

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física



GENERACIÓN DE UN VOLUMEN DE RESISTIVIDADES EN LA REGIÓN
DELIMITADA POR EL PROYECTO BARINAS - ESTE 07G 3D A PARTIR
DE SONDEOS MAGNETOTELÚRICOS

Trabajo Especial de Grado presentado por
Karen Yobeily Escalona Escalona
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: **Licenciada en Física**

Con la tutoría de: Dr. Pierre Embaid.
Ing. Jimmy Regalado

Octubre - 2015
Caracas - Venezuela.

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física



GENERACIÓN DE UN VOLUMEN DE RESISTIVIDADES EN LA REGIÓN
DELIMITADA POR EL PROYECTO BARINAS - ESTE 07G 3D A PARTIR
DE SONDEOS MAGNETOTELÚRICOS

Trabajo Especial de Grado presentado por
Karen Yobeily Escalona Escalona
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: **Licenciada en Física**

Con la tutoría de: Dr. Pierre Embaid.
Ing. Jimmy Regalado

Octubre- 2015
Caracas - Venezuela.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



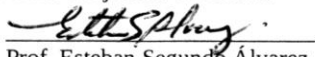
VEREDICTO


Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por **Karen Yobeily Escalona Escalona**, Cédula de Identidad **V-20234747**, bajo el título **“Generación de un Volumen de Resistividades en la región delimitada por el Proyecto Barinas- Éste 07G 3D a partir de Sondeos Magnetotélúricos”**, a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **Licenciada en Física**, dejan constancia de lo siguiente:

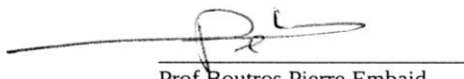
1. Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día 26 de octubre de 2015, a las 9:00 am, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de Seminarios Guillermo Ruggeri de la Escuela de Física, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado; todo ello conforme a los artículos 20, 21, 22, 25, 26 y 28 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente.
2. Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió declararlo aprobado por considerar que se ajusta a lo dispuesto y exigido en la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente en sus artículos 1, 5 y 6.

Se levanta la presente acta a los 26 días del mes de octubre de 2015, dejándose también constancia de que, conforme a la normativa jurídica vigente, actuó como coordinador del jurado el tutor del Trabajo Especial de Grado Prof Boutros Pierre Embaid Embaid.

Firma del jurado evaluador


Prof. Esteban Segundo Álvarez
V-9525744
UCV


Profa. Nuri Janil Hurtado
Villasana
V-6180156
UCV


Prof Boutros Pierre Embaid
Embaid
V-12162811
UCV



Facultad de Ciencias
Universidad Central de Venezuela
Consejo de la Escuela de Física

Estimados miembros del Consejo de Escuela

Reciban un cordial saludo. Conforme a lo establecido en el artículo 13 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV" les remitimos tres ejemplares de la monografía de TEG de la estudiante Karen Escalona, CI: 20.234.747, titulado: **GENERACIÓN DE UN VOLUMEN DE RESISTIVIDADES EN LA REGIÓN DELIMITADA POR EL PROYECTO BARINAS - ESTE 07G 3D A PARTIR DE SONDEOS MAGNETOTELÚRICOS**, los cuales hemos revisado y consideramos listos para la evaluación por parte de un jurado.

Agradeciendo la consideración que sirvan prestar a la presente, nos despedimos atentamente,

Dr. Pierre Embaid
12.162.811
Tutor
UCV

Ing. Jimmy Regalado
12.912.398
Tutor
PDVSA

DEDICATORIA

A Dios, a mi madre, a mi abuela y demás familiares...

14 de Octubre de 2015.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios. A mis tres madres: al ser que me dio la **vida María Escalona**, a mi segunda madre (**La Abuela Margarita**), y a mi tercera madre (**Mi tía Mariluz**), las cuales siempre me han guiado, educado, ayudado y sus regaños necesarios de vez en cuando, asimismo a papá **Juan Torres** por sus consejos, apoyo y guía. A mi padrino **Robert Torres** por siempre estar pendiente de mí, ayudarme desde pequeña a salir hacia adelante, además de sus consejos y cariño, A mi prima **Gemma Torres** por ser una hermana mayor que siempre me ha escuchado y apoyado en los desmayos y momentos mas difíciles de la carrera, a mi otro hermano **Pedro Martín** con el que compartí toda mi infancia y quien a pesar de la distancia siempre ha estado allí cuando más lo necesito, a todos mis otros primos **Gabriela, Johanna, Pablo, Lali**.

A mi Tía **Miguelina Escalona** quien hoy no está con nosotros físicamente pero que nos enseñó y dejó su ejemplo de perseverancia, ese enorme espíritu de lucha incansable que la caracterizaba, levantando siempre la frente en alto para ir siempre hacia adelante y no caer, a pesar de los obstáculos, y que vive en todos nuestros corazones, transmitiéndonos su fuerza para no caer en las dificultades. **Gracias Familia, LOS AMO...**

A mi Tutor **Pierre Embaid**, no sólo por su enorme vocación de enseñanza sino también por esa palmada en la espalda y palabras de ánimo que todo estudiante necesita cuando cree que su tesis será infinita. A mi tutor **Jimmy Regalado** por todo su acompañamiento y enseñanzas a lo largo de esta investigación, al **Ing. Manuel Medina** por toda su asesoría, paciencia y disposición. A todos aquellos profesores que han contribuido a lo largo de todos estos años en mi formación académica, en especial a la Profesora **Nuri Hurtado** por estar allí siempre no sólo en el aula de clase sino por su calidad humana y disposición para la enseñanza en todo momento, también al **Prof. Pio Arias**.

A **Ronald Tovar** por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos, escucharme, apoyarme cuando más lo necesito.

A **Katherine Joachimi** por ser mi compañera de estudio y amiga, calarse mis lloraderas y estrés en especial en Cuántica I, por ayudarme y darme fuerzas siempre.

RESUMEN

En este trabajo se procesaron las medidas de 486 estaciones magnetotelúricas (MT) ubicadas en la región delimitada por el proyecto BARINAS-ESTE 7G 3D (Cuenca Barinas - Apure). Utilizando la rutina de Bostick se determinó la distribución de resistividades del subsuelo. A partir de estas distribuciones se generó un modelo tridimensional de resistividad mediante la utilización del software GOCAD. Este volumen de resistividad fue validado con registros de dos pozos exploratorios, y luego integrado con la información de un volumen de densidades calculado a partir de medidas gravimétricas disponibles en la zona de estudio. De los datos de resistividad inferidos por las medidas MT y registros de pozo, se puede evidenciar una correspondencia de las anomalías resistivas en los intervalos de interés, lo cual constituye un aporte a la exploración y producción de yacimientos, en cuanto a la localización de anomalías de resistividad asociadas a hidrocarburos, ya que se podría disminuir los costos de inversión en la perforación de nuevos pozos exploratorios que en sí, son muy costosos comparados con el sondeo MT, además de garantizar una mayor eficiencia en la planificación de la futura extracción de dichos yacimientos.

Índice General

INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I	14
1.1 – Ubicación de la zona de estudio	15
1.2 – Consideraciones geológicas.....	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 – Método Magnetotelúrico.....	17
2.2 – Fenomenología Física.....	17
2.3 – Corriente o Intensidad Eléctrica.....	20
2.4 – Ley de Faraday	21
2.5 – Ley de Lenz.....	21
2.6 – Conductividad Eléctrica	21
2.7 – Resistividad Eléctrica.....	21
2.8 – Resistividad de las rocas.....	21
2.9 – Registro Geofísico.....	23
2.10 – Fundamento teóricos del Método Magnetotelúrico.....	24
2.11 – Software Imagen	29
2.12– Transformada de Bostick.....	29
2.13 – Software GOCAD.....	31
2.14 - Definiciones importantes acerca del Software GOCAD	32
2.15 – Voxet	32
2.16 – Secciones de un voxet	32
2.17 – Propiedades de un voxet.....	32
2.18 – Points Set.....	33
2.19 - Kriging.....	33

2.20 – Kriging Simple.....	35
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	36
3.1 – Método Magnetotelúrico	38
3.2 – Adquisición.....	38
3.3 – Flujo de trabajo a partir de los datos MT.....	43
3.4 – Ejecución de la fase I.....	43
3.5 – Ejecución de la fase II.....	46
3.6 – Ejecución de la fase III	49
3.7 – Método Gravimétrico.....	50
3.8 – Volumen de Resistividades a partir de Sondeos MT.....	53
3.9 – Integración MT, Gravimetría y registros de pozo.....	56
CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	54
4.1 – Estimación de resistividades.....	55
4.2 – Volumen de Resistividades MT.....	56
4.3 – Validación del modelo de resistividades obtenido por MT.....	56
4.4 – Identificación de anomalías significativas mediante el volumen MT.....	60
4.5 – Integración de datos MT con registros de pozo.....	63
4.6 – Volumen de Densidades.....	75
4.7 - Integración de Datos MT, Registros de pozo y gravimetría.....	78
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	79

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

El Método Magnetotelúrico (MT) en la exploración del subsuelo se remonta a los años 50, cuando se reportó por primera vez la medición de variaciones en los campos electromagnéticos originados en la ionosfera con el fin de inferir la impedancia característica en función de la profundidad, en un trabajo realizado por Louis Cagniard [1], posteriormente aparecen trabajos como los desarrollados por Vozzof [2] donde se presenta de manera detallada las ecuaciones de estimación de resistividades en el subsuelo. Estos trabajos previos utilizan el dominio de la frecuencia, el cual es difícil de interpretar e integrar con otros métodos geofísicos cuyo dominio es la profundidad, es por ello que S. Goldberg e Y. Rotstein [3] plantearon en 1972 una nueva forma de presentación de los datos aplicando un algoritmo denominado transformación de Bostick, la cual permite realizar un cambio de dominio.

Sin embargo para ese entonces MT no logra tener el impacto deseado en la industria, y no cobra importancia sino hasta los últimos 15 años cuando el conocimiento ha crecido y el financiamiento de la investigación y desarrollo ha aportado las técnicas de inversión e integración electromagnéticas (EM), además de avances producidos en la instrumentación, haciendo que el verdadero valor de estos métodos haya comenzado a realizarse [4], permitiendo que en la actualidad sea una herramienta importante en la búsqueda de hidrocarburos y también en la exploración de zonas geotérmicas, mantos acuíferos y zonas de alta mineralización caracterizadas éstas por presentar cambios anómalos en la conductividad eléctrica.

Motivados en el aprovechamiento y desarrollo de esta potencial técnica electromagnética en Venezuela, PDVSA-ORIENTE realizó un estudio magnetotelúrico en Tascabaña (Edo. Anzoátegui) en el año 2010 [5] y dos años más tarde en la zona delimitada por el proyecto BARINAS-ESTE 07G 3D junto con la adquisición de otros métodos geofísicos como: Sísmica, Gravimetría, Magnetometría y Registros de pozos exploratorios.

Una vez realizada la adquisición magnetotelúrica surge la necesidad de procesar y analizar los datos de campo del proyecto Barinas – Este 07G 3D. Basados en dicha necesidad se plantea

este Trabajo Especial de Grado, en el cual se generará un modelo tridimensional de la distribución de la resistividad en el subsuelo, y luego se integrará con otros métodos prospectivos (Gravimetría y datos de pozo) para obtener una caracterización de la zona más completa, con la finalidad de localizar zonas con hidrocarburos. Dado lo anterior, los objetivos de este escrito se detallan a continuación:

Objetivo General:

- ✚ Estudiar mediante el sondeo Magnetotelúrico el comportamiento de la resistividad con la profundidad en la región BARINAS-ESTE 07G 3D, y su posible correlación con la presencia de Hidrocarburos.

Objetivos Específicos:

- ✚ Calcular las resistividades utilizando el algoritmo de Bostick, mediante el uso del programa IMAGEM.
- ✚ Generar un modelo tridimensional de la distribución de las resistividades en la región del proyecto BARINAS-ESTE 07G 3D creando un flujo de trabajo mediante el uso del programa GOCAD.
- ✚ Estudiar la correlación entre las medidas de resistividad obtenidas con el método de prospección magnetotelúrica y las medidas obtenidas en pozos exploratorios.
- ✚ Interpretar de manera integrada los datos obtenidos mediante el Método Magnetotelúrico, Gravimétrico y Pozos exploratorios (A y B).

ESTRUCTURA DE ESTE ESCRITO:

En lo siguiente se dará una descripción de los contenidos por capítulo en el presente escrito:

Capítulo 1: Nociones Geológicas, en el cual se detallará la ubicación de la zona objeto de estudio y sus aspectos geológicos relevantes.

Capítulo 2: Marco Teórico, donde se describe el fenómeno de la radiación electromagnética a partir de las relaciones de Maxwell y su aplicación en la determinación de resistividad

mediante una rutina de cómputo llamada rutina de Bostick. También se abordarán las herramientas del programa GOCAD necesarias para la generación del volumen de resistividades provenientes de los sondeos magnetoteléuticos del programa GOCAD.

Capítulo 3: Metodología Experimental, donde se explica la metodología empleada para la adquisición y procesamiento de datos.

Capítulo 4: Resultados y Discusión, donde se discutirán los resultados a partir de las comparaciones entre el Método Magnetoteléutico y los registros adquiridos en dos pozos exploratorios, además de la integración con las medidas densidad obtenida a partir de inversión gravimétrica.

Capítulo 5: Conclusión, donde se resumen los resultados más importantes del presente escrito

Referencias.

CAPÍTULO 1

NOCIONES GEOLÓGICAS.

1.1 - Ubicación Geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra enmarcada dentro del Proyecto de Exploración “Barinas Este 07G 3D” PDVSA-ORIENTE el cual abarca desde el punto de vista geopolítico los municipios Obispo, Rojas y Sosa del Estado Barinas y los municipios San Genaro de Boconoíto, Guanarito y Papelón del Estado Portuguesa, su área está definida dentro de un polígono envolvente perimetral de 8 vértices mostrado en la Figura 1.1, con una extensión aproximada de $934,67 \text{ Km}^2$ [6].

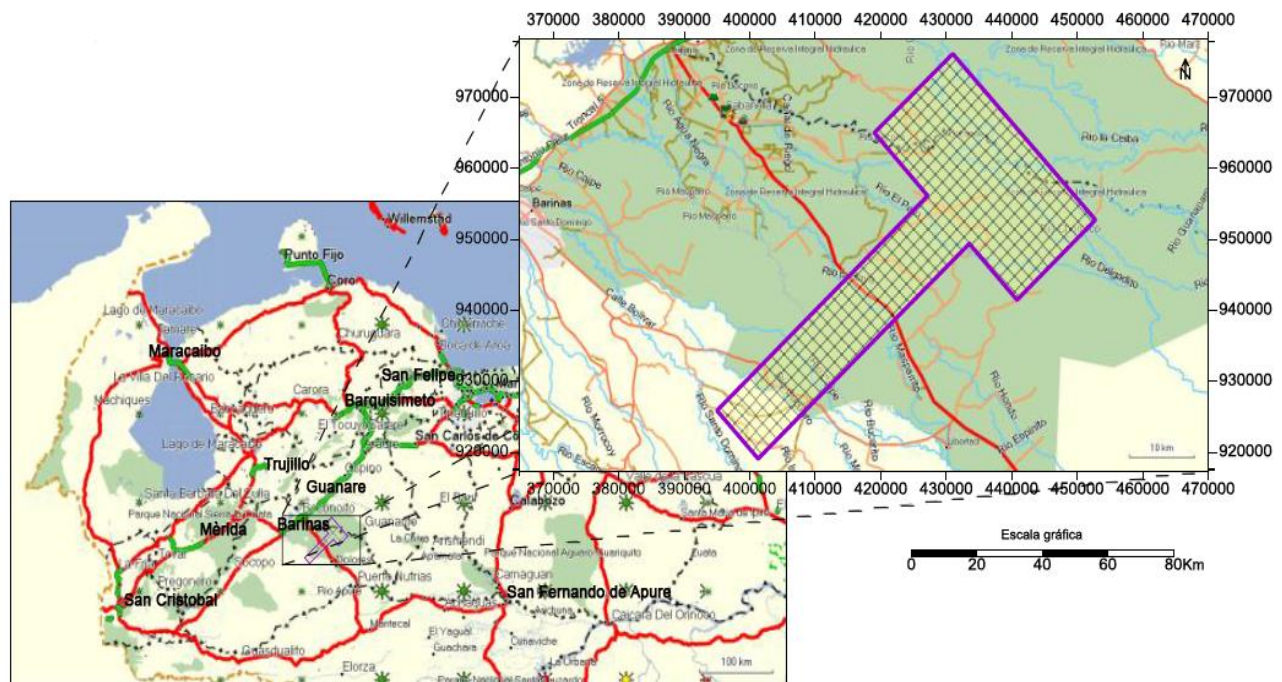


Fig. 1.1 Ubicación Geográfica del Proyecto Barinas Este 07G 3D [6].

1.2 - Consideraciones Geológicas

La Cuenca Barinas-Apure es una extensión hacia el norte-noroeste de la cuenca subandina del Meta o también llamada Cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, con una extensión de 95000Km². Sin embargo, algunos autores prefieren separar las dos cuencas por un alto estructural denominado Arco de Arauca. La cuenca está limitada por el escudo precámbrico, los Arcos de Macarena, El Baúl y por la Cordillera Andina, y constituye la más septentrional de las cuencas subandinas.

La mayoría de las trampas estructurales presentes en las cuencas de Barinas y Apure son esencialmente altos estructurales con presencia de algunas fallas que sirven también como trampas de hidrocarburos, tal como ocurre en el campo Guafita.

El Arco de Arauca y el Arco de Mérida constituyen los dos rasgos tectónicos más importantes en el área y han influido notablemente en la distribución de facies y espesores del Cretácico y Terciario.

El Arco de Arauca representa una plataforma que separa las depresiones de Capitanejo y Arauca respectivamente, la cual incluye una alineación de altos estructurales “a nivel de basamento” que aparentemente están asociados a fallamientos pre-Terciario reactivados.

Los Arcos de Mérida y Arauca estuvieron activos durante la sedimentación de las capas basales del Cretácico y fueron reactivados en la orogénesis a finales del Cretácico. Dichos arcos prevalecieron durante el Eoceno como altos estructurales, donde se depositaron sedimentos de aguas poco profundas tal como lo muestra la distribución de facies del Eoceno.

La Cuenca de Barinas-Apure está conformada principalmente por dos cocinas de gran importancia, la Eocena al noroeste de la cuenca, generadora del petróleo de los campos de Barinas y la cocina de Arauca, la cual generó el petróleo de Guafita - La Victoria. El hidrocarburo de la primera, debió migrar hacia el sur-sureste y entramparse en virtud de un sello tan significativo como las lutitas de la Formación Paguey. Se presume que este petróleo no alcanzó el área de Capitanejo, porque Arco de Mérida sirvió de barrera a la migración.

También existe la incertidumbre de porqué el hidrocarburo de la cocina de Arauca no alcanzó el área de Capitanaje, teniéndose como primera opción que el Arco de Arauca sirvió al igual que el Arco de Mérida de estructura sello.

Arco de Mérida sirvió de barrera a la migración. También existe la incertidumbre de porqué el hidrocarburo de la cocina de Arauca no alcanzó el área de Capitanaje, teniéndose como primera opción que el Arco de Arauca sirvió al igual que el Arco de Mérida de estructura sello. [7]

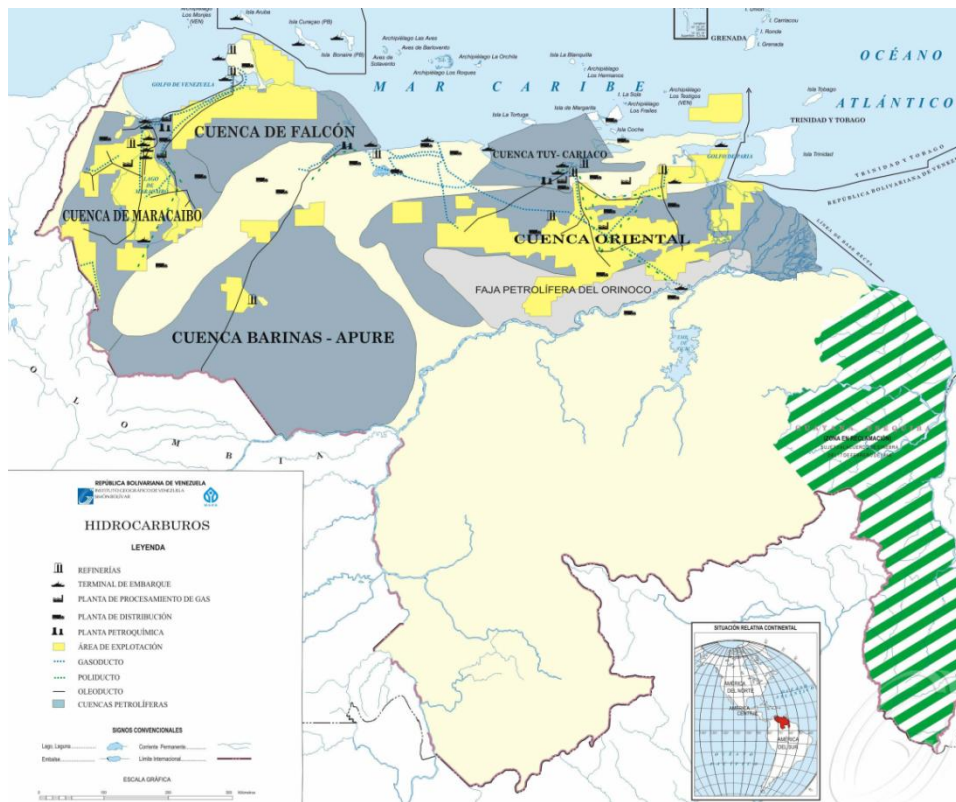


Fig. 1.2 Cuencas petrolíferas de Venezuela [Recuperado de: <http://geologiavenezolana.blogspot.com>].

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan brevemente los fundamentos teóricos básicos que sustentan el Método Magnetotelúrico (MT), y su aplicación en la geofísica para inferir una imagen del comportamiento de las resistividades del subsuelo, así como también descripciones de los principios físicos utilizados en las medidas de algunas otras propiedades físicas adquiridas en los pozos exploratorios.

2.1 - Método Magnetotelúrico

Es una técnica de exploración geofísica que combina conceptos simples de la teoría electromagnética, análisis de series de tiempo y teoría de sistemas lineales mediante la cual es posible determinar la estructura geoelectrica de la tierra a grandes profundidades. La operación en terreno consiste en medir campos eléctricos y campos magnéticos en diferentes rangos de frecuencia mediante un instrumento receptor con el fin de determinar la resistividad aparente del terreno. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo.

Los resultados interpretados a partir de mediciones en un determinado sitio pueden ser comparados con registros de inducción, bastante suavizados, obtenidos sin la necesidad de perforar un pozo [2].

2.2 - Fenomenología Física

2.2.1 - Origen de la Fuente

El sol emite una corriente continua de iones positivos y negativos (Viento solar), que al encontrarse con el campo magnético terrestre en una región denominada magnetopausa, interaccionan de manera compleja, por ejemplo: el aumento de la presión del viento solar

provoca la compresión rápida de la magnetosfera, y por lo tanto la compactación de las líneas campo magnético, que a su vez produce un aumento en el campo geomagnético horizontal. Oscilaciones de la magnetosfera generan pequeñas, casi sinusoidal variaciones del campo geomagnético, llamados pulsaciones geomagnéticas. Como se observa en la Figura 2.1.

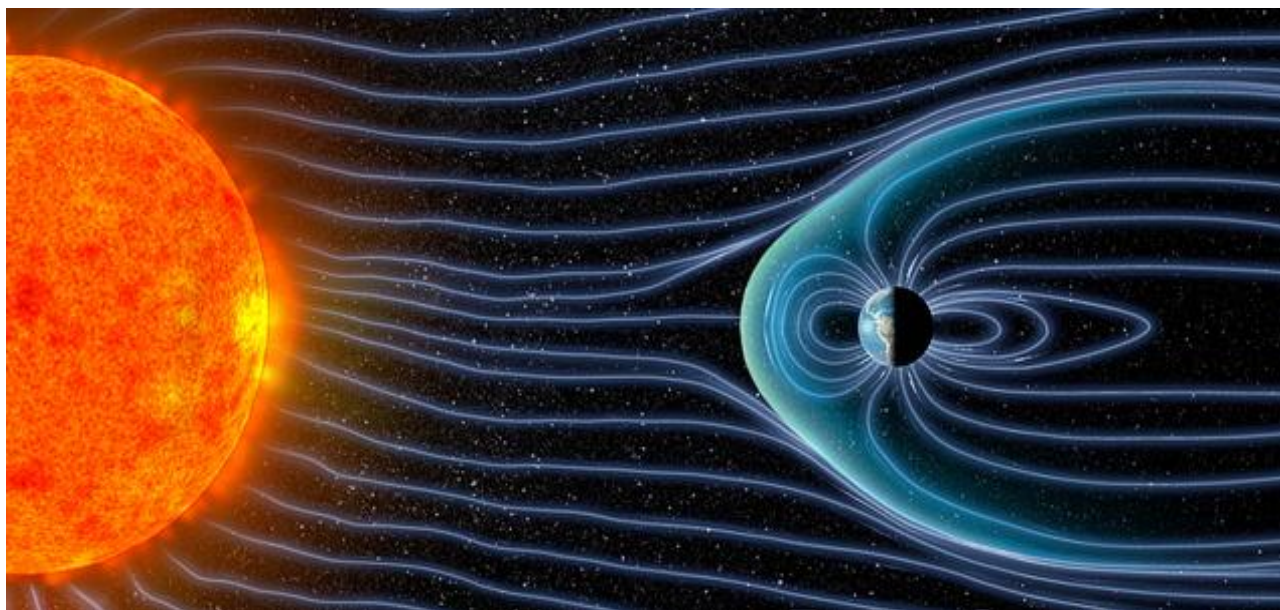


Fig. 2.1 Interacción del viento solar con el campo magnético terrestre [Recuperado de: <http://blog.milliyet.com.>].

Si bien la mayoría de iones solares son desviados por el campo magnético en la magnetopausa, algunos se fugan y logran llegar a la atmósfera superior, donde pueden ionizar las partículas presentes en la ionosfera, la cual se halla entre 75 y 550 km de altura por encima de la superficie terrestre. En la Ionosfera las velocidades de las partículas son suficientemente altas y la densidad de las partículas suficientemente bajas como para que los iones no se recombinen de inmediato para formar átomos y moléculas neutrales sino que forman un plasma, efecto que se describe en la Fig. 2.2.:

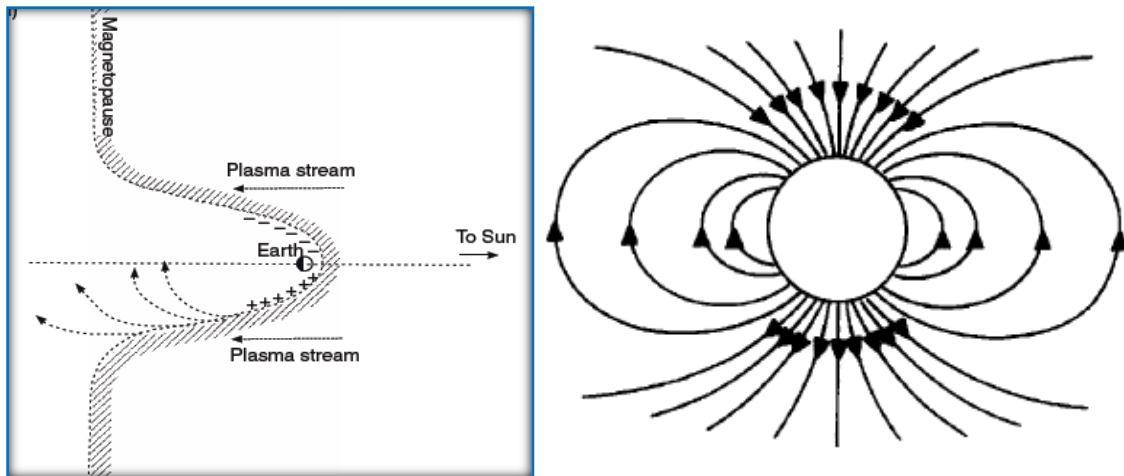


Fig. 2.2. Plasma de partículas cargadas en la Ionosfera [8].

Los movimientos de las cargas en la Ionosfera están entonces restringidos el campo magnético terrestre, cuando ingresan iones solares al plasma dentro de este campo magnético generan pulsos electromagnéticos que resuenan en la Ionosfera, viajando a lo largo de las líneas del campo (líneas de fuerzas que se extienden de polo a polo). La interacción compleja del campo magnético junto con el plasma atmosférico y los iones solares, se traduce en un amplio espectro de frecuencias electromagnéticas, incluyendo los fenómenos de luz visible de la aurora boreal y aurora austral.

No obstante, para efectos de las mediciones del método MT en la industria de petróleo y gas, el rango espectral útil se encuentra entre 0.001 Hz hasta 10kHz [9]. Como la fuente de estos campos electromagnéticos es tan lejana (originadas a distancias mayores de 100 Km) se puede hacer una aproximación de ondas planas sobre la superficie terrestre.

2.2.2. Interacción de las Ondas electromagnéticas en un medio (tierra)

Las ondas electromagnéticas (EM) provenientes de la ionosfera al llegar a la tierra interactúan con las formaciones conductivas e inducen una onda de respuesta, que se retropropaga hacia la superficie, similarmente a como ocurre en las reflexiones sísmicas, aunque las EM poseen un origen y comportamiento físico distinto a las ondas sísmicas (Ondas Mecánicas).

La señal EM variable en el tiempo penetra la tierra y se propaga en su interior, de tal manera que al encontrar a su paso capas conductoras por ley de Faraday induce un bucle de corriente denominado corrientes parásitas o de Eddy, la cual depende de la resistividad de la formación conductora, de la magnitud y la velocidad de cambio con el tiempo o la frecuencia de la señal fuente, a su vez esta corriente parásita induce un campo magnético que se contrapone a la onda incidente (Ley de Lenz), es decir, se propaga desde la formación hacia la superficie, lo cual se traduce en una pérdida de energía de la señal de entrada, por lo tanto se produce una atenuación de la misma a medida que se propaga en el subsuelo. Los sensores colocados en la superficie (Método MT) miden este campo de respuesta (Ver Figura 2.3).

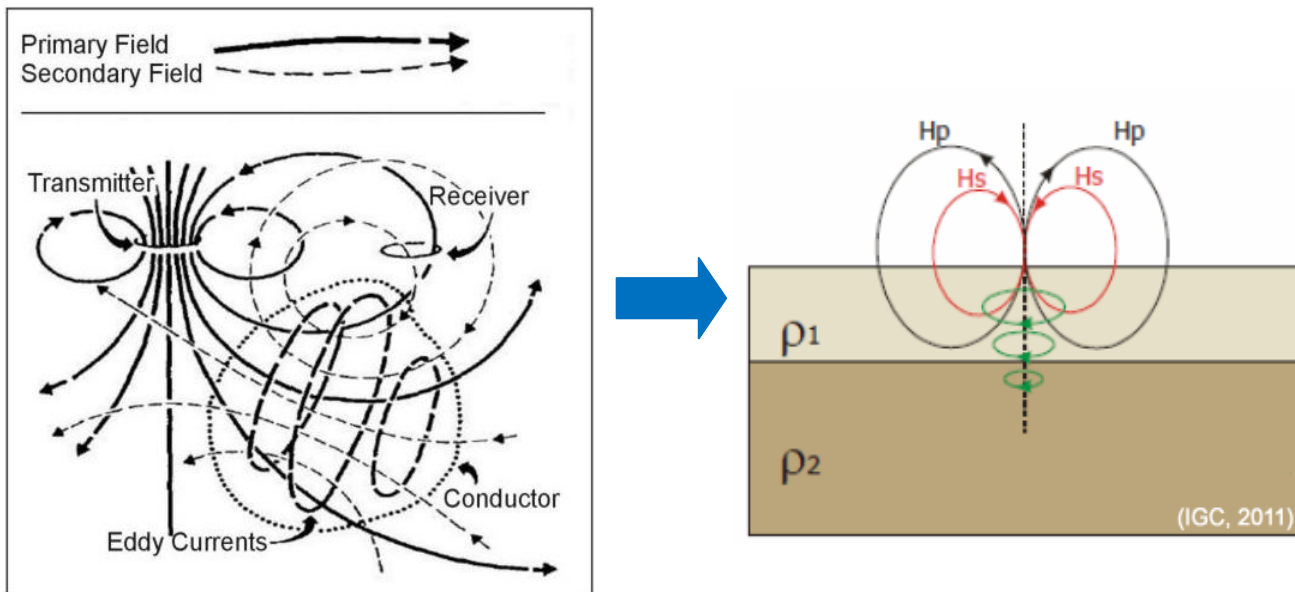


Fig. 2.3: Esquema simple sobre el funcionamiento de la inducción electromagnética en MT: H_p , campo magnético primario y H_s , campo magnético secundario [Recuperado de: http://www.igc.cat/web/es/geofisica_tec_magnetotelurica.html].

2.3 - Corriente o Intensidad Eléctrica

Se define como el flujo de carga por unidad de tiempo en un material. Se debe al movimiento de los electrones en el interior de dicho material, su unidad física en el sistema internacional es el Coulomb sobre segundo (C/s –Amperio-).

2.4 - Ley de Inducción de Faraday

Cuando un conductor es atravesado por un flujo magnético variable, se genera en él una fuerza electromotriz inducida que da lugar a una corriente eléctrica, a su vez una corriente eléctrica, puesto que se trata de un movimiento de cargas, produce un campo magnético secundario.

2.5 - Ley de Lenz

El sentido de la fuerza electromotriz inducida es tal que la corriente que crea tiende a oponerse a la causa que la produce.

2.6 - Conductividad Eléctrica

Se define como la capacidad que tiene un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí, es una propiedad intrínseca de la materia y una de las características de estudio más importantes de los materiales. Su unidad básica S.I es el Siemens por metros (S/m). Sin embargo para su aplicación en la geofísica se trabaja con el inverso de esta propiedad, es decir, la Resistividad Eléctrica.

2.7 - Resistividad Eléctrica

Se llama resistividad al grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos en el interior de un material, se denota con la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios por metro (Ωm). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente calificándolo de buen o mal conductor.

2.8 - Resistividad Eléctrica de las rocas

Las rocas dependiendo únicamente de sus minerales constituyentes son consideradas aislantes en su mayoría, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc. prácticamente lo son, sin embargo todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales se encuentran ocupados de manera parcial o en su totalidad por electrolitos, por lo que en conjunto las rocas poseen un comportamiento similar a conductores iónicos de resistividad variable. Dicha resistividad varía en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y

del modo de distribución de los poros, a su vez puede depender de la temperatura (ver Figura 2.4).

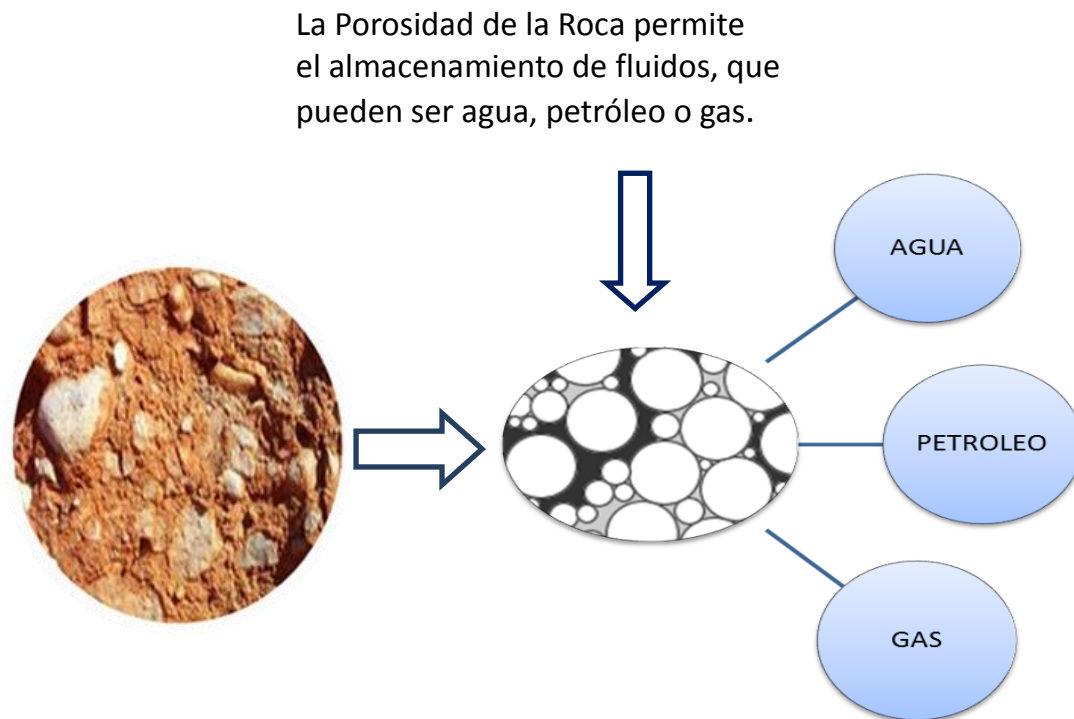


Fig. 2.4. Capacidad de las rocas de alojar fluidos en sus poros [Recuperado y modificado de:<http://definicion.de/roca-sedimentaria/>].

De manera general existen comportamientos típicos del tipo de roca que pueden resumirse de la siguiente manera:

- a) Las rocas ígneas y metamórficas: tienen valores altos de resistividad, la cual depende del grado de fracturación que posean, y del porcentaje de agua que rellena esas fracturas.
- b) Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Además las aguas subterráneas que se encuentran en la naturaleza tienen resistividades de 1 a 20 Ωm , y las aguas marinas tienen una resistividad de unos 0,2 Ωm . Los intervalos de resistividades más comunes en las rocas y minerales (Figura 2.5).

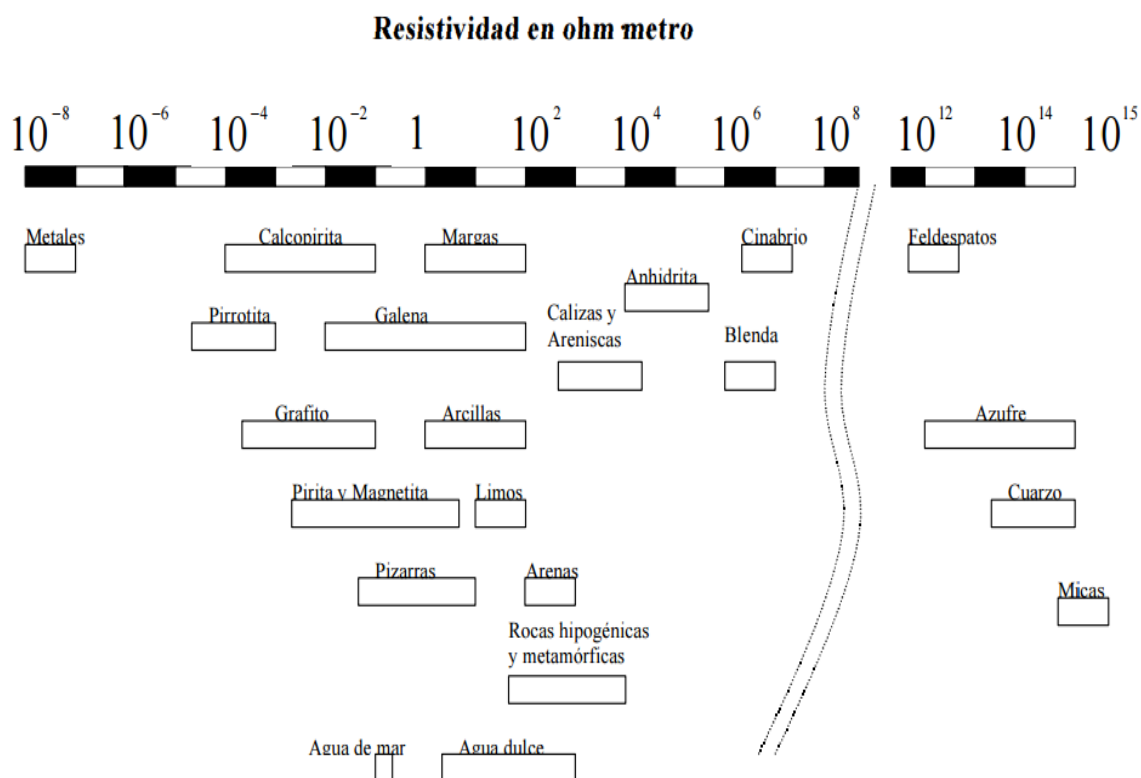


Fig.2.5 - Valores de resistividades más comunes de rocas y minerales

2.9 - Registro Geofísico

Es la Medición en función de la profundidad o del tiempo, o de ambos parámetros, de una o más magnitudes físicas en o alrededor de un pozo. El término proviene de la palabra inglesa "log" utilizada en el sentido de registro o nota [Schlumberger oilfield glossary].

Estos registros se pueden agrupar en eléctricos, nucleares, acústicos y electromagnéticos, atendiendo al método físico empleado en las mediciones. El análisis en conjunto de varias de ellas, sumada con la información que se tenga del campo petrolero, permitirá obtener un perfil de la formación adyacente al pozo, así como estimar la cantidad de petróleo extraíble y por lo tanto, determinar el valor comercial del mismo (ver Figura 2.6).

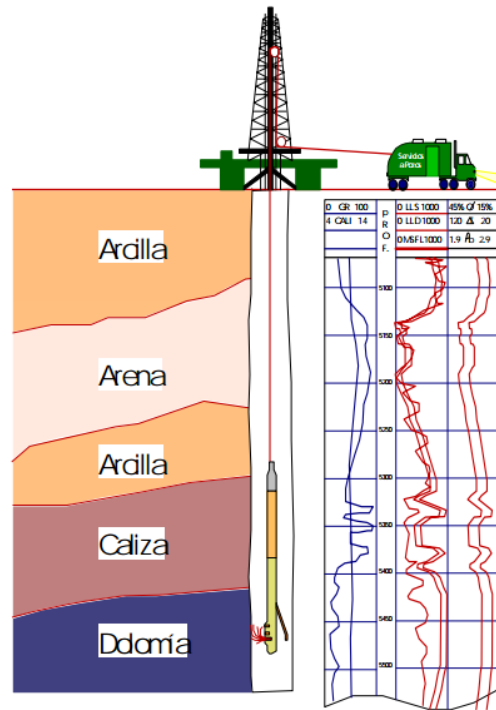


Fig. 2.6. - Diagrama esquemático de la toma de registros de pozo [Recuperado de:
<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo06.pdf>]

2.10 - Fundamentos Teóricos del Método Magnetotelúrico

Todos los métodos electromagnéticos utilizados en la exploración geofísica, están sustentados teóricamente por las ecuaciones de Maxwell. En particular para el estudio de la distribución de resistividad en el subsuelo dichas ecuaciones se trabajan en el dominio de la frecuencia, ya que esto permite el análisis de los campos como funciones armónicas en el tiempo, que se propagan como ondas electromagnéticas en medios materiales (la tierra) y permiten establecer las relaciones entre este campo, el medio y la fuente que los genera.

Ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia:

$$a) \nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B}$$

$$b) \nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J}$$

$$c) \nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$d) \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

El objetivo de MT es determinar la resistividad eléctrica en el subsuelo a partir de la correlación de los campos eléctrico y magnético observados sobre la superficie terrestre.

Uno de los conceptos claves en la teoría de la inducción electromagnética utilizados en MT es la profundidad superficial “skin depth”, es decir, la distancia vertical que los campos electromagnéticos pueden penetrar dentro de la Tierra. Podemos derivar la profundidad superficial usando:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

Las corrientes de desplazamiento no son significativas para las frecuencias y conductividades en la inducción geomagnética.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

Utilizando las relaciones constitutivas $B = \mu H$ y $J = \sigma E$ y la identidad del rotor $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ en (1) y (2) se tiene:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \frac{\partial(\nabla \times H)}{\partial t} = \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla^2 H = -\sigma \mu (\nabla \times E) = \mu_0 \sigma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

Además sabemos que los campos varían sinusoidalmente con una frecuencia ω

$$E(t) = E e^{i\omega t} \quad H(t) = H e^{i\omega t}$$

por tanto (3) y (4) se reescriben como :

$$\nabla^2 E = i\omega \mu_0 \sigma E \quad (5)$$

$$\nabla^2 H = i\omega \mu_0 \sigma H \quad (6)$$

Si consideramos adicionalmente que la onda electromagnética incide en la tierra de manera vertical, es decir, se propaga en el eje Z, los campos H y E se mantendrán oscilando en el plano XY. Los campos en el plano XY vienen dados de la forma $E = (E_x, E_y, 0)$ $H = (H_x, H_y, 0)$, lo cual puede visualizarse en la Figura 2.7.

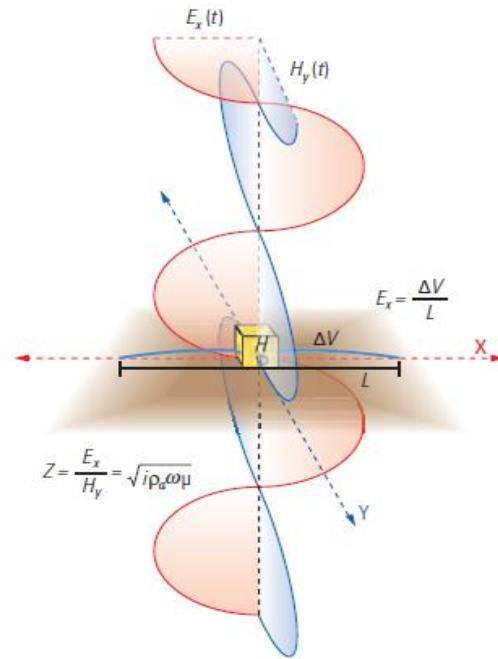


Fig. 2.7 Incidencia de manera normal de una onda plana electromagnética cuyos campos eléctricos y magnéticos oscilan en el plano XY (Superficie terrestre) y su propagación ocurre en el eje Z (Profundidad de penetración en el subsuelo) [9].

Representando las componentes de los campos en el plano XY matemáticamente se tienen las siguientes igualdades:

$$E_x(t,z) = E_{0x}(z) e^{i\omega t} \quad (7) \quad E_y(t,z) = E_{0y}(z) e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$H_x(t,z) = H_{0x}(z) e^{i\omega t} \quad (9) \quad H_y(t,z) = H_{0y}(z) e^{i\omega t} \quad (10)$$

Para encontrar como varían los campos con la profundidad se combinan las ecuaciones (5) y (6) con (7) y (10) respectivamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \nabla^2 E &= i\omega \epsilon_0 \sigma E \\ \frac{\partial^2 [E_{0x}(z)]}{\partial z^2} &= i\omega \epsilon_0 \sigma [E_{0x}(z)] \\ \Rightarrow E_{0x}(z) &= E_{0x} e^{-ikz} \end{aligned}$$

Reescribiendo las ecuaciones para las componentes de los campos:

$$\begin{aligned} E_x(t, z) &= E_{0x} e^{-ikz} e^{i\omega t} & H_x(t, z) &= H_{0x} e^{-ikz} e^{i\omega t} \\ H_y(t, z) &= H_{0y} e^{-ikz} e^{i\omega t} & E_y(t, z) &= E_{0y} e^{-ikz} e^{i\omega t} \end{aligned}$$

Con $k = \sqrt{\omega\sigma\mu_0/2} (1-i)$ y utilizando la definición del factor de penetración $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ se tienen que los campos son:

$$E_x(t, z) = E_{0x} e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - \frac{z}{\delta})} \quad (11) \quad H_x(t, z) = H_{0x} e^{-ikz} e^{i(\omega t - \frac{z}{\delta})} \quad (12)$$

$$H_x(t, z) = H_{0y} e^{-ikz} e^{i(\omega t - \frac{z}{\delta})} \quad (13) \quad E_y(t, z) = E_{0y} e^{-ikz} e^{i(\omega t - \frac{z}{\delta})} \quad (14)$$

En estas ecuaciones se observa que la profundidad superficial es la distancia en que las amplitudes de los campos están reducidas a un valor de $1/e$ ($\sim 37\%$) de su valor superficial.

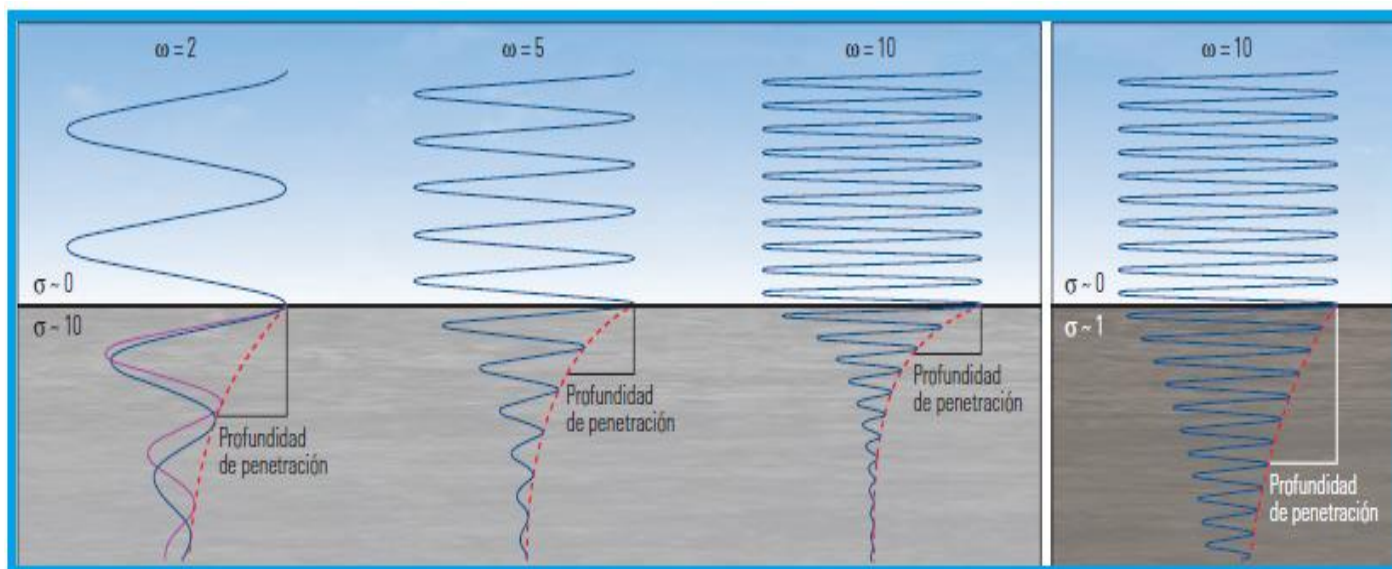


Fig.2.8 Una onda electromagnética que sale de un medio altamente resistivo tal y como es el aire y entra en un medio más conductor (la tierra), presenta un decaimiento exponencial en su amplitud que es una función de la frecuencia ω y de la conductividad σ (Curva Roja). Además también experimenta un retardo gradual en la Fase (Curva violeta onda atenuada sin el cambio de fase [9]).

Finalmente si se sustituyen las expresiones de los campos E y H (12- 14) en las leyes de Faraday y Ampere y se llega a que las soluciones del sistema de ecuaciones son:

$$E_x = \frac{\mu_0 \omega}{k} H_y$$

$$E_y = \frac{-\mu_0 \omega}{k} H_x$$

De donde se puede obtener la impedancia como:

$$Z = \frac{E_y}{H_x} = -\frac{\omega \mu_0}{kn} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{j\sigma}}$$

La impedancia obtenida es considerando la tierra como un semi-espacio homogéneo con una onda plana incidiendo de manera normal, suponiendo una frecuencia angular ω particular.

A partir de esta definición general de impedancia dada anteriormente se puede definir la resistividad aparente “ ρ_a ” que resulta ser el parámetro físico utilizado para caracterizar el subsuelo en los estudios Magnetoteléurico.

$$\rho_a = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (15)$$

Sin embargo cabe destacar que la magnitud Z tiene un carácter tensorial, el tensor de impedancia, se representa mediante una matriz, compuesta por la resistividad aparente y la fase, esta última viene dada por:

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{\text{Im}Z(\omega)}{\text{Re}Z(\omega)} \right) \quad (16)$$

Donde $\omega=2\pi f$, $\mu= 4\pi \cdot 10^{-7}$ (SI), y f es la frecuencia. Esto quiere decir que los registros temporales medidos en la superficie se pasan al dominio espectral o de frecuencias mediante la transformada de Fourier. Las relaciones lineales permiten determinar el tensor de impedancia (15 y 16) (Ref. [2]), y a partir de él, las curvas de resistividad aparente y fase en función de la frecuencia.

Por tanto la respuesta de la Tierra con las variaciones temporales de los campos externos puede ser interpretada en términos de las variaciones de la conductividad eléctrica en profundidad. tomando en cuenta que las señales con frecuencias altas (periodos bajos) se

amortiguan más que las que contienen frecuencias bajas (periodos altos), por lo que la frecuencia de la señal nos va a determinar la profundidad de estudio.

Esto también nos indica que en medios conductores la penetración es menor que en medios resistentes, por lo que este método es adecuado para "atravesar" y visualizar medios resistentes (Hidrocarburos).

2.11 – Software IMAGEM

Es un programa creado por la empresa GEOMETRICS [10], que se usa tanto para la adquisición en campo incorporado al equipo STRATAGEM EH4, como para el procesamiento de los datos, ya que permite aplicar la rutina de Bostick para estimar las resistividades del subsuelo.

2.12 - Transformada de Bostick:

Esta transformación se basa en las expresiones asintóticas simples de las ecuaciones (17) y (18) introducidas por Bostick (1977) [3]:

$$\rho(D) = \rho_a(\omega) \left(\frac{\pi}{2\phi} - 1 \right) \quad (17)$$

$$D = \left(\frac{\rho_a(\omega)}{\mu\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Donde D es la profundidad, $\rho(D)$ es la resistividad en la profundidad D, ω es la frecuencia, $\rho_a(\omega)$ es el la resistividad aparente en la frecuencia ω , μ es la permeabilidad magnética, y Φ es la fase. Con las expresiones (17) y (18) tanto la resistividad como la profundidad aproximada pueden ser fácilmente determinadas. Los Datos obtenidos en campo se encuentran en el dominio de las frecuencias tal y como se muestra en la figura 2.9:

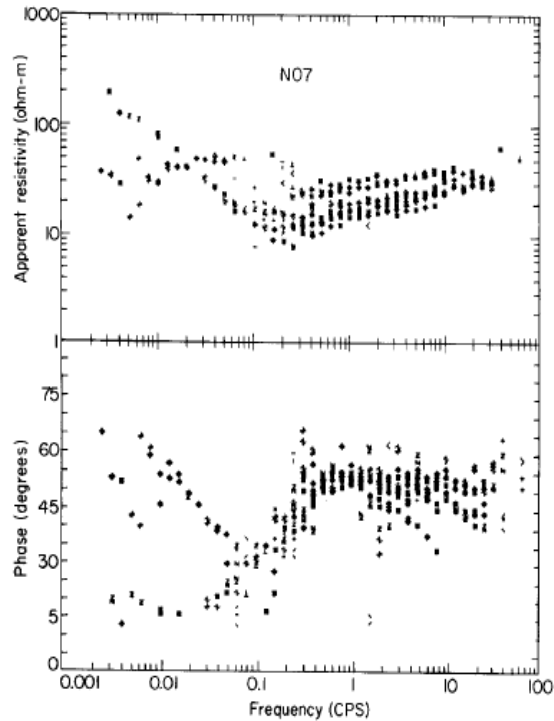


Fig. 2.9 Ejemplo de una representación convencional de los datos de MT provenientes de Campo, con resistividad aparente y valores de fase en el dominio de la frecuencia [3].

Considerando que la resistividad aparente y los diagramas de fase son difíciles de interpretar en términos de las estructuras del subsuelo, S. Goldberg e Y. Rotstein [3] propusieron en 1982 una nueva técnica de presentación de los datos de MT, que permitiese un fácil análisis de los mismos, aplicando la transformación de Bostick de las ecuaciones (17) y (18) a la resistividad aparente y la fase de datos en bruto.

Cada punto de los datos de resistividad aparente junto con los datos de fase correspondientes se transfiere punto a punto en un diagrama de datos de resistividad en función de la profundidad. El resultado de esta transformación aplicada a los datos de la Figura 2.8 se muestra en la Figura. 2.9.

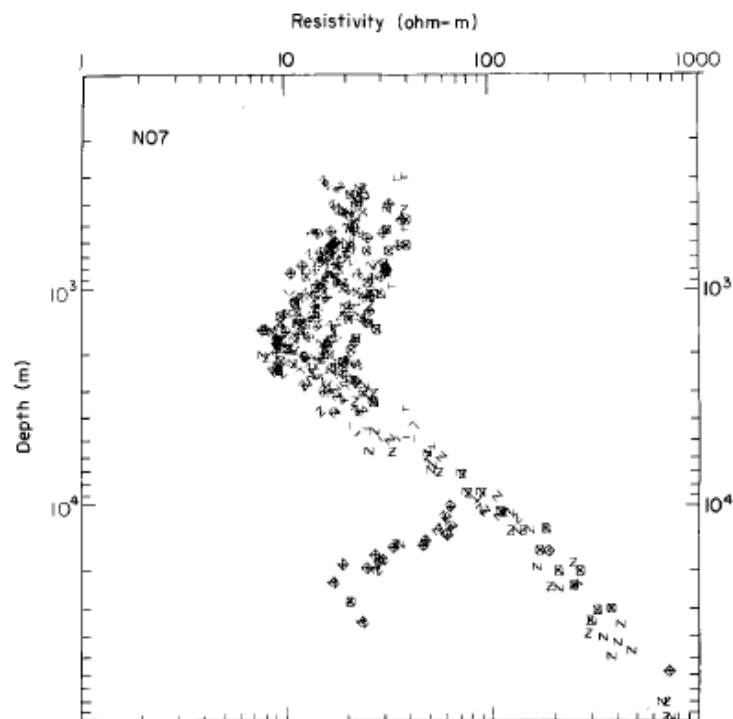


Fig. 2.10. Ejemplo de una representación modificada de los datos MT aproximada por nuestro valor de resistividad verdadera en profundidad. [3]

Debido a la simplicidad que genera interpretar los resultados de la resistividad de MT en el dominio de la profundidad, el uso de la inversión Bostick adquirió popularidad inmediata en empresas de servicios geofísicos y es de particular interés para el tratamiento de datos en este trabajo de investigación.

2.13 - Software GOCAD

Es una aplicación computarizada que permite importar, crear, modificar, integrar, visualizar y exportar objetos geológicos en 3D, también ofrece una gran variedad de herramientas para realizar análisis geológicos, geofísicos y geoestadísticos de dichos objetos. GOCAD fue creado por la empresa PARADIGM [11]. Es conveniente describir algunos conceptos útiles de este software en lo siguiente:

2.13.1 Definiciones Importantes acerca del Software GOCAD

2.13.1a) Voxet: Un objeto Voxet es una malla regular 3D hecha de elementos de volumen llamados Voxels, o simplemente células. Cada cuadrícula punto (nodo) es el centro de una célula. Las células en un Voxet están dispuestas a lo largo de las líneas de rejillas paralelas a tres ejes (direcciones); u , v , w . Los tres ejes no tienen que ser necesariamente ortogonales. Los números de puntos de rejilla en las direcciones u , v , w , y, son nu , nv , y nw respectivamente, tal y como se describe en la Fig. 2.11.

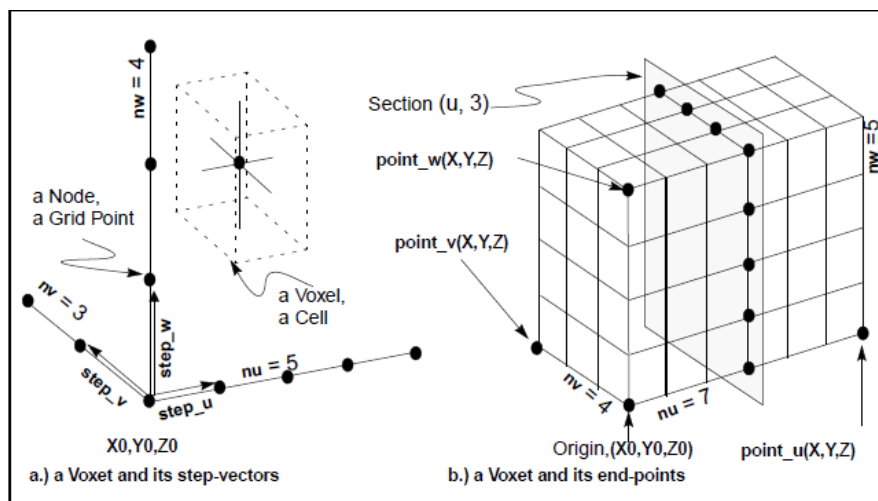


Fig. 2.11 Construcción de un Voxet [12].

2.13.1 b) Sección de un Voxet:

Una sección sobre un eje particular del Voxet es un plano que es paralelo a los otros dos ejes de dicho Voxet. Una sección está definida por un eje y por un número de índice, que comienza en cero. Por ejemplo, en la figura anterior la Sección denotada por $(u, 3)$ es el plano paralelo a v y w , cuya distancia al origen es 3 veces la distancia de "step_u". Esta sección consta de todos los puntos de la cuadrícula cuyas coordenadas son $(3, v, w)$ [12].

2.13.1 c) Propiedad de un Voxet:

Un Voxet puede contener múltiples conjuntos de información. Cada conjunto recibe el nombre de la propiedad o "Grid" del Voxet y contiene un valor en cada cuadrícula. Los valores de las propiedades se encuentran en el centro de las celdas, y toda la célula tiene el

mismo valor de la propiedad; es por ello que cuando se visualiza una propiedad en una sección Voxet, se compone de diminutos bloques [12].

2.13.1 d) PointsSet (Vset)

Un PointsSet es un conjunto de átomos que no están conectados de cualquier manera. [12]

2.13.2 - Kriging:

Es un término que se usa para designar al "*mejor estimador lineal insesgado*" de un punto y al mejor promedio lineal móvil ponderado de un bloque. Esta técnica fue creada en Francia por Georges Matheron alrededor de los años 60, a partir de los trabajos desarrollados por el Ingeniero minero Danie G. Krige y el estadista Herberg Sichel quienes usaron esta correlación espacial en el campo de la evaluación de yacimientos minerales en Sudamérica. Matheron adoptó el trabajo pionero de Krige, formalizó la mayor parte de los conceptos de la teoría y generalizó matemáticamente la técnica, acuñándole el término de Geoestadística, definiéndola como: "la aplicación del formalismo de las *funciones aleatorias* al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales" (Matheron, 1962). [13]

Una forma sencilla de entender porque se usa el kriging es planteando lo siguiente:

Supongamos que se tienen las mediciones $Z(S_1)$, $Z(S_2)$, $Z(S_3)$ y $Z(S_4)$, en los puntos S_1 , S_2 , S_3 y S_4 respectivamente, y se requiere predecir el valor $Z(S_0)$. El valor a predecir se ubica más cerca de S_2 que de cualquier otra ubicación donde se tenga medición; por lo tanto, es lógico pensar que $Z(S_0)$ es más parecido a $Z(S_2)$ que a cualquiera de los otros tres valores medidos.

De acuerdo a lo anterior, se puede optar para la predicción, por una media ponderada de las cuatro mediciones, en la cual $Z(S_2)$ tiene mayor peso que cualquier otra, seguida en su orden por $Z(S_4)$, $Z(S_3)$ y por último $Z(S_1)$.

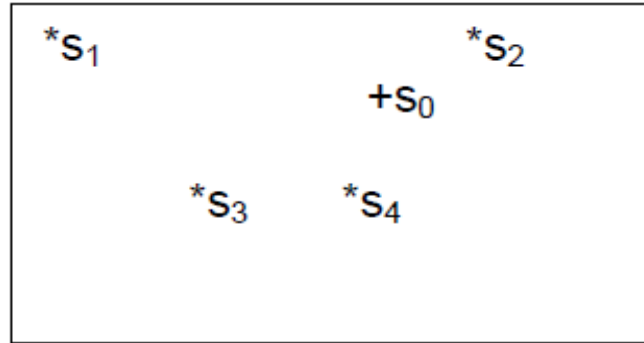


Fig. 2.12. Ejemplo de distribución de datos para una muestra [Recuperado de: <http://www.docentes.unal.edu.co/mpbohorquezc/docs/clase%20junio%202012%20kriging.pdf>].

Así

$$\hat{Z}(S_0) = \lambda_1 Z(S_1) + \lambda_2 Z(S_2) + \lambda_3 Z(S_3) + \lambda_4 Z(S_4)$$

Donde los λ_i con $i = 1, 2, 3, 4$ son factores de ponderación o pesas tales que $\lambda_2 > \lambda_4 > \lambda_3 > \lambda_1$ y $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$. En general, para obtener la estimación de $Z(S_0)$, se realiza una combinación lineal de los valores $Z(S_i)$ con $i = 1 \dots n$:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i)$$

Los parámetros λ_i son factores de ponderación o coeficientes de ponderación y son calculados de acuerdo a los siguientes criterios:

$\hat{Z}(S_0)$ sea insesgado, es decir, el valor esperado del error es cero

$Var[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]$ la varianza sea mínima

Note que:

$$\begin{aligned} Var[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)] &= E[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]^2 - E^2[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)] \\ &= E[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]^2 - \{E[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]\}^2 = E[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E[\hat{Z}(S_0) - Z(S_0)]^2 &= E \left[\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \right) \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j Z(S_j) \right) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) Z(S_0) + Z^2(S_0) \right] \\
&= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j E[Z(S_i) Z(S_j)] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(S_i) Z(S_0)] + E[Z^2(S_0)]
\end{aligned}$$

Si ha estimado el semivariograma o bien se conoce la función de covarianza, también se tendrán los valores

$$E[Z(S_i)Z(S_j)], E[Z(S_i)Z(S_0)], E[Z^2(S_0)]$$

Por lo tanto, se encontrarán los λ_i minimizando esta varianza. Del respectivo proceso de minimización se obtiene un sistema de ecuaciones, que cambiará de acuerdo a las hipótesis que se tengan sobre la media y la covarianza del proceso, y la distribución de la variable en estudio.

El Kriging aparece en muchas formas de acuerdo a si se conocen la media, la distribución de probabilidad de $Z(s)$, si las predicciones son hechas para puntos o áreas, para el caso que atañe a esta investigación, serán necesarios dos de ellos [13]

2.13.2 a) - Kriging Simple

Normalmente se utiliza con data estacionaria, los datos deben ser conocidos y constantes, no debe existir tendencia espacial real de los datos. Se asume que la media de la propiedad es localmente constante y conocida, por lo tanto, antes de aplicar el kriging simple se debe saber de la media global de la propiedad en el reservorio que desea calcular en el dominio de interés. Cada vez que un punto se estime y se encuentre más lejos que el rango del variograma, el kriging asignará la media global al punto desconocido (Paradigm, 2007).

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

El objetivo final de esta investigación es correlacionar el modelo de resistividades generado, con otras variables físicas medidas mediante otros métodos que permitan caracterizar de manera más completa las zonas prospectivas. En este caso se dispone del modelo de densidades de la inversión gravimétrica el cuales es analizado junto con secciones del voxel de resistividades, para determinar en qué capas de densidad se pueden encontrar alojadas las anomalías resistivas y a su vez verificar si se corresponden en profundidad con los intervalos prospectivos del pozo. En este Capítulo se presentará el flujo de trabajo detallado por medio del cual se alcanza dicho objetivo final.

3- MÉTODO MAGNETOTELÚRICO (MT):

3.1 - Adquisición:

La empresa Daqing de Venezuela se encargó de realizar la adquisición conforme a la geometría definida por PDVSA, dentro de un polígono envolvente perimetral de 8 vértices, con 516 estaciones inicialmente planificadas, y luego debido a las condiciones del terreno se descartaron 30 estaciones, por lo tanto los datos utilizados en esta investigación constan de 486 sondeos Magnetotelúricos (ver Figura 3.1).

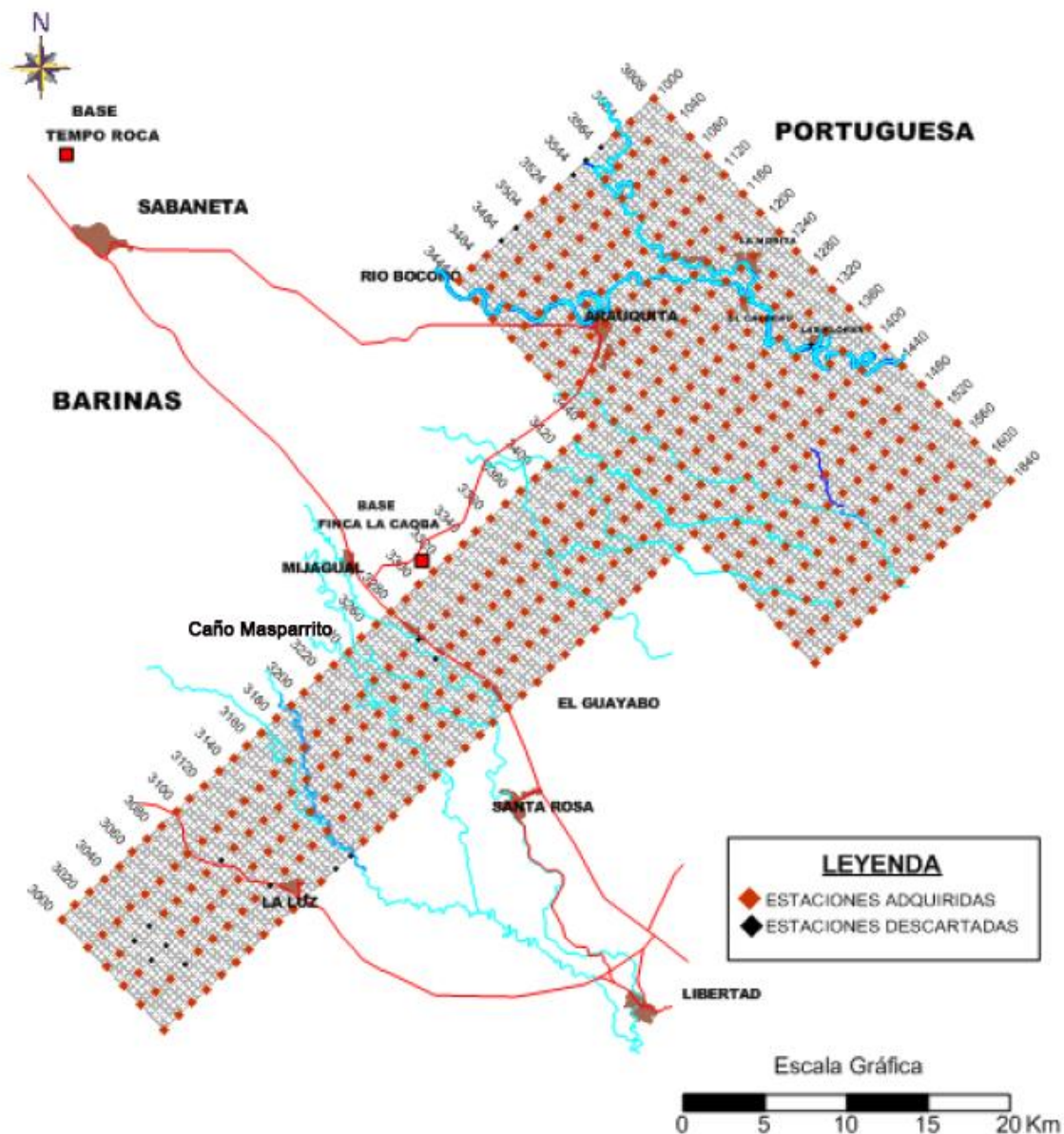


Fig.3.1 Ubicación geográfica del levantamiento Magnetotelúrico, distribución de las estaciones [6].

La medición se realizó sobre la geometría de mallas de métodos sísmicos, específicamente en los puntos de intersección entre las líneas de tiro (verticales) – Figura 3.2 -y las líneas receptoras (horizontales), con una distancia aproximada de 2000 metros entre cada estación

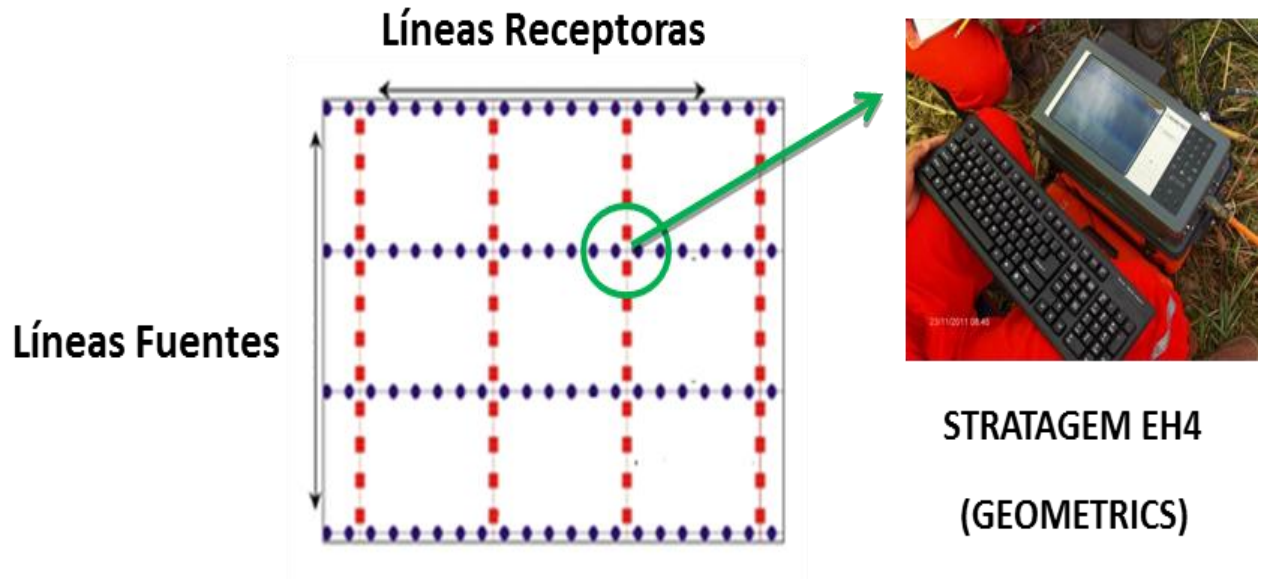


Fig. 3.2 Geometría de las mediciones magnetotelúricas sobre el tendido en campo. Modificado de [6].

La metodología utilizada para el arreglo de la instrumentación se especifica brevemente a continuación:

Los sensores eléctricos E_{x0} , E_{x1} , E_{y0} y E_{y1} se colocan ortogonalmente a 40 metros alejados del centro del tendido, ubicado en una estaca de referencia y las bobinas magnéticas H_x y H_y alejadas 9 m del centro del tendido y orientadas ortogonalmente, siguiendo el esquema de la fig. 3.3, donde se representa la posición de cada uno de los componentes y las conexiones con el equipo STRATAGEM EH4 para adquisición de los campos electromagnéticos variables.

Para todos los casos se colocó el par de electrodos Y_0 y Y_1 en la dirección de líneas fuentes y la brújula indicando una dirección de 47 grados al Noreste.(Ver Figura 3.3)

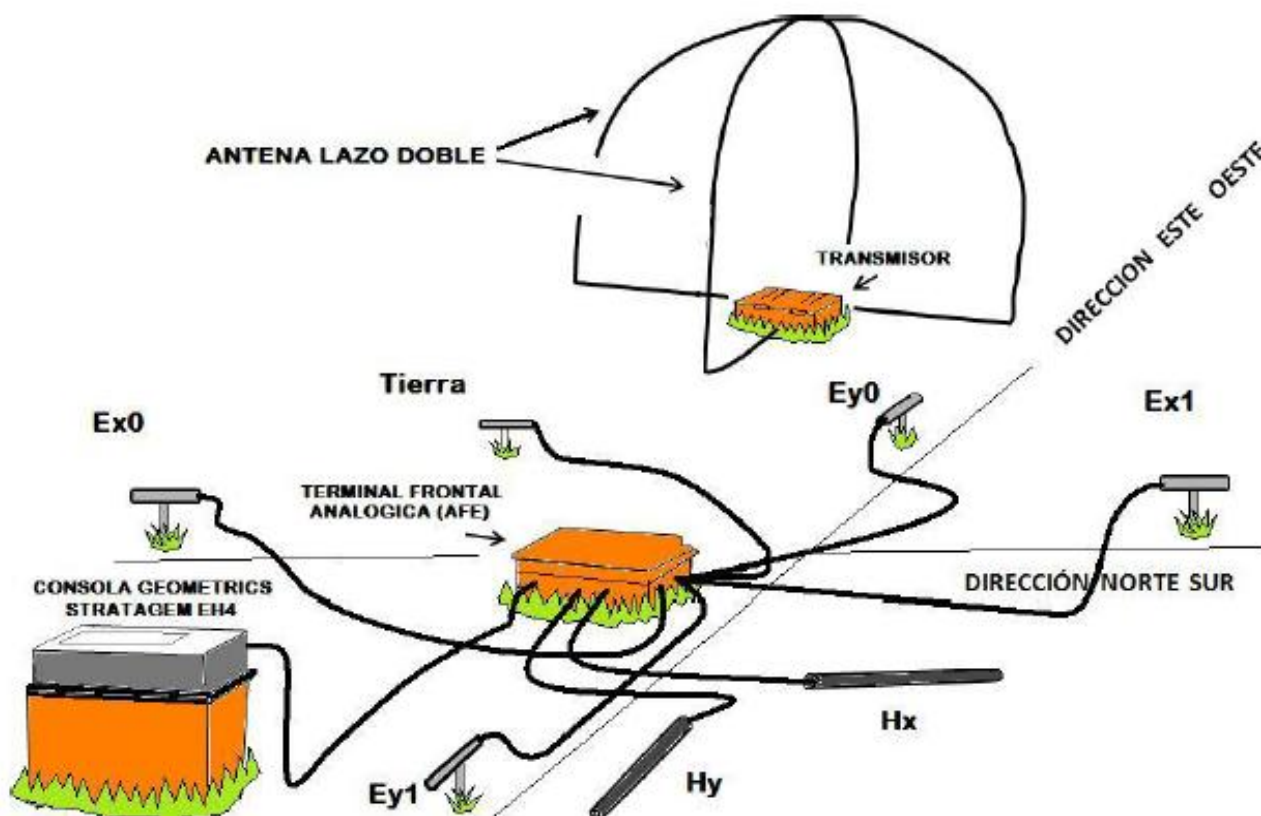


Fig. 3.3 Arreglo experimental de la adquisición MT para una estación de medida [6].

Este arreglo experimental se hizo en cada una de las estaciones, 486 en total. Para garantizar una mayor profundidad de prospectividad de los niveles de interés en el subsuelo y cumplir los objetivos del proyecto se operó en el rango de bajas frecuencias; en una banda de 0,1 a 1000 Hz, la versatilidad del equipo permite incluso llegar a frecuencias de 0,1 Hz. (Figura 3.4).



Fig 3.4 Consola STRATAGEM EH4 (Geometrics) [6].

Por cada medición de MT realizada en campo fueron generados 4 archivos, los cuales se ordenaron de la siguiente manera: 1) archivo “@” que contiene la posición de las mediciones realizadas, ordenadas por líneas receptoras. Tal y como muestra la Figura 3.5.

```

60 0
R3156.000 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 0 RY= 0 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=000160 G2=000080 G3=000080
R3156.001 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1552 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.002 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1536 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.003 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1520 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.004 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1504 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 160 G2=00 80 G3=00 883
R3156.005 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1488 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 160 G2=00 80 G3=00 883
R3156.006 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1472 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 883
R3156.007 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1456 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.008 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1440 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.009 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1424 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 a84
R3156.010 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1408 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 881
R3156.011 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1008 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a83
R3156.012 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1168 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a83
R3156.013 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1392 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a83
R3156.014 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1376 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 a83
R3156.015 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1360 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 882
R3156.016 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1344 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 882
R3156.017 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1264 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 882
R3156.018 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1280 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 883
R3156.019 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1248 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 882
R3156.020 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1232 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 883
R3156.021 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1216 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 882
R3156.022 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1200 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 683
R3156.023 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1184 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 683
R3156.024 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1008 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 882
R3156.025 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1023 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 763 G2=00 80 G3=00 882
R3156.026 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1328 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 882
R3156.027 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1312 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 882
R3156.028 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1296 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 882
R3156.029 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1136 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 b65 G2=00 80 G3=00 884
R3156.030 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1120 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 883
R3156.031 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1104 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 883
R3156.032 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1152 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 883
R3156.033 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1072 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 883
R3156.034 TX= 0 TY= 0 TZ= 0 RX= 3156 RY= 1056 RZ= 0 XL= 2000 YL= 2000 G1=00 964 G2=00 80 G3=00 482

```

Fig. 3.5. Archivo “@”

En la Fig. 3.5. Se muestra en el recuadro rojo el número de mediciones que se realizaron para la línea R3156 (34 en total), y en el recuadro verde se muestra la ubicación de cada medición, siendo la columna más a la derecha la ubicación en la línea de tiro.

Los siguientes 3 archivos que se generan son llamados: “U”, “V” y “W”. Los archivos “U” y “V” contienen la información relacionada con la calibración del equipo, y el archivo “W” posee la información de interés proveniente del campo junto con algunos datos de calibración del equipo. En la Figura 3.6 se muestra un archivo “W”

12.6	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
75.8	0.879	3.87	45.8	0.672	4.37	41.2	0
0.0105	0.129	1.21	1.12	1.33	0.809	-0.396	0.131
20	0.949	3.32	43.5	0.805	2.67	50.4	
0.0074	-0.0875	1.23	1.26	0.718	1.08	0.167	-0.0322
25.1	0.932	3.47	43.9	0.814	2.82	46.9	
0.0304	-0.189	1.22	1.36	0.958	0.89	-0.0364	0.131
31.6	0.964	3.18	43.4	0.899	2.17	43.9	
-0.0143	-0.108	1.26	1.29	0.993	1.06	-0.0477	-0.201
39.8	0.973	2.95	44.6	0.93	2.15	46	
-0.0679	-0.127	1.26	1.3	0.923	0.922	0.0351	0.076
50.1	0.978	2.87	42.3	0.943	2.17	45.1	
-0.0996	0.0234	1.33	1.1	1.08	0.98	-0.126	-0.0103
63.1	0.977	2.54	47.5	0.952	1.87	49.9	
0.0808	0.00182	0.968	1.14	0.759	0.896	0.094	0.126
79.4	0.988	2.88	47.3	0.975	2.12	48.7	
-0.021	0.00935	1.16	1.22	0.941	1.19	0.00837	-0.164
100	0.989	2.86	48.7	0.98	2.08	49.3	
-0.0537	-0.039	1.17	1.31	0.899	1.12	0.0353	-0.0572
126	0.989	3.02	46.5	0.982	1.97	50	
0.0111	0.0313	1.17	1.21	1.13	1.14	-0.326	-0.0959
158	0.99	3.09	48.5	0.987	2.12	51.6	
-0.0136	-0.0347	1.18	1.34	1	1.29	-0.159	-0.189
200	0.988	3.1	45.9	0.985	2.16	49.6	
0.032	-0.0249	1.18	1.28	1.05	1.23	-0.15	-0.152
251	0.980	3.12	45.3	0.982	2.32	50.0	
-0.0774	-0.0212	1.31	1.27	1.12	1.47	-0.210	-0.328
316	0.985	3.1	46	0.975	2.45	51.1	
0.0596	-0.0437	1.15	1.3	1.22	1.42	-0.294	-0.231
398	0.978	3.11	46.8	0.963	2.6	51.3	
-0.0215	-0.0899	1.21	1.34	1.16	1.51	-0.223	-0.276
501	0.96	3.33	48.7	0.916	2.82	49.6	
0.0247	0.0307	1.13	1.29	1.28	1.08	-0.247	0.106
631	0.937	3.38	48	0.856	2.71	47.5	
0.0271	0.061	1.13	1.23	1.03	0.384	-0.0368	0.575
794	0.931	3.84	47.2	0.873	3.64	49.7	
-0.24	-0.284	1.39	1.5	1.32	1.4	-0.31	-0.149
1e+003	0.984	3.74	49.5	0.924	2.42	53.6	
-0.303	-0.29	1.42	1.58	1.06	1.2	-0.135	-0.013
1.26e+003	0.976	6.01	45.8	0.989	5.54	50.2	
-0.273	-0.184	1.67	1.77	1.51	1.77	-0.164	-0.0447
1.58e+003	0.955	7.11	47.1	0.986	5.04	51.5	
-0.128	-0.141	1.75	1.77	1.37	1.75	-0.135	-0.019
2e+003	0.98	6.33	46.1	0.990	5.22	52.8	
2000	0.977	1.77	1.88	1.41	1.81	-0.178	-0.113

Fig.3.6 Archivo "W" proveniente de campo.

En los recuadros rojos se encuentran los valores de frecuencia que van desde 12,6 Hz, hasta llegar a 2000 Hz y en las columnas correspondientes a cada frecuencia se encuentran los valores de Coherencia, Resistividad y Fase en los ejes X e Y. La empresa de adquisición de los datos, posteriormente ordeno y elimino todos los errores y parámetros de calibración del equipo.

Los datos finales de MT fueron proporcionados a PDVSA en formato ASCII, los cuales constituyen el punto de partida para la generación del volumen 3D de resistividades.

3.2 - Flujo de Trabajo a Partir de los Datos MT (Fig. 3.7)

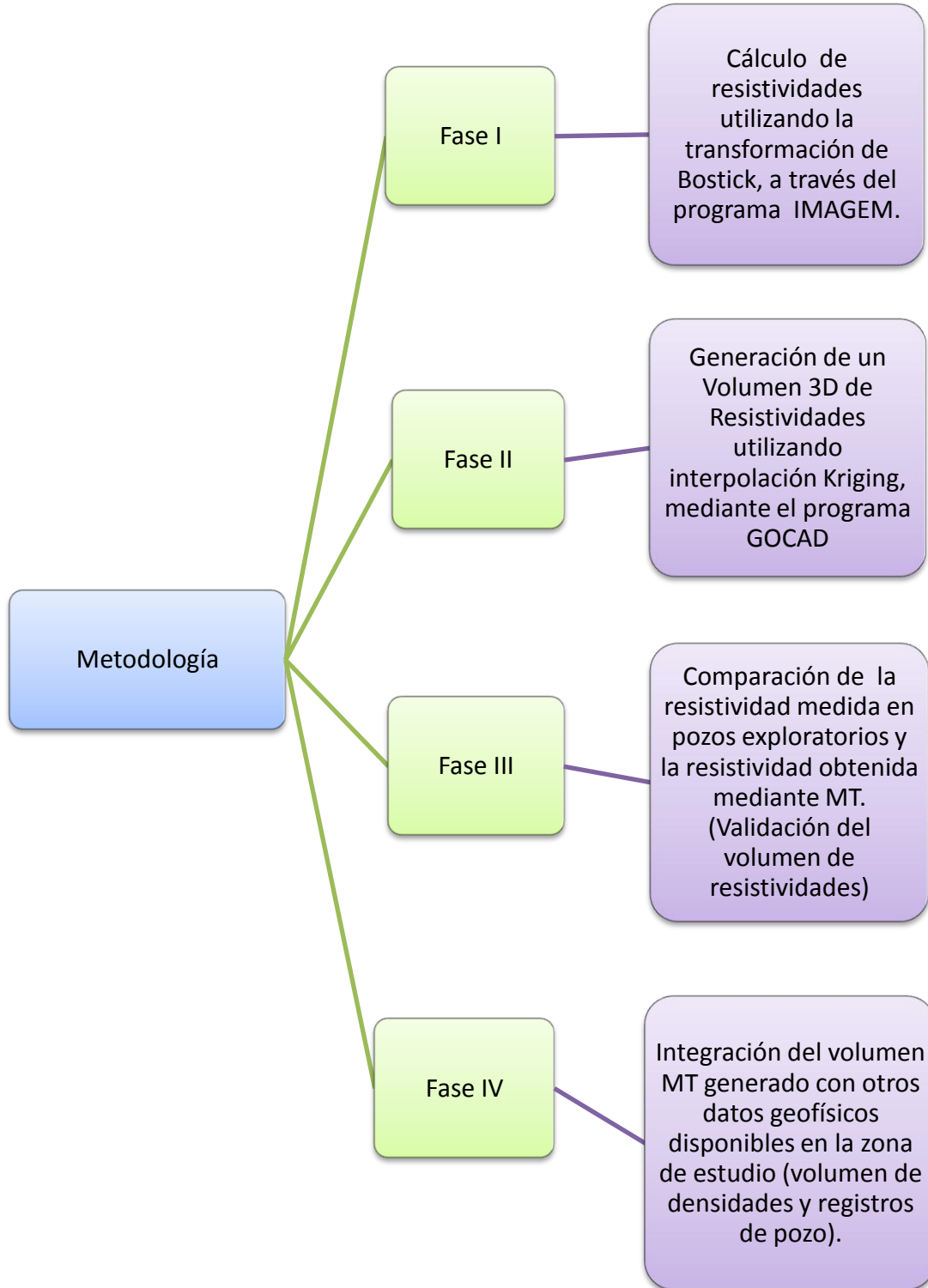


Fig.3.7: Esquema de trabajo a partir de los datos MT suministrados a PDVSA-ORIENTE

3.2.1 - Ejecución de la Fase I:

Para calcular la distribución de la resistividad en el subsuelo a partir de las variaciones electromagnéticas medidas en campo, se utilizó el programa “IMAGEM” (versión 2.15) de la empresa Geometrics.

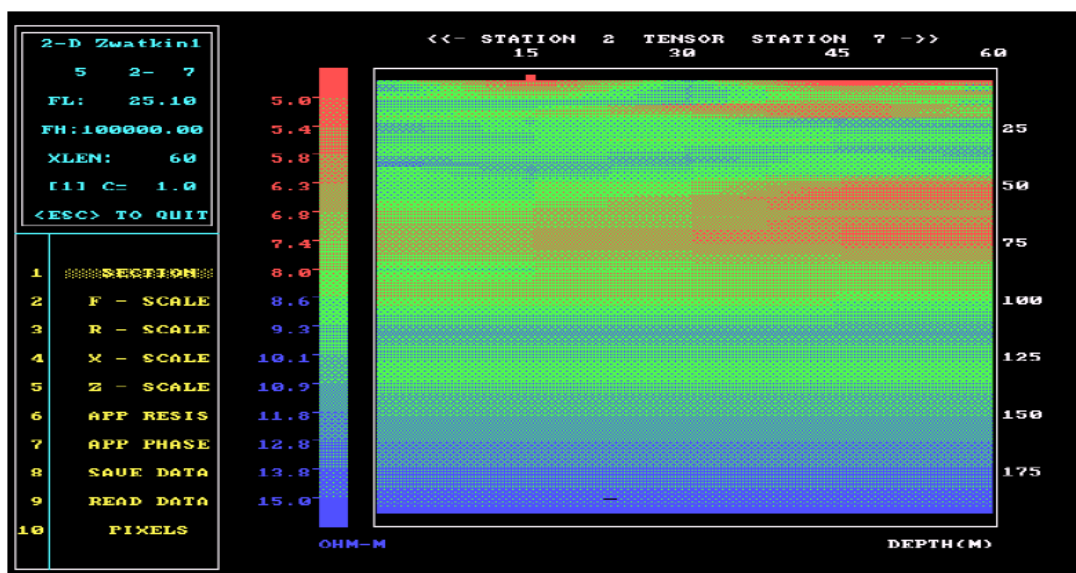


Fig. 3.8: Sección 2D. Cálculo de resistividad entre dos estaciones mediante IMAGEM.

El programa IMAGEM permite llevar los resultados de los sondeos MT del dominio de la frecuencia al de profundidad, utilizando un algoritmo conocido como “Transformación de Bostick (1977)”, cuyas expresiones se explicaron de manera detallada en el Capítulo 2. El cual toma como datos de entrada los tres archivos “U”, “V” y “W” (Previamente filtrados), que contienen la información de resistividad aparente y fase en el dominio de las frecuencias provenientes de campo, obteniendo un diagrama de Resistividad en función de la profundidad como el propuesto por S. Goldberg e Y. Rostein.

Los datos obtenidos por IMAGEM individualizados por estación se guardaron en un archivo de texto plano ASCII constituido por 3 columnas: línea de referencia para ubicación de la estación, Profundidad (m), Resistividad aparente (Ω -m), tal y como se muestra en la Figura 3.9.

The image shows a Notepad window titled "SEC-001 - Notepad" containing a data file. The data is organized into columns. The first column contains the value "1288.00" repeated 30 times. The second column contains depth values ranging from -7.88 to -1676.67. The third column contains resistivity values ranging from 8.37 to 6.42. The fourth column contains the value "0" repeated 30 times. The fifth column contains the value "1000" repeated 30 times. The sixth column contains the value "0" repeated 30 times. The seventh column contains the value "5000" repeated 30 times. The eighth column contains the value "500" repeated 30 times. The ninth column contains the value "1.01" repeated 30 times. The tenth column contains the value "10000" repeated 30 times. The eleventh column contains the value "92" repeated 30 times. The twelfth column contains the value "96" repeated 30 times. The second and third columns are highlighted with orange and green boxes, respectively.

1288.00	1288	2288	1000	0	5000	500	1.01	10000	92	96"
1288.00	-7.88	8.37	0							
1288.00	-8.84	8.37								
1288.00	-9.92	8.37								
1288.00	-11.13	8.37								
1288.00	-12.50	8.37								
1288.00	-14.02	8.37								
1288.00	-15.71	8.37								
1288.00	-17.67	8.37								
1288.00	-19.79	8.37								
1288.00	-22.21	8.37								
1288.00	-30.66	7.22								
1288.00	-69.08	19.69								
1288.00	-96.13	28.09								
1288.00	-109.03	31.54								
1288.00	-133.32	31.95								
1288.00	-135.45	19.20								
1288.00	-169.83	21.62								
1288.00	-198.89	19.10								
1288.00	-214.59	18.78								
1288.00	-245.41	19.07								
1288.00	-281.05	19.70								
1288.00	-298.98	17.16								
1288.00	-340.14	17.18								
1288.00	-385.91	17.40								
1288.00	-428.32	16.73								
1288.00	-483.77	17.15								
1288.00	-533.89	16.29								
1288.00	-597.85	16.80								
1288.00	-667.30	16.83								
1288.00	-742.47	15.83								
1288.00	-805.96	14.62								
1288.00	-890.43	12.79								
1288.00	-966.69	11.39								
1288.00	-1073.76	9.38								
1288.00	-1200.60	12.51								
1288.00	-1345.00	11.29								
1288.00	-1676.67	6.42								

Fig.3.9: Archivo obtenido mediante el programa IMAGEM, aplicando el algoritmo de la transformada de Bostick, Estación 001. Columna Naranja (Profundidad) y columna Verde Resistividad Aparente.

Analizando los valores generados, se pudo notar que existía un error instrumental en los resultados de resistividad que es sistemático para todas las estaciones, el cual consistía en una repetición de un valor de resistividad constante en los primeros 10 puntos del sondeo, que aunque no es el mismo valor en todas, en comportamiento si se mantiene, lo cual no es consecuente con la resistividad de las rocas puesto que de existir una capa en profundidad que contenga un material de igual resistividad, no es coherente otro material con otro valor distinto de resistividad constante en el mismo intervalo de profundidad para una estación vecina, y así

sucesivamente. Para evitar que este error afecte el volumen final de resistividades se eliminaron los 10 puntos iniciales de cada archivo por estación (Fig. 3.10).

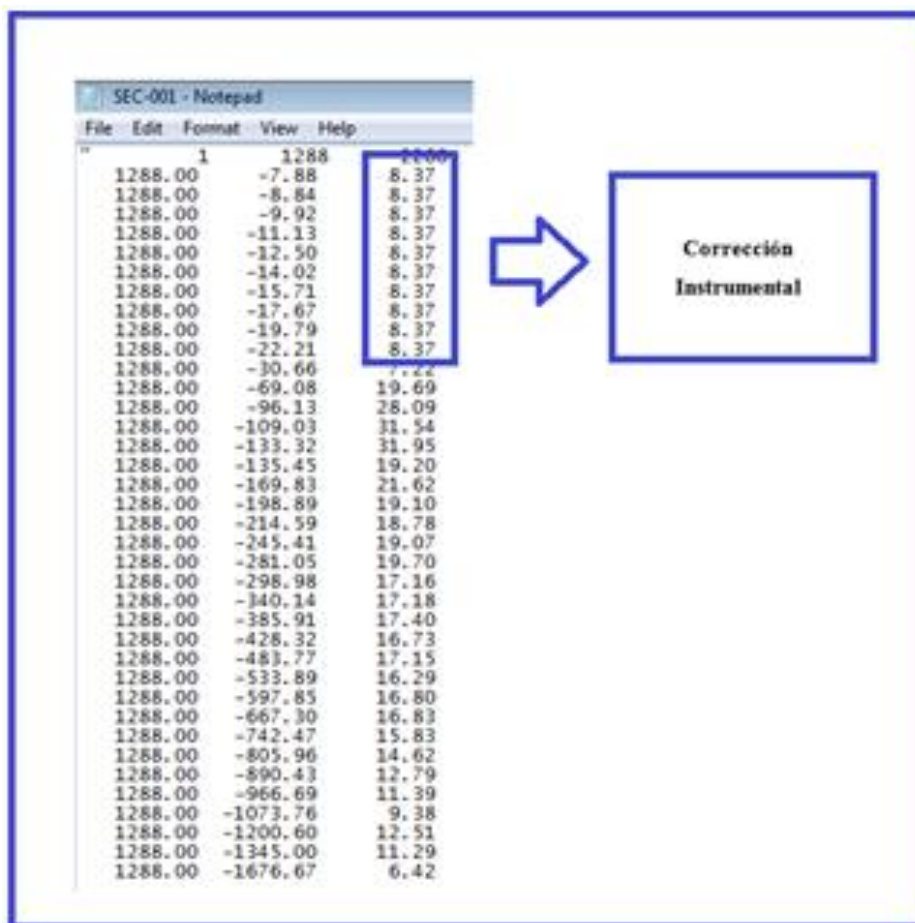


Fig. 3.10: Error sistemático de resistividad constante para los 10 primeros valores de profundidad. (Ejemplo: Estación 001)

El programa IMAGEM asume que cada medición de MT está referida sobre el Geoide, es decir, relativo al cero del nivel del mar. En nuestro caso particular las estaciones se encuentran referidas al nivel topográfico, por ende se requería de una calibración; la cual consistió en sumar a cada punto de la columna de profundidades del sondeo la altura inicial de la topografía (Figura 3.11).

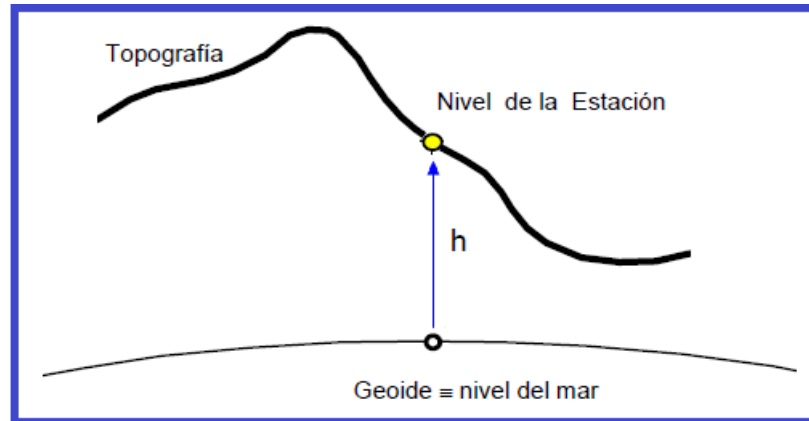


Fig. 3.11 Traslación de los datos de resistividades en profundidad desde el nivel del mar (Salida del programa IMAGEM) a la elevación real de la topografía. [14]

3.2.2 - Ejecución de la fase II

Parte 1: Una vez realizadas las correcciones de los datos de IMAGEM, se procedió a cargar los datos en el programa GOCAD con la finalidad obtener el volumen 3D resistividades, siguiendo la secuencia de pasos esquematizados en la Figura 3.12.

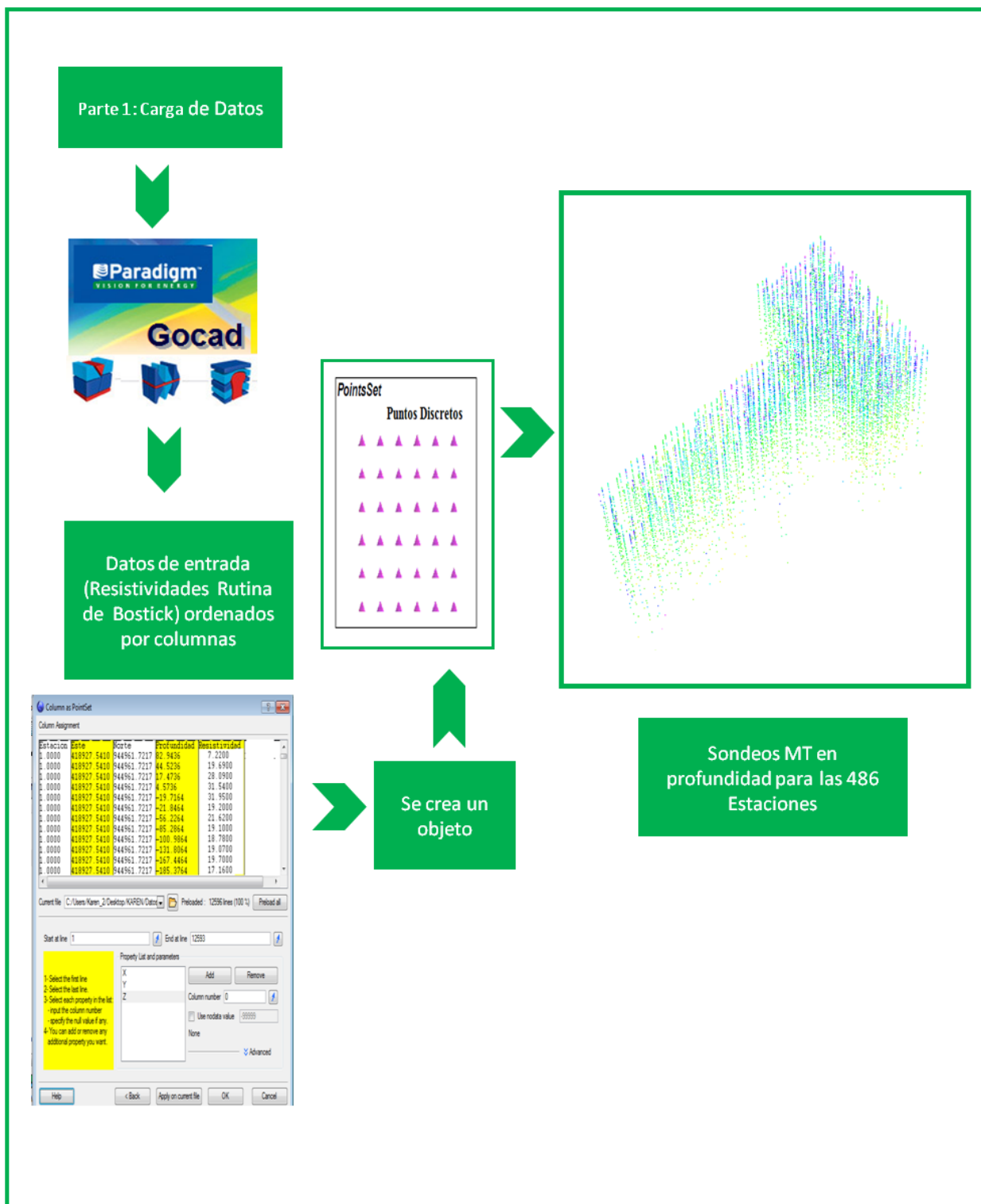


Fig. 3.12 Esquema de carga de datos de resistividad en función de la profundidad [15].

Parte 2: Al finalizar la carga de los datos como “points set” se tiene distribuciones espaciales de resistividades discretas en profundidad (Valores del Sondeo MT) ubicadas en superficie por sus coordenadas UTM respectivas a cada estación, por lo tanto se debe realizar un método de interpolación que me permita estimar la resistividad de manera tridimensional en toda el área del proyecto.

Para efectuarse una interpolación o estimación debe crearse una malla 3D con un número determinado de elementos de volumen y debe asignársele un tamaño a dicho volumen, ya que de ese tamaño depende el grado de resolución con que se efectúa la estimación.

La herramienta GOCAD cuenta con el análisis de estimación a través de varios tipos de métodos estadísticos, sin embargo, el método que mejor se ajusta a la investigación, considerando el tamaño de la muestra y su distribución espacial, es el kriging, que a su vez se clasifica en varios tipos de los cuales se utilizó kriging Simple (Figura 3.13).

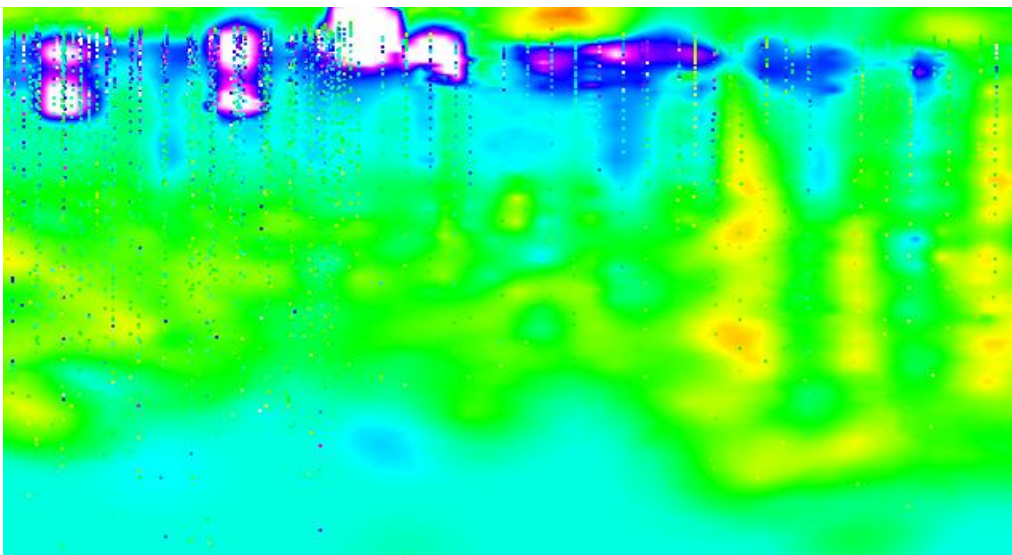


Fig. 3.13: Ejemplo de distribución de datos e interpolación

A continuación se presenta un esquema de la estimación de resistividades realizada utilizando GOCAD (Figura 3.14):

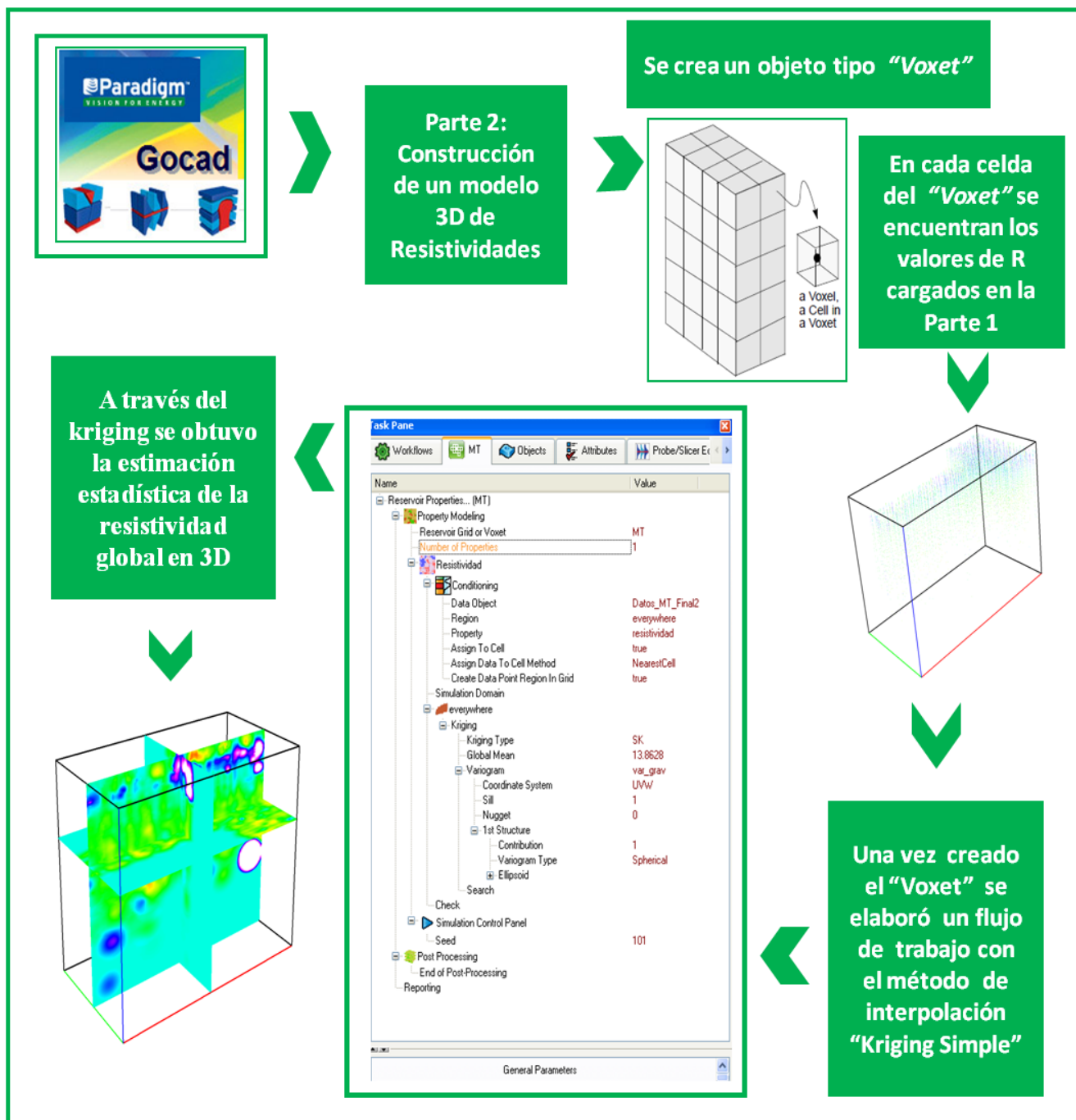


Fig.3.14: Parte II: Esquema de generación del volumen de resistividad en GOCAD.

3.2.3 - Ejecución de la Fase III

Al culminar el volumen de resistividades se procedió a hacer su validación con datos de medidas directas, es decir, con la resistividad medida en dos pozos exploratorios A y B. Su

ubicación dentro del proyecto se representa en la Figura 3.15. Los datos de pozo fueron ordenados en columnas, y se hizo una transformación de unidades de pies a metros (para que coincidan con las de MT), posteriormente se cargaron en el programa GOCAD, creando un objeto llamado “Well” que permite desplegar los registros.

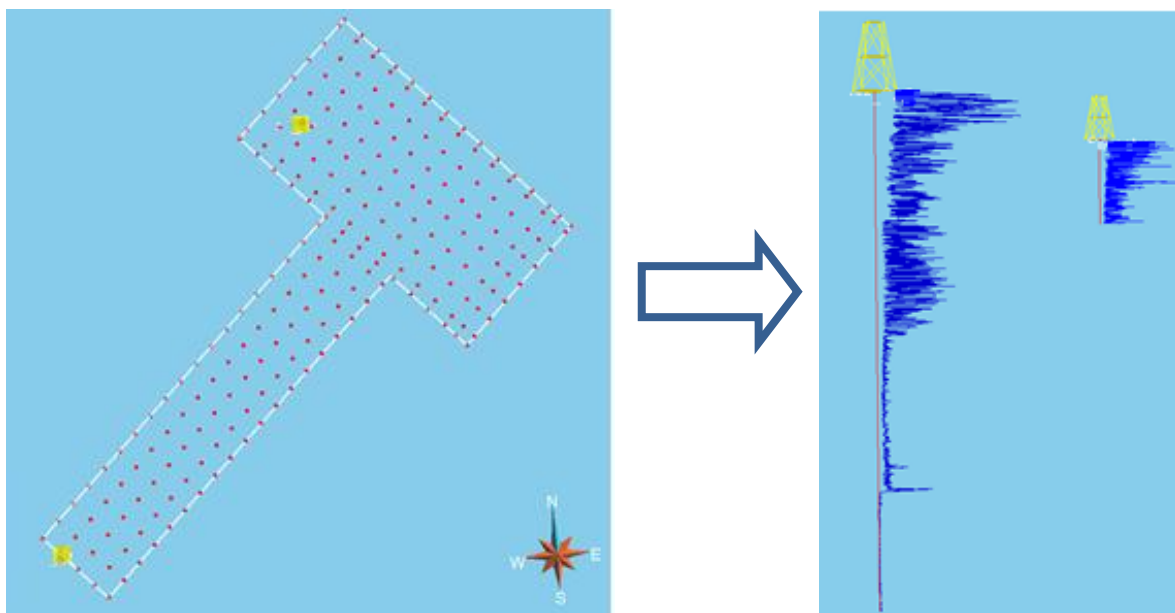


Fig. 3.15: Carga y despliegue de registro de pozo en GOCAD.

Luego se utilizó una propiedad que extrae del Voxet MT un promedio de la resistividad en profundidad, alrededor del pozo para poder correlacionar ambas medidas.

3.3 - Método Gravimétrico

El estudio del subsuelo mediante la aplicación del Método Gravimétrico tiene por objeto identificar las principales estructuras geológicas que se encuentran en el área de interés, mediante el estudio de las variaciones del campo gravitatorio sobre la superficie terrestre, también conocidas como anomalías gravimétricas. A fin de determinar dichas anomalías gravimétricas la empresa de servicios Daqing realizó un levantamiento 3031 estaciones gravimétricas, asimismo calculó la anomalía de Bouguer, realizando previamente todas las correcciones respectivas (Deriva instrumental, mareas, aire-libre, Bouguer, latitud y topográfica). De este volumen de datos, 1981 estaciones gravimétricas se encontraban en la región del proyecto y 1050 estaciones gravimétricas adicionales fuera del proyecto tal y como se denota con puntos rojos en la figura 3.16.

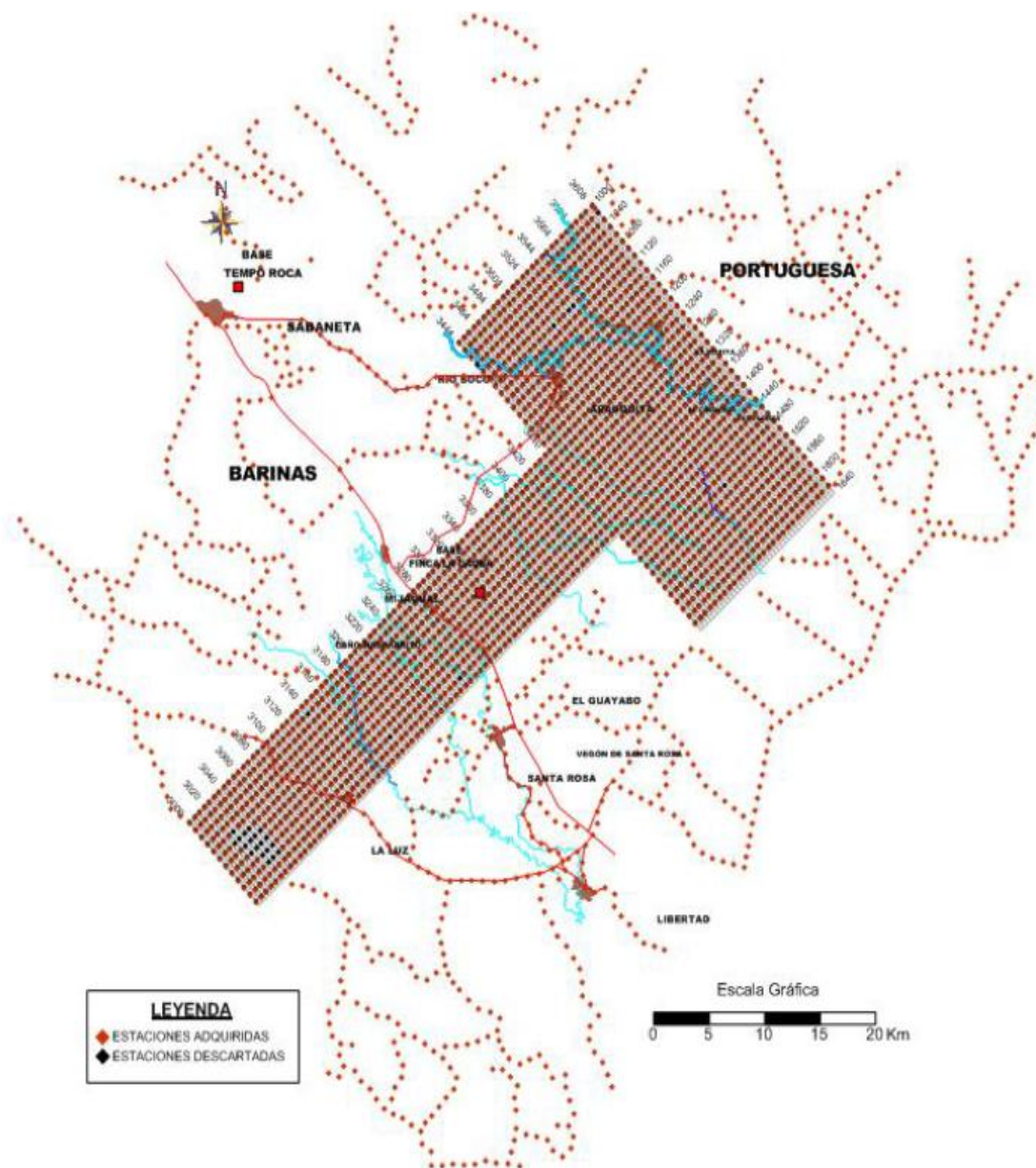


Fig. 3.16 Ubicación geográfica de las estaciones gravimétricas Adquiridas.[6]

Para efectos de la interpretación de los datos gravimétricos PDVSA generó un modelo de densidades utilizando inversión gravimétrica, es decir, utilizando un algoritmo de inversión lineal, para inferir el contraste de densidad en un cuboideconstituido por un conjunto de prismas rectangulares, de forma tal que su efecto gravimétrico explique la gravedad observada. [16]

Luego del procesamiento de la inversión gravimétrica, se recibió el volumen de densidades en formato texto plano ASCII, constituido por ubicación espacial (X Y), profundidad (Z) y el valor de la propiedad, en este caso de densidad (D). Estos datos ordenados por columnas fueron cargados como “points set” en el programa GOCAD de la misma manera que se hizo con los datos MT, lo cual se resume en la a continuación (Figura 3.17):

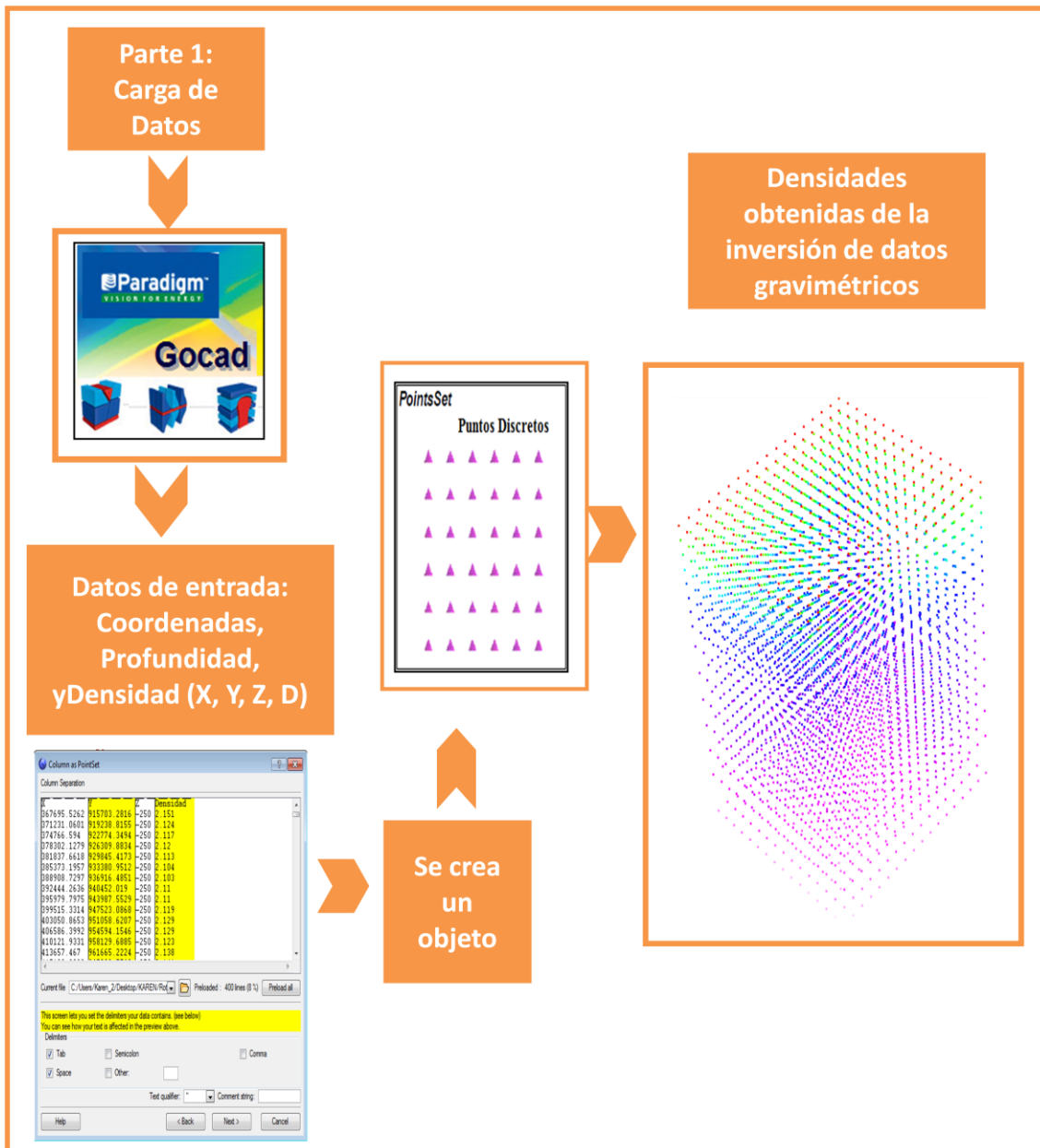


Fig. 3.17: Esquema de carga de datos de densidades obtenidas a través de inversión gravimétrica

A partir de los “points set” se creó una malla tridimensional conocida como voxet, y posteriormente se estimó la densidad para todo el volumen de datos usando interpolación tipo kriging simple, siguiendo la misma metodología llevada a cabo en la elaboración del volumen MT (Fig. 3.18):

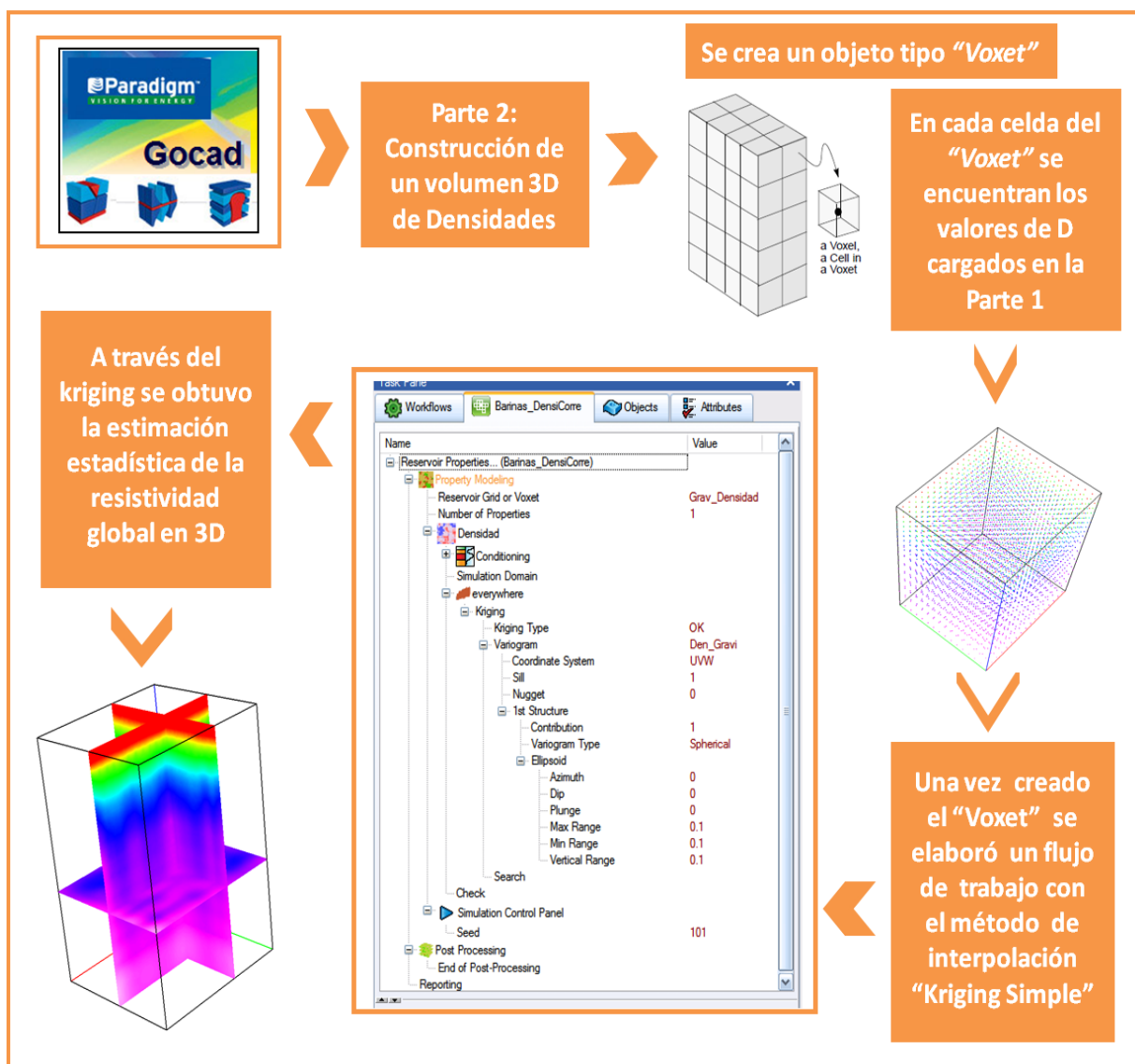


Fig. 3.18 Esquema de Interpolación de datos provenientes de la inversión gravimétrica [GOCAD].

3.4 - Integración MT, Gravimetría y Registros de Pozos

Finalmente se integraron e interpretaron los datos de los métodos magnetotelúricos con los datos gravimétricos y de pozos exploratorios para caracterizar de forma más precisa la zona en términos prospectivos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo, se presenta el análisis y la interpretación de los datos Magnetotelúricos procesados, con base en los fundamentos teóricos que sustentan su aplicación en la búsqueda de zonas con presencia de hidrocarburos, abordando de manera detallada cada uno de los resultados obtenidos mediante la metodología de trabajo planteada en el capítulo anterior, e integrándola con la información de otros métodos geofísicos.

4.1 – Estimación de Resistividades:

Las estimación se llevó a cabo mediante la transformación de Bostick, con base en la metodología planteada por S. Goldberg y Y. Rotstein [3], luego se hizo un filtrado de errores instrumentales, y se aplicó la corrección de altitud para ajustarlos al relieve de la zona de estudio. Se obtuvieron diagramas de resistividades en función de la profundidad, para cada una de las estaciones de MT (486 en total)(ver Figura 4.1).

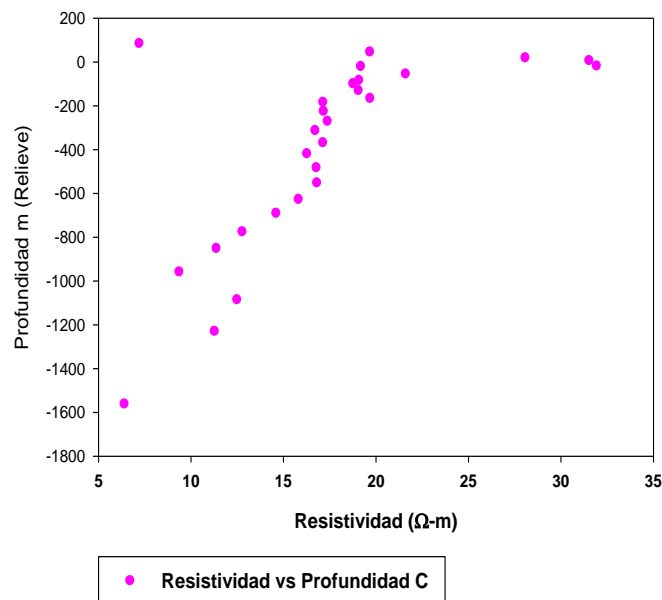


Fig. 4.1 Diagrama final de resistividad en función de la profundidad de un sondeo MT, aplicando la transformación de Bostick, incluyendo la corrección de elevación e instrumental (Estación 001).

Los sondeos MT calculados en profundidad, se cargaron utilizando el Programa GOCAD como un objeto “Point Set”, respetando la geometría de campo para cada estación y ordenados según su posición geográfica [Eje X = Este, Eje Y = Norte, Eje Z = Profundidad], y unacuarta variable correspondiente a la propiedad de estudio calculada, representada con atributos de colores (Escala de 0 a 40 ohm-m) (Figura 4.2).

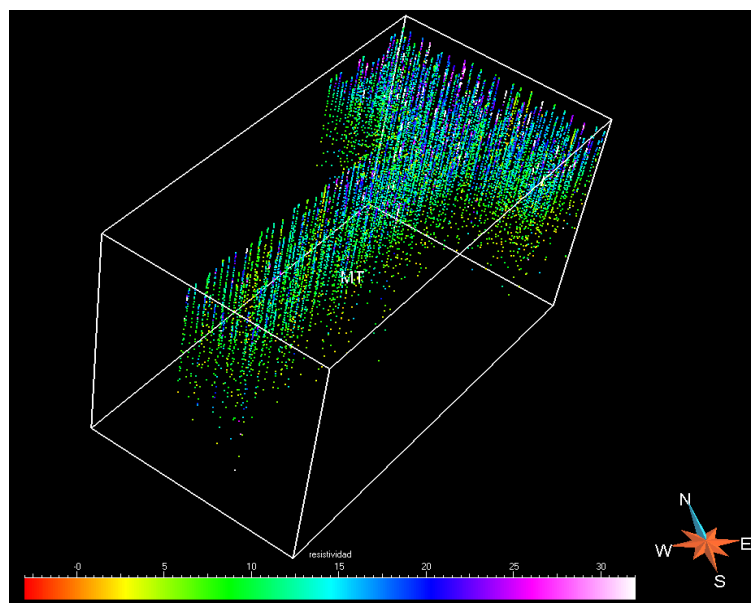


Fig. 4.2: Resistividades de Sondeos MT, representadas a través del programa GOCAD.

4.2 - Volumen de Resistividades MT

Debido a la gran cantidad de puntos procesados del sondeo MT y a fin de conservar la mayor resolución espacial de los datos adquiridos en el mismo, se construyó mediante GOCAD un objeto tipo “*Voxel*”, es decir, una grilla regular en tres dimensiones con celdas centradas para elaborar el volumen de resistividades (modelo propuesto), cuyos números de nodos son: 100 (u), 100 (v), 200 (w) que equivale a un total de 2 millones de celdas. Este objeto tipo *Voxel* permite crear una propiedad geofísica (Resistividad en nuestro caso) y propagarla mediante métodos de interpolaciones o simulaciones geoestadísticas.

Con el propósito de no producir alteraciones en el set de datos obtenidos por IMAGEM, se utilizó como método de interpolación el “*Kriging Simple*” el cual es un estimador lineal insesgado ampliamente utilizado en la geofísica (Figura 4.3).

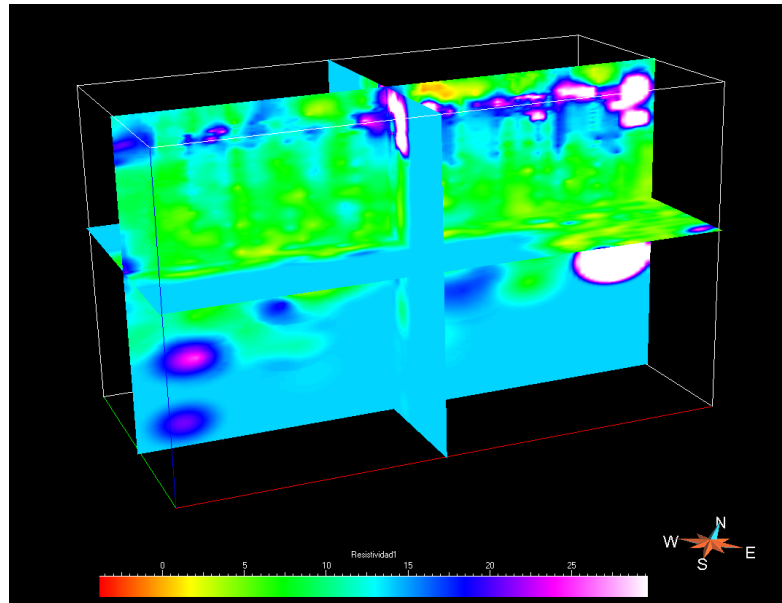


Fig. 4.3 Modelo de resistividades para toda extensión territorial del proyecto Barinas-Este a partir de los datos de MT. [Generado en GOCAD de Paradigm].

4.3 - Validación del Volumen de Resistividades Obtenido Mediante Sondeos MT

Se validaron los datos de resistividades obtenidos desde el volumen, comparándolos con los medidos en los dos pozos exploratorios disponibles (A y B)(Ver Figura 4.4).

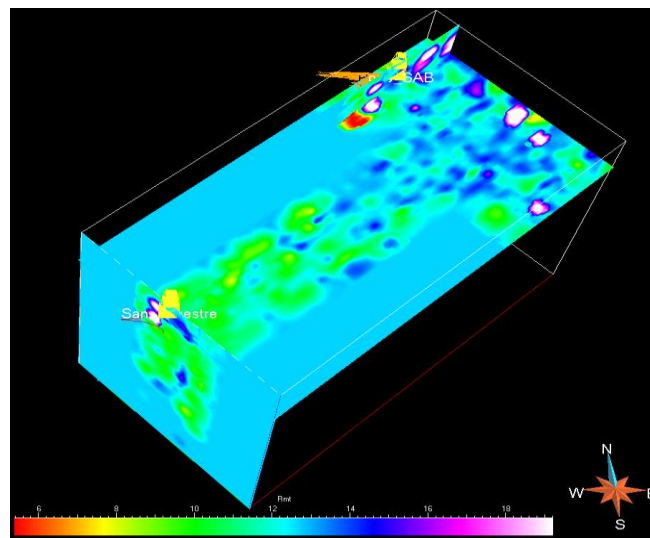


Fig. 4.4 Ubicación de los pozos exploratorios sobre la región de estudio (Pozos Identificados con color amarillo) [Generado en GOCAD de Paradigm].

A partir del volumen de resistividades creado con los sondeos MT, se extrajo la propiedad de resistividad utilizando una herramienta del programa GOCAD, que permite hacer una proyección vertical de dicha propiedad en la región de las celdas más cercanas a la trayectoria del pozo y visualizarlo como un “Registro sintético” o “pseudoregistro de pozo”, de tal manera que se pueda realizar una comparación directa entre las resistividades del modelo y las adquiridas por la herramienta en pozo. En las figuras 4.5 y 4.6 se muestran de manera más detallada estos resultados.

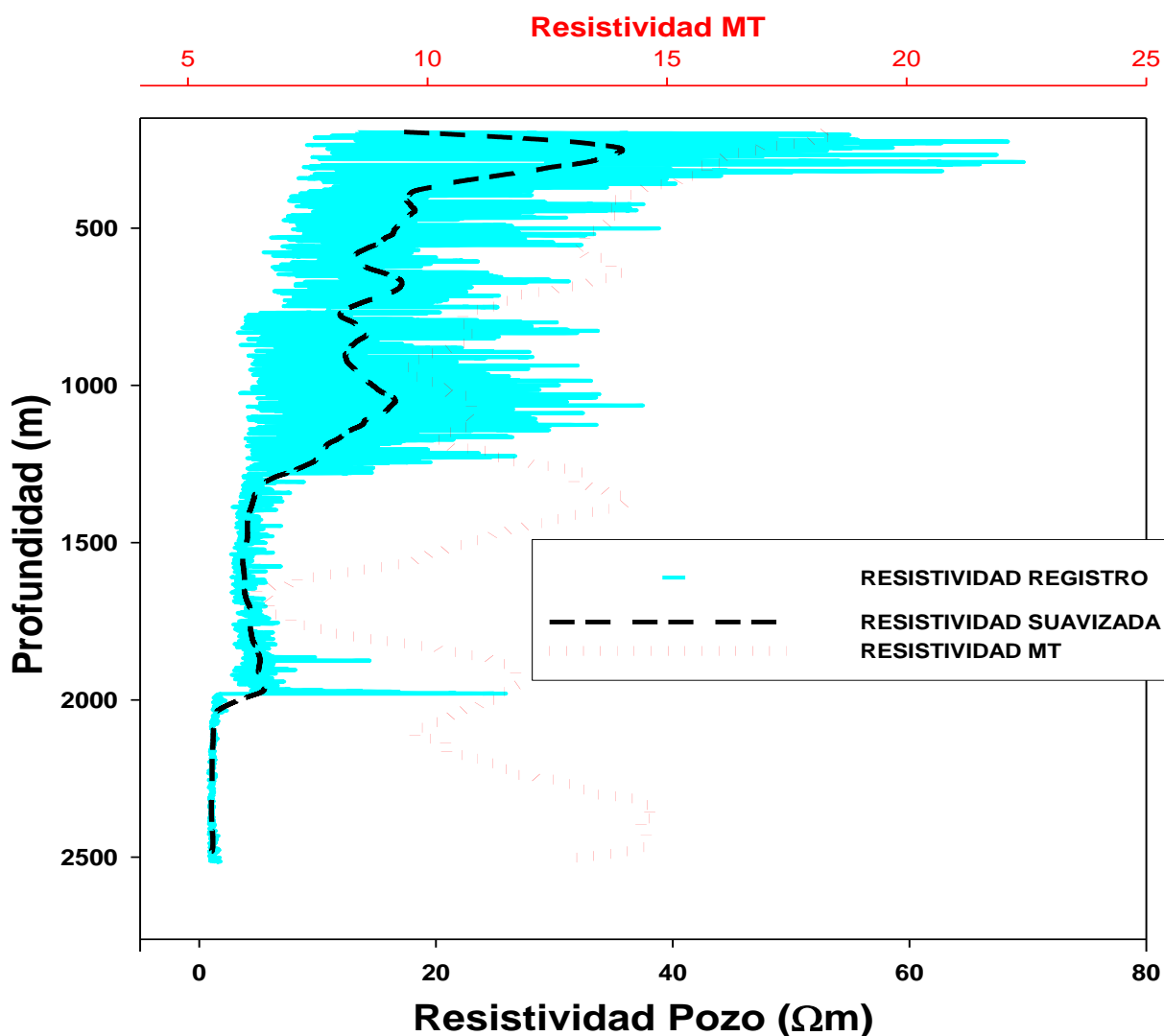


Fig. 4.5 Comparación entre la resistividad profunda del pozo A y la resistividad obtenida mediante el volumen de MT.

En la Fig. 4.5 se representa en color Rojo la resistividad del modelo MT, es decir, un promedio en profundidad extraído de las celdas más cercanas a la ubicación del pozo, y en color “cyan” el perfil de resistividad adquirido en el pozo exploratorio A.

Observando dicha gráfica se puede notar que ambas medidas van en la misma tendencia de la variación de la resistividad con la profundidad, pero la medida tomada desde el pozo con mayor precisión (muestreada cada ~ 15 cm) y una medida más global obtenida desde MT (muestreada cada ~100 m). Este resultado, es similar a los obtenidos en varios pozos reportados por PDVSA en la región de Tascabaña, estado Anzoátegui [5]. Para determinar la correlación adecuada en el análisis comparativo de estos métodos, en esta investigación se utilizó la técnica de suavizado sobre el registro de resistividad del pozo (Curva Negra – Fig. 4.5). Con la finalidad de encontrar el mejor ajuste, se fue variando el grado del suavizado en orden decreciente, partiendo de grado 10 hasta llegar a grado 5, ya que este último proporcionó el mejor ajuste con la curva de MT.

Sin embargo de la gráfica anterior es importante resaltar que para la zona de estudio el método MT posee una limitación, que es la profundidad de penetración, ya que a pesar de estar calculada para aproximadamente 2000 metros, el sondeo real en campo para la mayoría de estaciones se encontraba entre 1300 y 1500 metros, por lo tanto la distribución de datos es menor por debajo de 1500 metros, lo que hace que la interpolación kriging sea mucho más abrupta y el comportamiento de ajuste tienda a alejarse con los datos de pozo por debajo de esta profundidad.

Además del pozo A, también se comparó con los datos disponibles de otro pozo exploratorio, obteniendo el resultado mostrado en la siguiente Figura:

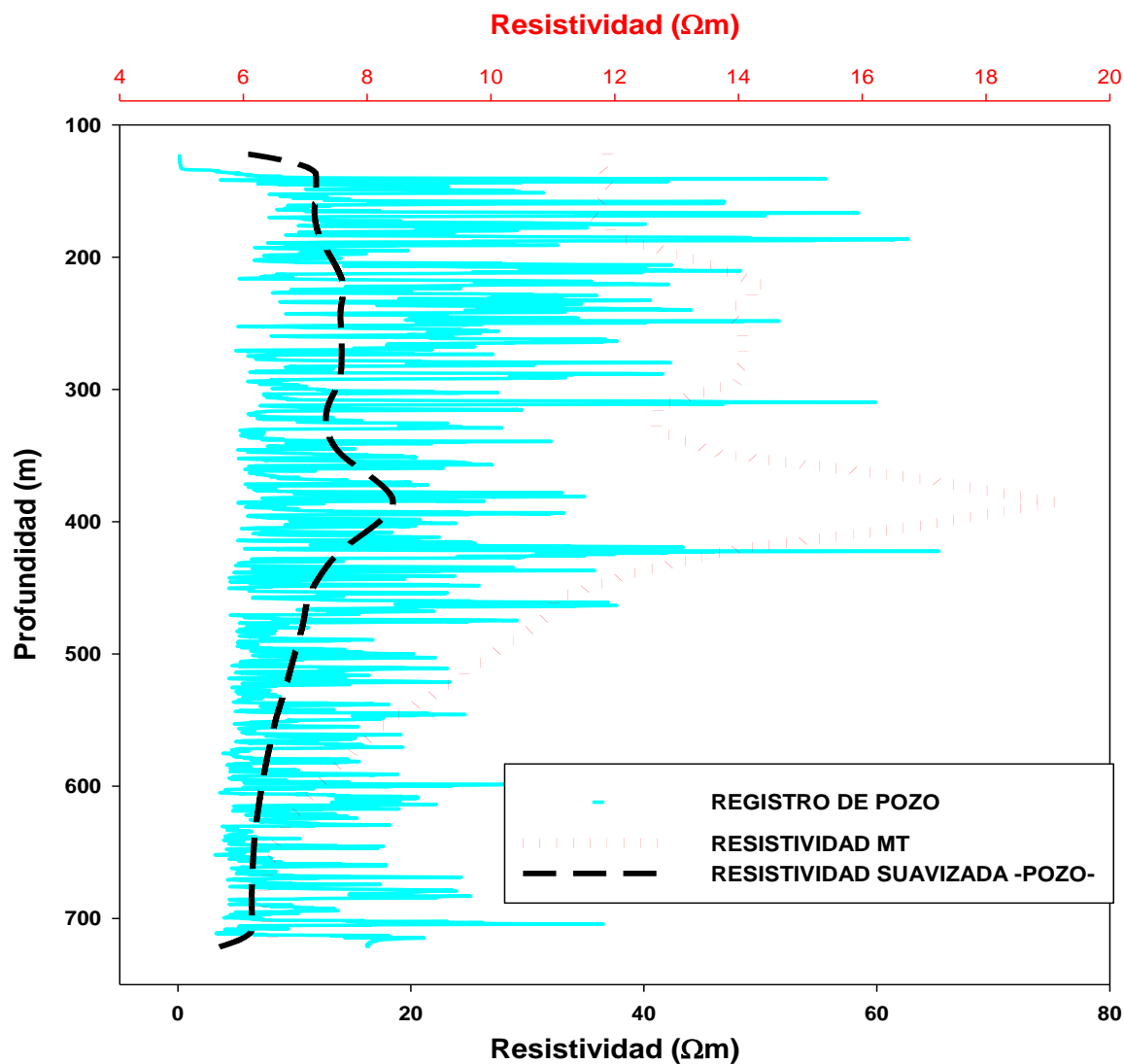


Fig.4.6: Comparación entre la resistividad profunda del pozo B y la resistividad obtenida mediante el volumen de MT.

Para el ajuste de los datos se hace uso de la técnica propuesta para el pozo A, obteniéndose nuevamente una buena correlación entre el comportamiento del registro MT, con el obtenido mediante un suavizado de grado 5 de los datos de pozo, es decir, se encuentra una correspondencia entre los valores máximos y mínimos de ambas curvas.

La correlación de la resistividad entre los datos de registros de pozo y MT, le dan un alto nivel de confiabilidad al Volumen de resistividades propuesto, lo cual constituye un aporte al flujo de trabajo de la Exploración y Producción de yacimientos, en cuanto a la localización de

anomalías de resistividad asociadas a hidrocarburos, ya que se podría disminuir los costos de inversión en la perforación de nuevos pozos exploratorios que en sí, son muy costosos comparados con el sondeo MT, además de garantizar una mayor eficiencia en la planificación de la futura extracción dichos yacimientos.

4.4 – Identificación de Anomalías Resistivas Significativas Mediante el Volumen de MT

a) **Anomalías resistivas significativas en profundidad:** Una vez validada la confiabilidad del Volumen MT propuesto con los datos de pozos, se procedió a realizar un barrido de planos XY que cortan al eje Z (Profundidad), de tal manera de visualizar y localizar las anomalías más importantes dentro de la región. El criterio utilizado para selección de los planos mostrados fue realizado de manea cualitativa donde se observaron cambios significativos de resistividad. (Figura 4.7 y 4.8):

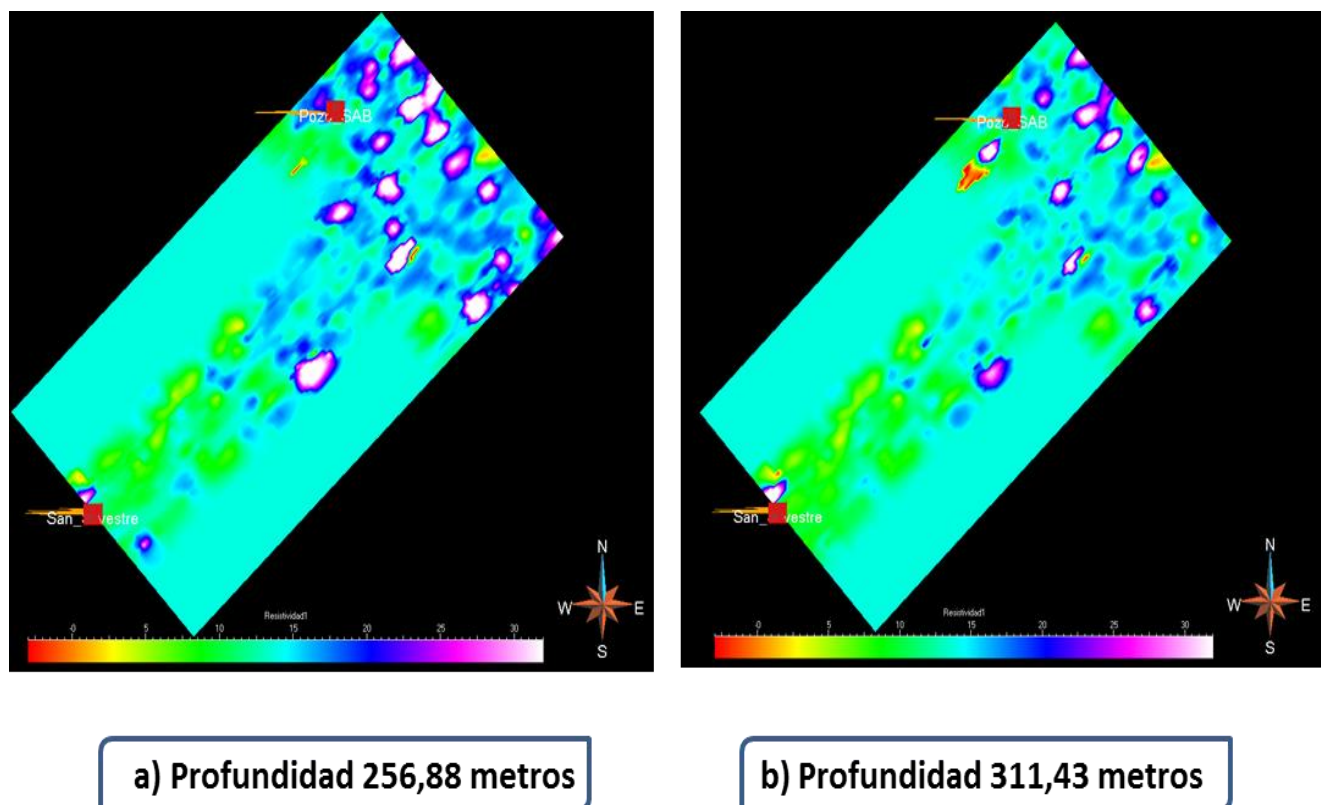
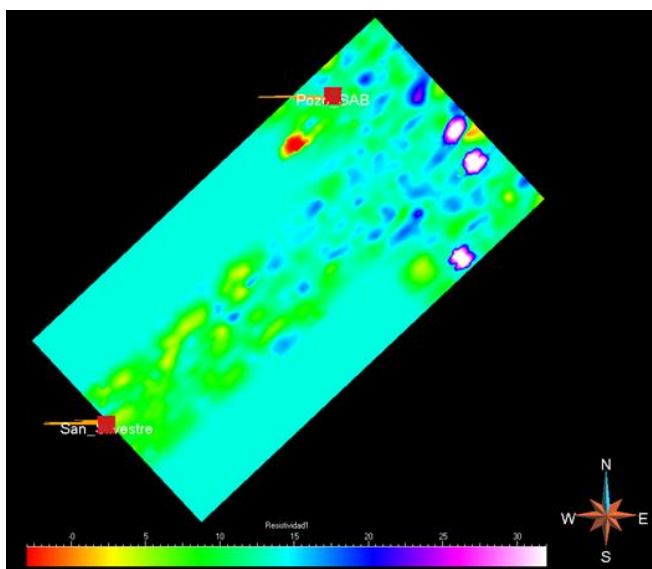
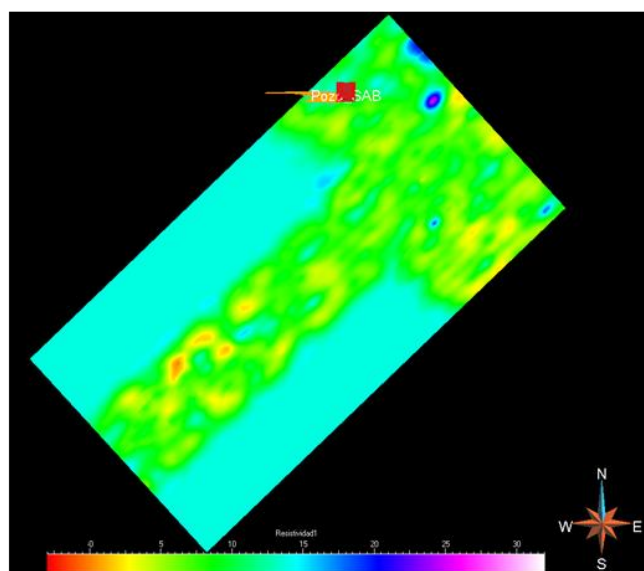


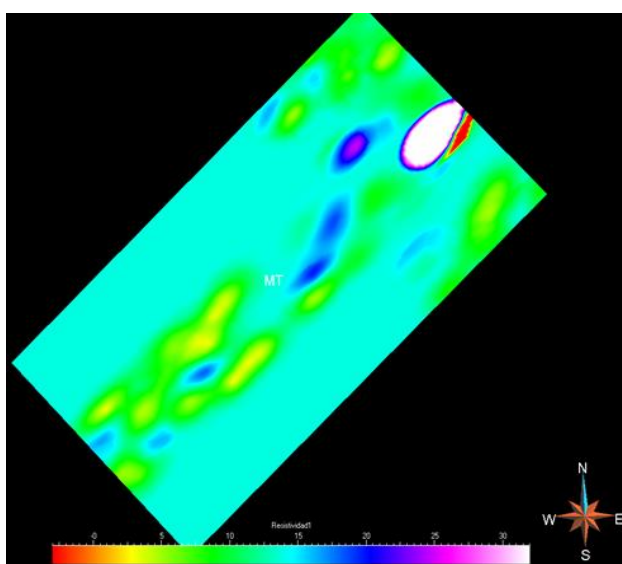
Fig. 4.7: Corte al eje Z con un plano XY, a la profundidades señaladas en las imágenes clasificadas de la a) a la b) [Volumen MT generado con GOCAD -Paradigm-].



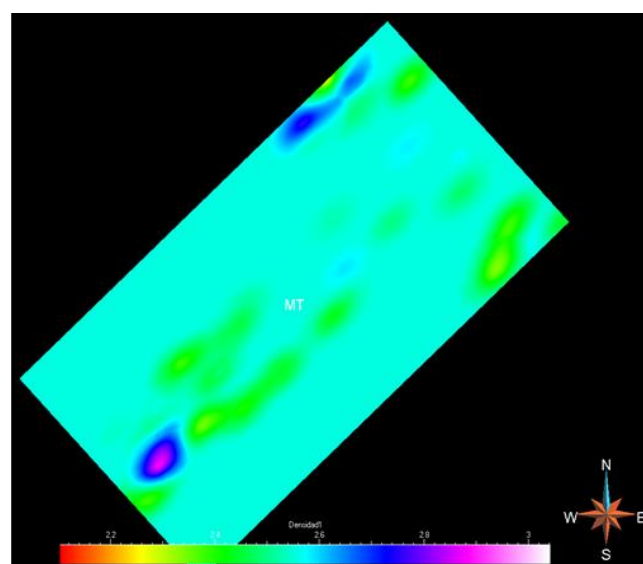
c) Profundidad 438,70 metros



d) Profundidad 1002,32 metros



e) Profundidad 2002,29 metros



f) Profundidad 2311,37 metros

Fig. 4.8: Corte al eje Z con un plano XY, a la profundidades señaladas en las imágenes clasificadas de la **c)** a la **f)** [Volumen MT generado con GOCAD -Paradigm-].

Al observar la Figura 4.7 a) el corte para una profundidad constante de 256,88 metros se puede apreciar numerosos máximos locales distribuidos en toda el área del proyecto (identificados con degradaciones de colores azul, morado y blanco). Destacan anomalías resistivas que se concentran principalmente al noreste (NE), una anomalía central y una anomalía hacia la región Suroeste; esta última coincide geográficamente con la ubicación del pozo B. Este Comportamiento se mantiene similar en un corte a 311,43m (Figura 4.7 b), es decir, en un espesor 55 metros aproximadamente.

Realizando un corte a una profundidad constante de 438,70 metros, se mantienen distribuidas las anomalías resistivas hacia el Noreste del proyecto, pero en menor cantidad, se distinguen 3 grandes máximos (Valores) Ver Figura 4.8 c)

Los valores menores de resistividad se encuentran dispersos en diferentes localidades (identificados con escalas de colores degradadas desde el rojo, pasando por el amarillo hasta el verde) pero los más importantes se encuentran ubicados hacia el sureste y noreste del área del proyecto, y los valores más bajos registrados alcanzan un mínimo $1 \Omega\text{-m}$. de en la zona noroeste del proyecto.

Entre 800,00 y 1002,32 metros (Figura 4.8d) el comportamiento es contrario, predominan las bajas resistividades considerablemente con respecto a las secciones anteriores, entre 1 y $12 \Omega\text{-m}$. Ello significa que los cuerpos litológicos presentes en cada una de esas profundidades, bien pudieran contener un elevado contenido de fluidos conductores como aguas subterráneas o arcillas de grano muy fino que representan cuerpos de muy alta conductividad eléctrica. No obstante, no es sencillo distinguir con la información que se posee la presencia de aguas subterráneas o mineralizaciones conductivas.

A medida que se sigue barriendo las secciones sobre el eje Z y se alcanzan los 2002,29 m de profundidad (Figura 4.8e) se observa un gran contraste de resistividad, evidenciado por la presencia de fuertes anomalías ubicadas en la región noreste del proyecto, alcanzando valores máximos hasta de $200 \Omega\text{-m}$, con respecto los $9 \Omega\text{-m}$ que predominan en toda el área del proyecto para dicha profundidad, que puede estar asociado a la presencia de hidrocarburo.

4.5 - Integración de Datos MT con Registros de Pozo

Evaluación de Registros de pozos:

De las propiedades físicas medidas en los pozos, se pueden obtener características importantes acerca de la constitución de las rocas y fluidos del subsuelo, en las cuales es de nuestro particular interés identificar aquellas que sean potencialmente capaces de almacenar hidrocarburos. En este sentido se caracterizarán estas zonas a través de dos técnicas: a) Gráficas cruzadas y b) Evaluación convencional de registros de pozo en función de la profundidad. Por último se comprobará si esta información se corresponde con la información obtenida desde el volumen 3D de resistividades.

4.5.1. Pozo Exploratorio A:

a) Evaluación Litológica:

Mediante la utilización de gráficos cruzados para correlacionar el comportamiento de resistividad y rayos gamma, se pudo determinar un estimado de la litología de las formaciones que atraviesa el pozo.

Esta información litológica es relevante en la búsqueda de características de una posible “Roca Yacimiento”, ya que nos permite visualizar en donde se encuentran ubicadas zonas de interés prospectivo, tal y como se señala en el círculo negro de la figura 4.9, zonas con alta resistividad (comportamiento típico en hidrocarburos) en un posible intervalo arenoso.

Para la construcción de dicha gráfica se utilizaron valores típicos de rayos gamma en las litologías más comunes, sin embargo estos valores no son absolutos ya que pueden tener algunas variaciones dependiendo de la región de estudio.

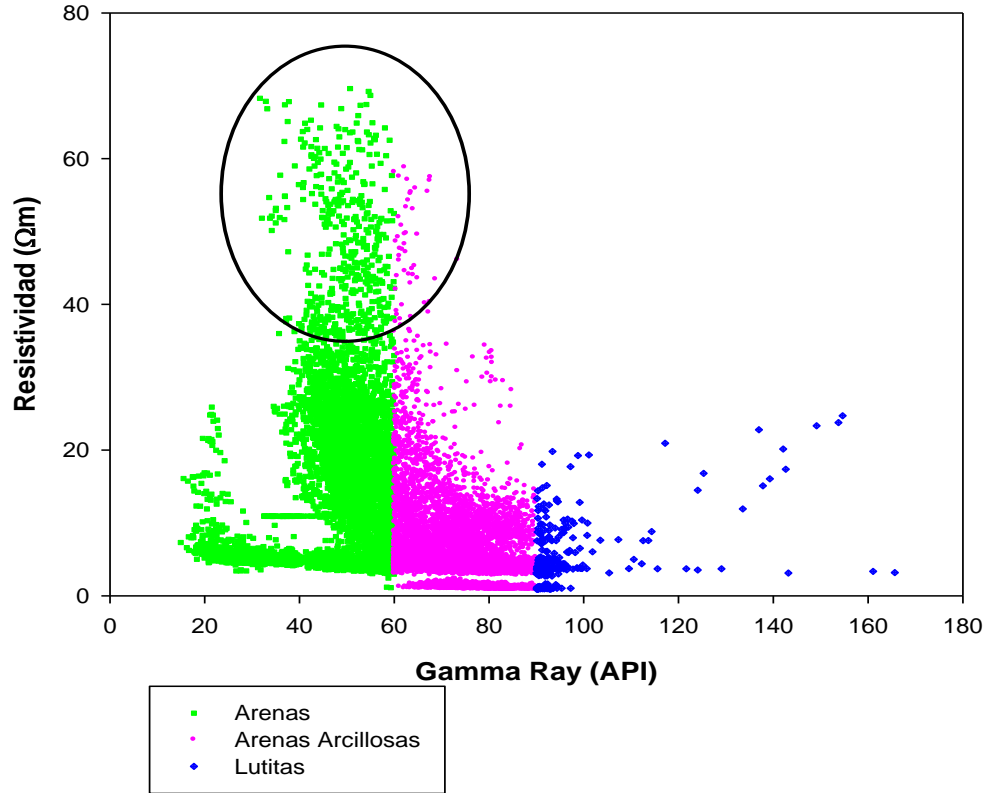
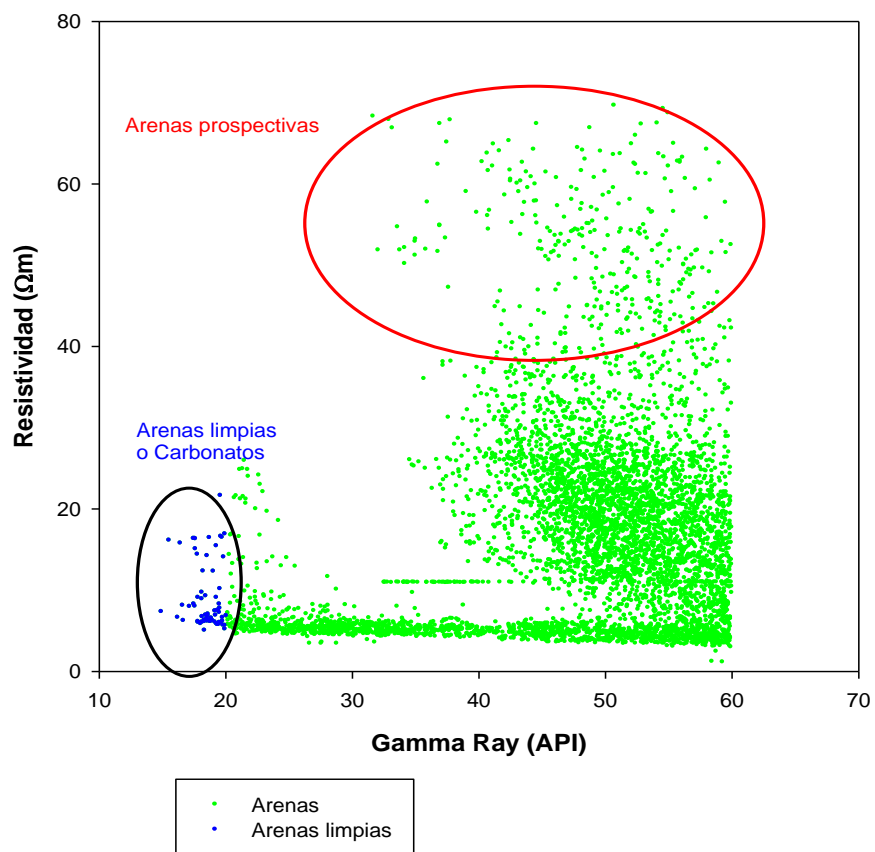


Fig. 4.9 Resistividad en función de rayos gamma (Pozo A).

En la Figura 4.9 se determinó que la mayor densidad de puntos a lo largo de la trayectoria del pozo A está ubicada en el rango correspondiente a las **arenas**, y en segundo lugar **arenas mezcladas con arcillas** o lo que comúnmente se le conoce como “Arenas sucias”, mientras que las **lutitas** se encuentran en una menor porción.

A partir de esta clasificación, nos centramos en las arenas cuyas características de porosidad y permeabilidad las convierten en rocas ideales para almacenar fluidos, cuyo comportamiento puede ser resistivos (hidrocarburos) o fluidos conductores (Agua) (Figura 4.10).



4.11 Arenas Prospectivas

De aquí se observa que la mayor cantidad de capas de arenas poseen valores bajos de resistividad (14-20 ohm) lo cual puede indicar la presencia de acuíferos. Sin embargo, aunque en menor cantidad, también hay una porción de estas capas potencialmente prospectivas en un rango de resistividades de 40-70 ohm.

Además se visualiza que una pequeña porción de las arenas con valores de GR de 15 a 20 API, lo que se conoce comúnmente como “arenas limpias”, que contengan posiblemente agua (Baja resistividad).

b) *Registros de Pozo*

Los registros de A, ubicado en el Edo Portuguesa, se tomaron con la finalidad de evaluar los posibles fluidos presentes en las formaciones Masparrito y Escandalosa, así como caracterizar los yacimientos, para determinar su potencial productivo. Fueron considerados para este trabajo los registros de Densidad, Rayos Gamma y Sónico.

Dado que el registro de densidad se corrió desde 122, 22 metros, se infiere que el objetivo de interés se ubica por debajo de esta profundidad, por otra parte el registro de resistividad muestra por encima de 579, 12 metros valores altos con un máximo de $70 \Omega\text{-m}$,

La sección de interés se ubica en el intervalo de $\sim 612 - 1127$ metros, con una resistividad máxima de $30 \Omega\text{-m}$ y valores de densidad menores a $2,2 \text{ g/cm}^3$, y con porosidades 12% y 23% aproximadamente. Por debajo de esta columna incrementan los valores de Rayos Gamma que indican un aumento del contenido de arcilla y la resistividad disminuye (hasta $5 \Omega\text{-m}$), acompañado de lecturas mayores de densidad (menor porosidad). Las condiciones del hoyo son buenas, es decir, no presenta muchos derrumbes.

En un intervalo entre 1544 metros y 1828 metros, se observa un máximo de resistividad, asimismo un incremento de la densidad (Valores mayores a 2.2 g/cm^3), quizás por un incremento de la compactación de las rocas, lo cual disminuye la porosidad. A medida que aumenta la profundidad se encuentran valores de Rayos Gamma mayores a 60 API, además de valores de resistividad que decaen considerablemente (menores a $3 \Omega\text{-m}$), además de derrumbes en el hoyo, todo esto indicaría que por debajo de este intervalo no existen desarrollos prospectivos.

Comparación de Secciones de MT y A

Una vez identificados los intervalos con potencial prospectivo, mediante el análisis del conjunto de medidas físicas realizadas en pozo, y las gráficas cruzadas, se procedió a evaluar secciones del Voxet MT perpendiculares a la ubicación del pozo en superficie, para visualizar y comparar el comportamiento de MT en estos intervalos de interés.

La primera sección denominada AA' con orientación desde A = Suroeste hasta A' = Noreste (Ver Figuras 4.12 y 4.13).

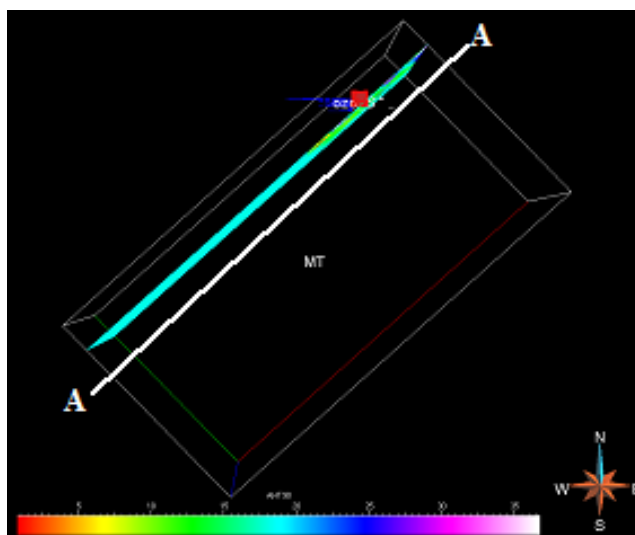


Fig. 4.12 Sección sobre el volumen MT con orientación AA' (Vista en planta) [Generado en Gocad Paradigm].

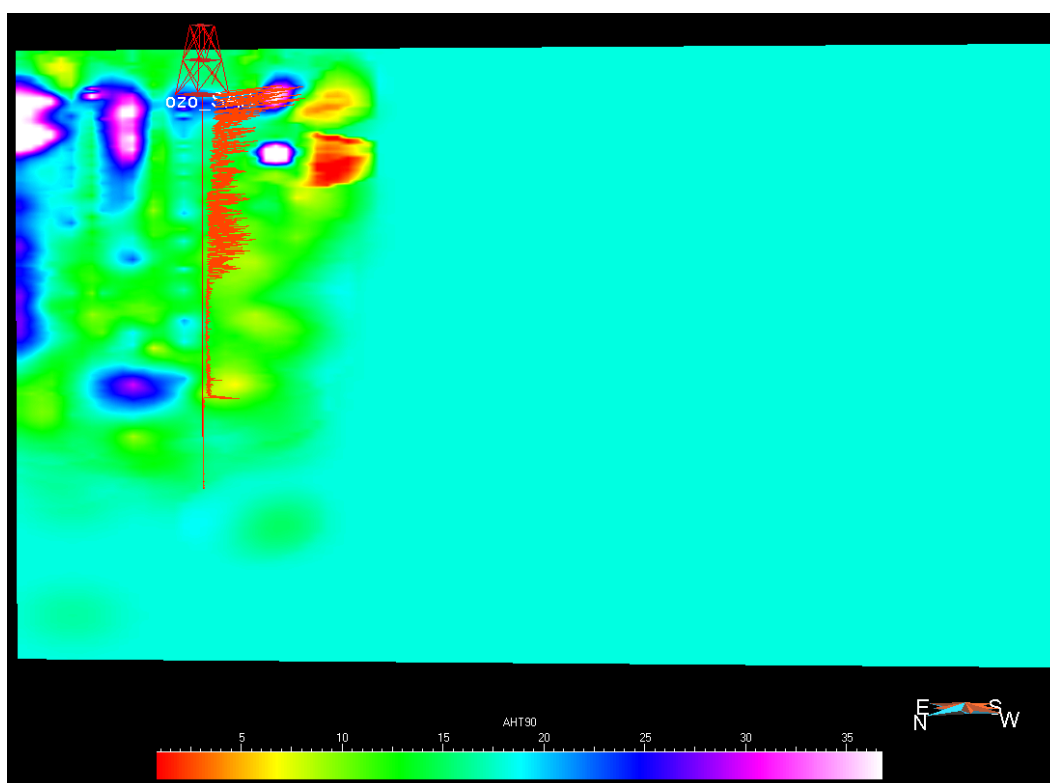


Fig. 4.13 Sección sobre el volumen MT con orientación AA' (Vista lateral) [Generado en Gocad Paradigm].

La sección AA' muestra una anomalía con un comportamiento de forma vertical de un contraste de resistividad, en el rango aproximado de 16 a 40 Ω -m. Cabe destacar coincide con el comportamiento de los registro de pozo, para intervalos entre 500 y 1800 metros.

La siguiente Sección BB' cuya orientación viene dada por B = Noroeste y B' = Sureste tal y como se muestra en la Figura 4.14.

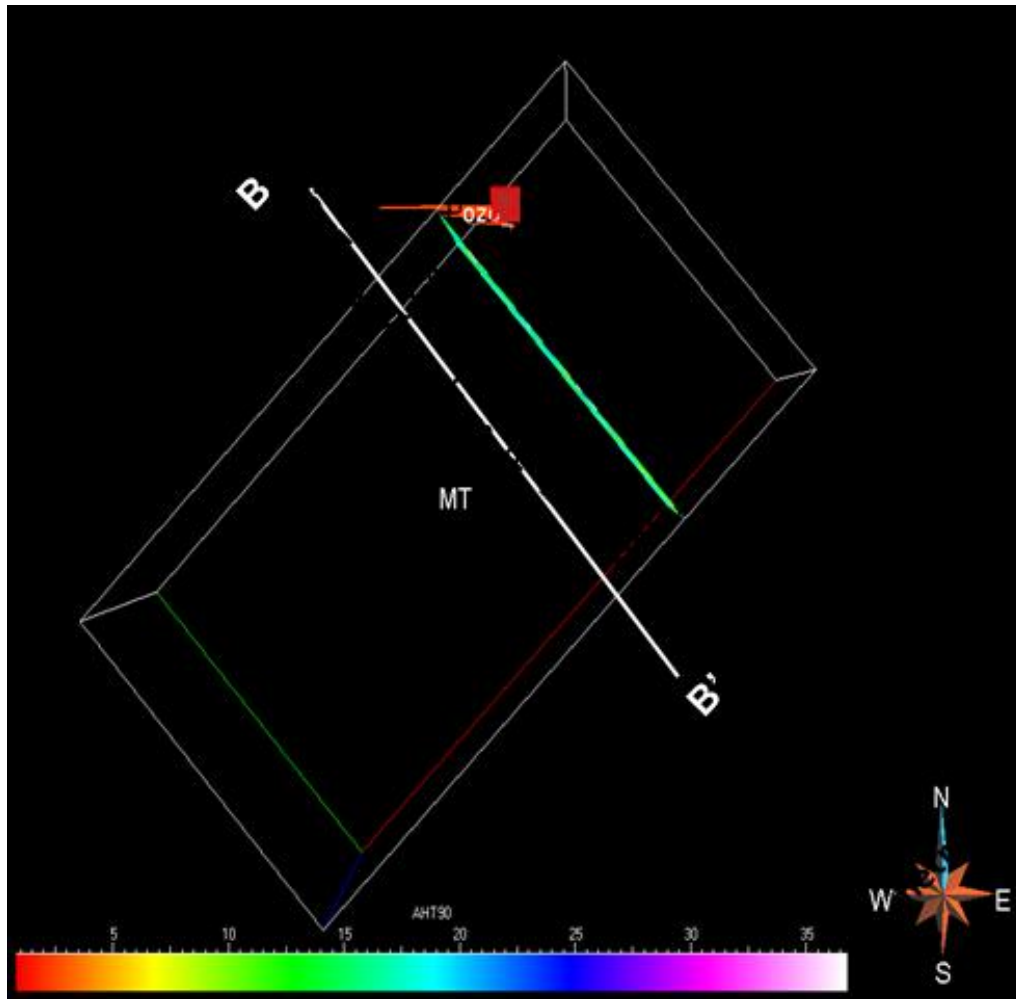


Fig. 4.14: Sección sobre el volumen MT con orientación BB' (Vista en planta) [Generado en Gocad Paradim].

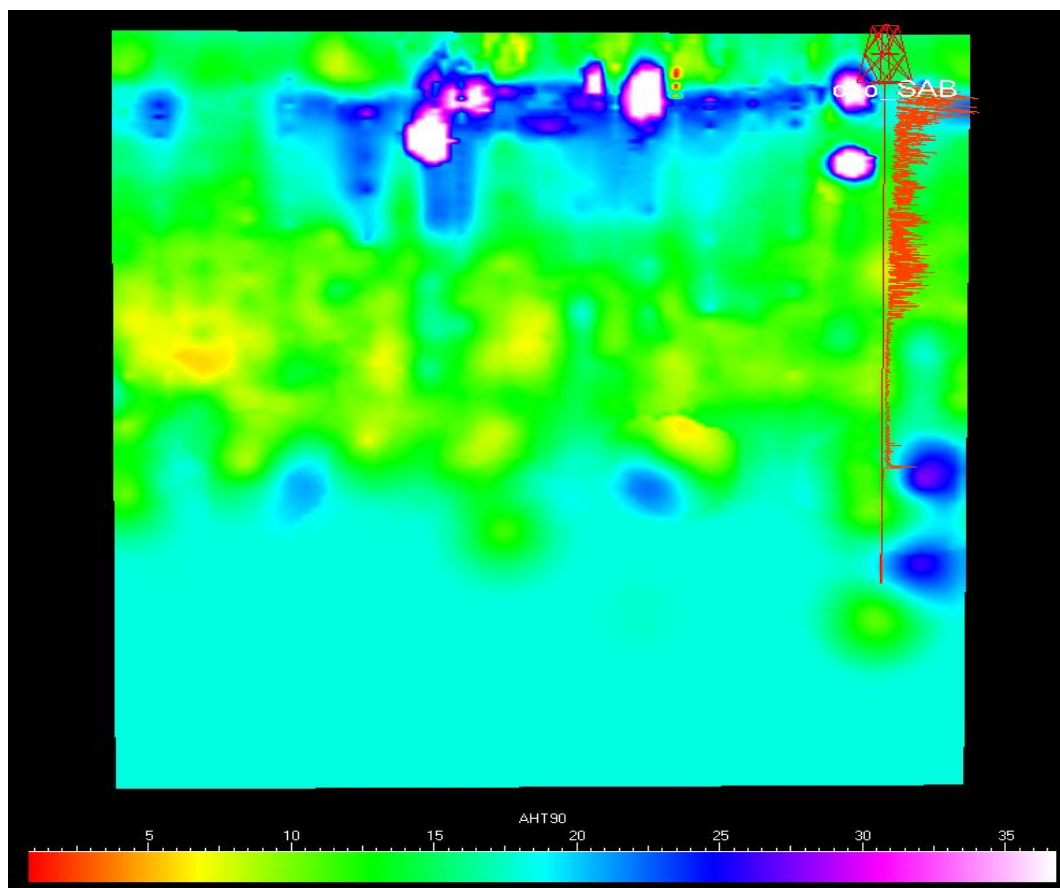


Fig. 4.15: Sección sobre el volumen MT con orientación BB' (Vista lateral) [Generado en Gocad Paradigm].

En Figura 4.14 se detalla una secuencia de anomalías en morado y azul que se extienden a lo largo de la región BB' y que se encuentran aproximadamente a profundidades menores de 450 metros, con un contraste de resistividad que oscila en un rango aproximado de 35 a 96 Ω -m; además de otras anomalías en 20 Ω -m metros que coincide con un intervalo de interés mostrado en el análisis anterior.

4.5.2 - Pozo B

Se siguió el mismo procedimiento para el análisis de datos que se empleó en el pozo A correlacionando las variables de los registros para determinar la litología, y los intervalos en profundidad (Figura 4.16).

a) *Evaluación Litológica:*

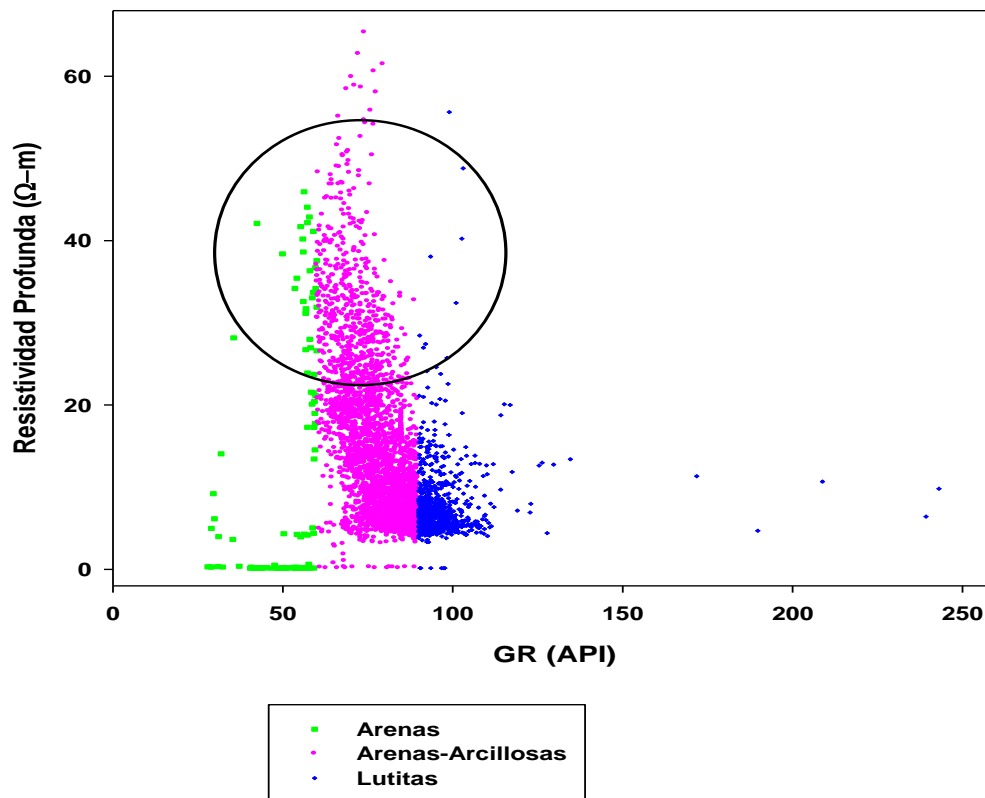


Fig. 4.16: Resistividad Profunda en función de los rayos Gamma del pozo A.

Haciendo un análisis en la distribución de los datos considerando los valores de resistividad profunda versus rayos gamma a lo largo de todo el pozo San silvestre, se encuentra que la mayoría de éste está compuesto por arenas mezcladas con arcillas (Rayos Gamma 60 a 90 API). En segundo lugar capas lutíticas correspondientes a valores altos de rayos gamma mayores a 90 API y en menor cantidad arenas más limpias, es decir, arenas con menos cantidad de arcilla por tanto bajos valores de rayos gamma.

De la clasificación litológica anterior se determinó que las principales zonas resistivas (Valores de resistividades mayores a 30 Ω-m). se encuentran ubicadas en capas de Arenas Arcillosas [Círculo negro, figura 4.16], por lo tanto se centra la atención en dicha zona. Sin embargo se observa que dentro de estas arenas, existe una población importante de datos cuya

resistividad es baja entre 3 y 10 $\Omega\text{-m}$, lo cual puede asociarse a posibles acuíferos (Ver Figura 4.17, círculo azul).

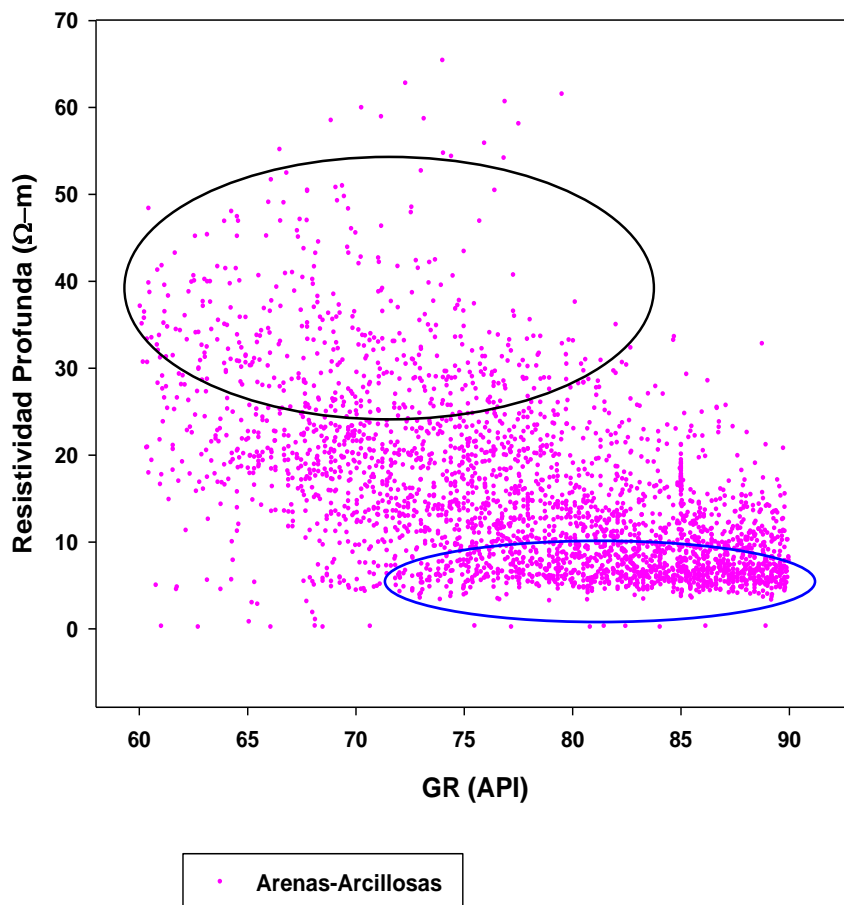


Fig. 4.17: Arenas prospectivas en el pozo San Silvestre.

Registros de Pozo

Los registros de este pozo exploratorio B ubicado en el Edo Portuguesa, se midieron con la finalidad de evaluar los posibles fluidos presentes en dos intervalos en la Formación Escandalosa (Miembros “O” y “P”), así como las características de las rocas yacimientos, para determinar su potencial productivo.

A diferencia del pozo A, en este pozo se dispone de menos información, ya que solo se cuenta con registros eléctricos, temperatura y Rayos Gamma. Dado que los registros sólo se corrieron hasta 600 metros se infiere que el objetivo se encontraba a somero (Profundidades menores a 1000 metros) o que el pozo pudo ser abandonado por problemas operativos. Específicamente se observan intervalos tres de interés: 186 metros ($\sim R=62 \Omega\text{-m}$, $72 \text{ GR}=65\Omega\text{-m}$, 99API), 310 metros ($\sim R=60,97\Omega\text{-m}$ y $\text{GR}=59,67$) y 418 metros $R= 65,33\Omega\text{-m}$ $\text{GR} = 62,50 \text{ API}$, Los valores de resistividad de estos intervalos podrían indicar zonas con presencia de crudo, sin embargo los valores de rayos gamma indican que pudiesen encontrarse en cuerpos de arenas no muy limpios.

Secciones de MT y Pozo B

Al igual que se hizo para B se verificó si la interpretación proveniente de las gráficas cruzadas y los registros en función de la profundidad se corresponde con el análisis del volumen de MT, en las regiones adyacentes al pozo. En este caso se trazaron las secciones identificadas como: Sección CC' y sección DD' (ver Figuras 4.18 y 4.19)

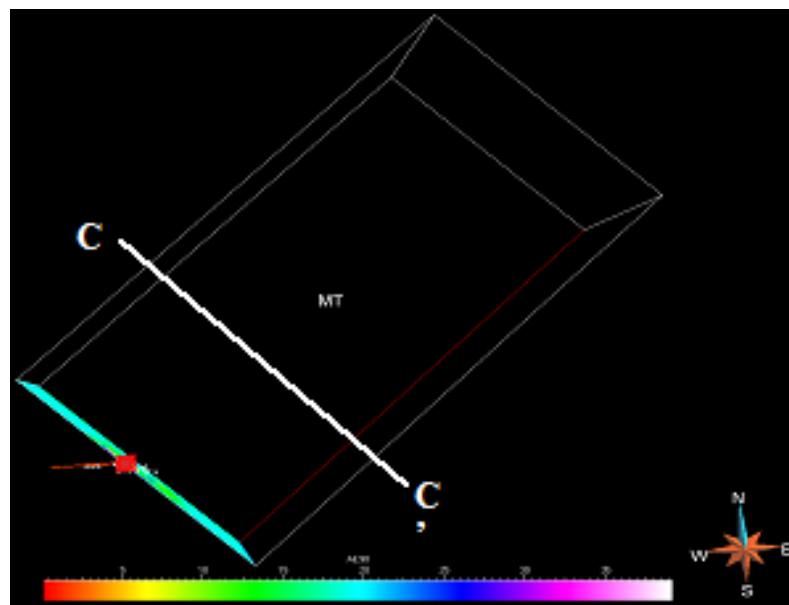


Fig.4.18: Sección 3 del volumen MT con dirección C = Noroeste y C' = Sureste (Vista Superior)

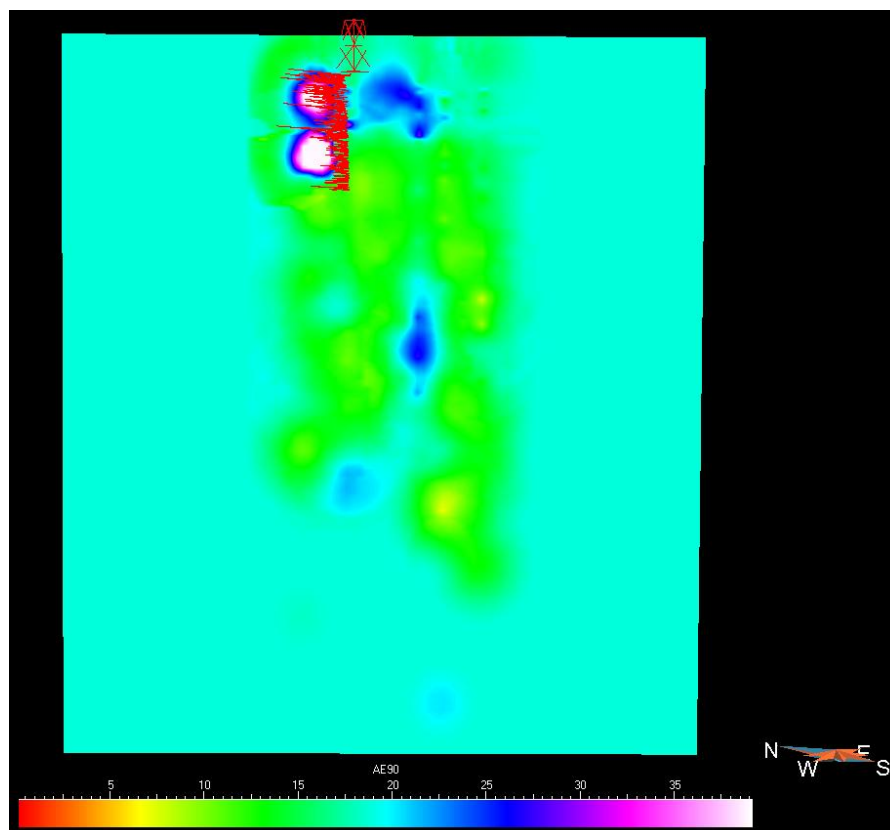


Fig. 4.19: Sección sobre el volumen MT con orientación CC' (Vista lateral) [Generado en Gocad Paradigm].

En la sección CC' se detalla una anomalía con un comportamiento de forma vertical con un contraste de resistividad en el rango aproximado de 22 a 57 Ω -m, ubicadas entre 100 y 400 metros, y que cabe destacar coincide con la región muestreada en el pozo exploratorio B.

Es de gran importancia destacar que la perforación del pozo B, campo Silvestre, estado Barinas, descubrió reservas recuperables probadas de petróleo de 19,7°API, a nivel de la Formación Escandalosa, Miembro P, las cuales se encuentran por el orden de 1,347 MMBls de crudo. [Refe]

Posteriormente se obtuvo la sección 4 (DD'), cuya orientación está dada en el volumen MT por D = Suroeste y D' = Noreste, tal y como se muestra en la figura 4.20

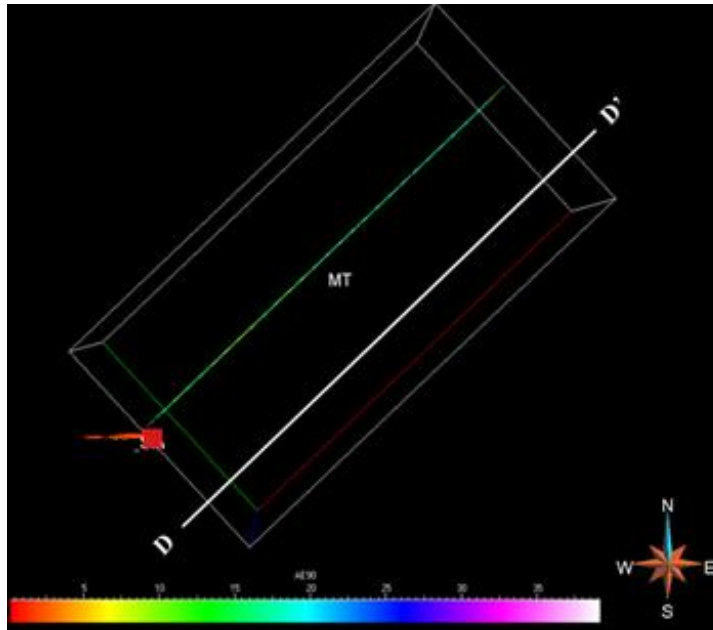


Fig. 4.20: Sección 3 del volumen MT con dirección D = Noroeste y D' = Sureste (Vista Superior).

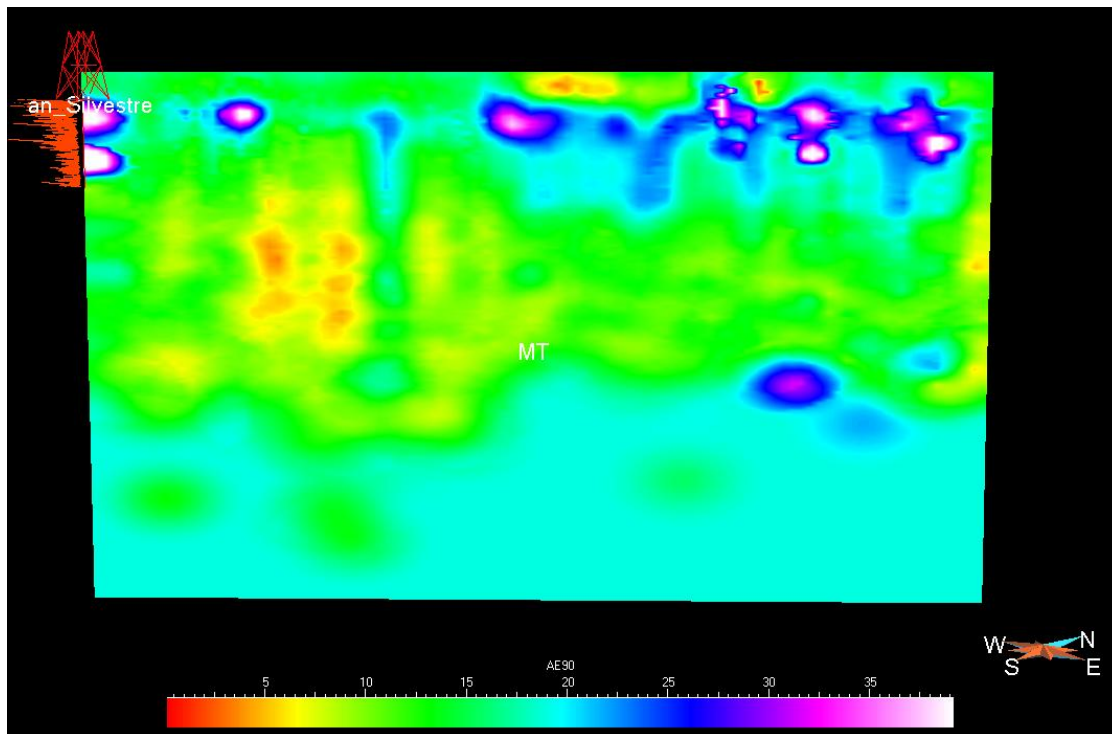


Fig. 4.21: Sección sobre el volumen MT con orientación DD' (Vista lateral) [Generado en Gocad Paradigm].

En las figuras 4.20 y 4.21 se detalla una anomalía resistiva de color morado y azul al igual que la vista en la sección anterior la cual coincide exactamente con la región muestreada por el pozo, es decir, que coincide con el crudo encontrado a nivel de la Formación escandalosa, por

lo tanto las anomalías de un rango similar que se observan en secuencia bien definida en la misma profundidad y hacia el Noreste podrían indicar una continuidad de presencia de hidrocarburo.

4.6 – Volumen de Densidades

Con el fin de proporcionar una caracterización más completa de la región de estudio, se creó un modelo de densidades a partir de los datos de inversión gravimétrica proporcionados por PDVSA, utilizando nuevamente “kriging simple” como método de interpolación, obteniéndose así el siguiente resultado (ver Figura 4.22):

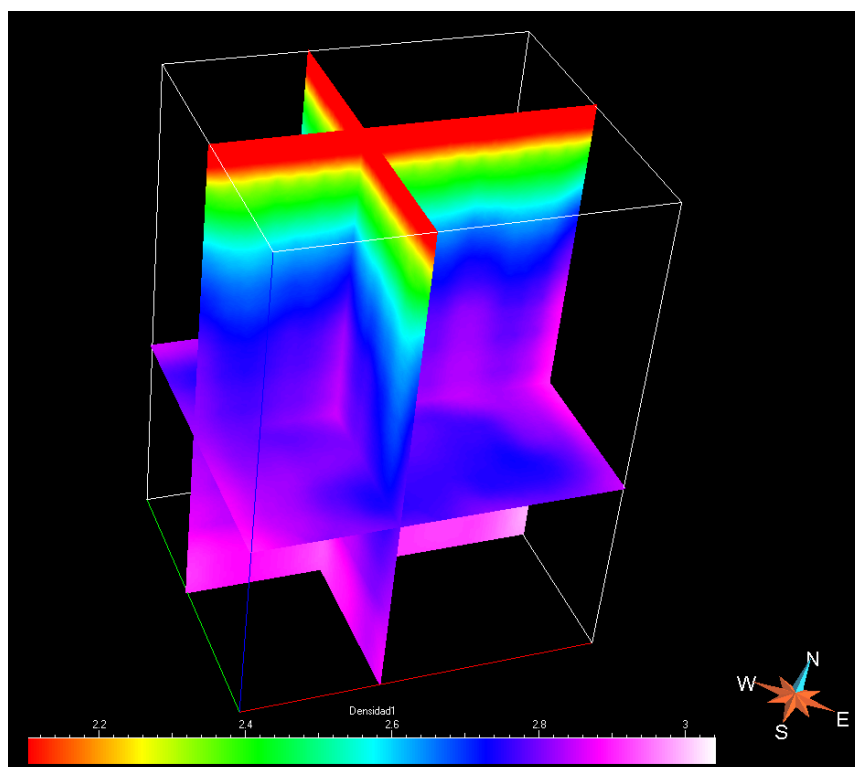


Fig. 4.22: Modelo de densidades para toda extensión territorial del proyecto Barinas-Este a partir de los datos gravimétricos [Generado en GOCAD de Paradigm].

En este modelo se aprecian espesores de seis capas claramente definidas con densidades que oscilan entre 2.2 g/cm^3 y 3 g/cm^3 , cuyo comportamiento es ascendente a medida que aumenta la profundidad.

4.7 - Integración De Datos (MT, Registros de Pozo y Gravimetría)

La información acerca de la estructura del subsuelo proporcionada por el modelo de densidades nos permite complementar la información de aquellas zonas interés prospectivo, conociendo el tipo de rocas según su densidad e integrándola con la resistividad de MT y la información de registros de pozos.

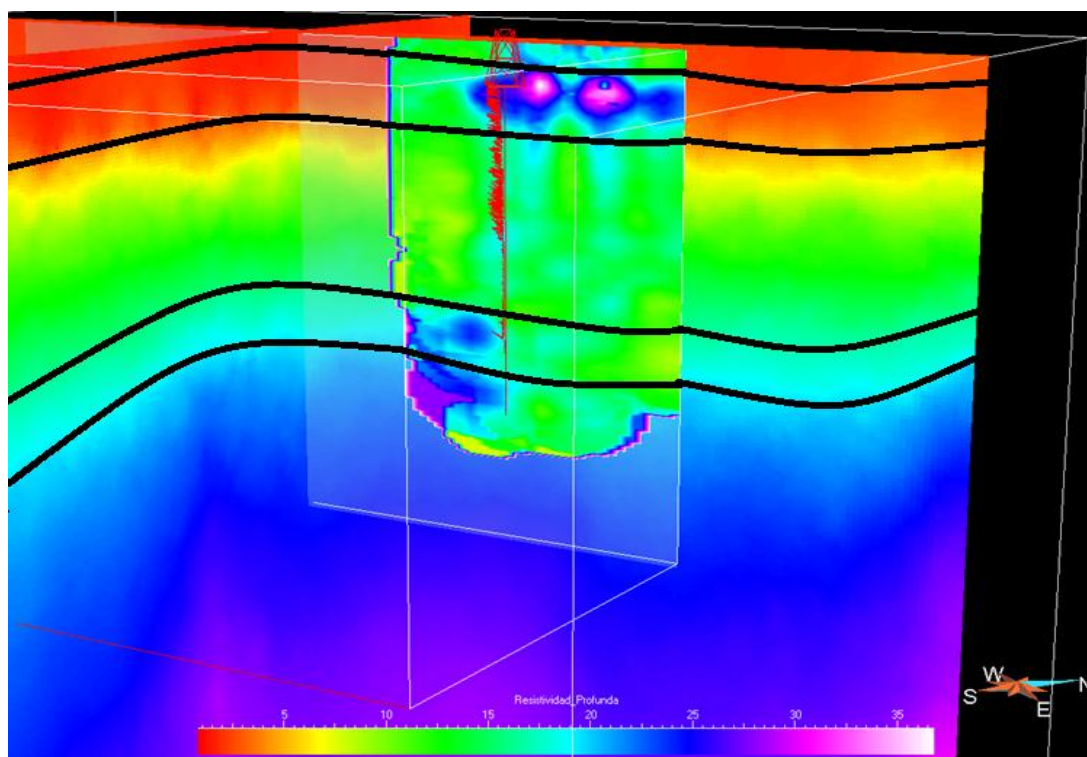


Fig.4.23: Integración de la información de los datos del pozo A con los volúmenes de densidad y resistividad.

En la figura 4.23 se muestra una sección del volumen MT que va desde el Suroeste al Noreste, de igual manera una en el volumen de densidades y el registro de resistividad en A. En esta integración se detalla que los máximos de resistividad del registro se correlacionan con las anomalías mostradas en el volumen MT (color morado y azul oscuro), a una profundidad sobre una misma capa de densidad que oscila entre $2,2 \text{ g/cm}^3$ lo cual corresponde a las densidades típicas de arenas. Para profundidades tal se observa la misma coincidencia entre el pozo y anomalía, pero con un incremento de la compactación de las rocas que se traduce en un aumento considerable de densidad ($2,6 \text{ g/cm}^3$).

Este comportamiento descrito en la integración también puede evidenciarse mediante una gráficas cruzadas de las variables densidad y rayos gamma adquiridas en los registros, como se muestra en la Figura 4.24:

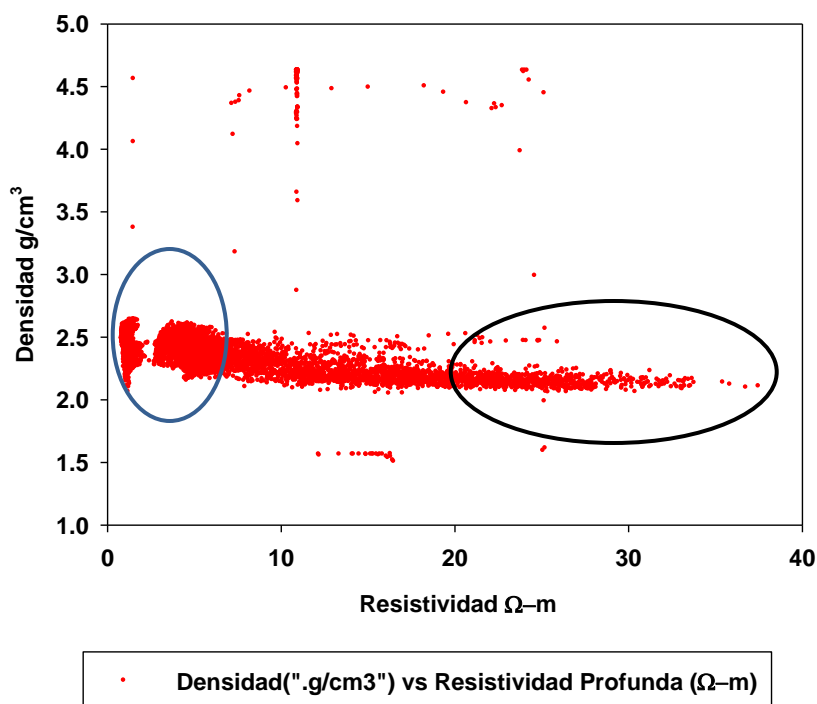


Fig. 4.24: Grafica cruzada de Densidad vs Resistividad.

De la Figura 4.24 se puede detallar claramente que la distribución de los datos (Círculo negro) para resistividades que pueden estar asociadas a hidrocarburos ($> 20 \Omega\text{-m}$) se encuentran en contenidas en capas de arenas que pueden ser porosas y permeables de densidad $2,2 \text{ g/cm}^3$. También se observan cuerpos muy conductores (Círculo azul), con resistividades menores a $5 \Omega\text{-m}$ posiblemente asociados a arcillas de grano fino o arenas con acuíferos, ya que su densidad oscila entre 2 y $2,5 \text{ g/cm}^3$.

Para el pozo San Silvestre no se hizo la integración con el volumen de densidades, puesto que no se contaba con el registro de densidades, además de que fue perforado solo hasta 600 metros y la resolución del método gravimétrico no permite visualizar capas delgadas de densidades.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

- ❖ Las resistividades obtenidas mediante el volumen MT se corresponden con el promedio de las resistividades medidas en los pozos exploratorios A y B, es decir, existe una correspondencia de máximos resistivos que podrían estar asociados a zonas prospectivas en una determinada profundidad para ambos datos.
- ❖ Lo anterior constituye un aporte a la prospección geofísica, ya que el método magnetotelúrico es menos invasivo y considerablemente más económico que el método directo de perforación de pozo.
- ❖ Se detectó por MT una anomalía resistiva vertical de rango (22 – 57) Ω -m en el intervalo de profundidad entre (100 - 400) m, que coincide con el intervalo explorado en el pozo B, en el cual fue detectado petróleo de 19,7°API.
- ❖ La mayor cantidad de anomalías resistivas detectadas por MT se encuentran ubicadas en la dirección Noreste del proyecto.
- ❖ Integrando MT, Registros de pozo y gravimetría, se halló que la mayor cantidad de anomalías resistivas se encuentran en capas de densidad $\sim 2,2 \text{ g/cm}^3$ las cuales podrían estar asociadas a arenizas, las cuales son rocas idóneas para almacenar hidrocarburos.

REFERENCIAS

- [1].Cagniard L. *Basic Theory Of The Magneto-Telluric Method Of Geophysical Prospecting* Geophysics **18**, 3 1953.
- [2].Vozoff, K. *The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins.* GEOPHYSICS. Society of Exploration Geophysics. (37), 98-141, 1972.
- [3].S. Goldberg y Y. Rotstein, *A simple form of presentation of magnetotelluric data using the Bostick transform*, 1982.*Geophysical Prospecting*, 30, 2 pag 211–216, Abril 1982.
- [4].Lovatini, A. *An integrated approach to exploration data in the Potiguar Basin, offshore Brazil.* FIRST BREAK, 28 5, 2010.
- [5].Medina M, *Caracterización Geofísica En La Zona Del Campo Tascabaña, Estado Anzoátegui, Aplicando Métodos Magnetotelúricos*, 2011.
- [6].Daqing de Venezuela, C.A, PDVSA servicios petroleros, *Informe Final (Volumen 3), levantamiento Barinas-Este 07G 3D*, 2012.
- [7].Schlumberger WEC. *Evaluación de Pozos.* Capítulo 1: Geología de Venezuela. (1997).
- [8].Simpson F. y Karsten B, *Practical magnetotellurics*, Universidad de Cambridge, Inglaterra, Primera edición, 2005.
- [9].Brady J. *et al*, *Sondeos Electromagnéticos para exploración de petróleo y Gas.* Oilfield review spring, –Schlumberger - **21**, 2009.
- [10].Imagem, Stratagent EH4, sitio oficial: www.geometrics.com
- [11].Gocad Software, sitio Oficial: www.pdgm.com
- [12]. Cheng A, *GOCAD in a hurry*, ASGA, Nancy, France 1997.
- [13]. Díaz, M.A, *Geoestadística aplicada*, UNAM, Instituto de Geofísica, México, 2002. Disponible en: <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>.
- [14]. Estrada L, *Prospección gravimétrica*, Geofísica-FACET-UNT, 2008.
- [15].García N, *Introducción al módulo Base (Earth Decision Suite 2.1)*.
- [16]. Regalado, J. *Un modelo 3D de la densidad del subsuelo en el Graben de Espino: un aulacógeno Jurásico en el oriente de Venezuela.* PDVSA, 2010.

