herramienta computacional que se crea como soporte de investigación para la industria del petróleo en el área de registros de pozos.

**POZOSOFT** tiene como objetivo principal el de servir en la reconstrucción y elaboración de registros sínicos por medio de registros resistivos y radiactivos utilizando para ello los fundamentos matemáticos de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente. Además, se convierte debido a la versatilidad en el uso del lenguaje de programación implementado en la fabricación del software en una herramienta sencilla, fácil de manejar, didáctica y confiable para el ingeniero de petróleos y para los usuarios en general.

### 3.2 INICIALIZACIÓN

El software **POZOSOFT** requiere antes de iniciar su ejecución la creación de uno o varios archivos en el formato **.XLS de Microsoft Excel** con los datos numéricos de los registros de pozos que el usuario posea, y que en últimas serán los archivos con los que contará el programa para realizar la reconstrucción del registro original o la elaboración de uno nuevo.

Los datos deberán almacenarse en una carpeta denominada **RT-CGR-DTCO**, cuando el usuario tenga los datos de los registros de resistividad, rayos gamma y sínico, o por el contrario almacenarse en una carpeta denominada **RT-CGR**,

cuando el usuario sólo tenga los datos de los registros de resistividad y de rayos gamma. Estas carpetas deberán conservar un orden al momento en el que se ingresen los datos de los registros, para permitir el óptimo funcionamiento del software, a saber:

- En la primera columna se deben almacenar los datos de profundidad correspondientes a las lecturas de todos los registros y en donde la palabra **DEPTH** deberá encabezar ésta columna.
- En la segunda columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro de resistividad y en donde las letras **RT** deberán encabezar ésta columna.
- En la tercera columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro de rayos gamma y en donde las letras **CGR** deberán encabezar ésta columna.
- Por último, en la cuarta columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro sísmico o de tiempo de tránsito y en donde las letras **DTCO** deberán encabezar ésta columna. Esto sí se posee el registro sísmico, de lo contrario, obviar éste paso.

### **3.3 MÉTODO NUMÉRICO UTILIZADO EN LA SOLUCIÓN MATRICIAL DE LAS SERIES DOBLES DE FOURIER**

El método numérico de solución de matrices que se implementa en el software **POZOSOFT** para los datos de los registros que el usuario carga en el programa, es el método de Gauss - Jordan.

Este método es prácticamente igual al Método de Gauss, excepto que se busca simplificar un poco más el procedimiento al normalizar cada ecuación base antes de efectuar las operaciones de multiplicación y suma con las siguientes. Esto es, dejar el primer coeficiente de cada ecuación base igual a 1, dividiendo por el coeficiente original toda la ecuación. Hasta llegar a tener una matriz identidad. Esto tendrá como consecuencia un despeje más fácil de cada variable al terminar todo el procedimiento.

#### **3.3.1 Generalidades**

##### **\* Operaciones que no cambian el conjunto de soluciones**

- Multiplicar a una ecuación por un número distinto de cero.
- Cambiar las ecuaciones de orden.
- Sumar a una ecuación un múltiplo (positivo o negativo) de otra.

##### **\* Matriz de Gauss-Jordan**

Una matriz está en forma de Gauss-Jordan si cumple las siguientes condiciones:

- Las filas nulas están en la parte inferior de la matriz.
- Si una fila no es nula, entonces el primer elemento (de izquierda a derecha) es un uno. Estos unos se llaman pivotes.

- Los pivotes de más arriba están a la izquierda de los pivotes de abajo .
- Las columnas que contienen a los pivotes tienen ceros en los demás lugares.

**\* Como hallar todas las soluciones**

- Si alguna de la ecuaciones es de la forma  $0 = \text{número distinto de cero}$  entonces el sistema de ecuaciones lineal no tiene solución. Si no hay ecuaciones de éste tipo el sistema va a tener solución.
- Si la cantidad de pivotes es igual a la cantidad de incógnitas, entonces: o bien el sistema no tiene solución o bien existe una única solución.
- Si la cantidad de pivotes es menor a la cantidad de incógnitas, entonces el sistema: o bien no tiene solución o bien tiene infinitas soluciones.

**\* Aplicaciones de Gauss-Jordan**

El rango de la matriz **A** es la cantidad de pivotes de la matriz de Gauss-Jordan de **A**.

Dada una matriz **A** de **m x n**:

- Si el rango de **A** es **n**, entonces el sistema  $\mathbf{A \cdot x = b}$  tiene o bien una solución o bien no tiene solución.
- Si el rango de **A** es menor que **n**, entonces el sistema  $\mathbf{A \cdot x = 0}$  tiene infinitas soluciones.
- Si el rango de **A** es **m**, entonces el sistema  $\mathbf{A \cdot x = b}$  tiene soluciones para cualquier **b**.
- Si el rango de **A** es menor que **m**, entonces el sistema de ecuaciones  $\mathbf{A \cdot x = b}$  no puede tener soluciones para todo **b**.

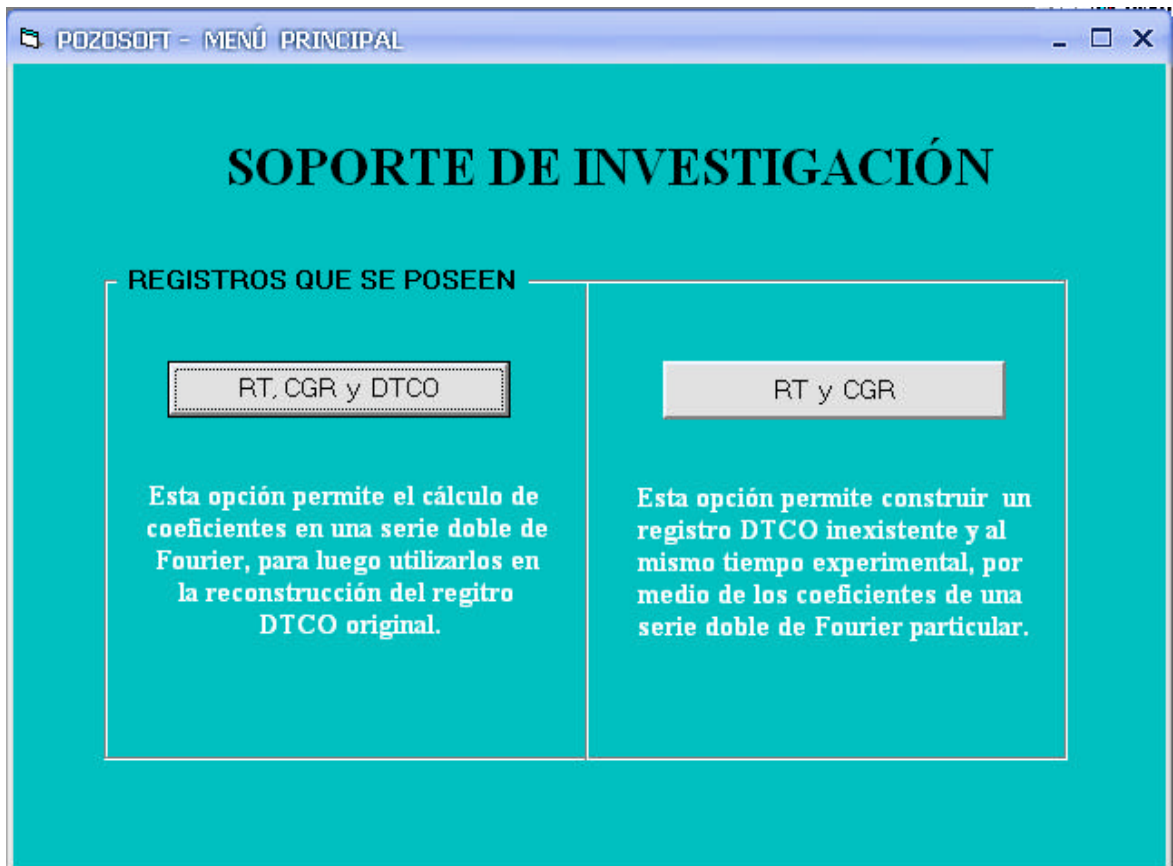
Dada una matriz  $\mathbf{A}$  de  $n \times n$  (es decir cuadrada), si el rango de  $\mathbf{A}$  es  $n$ , entonces existe una matriz inversa de  $\mathbf{A}$ . Si  $\mathbf{A}$  tiene inversa, entonces el sistema de ecuaciones  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$  tiene como única solución  $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b}$ .

**\* Ventajas y desventajas del método**

- Es un método que por así decirlo es directo y se obtiene un resultado de una manera fácil sin tener ningún tipo de iteraciones, es útil en  $n$  sistemas de ecuaciones.
- El escalonamiento puede conllevar muchos errores en la aplicación de éste método.
- Durante éste proceso es muy frecuente que se ganen o pierdan cifras decimales, lo cual lleva a un resultado muy aproximado del valor real de la solución.
- Se pueden tener sistemas incompatibles así que para evitarlo se busca que en la diagonal principal de la matriz se tengan los valores mayores.

### 3.4 MENÚ PRINCIPAL

Esta pantalla nos presenta las dos opciones con las que cuenta **POZOSOFT** dependiendo de los registros que se posean y de lo que el usuario quiera realizar.



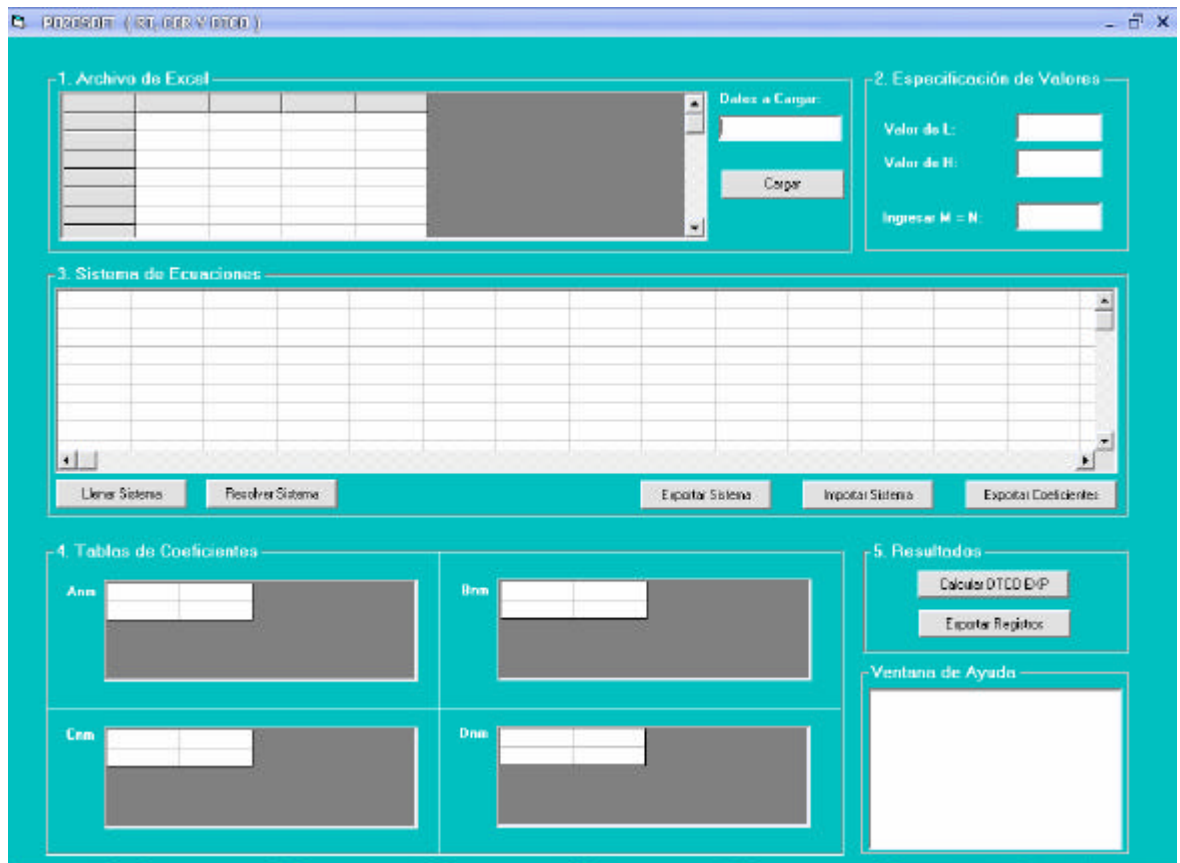
#### 3.4.1 Opción “RT, CGR y DTCO”

Esta opción asume que el usuario tiene los datos numéricos de los registros:

- Resistividad (**RT**)
- Rayos gamma (**CGR**)
- Sónico (**DTCO**)

Con ésta opción lo que se desea es generar un registro sónico experimental a partir de unos coeficientes obtenidos por la solución matricial característica de las series dobles de Fourier para datos espaciados irregularmente (**Ecuación 11**), para luego compararlo y correlacionarlo con el registro sónico original o de campo que el usuario posee.

Al hacer clic sobre ésta opción, se abre una pantalla con las siguientes características:



### **\* Recuadro “1. Archivo de Excel”**

En éste recuadro se presentan dos opciones y un visor móvil de los datos cargados.

#### **\*\* Opción “Datos a Cargar”**

El usuario deberá digitar en ésta opción, una cantidad numérica mayor que uno (1) y que le estipulará al programa la cantidad de datos que se cargarán y que por lo tanto tendrán los tres registros que posee. Por ejemplo, sí el usuario digita el número 50, se tomarán los 50 primeros datos del registro de resistividad, los 50 primeros datos del registro de rayos gamma y los 50 primeros datos del registro sónico. Cabe anotar que sí los tres registros del usuario no tienen dicha cantidad de datos (50), sino por el contrario una menor, el programa automáticamente tomará la totalidad de los datos que existan en la carpeta donde se estén almacenando esos registros.

#### **\*\* Opción “Cargar”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente abrirá la carpeta “**RT-CGR-DTCO**” donde se encuentran los archivos con los datos numéricos de los registros de resistividad, rayos gamma y sónico que el usuario ha incorporado al software para posteriormente ejecutarlos.

#### **\*\* Visor móvil de registros**

En éste visor se presentarán la totalidad de datos que el usuario decidió cargar y en donde por medio de la barra de desplazamiento se podrán observar sus respectivos valores y verificar sí los registros conservan el orden especificado para el óptimo funcionamiento del programa, a saber:

- Primera columna datos de profundidad.
- Segunda columna datos del registro de resistividad (**RT**).
- Tercera columna datos del registro de rayos gamma (**CGR**).
- Cuarta columna datos del registro sónico o de tiempo de tránsito (**DTCO**).

De lo contrario se aconseja al usuario reacomodar los datos de los registros en el archivo de Excel que ejecutó, y que se encuentran en la carpeta "**RT-CGR-DTCO**" ya que sino lo hace, el software lo más posiblemente es que no trabaje o arroje resultados incoherentes

#### \* **Recuadro "2.Especificación de Valores"**

En éste recuadro se presentan dos valores numéricos y una opción.

##### **\*\* Valor de L:**

Este valor que se obtiene para **L**, representa la mitad de la longitud de la muestra de los datos que han sido cargados en el programa correspondiente al registro de resistividad. En otras palabras, representa el valor numérico del dato más grande menos el dato más pequeño todo esto dividido en dos para éste registro.

##### **\*\* Valor de H:**

Este valor que se obtiene para **H**, representa la mitad de la longitud de la muestra de los datos que han sido cargados en el programa correspondiente al registro de rayos gamma. En otras palabras, representa el valor numérico del dato más grande menos el dato más pequeño todo esto dividido en dos para éste registro.

### **\*\* Opción “Ingresar M = N:”**

En ésta opción se le presenta al usuario la posibilidad de digitar una cantidad numérica entre 1 y 10, que representará el grado máximo de términos armónicos para el registro de resistividad (**M**) y para el registro de rayos gamma (**N**). La cual establecerá al final, la cantidad de coeficientes que se obtendrán de la solución matricial característica de las series dobles de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:  $(2*(M=N)+1)^2$ . Por ejemplo, si el usuario digita el número 5, se obtendrán  $(2*(5)+1)^2$  coeficientes, es decir, 121.

En ésta parte es muy importante recalcar que el número ideal de coeficientes que se deben obtener para que satisfagan la obtención de un DTCO experimental lo más parecido posible a los datos del DTCO original o de campo, debe ser igual a la cantidad total de datos cargados. Idealidad que se cumple cuando estos datos por inexactitud en los instrumentos de medida, fallas humanas, entre otras, sufren procesos de depuración y “limpieza”. En otras palabras, se introducen de tal manera que todos logran hacer parte de una misma tendencia representativa de la muestra total de datos.

### **\* Recuadro “3. Sistema de Ecuaciones”**

En éste recuadro se presentan cinco opciones y un visor móvil del sistema de ecuaciones formado por los datos cargados.

### **\*\* Opción “Llenar Sistema”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente realiza la conversión de los datos cargados por el usuario a un sistema de ecuaciones que se organizará de acuerdo a la forma de la matriz característica de las series dobles de Fourier para datos espaciados irregularmente (**Ecuación 11**).

### **\*\* Opción “Resolver Sistema”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente le da solución al sistema de ecuaciones generado por la cantidad de datos cargados a través del método de Gauss- Jordan.

### **\*\* Opción “Exportar Sistema”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa le captura al usuario la totalidad del sistema de ecuaciones generado por los datos cargados y se lo almacena en una carpeta denominada **SISTEMA**.

### **\*\* Opción “Importar Sistema”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente le captura un sistema de ecuaciones que pudo haberse generado con anterioridad y lo introduce en el visor móvil de éste recuadro indicando que será el sistema de ecuaciones con el que se trabajará de ahora en adelante y que servirá de solución a la serie doble de Fourier característica de él. Generando así unos coeficientes propios y un DTCO experimental particular.

Esta opción se creó con el fin de aligerar y obviar el proceso de captura de datos y el proceso de lectura de los grados máximos de términos armónicos de los registros de resistividad (**M**) y de rayos gamma (**N**), que para algunas cantidades numéricas apreciables (por ejemplo,  $M = N: 7$  ó más) puede resultar dispendioso.

## **\*\* Opción “Exportar Coeficientes”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa le captura al usuario los coeficientes de la serie doble de Fourier que han sido generados con los datos cargados en la actualidad y se los almacena en una carpeta denominada **COEFICIENTES**.

Esta opción se creó con el fin de servir como soporte en la construcción de un registro sónico experimental cuando solamente se posean los registros de resistividad y de rayos gamma.

## **\*\* Visor móvil del sistema de ecuaciones**

En éste visor se presentarán al hacer clic sobre la opción “**llenar sistema**” la totalidad de ecuaciones generadas por los datos cargados dispuestos de la forma matricial característica de las series dobles de Fourier (**Ecuación 11**), y que contará con **W** filas y **(W+1)** columnas. En donde:  $W = (2*(M=N)+1)^2$ . Por ejemplo, sí en la opción “**Ingresar M = N:**” el usuario digita el valor de 3, saldrán 49 filas y (49+1) columnas. Estas 49 filas y 49 primeras columnas corresponden al arreglo de la parte izquierda de la **Ecuación 11** y la columna que hay de más, en éste caso la 50, corresponde al arreglo de la parte derecha de ésta misma ecuación.

Al hacer clic sobre la opción “**resolver sistema**” se presentarán sobre el visor móvil las mismas **W** filas y **(W+1)** columnas, pero ya dispuestas en forma de solución matricial, la cual se obtiene por la implementación dentro del programa de un método numérico de solución de matrices que para nuestro caso es el método numérico de Gauss-Jordan. Siguiendo el ejemplo anterior (el de 49 filas y 50 columnas), las 49 filas y las 49 primeras columnas corresponden a la disposición que da el método numérico al arreglo de la parte izquierda de la **Ecuación 11** (diagonal principal con unos (1) y el resto con ceros (0)), y en la última columna, la 50, se encuentra la solución al arreglo del centro en ésta misma ecuación, es

decir, los valores de los coeficientes de la serie doble de Fourier que se estén trabajando.

Para las opciones “**Exportar Sistema**” y “**Exportar Coeficientes**” se realizará sólo una lectura y almacenamiento de datos en sus respectivas carpetas.

Para la opción **Importar Sistema**” se capturarán los datos almacenados en la carpeta denominada **SISTEMA** y se mostrarán en el visor móvil de acuerdo a la disposición de filas y columnas antes mencionada.

#### \* Recuadro “4. Tablas de Coeficientes”

En los visores móviles de éste recuadro se muestran las ubicaciones que toman los coeficientes obtenidos en la solución matricial característica de las series dobles de Fourier en cuatro grupos, a saber:

- $a_{nm}$ : Coeficientes del término **coseno-coseno** de grado **n** y **m**.
- $b_{nm}$ : Coeficientes del término **seno- coseno** de grado **n** y **m**.
- $c_{nm}$ : Coeficientes del término **coseno- seno** de grado **n** y **m**.
- $d_{nm}$ : Coeficientes del término **seno- seno** de grado **n** y **m**.

Sí el usuario posiciona el cursor y hace clic sobre el valor de cualquier coeficiente, el programa automáticamente le mostrará una ventana que le especificará su grupo y su grado.

### \* Recuadro “5. Resultados”

En éste recuadro se presentan dos opciones:

#### \*\* Opción “Calcular DTCO EXP”

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa captura y procesa los valores obtenidos de los coeficientes de la serie doble de Fourier que se está trabajando y los introduce en su ecuación general (**Ecuación 10**) junto con cada par de datos ( $x_i, y_i$ ), para luego obtener un correspondiente  $z_i$  experimental.

Donde:

$x_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro de resistividad.

$y_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro de rayos gamma.

$z_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro sónico experimental.

Los resultados saldrán en el visor móvil del recuadro “**1. Archivo de Excel**” en la columna encabezada con las letras **DTCO EXP**.

#### \*\* Opción “Exportar Registros”

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente captura los datos numéricos que se haya en las columnas **DEPTH, RT, CGR, DTCO** y **DTCO EXP** del visor móvil del recuadro “**1. Archivo de Excel**” y los almacena en la carpeta **RESULT-GENERAL**. Carpeta que facilitará la comparación de los datos de los registros al poder el usuario graficarlos en Excel.

### \* Recuadro “Ventana de Ayuda”

Esta ventana se creó con el objetivo de ayudar al usuario, al poder presentar una serie de mensajes de soporte que contienen las generalidades o implicaciones de cada uno de los botones que se encuentran en la pantalla **POZOSOFT (RT, CGR y DTCO)** y que con un simple posicionamiento del cursor sobre cada uno de ellos, se mostrarán en ésta.

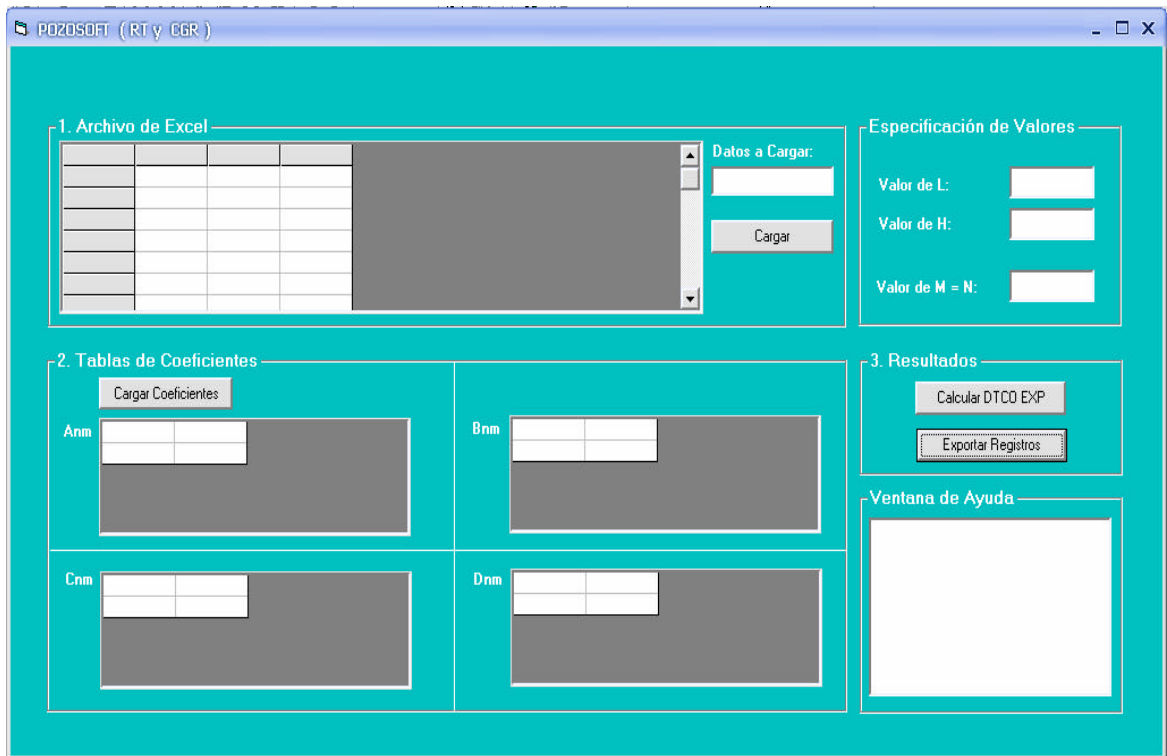
### 3.4.2 Opción “RT y CGR”

Esta opción asume que el usuario tiene los datos numéricos de los registros:

- Resistividad (**RT**)
- Rayos gamma (**CGR**)

Con ésta opción lo que se desea es generar un registro sónico experimental utilizando unos coeficientes preexistentes de una serie doble de Fourier particular.

Al hacer clic sobre ésta opción, se abre una pantalla con las siguientes características:



**\* Recuadro “1. Archivo de Excel”**

En éste recuadro se presentan dos opciones y un visor móvil de los datos cargados.

**\*\* Opción “Datos a Cargar”**

El usuario deberá digitar en ésta opción, una cantidad numérica mayor que uno (1) y que le estipulará al programa la cantidad de datos que se cargarán y que por lo tanto tendrán los dos registros que posee.

## **\*\* Opción “Cargar”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa automáticamente abrirá la carpeta “**RT-CGR**” donde se encuentran los archivos con los datos numéricos de los registros de resistividad y rayos gamma que el usuario ha incorporado al software para posteriormente ejecutarlos.

## **\* Recuadro “2.Tablas de Coeficientes”**

Este recuadro solamente presenta la opción “**Cargar Coeficientes**” y con la cual el usuario podrá al hacer clic sobre ella, importar los coeficientes obtenidos de una serie doble de fourier que haya trabajado y previamente almacenado en la carpeta **COEFICIENTES**, e introducirlos en su visor móvil. Además ésta opción permite que el programa automáticamente capture el valor correspondiente a la opción “**Ingresar M = N:**” del recuadro “**Especificación de valores**”. Valor que fue utilizado para generar éstos coeficientes.

## **\* Recuadro “3. Resultados”**

En éste recuadro se presentan dos opciones:

## **\*\* Opción “Calcular DTCO EXP”**

Al hacer clic sobre ésta opción, el programa captura y procesa los valores obtenidos de los coeficientes de la serie doble de Fourier que se ha cargado o importado y los introduce en su ecuación general (**Ecuación 10**) junto con cada par de datos ( $x_i, y_i$ ), para luego obtener el correspondiente  $z_i$  experimental.

Donde:

$x_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro de resistividad.

$y_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro de rayos gamma.

$z_i$  = valor del dato numérico  $i$  del registro sónico experimental.

Los resultados saldrán en el visor móvil del recuadro "**1. Archivo de Excel**" en la columna encabezada con las letras **DTCO EXP**.

### **\*\* Opción "Exportar Registros"**

Al hacer clic sobre esta opción, el programa captura los datos numéricos que se hayan en las columnas **DEPTH**, **RT**, **CGR** y **DTCO EXP** del visor móvil del recuadro "**1. Archivo de Excel**" y los almacena en la carpeta **RESULT-RT-CGR**. Carpeta que facilitará la comparación de los datos de los registros al poder el usuario graficarlos en Excel.

Los recuadros "**Especificación de valores**" y "**Ventana de ayuda**" presentan las mismas funciones y características que las de la opción **RT**, **CGR** y **DTCO** del menú principal.

## 4. PRUEBAS

En esta parte del trabajo se presentarán los resultados obtenidos en la ejecución del software **POZOSOFT** para un total de cuatro pruebas.

Los datos numéricos de los registros utilizados en estas pruebas corresponden a datos de campo reales de un pozo "X" ubicado en nuestro país.

### 4.1 PRUEBA 1

(Ver Anexo A)

En esta prueba se disponen de **4049** datos provenientes de un registro de resistividad (**RT**), un registro de rayos gamma (**CGR**) y un registro sísmico o de tiempo de tránsito (**DTCO**).

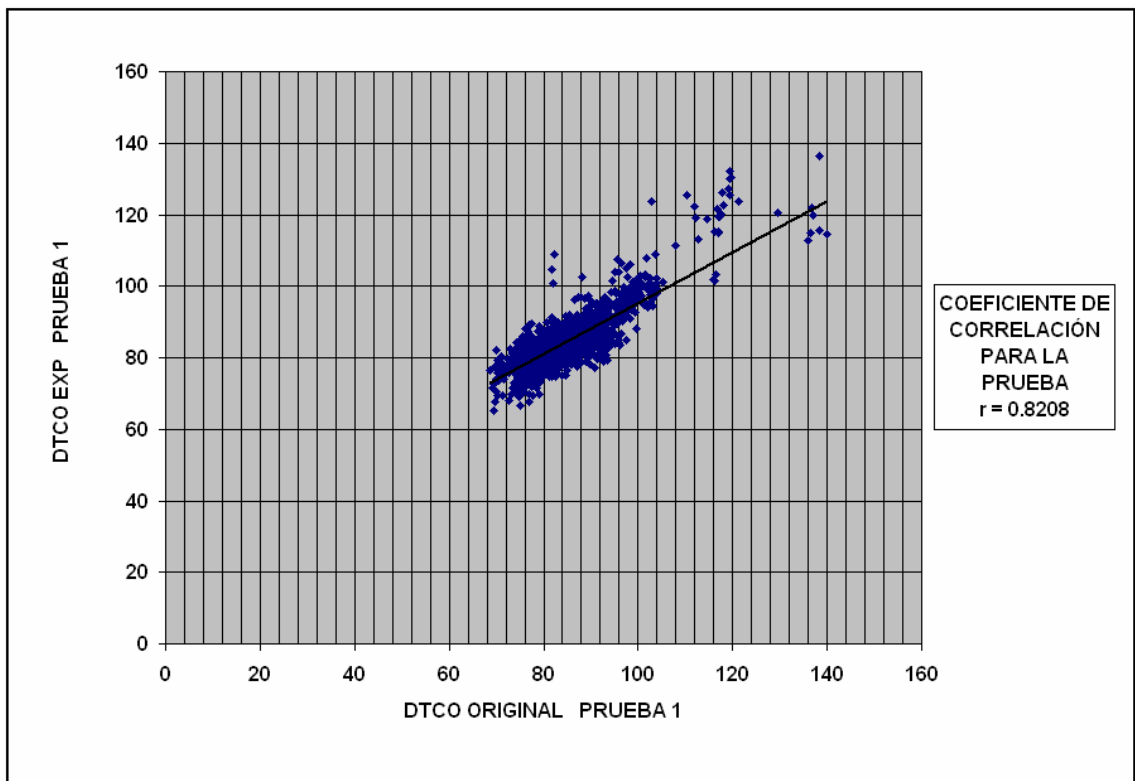
Se hizo clic sobre la opción "**RT, CGR y DTCO**" del menú principal, lo que permitió abrir la pantalla '**POZOSOFT (RT, CGR y DTCO)**', en donde se especificarán ciertos valores y en la cual se realizarán los cálculos pertinentes para darle solución a una serie doble de Fourier particular.

La prueba fue corrida para los **4049** datos y con un valor de **M = N de 8**, lo que generó una cantidad de **289** coeficientes para la serie y los cuales intervendrán en el cálculo del DTCO experimental, junto con los pares de datos cargados de los registros de resistividad y rayos gamma.

Los datos obtenidos de calcular el registro DTCO experimental por medio del software POZOSOFT fueron comparados contra los datos del registro DTCO original cargado inicialmente.

Las relaciones entre estos dos registros y el coeficiente de correlación ( $r$ ) pueden observarse gráficamente en la **Figura 3**.

**Figura 3. Comparación de registros para la PRUEBA 1.**



#### **4.1.1 Medida estadística utilizada para evaluar el rendimiento y la exactitud de la prueba**

El valor del coeficiente de correlación ( $r$ ) de la **Figura 3** que equivale a: **0.8208**, representa el grado de éxito en la reducción de la desviación estándar al aplicar métodos de regresión.

El  $r$  varía entre 0 y 1. Un valor de 1 implica una correlación perfecta, mientras que un valor de 0 indica que no hay correlación entre las variables. Teniendo en cuenta lo anterior y el valor obtenido del coeficiente  $r$  para la prueba, se determina que el registro **DTCO EXP** generado por el software presenta una muy buena correlación con el registro **DTCO ORIGINAL**, a su vez se muestra la bondad y confiabilidad en la implementación del ajuste por series dobles de Fourier para datos espaciados irregularmente, sobre todo sí el usuario reconoce o percibe que estos varían de alguna forma periódica.

#### **4.2 PRUEBA 2**

**(Ver Anexo B)**

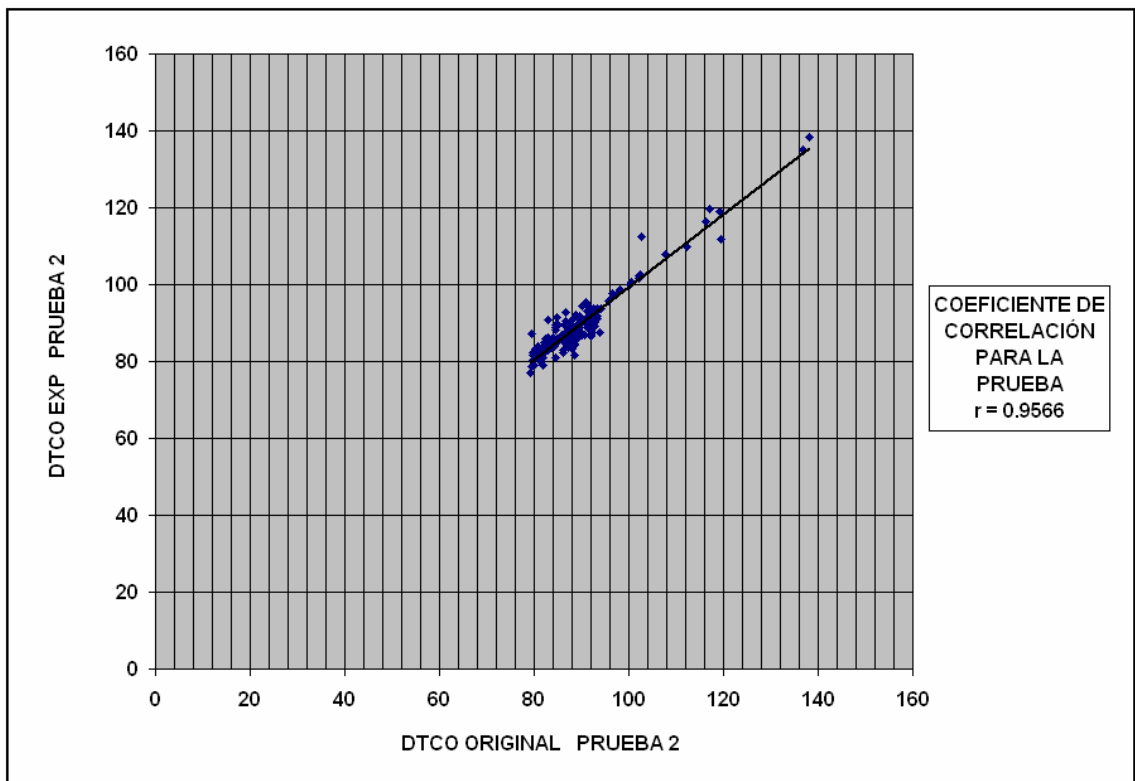
En esta prueba se cuenta con **1014** datos representativos de los **4049** provenientes de los registros **RT**, **CGR** y **DTCO** de la prueba 1.

La prueba fue corrida para los primeros **200** datos y con un valor de  **$M = N$  de 7**, lo que generó una cantidad de **225** coeficientes para esta serie y los cuales intervendrán en el cálculo.

Los datos obtenidos de calcular el registro DTCO experimental por medio del software POZOSOFT fueron comparados contra los datos del registro DTCO original cargado inicialmente (200 datos).

Las relaciones entre estos dos registros y el coeficiente de correlación ( $r$ ) pueden observarse gráficamente en la **Figura 4**.

**Figura 4. Comparación de registros para la PRUEBA 2.**



#### **4.2.1 Medida estadística utilizada para evaluar el rendimiento y la exactitud de la prueba**

El valor del coeficiente de correlación ( $r$ ) de la **Figura 4** que equivale a: **0.9566**, indica que el registro **DTCO EXP** generado por el software presenta una casi perfecta correlación con el registro **DTCO ORIGINAL**. Esto se debe a que el número de coeficientes obtenidos para la prueba es casi igual (para éste caso un poco mayor) al número de datos representativos de la muestra, es decir, hay mayores posibilidades de que los coeficientes se redistribuyan mejor entre los datos de ésta.

#### **4.3 PRUEBA 3**

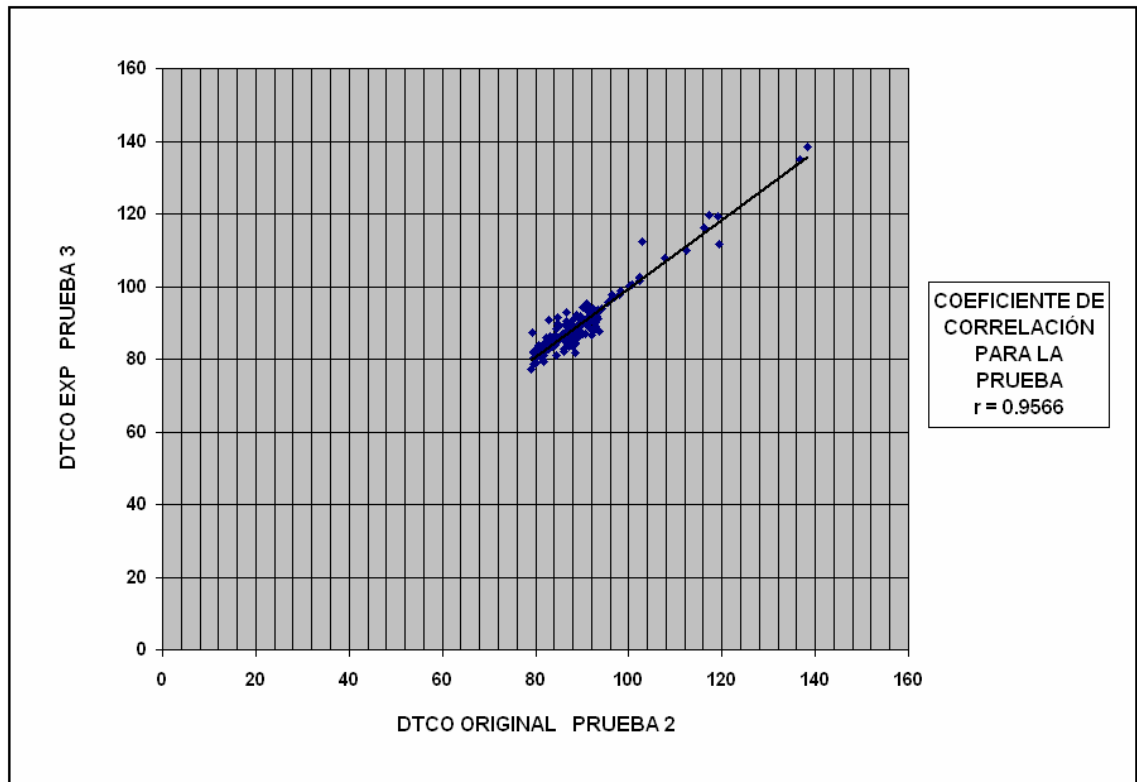
**(Ver Anexo C)**

En esta prueba se cuenta con los mismos **200** datos provenientes del registro de resistividad (**RT**) y del registro de rayos gamma (**CGR**), de la prueba anterior y para la cual se ha obviado las lecturas del registro sónico (**DTCO**).

Se hizo clic sobre la opción "**RT y CGR**" del menú principal, lo que permitió abrir la pantalla "**POZOSOFT (RT y CGR)**", en donde se cargarán estos **200** datos y los coeficientes que previamente se exportaron de la prueba número 2, los cuales intervendrán en la construcción de un registro **DTCO EXP** para el pozo en donde se tomaron los otros dos registros.

Las relaciones entre el registro creado **DTCO EXP** y el registro **DTCO ORIGINAL de la prueba 2**, al igual que el coeficiente de correlación ( $r$ ) pueden observarse gráficamente en la **Figura 5**.

**Figura 5. Comparación de registros para la PRUEBA 3.**



Para corroborar si el registro recién creado (**DTCO EXP prueba 3**) es similar al registro que se posee en la prueba anterior (**DTCO ORIGINAL prueba 2**), los coeficientes de correlación (**r**) de las **Figuras 4** y **5** deben ser los mismos.

Es importante recalcar para esta prueba, que este tipo de construcciones (**DTCO EXP**) se deben hacer para cuando los datos que se poseen de los registros de resistividad y de rayos gamma del pozo, guardan estrecha relación o similares características en la litología de las rocas encontradas y de los fluidos presentes en ellas, con los datos de los registros que originaron los coeficientes importados.

Esta prueba se desarrolló con el fin de demostrar que el software puede construir perfectamente, con una muy buena aproximación y una trascendental confiabilidad registros sónicos experimentales, para cuando en el pozo en el que se trabaja no exista o no haya la posibilidad de correr uno.

#### **4.4 PRUEBA 4**

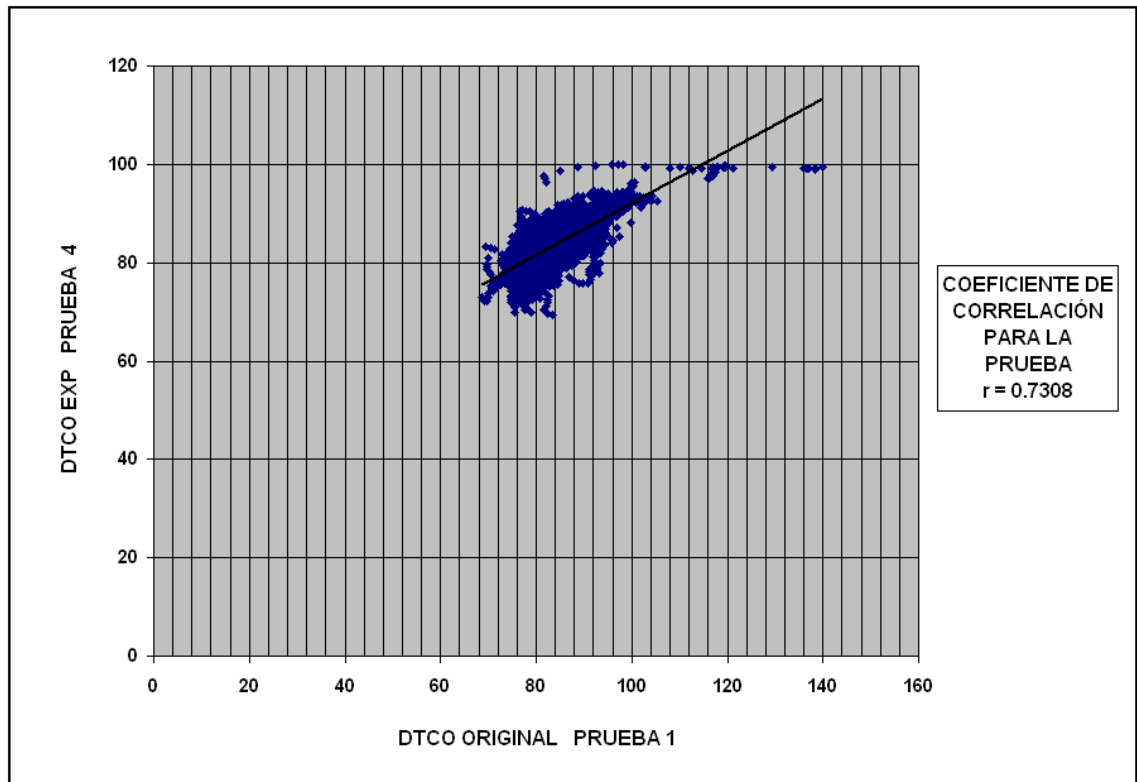
**(Ver Anexo D)**

En esta prueba se contó con los mismos **4049** datos de la prueba 1.

Se logró obtener un registro **DTCO EXP**, a partir de los registros de resistividad (**RT**), rayos gamma (**CGR**) y sónico ó de tiempo de tránsito (**DTCO**), pero utilizando la modalidad de ajuste por tendencia polinomial para los **4049** datos, y en la que se incluye un número de tres variables (**x**, **y** y **z**) entre ellas la variable dependiente, y la restricción de que la superficie generada sea de segundo grado y que es de la forma:  $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$ . Condiciones que también se cumplen en el análisis armónico, más específicamente en las series dobles de Fourier para datos espaciados irregularmente que en éste trabajo se están desarrollando (**Ecuación 10**).

Las relaciones entre los registros **DTCO ORIGINAL** y **DTCO EXP**, al igual que el coeficiente de correlación (**r**), pueden observarse gráficamente en la **Figura 6**.

**Figura 6. Comparación de registros para la PRUEBA 4.**



Esta prueba a pesar de que se realizó en **Excel** y no con el software **POZOSOFT**, pretende mostrar la bondad de utilizar la modalidad de ajuste por series dobles de Fourier antes que la de ajuste por tendencia polinomial, para datos en los que el usuario intuye que estos varían de alguna forma periódica.

Es muy claro que al comparar los coeficientes de correlación (**r**) de las **Figuras 3 y 6**, el ajuste por series dobles de Fourier genera una mejor aproximación entre los datos de los registros **DTCO ORIGINAL** y **DTCO EXP** que los que genera el ajuste por tendencia polinomial.

## 5. CONCLUSIONES

Las series de Fourier suministran una manera de representar ciertas estructuras complicadas por medio de un conjunto de simples formas de onda descritas por los términos seno y coseno. Además, determinan si las variaciones en algunas características innatas pueden ser representadas por una función oscilatoria.

Si una serie de Fourier suministra una buena representación de los datos observados, es posible que las fluctuaciones sean debidas a causas que varían de alguna manera periódica; si la serie de Fourier no representa los datos convincentemente, otros métodos matemáticos como el ajuste polinomial pueden ser empleados.

El análisis de tendencia polinomial permite la Interpolación entre puntos de datos, y la extrapolación mas allá de los puntos de datos para distancias cortas únicamente. El análisis armónico (series de Fourier) puede permitir también la extrapolación más allá de los puntos de datos pero puede ser usado para interpolar únicamente si métodos para datos espaciados irregularmente son utilizados.

La serie doble de Fourier representa una expansión de la serie simple de Fourier en donde una variable dependiente,  $Z$ , se vuelve una función de dos variables independientes,  $X$  y  $Y$ . Así, las series dobles de Fourier son apropiadas para la representación de superficies en lugar de curvas.

Las series dobles de Fourier pueden ser usadas para analizar y describir estratos sedimentarios en los cuales la variación de capa a capa es cíclica o periódica, no obstante los estratos sedimentarios, de común con muchos otros fenómenos naturales, no están compuestos de componentes que representen ciclos o períodos “puros”. En vez de ello están compuestos de una mezcla de componentes periódicos y componentes aleatorios o “ruido”.

El análisis armónico suministra un método de filtración. Además, de la necesidad de separar componentes aleatorios y cíclicos, puede haber necesidad de expresar una curva compleja en términos de un grupo más pequeño de números los cuales, en esencia, sirven como descripción numérica de la curva. Los coeficientes de una serie de Fourier pueden servir como estos descriptores.

El Software **POZOSOFT**, diseñado bajo el lenguaje de programación de Visual Basic Versión 6.0, es una herramienta computacional que se crea como soporte de investigación para la industria del petróleo en el área de registros de pozos.

**POZOSOFT** se utiliza en la reconstrucción y obtención de registros sínicos por medio de registros resistivos y radiactivos recurriendo para ello a los fundamentos matemáticos de las series dobles de Fourier con datos espaciados irregularmente. Además, se convierte gracias a la versatilidad en el uso del lenguaje de programación empleado en la elaboración del software en una herramienta sencilla, fácil de manejar, didáctica y confiable para el ingeniero de petróleos y para los usuarios en general.

El número ideal de coeficientes que se deben obtener para que satisfagan la obtención de un DTCO experimental lo más parecido posible a los datos del DTCO original o de campo, debe ser igual a la cantidad total de datos cargados. Idealidad que se cumple cuando estos datos por inexactitud en los instrumentos de medida, fallas humanas, entre otras, sufren procesos de depuración y “limpieza”. En otras palabras, se introducen de tal manera que todos logran hacer parte de una misma tendencia representativa de la muestra total de datos.

Este proyecto se elaboró en gran medida para demostrar que el software **POZOSOFT** puede construir perfectamente y con una muy buena aproximación registros sísmicos experimentales, para cuando en el pozo en el que se trabaja no exista o no haya la posibilidad de correr uno. Lo que generará en la compañía encargada del área de los registros de pozos, una trascendental confiabilidad en los resultados del programa, ahorro de dinero y de tiempo.

Finalmente, se comprueba que la implementación de las series dobles de Fourier y que en forma de ecuaciones lineales se solucionan por el método numérico de Gauss - Jordan, son una representativa, efectiva y recomendada técnica de ajuste a la hora de construir y reconstruir registros de pozos con datos irregularmente espaciados.

## 6. RECOMENDACIONES

Al escoger entre varios métodos de ajuste de superficies se debe tener en cuenta que las superficies de tendencia polinomial convencional son mejor aplicadas a datos no oscilatorios, mientras que las superficies de Fourier pueden ser apropiadas para datos que reflejen estos fenómenos.

Es de vital importancia para el uso del software **POZOSOFT**, recalcar que se deben crear antes de iniciar la ejecución del programa, uno o varios archivos en el formato **.XLS de Microsoft Excel** con los datos numéricos de los registros que se posean y que estos deben conservar un orden para poder permitir su óptimo funcionamiento, a saber:

- En la primera columna se deben almacenar los datos de profundidad correspondientes a las lecturas de todos los registros y en donde la palabra **DEPTH** deberá encabezar ésta columna.
- En la segunda columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro de resistividad y en donde las letras **RT** deberán encabezar ésta columna.
- En la tercera columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro de rayos gamma y en donde las letras **CGR** deberán encabezar ésta columna.
- Por último, en la cuarta columna se deben almacenar los datos numéricos correspondientes a las lecturas del registro sísmico o de tiempo de tránsito y en donde las letras **DTCO** deberán encabezar ésta columna. Esto si se posee el registro sísmico, de lo contrario, obviar éste paso.

Para la construcción en un pozo determinado del registro sónico o de tiempo de tránsito (**DTCO**), inexistente y por lo tanto experimental, utilizando datos de los registros de resistividad y rayos gamma únicamente, es muy importante tener en cuenta que estos datos deben guardar estrecha relación o similares características en la litología de las rocas encontradas y de los fluidos presentes en ellas, con los datos de los registros de resistividad y de rayos gamma de cualquier otro pozo, y que se utilizarán en la obtención de los coeficientes de las series dobles de Fourier particulares de éste, y los que a su vez el usuario importará e implementará al correr el programa. Coeficientes que serán determinantes en la consecución, optimización y exactitud de dicho registro.

## BIBLIOGRAFÍA

BURDEN, L; FAIRES, D. Análisis numérico. G.E. Iberoamérica, 1985.

G, BACHMAN; L, NARICI; E, BECKENSTEIN. Fourier and Wavelet Analysis. Springer-Verlag. New York, 2000.

GÓMEZ, L. C. Guía para el desarrollo de proyectos de grado.

H, DYM; H, MCKEAN. Fourier Series And Integrals. Academic Press, New York.1972.

KINKARD, D; CHENEY, W. Analisis numerico. Addison Wesley, 1994.

MICROSOFT ENCARTA 2005. Biblioteca de consulta.

P, BUTZER; R, NESSEL. Fourier Analysis And Approximation. 1971.

PLYBONI, B. F. And introduction to applied numerical análisis. PWS-Kent , 1992.

PRESTON; HARBAUGH. 1965.

T, KAWATA. Fourier Series in Probability Theory. Academic Press, New York.1972.

T, KOMER. Fourier Analysis. Cambridge University Press, 1988.

## Anexo A

### PRUEBA 1

Al hacer clic sobre la opción “RT, CGR y DTCO” y ejecutar las cantidades establecidas y funciones especificadas para esta prueba se obtiene la siguiente configuración en pantalla:

**1. Archivo de Excel**

DEPTH	RT	CGR	DTCO	DTCO EXP
3976.5	2.131	79.138	117.869	126.2207
3973.5	2.145	75.132	119.705	130.3024
3970	2.163	72.249	95.964	104.045
3973.75	2.168	76.498	119.531	132.0096
3976.25	2.167	79.576	110.207	125.5919
3973.25	2.174	75.597	119.998	129.9889
3979.25	2.177	77.363	97.045	98.1143

**2. Especificación de Valores**

Datos a Cargar:

Valor de L:

Valor de H:

Ingresos M = N:

**3. Sistema de Ecuaciones**

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

**4. Tablas de Coeficientes**

**Ainv**

2024.646781733	729.575992018
984.118096932	-343.254985424
841.190144157	1006.08636388
1209.270806579	1628.309733806

**Binv**

0	-1208.307630406
0	-1231.779950005
0	-425.742193196
0	135.009616032

**Cinv**

0	0
2118.329897985	1688.094649887
880.027890387	-31.79346015
-314.525996058	376.67522541

**Dinv**

0	0
0	-305.569307442
0	-193.37832996
0	308.03307742

**5. Resultados**

Calcular DTCO EXP

Exportar Registros

Ventana de Ayuda

## RESULTADOS PRUEBA 1

A continuación se muestran los primeros **200** datos (por simplicidad) de los registros originales **RT, CGR Y DTCO**) y los correspondientes al registro **DTCO EXP** reconstruido, de un total de **4049** datos de muestra.

RT	CGR	DTCO	DTCO EXP
2,131	79,135	117,669	126,2207
2,145	75,132	119,706	130,3024
2,163	72,249	95,964	104,045
2,166	76,498	119,531	132,0086
2,167	78,576	110,207	125,5919
2,174	75,597	119,398	129,9869
2,177	72,363	97,045	98,1143
2,186	77,863	119,356	125,5348
2,191	72,477	98,126	93,3815
2,203	76,063	119,091	127,3052
2,204	78,018	102,746	123,8457
2,224	77,759	118,109	122,5159
2,231	78,727	112,004	122,4419
2,257	79,435	121,262	123,6209
2,259	76,488	129,472	120,3722
2,261	77,655	116,862	119,5172
2,276	78,991	116,773	121,4891
2,279	78,101	114,573	118,7085
2,295	73,248	92,289	82,2841
2,296	78,547	112,285	119,0603
2,314	76,913	139,854	114,6212
2,325	80,977	138,24	136,3012
2,329	78,954	137,137	119,7261
2,334	76,932	136,035	112,7987
2,338	78,163	138,313	115,4462
2,349	78,173	136,403	114,9003
2,363	79,414	136,771	121,9863
2,4	79,151	117,394	119,3353
2,427	74,246	88,614	88,1417
2,474	72,295	102,995	96,4723
2,668	79,167	117,12	115,3006
2,758	72,113	107,864	111,4261
2,895	76,481	85,109	83,6408

3,05	72,26	112,734	113,1501
3,304	78,628	116,526	103,3227
3,341	72,408	117,603	120,3323
3,363	78,717	81,605	104,5641
3,707	73,779	116,921	114,7743
3,921	77,909	81,919	100,7596
3,939	78,089	115,933	101,8484
4,005	76,62	116,086	101,4431
4,072	75,15	116,239	115,2192
4,48	77,101	82,233	108,8641
6,25	86,575	96,557	98,1122
6,286	85,31	97,483	105,051
6,32	79,54	99,849	96,3687
6,322	84,045	98,409	106,2096
6,356	79,679	99,728	96,0353
6,39	78,938	92,897	96,9658
6,391	79,818	99,607	95,7574
6,423	85,841	99,778	102,2824
6,448	87,965	96,465	96,2905
6,523	87,636	101,148	95,8001
6,535	80,473	91,254	95,152
6,54	88,48	102,341	98,7069
6,558	89,324	103,534	108,981
6,628	87,016	102,557	97,4744
6,642	86,553	103,712	99,2544
6,646	89,355	96,373	106,5723
6,68	82,008	89,612	97,2259
6,726	83,783	103,89	102,1018
6,729	83,879	102,701	102,2917
6,732	83,976	101,511	102,4667
6,759	76,732	104,219	99,0237
6,79	77,828	92,769	95,6748
6,826	80,222	103,222	94,4386
6,846	86,105	103,935	100,8531
6,893	83,713	102,225	100,7019
6,901	80,703	101,186	94,6458
6,901	83,953	100,053	101,1276
6,925	85,691	94,449	101,4688
7,029	85,806	102,656	100,9165
7,065	85,194	105,313	101,0735
7,07	83,93	98,595	99,8819
7,156	75,326	103,211	99,4885
7,165	77,314	88,823	92,5406

7,166	87,899	103,086	97,3957
7,19	76,718	92,642	93,1959
7,204	82,026	92,525	96,0349
7,218	87,689	102,773	97,8537
7,244	86,106	101,382	99,8442
7,256	86,793	101,921	99,2153
7,269	87,48	102,461	98,2801
7,274	83,529	103,918	97,9878
7,309	85,896	100,768	99,628
7,323	70,367	101,593	103,3261
7,335	80,593	98,079	94,2681
7,373	85,686	100,154	99,2588
7,383	88,564	98,321	96,5759
7,383	89,901	98,107	94,1619
7,383	91,239	97,893	95,4565
7,396	70,09	101,102	100,1746
7,43	85,144	102,254	98,6033
7,438	72,144	101,898	107,9294
7,444	84,757	99,657	98,203
7,468	92,074	97,812	96,7249
7,469	69,813	100,611	97,3338
7,477	84,67	97,77	97,8942
7,482	81,865	102,524	95,5739
7,49	81,616	92,189	95,3491
7,49	82,639	96,219	96,1814
7,49	85,037	95,259	98,0964
7,49	87,436	94,299	98,4462
7,515	83,829	99,16	96,962
7,552	68,699	96,123	92,8631
7,552	80,804	96,927	94,4844
7,552	92,909	97,731	102,6281
7,553	73,92	102,203	99,9424
7,649	72,619	88,035	102,6249
7,724	73,761	96,352	97,4406
7,724	74,064	96,409	96,1204
7,724	74,366	96,466	94,764
7,756	66,841	98,778	101,0506
7,777	81,206	91,852	94,922
7,884	85,41	96,946	95,5743
7,889	85,967	86,615	96,181
7,911	81,754	92,29	95,2555
7,979	87,03	87,254	97,0385
8,028	93,127	88,788	89,9583

8,043	63,87	96,944	99,6419
8,043	82,534	96,092	95,0507
8,043	92,714	88,528	84,7417
8,045	82,303	92,727	95,1397
8,059	92,301	88,269	81,7843
8,069	88,093	87,894	97,0504
8,206	83,748	98,695	93,5203
8,215	93,231	88,954	89,1347
8,223	89,362	91,541	93,3863
8,23	74,734	85,886	87,9581
8,232	83,271	101,951	93,9397
8,243	85,757	97,301	93,4041
8,278	81,367	96,551	94,7939
8,29	83,319	89,052	93,6905
8,386	83,45	89,916	93,1858
8,402	93,335	89,119	89,6021
8,437	83,332	92,599	93,1911
8,44	88,773	97,6	95,1456
8,477	88,645	90,625	95,2926
8,482	83,581	90,781	92,6468
8,546	85,331	86,354	90,9796
8,569	91,508	88,404	81,2975
8,572	84,74	90,817	90,8466
8,59	69,434	86,697	86,7153
8,597	82,429	95,965	94,07
8,602	86,104	97,656	91,5208
8,61	62,764	95,422	89,9757
8,615	89,146	91,715	93,7819
8,661	85,9	90,853	90,8283
8,726	93,326	88,171	89,2714
8,732	87,929	89,709	94,3841
8,745	85,13	91,662	89,8128
8,799	75,022	92,091	85,8823
8,807	92,139	82,715	81,3649
8,828	84,36	92,47	90,0529
8,897	83,667	98,229	91,0832
8,926	82,869	92,002	92,6303
8,928	83,555	91,873	91,2252
8,929	84,242	91,744	89,8577
8,941	97,727	86,432	86,0636
9	86,734	85,981	90,4781
9,007	88,93	91,888	93,1906
9,018	90,863	82,239	85,6816

9,023	78,246	86,453	86,9362
9,033	87,206	85,444	91,4185
9,05	93,317	87,222	89,7118
9,059	75,741	85,529	85,8044
9,078	90,716	88,54	86,4998
9,112	75,065	89,664	86,3161
9,113	66,817	96,019	91,0742
9,129	73,961	89,262	86,5734
9,131	73,711	89,864	86,5172
9,146	70,5	95,861	84,8259
9,15	72,357	90,064	85,6131
9,18	86,939	96,698	90,0468
9,202	84,695	86,093	88,2427
9,21	81,884	91,538	93,068
9,228	89,587	81,763	91,1204
9,244	83,282	91,253	90,9496
9,267	73,888	88,498	86,7033
9,301	77,678	84,076	86,262
9,305	79,271	88,294	88,8933
9,305	79,939	87,676	90,4644
9,305	80,608	87,058	91,8455
9,34	74,98	89,845	87,0045
9,403	85,747	85,001	87,235
9,404	73,816	87,734	86,8947
9,417	81,491	89,04	92,4786
9,432	87,921	92,314	91,0099
9,449	79,12	88,1	88,3371
9,455	74,809	90,365	87,4148
9,469	89,049	93,234	91,3722
9,47	88,058	93,478	91,0581
9,482	89,016	95,056	91,3527
9,491	79,526	91,332	89,1204
9,496	88,983	96,878	91,3254
9,497	80,838	97,383	91,6499
9,512	73,811	89,371	87,1279
9,524	86,463	86,216	87,7172
9,527	93,392	86,529	90,3306
9,531	66,25	85,359	91,9087

## Anexo B

### PRUEBA 2

Al hacer clic sobre la opción “RT, CGR y DTCO” y ejecutar las cantidades establecidas y funciones especificadas para esta prueba se obtiene la siguiente configuración en pantalla:

The screenshot displays the 'POZOSDF (RT, CGR y DTCO)' software interface, which is organized into five main sections:

- 1. Archivo de Excel:** A table with 5 columns: DEPTH, RT, CGR, DTCO, and DTCO EXP. The data rows are as follows:

DEPTH	RT	CGR	DTCO	DTCO EXP
3756	2.325	80.977	138,24	138,4106
3758	2.363	79.414	136,771	135,0845
3800	2.309	76,063	119,091	119,1643
3801	2.186	77,863	119,366	111,7832
3802	2.296	79,547	112,285	109,9946
3803	2.304	78,018	102,746	112,3025
3804	2.668	79,167	117,12	119,6219
- 2. Especificación de Valores:** Input fields for 'Valor de L:' (20513), 'Valor de H:' (20084), and 'Ingresos M = N:' (7). A 'Cargar' button is also present.
- 3. Sistema de Ecuaciones:** A matrix of coefficients for a system of equations, with buttons for 'Limpiar Sistema', 'Resolver Sistema', 'Exportar Sistema', 'Importar Sistema', and 'Exportar Coeficientes'.
- 4. Tablas de Coeficientes:** Four tables labeled 'Ann', 'Bnn', 'Cnn', and 'Dnn' containing numerical data.

75,122753176	-156,583036318
-672,333113579	-384,784595905
-225,935133274	-228,878828404
310,435259589	-360,078510361

0	-233,724698087
0	305,728914019
0	625,117362037
0	136,13026512

0	0
143,524872982	421,012380445
-122,268049671	713,471756461
601,067463893	137,763189968

0	0
0	454,398736961
0	350,153658731
0	-589,009446357
- 5. Resultados:** A section with a 'Calcular DTCO EXP' button, an 'Exportar Registros' button, and a 'Ventana de Ayuda' area.

## RESULTADOS PRUEBA 2

A continuación se muestran los primeros **200** datos (por simplicidad) de los registros originales **RT, CGR Y DTCO**) y los correspondientes al registro **DTCO EXP** reconstruido, de un total de **1014** datos de muestra.

RT	CGR	DTCO	DTCO EXP
2,325	80,977	138,24	138,4156
2,363	79,414	136,771	135,0845
2,203	76,063	119,091	119,1643
2,186	77,863	119,356	111,7832
2,296	78,547	112,285	109,9946
2,204	78,018	102,746	112,3025
2,668	79,167	117,12	119,5319
4,072	75,15	116,239	116,2745
2,758	72,113	107,864	107,898
2,163	72,249	95,964	95,902
3,363	78,717	81,605	80,8673
11,98	72,368	89,539	86,5053
21,611	60,991	92,116	87,918
26,432	58,928	92,636	92,5668
20,815	60,273	93,434	91,1581
17,349	66,022	93,785	87,5186
20,543	59,19	92,731	90,0021
20,283	49,764	92,435	93,7766
20,696	50,623	92,787	91,295
17,21	58,687	94,163	93,8079
19,467	61,554	91,961	86,7274
17,361	71,689	87,068	87,7077
16,78	76,023	87,964	87,174
17,635	70,349	87,943	87,1938
17,919	64,329	82,933	90,6645
23,032	53,228	82,177	83,0819
30,208	52,825	83,886	83,8016
24,646	57,324	84,775	84,8633
19,257	59,18	83,046	86,1391
19,806	58,481	87,63	85,3274
20,029	49,307	90,256	94,3497
19,691	47,986	91,219	88,9415
19,323	46,324	91,95	92,2807

22,681	46,077	91,917	86,5175
22,176	49,115	92,893	89,1956
18,265	50,418	93,07	92,9565
18,808	48,411	93,315	93,6833
18,94	50,831	92,326	88,4262
18,415	53,155	90,047	86,9898
19,636	55,959	87,424	85,4782
17,82	50,657	89,38	91,4559
17,226	53,934	91,163	89,7509
16,263	54,319	91,8	94,0141
15,812	55,734	91,507	90,8648
13,496	62,161	93,345	93,4457
7,724	74,366	96,466	97,5668
10,501	59,873	95,687	95,6768
17,687	50,947	91,308	90,588
24,143	52,178	85,08	85,8875
19,49	54,144	84,621	88,8111
17,499	63,831	92,344	87,5108
17,229	65,973	89,762	87,3645
21,496	54,339	87,976	90,8647
20,481	53,897	87,736	87,46
19,057	61,21	88,747	88,1161
16,155	68,788	89,486	87,7742
14,134	69,405	86,618	85,2603
15,658	69,424	88,028	87,1609
18,06	68,448	86,077	82,9203
17,068	68,971	88,645	81,8027
14,32	75,732	88,087	85,8363
11,925	79,697	89,644	89,9867
11,685	76,461	93,203	91,8274
8,897	83,667	98,229	98,8179
7,373	85,686	100,154	100,0395
7,269	87,48	102,461	102,5032
6,893	83,713	102,225	102,2077
7,553	73,92	102,203	101,6919
7,469	69,813	100,611	100,5572
13,671	59,28	93,399	93,0072
22,127	57,256	87,986	83,4108
20,368	59,771	86,571	90,5144
13,974	71,45	87,35	85,1487
12,795	72,837	87,347	85,8292
14,449	71,011	88,446	84,145
10,394	86,663	91,063	91,0513

9,496	88,983	96,878	97,0457
7,383	91,239	97,893	97,8791
7,552	68,699	96,123	96,2205
12,873	53,995	91,021	90,8533
21,794	43,054	87,706	88,4007
29,499	37,931	90,244	90,2452
25,34	45,569	91,684	92,5297
28,931	47,371	92,063	91,6433
34,636	45,581	91,217	93,139
34,474	45,656	92,253	90,3712
35,298	44,493	92,704	92,679
37,553	45,834	91,855	91,7763
43,189	47,1	88,969	88,9827
26,71	47,947	85,829	86,5055
21,452	45,225	83,312	83,3719
27,479	42,375	87,562	87,5552
29,258	43,955	90,109	90,1165
28,693	44,963	89,302	89,0547
25,087	47,704	87,983	86,5006
22,021	52,811	87,161	85,41
17,434	63,748	86,638	86,4953
15,249	74,074	86,861	84,0712
18,557	64,177	85,88	86,9647
20,848	62,635	84,441	88,3294
19,706	62,717	84,576	80,9254
17,449	63,311	84,732	85,9837
21,894	59,038	85,109	89,5601
23,269	49,238	86,294	86,1718
22,671	44,175	86,672	92,8118
23,423	45,367	87,273	86,935
21,145	41,14	87,511	87,529
22,381	43,414	86,028	82,1507
29,923	49,178	83,784	83,712
27,972	48,386	82,769	82,8331
22,848	47,771	84,682	91,3965
11,602	64,051	88,782	89,0278
9,598	66,532	90,508	90,3505
13,397	65,941	89,469	88,866
18,578	60,06	85,588	86,0113
15,427	62,839	88,095	88,8414
11,515	82,08	88,41	84,6012
10,082	81,752	88,925	85,4547
10,634	80,37	88,88	92,2178

12,363	80,912	87,243	85,8574
13,092	75,635	86,115	85,1263
11,477	81,688	86,08	86,4592
12,818	71,408	84,609	89,6255
13,368	73,347	86,116	85,9139
12,87	73,45	86,914	86,5007
17,029	65,541	86,056	85,5288
19,933	61,53	84,085	86,1696
19,639	61,867	82,205	84,9851
19,252	66,312	81,745	79,1406
18,51	67,82	81,482	82,5373
18,674	66,237	80,733	81,4094
19,754	68,996	79,515	78,5575
16,758	67,321	79,38	87,3615
17,706	67,347	80,25	82,6802
15,356	67,269	81,773	80,8726
15,057	69,825	82,294	85,9561
14,845	68,457	82,419	84,0372
14,337	73,384	82,376	84,3739
14,907	70,676	82,867	83,6578
14,612	74,079	83,515	84,647
13,759	73,986	82,648	85,344
13,283	75,07	84,238	85,1802
10,605	77,999	86,777	84,4994
9,129	73,961	89,262	87,0869
9,766	73,398	91,453	91,2242
9,966	73,294	89,637	91,8857
10,953	72,536	88,791	86,4757
9,112	75,065	89,664	90,0691
9,76	77,262	90,666	87,0195
10,637	75,293	90,91	95,4112
11,187	71,093	88,047	89,1039
13,23	72,506	85,577	85,7619
12,663	61,918	86,169	86,1014
13,657	57,05	86,625	87,0745
15,058	53,629	87,199	86,424
20,071	55,508	87,24	83,5548
25,015	51,974	86,644	85,808
27,852	51,452	82,087	82,2662
20,022	56,897	79,691	81,6566
18,172	75,294	81,462	80,1493
27,183	65,424	83,052	83,0514
31,143	47,244	82,428	82,6486

18,522	53,021	83,031	86,3194
13,604	75,009	83,816	84,6862
9,695	78,552	86,393	89,5614
10,769	83,549	87,518	89,8945
13,745	81,014	87,114	84,9269
15,702	78,938	83,322	85,0332
17,152	67,989	81,335	83,363
15,697	73,112	80,317	81,1018
17,012	70,871	80,77	83,793
18,601	68,159	80,364	83,1233
17,87	74,681	79,119	77,1516
16,542	79,739	80,129	79,0471
14,347	82,828	81,659	82,1378
13,584	84,83	83,382	84,0385
12,651	80,828	84,37	85,6846
12,353	80,701	83,659	85,759
14,136	78,623	81,964	82,623
16,851	74,996	79,669	80,4177
17,923	75,525	79,635	82,2554
17,519	83,062	79,846	79,9815
15,966	85,796	82,932	82,8456
11,002	86,83	86,556	89,414
10,705	86,727	87,331	84,2746
11,723	86,331	86,761	86,5081
12,859	85,443	86,549	85,6308
11,864	83,09	86,584	87,6411
13,32	75,935	84,259	83,9924
18,303	75,815	81,892	82,2439
19,596	69,466	80,753	81,7478
23,136	58,951	82,004	82,216
21,415	58,068	86,795	89,4994
13,229	53,425	89,185	89,3779
15,061	47,245	88,24	88,2079
24,49	46,476	86,133	85,4981
24,086	42,943	83,613	83,4427
24,76	46,816	86,556	87,3498
24,245	45,353	86,484	85,5135
29,501	45,619	86,406	86,6515

## Anexo C

### PRUEBA 3

Al hacer clic sobre la opción “RT y CGR” y ejecutar la cantidad establecida, importación y cálculo especificado para esta prueba se obtiene la siguiente configuración en pantalla:

The screenshot displays the POZOSOFT (RT y CGR) software interface. It is divided into several sections:

- 1. Archivo de Excel:** A table with columns DEPTH, RT, CGR, and DTCCO EXP. The data is as follows:

DEPTH	RT	CGR	DTCCO EXP
3798	2,325	80,977	138,4156
3799	2,363	79,414	135,0845
3800	2,203	76,063	119,1643
3801	2,186	77,863	111,7832
3802	2,296	78,547	109,9946
3803	2,204	78,018	112,3025
3804	2,668	79,167	119,5319
- Especificación de Valores:** Input fields for Valor de L: 20,513, Valor de H: 26,654, and Valor de M = N: 7. A 'Cargar' button is also present.
- 2. Tablas de Coeficientes:** Four tables for Anm, Bnm, Cnm, and Dnm. Each table has a 'Cargar Coeficientes' button and a scrollable list of values.
  - Anm:** 75,122753176; -156,583036318; -672,333113579; -394,78455905; -225,935333274; -228,878828404; 310,435259689; -380,078910361
  - Bnm:** 0; -233,724698087; 0; 385,728914018; 0; 625,117362037; 0; 136,33025512
  - Cnm:** 0; 0; 143,524872982; -421,012365445; -122,266063671; 713,471755661; 601,067463893; 137,763189968
  - Dnm:** 0; 0; 0; 454,398736961; 0; 390,153658731; 0; -589,009446357
- 3. Resultados:** Buttons for 'Calcular DTCCO EXP' and 'Exportar Registros'.
- Ventana de Ayuda:** An empty window for help.

### RESULTADOS PRUEBA 3

A continuación se muestran los primeros **200** datos (por simplicidad) de los registros originales (**RT** y **CGR**) y los correspondientes al registro **DTCO EXP** construido, de un total de **1014** datos de muestra.

RT	CGR	DTCO EXP
2,325	80,977	138,4156
2,363	79,414	135,0845
2,203	76,063	119,1643
2,186	77,863	111,7832
2,296	78,547	109,9946
2,204	78,018	112,3025
2,668	79,167	119,5319
4,072	75,15	116,2745
2,758	72,113	107,898
2,163	72,249	95,902
3,363	78,717	80,8673
11,98	72,368	86,5053
21,611	60,991	87,918
26,432	58,928	92,5668
20,815	60,273	91,1581
17,349	66,022	87,5186
20,543	59,19	90,0021
20,283	49,764	93,7766
20,696	50,623	91,295
17,21	58,687	93,8079
19,467	61,554	86,7274
17,361	71,689	87,7077
16,78	76,023	87,174
17,635	70,349	87,1938
17,919	64,329	90,6645
23,032	53,228	83,0819
30,208	52,825	83,8016
24,646	57,324	84,8633
19,257	59,18	86,1391
19,806	58,481	85,3274
20,029	49,307	94,3497
19,691	47,986	88,9415
19,323	46,324	92,2807

22,681	46,077	86,5175
22,176	49,115	89,1956
18,265	50,418	92,9565
18,808	48,411	93,6833
18,94	50,831	88,4262
18,415	53,155	86,9898
19,636	55,959	85,4782
17,82	50,657	91,4559
17,226	53,934	89,7509
16,263	54,319	94,0141
15,812	55,734	90,8648
13,496	62,161	93,4457
7,724	74,366	97,5668
10,501	59,873	95,6768
17,687	50,947	90,588
24,143	52,178	85,8875
19,49	54,144	88,8111
17,499	63,831	87,5108
17,229	65,973	87,3645
21,496	54,339	90,8647
20,481	53,897	87,46
19,057	61,21	88,1161
16,155	68,788	87,7742
14,134	69,405	85,2603
15,658	69,424	87,1609
18,06	68,448	82,9203
17,068	68,971	81,8027
14,32	75,732	85,8363
11,925	79,697	89,9867
11,685	76,461	91,8274
8,897	83,667	98,8179
7,373	85,686	100,0395
7,269	87,48	102,5032
6,893	83,713	102,2077
7,553	73,92	101,6919
7,469	69,813	100,5572
13,671	59,28	93,0072
22,127	57,256	83,4108
20,368	59,771	90,5144
13,974	71,45	85,1487
12,795	72,837	85,8292
14,449	71,011	84,145
10,394	86,663	91,0513

9,496	88,983	97,0457
7,383	91,239	97,8791
7,552	68,699	96,2205
12,873	53,995	90,8533
21,794	43,054	88,4007
29,499	37,931	90,2452
25,34	45,569	92,5297
28,931	47,371	91,6433
34,636	45,581	93,139
34,474	45,656	90,3712
35,298	44,493	92,679
37,553	45,834	91,7763
43,189	47,1	88,9827
26,71	47,947	86,5055
21,452	45,225	83,3719
27,479	42,375	87,5552
29,258	43,955	90,1165
28,693	44,963	89,0547
25,087	47,704	86,5006
22,021	52,811	85,41
17,434	63,748	86,4953
15,249	74,074	84,0712
18,557	64,177	86,9647
20,848	62,635	88,3294
19,706	62,717	80,9254
17,449	63,311	85,9837
21,894	59,038	89,5601
23,269	49,238	86,1718
22,671	44,175	92,8118
23,423	45,367	86,935
21,145	41,14	87,529
22,381	43,414	82,1507
29,923	49,178	83,712
27,972	48,386	82,8331
22,848	47,771	91,3965
11,602	64,051	89,0278
9,598	66,532	90,3505
13,397	65,941	88,866
18,578	60,06	86,0113
15,427	62,839	88,8414
11,515	82,08	84,6012
10,082	81,752	85,4547
10,634	80,37	92,2178

12,363	80,912	85,8574
13,092	75,635	85,1263
11,477	81,688	86,4592
12,818	71,408	89,6255
13,368	73,347	85,9139
12,87	73,45	86,5007
17,029	65,541	85,5288
19,933	61,53	86,1696
19,639	61,867	84,9851
19,252	66,312	79,1406
18,51	67,82	82,5373
18,674	66,237	81,4094
19,754	68,996	78,5575
16,758	67,321	87,3615
17,706	67,347	82,6802
15,356	67,269	80,8726
15,057	69,825	85,9561
14,845	68,457	84,0372
14,337	73,384	84,3739
14,907	70,676	83,6578
14,612	74,079	84,647
13,759	73,986	85,344
13,283	75,07	85,1802
10,605	77,999	84,4994
9,129	73,961	87,0869
9,766	73,398	91,2242
9,966	73,294	91,8857
10,953	72,536	86,4757
9,112	75,065	90,0691
9,76	77,262	87,0195
10,637	75,293	95,4112
11,187	71,093	89,1039
13,23	72,506	85,7619
12,663	61,918	86,1014
13,657	57,05	87,0745
15,058	53,629	86,424
20,071	55,508	83,5548
25,015	51,974	85,808
27,852	51,452	82,2662
20,022	56,897	81,6566
18,172	75,294	80,1493
27,183	65,424	83,0514
31,143	47,244	82,6486

18,522	53,021	86,3194
13,604	75,009	84,6862
9,695	78,552	89,5614
10,769	83,549	89,8945
13,745	81,014	84,9269
15,702	78,938	85,0332
17,152	67,989	83,363
15,697	73,112	81,1018
17,012	70,871	83,793
18,601	68,159	83,1233
17,87	74,681	77,1516
16,542	79,739	79,0471
14,347	82,828	82,1378
13,584	84,83	84,0385
12,651	80,828	85,6846
12,353	80,701	85,759
14,136	78,623	82,623
16,851	74,996	80,4177
17,923	75,525	82,2554
17,519	83,062	79,9815
15,966	85,796	82,8456
11,002	86,83	89,414
10,705	86,727	84,2746
11,723	86,331	86,5081
12,859	85,443	85,6308
11,864	83,09	87,6411
13,32	75,935	83,9924
18,303	75,815	82,2439
19,596	69,466	81,7478
23,136	58,951	82,216
21,415	58,068	89,4994
13,229	53,425	89,3779
15,061	47,245	88,2079
24,49	46,476	85,4981
24,086	42,943	83,4427
24,76	46,816	87,3498
24,245	45,353	85,5135
29,501	45,619	86,6515

## Anexo D

### RESULTADOS PRUEBA 4

A continuación se muestran los primeros **200** datos (por simplicidad) de los registros originales **RT**, **CGR** y **DTCO**) y los correspondientes al registro **DTCO EXP** reconstruido, de un total de **4049** datos de muestra y utilizados en la programación de una hoja de cálculo en Excel para un ajuste por tendencia polinomial.

RT	CGR	DTCO	DTCO EXP
2,131	79,135	117,669	99,40709625
2,145	75,132	119,706	99,71013416
2,163	72,249	95,964	99,98996293
2,166	76,498	119,531	99,55819084
2,167	78,576	110,207	99,3954583
2,174	75,597	119,398	99,62694707
2,177	72,363	97,045	99,9576991
2,186	77,863	119,356	99,42113756
2,191	72,477	98,126	99,92552734
2,203	76,063	119,091	99,54520024
2,204	78,018	102,746	99,38478048
2,224	77,759	118,109	99,37675726
2,231	78,727	112,004	99,29678427
2,257	79,435	121,262	99,21381038
2,259	76,488	129,472	99,43147518
2,261	77,655	116,862	99,33388961
2,276	78,991	116,773	99,21682354
2,279	78,101	114,573	99,275524
2,295	73,248	92,289	99,69767938
2,296	78,547	112,285	99,21994841
2,314	76,913	139,854	99,32040318
2,325	80,977	138,24	99,02976516
2,329	78,954	137,137	99,14642797
2,334	76,932	136,035	99,29144286
2,338	78,163	138,313	99,18994303

2,349	78,173	136,403	99,174	11381
-------	--------	---------	--------	-------

2,363	79,414	136,771	99,06927279
2,4	79,151	117,394	99,03566315
2,427	74,246	88,614	99,41258886
2,474	72,295	102,995	99,56223571
2,668	79,167	117,12	98,66762766
2,758	72,113	107,864	99,20036893
2,895	76,481	85,109	98,56625751
3,05	72,26	112,734	98,79130089
3,304	78,628	116,526	97,84296176
3,341	72,408	117,603	98,38580402
3,363	78,717	81,605	97,75714743
3,707	73,779	116,921	97,74505888
3,921	77,909	81,919	97,07297435
3,939	78,089	115,933	97,03492407
4,005	76,62	116,086	97,07020887
4,072	75,15	116,239	97,12058127
4,48	77,101	82,233	96,40332998
6,25	86,575	96,557	93,5946067
6,286	85,31	97,483	93,58241961
6,32	79,54	99,849	93,84198966
6,322	84,045	98,409	93,58213525
6,356	79,679	99,728	93,78638593
6,39	78,938	92,897	93,79932606
6,391	79,818	99,607	93,73219593
6,423	85,841	99,778	93,39170021
6,448	87,965	96,465	93,31676058
6,523	87,636	101,148	93,22539565
6,535	80,473	91,254	93,50521524
6,54	88,48	102,341	93,19346995
6,558	89,324	103,534	93,16538028
6,628	87,016	102,557	93,10236272
6,642	86,553	103,712	93,09455446
6,646	89,355	96,373	93,05269724
6,68	82,008	89,612	93,22772016
6,726	83,783	103,89	93,08089368
6,729	83,879	102,701	93,07294944
6,732	83,976	101,511	93,06502876
6,759	76,732	104,219	93,52845861
6,79	77,828	92,769	93,39006917
6,826	80,222	103,222	93,15730287
6,846	86,105	103,935	92,84719073
6,893	83,713	102,225	92,87363707
6,901	80,703	101,186	93,03078863

6,901	83,953	100,053	92,85308533
6,925	85,691	94,449	92,75930252
7,029	85,806	102,656	92,62483229
7,065	85,194	105,313	92,59914182
7,07	83,93	98,595	92,64197511
7,156	75,326	103,211	93,17925033
7,165	77,314	88,823	92,97131636
7,166	87,899	103,086	92,40572303
7,19	76,718	92,642	92,996536
7,204	82,026	92,525	92,57093121
7,218	87,689	102,773	92,34355062
7,244	86,106	101,382	92,34616688
7,256	86,793	101,921	92,31354786
7,269	87,48	102,461	92,28306807
7,274	83,529	103,918	92,40524409
7,309	85,896	100,768	92,27086017
7,323	70,367	101,593	93,59280631
7,335	80,593	98,079	92,4987313
7,373	85,686	100,154	92,19731084
7,383	88,564	98,321	92,12438925
7,383	89,901	98,107	92,11680385
7,383	91,239	97,893	92,12222745
7,396	70,09	101,102	93,54431037
7,43	85,144	102,254	92,14438256
7,438	72,144	101,898	93,21103031
7,444	84,757	99,657	92,14125525
7,468	92,074	97,812	92,02485838
7,469	69,813	100,611	93,49662496
7,477	84,67	97,77	92,10358903
7,482	81,865	102,524	92,23566713
7,49	81,616	92,189	92,24082834
7,49	82,639	96,219	92,18189042
7,49	85,037	95,259	92,07356506
7,49	87,436	94,299	92,0070405
7,515	83,829	99,16	92,09190451
7,552	68,699	96,123	93,56526495
7,552	80,804	96,927	92,21664431
7,552	92,909	97,731	91,9336703
7,553	73,92	102,203	92,85168663
7,649	72,619	88,035	92,89457282
7,724	73,761	96,352	92,66337274
7,724	74,064	96,409	92,62763599
7,724	74,366	96,466	92,59268156

7,756	66,841	98,778	93,6231852
7,777	81,206	91,852	91,91362957
7,884	85,41	96,946	91,57237219
7,889	85,967	86,615	91,54798358
7,911	81,754	92,29	91,71490365
7,979	87,03	87,254	91,40823799
8,028	93,127	88,788	91,34083695
8,043	63,87	96,944	93,82040279
8,043	82,534	96,092	91,50774676
8,043	92,714	88,528	91,31406189
8,045	82,303	92,727	91,51844489
8,059	92,301	88,269	91,28731917
8,069	88,093	87,894	91,27646005
8,206	83,748	98,695	91,24584056
8,215	93,231	88,954	91,11003825
8,223	89,362	91,541	91,07211488
8,23	74,734	85,886	91,94183827
8,232	83,271	101,951	91,23770593
8,243	85,757	97,301	91,11953714
8,278	81,367	96,551	91,29251185
8,29	83,319	89,052	91,16465433
8,386	83,45	89,916	91,04135739
8,402	93,335	89,119	90,88021225
8,437	83,332	92,599	90,98546927
8,44	88,773	97,6	90,81071226
8,477	88,645	90,625	90,76693736
8,482	83,581	90,781	90,91838351
8,546	85,331	86,354	90,76507102
8,569	91,508	88,404	90,64721579
8,572	84,74	90,817	90,75666301
8,59	69,434	86,697	92,21995762
8,597	82,429	95,965	90,84144025
8,602	86,104	97,656	90,67060758
8,61	62,764	95,422	93,3770106
8,615	89,146	91,715	90,59260214
8,661	85,9	90,853	90,60559747
8,726	93,326	88,171	90,48026174
8,732	87,929	89,709	90,46700708
8,745	85,13	91,662	90,53166728
8,799	75,022	92,091	91,23280015
8,807	92,139	82,715	90,36154645
8,828	84,36	92,47	90,4637772
8,897	83,667	98,229	90,41364422

8,926	82,869	92,002	90,42108088
8,928	83,555	91,873	90,3821011
8,929	84,242	91,744	90,34769178
8,941	97,727	86,432	90,37592159
9	86,734	85,981	90,17041121
9,007	88,93	91,888	90,11821052
9,018	90,863	82,239	90,09534332
9,023	78,246	86,453	90,64197034
9,033	87,206	85,444	90,11826733
9,05	93,317	87,222	90,08330309
9,059	75,741	85,529	90,84710451
9,078	90,716	88,54	90,02230251
9,112	75,065	89,664	90,85958712
9,113	66,817	96,019	92,03817408
9,129	73,961	89,262	90,96893566
9,131	73,711	89,864	90,997104
9,146	70,5	95,861	91,41193909
9,15	72,357	90,064	91,1480929
9,18	86,939	96,698	89,94832523
9,202	84,695	86,093	90,00062915
9,21	81,884	91,538	90,1413944
9,228	89,587	81,763	89,84479918
9,244	83,282	91,253	90,01899965
9,267	73,888	88,498	90,81673603
9,301	77,678	84,076	90,36670416
9,305	79,271	88,294	90,22066301
9,305	79,939	87,676	90,16688348
9,305	80,608	87,058	90,1162759
9,34	74,98	89,845	90,60267915
9,403	85,747	85,001	89,71920375
9,404	73,816	87,734	90,66620387
9,417	81,491	89,04	89,92213022
9,432	87,921	92,314	89,62325223
9,449	79,12	88,1	90,06404851
9,455	74,809	90,365	90,48848715
9,469	89,049	93,234	89,56060137
9,47	88,058	93,478	89,57510537
9,482	89,016	95,056	89,54544605
9,491	79,526	91,332	89,98109483
9,496	88,983	96,878	89,52910909
9,497	80,838	97,383	89,87330477
9,512	73,811	89,371	90,54158816
9,524	86,463	86,216	89,55110664

9,527	93,392	86,529	89,5060026
9,531	66,25	85,359	91,659075

