

# **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE MODELOS PARA SUELOS BIESTRATIFICADOS USANDO PYTHON**

## *ANALYSIS AND COMPARISON OF MODELS FOR BIESTRATIFIED SOILS USING PYTHON*

***Cristian Jair Pacheco Mejía***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia  
*cjpachecom@udistrital.edu.co*

***Herbert Enrique Rojas Cubides***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia  
*herojasc@udistrital.edu.co*

***Cristian Gonzalo Sarmiento Castro***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia  
*cgsarmientoc@udistrital.edu.co*

**Recepción:** 15/noviembre/2024

**Aceptación:** 19/mayo/2025

### **Resumen**

Este artículo presenta el proceso de diseño e implementación de una herramienta computacional para el tratamiento de mediciones recolectadas en campo y el modelado de suelos de una o dos capas (biestratificados) empleando técnicas convencionales y métodos computacionales avanzados. Durante el diseño preliminar, se revisaron aplicaciones similares o desarrollos destacados en la academia e industria y se realizó una revisión conceptual para la selección de tres modelos robustos (cuasi-Newton, algoritmo genético y optimización por enjambre de partículas) que destacan por agilidad de cálculo y fiabilidad de resultados. Asimismo, La herramienta fue programada usando el lenguaje libre Python, y se presenta a estudiantes, profesionales o interesados en el diseño de sistemas de puesta a tierra, como un producto tecnológico flexible y robusto, sin pago de licencia para su uso, y lo más relevante, con la capacidad de procesar y analizar monitoreos obtenidos en los que se emplee el método Wenner.

**Palabras Clave:** Método Wenner, Modelos avanzados, Python, Resistividad aparente, Suelos biestratificados.

## **Abstract**

*This paper presents the design and implementation process of a computational tool for the treatment of measurements collected in the field and the modeling of one - or two-layer (bistratified) soils using conventional techniques and advanced computational methods. During the preliminary design, similar applications or notable developments in academia and industry were reviewed and a conceptual review was conducted for the selection of three robust models (quasi-Newton, genetic algorithm and particle swarm optimization) that stand out for their agility in calculations and reliability of results. Likewise, the tool was programmed using the free language Python, and it is presented to students, professionals or those interested in the design of grounding systems, as a flexible and robust technological product, without paying a license for its use, and most importantly, with the ability to process and analyze measurements in which the Wenner method is used.*

**Keywords:** *Advanced models, Apparent resistivity, Bistratified soils, Python, Wenner method.*

## **1. Introducción**

En la actualidad, se considera esencial que toda instalación eléctrica cuente con una conexión a tierra, la cual garantizará que, en caso de presentarse una falla, exista un camino fiable a tierra para la corriente de corto circuito. De esta manera, dicha corriente anómala no recorrerá el cuerpo humano o entrará en contacto con un equipo eléctrico y lo averíe. Esta conexión, que configura un lazo o camino conductor entre equipos y partes de la instalación con la tierra física (suelo), recibe el nombre de sistema de puesta a tierra (SPT), y además de cumplir con las tareas ya mencionadas, conduce de manera segura las corrientes en exceso del sistema, permite la conexión de sistemas de apantallamiento y evita la aparición de tensiones críticas, equipotencializando el suelo donde es emplazado.

El adecuado dimensionamiento y la implementación de un SPT depende de múltiples variables, tales como: corriente máxima de la red, duración de la falla, duración del choque, resistividad del suelo, resistividad de la superficie, humedad, temperatura, geometría de los electrodos de puesta a tierra, tensión de paso y de

contacto. En este contexto, para diseñar un SPT, se debe conocer con anticipación la resistividad del terreno, y su modelo equivalente, los cuales se obtienen generalmente a partir de mediciones sobre el suelo natural, ya sea por medio del método Wenner, Schlumberger, Driven rod o Dipolo-Dipolo, entre otros.

Estos modelos de suelo son representaciones aproximadas de la estructura del terreno y permiten estimar la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) en unidades de ohmio-metro ( $\Omega m$ ) [Viggiano, 2006], entregando un valor representativo o la información de cierto número de capas (dos, tres o más) [Ayala, 2009]. Para su aplicación, el estándar IEEE-80 "*Guide for safety in AC substation grounding*", recomienda el uso de algunos modelos clásicos o convencionales para suelos de una sola capa (promedio, homogéneo o Box-Cox) o para suelos estratificados (Sunde, exponencial). Esto en razón a que los modelos de suelo uniforme son utilizados cuando se presenta poca variación entre mediciones (situación que poco se presenta en la práctica), mientras que los modelos de dos capas tienen una buena aproximación al suelo natural cuando se evidencia una variación considerable en las medidas de resistividad [Loke, 2001].

A pesar de lo anterior, existen gran diversidad modelos que se emplean cuando el suelo muestra condiciones complejas, tales como altas variaciones en la resistividad del terreno, curvas que ascienden y descienden en un mismo perfil de resistividad (curvas tipo  $k$ ,  $H$ ,  $A$  y  $Q$ ) o mediciones que al ser interpretadas como un suelo de dos capas generan errores. Estos son aplicados cuando se desea una mayor precisión, pero conlleva el uso de programas de computación (software) o métodos basados en sistemas de ecuaciones no-lineales (Laplace o el método de imágenes), aumentando los tiempos de implementación y análisis [Del Alamo, 1993].

En el mercado existen herramientas computacionales orientadas, en su mayoría, al diseño y cálculo de los electrodos de puesta a tierra (varillas, anillos o mallas). Algunos incluso permiten simular fallas y otros eventos transitorios, para apoyar tareas de ingeniería. Algunos ejemplos de software comercial desarrollados para diseñar SPT son ETAP<sup>®</sup>, IPI2WIN<sup>®</sup>, Aspix<sup>®</sup> y XGSLab<sup>®</sup>, los cuales emplean métodos como Steepest Descent o Newton para modelar el suelo. De hecho, varias de estas herramientas incluyen por defecto los modelos básicos recomendados por la norma

IEEE-80/81, o se limitan a solicitar un valor de resistividad, la cual deber ser calculada previamente, pasando desapercibida la modelación del suelo. A esto se suma que la mayoría de los softwares poseen licencias de pago para su ejecución, tiene versiones libres restringidas o no están disponibles para el ámbito académico. En aplicaciones prácticas relacionadas con SPT, el primer reto del profesional a cargo es el estudio y la caracterización del terreno, lo cual promueve entender y aplicar modelos matemáticos, tarea que por lo general termina con el uso de los modelos recomendados por la norma IEEE-80 (Box-Cox, Sunde). En este proceso, se suele excluir modelos desarrollados en las últimas décadas, dada su complejidad, el tiempo de implementación (debido a las posibles iteraciones) y la poca disponibilidad para hacer comparaciones. Lo anterior, a pesar de que sus resultados presentan menor margen de error y a que la literatura señala que para cada tipo de suelo, ya sea de una, dos, o múltiples capas, se recomienda comparar y seleccionar el modelo que mejor se ajuste a las características del lugar bajo estudio [Gonos, 2005]. De esta manera, este artículo describe el proceso de desarrollo e implementación de una herramienta computacional que facilita el estudio y caracterización de suelos de una o múltiples capas, incluyendo modelos clásicos y avanzados. Asimismo, este producto tecnológico proporciona ayudas sobre la fundamentación teórica, entrega resultados a partir de mediciones experimentales, permite la comparación de resultados entre dos o más modelos, y es capaz de generar un reporte en formato configurable (hojas de cálculo como Microsoft Excel®). Para este propósito, se utiliza el lenguaje de programación Python de libre acceso que elimina el problema de adquirir una licencia, facilitará el procesamiento de la información y garantizará su continua accesibilidad.

## **2. Métodos**

El diseño e implementación de la herramienta MSRES inició con una revisión documentos técnicos y académicos que incluyeran, la descripción de modelos analíticos para suelos de múltiples capas, así como sus parámetros de entrada y salida. Sumado a lo anterior, se revisaron herramientas computacionales diseñadas para el estudio de sistemas de puesta a tierra (en el sector comercial o académico),

su lenguaje o medio de programación y los tipos de modelos incluidos. Finalmente, se revisaron normas técnicas nacionales e internacional y se definió el alcance de la herramienta. Para completar la estructura del software, se planteó la selección de las variables de entrada usando programación básica y orientada a objetos. Lo anterior, de acuerdo con cada modelo seleccionado y los procedimientos necesarios para su implementación y la adecuada caracterización y evaluación de la resistividad del suelo. Adicionalmente, los módulos que compone la herramienta se enlazaron con ayuda de una interfaz gráfica de usuario.

### **Python como herramienta computacional**

Python es un lenguaje de alto nivel que soporta múltiples paradigmas de programación, incluyendo la programación orientada a objetos (OOP). Su biblioteca estándar Tkinter facilita la creación de interfaces gráficas de usuario (GUI) utilizando TCL/TK, permitiendo desarrollar de manera sencilla ventanas, botones, cuadros de texto y más. Al combinar OOP con Tkinter es posible organizar eficientemente el código de aplicaciones gráficas como lo es MSRES, encapsulando la lógica de la interfaz en clases y métodos. La selección de Python fue debido a que su licencia es de código abierto, posee gran flexibilidad y permite distribuir módulos sin restricciones, facilitando así el cálculo ágil y la generación de informes de estudio. Sumado a lo anterior, Python se destaca por su sintaxis fácil de entender y su amplia gama de Bibliotecas o librerías matemáticas y científicas, incluidas en la Tabla 1. Esto permitió acelerar el desarrollo de la herramienta al ofrecer códigos reutilizables y soporte para programación estructurada y funcional.

### **Criterios empleados para la selección de modelos**

Durante su diseño, y posterior implementación, se decidió que la herramienta integrara varios modelos avanzados para estimar la resistividad del suelo. Estos fueron seleccionados por su relevancia dentro de la literatura especializada y a partir de la valoración de cuatro criterios:

- **Cantidad de procesos (CP).** Se refiere a la cantidad de pasos u operaciones lógicas que se llevan a cabo en un algoritmo. Para limitar el número de

procesos, y establecer un límite claro entre los mismos, se tiene en cuenta la similitud matemática u operativa entre las operaciones ejecutadas. De esta manera, se busca asegurar que cada proceso sea coherente, permitiendo un mejor análisis del algoritmo en su conjunto. Los algoritmos asociados a cada modelo representan el total de procesos, independientemente de la complejidad que tengan. En estos procesos realizan diversas tareas, tales como el tratamiento de datos, la adición de variables, la inclusión de factores de amortiguación, y la estimación de errores. De esta forma, se asignó un valor de 1 para modelos que realizan hasta 3 procesos, un valor de 2 para modelos que contengan entre 4 y 6 procesos, y un valor de 3 para modelos con 7 procesos o más.

Tabla 1 Bibliotecas utilizadas en el desarrollo de la herramienta MSRES.

<b>Biblioteca</b>	<b>Descripción</b>
tkinter	Diseño y desarrollo de la interfaz gráfica completa de la herramienta, incluyendo la ventana principal y las áreas de cada módulo.
math	Operaciones básicas de matemáticas como sumas, restas, multiplicación y división.
numpy	Cálculo numérico, análisis de datos, cálculo entre matrices.
pandas	Análisis de estructuras de datos y facilidad en la lectura de datos en formato CSV, Excel y bases de datos.
matplotlib	Gráficas en dos dimensiones personalizables.
tksheet	Encargada de la Organización y visualización de las tablas en la GUI.
os	Obtención de datos del sistema del usuario, como el nombre de carpetas en donde guardar los reportes generados.
sys	Acceso a funciones y variables relacionadas con el intérprete de Python.
time	Toma de tiempos de ejecución de los scripts
openpyxl	Lectura y modificar ficheros de Excel.
xlsxwriter	Escritura ficheros de Excel.
statistics	Operaciones estadísticas con varios tipos de variables (int, float, etc).
sympy	Operaciones básicas y diferenciales con funciones algebraicas (simbólicas).
sklearn	Clasificación y regresión de datos.
Scipy	Optimización por método de Cuasi Newton.
PyGad	Optimización por el método de Algoritmo Genético.
Pyswarms	Optimización por el método de enjambre de partículas.

*Fuente: elaboración propia*

- **Citaciones por año (CA).** La citación es una métrica empleada en los artículos científicos, en este caso, para respaldar el uso e impacto de los modelos desarrollados para estimar la resistividad eléctrica de suelos de dos o más capas. Para este trabajo, se asignó un valor de 1 para modelos con una tasa de citación anual menor a 5, un valor de 2 para modelos con una

tasa de citaciones por año entre 6 y 15, y finalmente, un valor de 3 para modelos con una tasa de citaciones a 15 por año.

- **Variables de entrada (VE).** La variable de entrada en un modelo se utiliza para representar una cantidad o propiedad que puede ser controlada o manipulada [Bobachev, 2002]. Para este criterio, se buscaron modelos parsimoniosos, es decir, aquellos que mantienen su simplicidad mediante el mínimo número de variables de entrada. Adicionalmente, estos modelos evitan estar sobre parametrizados, lo que significa que no introducen variables innecesarias o irrelevantes al modelo, evitando así la introducción de “ruido”. De esta forma se asignó un valor de 1 para modelos con 5 o más variables de entrada, un valor de 2 para modelos con 4 variables de entrada y un valor de 3 para modelos con 3 o menos variables de entrada.
- **Computación Evolutiva (CE).** La programación y computación evolutiva, los algoritmos genéticos y el enjambre de partículas son técnicas de optimización basadas en la imitación de procesos naturales. Estas técnicas son ampliamente utilizadas en diversas áreas de la ciencia y la tecnología, incluyendo la optimización de procesos industriales, el diseño de sistemas complejos y la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre [Del Alamo, 1991]. De esta forma, se asignó un valor de 1 para modelos que no requieren computación evolutiva, un valor de 2 para modelos que requieren práctica básica de computación evolutiva (elementos finitos o algoritmos genéticos) y un valor de 3 para modelos más eficientes de computación evolutiva como lo es el enjambre de partículas.

### **Modelos seleccionados**

Aplicando los criterios descritos en la sección anterior, se revisaron diez modelos consultados en la literatura, cuyos resultados de ponderación se incluyen en la Tabla 2. A partir de esta tarea, y con base en su complejidad y actualidad (aplicación reciente), se seleccionaron los modelos avanzados de cuasi-Newton, algoritmo genético y optimización por enjambre de partículas que obtuvieron una calificación total de nueve puntos cada uno.

Tabla 2 Puntuaciones de los criterios de selección para cada modelo analizado.

Modelo / Criterio	CP	valor	CA	valor	CE	valor	VE	valor	TOTAL
Finite expression [Seedher, 1992]	6	2	2.42	1	NI	1	3	3	7
Generalized inverse [Melicyoulos, 1984]	5	2	0.59	1	NI	1	3	3	7
Steepest descent [Dawalibi, 1984]	5	2	1.62	1	NI	1	3	3	7
Levenberg-Marquardt [Lagace, 1996]	9	3	1.74	1	NI	1	4	2	7
Algoritmo de Newton [Del Alamo, 1993]	7	3	1.03	1	NI	1	3	3	8
Cuasi-Newton [Loke, 1996]	6	2	76.48	3	NI	1	3	3	9
Algoritmo genético (GA) [Gonos, 2005]	6	2	6.44	2	NO	2	3	3	9
GA - variación Zhiquiang y Bin [Zhiquiang, 2011]	6	2	0.67	1	NO	2	4	2	7
GA - variación Pacheco-Calixto [Pacheco, 2010]	6	2	4.15	1	NO	2	4	2	7
Optimización por enjambre de partículas [He, 2013]	5	2	0.8	1	AV	3	3	3	9
<b>Criterios:</b> CP: cantidad de procesos; CA: citas por año; CE: computación evolutiva; VE: variables de entrada <b>Calificador:</b> NI: ninguno; NO: normal; AV: avanzando									

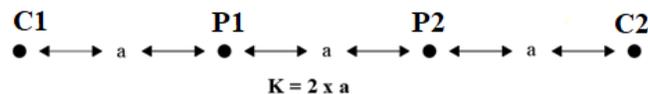
Fuente: elaboración propia

La selección del tercer modelo radicó en su capacidad de manejar condiciones o problemas complejos, a pesar de ser el menos referenciado. Por su parte, el modelo cuasi-Newton y el algoritmo genético son ampliamente citados y fueron seleccionados por su eficiencia computacional y la fiabilidad de resultados, además usan pocas variables de entrada. Estos modelos, cuya fundamentación teórica se puede revisar en un apéndice dispuesto online, fueron incorporados en la herramienta MSRES junto con seis modelos convencionales, ampliamente referidos en la literatura por su practicidad y simpleza. Estos métodos base, algunos de los cuales son válidos únicamente para suelos de una sola capa, serán el cálculo del

valor promedio, el método Box-Cox, y los modelos polinomial, exponencial y Sunde. De esta manera, se pone a disposición de la comunidad interesada en el diseño de SPT un conjunto de alternativas de diversa naturaleza y complejidad que pueden ser aplicadas de acuerdo con las necesidades del usuario (profesional o estudiante) y la información disponible (mediciones o simulaciones).

### **Variables de entrada**

Todos los modelos incluidos en la herramienta MSRES funcionan con información proveniente de mediciones realizadas con el método de Wenner que se utiliza para medir la resistividad del subsuelo a una profundidad superficial. Este método consiste en clavar cuatro electrodos equidistantes en línea recta, como se muestra en la Figura 1, con una separación fija entre ellos ( $a$ ). La corriente se aplica a los dos electrodos externos ( $C1$  y  $C2$ ) y se mide la diferencia de potencial entre los electrodos internos ( $P1$  y  $P2$ ). Aunque existen múltiples variaciones, este método proporciona una buena resolución vertical en suelos homogéneos. De esa forma, se tienen como variables de entrada la distancia entre electrodos y la resistividad de suelo.



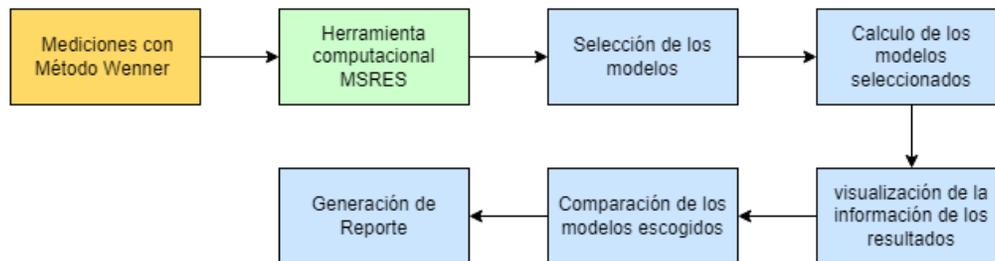
*Fuente: elaboración propia*

Figura 1 Configuración de electrodos por método Wenner.

### **Descripción general de la herramienta**

MSRES es una herramienta computacional que utiliza como información de entrada un conjunto de mediciones de resistividad del suelo (distancia versus resistividad). En términos generales, esta aplicación consta de cuatro módulos: mediciones, modelos, comparación y reporte. La Figura 2 muestra el diagrama o estructura principal de la herramienta. Al inicio de su ejecución, y como parte del apoyo al usuario, la herramienta grafica de manera automática el perfil de resistividad del terreno y evalúa la uniformidad de las mediciones. Con este resultado preliminar, el usuario puede procesar las mediciones y aplicar cualquiera de los modelos

disponibles (seis convencionales y tres avanzados), comparar los resultados y generar un informe-resumen. Esto facilita el uso de modelos matemáticamente complejos, como los basados en programación evolutiva, sin necesidad de conocer a fondo su funcionamiento. De esta forma se proporcionan resultados que pueden ser usados por diversos tipos de usuario (estudiantes, técnicos, ingenieros, entre otros) que requieren un modelo de suelo de una o dos capas para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

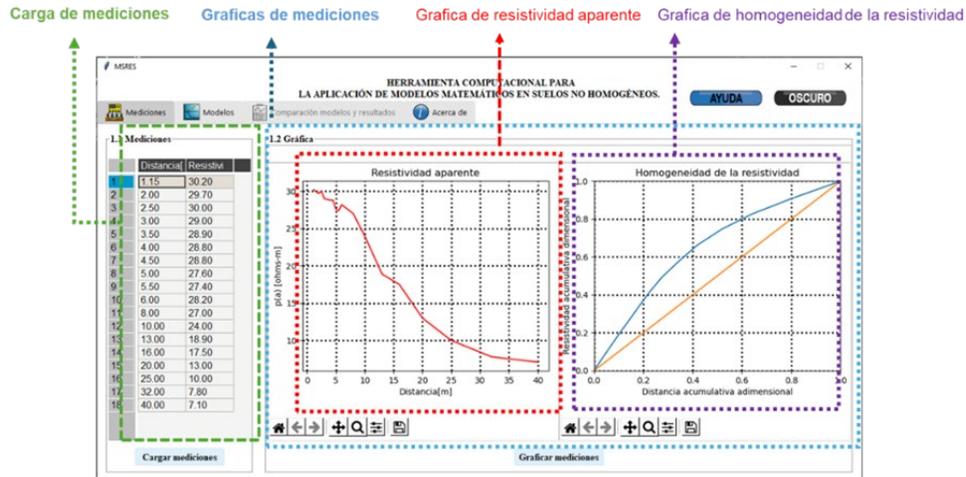


Fuente: elaboración propia

Figura 2 Esquema general de la herramienta computacional MSRES.

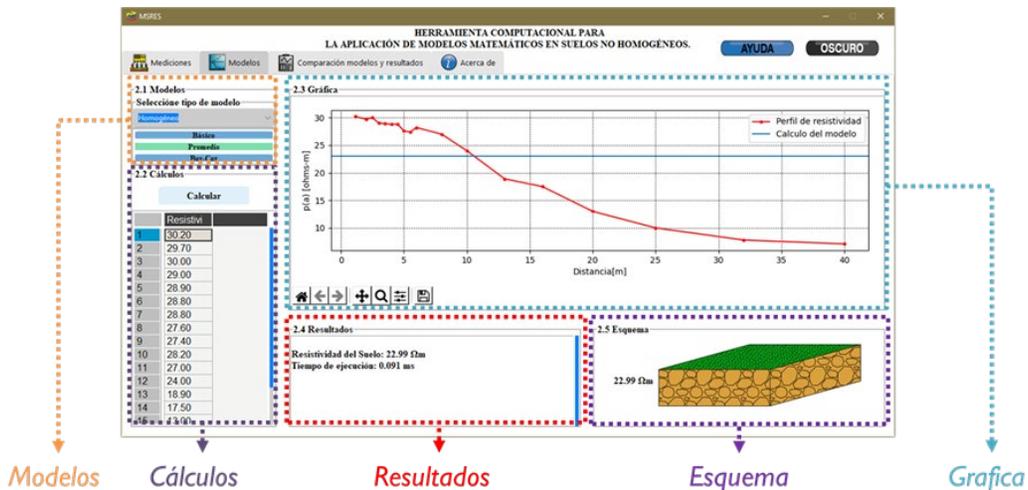
Describiendo en detalle la herramienta, el módulo 1 (Mediciones), que se puede apreciar en la Figura 3, importa las mediciones de resistividad del suelo obtenidas con el método de Wenner a través de una plantilla específica (nombrada como "FormatoMediciones.xlsx"). Esta plantilla se puede descargar con el botón de ayuda (dispuesto en el menú superior), y no posee un límite fijo de entradas, aunque se suelen procesar entre 4 y 50 conjuntos de datos (resistividad vs. distancia). Como se mencionó previamente, los datos importados son presentados gráficamente exhibiendo el perfil de resistividad aparente y la homogeneidad de los datos.

Por su parte, en el módulo 2 (Modelos) se procesan los datos y se aplican los modelos de suelo seleccionados por el usuario, disponibles en la sección izquierda de la interfaz, tal y como se aprecia en la Figura 4. Los resultados de cada método, junto con los cálculos realizados y las gráficas del perfil de resistividad, se muestran luego de presionar el botón de "calcular". Como se observa en la Figura 4, los cálculos se disponen en la parte baja de la sección izquierda, mientras que la gráfica de resistividad aparente, las iteraciones ejecutadas, los resultados y el modelo de suelo final (una, dos o múltiples capas) se incluyen en la sección derecha.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Módulo 1 – Mediciones.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Módulo 2 – Modelos.

El módulo 3, cuya disposición se puede ver en la Figura 5, permite al usuario comparar los resultados de hasta tres modelos procesados previamente, incluyendo la estimación de la diferencia porcentual de la resistividad obtenida para cada capa y su altura (profundidad), así como el tiempo de ejecución de cada método. Por otro lado, el módulo 4 (Reporte), facilita la generación de un informe (hoja de cálculo en formato \*.xlsx). En este nivel, el usuario puede seleccionar los modelos, cálculos, gráficas y resultados que desea incluir. Adicionalmente, se permite personalizar el nombre del usuario, agregar la ubicación de las mediciones y una descripción o

conclusión al informe. Sumado estas funciones, la herramienta proporciona un botón de ayuda para acceder a una página web local (sin conexión a internet), donde encontrará las instrucciones de uso y el manual general. Esta página web fue desarrollada en HTML y CSS, lo que le permite adaptarse al tamaño de la pantalla del dispositivo utilizado por el usuario.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Módulos 3 y 4 – Comparación de modelos y reporte.

### 3. Resultados

Durante el proceso de validación de la herramienta computacional MSRES, se utilizaron mediciones de resistividad aparente presentadas en los trabajos publicados por [Del Alamo, 1993] y [Seedher, 1992], artículos de consulta obligada en estudios asociados al modelamiento eléctrico del suelo y su aplicación en el diseño de SPT.

En su trabajo, Del Alamo comparó ocho técnicas para encontrar parámetros de un modelo de dos capas (resistividades y espesor), buscando un ajuste óptimo entre los valores medidos en campo y aquellos calculados con el modelo matemático. Entre tanto, Seeder introdujo un método eficiente basado en expresiones finitas para evaluar modelos de suelo de dos capas a partir de mediciones reales, utilizando el programa SPEF (*estimación de parámetros de suelo utilizando expresiones finitas*). A partir de lo anterior, se tomaron dos casos de estudio por cada referencia que son sintetizados en la Tabla 3.

Tabla 3 Casos de referencia empleados para validar la herramienta MSRES.

Ref.	Caso	Unidad	1	2	3	4	5	6
Del Alamo	1	$a [m]$	2.5	5	7.5	10	12.5	15
		$\rho_a [\Omega m]$	320	245	182	162	168	152
	2	$a [m]$	1	2	3	4	-	-
		$\rho_a [\Omega m]$	156.4	113.1	95.2	65.3	-	-
Seedher & Aroa	3	$a [m]$	2	4	6	8	10	-
		$\rho_a [\Omega m]$	123.3	190	258.9	320.3	374.1	-
	4	$a [m]$	2	4	6	8	10	-
		$\rho_a [\Omega m]$	102.3	113.1	129.8	147.5	164	-

Fuente: elaboración propia

Para este trabajo se incluyen cuatro de los nueve modelos disponibles en la herramienta. Estos fueron el Sunde y el Polinomial, como métodos convencionales de referencia, y los modelos cuasi-Newton (QN) y enjambre de partículas (PSO) en representación de las técnicas avanzadas de computación.

En la Tablas 4 se presentan los resultados arrojados por cada método, mostrando para cada suelo tres parámetros: la resistividad ( $\rho_1$ ) y el espesor ( $h$ ) de la capa superior, así como la resistividad de la capa inferior ( $\rho_2$ ).

Tabla 4 Resultados para cada caso.

Variables	Sunde	Polinomial	QN	PSO	Referencia
<b>Caso 1</b>					
$\rho_1 [\Omega m]$	249	460	364.69	378	372.73
$\rho_2 [\Omega m]$	160.67	-238.80	143.64	145.74	145.26
$h [m]$	4.37	14.62	2.83	2	2.69
<b>Caso 2</b>					
$\rho_1 [\Omega m]$	156.40	262.00	167.25	173.35	160.78
$\rho_2 [\Omega m]$	65.30	-125.40	45.29	49.57	34.07
$h [m]$	1.37	2.99	1.57	1.38	1.85
<b>Caso 3</b>					
$\rho_1 [\Omega m]$	156.66	60	100.21	100	98.38
$\rho_2 [\Omega m]$	347.20	4390	1022.77	1199	1018.80
$h [m]$	1.77	1.74	2.52	3	2.44
<b>Caso 4</b>					
$\rho_1 [\Omega m]$	108	100	100	100.02	99.99
$\rho_2 [\Omega m]$	156	334	300	303	302.64
$h [m]$	4	5.30	5	5	5.04

Fuente: elaboración propia

Al contrastar los resultados ( $\rho_1, \rho_2, h$ ) arrojados por la herramienta (modelos por separado) con los valores de referencia (Del Alamo y Seedher), se calcularon las

diferencias porcentuales de cada caso. Estos resultados se aprecian entre la Tabla 5 se observa que los modelos QN y PSO exhiben desviaciones inferiores al 15%, con excepción del caso 2 en el que se observa una diferencia de hasta el 34%. Por otro lado, los modelos Sunde y polinomial exhiben errores superiores al 20% en la mayoría los casos, llegando a reportar diferencias para  $\rho_2$  de 193% (caso 3) y 161% (caso 1), respectivamente. En contraste, el modelo polinomial muestra diferencias porcentuales por debajo del 10% solo en el caso 4.

Tabla 5 Diferencia de resultados por modelo para cada caso (%).

Variables	Sunde	Polinomial	QN	PSO
<b>Caso 1</b>				
$\rho_1$ [ $\Omega m$ ]	49.69%	18.97%	2.21%	1.47%
$\rho_2$ [ $\Omega m$ ]	9.59%	160.83%	1.13%	0.33%
$h$ [m]	38.42%	81.61%	4.88%	7.95%
<b>Caso 2</b>				
$\rho_1$ [ $\Omega m$ ]	2.80%	38.64%	3.87%	7.25%
$\rho_2$ [ $\Omega m$ ]	47.82%	127.17%	24.77%	31.26%
$h$ [m]	35.19%	38.19%	17.63%	34.40%
<b>Caso 3</b>				
$\rho_1$ [ $\Omega m$ ]	37.20%	63.97%	1.83%	1.59%
$\rho_2$ [ $\Omega m$ ]	193.43%	76.79%	0.39%	15.03%
$h$ [m]	37.85%	40.63%	3.02%	3.63%
<b>Caso 4</b>				
$\rho_1$ [ $\Omega m$ ]	7.13%	0.01%	0.01%	0.03%
$\rho_2$ [ $\Omega m$ ]	94.33%	9.39%	0.88%	0.17%
$h$ [m]	26.19%	4.85%	0.80%	0.28%

Fuente: elaboración propia

## 4. Discusión

Los modelos convencionales (Sunde y polinomial) tuvieron errores que variaron ampliamente, desde el 19.93% hasta el 87.12%, a excepción del caso 4. Por otro lado, los métodos de computación evolutiva presentaron errores que oscilaron entre el 0.01% y el 7.92%, excepto en el caso 2. Adicionalmente, para los casos 3 y 4 los métodos avanzados presentaron errores bajos con respecto a los datos de referencia (entre  $1.82 \times 10^{-7}\%$  y 3% para QN; entre  $9.4 \times 10^{-3}\%$  y 15% para PSO), mientras que los errores de los métodos convencionales estuvieron entre el 0.91% y el 193%. De hecho, los errores más grandes se evidenciaron con mayor frecuencia en la estimación de la resistividad de la capa profunda ( $\rho_2$ ). A pesar de ser

ampliamente utilizados, los modelos convencionales (Sunde y polinomial) muestran limitaciones en su capacidad de representar con precisión los datos medidos. En contraste, el método iterativo Cuasi-Newton y el método de optimización por enjambre de partículas basado en computación evolutiva han demostrado mayor capacidad de aproximación, con errores por debajo del 15%, y alcanzando aproximaciones sobresalientes (por debajo del 8% para el caso 1 y menores al 1% en el caso 4). Estos resultados subrayan la eficacia de los métodos iterativos y heurísticos para obtener representaciones más precisas del suelo en comparación con los métodos convencionales.

Gracias a técnicas informáticas avanzadas y a los avances tecnológicos actuales, es posible aplicar modelos de suelos diferentes a los clásicos o convencionales, mejorando significativamente su precisión, generando así mayor confianza en sus resultados. De esta forma, se presenta a la comunidad especializada una alternativa de software libre para el estudio y evaluación de modelos de suelos biestratificados, sin costo de licencia. Tras su validación, MSRES demuestra que está en capacidad de competir con soluciones comerciales, ofreciendo un procesamiento de mediciones ágil e intuitivo.

Adicionalmente, al ser desarrollada en Python, esta herramienta proporciona flexibilidad para ser ampliada, mejorada y adaptada a las necesidades específicas del usuario. Esto asegura que el software pueda mantenerse en continua actualización conforme a las nuevas normas y los modelos electromagnéticos emergentes.

## **5. Conclusiones**

A partir de lo presentado en este trabajo se tienen las siguientes conclusiones:

- MSRES es una herramienta computacional diseñada para el modelado eficiente de suelos, tanto homogéneos, como biestratificados. Ofrece la opción de aplicar hasta nueve modelos (entre básicos y avanzados), proporcionando flexibilidad y agilidad en el proceso. Asimismo, al incorporar modelos basados en métodos heurísticos, MSRES se presenta como una solución completa, accesible y adecuada tanto para profesionales del área

de ingeniería eléctrica y geología, como para aquellos que están iniciando en la exploración de estas temáticas.

- Se incluyeron en la herramienta los modelos avanzados Cuasi-Newton, Algoritmo Genético y Enjambre de Partículas, seleccionados a partir de una revisión de la literatura y la valoración de factores tales como: las citas por año, el número de procesos, las técnicas computacionales y sus variables de entrada. La inclusión de estos modelos amplía el espectro de aplicación de la MSRES dando a los usuarios más alternativas para el modelado de suelos. Esto mejora la eficiencia en la exploración y análisis de datos del terreno.
- La interfaz gráfica facilita al usuario el uso de la herramienta y permite la carga de las variables de entrada de manera intuitiva, así como la visualización del perfil de resistividad y la uniformidad de los datos. Esto permite al usuario decidir si debe analizar los datos como un suelo homogéneo o biestratificado. Asimismo, supone una reducción considerable en el tratamiento manual de la información.
- La comparación realizada con los casos de referencia (Del Alamo y Seedher) validó la efectividad de la herramienta desarrollada, especialmente en lo que se refiere a la predicción de la resistividad y profundidad del subsuelo. Respecto al espesor de las capas, los modelos Cuasi-Newton y Enjambre de Partículas mostraron diferencias por debajo del 10%. Estos hallazgos respaldan la utilidad de la MSRES, fortalecen la confianza en el modelado y su capacidad para proporcionar información crucial en proyectos geotécnicos y diseño de SPT.
- A partir de la investigación realizada el siguiente paso es desarrollar una versión web de la herramienta para mejorar la accesibilidad, incluir mayor número de capas de suelo en los modelos avanzados, implementar algunos de los modelos poco usados y que resultaron con puntuaciones inferiores en la ponderación, y permitir que el módulo de mediciones acepte alternativas distintas al método Wenner.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Ayala F. Método para determinar el modelo del duelo no homogéneo y sus parámetros, por medio de algoritmos genéticos, para el diseño de sistemas de puesta a tierra. Trabajo de grado – Maestría, repositorio Universidad Nacional de Colombia. 2009.
- [2] Bobachev A, Modin I, N, Shevnin V, IPI2Win(MT) User's Guide. Version 2, Geoscan-M Ltd. 2002.
- [3] Dawalibi F, Member S, Blattner C. Earth resistivity measurement interpretation techniques. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, 374 - 382. 1984.
- [4] Del Alamo J. A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, 1890 - 1899. 1993.
- [5] Del Alamo JL. A second order gradient technique for an improved estimation of soil parameters in a two-layer earth. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, 1166 - 1170. 1991.
- [6] Gonos I, Stathopoulos I. Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.1, 100 – 106. 2005.
- [7] He W, Zhang R, Zhu L, Chen T, Yang F, Shi Q. Parameter estimation of horizontal multilayer earth based on complex image method and improved particle swarm optimization. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 8, No. 5, 456 - 462. 2013.
- [8] Lagace P, Crainic E, Fortin J. Interpretation of resistivity sounding measurements in n-layer soil using electrostatic images. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11, No. 3, 1349 – 1354, 1996.
- [9] Loke M, Barker R. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, Vol. 44, No. 1, 131 - 152. 1996.
- [10] Loke M, H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo software. 2001.

- [11] Melicyoulos A, Papalexopoulos A, Webb R, Blattner C. Estimation of soil parameters from driven rod measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 9, 2579 – 2587. 1984.
- [12] Pacheco W, Martins L, Wu M, Yamanaka K, Da Paz E. Parameters estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, 1250–1257. 2010.
- [13] Seedher H, Arora J. Estimation of two layer soil parameters using finite wanner resistivity expressions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 3, 1213 – 1217.1992.
- [14] Viggiano D. Modelación y metodología para el cálculo de sistemas de puesta a tierra en subestaciones industriales. repositorio Universidad Simón Bolívar, Venezuela. 2006.
- [15] Zhiquiang H, Bin Z. Soil model's inversion calculation based on genetic algorithm. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning. 2011.