

**Metodología Para La Estimación Del Diámetro De Invasión A Partir De Registros De  
Resistividad**

Mauro Francisco Vásquez Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Ingeniería de Yacimientos

Director

PhD Maika Gambús Ordaz

Doctora en Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Ingeniería de Yacimientos

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

A Dios por concederme la vida, la salud y las habilidades necesarias para completar este trabajo de investigación.

A mis padres y hermanas por su constante apoyo y estímulo para proseguir con mis estudios.

### **Agradecimientos**

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por concederme la oportunidad de formar parte de su destacado claustro académico y por contar con un equipo humano de gran talento a cargo del programa. Su inestimable apoyo y dedicación han sido esenciales para que adquiriera los conocimientos y habilidades necesarios y así culminar con éxito esta prestigiosa especialización.

A mi estimada directora de proyecto, la PhD Maika Karen Gambús Ordaz, por su valioso aporte y su seguimiento constante durante el desarrollo del presente trabajo. Su orientación ha sido fundamental para alcanzar los objetivos de este proyecto.

A todos y cada uno de los docentes por su invaluable orientación, dedicación y profundo conocimiento compartido durante la especialización en ingeniería de yacimientos. Todo lo aprendido bajo su guía ha sido indispensable para mi crecimiento y desarrollo profesional en esta área.

## Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	11
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. Objetivo General .....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. MARCO DE REFERENCIA .....	18
2.1 Estado del arte fenómeno de invasión.....	18
2.2 El Proceso de Invasión.....	19
2.3 Modelos de diámetros de invasión.....	22
2.3.1. Modelo de Crain.....	22
2.3.2. Modelo Akram .....	26
2.4 Resistividad.....	32
2.4.1. Definición de Resistividad .....	35
2.4.2. Medición de la Resistividad.....	35
2.4.2.1. Principio Resistivo. ....	35
2.4.2.2. Principio de inducción electromagnética. ....	41
3. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS .....	45
3.1. Analisis de Variables.....	45
3.2. Intervalos a Analizar .....	49
4. ESTIMACIÓN DIÁMETRO DE INVASIÓN MODELO PROPUESTO.....	52

<b>MÉTODO PARA ESTIMAR D.I. MEDIANTE REGISTROS ELECTRICOS</b>	<b>5</b>
5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	63
CONCLUSIONES .....	73
RECOMENDACIONES .....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Valores típicos de resistividad para varios elementos, minerales, rocas y fluidos. ....	34
Tabla 2 Estadística descriptiva del pozo 4-BRSA-569D-BA .....	46
Tabla 3 Estadística descriptiva del pozo 7-JND-14D-BA .....	46
Tabla 4 Estadística descriptiva del pozo 7-JND-18D-BA .....	47
Tabla 5 Estadística descriptiva del pozo 7-JND-37D-BA .....	47
Tabla 6 Estadística descriptiva del pozo 7-JND-39D-BA .....	48
Tabla 7 Estadística descriptiva del pozo 7-JND-41D-BA .....	48
Tabla 8 Intervalos seleccionados para determinar el diámetro de invasión con el método propuesto. .....	50

## Lista de Figuras

Figura 1 Invasión de filtrado de lodo.....	20
Figura 2 Rcor-4a Induction Log Borehole Correction.....	23
Figura 3 Algoritmo de corrección por efecto de invasión. ....	25
Figura 4 Rint-5 Deep Induction-SFL Spherically Focused Resistivity Log-Rxo Device. ....	28
Figura 5 Gráfico de interpretación propuesto por Akram del Induction-Spherically Focused Log. .....	31
Figura 6 Entorno del pozo.....	37
Figura 7 Arreglo de electrodos básico del DLLTTM. ....	38
Figura 8 Geometría del flujo de corrientes para LLD y LLS. ....	38
Figura 9 Arreglo de electrodos de la herramienta de Registro Enfocado Micro-esférico (MSFL). .....	40
Figura10 Geometría del flujo de corriente en el MSFLTM representada como superficies equipotenciales.....	40
Figura 11 Diagrama de una herramienta de inducción simple. ....	43
Figura 12 Curvas de resistividades de los pozos propuestos. ....	49
Figura 13 Pozo 4-BRSA-569D-BA (3580-4000)ft.....	55
Figura 14 Pozo 4-BRSA-569D-BA (4660-5320)ft.....	56
Figura 15 Pozo 7-JND-14D-BA (3180-3380)ft.....	57
Figura 16 Pozo 7-JND-18D-BA (2200-2350)ft.....	58
Figura 17 Pozo 7-JND-37D-BA (1120-1220)ft.....	59
Figura 18 Pozo. 7-JND-37D-BA (1860-2260)ft.....	60

Figura 19 Pozo 7-JND-39D-BA (3593-3770)ft.....	61
Figura 20 Pozo 7-JND-41D-BA (3506-3788)ft.....	62
Figura 21 Pozo 4-BRSA-569D-BA (3580-4000)ft.....	64
Figura 22 Pozo 4-BRSA-569D-BA (4660-5320)ft.....	65
Figura 23 Pozo 7-JND-14D-BA (3180-3380)ft.....	66
Figura 24 Pozo 7-JND-18D-BA (2200-2350)ft.....	67
Figura 25 Pozo 7-JND-37D-BA (1120-1220)ft.....	68
Figura 26 Pozo 7-JND-37D-BA (1860-2260)ft.....	69
Figura 27 Pozo 7-JND-39D-BA (3593-3770)ft.....	70
Figura 28 Pozo 7-JND-41D-BA (3506-3788)ft.....	71

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Link de acceso código de aplicación desarrollada utilizando el método propuesto. 76

### Glosario

***Mudcake:*** retorta de lodo

***R<sub>mf</sub>:*** resistividad del filtrado de lodo (*mud filtrate resistivity*)

***R<sub>t</sub>:*** resistividad verdadera de la formación (*true resistivity*)

***R<sub>w</sub>:*** resistividad del agua de formación (*formation water resistivity*)

***R<sub>wa</sub>:*** resistividad aparente del fluido (*apparent fluid resistivity*)

***R<sub>xo</sub>:*** resistividad de la zona lavada (*flushed zone resistivity*)

***6FF40:*** herramienta de registros de inducción dual (propiedad de Schlumberger)

***Las:*** logic ASCII standard, es un de formato para almacenar y distribuir datos de registros de pozos digitales. El estándar fue definido y es mantenido por la Sociedad Canadiense de Registro de Pozos (CWLS).

## Resumen

**Título:** Metodología Para La Estimación Del Diámetro De Invasión A Partir De Registros De Resistividad\*

**Autor:** Mauro Francisco Vásquez Rodríguez\*\*

**Palabras Clave:** Diámetro de invasión, Registros eléctricos, Resistividad, Python.

**Descripción:** A partir de la literatura actual, se analizó el proceso de invasión y las variables que influyen en el diámetro de invasión del fluido de perforación en la formación. Se identificaron factores como las características del lodo, su peso, la porosidad efectiva y las permeabilidades de la formación, así como los fluidos que saturan el medio poroso. Dado que las propiedades del lodo varían entre condiciones estáticas en superficie y dinámicas en el fondo del pozo, se concluyó que la estimación más precisa del diámetro de invasión se logra a través de registros eléctricos de resistividad.

En este contexto, se presentaron los modelos empíricos utilizados para calcular el diámetro de invasión. Se propone una metodología basada en el modelo de Akram que emplea registros de resistividad. Este enfoque implica el desarrollo de una herramienta de software utilizando el lenguaje de programación Python y librerías especializadas en análisis y visualización de datos, integrando todas las variables relevantes.

Para validar esta metodología, se compararon los resultados obtenidos con el método propuesto, el enfoque empírico y los datos proporcionados por la compañía de registros. Utilizando archivos

(.las) de registros del campo Jandaia, en la cuenca del Reconcavo, disponibles en la página web de la Agencia Nacional de Petróleo (ANP) de Brasil, se demostró que el método propuesto es una excelente alternativa para estimar el diámetro de invasión cuando la compañía de registros no lo proporciona, además de servir como un método de control de calidad de los resultados obtenidos.

**Abstract**

**Title:** Methodology for Estimating the Invasion Diameter from Resistivity Logs\*

**Author:** Mauro Francisco Vásquez Rodríguez\*\*

**Key Words:** Diameter of Invasion, Electrical logs, Resistivity, Python.

**Description:** Based on current literature, the invasion process and the variables that influence the diameter of invasion of the drilling fluid in the formation were analyzed. Factors such as the characteristics of the mud, its weight, the effective porosity and permeabilities of the formation, as well as the fluids that saturate the porous medium, were identified. Since mud properties vary between static conditions at the surface and dynamic conditions at the bottom of the well, it was concluded that the most accurate estimate of the invasion diameter is achieved through electrical resistivity logs.

In this context, the empirical models used to calculate the invasion diameter were presented. A methodology based on the Akram model that uses resistivity logs is proposed. This approach involves the development of a software tool using the Python programming language and libraries specialized in data analysis and visualization, integrating all relevant variables.

To validate this methodology, the results obtained with the proposed method, the empirical approach and the data provided by the logging company were compared. Using files (.las) of records from the Jandaia field, in the Reconcavo basin, available on the website of the National Petroleum Agency (ANP) of Brazil, it was demonstrated that the proposed method is an excellent

alternative to estimate the diameter of invasion when the registry company does not provide it, in addition to serving as a method of quality control of the results obtained.

### Introducción

El daño de formación como consecuencia de la interacción del lodo de perforación con las formaciones atravesadas por la perforación de pozos, se traduce en otra arista del problema que la operación conlleva. Las consecuencias que la invasión del filtrado del lodo genera en zonas porosas y permeables, son variadas y en toda circunstancia perjudiciales. Así, esta invasión puede reducir la productividad del pozo, además de afectar los datos adquiridos por las herramientas de registros geofísicos, y propiciar con esto una evaluación imprecisa de las formaciones geológicas. No obstante, para producir los hidrocarburos almacenados dentro de estas formaciones geológicas, el pozo perforado debe comunicarse con estas formaciones más allá de la zona alterada o invadida y esto, puede ser logrado usando la penetración adecuada en el completamiento o creando fracturas. Sin embargo, crear perforaciones profundas genera no sólo mayores costos, sino también un mayor impacto ambiental en estas actividades de subsuelo. De esta manera, se hace necesario conocer la longitud invadida por el filtrado de lodo, comúnmente llamada diámetro de invasión. Entre las variables que inciden en el proceso de invasión, podemos citar: a) El lodo de perforación; este debe ser de baja pérdida de agua de tal manera que, el diámetro de invasión sea pequeño, b) el peso del lodo, ya que técnicamente al formular el lodo con un mayor peso, mayor será la presión hidrostática y por ende también lo será el diámetro de invasión; c) la porosidad efectiva y las permeabilidades de las formaciones expuestas al lodo; d) el contenido y distribución de arcilla presentes en el medio poroso; e) los fluidos que saturan el medio poroso; y finalmente f) el tiempo de permanencia del lodo en contacto con las formaciones desnudas. Así, se propone una metodología con base en el modelo de Akram para la estimación del diámetro de invasión a partir de registros de resistividad que evalúe el perfil de invasión por filtrado de lodos de perforación, mediante el desarrollo de una herramienta software, implementando el lenguaje de programación

Phyton y diferentes librerías especializadas en el análisis de datos, que integre las variables que intervienen en el fenómeno.

De esta manera en el capítulo 1 se propondrán el objetivo general y los objetivos específicos de la presente investigación los cuales se logran alcanzar en el desarrollo de la presente investigación, posteriormente en el capítulo 2 se expone el marco de referencia, dando a conocer el estado del arte del fenómeno de invasión, se define además el proceso de invasión y muestra los dos principales modelos empíricos utilizados para el cálculo del diámetro de invasión a partir de registros de resistividad, también se define el concepto de resistividad y se exponen los dos métodos utilizados para la medición de esta. En el capítulo 3 se desarrolla el análisis exploratorio de datos, los cuales se tomaron de una fuente abierta subidos a la página de internet oficial de la (Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles [ANP], 2023) de Brasil, se realiza el análisis de variables que inciden el cálculo del diámetro de invasión y se determinan los intervalos a analizar, seguido en el capítulo 4, se propone un modelo para la estimación del diámetro de invasión a partir del propuesto por Akram el cual se ejecuta mediante una aplicación realizada con el lenguaje de programación Phyton y algunas librerías especializadas en el análisis exploratorio de datos y generación de gráficos. Finalmente, en el capítulo 5 se presenta el análisis y comparación de los resultados obtenidos entre el modelo propuesto, modelo empírico y los entregados por la compañía de registro, los cuales se integran en una gráfica que los muestra correlacionados en un mismo *track*.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Proponer una metodología para la estimación del diámetro de invasión en formaciones de media a alta porosidad a partir de registros de resistividad.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Documentar el fenómeno de la invasión que ocurre en el ambiente de las formaciones geológicas porosas y permeables atravesadas por la broca de perforación.
- Clasificar las variables que afectan el diámetro de invasión.
- Desarrollar una aplicación que integre las variables que intervienen en el fenómeno de la invasión del lodo de perforación base agua, en un medio poroso y permeable, haciendo uso de registros de resistividad.
- Comparar los resultados obtenidos en el objetivo anterior con los reportados por algunos de los modelos empíricos documentados en la literatura.

## 2. Marco de Referencia

### 2.1 Estado del arte fenómeno de invasión.

Allen et. al (1991) definieron la invasión como el proceso por el que los fluidos del pozo se filtran en formaciones permeables, representando el fenómeno como una maldición, y al mismo tiempo como una bendición. Esta impide que se realicen mediciones precisas de la formación, pero proporciona información importante sobre la producibilidad. Los autores describen como la interpretación de la invasión que ocurre ha aportado avances en la tecnología de registro con cable y de registro durante la perforación (LWD). Shi-Xin (1992) resaltó que la invasión del fluido de perforación dentro de la formación durante el proceso de perforación es inevitable, esta invasión la cual puede variar de unos cuantos centímetros a metros tiene una influencia significativa dentro de la resistencia eléctrica de la formación. El autor menciona un método para corregir el efecto de la invasión del lodo en los *laterologs* , asumiendo un diámetro de formación ideal, flujo de corriente medida horizontal dentro de la formación y el radio de invasión menor al radio de la profundidad de investigación del *laterolog* más superficial; además refiere que una vez se determina la verdadera resistividad de la formación en la zona no invadida a partir de los *laterologs* duales, se puede estimar el diámetro de invasión para formaciones de porosidad efectiva media a alta. Akram (2015) describió un método que permite al analista calcular el diámetro de invasión y la resistividad real de la formación a partir de registros combinados; por ejemplo Inducción (IL) - Esférica Enfocado (SFL) –  $R_{XO}$ , donde el método cubre principalmente las condiciones cuando  $R_{XO} > R_t$ ; ya que, para condiciones en las que  $R_{XO} < R_t$ , la herramienta se vuelve menos precisa para determinar  $R_t$  resultando limitante para otras combinaciones de registros de los cuales se pudiera disponer. Por su parte, Yiren et al. (2017) compartieron los resultados de un trabajo

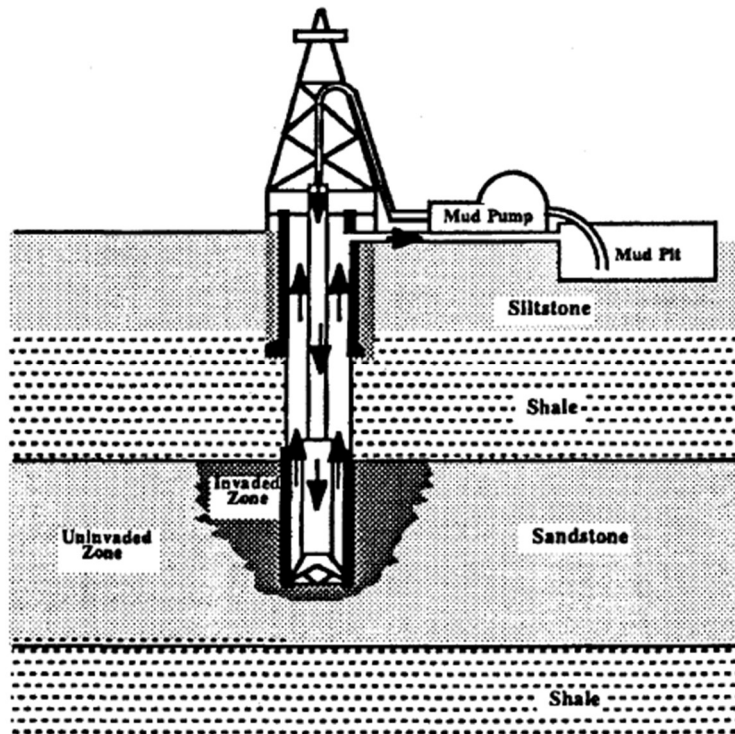
experimental que demuestra una disminución progresiva en la resistividad radial de la formación durante la invasión del lodo de perforación con base en salmuera. En el inicio de la invasión, la torta de lodo, también conocida como *mudcake*, se forma gradualmente, lo que resulta en un aumento en su espesor y una disminución en su porosidad y permeabilidad. Esto conlleva a una rápida disminución en el gradiente de presión radial del módulo de formación. En los periodos medio y tardío de la invasión, las propiedades de la torta de lodo y el gradiente de presión radial del módulo de formación se estabilizan. Con base en lo anterior surgen las siguientes preguntas: ¿Que hay cuando se tienen porosidades bajas?, ¿Puede esta metodología aplicarse a diferentes combinaciones de registros resistivos?, ¿Cuáles variables de entorno (formación y fluidos) afectarán el cálculo del diámetro de invasión?, ¿En qué magnitud el diámetro invadido afecta a las lecturas de los registros geofísicos utilizados en la caracterización petrofísica de los yacimientos?

## 2.2 El Proceso de Invasión

Yao y Holditch (1993), señalan que la perforación de pozos en yacimientos suele acompañarse de la circulación de lodo. Esto se lleva a cabo para eliminar el calor generado por fricción cuando la broca penetra en la roca, proporcionar lubricación para reducir los efectos de la fricción y transportar los recortes de la roca producidos durante la perforación. Sin embargo, los finos de lodo y los filtrados pueden invadir y dañar la formación cercana al pozo como se observa en la Figura 1.

Figura 1

*Invasión de filtrado de lodo.*



*Nota.* Tomado de *Reservoir Permeability Estimation from Time-Lapse Log Data*, por Yao, C. Y. & Holditch, S. A, *SPE Paper 25513 March 21-23, 1993*

Keelan y Koepf (1977) explicaron que los lodos de perforación contienen partículas sólidas que forman una torta sobre la pared del pozo, la torta restringe el flujo del lodo dentro de la formación cercana al pozo, pero alguna invasión de filtrado y partículas finas son inevitables y usualmente ocurre. El filtrado puede reaccionar con las arcillas de formación provocando el hinchamiento, la movilización y la migración. Las partículas liberadas y las partículas finas transportadas en la formación por el filtrado pueden tapar los poros y reducir la permeabilidad de la formación. Los filtrados con base agua aumentan la saturación irreductible del agua y crean bloqueo de agua y reducción de la permeabilidad de los hidrocarburos.

Henderson (2008) definió que la profundidad de la invasión también está influenciada por ciertas características del fluido del lodo de perforación, tales como su densidad, salinidad y viscosidad. La filtración a través de la pared del pozo resulta en la acumulación de revoque de lodo, siendo este último un factor crucial para determinar la profundidad de la invasión, ya que regula las tasas de filtración. Las propiedades de filtración se pueden relacionar con las tasas de flujo a través de la pared del pozo mediante la siguiente ecuación (1).

$$Q_f = \frac{kA}{\mu} \times \frac{\Delta P}{h_{mc}} \quad (1)$$

Dónde:  $Q_f$  = tasa de flujo;  $k$  = permeabilidad del revoque de lodo;  $A$  = área transversal;  $\mu$  = viscosidad del filtrado;  $\Delta P$  = diferencia de presión;  $h_{mc}$  = espesor del revoque de lodo.

Desafortunadamente, la información del lodo no proporciona un método preciso para predecir la profundidad de la invasión. Esto se debe a que a menudo hay poca correlación entre las propiedades del lodo medidas en condiciones estáticas de superficie y esas mismas propiedades en condiciones dinámicas de fondo de pozo. La mayoría de las variables en la ecuación (1) siguen siendo desconocidas.

La invasión se puede definir como conductiva o resistiva, lo que en términos generales se refiere a las propiedades eléctricas del filtrado: ¿es un filtrado conductivo (basado en agua salada) o resistivo (basado en agua dulce)? Más específicamente, "conductor" y "resistivo" se refieren al contraste de salinidad entre el filtrado invasor y el agua de formación original. Este contraste se expresa mediante la relación  $R_{mf}/R_w$ . La invasión de filtrado a base de agua es clasificada según la relación  $R_{mf}/R_w$ ; conductiva para  $R_{mf}/R_w < 2.5$  (ejemplo: formación de agua salada invadida por filtrado a base de agua salada, resistiva para  $R_{mf}/R_w > 2.5$  (ejemplo: formación de agua salada invadida por filtrado a base de agua dulce).

### 2.3 Modelos de diámetros de invasión.

Algunos de los modelos empíricos que se han utilizado en un intento de cuantificar el diámetro de invasión en la formación durante la perforación son:

#### 2.3.1. Modelo de Crain

Crain, (2015) implementó uno de los modelos empíricos utilizados para determinar el diámetro de invasión a través de registros de resistividad, para ello el modelo de Crain propone calcular primero las correcciones inducidas por el hueco mediante las ecuaciones (2) y (3) :

$$RESDc = \frac{100}{\frac{100}{(RESD - BHGD)}} \quad (2)$$

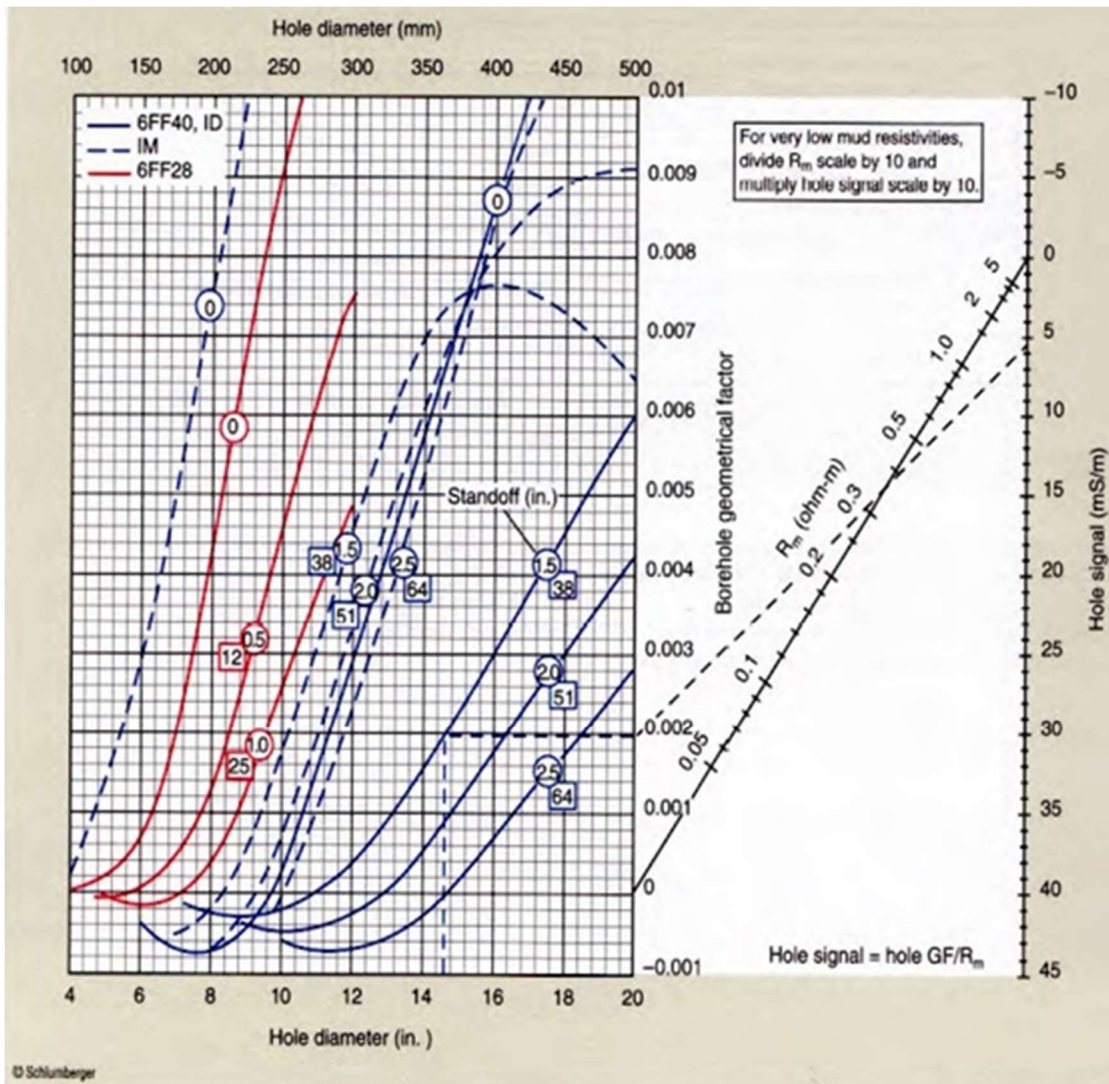
$$RESMc = \frac{100}{\frac{100}{(RESM - BHGM)}} \quad (3)$$

Dónde:

BHGD y BHGM son factores de corrección para la resistividad profunda y media dadas en (mS/m). RESD y RESM son las resistividades profunda y media leídas por la herramienta en (ohm-m). RESDc y RESMc son las resistividades profunda y media corregidas por efecto de hueco dadas en (ohm-m).

BHGD y BHGM se determinan por medio de la Figura 2:

Figura 2

*Rcor-4a Induction Log Borehole Correction.*

*Nota.* Tomado de *Log Interpretation Charts* (p.6-10), por Schlumberger 1997

La segunda corrección es para los efectos de la invasión del filtrado de lodo en la formación. El conocimiento del perfil de invasión se puede utilizar para corregir el registro de resistividad profunda para este efecto. El conocimiento del perfil proviene de los datos de resistividad media y superficial en comparación con la resistividad profunda. Los gráficos de

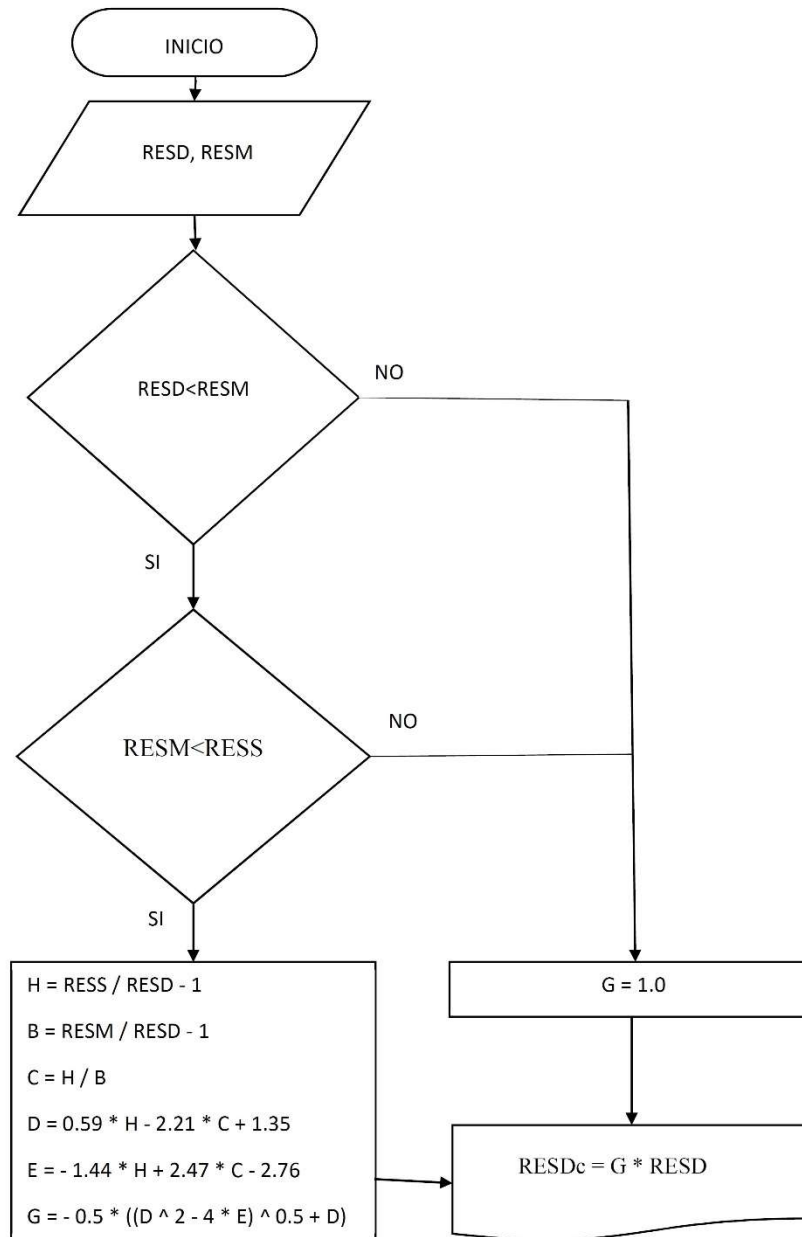
corrección están disponibles para varios tipos de herramientas y generalmente se conocen como gráficos de tornado debido a la forma de las líneas en el gráfico.

A veces, los datos del registro no caben dentro del cuerpo de líneas del gráfico. Una solución pragmática es reducir la resistividad profunda mediante un desplazamiento basado en la diferencia entre el logaritmo de la resistividad somera y el logaritmo de la resistividad media.

Para calcular la corrección por efecto de invasión se realiza el algoritmo de la Figura 3:

Figura 3

Algoritmo de corrección por efecto de invasión.



*Nota.* Algoritmo utilizado en método propuesto por Crain para calcular la corrección por efecto de invasión. Adaptado de *Crain's Petrophysical Handbook, water saturation environmental corrections for resistivity logs.* (2015)

Donde:

B, C, D, E, G, y H son términos intermedios calculados para estimar valores de resistividades corregidas. RESD, RESM, RESS representan la lectura de un registro de resistividad profunda, media y somera respectivamente medidas en unidades de ohm-m.

Si los registros de resistividad media y profunda leen el mismo valor, entonces no se necesita corrección porque la invasión es muy superficial o no es posible ninguna corrección porque la invasión es extremadamente profunda. Las herramientas más nuevas necesitan gráficos diferentes. RESDc a menudo se denomina  $R_t$ , la resistividad "verdadera"

El modelo de Crain calcula el  $D_i$  mediante las ecuaciones (4) y (5)

$$C = \frac{RESM}{RESDc} \times \frac{(RESD - RESDc)}{(RESM - RESD)} \quad (4)$$

$$D_i = 33 \times (C + 1) - \min(100, 10^{(0.5 \times C - 0.04)}) \quad (5)$$

### 2.3.2. Modelo Akram

Akram (2015) describió un método que permite estimar el diámetro de invasión ( $D_i$ ) y la resistividad verdadera de la formación ( $R_t$ ) a partir de las mediciones realizadas con la herramienta de resistividad por inducción de enfoque esférico (ISF) combinada con  $R_{xo}$ . El registro ISF ha demostrado ser una herramienta de registro muy útil en condiciones de  $R_{xo} > R_t$ ,  $R_{mf} > R_w$  e invasión superficial. El método cubre principalmente las condiciones en las que  $R_{xo}$  es mayor que  $R_t$ . Cuando  $R_{xo}$  es menor que  $R_t$ , el registro de inducción se vuelve menos preciso para la evaluación de  $R_t$ . Se ha construido una gráfica de corrección de invasión para determinar los valores de  $D_i$ ,  $R_{xo}/R_t$  y  $R_t$ . Sin esta corrección un error grave podría resultar en el cálculo de la

saturación de agua ( $S_w$ ), especialmente en una formación profunda invadida y con  $R_{xo}$  mucho mayor que  $R_t$ .

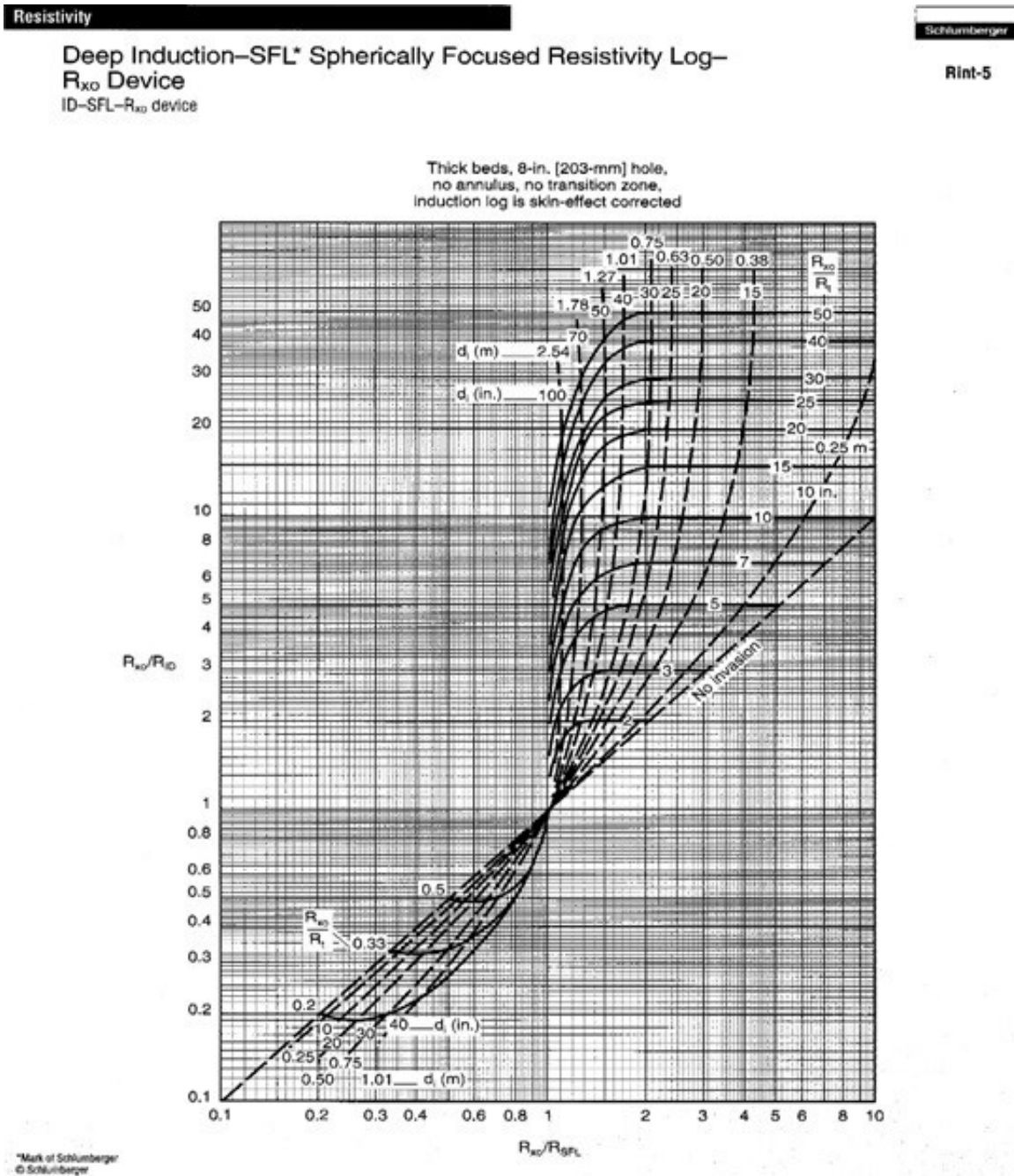
El registro ISF ha sido ampliamente utilizado en Medio Oriente como la mejor herramienta para la detección de hidrocarburos y  $R_o$  (resistividad de formaciones acuíferas limpias) evaluando cuando  $(R_{mf} / R_w) > 2$ . La herramienta de inducción esférica (ISF) contiene un sistema de electrodos SFL el cual reemplazó el sistema normal de 16" de las primeras herramientas de inducción. La herramienta de Inducción-SFL se puede combinar con una sónica compensada por hueco para reducir el tiempo de trabajo de taladro y registrar una curva de  $R_{wa}$  para una ubicación rápida de saturación de hidrocarburos. Este tipo de registro está disponible en la industria con el nombre de registro combinado ISF/Sonic, si se desea se puede agregar un registro  $SP$  y/o de rayos gamma.

Se han realizado varias mejoras en el diseño de herramientas de inducción, como la inducción fasorial (PI) y la herramienta *Array Induction Imager* (AIT). Estas herramientas contribuyen a mejorar la estimación de  $R_t$  en la mayoría de los rangos de resistividad y condiciones del pozo, como por ejemplo en casos de laminaciones delgadas, complicado perfil de invasión y cuando los problemas ambientales (correcciones efecto hombro y efecto pozo) son críticos.

El conocido cuadro de corrección de invasión denominado Rint-5, de la Figura 4 a veces denominado "*Tornado Chart*", permite al analista de registros determinar los valores de  $D_i$  y  $R_t$  a partir del registro de inducción profunda básico más auxiliares de menor profundidad (SFL y  $R_{xo}$ ). El gráfico Rint-5 en su forma clásica, con abscisas ( $R_{xo} / R_{SFL}$ ) y ordenada ( $R_{xo}/R_{ID}$ ) en escalas logarítmicas, muestra curvas de  $R_{xo}/R_t$  constante y  $D_i$  constante. Es difícil interpolar  $R_{xo}/R_t$  cuando un punto cae en la sección de invasión profunda del gráfico. El gráfico colapsa y la interpretación no es posible cuando  $D_i > 100$ ". Por otro lado, las ecuaciones de la gráfica no están publicadas.

Figura 4

Rint-5 Deep Induction-SFL Spherically Focused Resistivity Log-Rxo Device.



Nota Gráfico que permite determinar  $D_i$  y  $R_t$  a partir de registros de inducción profunda y superficiales. Tomado de *Log Interpretation Charts* (p. 6-17), por Schlumberger, 1997.

El concepto de factor pseudo-geométrico proporciona los datos básicos para la construcción de un gráfico de interpretación más precisa del registro de inducción. El diámetro de invasión ( $D_i$ ) resulta ser una función simple de  $\alpha$  (ecuación (6)):

$$D_i = 7.3 \times 10^{1.3\alpha} \quad (6)$$

Donde  $D_i$  está en pulgadas y  $\alpha$  está definida en términos de las lecturas (ecuación(7)):

$$\alpha = \frac{(R_{SFL} - R_{ID})}{(R_{XO} - R_{ID})} \quad (7)$$

Donde  $R_{SFL}$ ,  $R_{ID}$ , y  $R_{XO}$  son los valores de las resistividades tomadas del SFL, deep-induction log y el MSFL u otra herramienta micro-resistiva. Aquí, como suele ocurrir, se asume que  $R_{MSFL}=R_{XO}$ . El factor geométrico ( $G$ ) es determinado de la curva clásica (sin skin-effect) del 6FF40 cuando  $D_i \geq 37$  in (ecuación(8)).

$$G = -0.32 + 10^{-2}d_i - 0.34 \times 10^{-4}d_i^2 + 0.42 \times 10^{-7}d_i^3 \quad (8)$$

Cuando  $D_i < 37$ in el efecto de invasión en el 6FF40 registrado bajo la condición  $R_{XO} > R_t$  es pequeño. Por lo tanto, para uso práctico se asume que  $G=0$ . La  $R_{IDC}$  (corregida por invasión) se deriva entonces de la siguiente (ecuación(9)) ya que  $G$  y  $R_{XO}$  son conocidas.

$$\frac{1}{R_{ID}} = \frac{G}{R_{XO}} + \frac{1-G}{R_{IDC}} \quad (9)$$

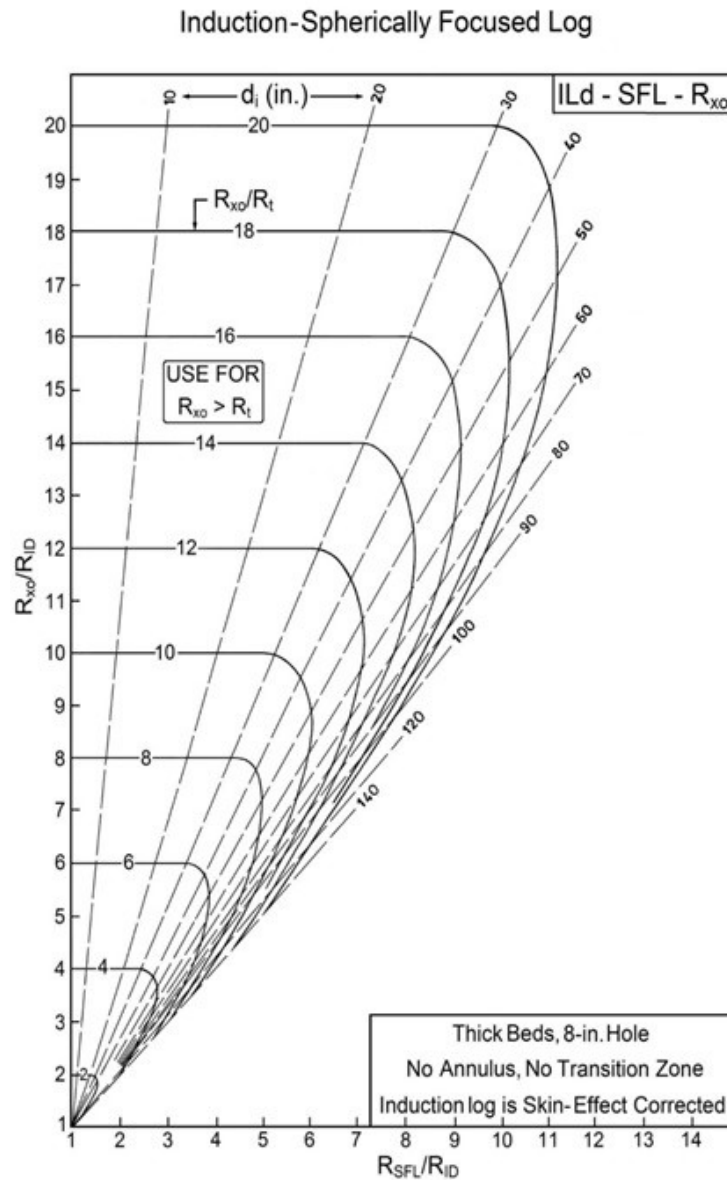
La corrección por skin-effect se vuelve necesaria cuando la invasión del filtrado de lodo es profunda y  $R_{XO}/R_t$  es grande, especialmente en el caso de un lecho muy fino de muy alta conductividad. Cuando las resistividades no infinitas son medidas la curva del factor geométrico clásico (sin *skin-effect*), como se describe en (ecuación(8)), no se puede utilizar directamente para predecir con precisión la respuesta radial de la herramienta de inducción. Esta vez  $G_{IL}$  depende no sólo de  $D_i$ , pero también hasta cierto punto de  $R_{XO}$  y  $R_t$ . El uso de factores pseudo-geométricos conduce a estimaciones mejoradas de  $R_t$  cuando solamente está disponible un registro de

inducción. Además, si la invasión es de moderada a profunda en las zonas de agua, las estimaciones de  $R_w$  se mejorarán utilizando los factores geométricos variables para diferentes combinaciones de  $R_{XO}$  y  $R_t$ .

La Figura 5 muestra el gráfico de interpretación propuesto del registro de Inducción profunda-SFL- $R_{XO}$ , con abscisas ( $R_{SFL}/R_{ID}$ ) y ordenada ( $R_{XO}/R_{ID}$ ) en escalas lineales. El gráfico muestra curvas de  $R_{XO}/R_t$  constante y líneas rectas discontinuas de  $D_i$  constante. En el gráfico se ha incorporado la corrección secundaria de *skin-effect* que implica un registro de inducción profundo. El gráfico describe el efecto relativo de los desplazamientos entre las tres curvas de resistividad y los diámetros de invasión cuando  $R_{XO} > R_t$ . Se ingresa al gráfico con las relaciones,  $R_{SFL}/R_{ID}$  y  $R_{XO}/R_{ID}$ , corregidas según sea necesario para los efectos del hueco y espesor del lecho, para encontrar valores de  $D_i$  y  $R_{XO}/R_t$ . A partir de la última relación, se puede determinar  $R_t$  ya que se conoce  $R_{XO}$ .

Figura 5

Gráfico de interpretación propuesto por Akram del Induction-Spherically Focused Log.



*Nota.* Gráfico de interpretación propuesto cuando se cumple  $R_{xo} > R_t$ , utilizando registro de inducción profunda, SFL y  $R_{xo}$ . Tomado de SPE-172514-MS *Determination of Invasion Diameter and True Resistivity from the Induction-SFL- $R_{xo}$  Combination* (p. 4), por Akram F., 2015, *Society of Petroleum Engineers*.

Los valores de  $R_t$  y  $D_i$  encontrados por este método son cercanos a los valores obtenidos mediante el gráfico Rint-5 cuando la relación  $R_{XO}/R_{ID} > 1$ . Si hay una invasión profunda en la formación entonces no se sugiere interpretar por el gráfico Rint-5, y es recomendado realizar el cálculo por este método. Cuando  $D_i$  es grande,  $R_{SFL}$  y  $R_{XO}$  serán cercanas una de otra. En presencia de ruido que siempre existe,  $R_{SFL}-R_{ID}$  y  $R_{XO}-R_{ID}$  contienen alto nivel de ruido, afectando su ratio ( $\alpha$ ). Por lo tanto, la precisión de la determinación de  $D_i$  y  $R_t$  disminuye bastante rápidamente a valores más altos de  $D_i$  debido a la baja sensibilidad de los datos.

El método aquí propuesto ofrece una solución directa para determinar con precisión la extensión de la zona invadida y por lo tanto se usa para corregir la lectura del registro de inducción profunda por el efecto de invasión. Cubre las condiciones favorecidas para el registro ISF en lodo a base de agua cuando  $R_{XO}$  es mayor que  $R_t$ . Sin esta corrección un error importante podría resultar en el cálculo de la saturación de agua, especialmente en una formación invadida profunda y con  $R_{XO}$  mucho mayor que  $R_t$ .

## 2.4 Resistividad

Las formaciones sedimentarias son capaces de transmitir una corriente eléctrica únicamente por medio de su contenido de agua intersticial y adsorbida. Serían no conductores si estuvieran completamente secas. El agua intersticial o connata que contiene sales disueltas constituye un electrolito capaz de conducir corriente, ya que estas sales se disocian en cationes con carga positiva (como  $Na^+$  y  $Ca^{2+}$ ) y aniones con carga negativa (como  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$ ). Estos iones se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico y transportan una corriente eléctrica a través de la solución. Cuanto mayor es la concentración de sal, mayor es la conductividad del agua connata. El agua dulce, por ejemplo, tiene solo una pequeña cantidad de sales disueltas y, por lo

tanto, es un mal conductor de la corriente eléctrica; mientras el petróleo y el gas son no conductores, tal como se evidencia en la Tabla 1

**Tabla 1***Valores típicos de resistividad para varios elementos, minerales, rocas y fluidos.*

Material	Temperatura (°C)	Resistividad (ohm m <sup>2</sup> /m)
Plata	0°	1.468 x 10 <sup>-8</sup>
Cobre	20°	1.692 x 10 <sup>-8</sup>
Oro	20°	2.44 x 10 <sup>-8</sup>
Aluminio	20°	2.828 x 10 <sup>-8</sup>
Acero	22°	9.8 x 10 <sup>-8</sup>
Calcopirita		3.0 x 10 <sup>-6</sup> a 2.0 x 10 <sup>-1</sup>
Galena		6.8 x 10 <sup>-6</sup> a 5.8 x 10 <sup>-1</sup>
Pirita		0.6 a 1.0 x 10 <sup>-5</sup>
Pirrotita		2.0 x 10 <sup>-6</sup> a 1.6 x 10 <sup>-4</sup>
Esfalerita		4.0 x 10 <sup>-2</sup> a 4.0 x 10 <sup>4</sup>
Hematita		6 x 10 <sup>-3</sup> a 120
Cuarzo		10 <sup>12</sup> a 3 x 10 <sup>14</sup>
Azufre		10 <sup>14</sup> a 10 <sup>15</sup>
Hálito		>10 <sup>4</sup>
Mica		10 <sup>11</sup> a 10 <sup>14</sup>
Mármol		5 x 10 <sup>7</sup> a 10 <sup>9</sup>
Arcilla		2 a 10
Esquisto compactado		Hasta 60
Pizarra		1-2 x 10 <sup>6</sup>
Caliza apretada		>10 <sup>3</sup>
Arena que contiene agua salada	15°	0.5 a 10
Arena que contiene aceite	15°	5 a 10 <sup>3</sup>
Agua destilada	15°	5 x 10 <sup>3</sup>
Agua salada (ppm NaCl) 2000	15°	3.4
Agua salada (ppm NaCl) 200.000	15°	0.06
Petróleo	15°	2 x 10 <sup>14</sup>

*Nota.* Adaptado de *Well Logging Handbook*, (p. D 146) Serra, Oberto. (2008), Editions Technip.

### ***2.4.1. Definición de Resistividad***

La resistividad eléctrica (recíproca de la conductividad) de una roca saturada de líquido es su capacidad para impedir el flujo de corriente eléctrica a través de esa roca. Las rocas secas exhiben una resistividad infinita. En la práctica de registros eléctricos, la resistividad se expresa en  $\Omega$  m. La resistividad de las rocas del yacimiento es una función de la salinidad del agua de formación, la porosidad efectiva y la cantidad de hidrocarburos atrapados en el espacio poroso. La relación entre estas cantidades indica que la resistividad disminuye al aumentar la porosidad efectiva y aumenta al aumentar el contenido de petróleo. Las mediciones de resistividad también dependen de la geometría de los poros, el estrés de la formación, la composición de la roca, los fluidos intersticiales y la temperatura, debido a lo anterior la resistividad es una herramienta valiosa para evaluar la productividad de una formación (Tiab, & Donaldson, E. C. 2012).

### ***2.4.2. Medición de la Resistividad***

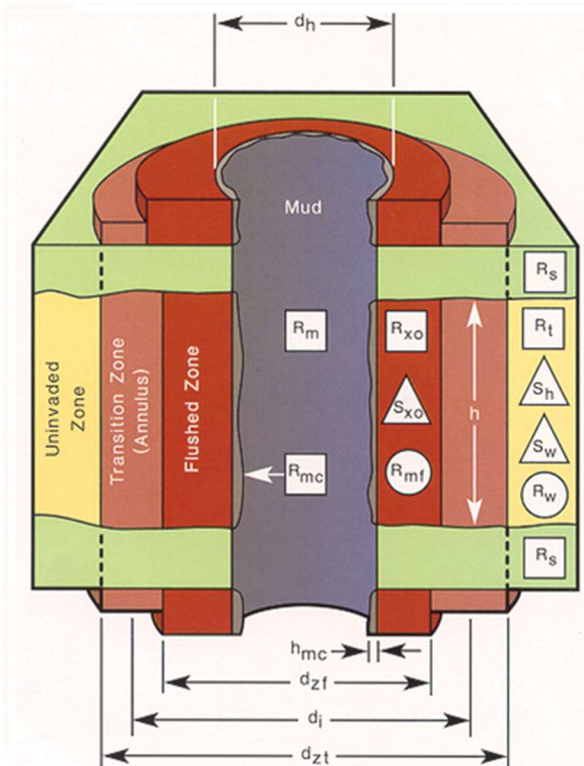
Según el ambiente de operación existen herramientas para medir la resistividad y conductividad (sin embargo, en el caso de conductividad por estándares de la industria se muestra resistividad ohm-m) basadas según el principio resistivo y principio de inducción electromagnética.

**2.4.2.1. Principio Resistivo.** Serra, Oberto (2008) afirma que existen diferentes técnicas para medir la resistividad, todas son variaciones de un sistema básico común, un (o varios) emisor (electrodos) envía una señal (corriente eléctrica) a la formación. Un (o varios) receptor (electrodos) mide la respuesta de la formación a esta señal a cierta distancia del emisor. Generalmente, un aumento en la distancia entre el emisor y receptor (llamado espaciamento) da como resultado una mayor profundidad de investigación. (y una lectura más cercana a la

resistividad verdadera de la formación,  $R_t$ ). Halliburton (s.f.), indica que las herramientas de resistividad están diseñadas para proporcionar estimaciones de la resistividad de la formación a múltiples distancias del pozo, conocidas como profundidades de investigación. Esta capacidad es la que hace a los registros de resistividad útiles para investigar la distribución radial de diferentes tipos de fluido en el espacio de poro de una formación permeable. La distribución del filtrado de lodo invadido y fluidos originales como se observa en la Figura 6 puede ser usada para deducir si la formación es o no permeable y si lo es, si algún hidrocarburo móvil fue desplazado durante la invasión. La herramienta de registro *dual laterolog* DLLT (*Dual Laterolog Logging Tool*) es un dispositivo de resistividad de electrodo. Los electrodos metálicos se colocan a lo largo de la sarta de herramientas y están eléctricamente aislados entre sí. Cada electrodo puede servir para uno o varios propósitos en la medida de la resistividad. El arreglo de electrodos de la Figura 7 utilizado para adquirir simultáneamente mediciones de *laterolog* profundas (LLD) y superficiales (LLS). La medición de la resistividad de la formación con un conjunto de electrodos se complica por la presencia de fluido del pozo a través del cual deben viajar las corrientes profundas y superficiales. Para minimizar la influencia de este fluido conductivo del pozo, los electrodos de protección se utilizan para enfocar las corrientes de inspección a través del pozo y en la formación. Los electrodos de monitoreo mantienen un enfoque adecuado al preservar una diferencia de potencial cero entre las corrientes de inspección y protección. Cuando la corriente de inspección está correctamente enfocada, las geometrías de flujo de corriente tanto de las medidas superficiales como las profundas son cilíndricas Figura 8.

Figura 6

Entorno del pozo.



Rs: Resistividad del shoulder beds.

Rt: Resistividad verdadera de la zona no invadida.

Sh: Saturación de hidrocarburo de la zona no invadida.

Sw: Saturación del agua de la zona no invadida.

Rw: Resistividad del agua de la formación.

Rm: Resistividad del lodo.

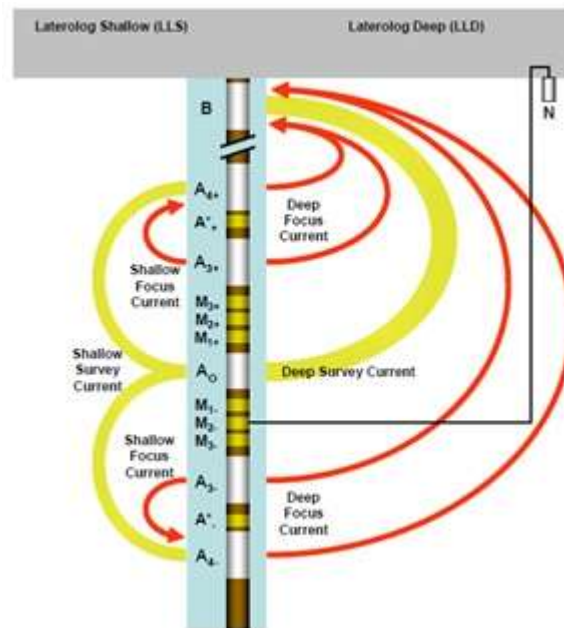
Rmc: Resistividad de la torta de lodo.

 $h_{mc}$ : Espesor de la torta de lodo $d_h$ : Diámetro del hueco

*Nota.* La invasión del filtrado de lodo en una formación permeable crea una distribución radial de tipos de fluido (invadida y original). Las formaciones invadidas se caracterizan por una zona enrojecida (*flushed zone*), una zona de transición (*transition zone*) y una zona no invadida (*uninvaded zone*), Tomado de *Dual Laterolog – Micro-Spherically Focused Log Measurement Principles, Block Diagram and Operations* (p. 1) por Halliburton (2008.), *Fort Worth Training Center*.

**Figura 7**

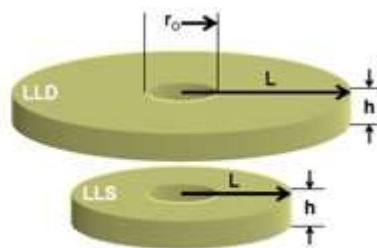
Arreglo de electrodos básico del DLLTTM.



Nota. Tomado de *Dual Laterolog – Micro-Spherically Focused Log Measurement Principles, Block Diagram and Operations* (p. 23) por Halliburton (2008.), Fort Worth Training Center.

**Figura 8**

Geometría del flujo de corrientes para LLD y LLS.



Nota. Tomado de *Dual Laterolog – Micro-Spherically Focused Log Measurement Principles, Block Diagram and Operations* (p. 13) por Halliburton (2008.), Fort Worth Training Center.

El espesor  $h$  de cada disco cilíndrico es mantenido constantemente por la emisión de corrientes de enfoque emitidas desde los electrodos de protección. El radio de cada disco es una función del espaciamento entre el electrodo A0 y el de retorno, longitud del electrodo de protección y la frecuencia de la corriente de inspección. El radio  $r_0$  es el radio del electrodo A0. La geometría de ambos cilindros es representada matemáticamente por la siguiente ecuación (10).

$$K = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{L}{r_0}\right)} \quad (10)$$

donde  $K$  es la constante de la herramienta,  $h$  el espesor del cilindro,  $L$  longitud del radio del cilindro,  $r_0$  radio del electrodo A0. Con la caracterización de la geometría del flujo de corriente para cada medida, la resistividad profunda y superficial son calculadas respectivamente con las siguientes ecuaciones (11) y (12).

$$R_{LLD} = K_{LLD} \frac{V_{e(LLD)}}{I_{A(LLD)}} \quad (11)$$

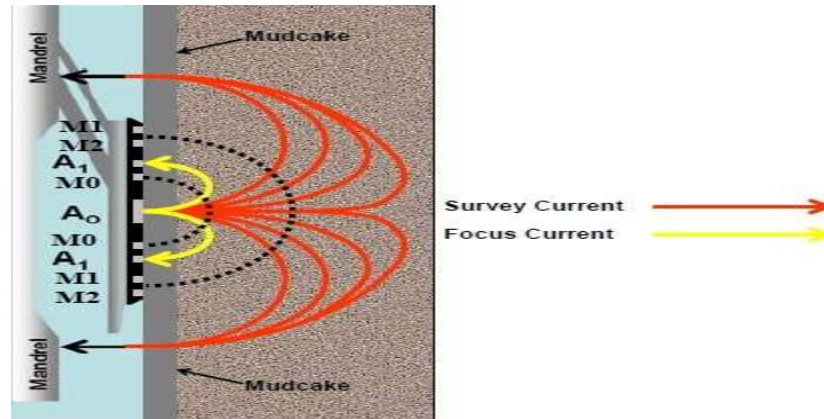
$$R_{LLS} = K_{LLS} \frac{V_{e(LLS)}}{I_{A(LLS)}} \quad (12)$$

El registro enfocado micro esféricamente (MSFL<sup>TM</sup>) se ejecuta comúnmente en combinación con el DLLT<sup>TM</sup> para proporcionar una tercera y aún menor profundidad de investigación. El MSFL<sup>TM</sup> investiga la resistividad de la zona lavada, (parte de la formación invadida más cerca del pozo). Para lograr tal poca profundidad de investigación, el MSFL<sup>TM</sup> como se aprecia en la Figura 9 utiliza una matriz de electrodos concéntricos montados en un arreglo que mantienen contacto con la pared del pozo. El objetivo principal del MSFL<sup>TM</sup> es estimar la profundidad de la invasión y determinar un valor de la resistividad de la zona lavada ( $R_{xo}$ ). La zona lavada se extiende varias pulgadas desde la pared del pozo, y una medición de su resistividad se logra mejor mediante un dispositivo de electrodo montado en un arreglo como el MSFL<sup>TM</sup>.

Cuando la corriente de inspección se enfoca correctamente, la geometría del flujo de corriente  $K$  para el MSFL™ es hemisférica. Las dimensiones de este hemisferio indicado en la Figura10, dependen del espaciado de los electrodos y de la frecuencia de la corriente de inspección.

**Figura 9**

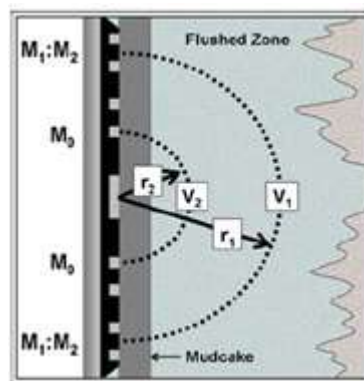
*Arreglo de electrodos de la herramienta de Registro Enfocado Micro-esférico (MSFL).*



*Nota.* Tomado de *Dual Laterolog – Micro-Spherically Focused Log Measurement Principles, Block Diagram and Operations* (p. 24) por Halliburton (2008.), Fort Worth Training Center.

**Figura10**

*Geometría del flujo de corriente en el MSFL™ representada como superficies equipotenciales.*



*Nota.* Tomado de *Dual Laterolog – Micro-Spherically Focused Log Measurement Principles, Block Diagram and Operations* (p. 24) por Halliburton (2008.), Fort Worth Training Center.

Obteniendo (ecuación 4)

$$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (13)$$

La resistividad del MSFL<sup>TM</sup> se calcula mediante la ley de ohm por (ecuación 5)

$$R_{MSFL} = K \frac{V_e}{I_e} \quad (14)$$

Con conocimiento de la resistividad ( $R_{XO}$ ) y porosidad ( $\Phi$ ) de la zona lavada, la saturación de agua de la zona lavada se puede calcular mediante la siguiente ecuación (ecuación 6):

$$S_{XO}^n = \left( \frac{a}{\Phi^m} \right) \left( \frac{R_{mf}}{R_{XO}} \right) \quad (15)$$

donde  $S_{XO}$  es la saturación del agua en la zona lavada, n exponente de saturación, a factor de tortuosidad,  $\Phi$  porosidad, m exponente de cementación,  $R_{mf}$  resistividad del lodo filtrado,  $R_{XO}$  resistividad de la zona lavada. Según el estándar de la industria, los resultados de los registros se presentan en unidades de resistividad (ohm-m), que es el recíproco de la conductividad.

Resistividad =  $\frac{1000}{\text{Conductividad}}$  , como ya se había dicho el ambiente de trabajo ideal para el

DLLT<sup>TM</sup> es en fluidos de pozo altamente conductivos, además cumplir según Halliburton (2008),

que  $\frac{R_{mf}}{R_w} < 2.5$  y  $R_{mf} \approx R_w$  .

**2.4.2.2. Principio de inducción electromagnética.** Halliburton (2009), señala que una de las herramientas que se utilizan para medir la resistividad basadas en este principio es el Array Compensated Resistivity Tool (ACRt<sup>TM</sup>), se utiliza cuando se perfora con fluidos que tienen de baja a media conductividad, o cuando se perfora en huecos de aire. El ACRt<sup>TM</sup> no requiere que fluya corriente desde la herramienta hacia la formación, debido a esto no es necesario que un

líquido conductivo esté presente en el hueco cuando la herramienta está registrando. La herramienta está diseñada para operar en formaciones que contengan aguas salinas.

En formaciones que contienen agua fresca (de alta resistividad), puede hacer insuficiente contraste en la resistividad de la formación para distinguir zonas que contienen hidrocarburos de otras que contienen agua. Para localizar hidrocarburos en estas clases de formaciones, es mejor utilizar una herramienta dieléctrica.

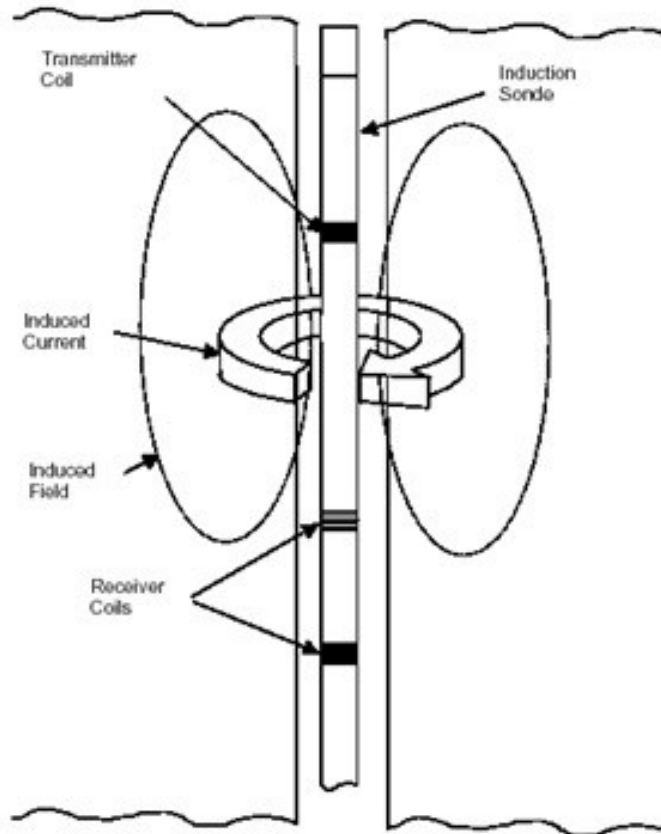
El ACRT™ puede ser utilizado para:

- Determinar resistividad de la zona no invadida.
- Distinguir entre formaciones que contienen agua salada y formaciones que contienen hidrocarburos.
- Definir los *bed boundaries*.
- Estimar los límites de la invasión.
- Indicar hidrocarburos móviles.
- Indicar zonas permeables.
- Correlacionar formaciones.
- Realizar mediciones precisas de resistividad del lodo ( $R_m$ ).

Un diagrama de cómo funciona una herramienta de inducción simple como el de la Figura 11, el conjunto de transmisores de la herramienta induce una corriente eléctrica en la formación; el conjunto de receptores detecta el campo electromagnético producido por esta corriente. No fluye corriente entre la herramienta y la formación.

**Figura 11**

*Diagrama de una herramienta de inducción simple.*



*Nota. Tomado de Array Compensated True Resistivity Tool (ACRt™) Field Operations Manual Revision F, (p. 26) Halliburton (2009)*

El ACRt™ contiene una bobina (transmisor) y un conjunto de seis bobinas (receptor), los cuales propagan y detectan los campos electromagnéticos. La bobina del transmisor es alimentada por una corriente de excitación compuesta a tres frecuencias de aproximadamente 12 kHz, 36 kHz y 72 kHz. La corriente que pasa a través de la bobina transmisora genera un campo electromagnético que induce corrientes eléctricas (corrientes parásitas) en la formación. Estas corrientes parásitas, a su vez, generan sus propios campos electromagnéticos, que inducen un

voltaje, conocido como "señal R", en las bobinas receptoras de la herramienta. Otro voltaje, llamado "señal X", también se induce en las bobinas del receptor. Este componente resulta principalmente del acoplamiento electromagnético entre las bobinas del transmisor y del receptor, pero también se ve afectado por la formación.

La amplitud de la señal R varía con los cambios en la resistividad de la formación y se utiliza para determinar esa resistividad. La magnitud de la señal R se reduce en formaciones de baja resistividad (skin effect) y se ve afectada por la proximidad y resistividad de los lechos adyacentes (shoulder bed affect).

La conductividad de la formación se mide en mS/m (mili-Siemens por metro) comúnmente llamado mili-mho (mmho). Es el recíproco de la resistividad expresada en ohm-m. Dada la resistividad R en ohm-m, la conductividad C en mili-mho se calcularía como ecuación (16):

$$C = \left( \frac{1000}{R} \right) \quad (16)$$

La herramienta ACRt™ realiza mediciones de resistividad de formaciones a seis profundidades de investigación. Las mediciones de resistividad se utilizan juntas para ajustar los efectos de invasión para obtener la resistividad real de la formación (Rt) y para calcular la saturación de agua en zonas no invadidas (Sw).

### 3. Análisis Exploratorio de Datos

*International Business Machine*, (IBM) (2023) indica en su página web que los científicos de datos utilizan el análisis exploratorio de datos, EDA por sus siglas en inglés (*Exploratory Data Analysis*) para analizar e investigar conjuntos de datos y resumir sus características principales, a menudo empleando métodos de visualización de datos. Ayuda a determinar la mejor manera de gestionar las fuentes de datos para obtener las respuestas que necesita, lo que facilita que los científicos de datos descubran patrones, detecten anomalías, prueben una hipótesis o verifiquen suposiciones.

EDA se utiliza principalmente para ver qué pueden revelar los datos más allá del modelado formal o tarea de prueba de hipótesis y proporciona una mejor comprensión de las variables del conjunto de datos y las relaciones entre ellas. También puede ayudar a determinar si las técnicas estadísticas que está considerando para el análisis de datos son apropiadas. Desarrolladas originalmente por el matemático estadounidense John Tukey en la década de 1970, las técnicas EDA continúan siendo un método ampliamente utilizado en el proceso de descubrimiento de datos en la actualidad.

#### 3.1. Análisis de Variables

Como se indicó en las ecuaciones (6) y (7) según el modelo Akram las variables que infieren en el cálculo del diámetro de invasión ( $D_i$ ) a partir de los registros de resistividad son: resistividad somera, resistividad profunda y resistividad zona lavada. Los datos de los registros de resistividad de los pozos se tomaron de una página web de acceso público de la ANP de Brasil, procedentes del campo Jandaia, de la cuenca del Reconcavo. En las Tabla 2 -7 se representan las estadísticas descriptivas de los registros de los pozos tomados en cuenta para calcular el  $D_i$ .

**Tabla 2***Estadística descriptiva del pozo 4-BRSA-569D-BA*

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	10853	10853	10853	10851	10851	10851	10851	10851	10851
mean	2681.5	69.3	8.5	8.7	308.8	338.0	35.7	19.2	171.7
std	1566.6	23.3	0.0	0.6	691.3	727.8	171.2	25.4	526.6
min	-31.5	13.4	8.5	8.1	0.1	0.2	0.6	8.2	0.5
25%	1325.0	52.1	8.5	8.5	1.9	1.9	1.9	8.7	1.9
50%	2681.5	73.4	8.5	8.7	2.8	2.8	3.0	8.8	2.9
75%	4038.0	82.0	8.5	8.8	10.2	10.4	8.9	17.2	11.0
max	5394.5	187.7	8.5	21.8	1950.0	1950.0	1950.0	234.2	1950.0

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

**Tabla 3***Estadística descriptiva del pozo 7-JND-14D-BA*

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	5304	5304	5304	5304	5303	5303	5303	5303	5303
mean	2076.3	74.1	8.8	9.2	4.4	4.5	4.5	21.8	4.5
std	765.6	18.8	0.0	0.4	6.1	6.8	5.8	28.4	6.7
min	750.5	15.7	8.8	8.6	0.8	0.7	0.7	8.7	0.7
25%	1413.4	70.2	8.8	9.1	2.2	2.1	2.3	9.2	2.2
50%	2076.3	78.1	8.8	9.2	2.8	2.9	3.1	9.4	2.9
75%	2739.1	84.5	8.8	9.3	4.0	4.2	4.3	16.7	4.2
max	3402.0	145.8	8.8	17.8	95.8	122.0	114.2	225.1	129.7

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

**Tabla 4***Estadística descriptiva del pozo 7-JND-18D-BA*

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	6880	6880	6880	6880	6879	6879	6879	6879	6879
mean	2279.8	72.8	8.8	8.8	158.7	155.4	5.2	21.3	35.7
std	993.1	21.6	0.0	0.6	526.0	521.5	6.2	26.3	227.2
min	560.0	14.1	8.8	3.8	0.1	0.6	0.5	4.0	0.5
25%	1419.9	65.5	8.8	8.7	2.2	2.1	2.3	8.9	2.2
50%	2279.8	76.3	8.8	8.9	2.8	2.8	3.1	9.1	2.9
75%	3139.6	83.2	8.8	9.0	4.8	4.9	5.0	21.8	4.9
max	3999.5	179.3	8.8	13.2	1950.0	1950.0	150.3	228.6	1950.0

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

**Tabla 5***Estadística descriptiva del pozo 7-JND-37D-BA*

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	7164.0	7164.0	7164.0	7164.0	7163.0	7163.0	7163.0	7163.0	7163.0
mean	1806.8	70.9	8.8	8.1	396.7	397.9	8.5	13.4	6.8
std	1034.1	19.2	0.0	2.1	781.2	782.7	16.1	25.1	16.0
min	16.0	12.2	8.8	3.6	1.2	1.0	1.0	4.1	1.0
25%	911.4	53.9	8.8	8.8	2.1	2.1	2.1	4.2	2.0
50%	1806.8	75.7	8.8	8.9	3.0	2.8	2.7	4.2	2.5
75%	2702.1	82.7	8.8	9.0	8.3	5.8	5.4	5.4	5.4
max	3597.5	134.5	8.8	17.4	1950.0	1950.0	390.3	229.7	790.9

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

**Tabla 6**

Estadística descriptiva del pozo 7-JND-39D-BA

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	8057.0	8057.0	8057.0	8057.0	8056.0	8056.0	8056.0	8056.0	8056.0
mean	2017.0	64.2	8.8	8.2	375.6	386.6	7.6	18.7	34.5
std	1163.0	19.6	0.0	1.9	761.0	773.4	17.1	28.5	218.9
min	3.0	10.0	8.8	3.7	0.1	0.1	0.2	4.0	0.2
25%	1010.0	46.8	8.8	8.7	2.1	2.1	2.3	8.9	2.2
50%	2017.0	70.2	8.8	8.9	3.2	3.2	3.3	9.0	3.2
75%	3024.0	77.5	8.8	9.0	7.9	8.1	6.7	9.5	6.7
max	4031.0	127.7	8.8	13.4	1950.0	1950.0	595.2	237.6	1950.0

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

**Tabla 7**

Estadística descriptiva del pozo 7-JND-41D-BA

	DEPTH	GR	BS	HCAL	AHTRX	AHT10	AHT90	AHTD2	AHT30
count	7933.0	7933.0	7933.0	7933.0	7932.0	7932.0	7932.0	7932.0	7932.0
mean	1996.0	68.4	8.8	8.1	359.7	371.4	11.5	26.6	91.6
std	1145.1	20.2	0.0	1.8	747.1	762.1	45.0	36.2	372.6
min	13.0	10.5	8.8	3.9	0.1	0.2	0.6	4.0	0.6
25%	1004.5	52.3	8.8	8.6	2.0	2.0	2.2	8.8	2.1
50%	1996.0	74.5	8.8	8.8	2.9	2.9	3.1	9.0	3.0
75%	2987.5	82.1	8.8	9.0	7.0	7.1	6.3	31.9	6.7
max	3979.0	148.2	8.8	13.6	1950.0	1950.0	1188.6	240.0	1950.0

*Nota.* Tabla generada a partir de lenguaje de programación Python por medio de librería Pandas.

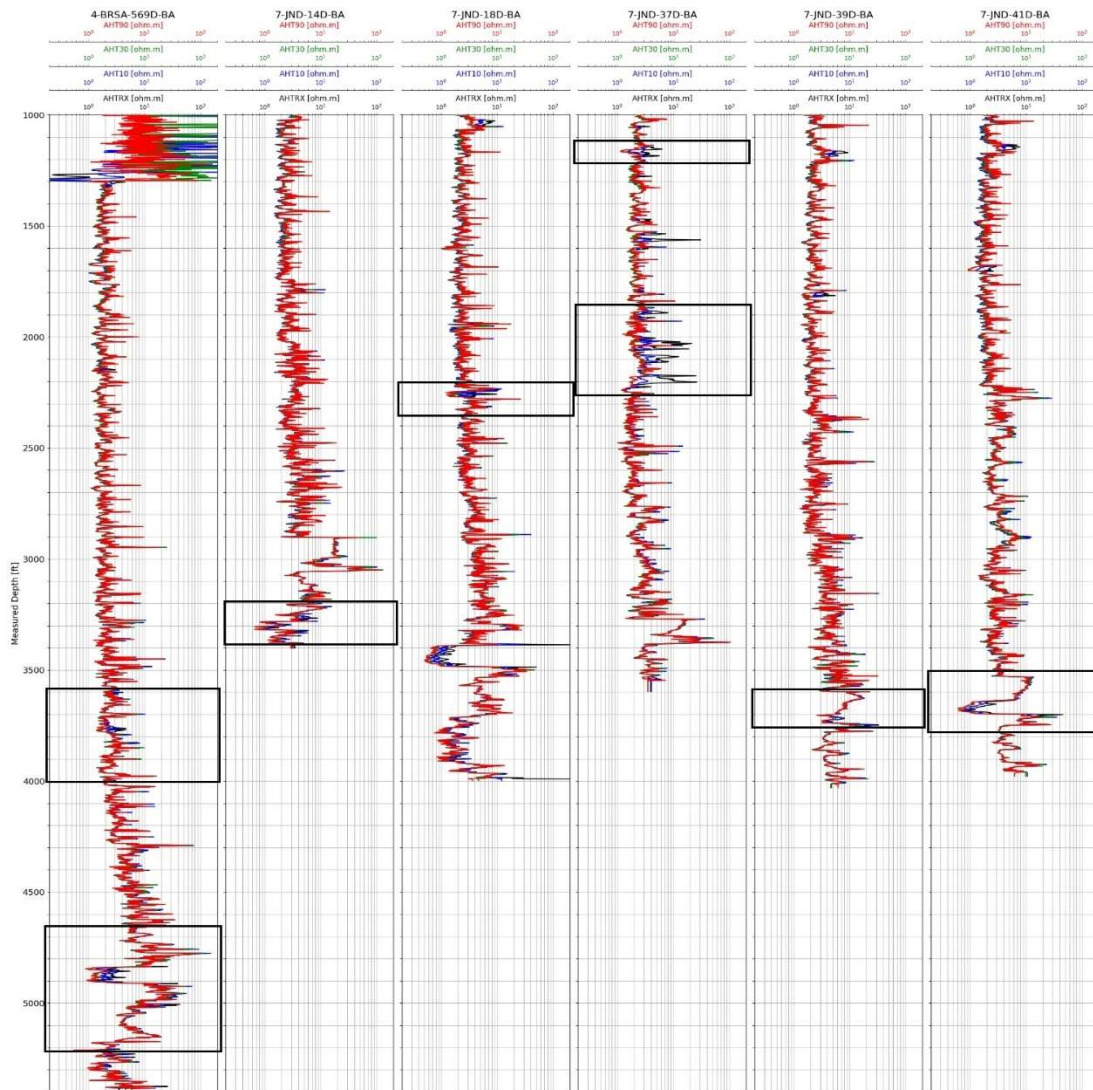
Las Tablas 2-7 se generan por medio del lenguaje de programación Python utilizando la librería Pandas con base en los archivos (.las) obtenidos de la página web de la Agencia Nacional de Petróleo de Brasil y se describen las variables de profundidad, Gamma Ray, Bite Size, caliper, resistividad de la zona lavada, resistividad somera, resistividad profunda, diámetro de invasión (estimada por la compañía de registros) y resistividad media, se tienen la cantidad de datos que se encuentra en el archivo .las por cada variable, la media, desviación estándar, mínimo, percentiles (25%, 50% y 75%) y el máximo valor de cada una de ellas.

### 3.2. Intervalos a Analizar

La Figura 12 muestra el registro de resistividad de los pozos a estudiar.

**Figura 12**

*Curvas de resistividades de los pozos propuestos.*



*Nota.* Gráfica generada por medio del lenguaje de programación Python mediante la librería matplotlib. En recuadro las zonas de interés para la estimación del diámetro de invasión mediante el modelo propuesto.

**Tabla 8**

*Intervalos seleccionados para determinar el diámetro de invasión con el método propuesto.*

Well	4-BRSA-569D-BA	7-JND-14D-BA	7-JND-18D-BA	7-JND-37D-BA	7-JND-39D-BA	7-JND-41D-BA
Depth (ft)	3580 – 4000	3180 – 3380	2200 – 2350	1120 – 1220	3593 – 3770	3506 – 3788
	4660 – 5320			1860 – 2260		

*Nota.* Zonas de interés de los pozos a evaluar para la estimación del diámetro de invasión según el modelo propuesto.

Teniendo en cuenta que debe existir un contraste en las resistividades para obtener un diámetro de invasión válido, se tomarán los intervalos de la

**Tabla 8** para analizar en el modelo propuesto y posteriormente realizar la comparación con base en los diámetros de invasión disponibles.

#### 4. Estimación Diámetro de Invasión Modelo Propuesto

En el modelo propuesto con base en el desarrollado por Akram, se realiza un análisis de sensibilidad sobre las relaciones entre  $\frac{R_{xo}}{R_d} = \frac{AHTRX}{AHT90}$  y  $\frac{R_{xo}}{R_s} = \frac{AHTRX}{AHT10}$  observando que dicho modelo es consistente cuando  $\frac{R_{xo}}{R_s} \geq 1.05$  y  $\frac{R_{xo}}{R_d} > 1$ , para tal caso como se indicó en las ecuaciones (7) y

$$(8) \quad D_i = 7.3 \times 10^{1.3 \times \alpha} \text{ donde } \alpha = \frac{(AHT10 - AHT9)}{(AHTRX - AHT90)}, \text{ de lo contrario } D_i = 0.$$

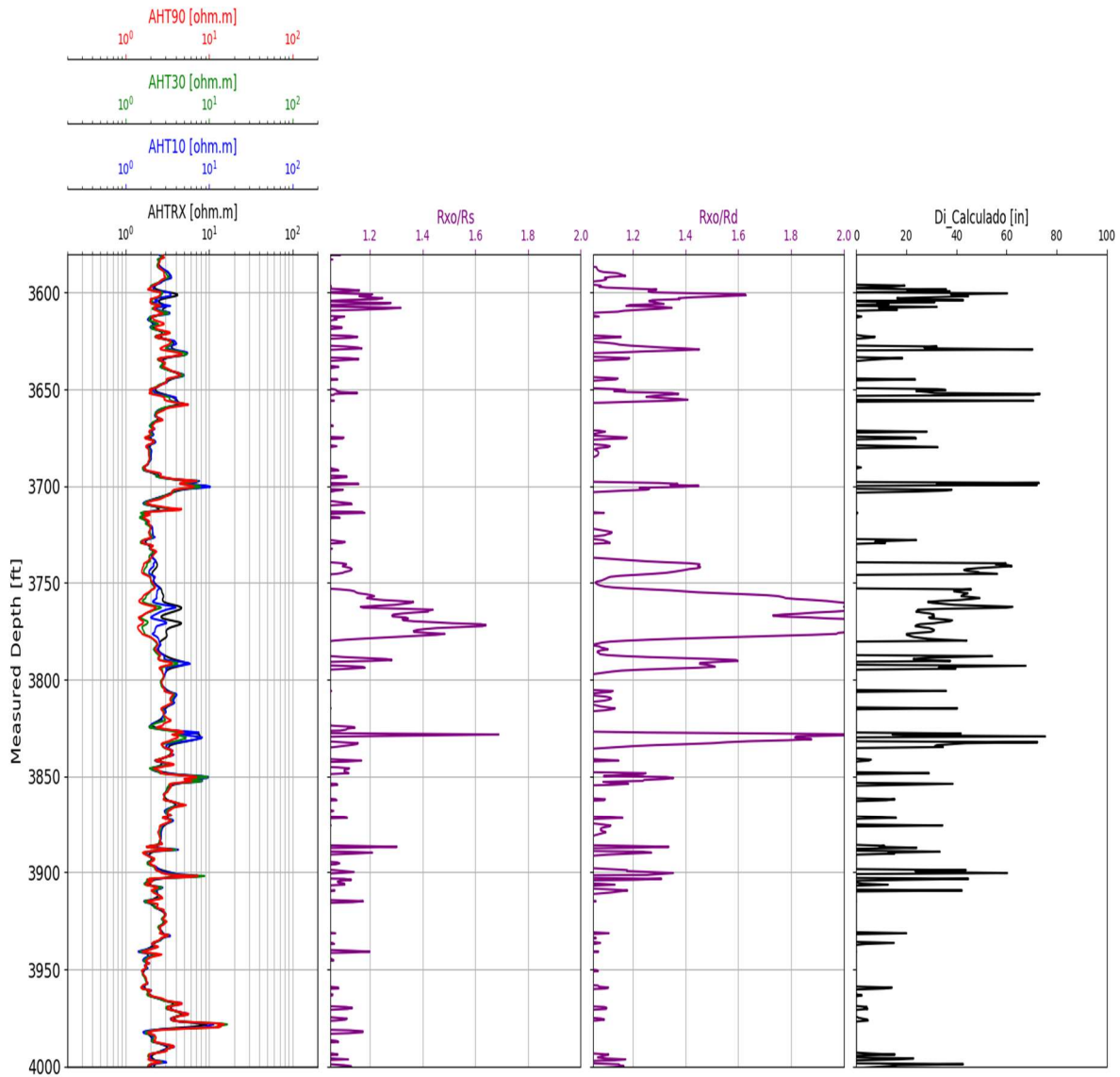
Para el desarrollo de la aplicación se utiliza el lenguaje de programación Python, (<https://www.python.org/>), Python es un lenguaje de programación interpretado, interactivo y orientado a objetos. Incorpora módulos, excepciones, tipos de datos dinámicos de muy alto nivel y clases. Tiene interfaces para muchas bibliotecas y llamadas al sistema, así como para varios sistemas de ventanas, y es extensible en C o C++. También se puede utilizar como lenguaje de extensión para aplicaciones que necesitan una interfaz programable. En la aplicación se utilizan bibliotecas como Numpy, (<https://numpy.org/about/>), (NumPy es un proyecto de código abierto que permite la computación numérica con Python), Pandas (<https://pandas.pydata.org/>), (pandas es una herramienta de manipulación y análisis de datos de código abierto, rápida, potente, flexible y fácil de usar, construido sobre el lenguaje de programación Python), matplotlib, (<https://matplotlib.org/>), (Matplotlib es una biblioteca completa para crear visualizaciones estáticas, animadas e interactivas en Python), Lasio, (<https://pypi.org/project/lasio/>), este es un paquete Python 3.7+ para leer y escribir archivos Log ASCII Standard (.las), utilizados para datos de pozos, como registros geofísicos, geológicos o petrofísicos. Se puede tener acceso al código de la aplicación propuesta a través del link indicado en el Apéndice A.

Para el cálculo de la invasión de diámetro propuesto por Crain se toman en cuenta las ecuaciones (4) y (5) vistas en la sección 2.3.1 Realizando los cálculos del diámetro de invasión por medio del modelo propuesto a los pozos candidatos en los intervalos seleccionados según la

**Tabla 8** se obtienen los resultados indicados en las Figura 13 - 20.

Figura 13

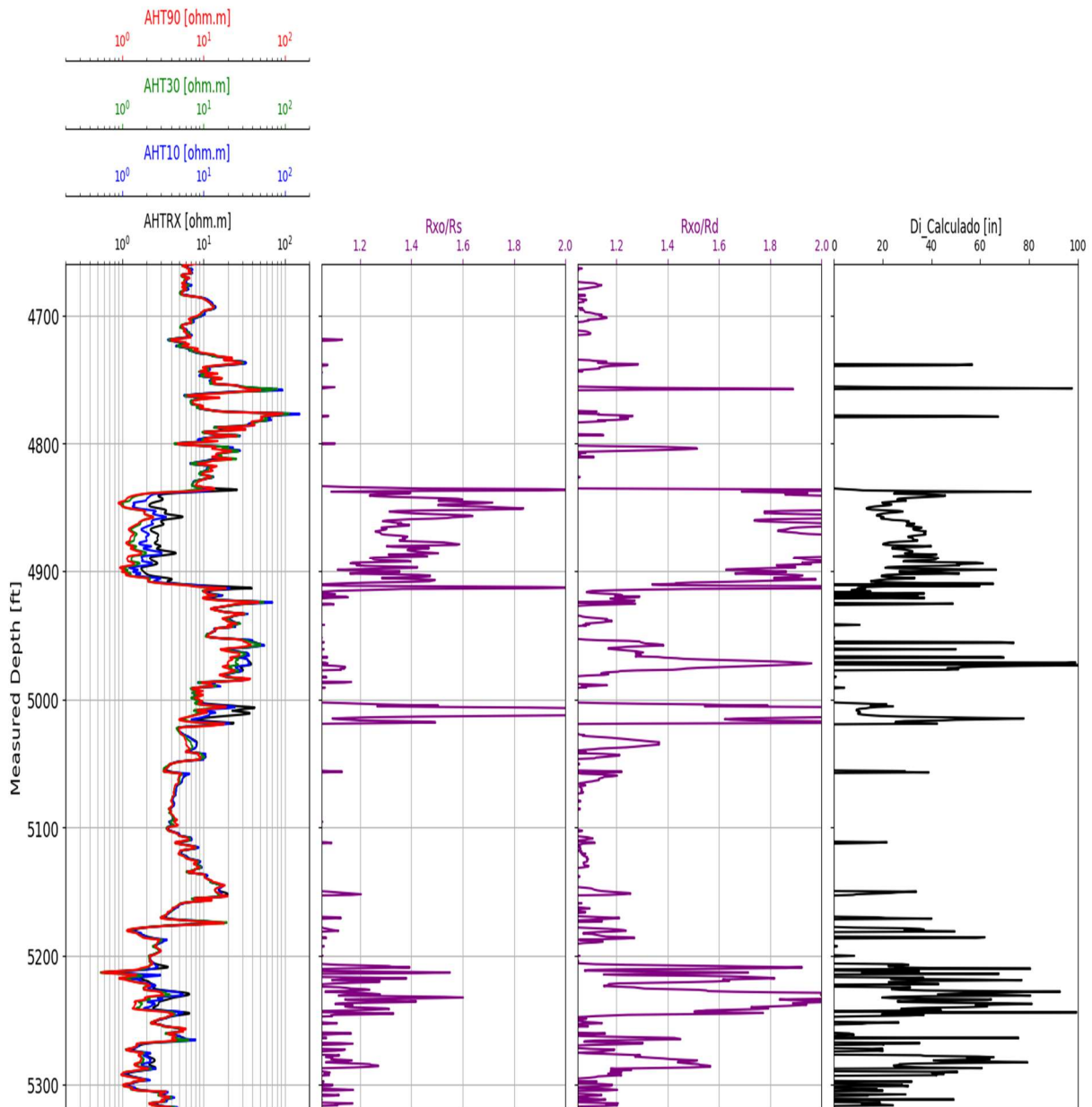
Pozo 4-BRSA-569D-BA (3580-4000)ft.



*Nota.* En el primer *track* se observan las resistividades del pozo en el intervalo estudiado en los siguientes *tracks* el cálculo para determinar el diámetro de invasión mediante el modelo propuesto. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 14

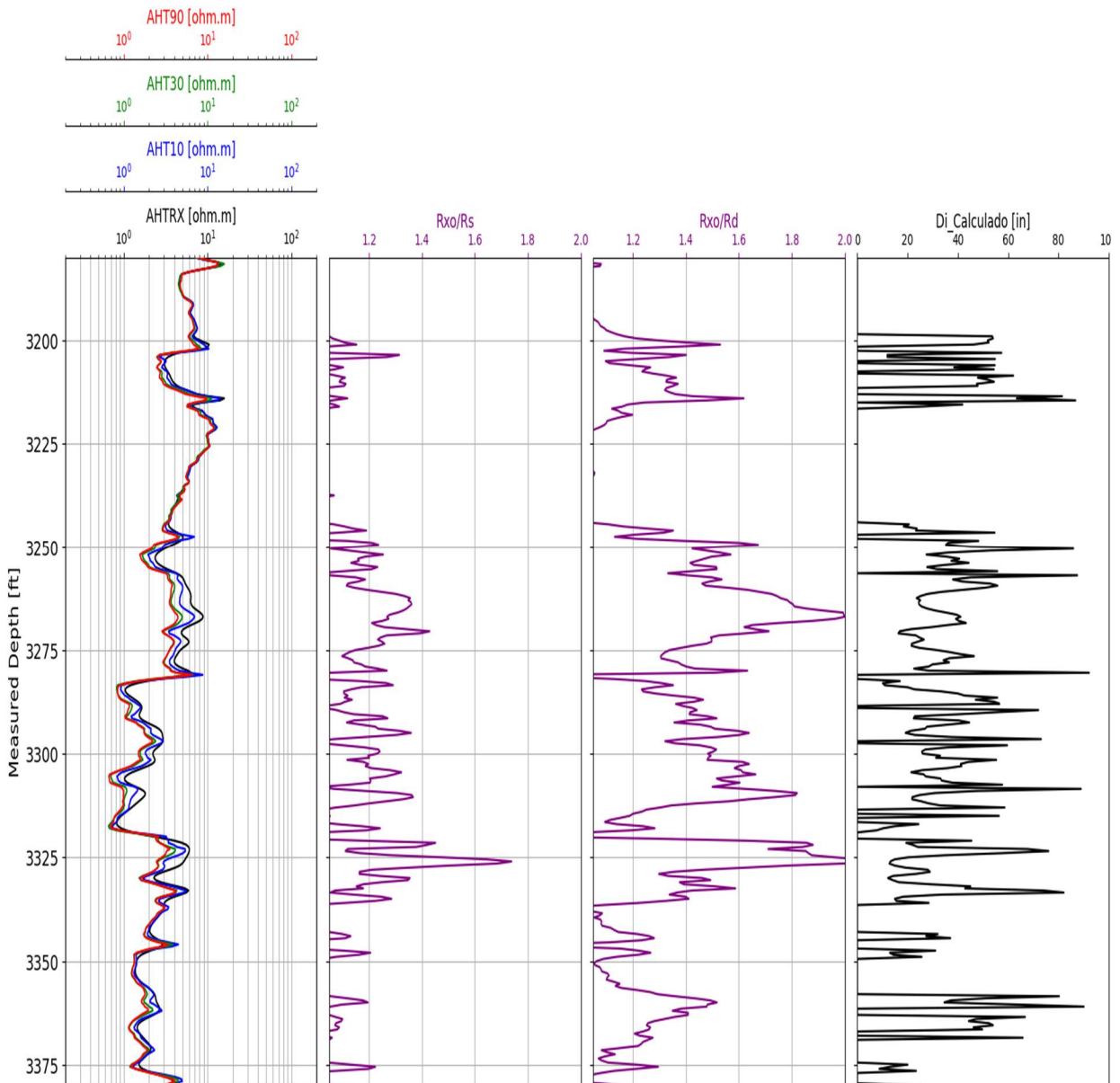
Pozo 4-BRSA-569D-BA (4660-5320)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 15

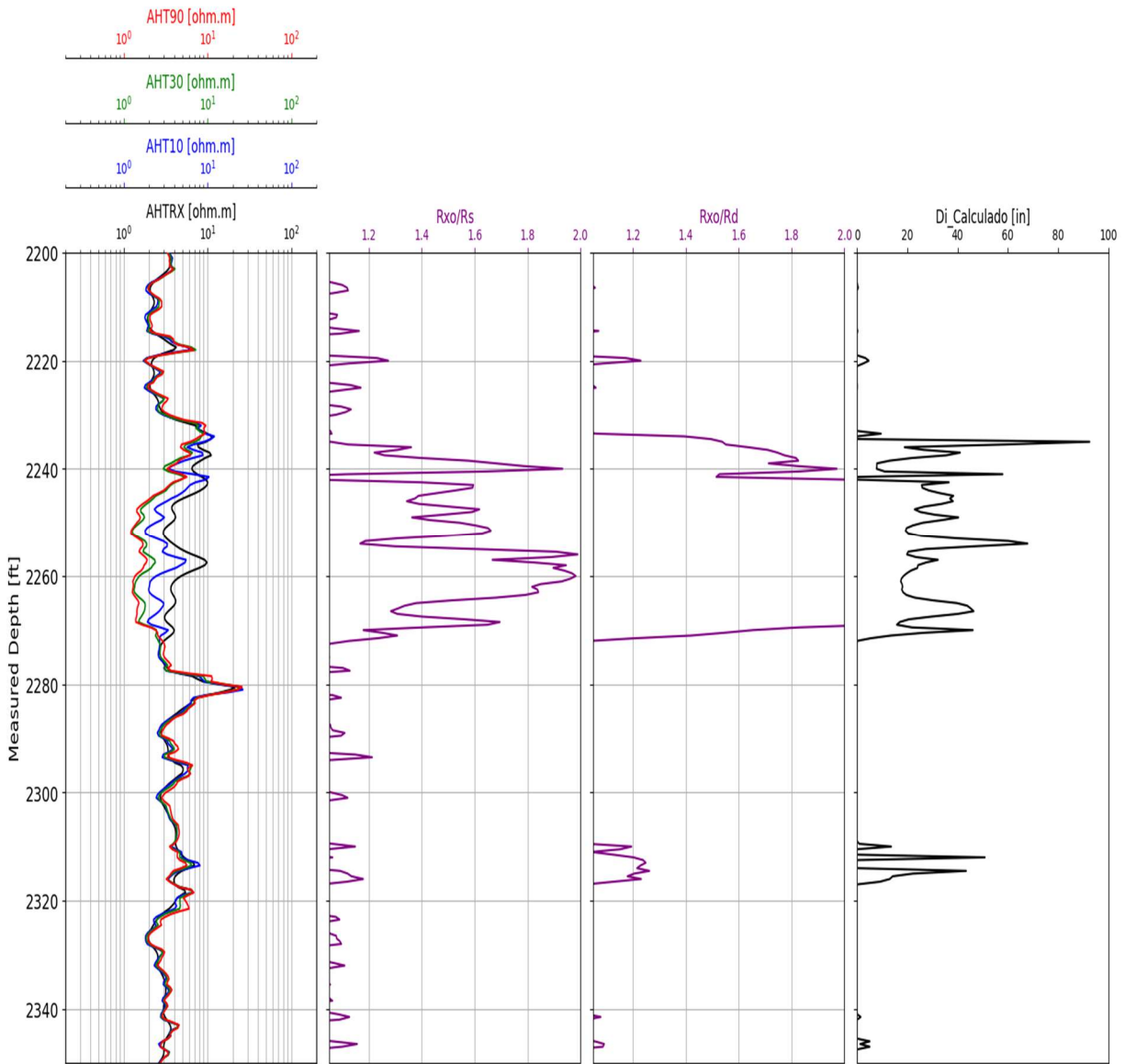
Pozo 7-JND-14D-BA (3180-3380)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 16

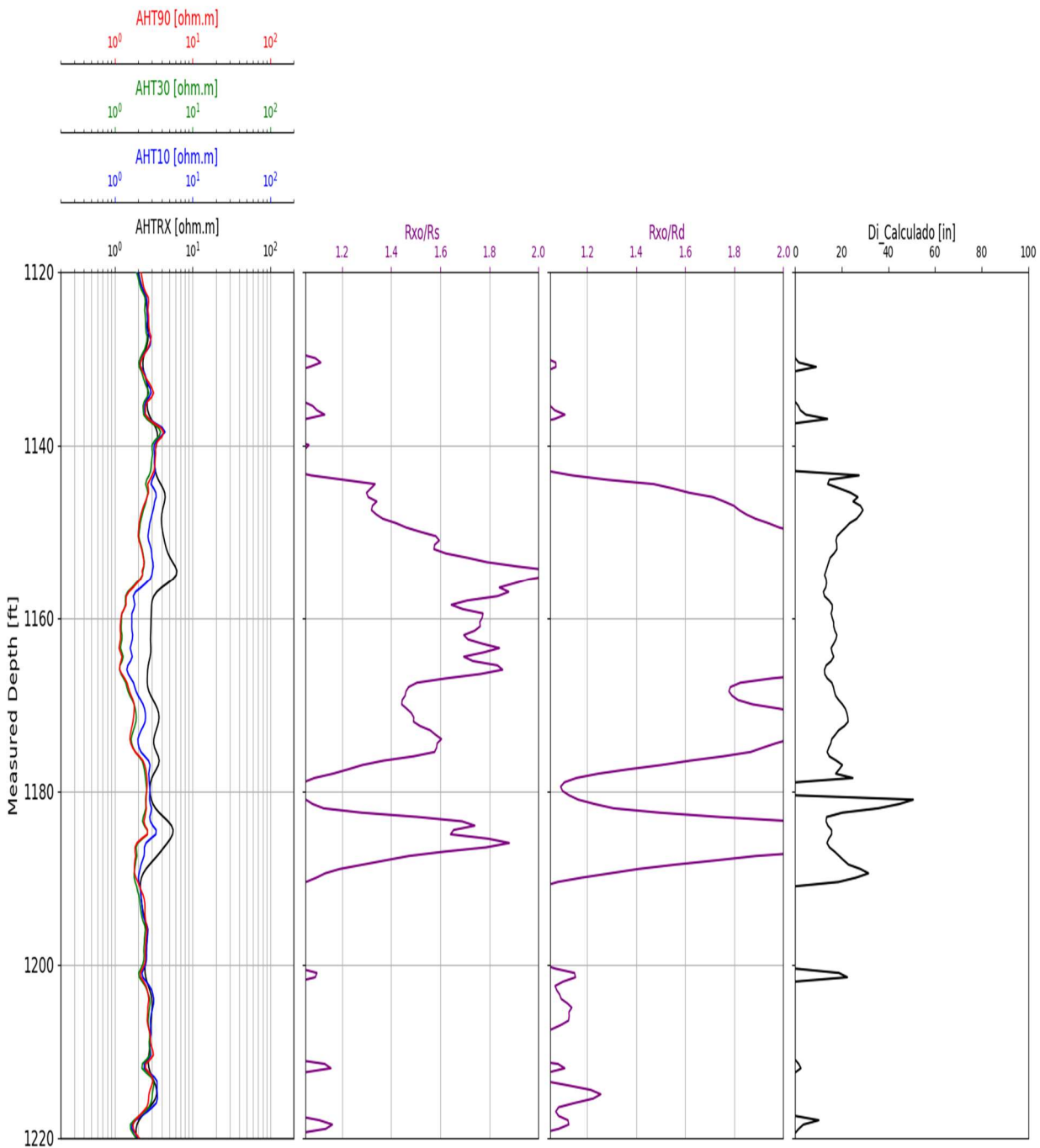
Pozo 7-JND-18D-BA (2200-2350)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 17

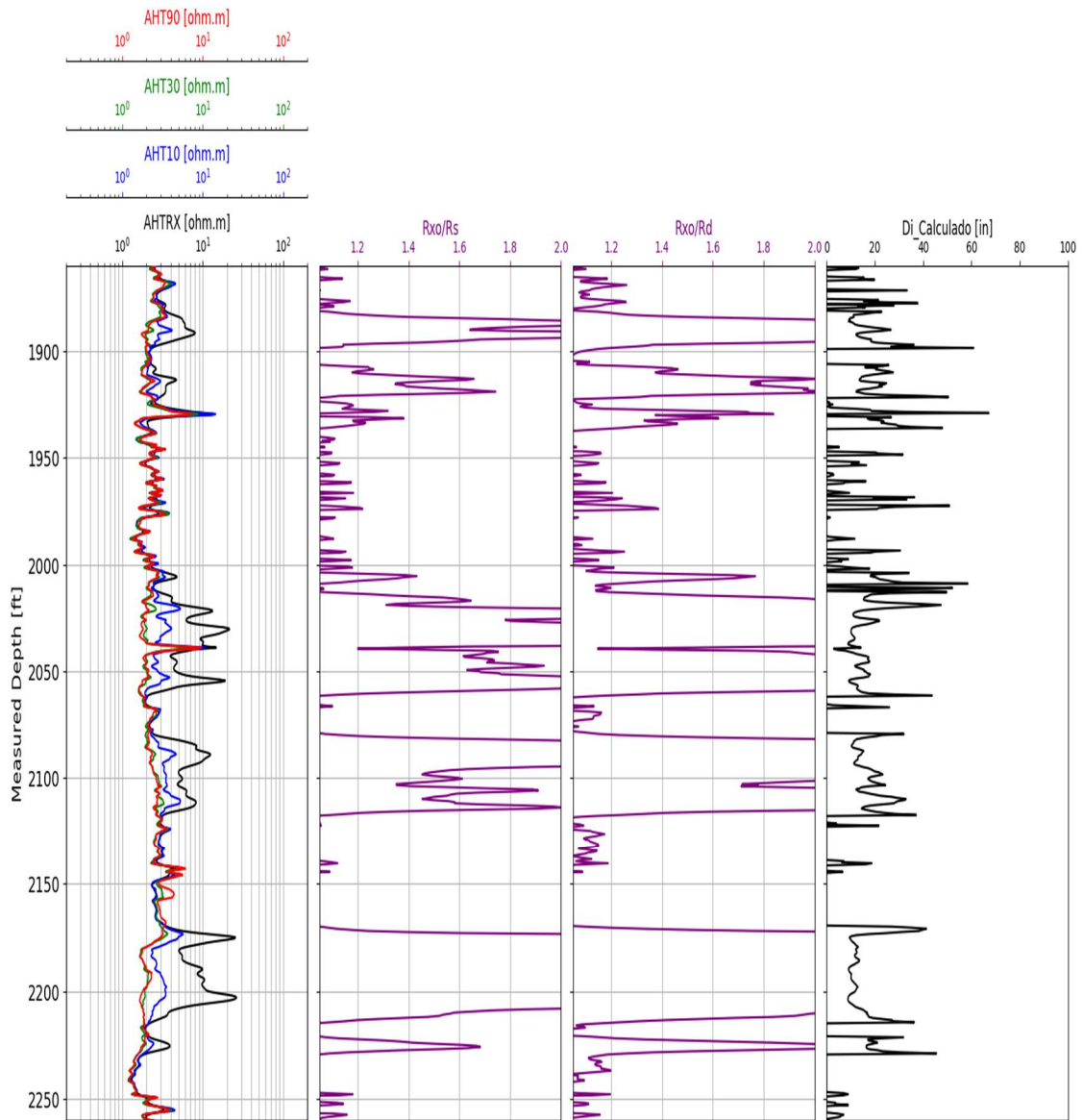
Pozo 7-JND-37D-BA (1120-1220)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 18

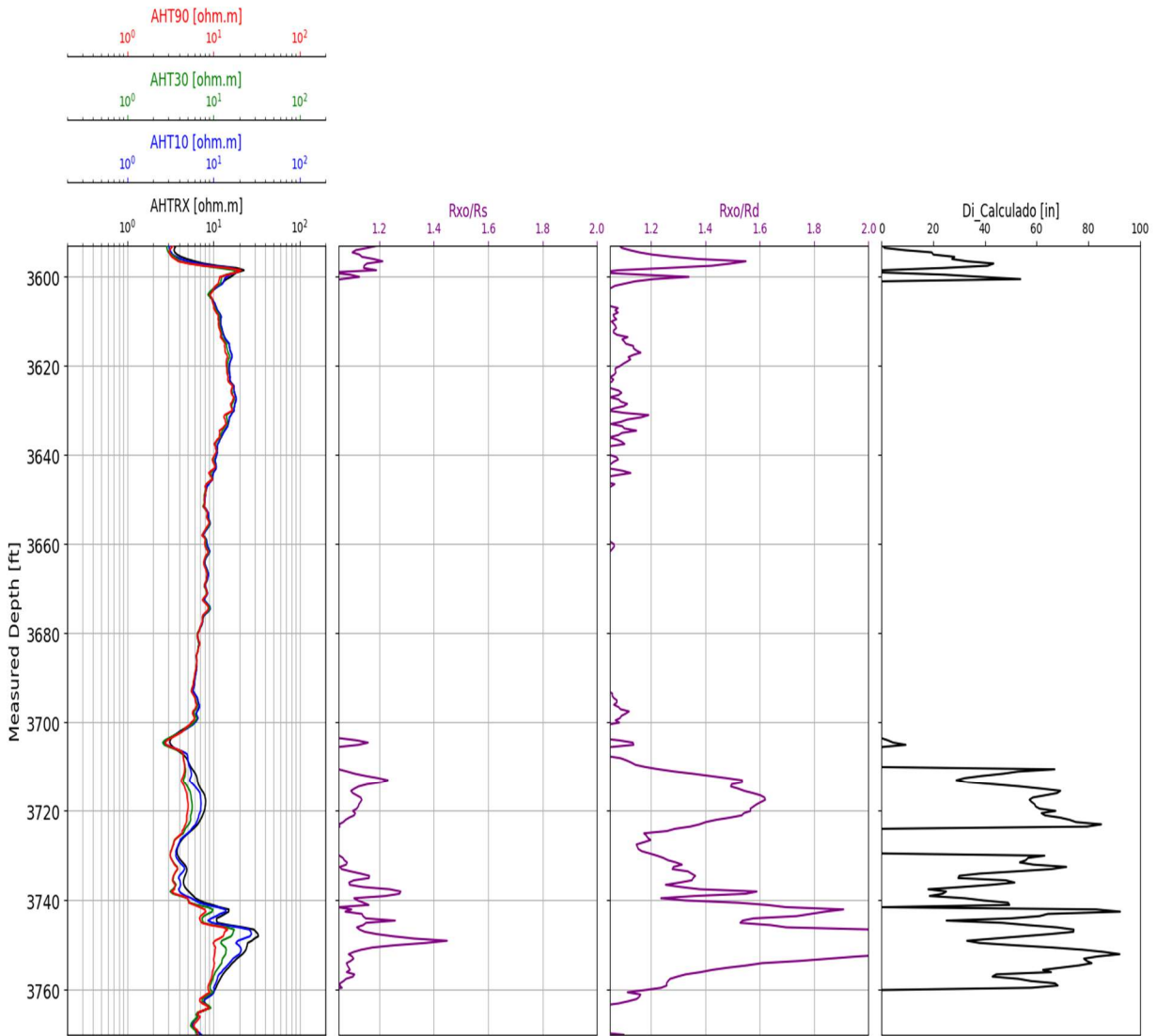
Pozo. 7-JND-37D-BA (1860-2260)ft.



Nota Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 19

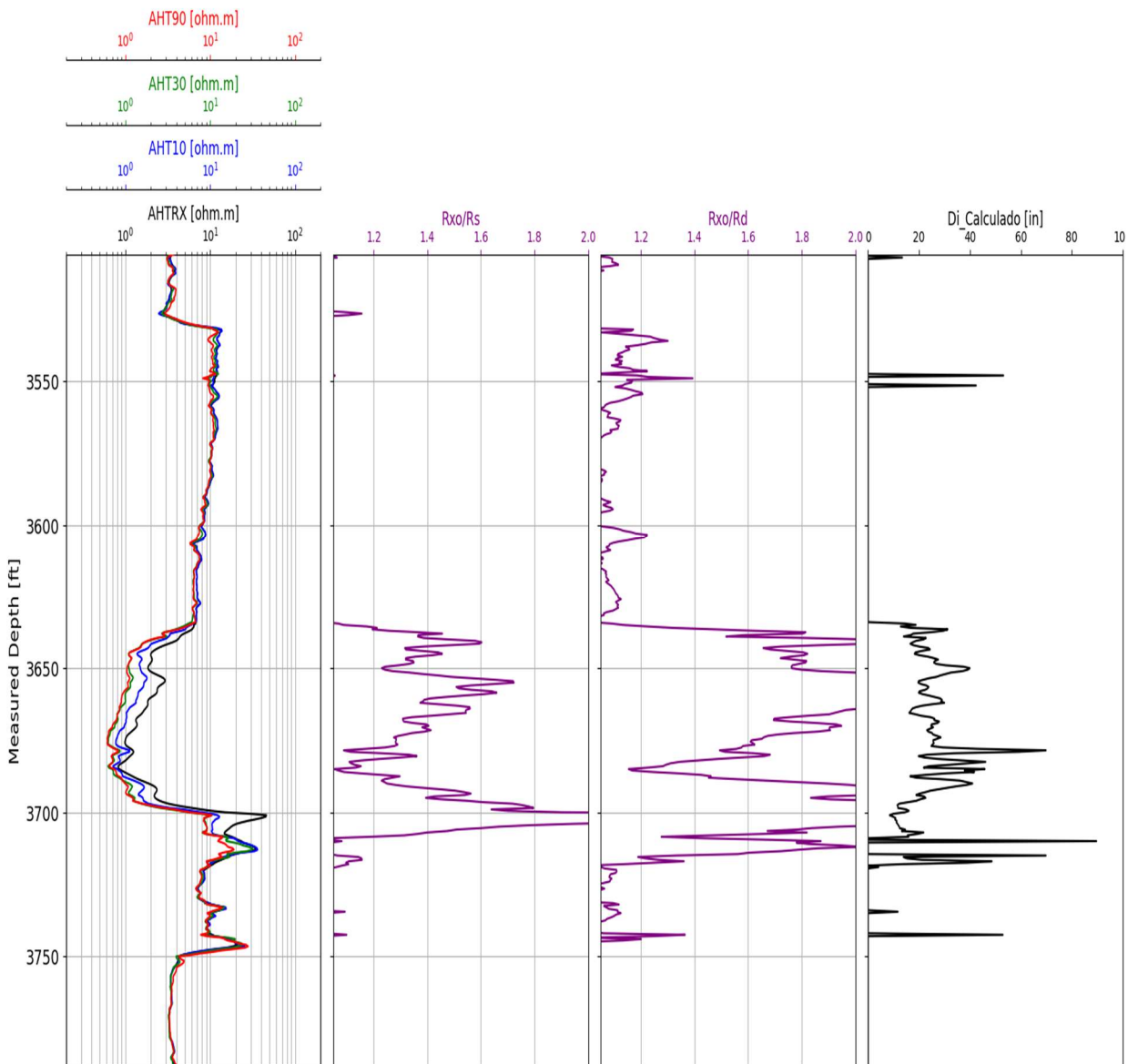
Pozo 7-JND-39D-BA (3593-3770)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 20

Pozo 7-JND-41D-BA (3506-3788)ft.



*Nota.* Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

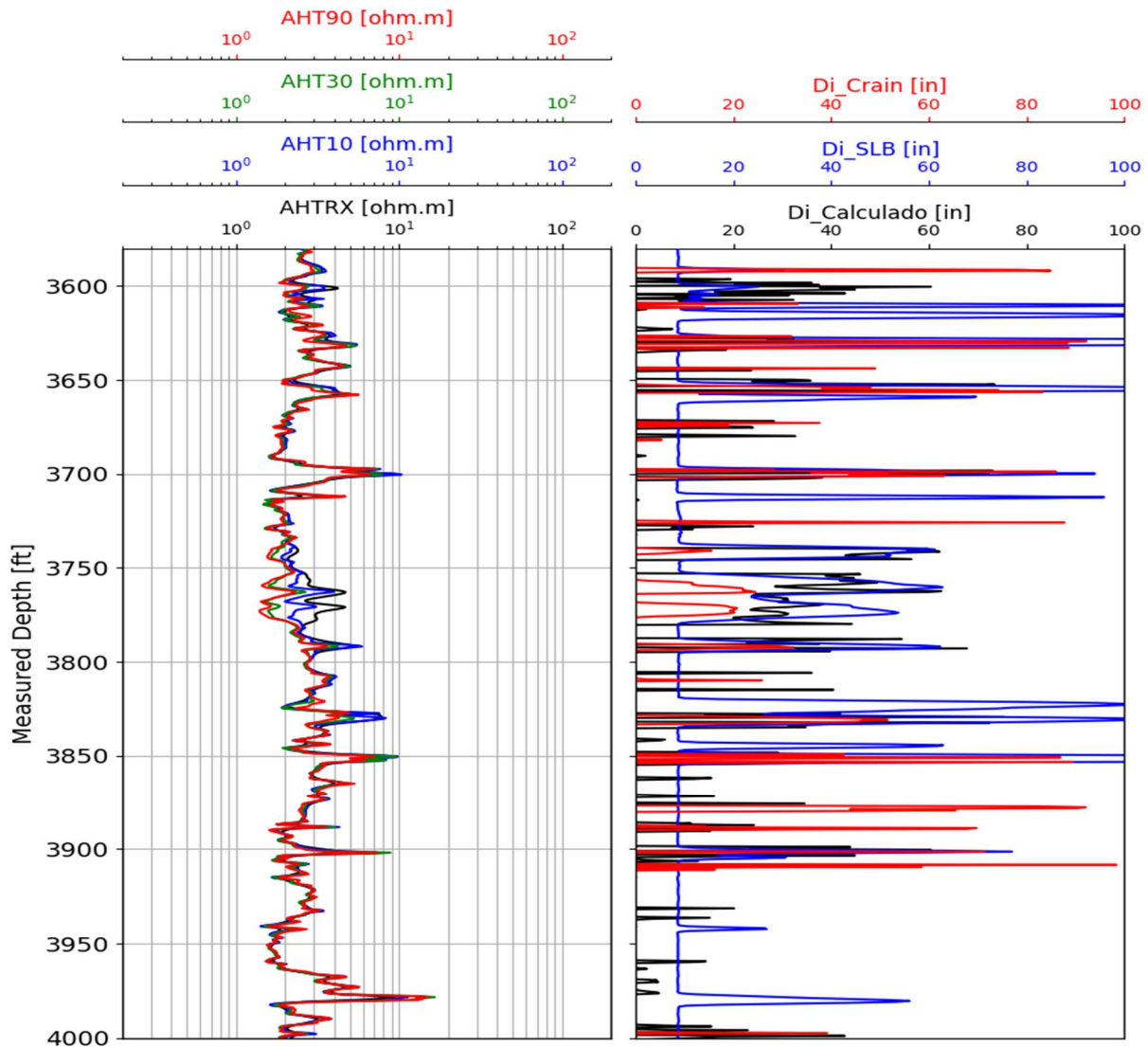
En general en las gráficas se observa que para el modelo propuesto se puede estimar un diámetro de invasión siempre y cuando exista un contraste en las resistividades.

### 5. Análisis y Comparación de Resultados

En las Figura 21 - 28 se presenta la comparación del diámetro de invasión estimado mediante el modelo propuesto ( $Di_{\text{calculado}}$ ) con respecto al modelo propuesto por Crain ( $Di_{\text{crain}}$ ) y al entregado por la compañía de registros ( $Di_{\text{SLB}}$ ), seguido el análisis de estos.

Figura 21

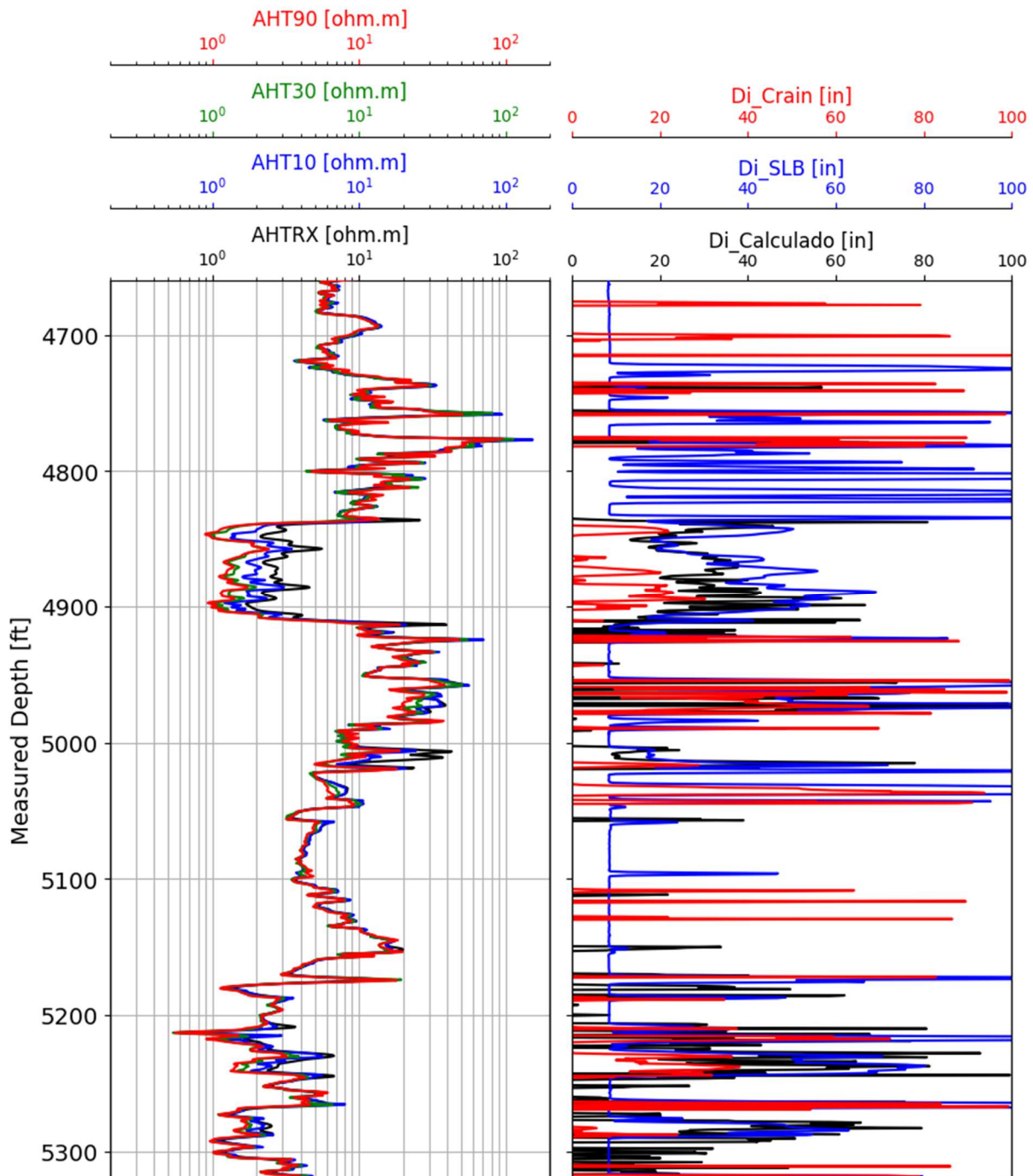
Pozo 4-BRSA-569D-BA (3580-4000)ft.



*Nota.* En el *track* de la izquierda se observa la resistividad del pozo en el intervalo a estudiar y en el *track* a la derecha se observan los diámetros de invasión estimados por el método de Crain (en rojo), por el método propuesto (en negro) y el entregado por la compañía de registros (en azul). Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 22

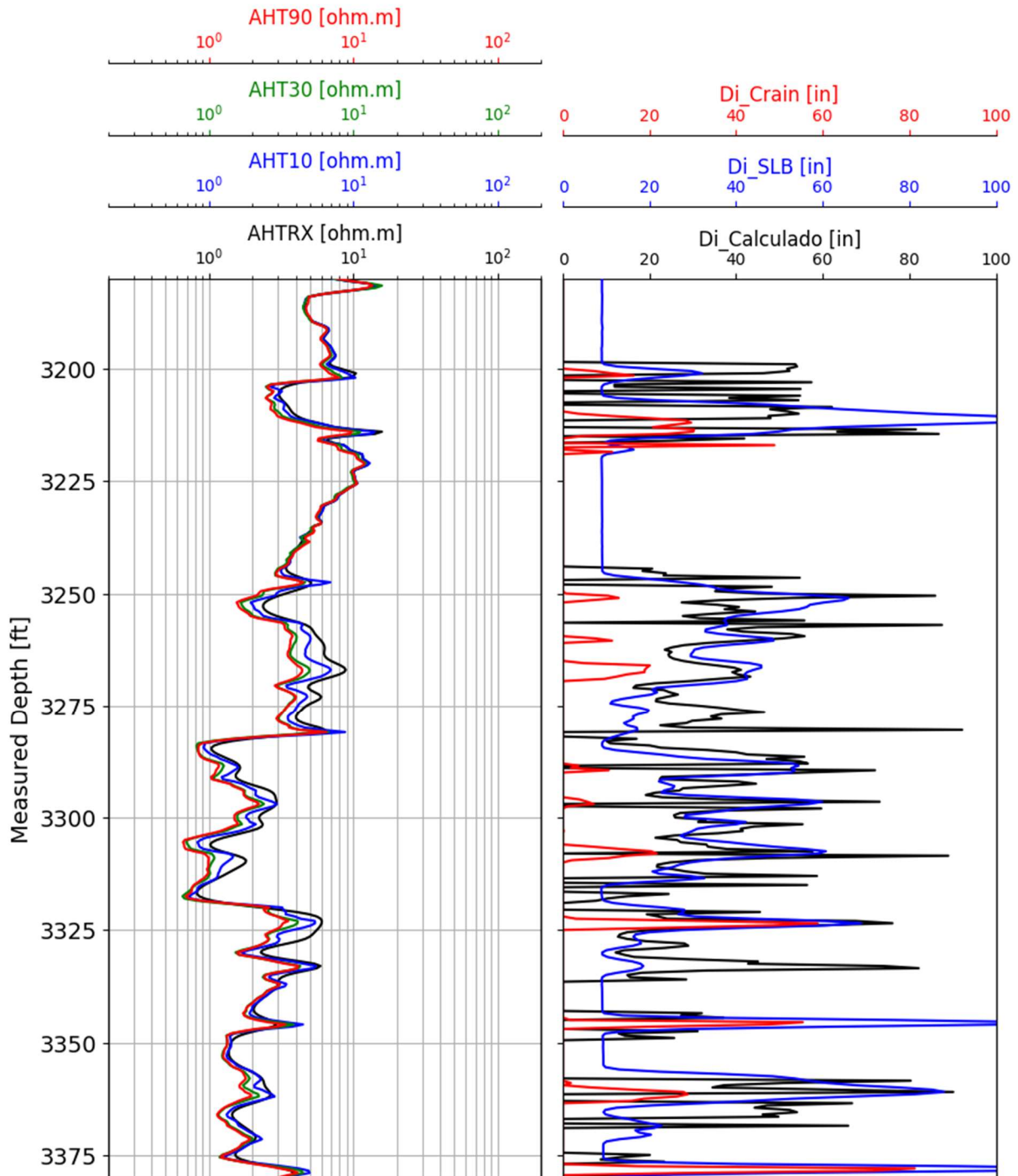
Pozo 4-BRSA-569D-BA (4660-5320)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 23

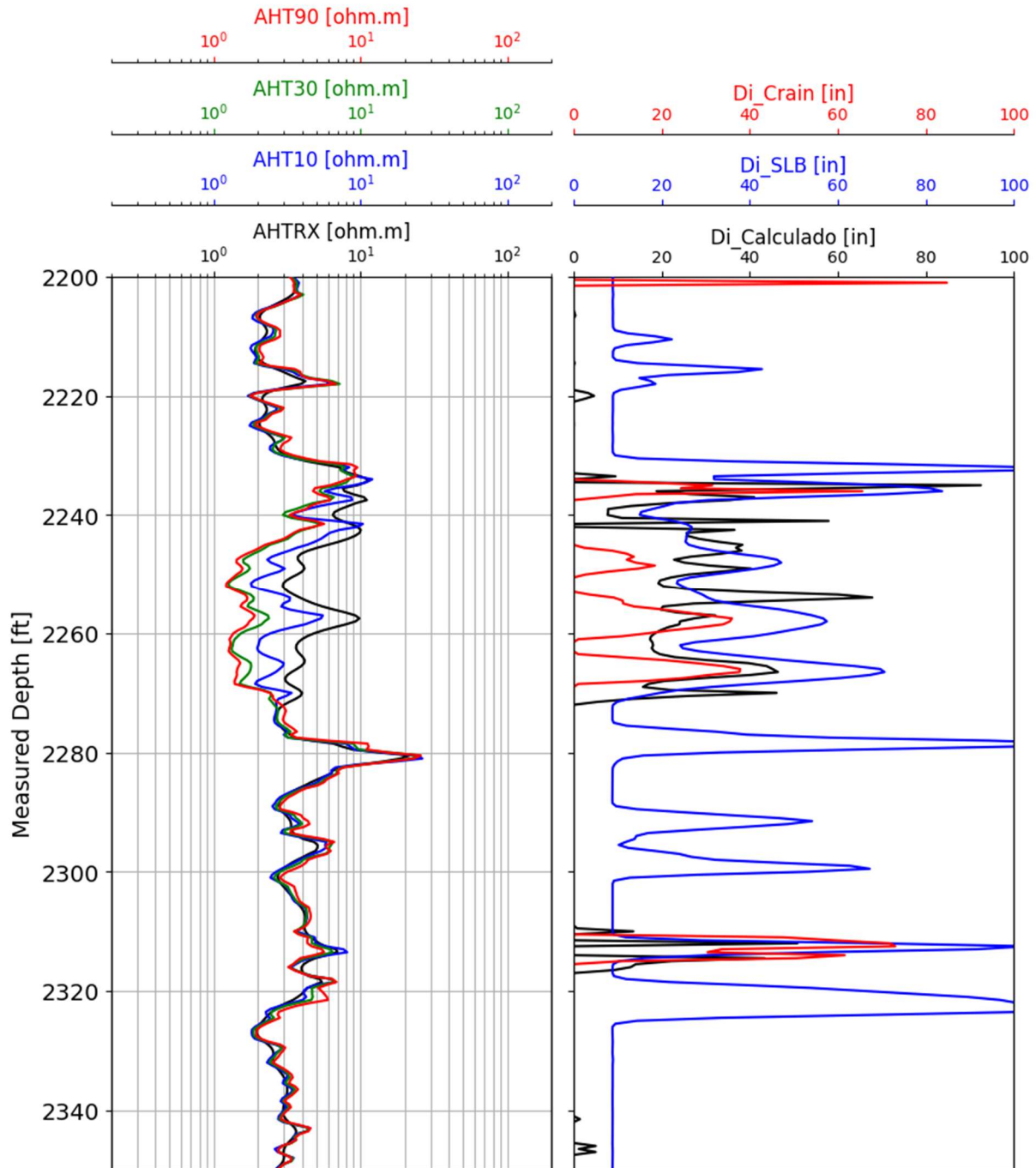
Pozo 7-JND-14D-BA (3180-3380)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 24

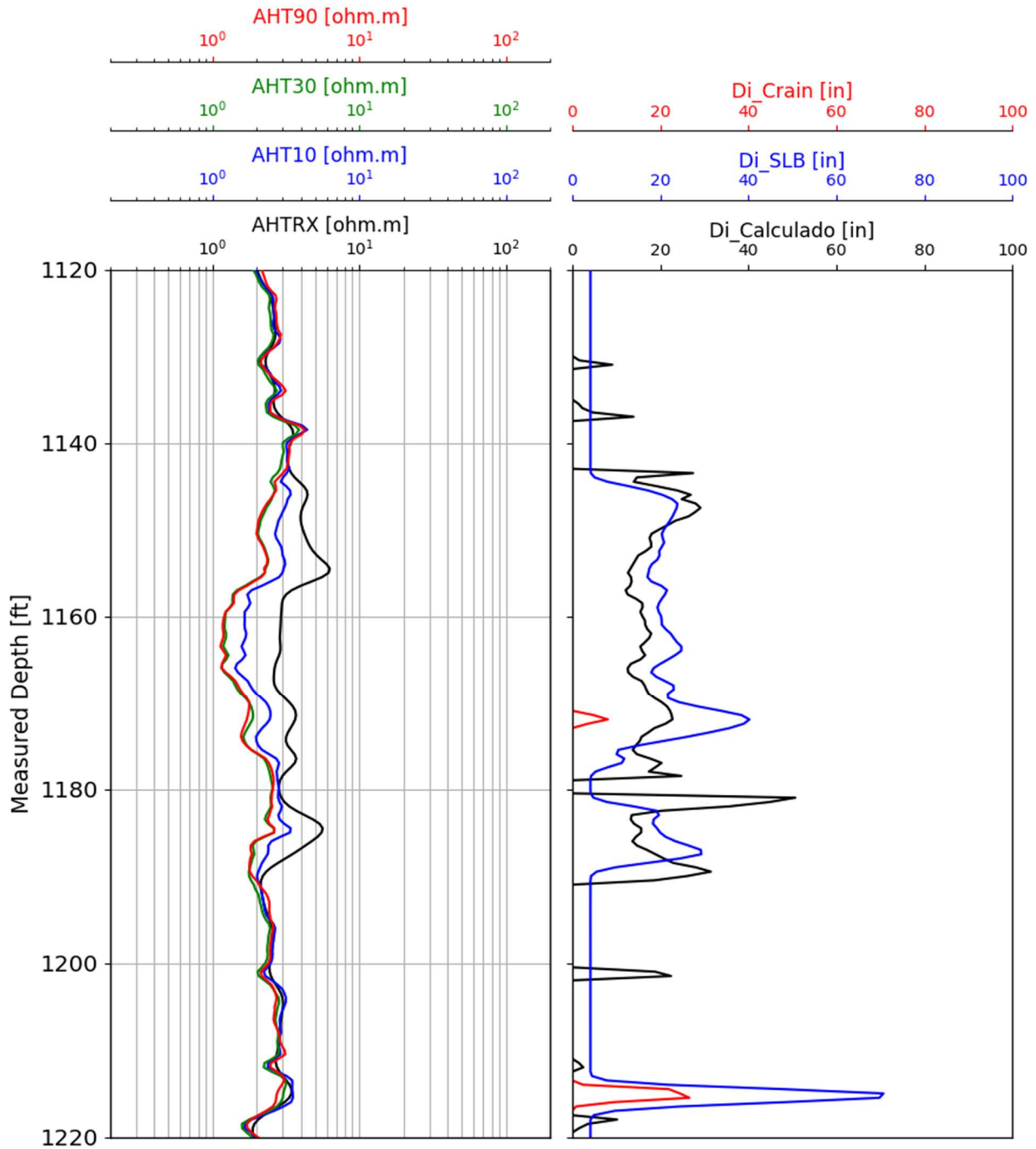
Pozo 7-JND-18D-BA (2200-2350)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 25

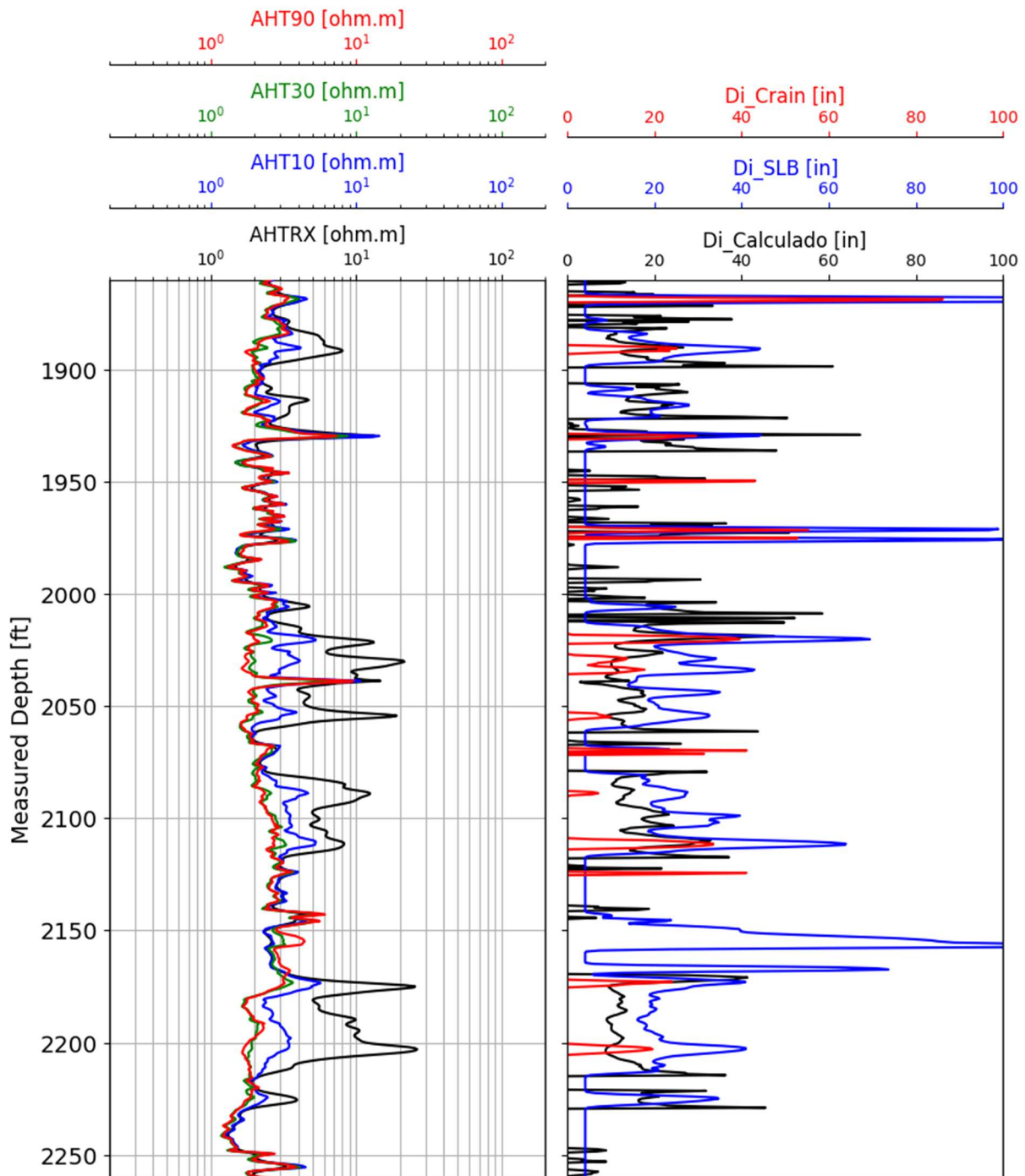
Pozo 7-JND-37D-BA (1120-1220)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 26

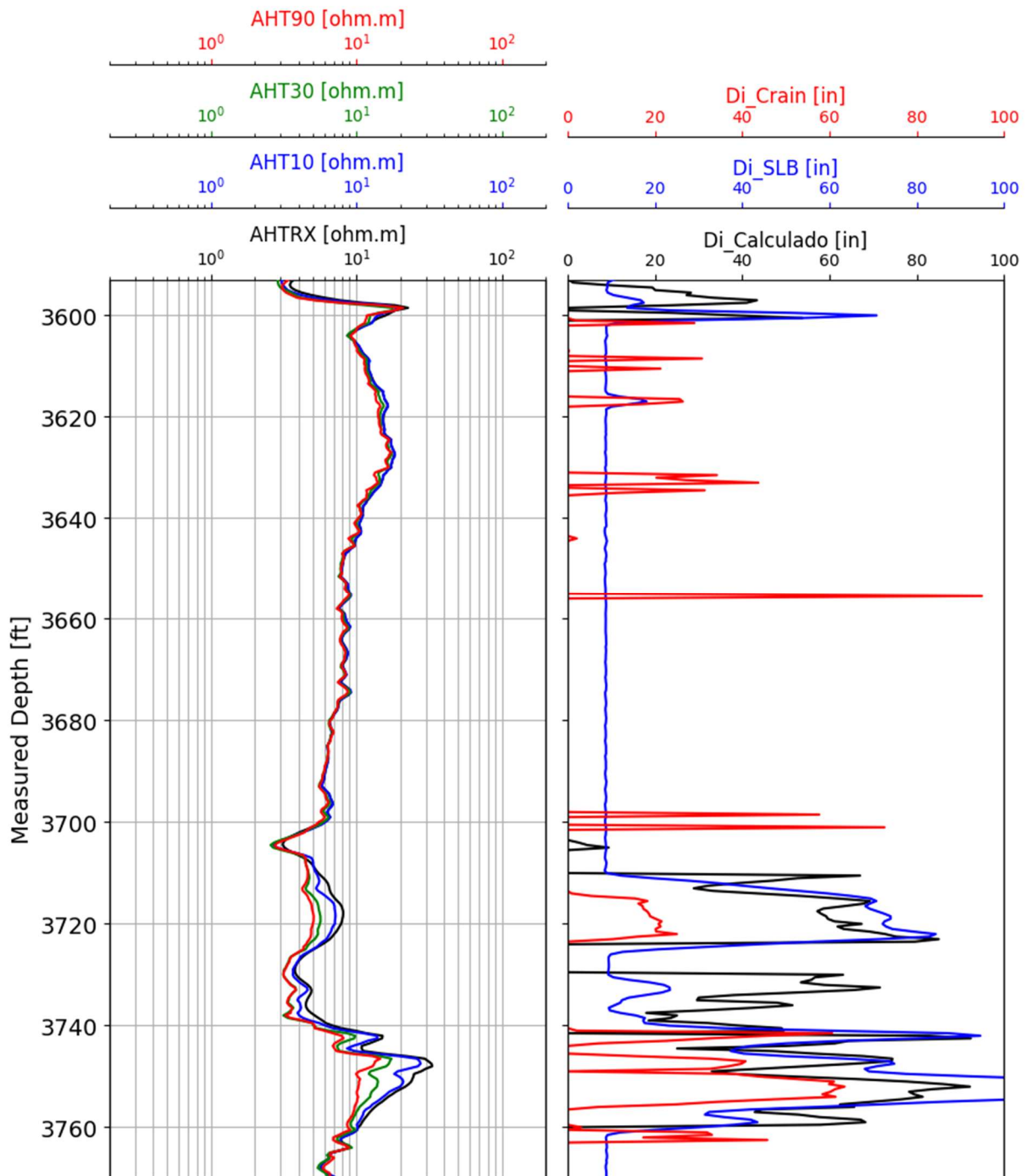
Pozo 7-JND-37D-BA (1860-2260)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 27

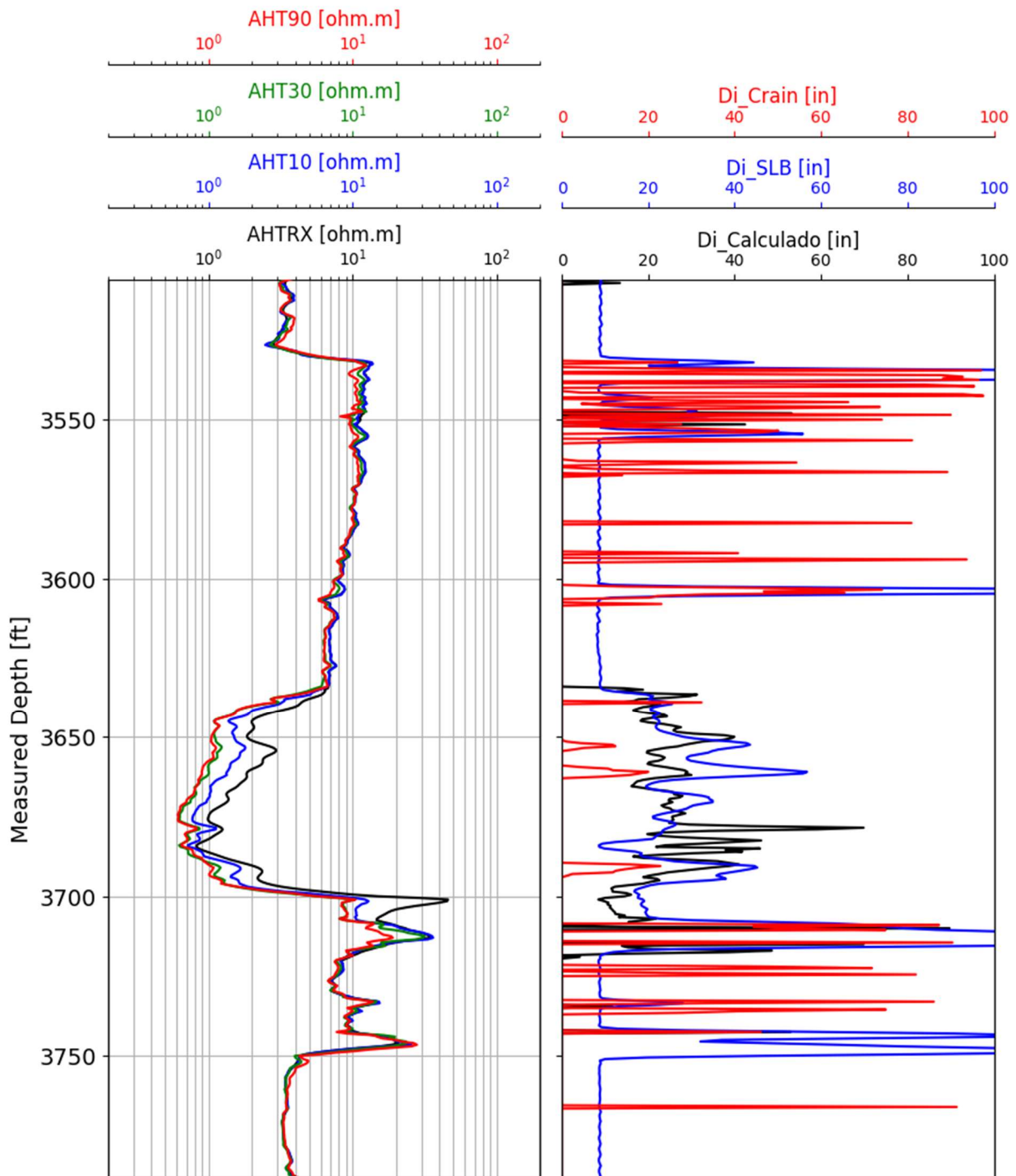
Pozo 7-JND-39D-BA (3593-3770)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

Figura 28

Pozo 7-JND-41D-BA (3506-3788)ft.



Nota. Gráfico generado por medio de lenguaje de programación Python.

En las gráficas se observa que en las zonas donde no hay contraste de resistividades la compañía de registros entrega un diámetro de invasión mínimo ( $D_i_{SLB}[\text{in}]$ ) a partir de parámetros adicionales suministrados por el cliente en locación y de la herramienta utilizada en la operación que no se tienen en cuenta en los modelos empíricos en los cuales el diámetro de invasión no tiene un valor positivo.

El modelo de la compañía de registro muestra mayor estabilidad en el cálculo y en la estimación debido a que toman en cuenta todos los anteriores parámetros.

Con base en los resultados de la estimación del diámetro de invasión suministrados por la compañía de registro se observa que el modelo propuesto es más preciso que el modelo empírico de Crain, lo cual indica que el control de calidad y ecuaciones propuestas funcionan mejor para dicha estimación, debido que en magnitud es mucho más similar en intervalos continuos al de la compañía de registro.

El diámetro de invasión es un indicador cualitativo sobre el control de calidad de los datos esperados en determinados intervalos para ciertas actividades y operaciones en la construcción de modelos petrofísicos más no como un indicador cuantitativo y parámetro del modelo.

### Conclusiones

A partir del modelo de Akram se realizó un análisis de sensibilidad identificando una relación óptima entre las resistividades de la zona lavada y profunda, así como la relación entre las resistividades de la zona lavada y somera, este análisis ha permitido el desarrollo de una aplicación efectiva para la estimación del diámetro de invasión en formaciones de media a alta porosidad a partir de registros de resistividad.

Se ha realizado una exhaustiva documentación del fenómeno de invasión que tiene lugar en el entorno de las formaciones geológicas porosas y permeables. Durante este proceso, se ha establecido que la profundidad de la invasión está influenciada por las características del fluido de lodo de perforación. Sin embargo, se ha observado que esta información no ofrece un método preciso para predecir la profundidad de la invasión. Esta limitación se debe, en gran medida, a la falta de correlación entre las propiedades del lodo medidas en condiciones estáticas de superficie y esas mismas propiedades en condiciones dinámicas de fondo de pozo. A raíz de lo mencionado anteriormente, se han desarrollado métodos para estimar el diámetro de invasión utilizando registros eléctricos de resistividad. En estos métodos, las variables que ejercen influencia son la resistividad profunda, somera y de la zona lavada. A partir de estos modelos, se ha adaptado uno mediante un análisis de sensibilidad para mejorar los resultados obtenidos por los métodos empíricos disponibles en la literatura actual. Se ha logrado exitosamente el desarrollo de una aplicación utilizando el lenguaje de programación Python, la cual integra las variables previamente identificadas a partir de los registros eléctricos resistivos proporcionados por la compañía de registros. Estos fueron obtenidos de la página web de la Agencia Nacional de Petróleo de Brasil. Además, se han empleado librerías auxiliares para visualizar los diámetros de invasión estimados por el modelo propuesto, el modelo empírico y los proporcionados por la compañía de registros.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación implementando la metodología propuesta fueron comparados revelando que el modelo propuesto se aproxima significativamente más a los resultados proporcionados por la compañía de registros que aquellos disponibles en la literatura actual. Por ende, este modelo puede considerarse como una solución eficaz para estimar el diámetro de invasión en casos en que la compañía de registros no lo provea, así como para llevar a cabo un control de calidad de dichos resultados.

### Recomendaciones

Se debe tener en cuenta que el aplicativo solo entrega resultados consistentes cuando hay contrastes en las lecturas de resistividad a distintas profundidades de investigación, cuando no hay esta diferencia en los perfiles el aplicativo como se encuentra desarrollado hasta el momento entrega un diámetro de invasión igual a cero.

Se recomienda tener información precisa sobre las condiciones del pozo para poder definir un diámetro de invasión base tal cual lo hacen las compañías de registro y también poder calcular un diámetro de invasión de referencia cuando no hay contraste o diferencias en las lecturas de resistividad.

Se recomienda utilizar la aplicación únicamente en herramientas de inducción y no *laterologs* dado que la herramienta de *laterolog* debe tener en cuenta detalles más específicos de la configuración y diseño de sus componentes que no se tienen en cuenta en la herramienta de inducción por el principio de su funcionamiento.

**Apéndice A. Link de acceso código de aplicación desarrollada utilizando el método  
propuesto.**

[https://github.com/col43/Di\\_calculado/blob/75fbc0c842ad94582722da15cf944a9e2b754  
2f3/Di\\_Final2.ipynb](https://github.com/col43/Di_calculado/blob/75fbc0c842ad94582722da15cf944a9e2b7542f3/Di_Final2.ipynb)

## Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (2023), *ACESSO GRATUITO AOS DADOS PÚBLICOS TERRESTRES* <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>
- Allen, D., Auzeais, F., Dussan, E., Goode, P., Ramakrishnan, T.S., Schwartz, L., Wilkinson, D., "Invasion Revisited", *Oilfield Review* 1991
- Chen, Shi-Xin. "A Simple Approach to Mud-Invasion Correction for Dual Laterolog Resistivities." Paper presented at the Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, March 1992. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/23962-MS>
- Crain's Petrophysical Handbook, *water saturation environmental corrections for resistivity logs* <https://www.spec2000.net/calculating-water-saturation/water-saturation-environmental-corrections-for-resistivity-logs.htm>
- Halliburton (s.f) *Depth of Investigation and Resistivity Measurements* (p. 1), *Fort Worth Training Center*.
- International Business Machines (1 de diciembre de 2023) ¿Qué es el análisis exploratorio de datos? <https://www.ibm.com/mx-es/topics/exploratory-data-analysis>
- J. Suau et al, "The Dual Laterolog- $R_{xo}$  Tool" SPE paper 4018-MS, October 08 1972.
- Keelan, D.K., and E.H. Koepf. "The Role of Cores and Core Analysis in Evaluation of Formation Damage." *J Pet Technol* 29 (1977): 482–490. doi: <https://doi.org/10.2118/5696-PA>.
- Mohammed, Akram F. "Determination of Invasion Diameter and True Resistivity from the Induction-SFL- $R_{xo}$  Combination." Paper presented at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, March 2015. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/172514-MS>.

Python, <https://www.python.org/>

Ramos-Galarza, Carlos Alberto, Los alcances de una investigación  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7746475>

Serra, Oberto. (2008). *Well Logging Handbook - D.2.1 Resistivity Measurement Principles*. Editions Technip. Retrieved from  
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007TC2LT/well-logging-handbook/resistivity-measurement>

Tiab, & Donaldson, E. C. (2012). *Petrophysics* (3rd ed.). Gulf Professional Pub.

Yao, C. Y, & Holditch, S. A., "Reservoir Permeability Estimation from Time-Lapse Log Data,"  
SPE Paper 25513, Proceedings of the Production Operations Sym. Held in Oklahoma City,  
OK, March 21-23,1993

Yiren FAN, Junchen WU, Fei WU, Cancan ZHOU, Chaoliu LI, A new physical simulation system  
of drilling mud invasion in formation module, *Petroleum Exploration and Development*,  
Volume 44, Issue 1, 2017, Pages 127-131, ISSN 1876-3804,  
[https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30016-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30016-2).