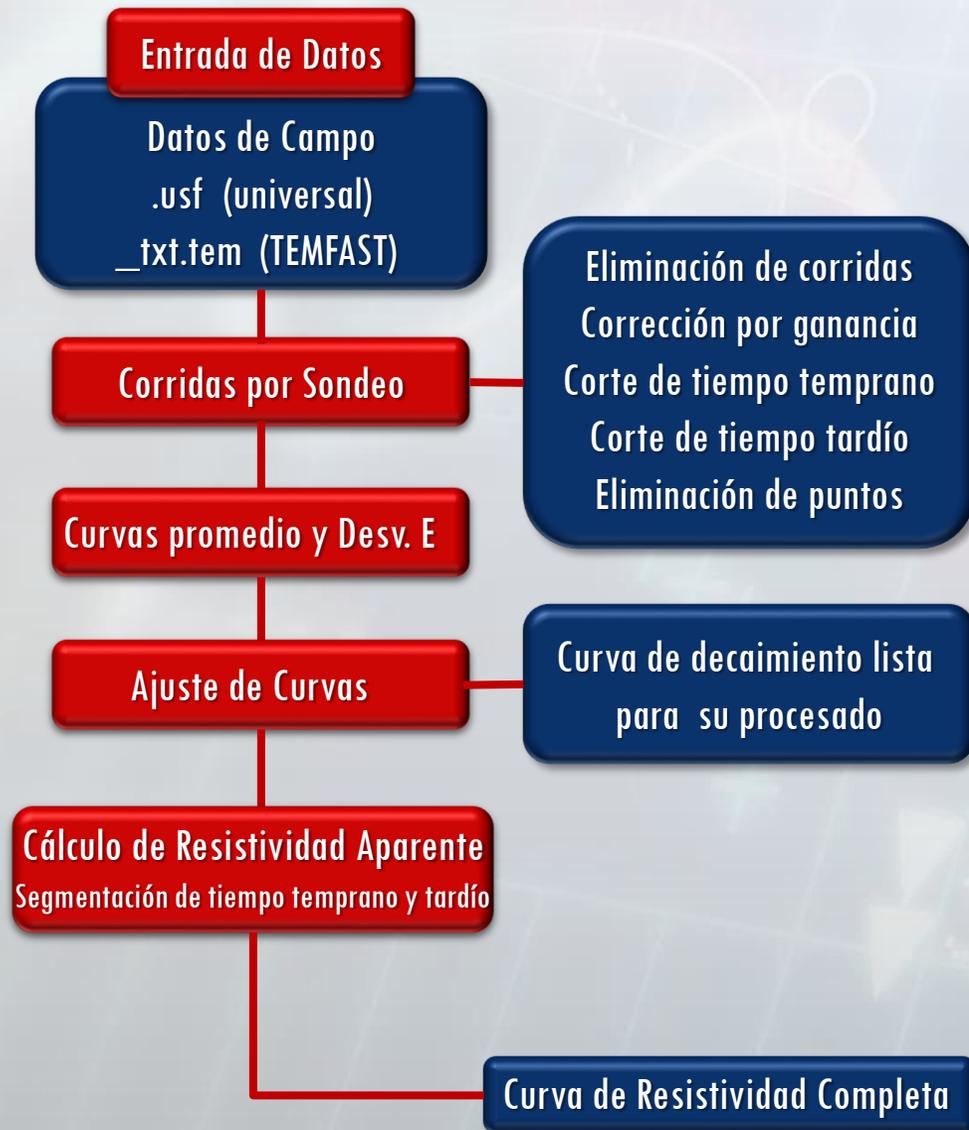


# Estructura de TerraWare TDEM



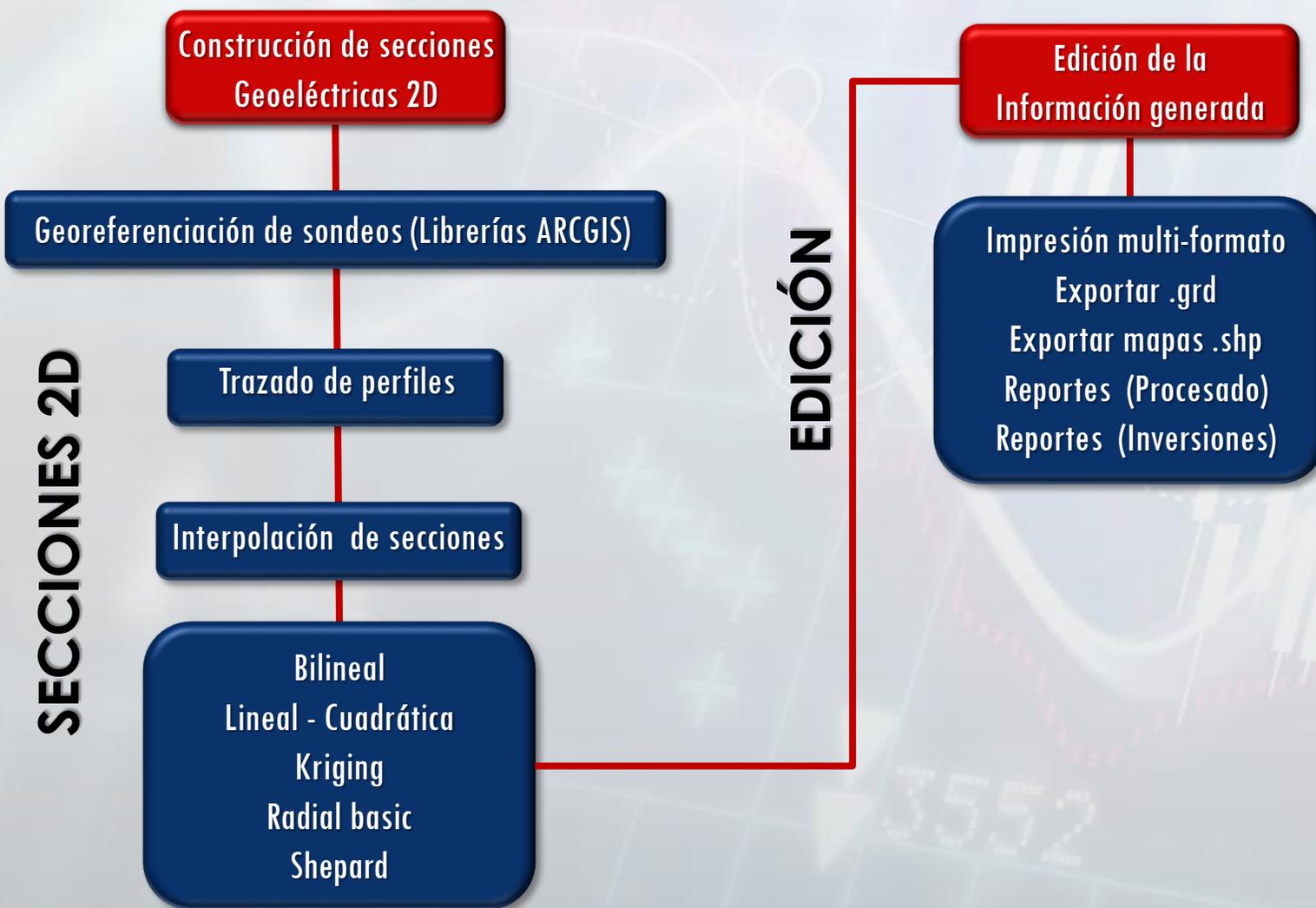
## PROCESADO



## MODELADO



## INVERSIÓN

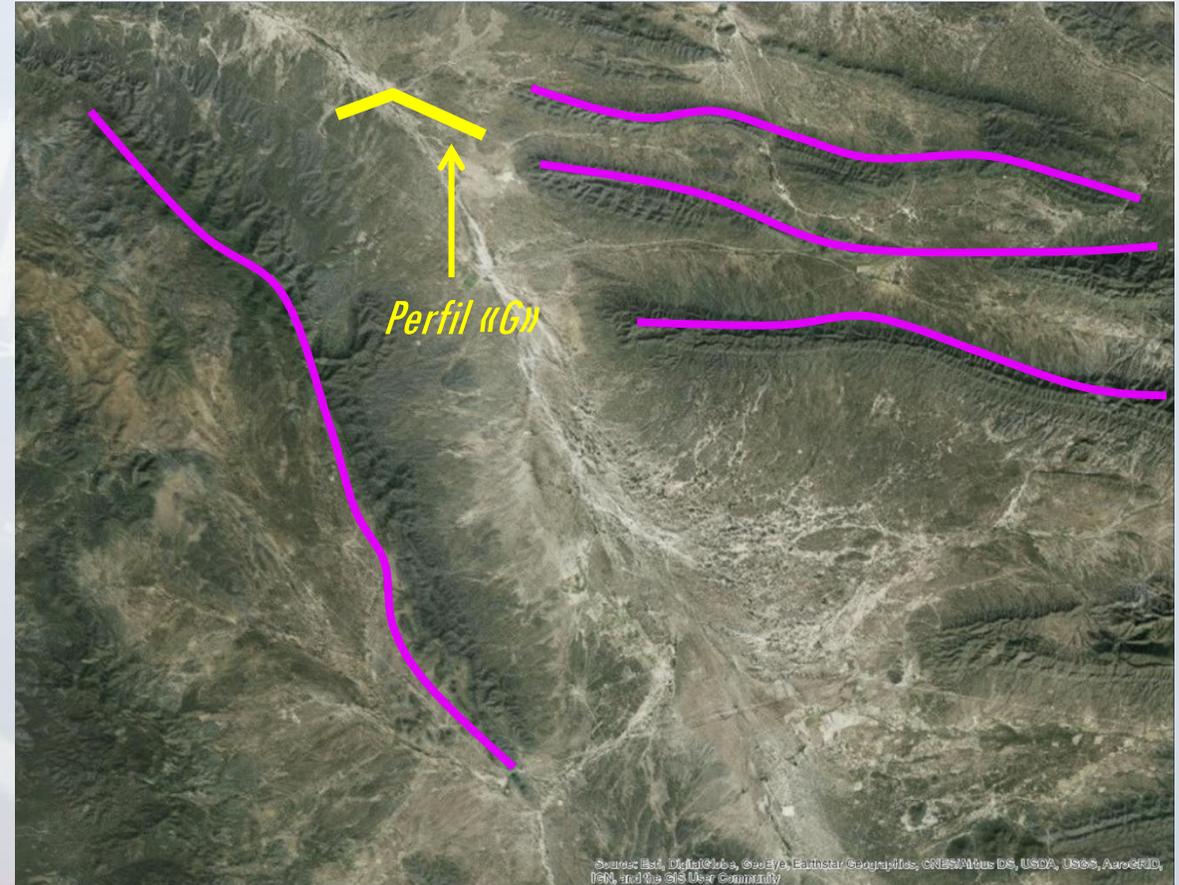
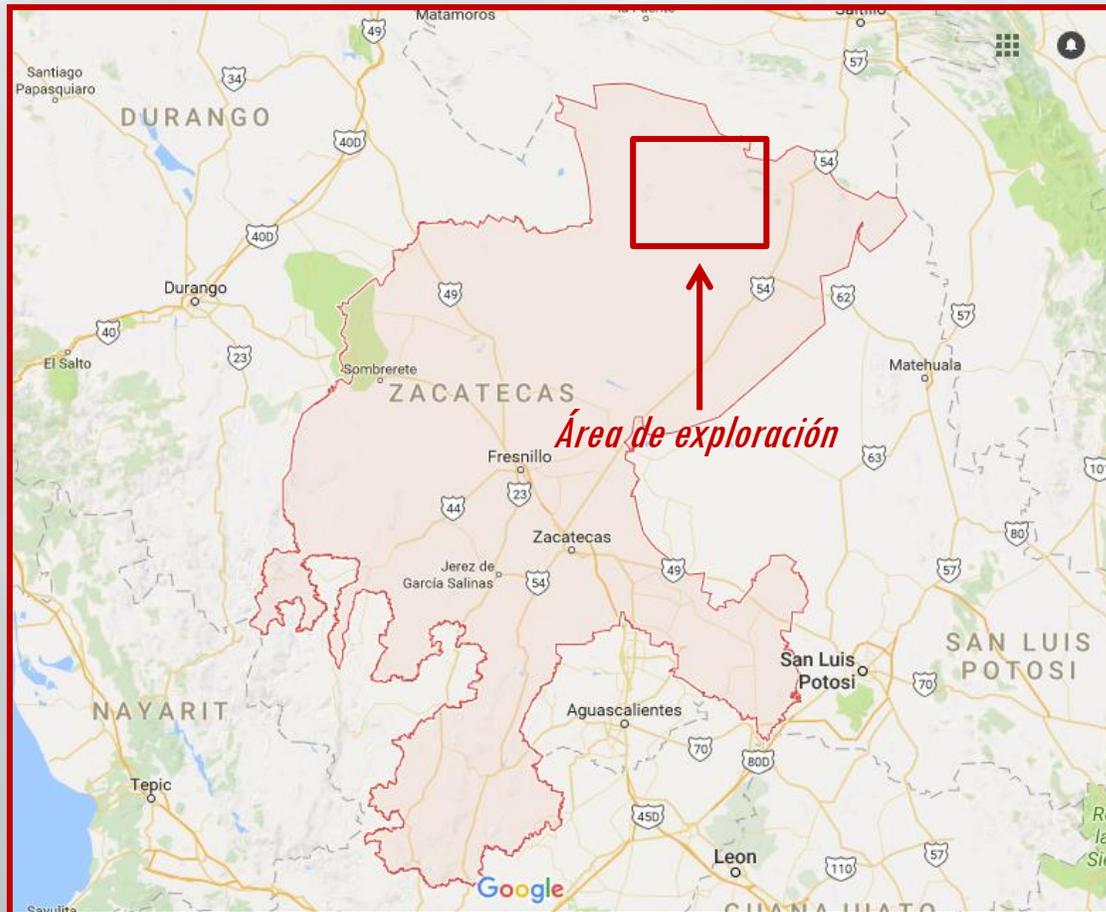


\*Código libre (Licencia GNU V.3 ) de la suite P223 EM de herramientas de modelado EM ; Art Raiche and Fred Sugeng; AMIRA International.

\*\* Occam's Inversion Fortran2003 Code, código libre (Licencia GNU V.3); Steven Constable, Kerry Key, David Myer, Catherine de Groot-Hedlin; Scripps Institution of Oceanography.

# Casos de estudio y aplicación

**Geotem Ingeniería S.A. de C.V.** realiza en 2014 un proyecto hidrogeológico integrando los métodos de TDEM y CSAMT al norte del estado de Zacatecas.

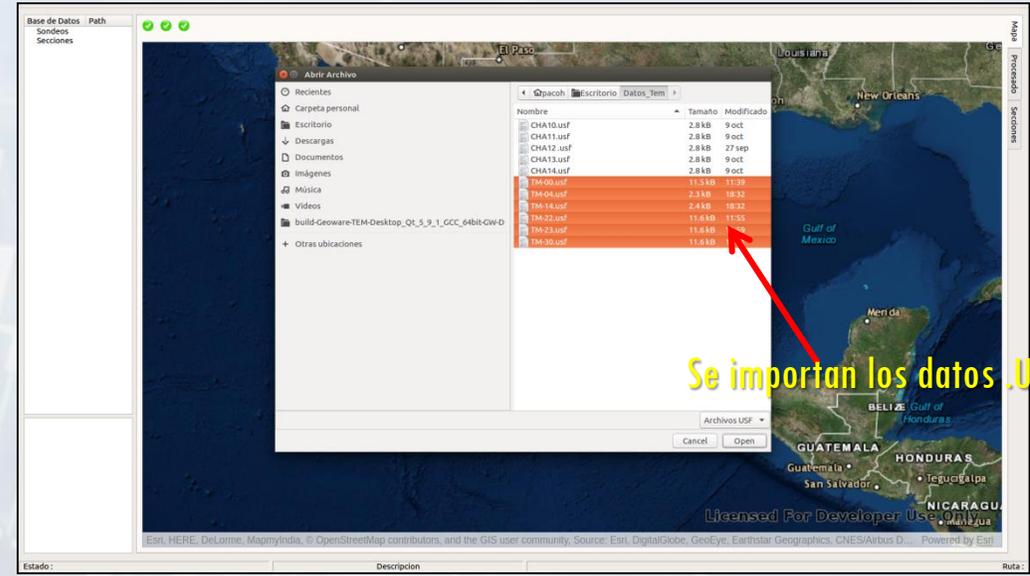


De este estudio se utilizó el **perfil G** para la correlación de modelos de inversión 1D y 2D entre **TDEM** y **CSAMT**.

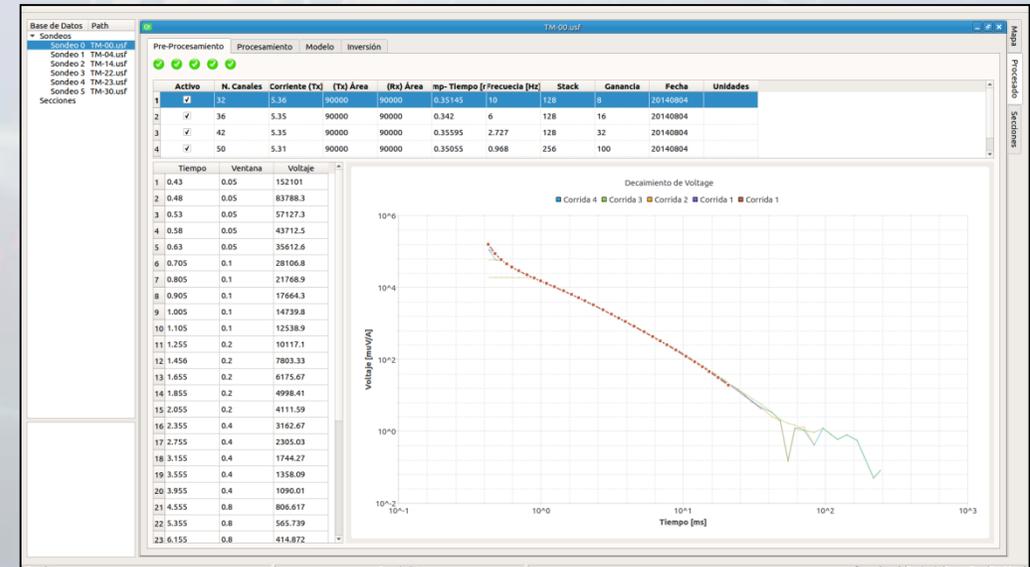
# Casos de estudio y aplicación



Entrada de Datos



Visualización GR



Interfaz de Procesado TerraWare

# Interfaz de procesamiento



Pre-Procesamiento

Base de datos

Base de Datos Path

- Sondeos
  - Sondeo 0 TM-00.usf
  - Sondeo 1 TM-04.usf
  - Sondeo 2 TM-14.usf
  - Sondeo 3 TM-22.usf
  - Sondeo 4 TM-23.usf
  - Sondeo 5 TM-30.usf
- Secciones

Pre-Procesamiento Procesamiento Modelo Inversión

Cadena de procesos

Coincident Loop; 300 x 300 m.

	Activo	N. Canales	Corriente (Tx)	(Tx) Área	(Rx) Área	mp- Tiempo [r	Frecuencia [Hz]	Stack	Ganancia	Fecha	Unidades
1	<input checked="" type="checkbox"/>	32	5.36	90000	90000	0.35145	10	128	8	20140804	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	36	5.35	90000	90000	0.342	6	128	16	20140804	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	42	5.35	90000	90000	0.35595	2.727	128	32	20140804	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	50	5.31	90000	90000	0.35055	0.968	256	100	20140804	

Parámetros de Adquisición

	Tiempo	Ventana	Voltaje
1	0.43	0.05	152101
2	0.48	0.05	83788.3
3	0.53	0.05	57127.3
4	0.58	0.05	43712.5
5	0.63	0.05	35612.6
6	0.705	0.1	28106.8
7	0.805	0.1	21768.9
8	0.905	0.1	17664.3
9	1.005	0.1	14739.8
10	1.105	0.1	12538.9
11	1.255	0.2	10117.1
12	1.456	0.2	7803.33
13	1.655	0.2	6175.67
14	1.855	0.2	4998.41
15	2.055	0.2	4111.59
16	2.355	0.4	3162.67
17	2.755	0.4	2305.03
18	3.155	0.4	1744.27
19	3.555	0.4	1358.09
20	3.955	0.4	1090.01
21	4.555	0.8	806.617
22	5.355	0.8	565.739
23	6.155	0.8	414.872

Decaimiento de Voltage

Corridas por sondeo

Estado : Descripción /home/pacoh/Escritorio/Datos\_Tem/TM-00.usf

Mapa Procesado Secciones

Módulos

# Interfaz de procesamiento



Pre-Procesamiento

- Base de Datos
- Path
- ▼ Sondeos
  - Sondeo 0 TM-00.usf
  - Sondeo 1 TM-04.usf
  - Sondeo 2 TM-14.usf
  - Sondeo 3 TM-22.usf
  - Sondeo 4 TM-23.usf
  - Sondeo 5 TM-30.usf
- Secciones



Base de datos

Qt
TM-00.usf

Pre-Procesamiento
Procesamiento
Modelo
Inversión

✓
✓
✓
✓
✓

	Activo	N. Canales	Corriente (Tx)	(Tx) Área	(Rx) Área	mp- Tiempo [r	Frecuencia [Hz]	Stack	Ganancia	Fecha	Unidades
2	✓	36	5.35	90000	90000	0.342	6	128	16	20140804	
3	✓	42	5.35	90000	90000	0.35595	2.727	128	32	20140804	
4	□	50	5.31	90000	90000	0.35055	0.968	256	100	20140804	
5	✓	50	5.31	90000	90000	0.35055	0.968	256	100	20140804	

Tiempo	Ventana	Voltaje	sv
1	0.58	0.05	43730.8
2	0.63	0.05	35612.6
3	0.705	0.1	28108.1
4	0.805	0.1	21771.1
5	0.905	0.1	17666.7
6	1.005	0.1	14745.9
7	1.105	0.1	12543.5
8	1.255	0.2	10123.4
9	1.456	0.2	7804.14
10	1.655	0.2	6184.9
11	1.855	0.2	5011.13
12	2.055	0.2	4111.59
13	2.355	0.4	3164.53
14	2.755	0.4	2314.22
15	3.155	0.4	1751.03
16	3.555	0.4	1364.36
17	3.955	0.4	1090.43
18	4.555	0.8	812.3
19	5.355	0.8	571.173
20	6.155	0.8	421.112
21	6.955	0.8	319.066
22	7.755	0.8	249.236

Decaimiento de Voltage

■ Corrida 0 ■ Corrida 1 ■ Corrida 2 ■ Promedio 4

*Curva ajustada*

Ajuste de Curvas

Eliminación de corridas  
 Corrección por ganancia  
 Corte de tiempo temprano  
 Corte de tiempo tardío  
 Eliminación de puntos

Módulos

Mapa  
Procesado  
Secciones





Procesamiento

Qt TM-00.usf

Base de Datos Path

- Sondeos
  - Sondeo 0 TM-00.usf
  - Sondeo 1 TM-04.usf
  - Sondeo 2 TM-14.usf
  - Sondeo 3 TM-22.usf
  - Sondeo 4 TM-23.usf
  - Sondeo 5 TM-30.usf
- Secciones
  - Sección 1

Pre-Procesamiento Procesamiento Modelo Inversión

Resistividad Aparente

Resistividad [ohm\*m]

Tiempo [ms]

Resistividad aparente

Curvas de Sensibilidad

Voltaje [V/A]

Resistividad [Ohm/m]

Análisis de sensibilidad

Tiempos Tempranos Tiempos Tardíos

Resistividad Completa

Resistividad [Ohm/m]

Tiempo [ms]

Curva de Resistividad Completa

Tiempos tempranos Tiempos tardíos

Controles

Armónico

Tiempos Tempranos

Armónico

Tiempos Tardíos

Curva

Resistividad

Tiempos Tempranos

Módulos

Mapa  
Procesado  
Secciones



Modelado EM

- Base de Datos Path
- ▼ Sondeos
    - Sondeo 0 TM-00.usf
    - Sondeo 1 TM-04.usf
    - Sondeo 2 TM-14.usf
    - Sondeo 3 TM-22.usf
    - Sondeo 4 TM-23.usf
    - Sondeo 5 TM-30.usf
  - Secciones

Qt TM-00.usf

Pre-Procesamiento Procesamiento **Modelo** Inversión

Resistividad - Profundidad

■ Modelo Profundidad ■ Modelo Capas

*Modelo de capas inicial*

Resistividad Aparente

■ Resistividad Observada ■ Resistividad Calculada

*Resistividad calculada*

*Resistividad observada*

	Resistividad	Espesor	P
11	22.6417	31.8067	40
12	23.8204	31.8067	43
13	24.4927	31.8067	46
14	25.0499	31.8067	49
15	26.3283	31.8067	53
16	26.9394	nan	na

Modelo de Capas

N. Capas

Homogéneo

Espaciado log

Zi

Zf

Rho

Decaimiento de Voltaje

■ Datos Observados ■ Datos Calculados

*Decaimiento Observado*

*Decaimiento Calculado*

Módulos

Modelado Directo EM

**Parámetros de entrada**

- Numero de capas
- Espesor de capas
- Modelo inicial  $\rho$  vs  $h$
- Limites de profundidad
- Limites de resistividad



**Aire** 
$$A_0(r, z) = \frac{-i\omega\mu_0 M_0}{4\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{\lambda}{m_0} e^{-m_0|z-z_0|} + C_0(\lambda) e^{m_0 z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$m_0 = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}$$

**i-ésima capa** 
$$A_i(r, z) = \frac{-i\omega\mu_0 M_0}{4\pi} \int_0^\infty \{C_i(\lambda) \cosh[m_i(z - h_{i+1})] + D_i(\lambda) \sinh[m_i(z - h_{i+1})]\} J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$m_i = \sqrt{\lambda^2 - k_i^2} ; \quad i = 1, \dots, N - 1$$

**n-ésima capa** 
$$A_N(r, z) = \frac{-i\omega\mu_0 M_0}{4\pi} \int_0^\infty D_N(\lambda) e^{-m_N(z-h_N)} J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$m_N = \sqrt{\lambda^2 - k_N^2}$$

$$k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \quad k_i^2 = \omega^2 \mu_i \epsilon_i - i\omega \mu_i \sigma_i ; \quad i = 1, \dots, N \quad M_0 = I_0 n_s A_s$$

**Campo magnético** 
$$H_{iz} = \frac{i}{\mu_i \omega} k_i^2 A_i + \frac{i}{\mu_i \omega} \frac{\partial^2 A_i}{\partial z^2} ; \quad i = 0, 1, \dots, N$$



Inversión 1D

**Cadena de procesos**

**Resistividad - Profundidad**

Resistividad [Ohm/m]

Profundidad [m]

Modelo Inicial (green square) Modelo Invertido (blue square)

**Resistividad Aparente**

Resistividad Observada (green line) Resistividad Calculada (blue line)

Tiempo [ms]

**Parámetros de Inversión**

Beowulf Occam Híbrido

Parámetros Iniciales

N. Iteraciones: 15

Iteración Inicial: 0

Convergencia

Tolerancia: 2

Multiplicador Lagrange (Log10): 5

Paso Corte: 20

Rugosidad: 1.50

Activar Occam

Run

**Occam**

**Algoritmo Suavizado de Occam**

Módulos



## Inversión Occam 1D

$$m_{k+1}(\mu) = \left[ \mu \underline{\partial}^T \underline{\partial} + \left( \underline{W} \underline{J}_k \right)^T \underline{W} \underline{J}_k \right]^{-1} \left( \underline{W} \underline{J}_k \right)^T \underline{W} \tilde{d}_k$$

$$\tilde{d}_k = F[m_k] - \underline{J}_k m_k$$

Inversión 1D

The screenshot displays the 'Inversión' module in TerraWare TDEM. The main window is titled 'TM-00.usf' and contains two primary plots:

- Resistividad - Profundidad:** A log-log plot of resistivity (Ohm\*m) versus depth (m). It compares the 'Modelo Inicial' (green line) with the 'Modelo Invertido' (blue stepped line). A red arrow points to the inverted model with the label 'Modelo Invertido'.
- Resistividad Aparente:** A log-log plot of apparent resistivity (ohm\*m) versus time (ms). It compares 'Resistividad Observada' (green circles) with 'Resistividad Calculada' (blue squares). A red arrow points to the calculated curve with the label 'Resistividad calculada' and 'Resistividad observada'.

Below the plots is a table with the following data:

	Resistividad	Espesor	P
1	89.8666	80	80
2	32.9192	15.8166	95
3	16.3125	18.9436	11
4	11.2598	22.6889	13
5	10.455	27.1747	16
6	11.9867	32.5474	19
7	15.4022	38.9822	23
8	20.4863	46.6893	28
9	26.6017	55.9201	33
10	32.5057	66.9759	40
11	36.7747	80.2175	48
12	38.7214	96.0771	58
13	38.727	115.072	69
14	37.7384	137.823	85

To the right of the table is a 'Resultados Occam' panel showing:

- N. Iteración: 4
- Error Inicial: 100.46599...
- Error Final: 5.7473194...
- N. Datos: 34
- N. Parámetros: 16
- M. Inversión: Occam
- Tiempo: 16.286000...

At the bottom, there is a 'Controles' section with a 'Run' button and a large blue button labeled 'Occam' with the text 'Algoritmo Suavizado de Occam' below it.

Módulos



Inversión 1D

Base de Datos Path

- Sondeos
- Sondeo 0 TM-00.usf
- Sondeo 1 TM-04.usf
- Sondeo 2 TM-14.usf
- Sondeo 3 TM-22.usf
- Sondeo 4 TM-23.usf
- Sondeo 5 TM-30.usf
- Secciones

Resistividad - Profundidad

Resistividad [Ohm/m]

Profundidad [m]

Resistividad Aparente

Resistividad Observada Resistividad Calculada

Tiempo [ms]

Parámetros de Inversión

Beowulf Occam Híbrido

Parámetros Iniciales

N. Iteraciones: 25

Convergencia

Criterio Convergencia: Default

Porcentaje: 5

N. Pasos: 2

Paso 1: 7

Paso 2: 5

Paso 3: 3

Paso 4: 2

Paso 5: 1

Activar Beowulf

Controles

Run

8	11.7427	50.3883	22
9	33.1185	73.3298	25
10	18.0896	63.03	35
11	10.1318	66.0449	42
12	42.4154	58.1136	48
13	96.2838	82.3237	56
14	152.656	124.12	65

Módulos

Parámetros de Inversión  
Beowulf 1D

Beowulf  
Algoritmo Gauss Newton– Marquardt





Inversión 1D

- Base de Datos Path
- Sondeos
  - Sondeo 0 TM-00.usf
  - Sondeo 1 TM-04.usf
  - Sondeo 2 TM-14.usf
  - Sondeo 3 TM-22.usf
  - Sondeo 4 TM-23.usf
  - Sondeo 5 TM-30.usf
- Secciones

Qt TM-00.usf

Pre-Preprocesamiento Procesamiento Modelo Inversión

Resistividad - Profundidad

Resistividad [Ohm\*m]

Profundidad [m]

Modelo Inicial Modelo Invertido

Resistividad Aparente

Resistividad [ohm\*m]

Tiempo [ms]

Resistividad Observada Resistividad Calculada

Resistividad	Espesor	P
1 104.417	30.5029	30
2 97.3115	14.0327	44
3 80.2398	16.1547	60
4 60.4322	18.6208	79
5 40.0736	21.9358	100
6 21.505	29.1138	130
7 9.85956	42.3552	170
8 11.7427	50.3883	220
9 33.1185	73.3298	290
10 18.0896	63.03	350
11 10.1318	66.0449	420
12 42.4154	58.1136	480
13 96.2838	82.3237	560
14 152.656	124.12	650

N. Iteración	12
Error Inicial	118.081490
Error Final	1.32872570
N. Datos	34
N. Parámetros	31
M. Inversión	BEOWULF
Tiempo	36.2319984

Modelo Invertido

Resultados Beowulf

Run

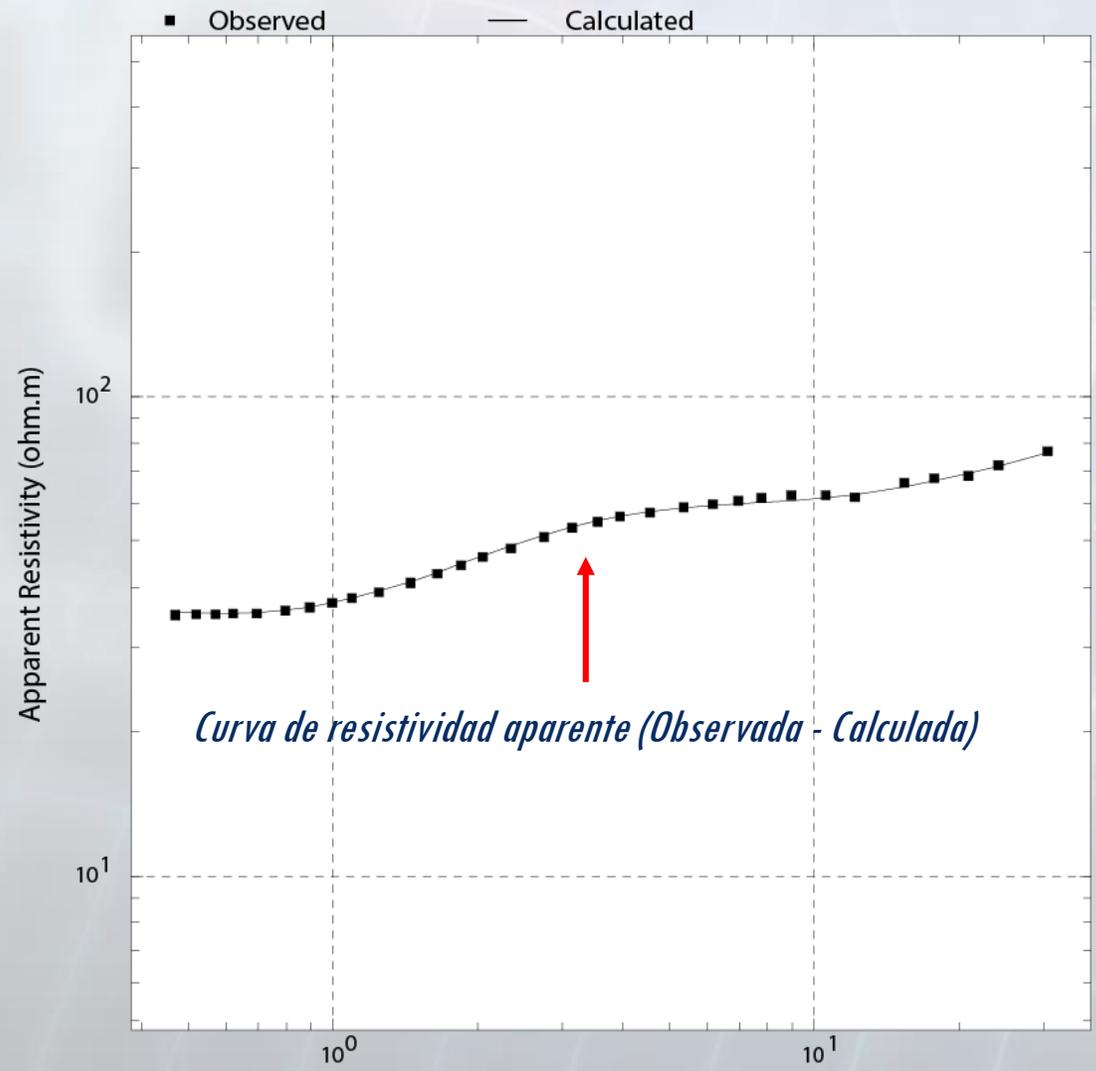
Beowulf

Algoritmo Gauss Newton– Marquardt

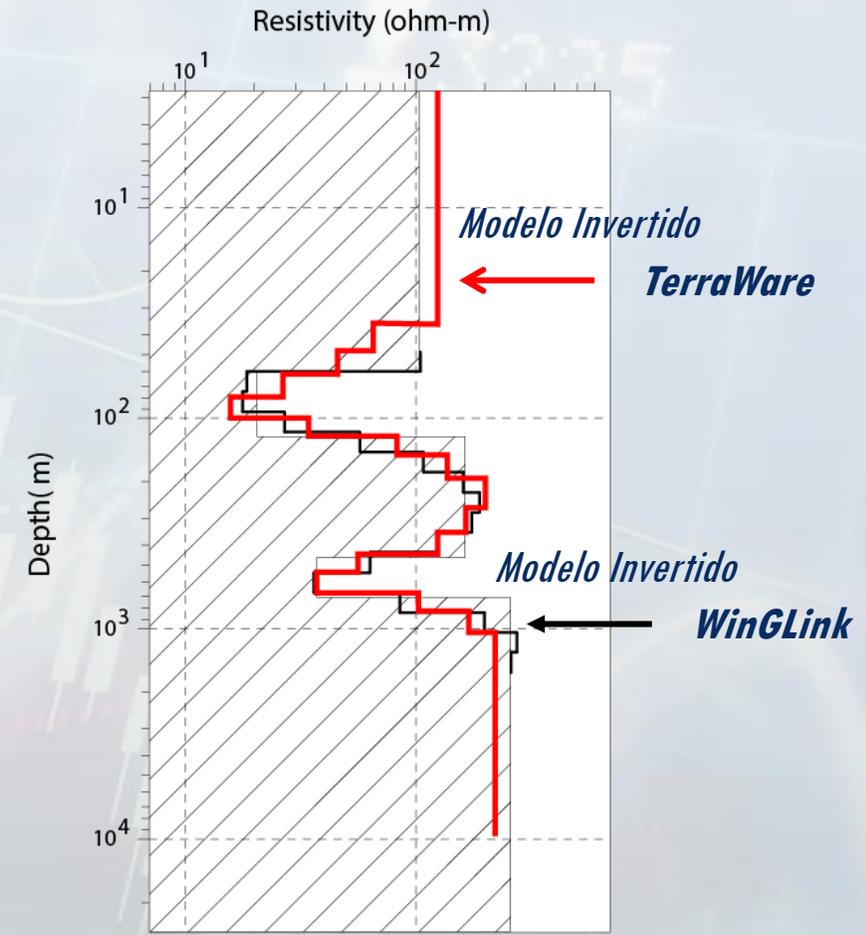
Módulos

Mapa  
Procesado  
Secciones

# WinGLink vs. TerraWare

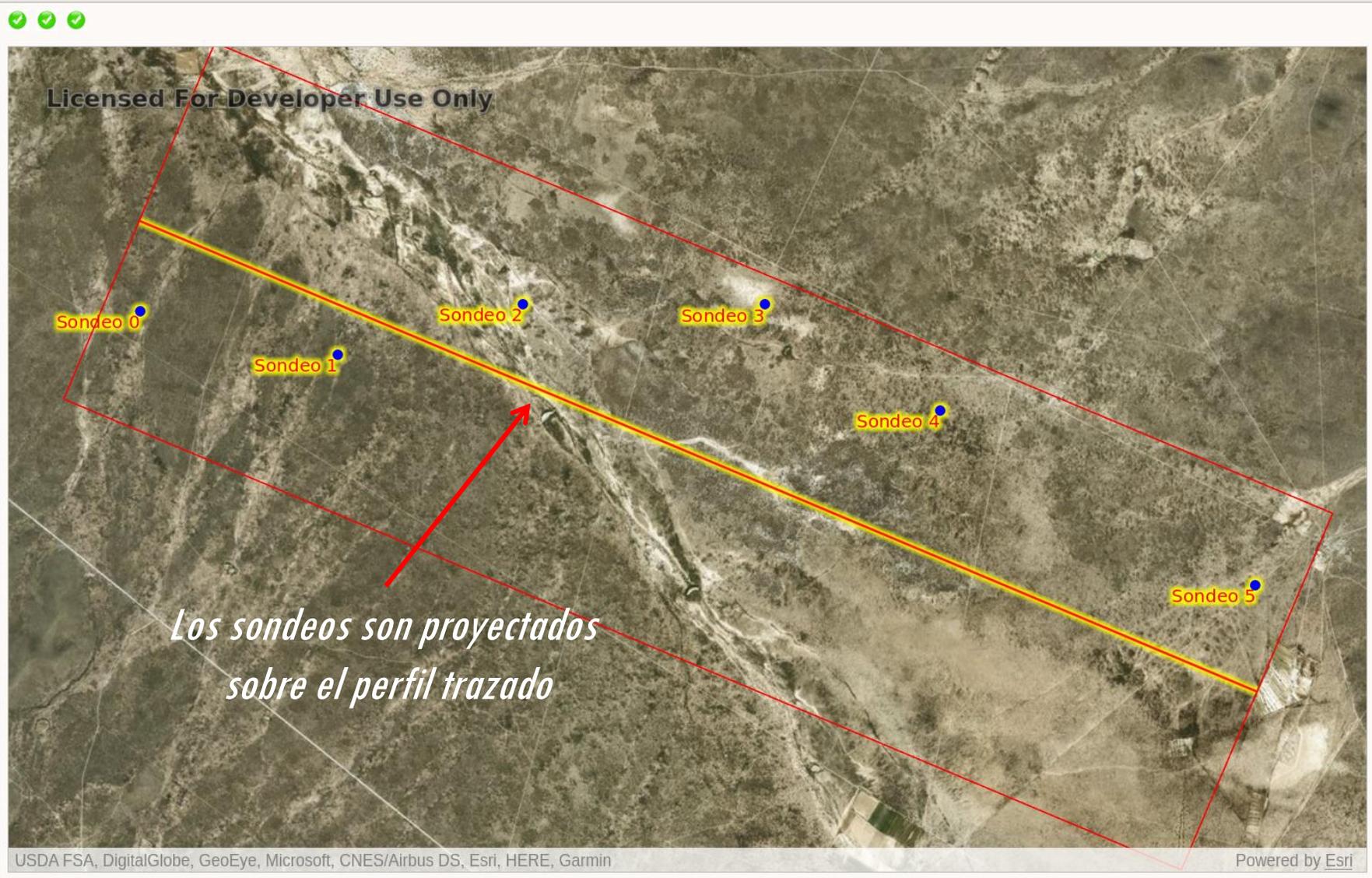


## 1D Inversion Models



Base de Datos	Path
▼ Sondeos	
Sondeo 0	TM-00.usf
Sondeo 1	TM-04.usf
Sondeo 2	TM-14.usf
Sondeo 3	TM-22.usf
Sondeo 4	TM-23.usf
Sondeo 5	TM-30.usf
▼ Secciones	
Sección 1	

↑  
*Base de datos*



Mapa  
Procesado  
Secciones

Módulos

*Los sondeos son proyectados sobre el perfil trazado*

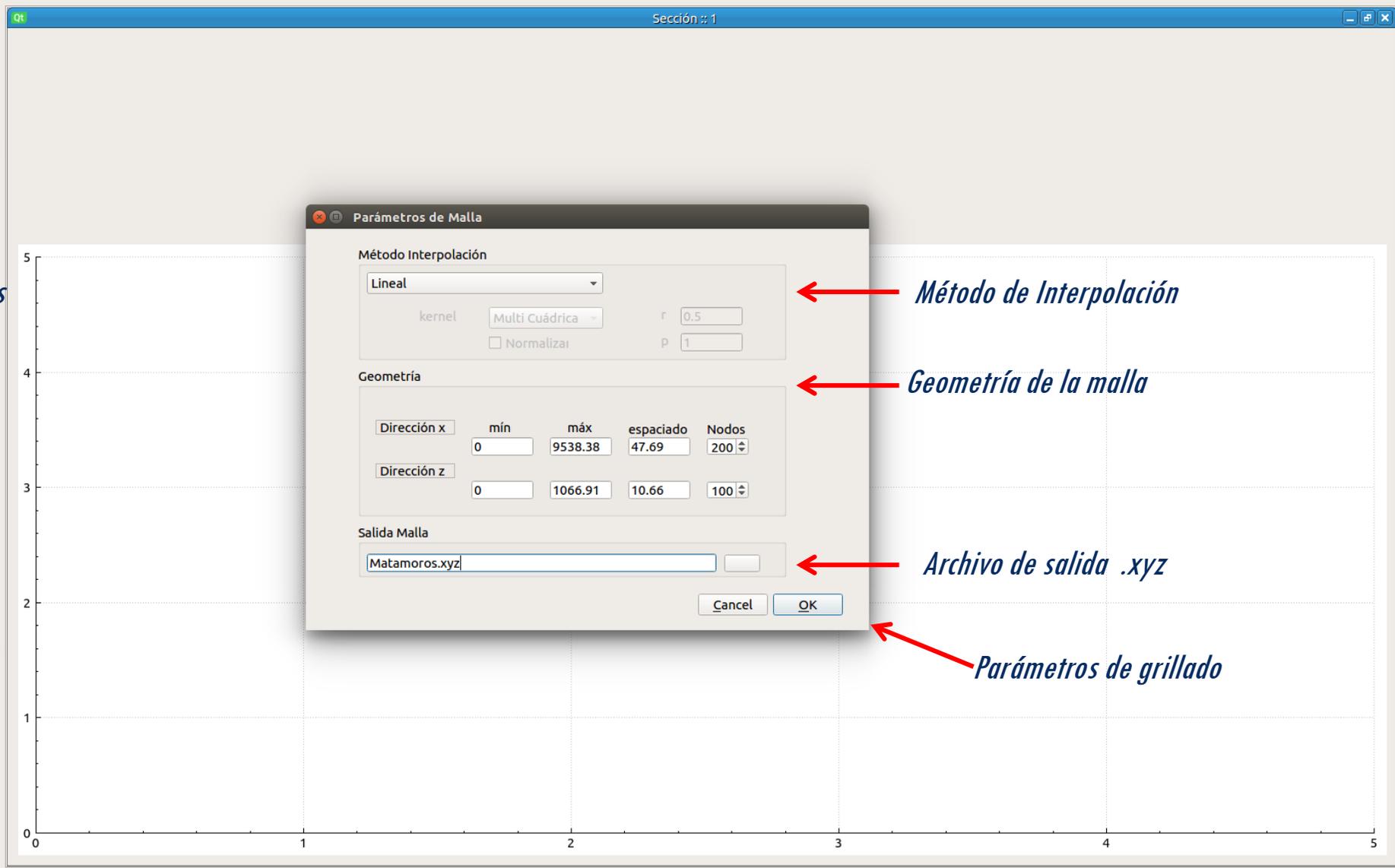
Base de Datos	Path
▼ Sondeos	
Sondeo 0	TM-00.usf
Sondeo 1	TM-04.usf
Sondeo 2	TM-14.usf
Sondeo 3	TM-22.usf
Sondeo 4	TM-23.usf
Sondeo 5	TM-30.usf
▼ Secciones	
Sección 1	

Base de datos



## Interpolación

- Bilineal
- Lineal - Cuadrática
- Kriging
- Radial basic
- Shepard



Método de Interpolación

Geometría de la malla

Archivo de salida .xyz

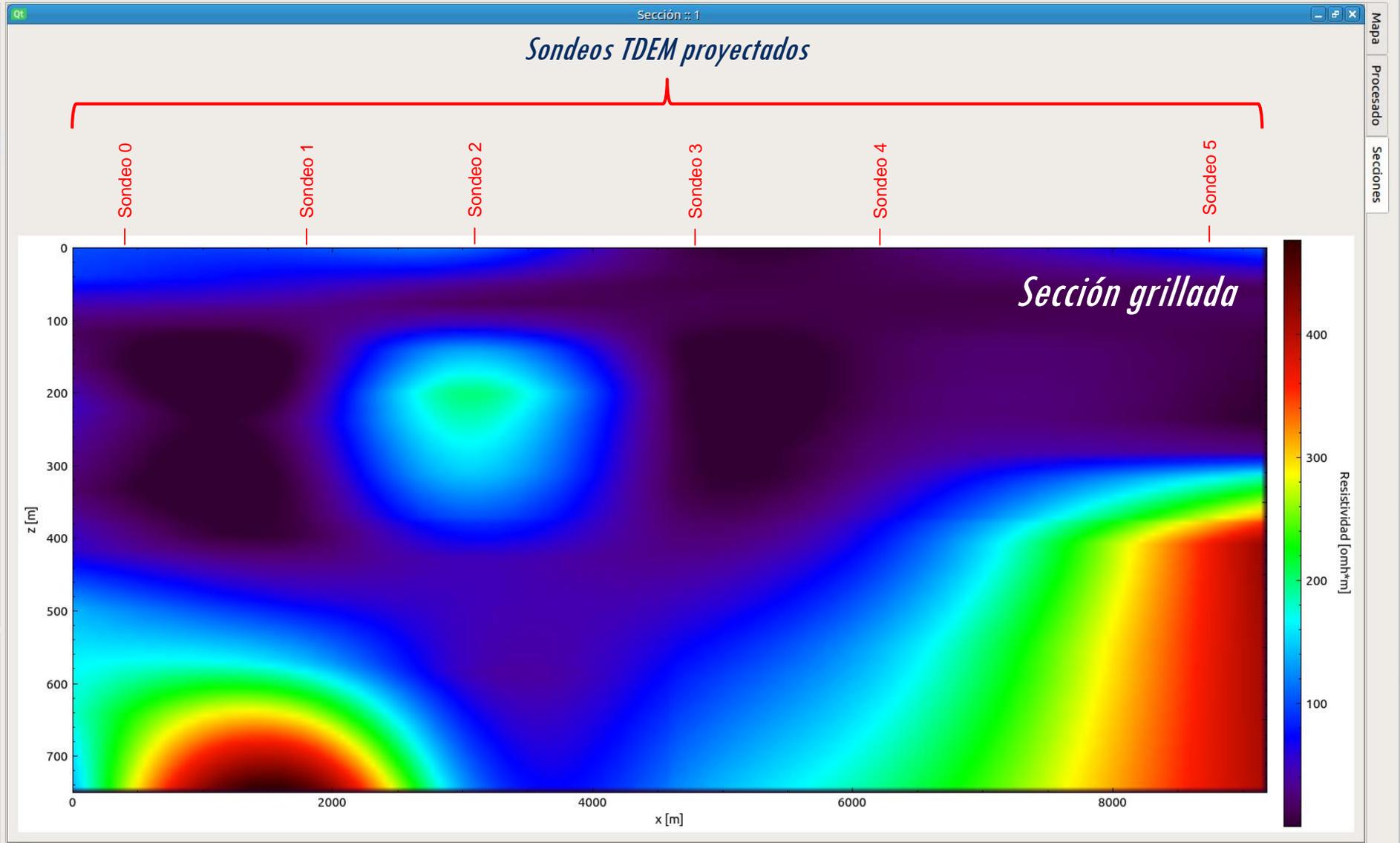
Parámetros de grillado



Base de Datos	Path
▼ Sondeos	
Sondeo 0	TM-00.usf
Sondeo 1	TM-04.usf
Sondeo 2	TM-14.usf
Sondeo 3	TM-22.usf
Sondeo 4	TM-23.usf
Sondeo 5	TM-30.usf
▼ Secciones	
Sección 1	

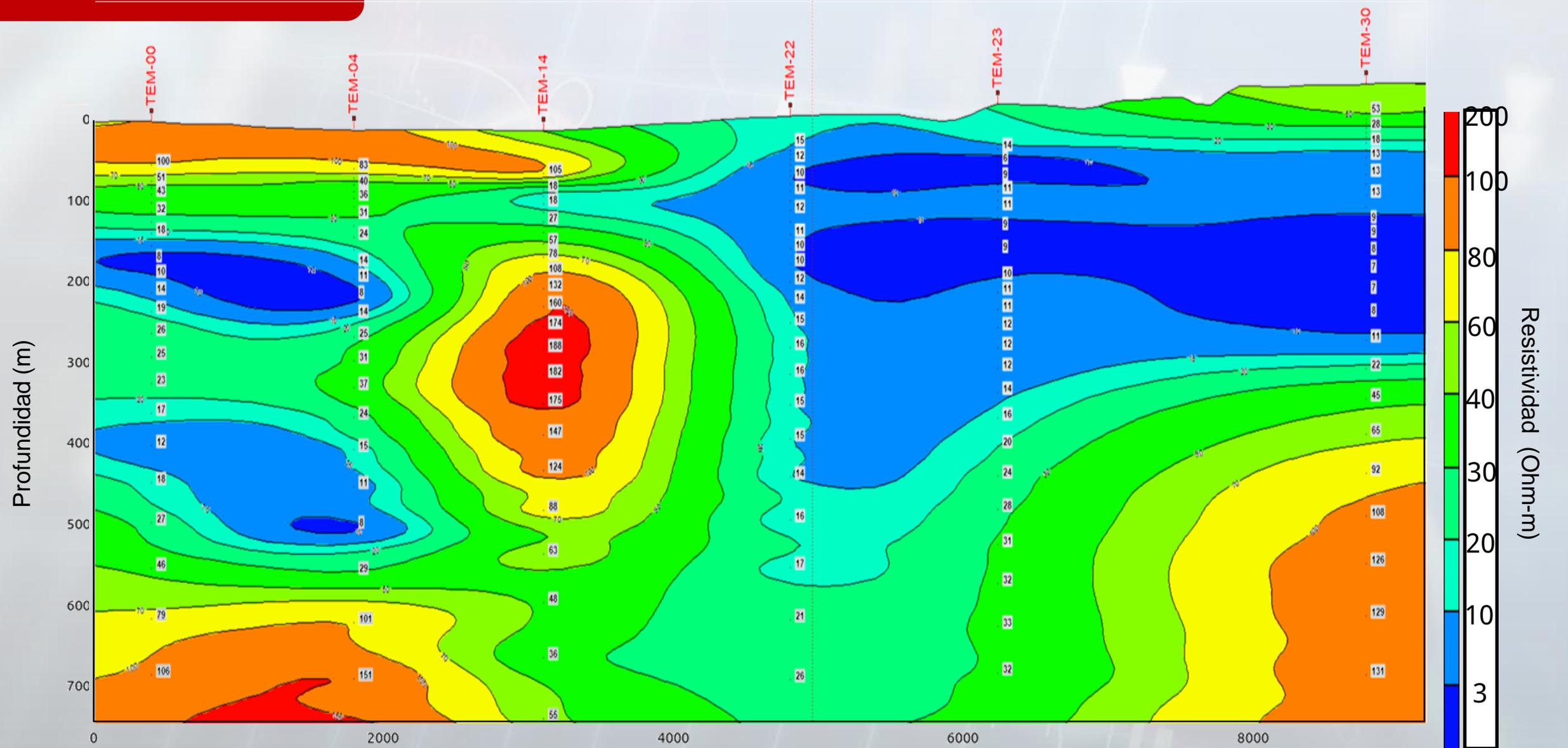


Base de datos



Módulos

Mapa  
Procesado  
Secciones



# Interpretación

