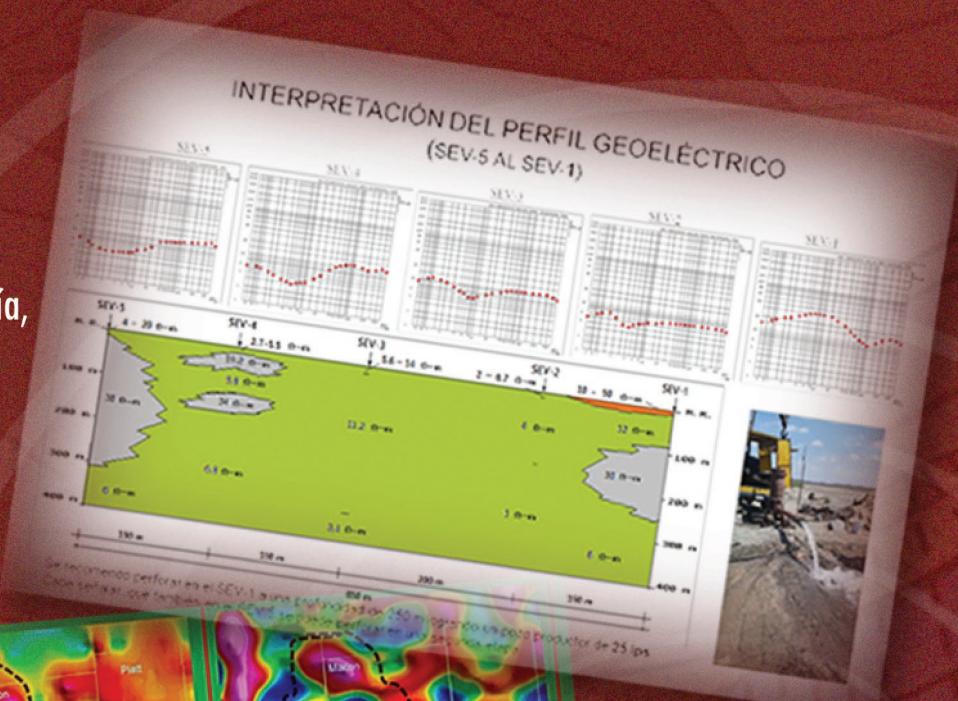
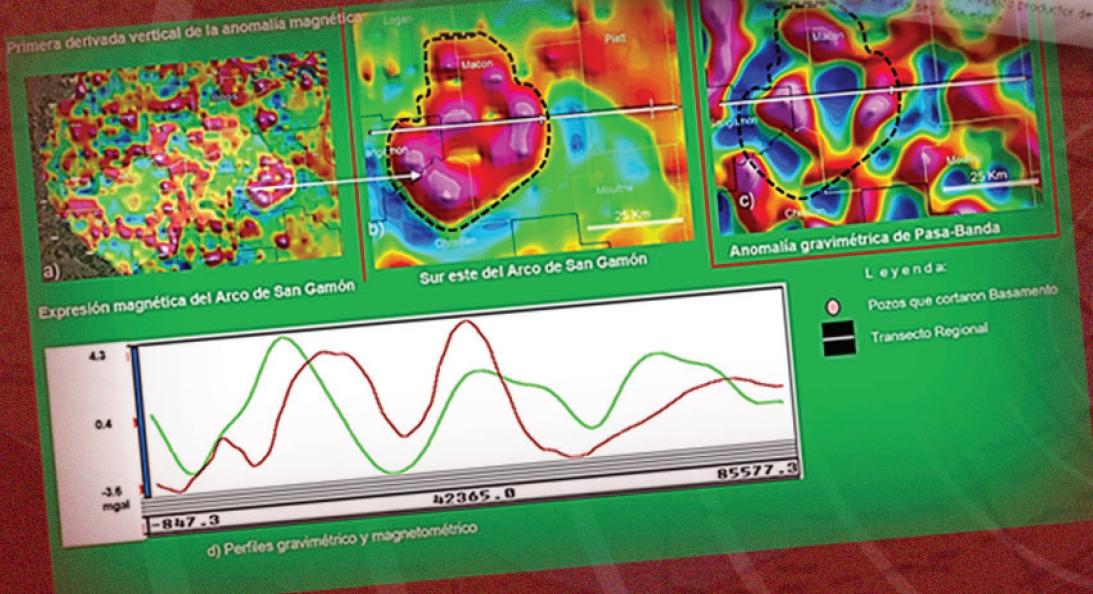


Aplicaciones de Métodos Eléctricos y Potenciales EN LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- La Prospección Geoeléctrica y sus Aplicaciones
- Análisis, Proceso e Interpretación Integrada de Gravimetría, Magnetometría, Datos Sísmicos y Geológicos, para Visualizar Oportunidades Exploratorias en el Sur de la Cuenca de Illinois, USA





Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A.C.

COMITÉ EJECUTIVO AMGE 2020-2022

Gerardo Clemente Martínez
Presidente

Humberto Salazar Soto
Vicepresidente

Juan Manuel Nájera García
Secretario

Rodolfo Rocha Ruiz
Tesorero

Efraín Méndez Hernández
Editor

Raúl Del Valle García
Editor

Presidentes Delegacionales:

- **Mark Morford**, Delegación Houston
- **Amador Guerra Reyna**, Delegación Reynosa
- **José Cámaras Alfaro**, Delegación Tampico
- **Félix Alan Ramírez Cuellar**, Delegación Poza Rica
- **Óscar Trejo Mortera**, Delegación Veracruz
- **Francisco Rubén Rocha de la Vega**, Delegación CDMX
- **Guadalupe Torres Acuña**, Delegación Villahermosa
- **José Alberto Santana Fernández**, Delegación Cd. Del Carmen

El contenido y las opiniones expresadas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente las del Comité Ejecutivo AMGE ni la de los editores.

Para someter manuscritos en el Boletín Técnico AMGE – Segunda Generación, así como conocer las normas editoriales y guía de publicación, favor de comunicarse con alguno de los siguientes editores:



Efraín Méndez Hernández
Email: emendez2310@gmail.com



Raúl del Valle García
Email: raul.vontal@gmail.com

DERECHOS DE AUTOR

El Boletín Técnico de la AMGE, Segunda Generación, es publicado por la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A.C., Campo Tamulte 117, Col. Carrizal, Villahermosa Centro, Tabasco, C.P. 86038. El título del Boletín, así como el contenido, se encuentran debidamente autorizados y protegidos. Publicado trimestralmente por la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A.C., Volumen 5, Número 3, Julio-Septiembre 2022.

SOBRE ARTÍCULOS

Los artículos del Boletín Técnico AMGE, en su Segunda Generación, son presentados a nuestros socios bajo el respaldo de textos técnicos recibidos y arbitrados por el Comité Editorial o bien que han sido difundidos en el Congreso Mexicano del Petróleo, de manera anual, manteniendo estos últimos un formato establecido, las autorizaciones respectivas, y el arbitrio de un comité de expertos en la materia.

Esta edición reproduce las imágenes y el contenido de origen de los autores, con la corrección de estilo correspondiente, manteniendo el objetivo técnico informativo, con el fin de efectuar mejoras de calidad editorial para nuestros lectores.

COLABORADORES



- **Director:**
Carlos Pozos
- **Editores:**
Francisco Abad
Rebeca Sánchez
- **Diseño:**
José Tepezano
solucioncuatro.4@gmail.com

Editorial

Estimados lectores, sean bienvenidos a la lectura del Boletín AMGE 2a Generación, V5, No. 3, correspondiente al periodo Julio-Septiembre 2022, esta vez bajo el tema: "Aplicaciones de Métodos Eléctricos y Potenciales en la Prospección Geofísica", en el cual presentamos dos artículos técnicos relacionados con métodos no sísmicos tanto de fuente natural (métodos potenciales integrados para el mapeo de arrecifes de pináculo y otras estructuras asociadas al basamento), como de fuente inducida (mediante sondeos eléctricos verticales de corriente directa para la búsqueda de agua subterránea). Los datos obtenidos mediante estos métodos permitieron realizar interpretaciones basadas en los contrastes de propiedades físicas de las rocas del subsuelo, tales como susceptibilidad magnética, resistividad y densidad, con estos fines prospectivos.

En la primera aportación "La Prospección Geoeléctrica y sus Aplicaciones", Humberto Badillo nos hace una descripción del Método de Prospección Eléctrica para la búsqueda de agua, mediante la adquisición e interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales, exponiendo casos de aplicación exitosa de la metodología en la exploración de este vital recurso en ambientes fluviales de depósito, resaltando ventajas y aplicaciones adicionales de este tipo de métodos geofísicos.

En el artículo técnico complementario de esta edición: "Análisis, Proceso e Interpretación Integrada de Gravimetría, Magnetometría, Datos Sísmicos y Geológicos, para Visualizar Oportunidades Exploratorias en el Sur de la Cuenca de Illinois, USA", Edilberto Hernández describe la interpretación integrada de datos sísmicos y potenciales para la búsqueda de oportunidades exploratorias ligadas con arrecifes de pináculo y otras estructuras asociadas al emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos, como potenciales almacenadores de hidrocarburos. La información de métodos potenciales fue descargada de las bases de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y del Servicio Geológico de Illinois (ISGS).



COMITÉ EDITORIAL AMGE 2020-2022.

Efraín Méndez Hernández, Raúl del Valle García

Carlos Pozos, Rebeca Sánchez, Francisco Abad, José Tepezano.

Estamos seguros de que estos artículos técnicos resultarán de interés para la comunidad geofísica de exploración de nuestro gremio.

Con este Boletín, finaliza nuestra labor editorial bajo la administración del M.I. Gerardo Clemente Martínez, Presidente de la Directiva Nacional AMGE 2020-2022. Expresamos nuestro reconocimiento al M.I. Clemente por la productiva actividad gremial y logros alcanzados a lo largo de su gestión, así como por la confianza depositada en este comité para la edición del Boletín AMGE 2a Generación. Nuestros mejores deseos al M.I. Humberto Salazar Soto, Presidente Electo AMGE 2022-2024, para la consecución de nuevos objetivos y metas al frente de nuestro gremio.

Contenido

Tema: Aplicaciones de Métodos Eléctricos y Potenciales en la Prospección Geofísica

Editorial

05

La Prospección Geoeléctrica y sus Aplicaciones

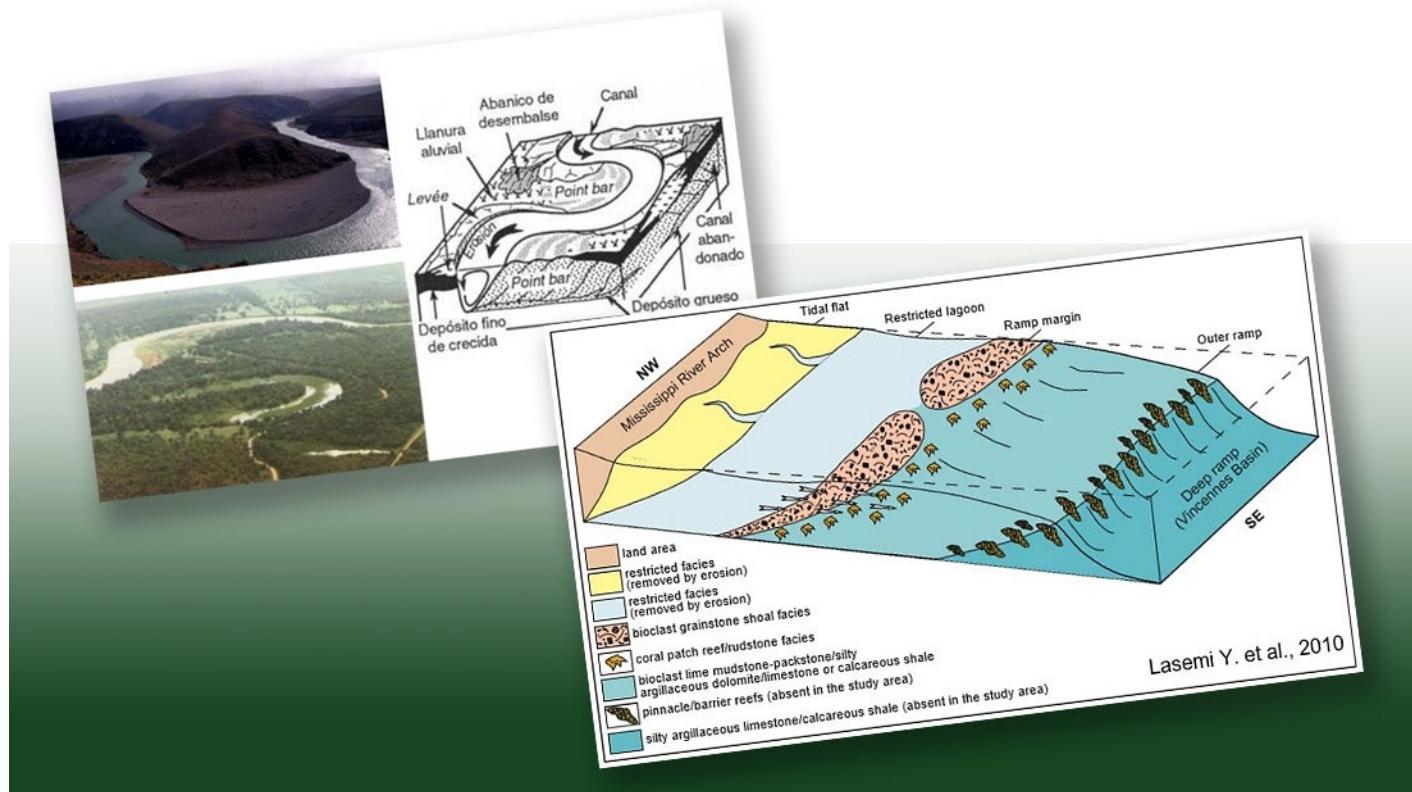
Autor: M.I. Jesús Humberto Badillo Rivera

08

Análisis, Proceso e Interpretación Integrada
de Gravimetría, Magnetometría, Datos Sísmicos y
Geológicos, para Visualizar Oportunidades
Exploratorias en el Sur de la Cuenca
de Illinois, USA

Autor: Edilberto Román Hernández Flores

23



La Prospección Geoeléctrica y sus Aplicaciones

Autor: M.I. Jesús Humberto Badillo Rivera

● Resumen

En este trabajo se presentará la definición de la Prospección Geoeléctrica, sus aplicaciones generales, la metodología de adquisición de datos, análisis de las curvas de campo y el método para interpretar los datos y presentar los resultados en perfiles geoeléctricos, asimismo, el análisis del ambiente de depósitos de sedimentos clásticos, en específico, el ambiente fluvial que predomina en muchas áreas de exploración de agua subterránea, mostrando casos de éxito, tanto en el estado de Tamaulipas, como el estado de Guanajuato. En ambos estudios, se propuso la perforación de un pozo exploratorio comprobando la presencia de agua subterránea aportando gastos de 20 a 25 Ips. Cabe mencionar que, en el estudio geofísico en Guanajuato se realizó en dos campañas de adquisición, una en 2017, y otra en el 2021 que, al integrar todos los sondeos adquiridos, se propuso la perforación de un sondeo obtenido en el 2017 que resultó exitoso, lo que demuestra que las condiciones del subsuelo no cambian con el tiempo. Otro caso de éxito se presenta en una zona de calizas en Monterrey, Nuevo León, donde se interpretó y comprobó la presencia de una oquedad y posibilidades de una caverna bajo uno de los sondeos adquiridos. Otro ejemplo que se

presenta es un cruce direccional subfluvial, que nos permitió proponer la trayectoria del cruce direccional mediante perforación horizontal para el tendido de tuberías en el estado de Tabasco. La finalidad de la prospección geoeléctrica es determinar la distribución de resistividades en el subsuelo, realizando mediciones en la superficie, obteniendo un perfil electroestratigráfico asociable al entorno geológico local. Éste consiste en emitir un pulso de corriente directa hacia la profundidad y evaluar el comportamiento resistivo del medio por el cual viaja dicha corriente. La resistividad depende, entre otras cosas, del contenido de minerales, fluidos, porosidad y grado de saturación de las capas del subsuelo.

Introducción

La prospección geoeléctrica es la exploración geofísica que utiliza métodos eléctricos para determinar la resistividad de las capas del subsuelo, con fundamento en la Ley de Ohm.

La Resistividad (ρ) o resistencia eléctrica es una propiedad física de los materiales que determina qué tanto se oponen un cuerpo al flujo de corriente eléctrica. Sus unidades están dadas en Ohms-metro ($\Omega\text{-m}$).

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Resistencia (Ω) = Voltaje (Volts) / Corriente (Amperes)

ρ ($\Omega\text{-m}$) = R (Ω) * Área (m^2) / longitud (m)

Fig. 1. Ley de Ohm, fundamento de la Prospección Geoeléctrica.

La prospección geoeléctrica se realiza con dispositivos tetra-electródicos, donde el más importante, por su aplicación, es el dispositivo electródico Schlumberger para la adquisición de Sondeos Eléctricos Verticales SEV's.

SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

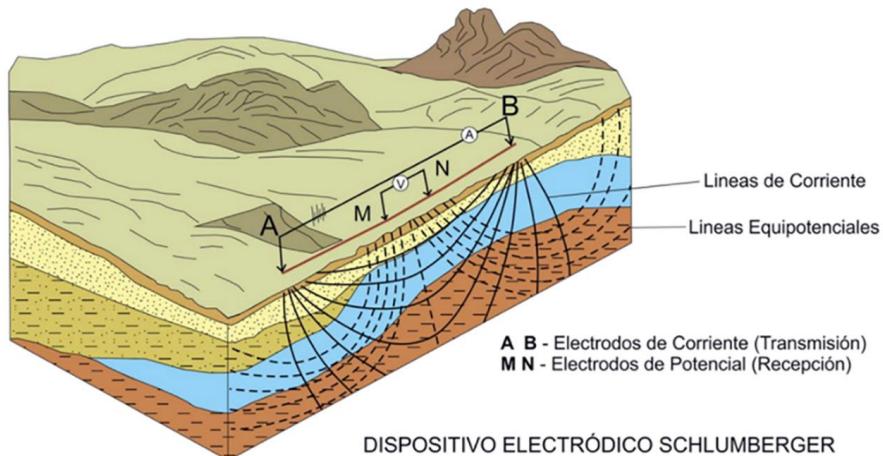


Fig. 2. Representación del trabajo de campo.

Aplicaciones

La aplicación de este método recibe muchos adeptos debido a su carácter no invasivo, su compatibilidad con el medioambiente y sus ventajas técnico-económicas. En el caso específico de localización de acuíferos, una de sus mayores ventajas obedece a la contrastante respuesta resistiva que tiene un material saturado con agua, permitiendo encontrar acuíferos potenciales o, en su caso, arrojar resultados negativos donde evite invertir en una perforación condenada al fracaso.

■ En agua subterránea

- Evaluación de sitios óptimos para perforación de pozos de agua.
- Encontrar las resistividades de las capas del subsuelo en el punto de investigación y obtener la resistividad relacionada con la presencia de agua (15 a 100 $\Omega\text{-m}$), simulando una perforación con datos geofísicos.
- Definir el grado de compactación y permeabilidad de las diversas capas del subsuelo.
- Asociar el valor de resistividad obtenido con el posible tipo de material, ya sea lutitas (sedimentos arcillosos impermeables), gravas, arenas, o rocas compactas.
- Diferenciar las zonas de rellenos de escombros, de las capas de sedimentación natural.
- Definición de zonas de intrusión marina.
- Definición de interfase entre agua dulce y agua salada en zonas de playas.
- Definir niveles freáticos.



Fig. 3. Evidencia de la presencia de agua luego de perforar en sitio propuesto por el estudio.

■ En Minería

- Exploración de yacimientos minerales metálicos y no metálicos.
- Detección de mantos de carbón.
- Cálculo volumétrico de bancos de material (graveras y bancos de tepetate).



Fig. 4. Fotografía de maquinaria en estudio y seguimiento de capas de carbón mediante estudios de prospección geoeléctrica.

■ En Ingeniería Civil

- Para encontrar la profundidad a la roca firme, en el emplazamiento de pilotes de cimentación.
- Delimitar cavernas (cavidades u oquedades).

■ En estudios de impacto ambiental

- Localización y monitoreo de contaminantes en el subsuelo (hidrocarburos, lixiviados, etc.).
- Dictamen de factibilidad para el emplazamiento de rellenos sanitarios.

■ En la Industria Petrolera

- Definición del área de contaminación por derrames de hidrocarburos.
- Perfiles estratigráficos en líneas sísmicas 2D, para definir la zona de intemperismo (wethering).
- Perfiles estratigráficos en cruces direccionales y subfluviales con perforación horizontal en el tendido de tuberías y gasoductos.
- Definición de sitios para la protección catódica a la corrosión en tuberías.

Metodología

La Prospección Geoeléctrica tiene sus fundamentos en la Ley de Ohm, con lo cual, se podrá calcular la resistividad, el espesor y profundidades de las capas geoeléctricas del subsuelo y las posibilidades de encontrar la distribución del acuífero. Para la adquisición de datos, se procede a inyectar corriente eléctrica (CD), al subsuelo mediante dos electrodos AB, posicionados equidistantemente al punto

central de investigación y se mide la diferencia de voltaje entre dos electrodos MN internos y equidistantes al centro del sondeo eléctrico vertical en investigación, con lo que se calcula la resistividad aparente, representándose los datos en un gráfico bilogarítmico respecto a la distancia de los electrodos AB/2, para obtener la curva a interpretar de cada Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

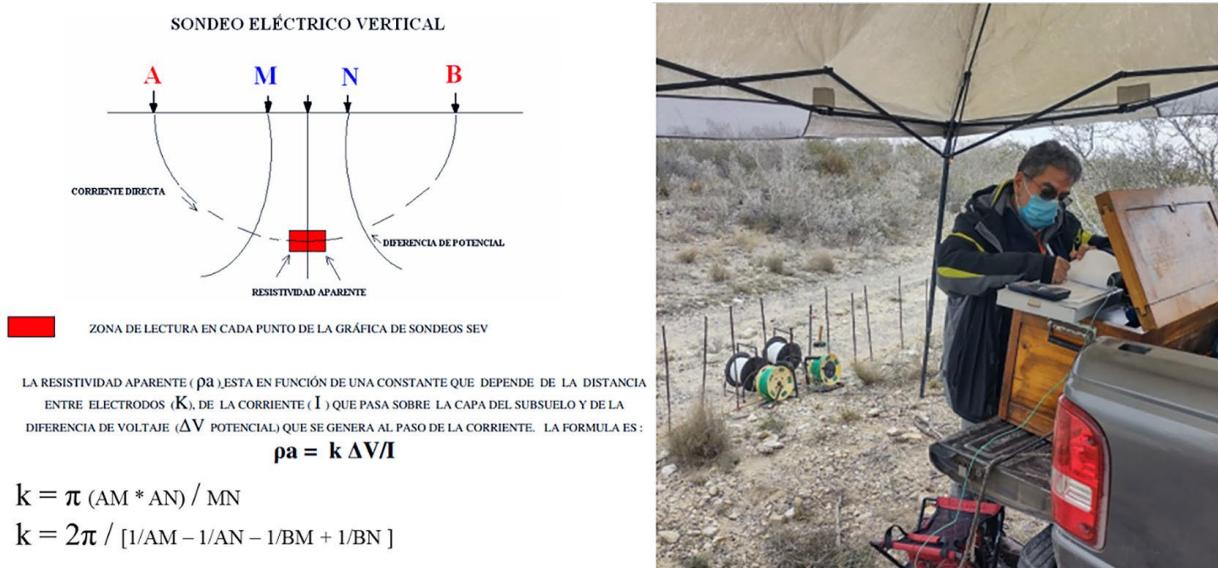


Fig. 5. Influencia del dato medido y fotografía de adquisición de SEV's.

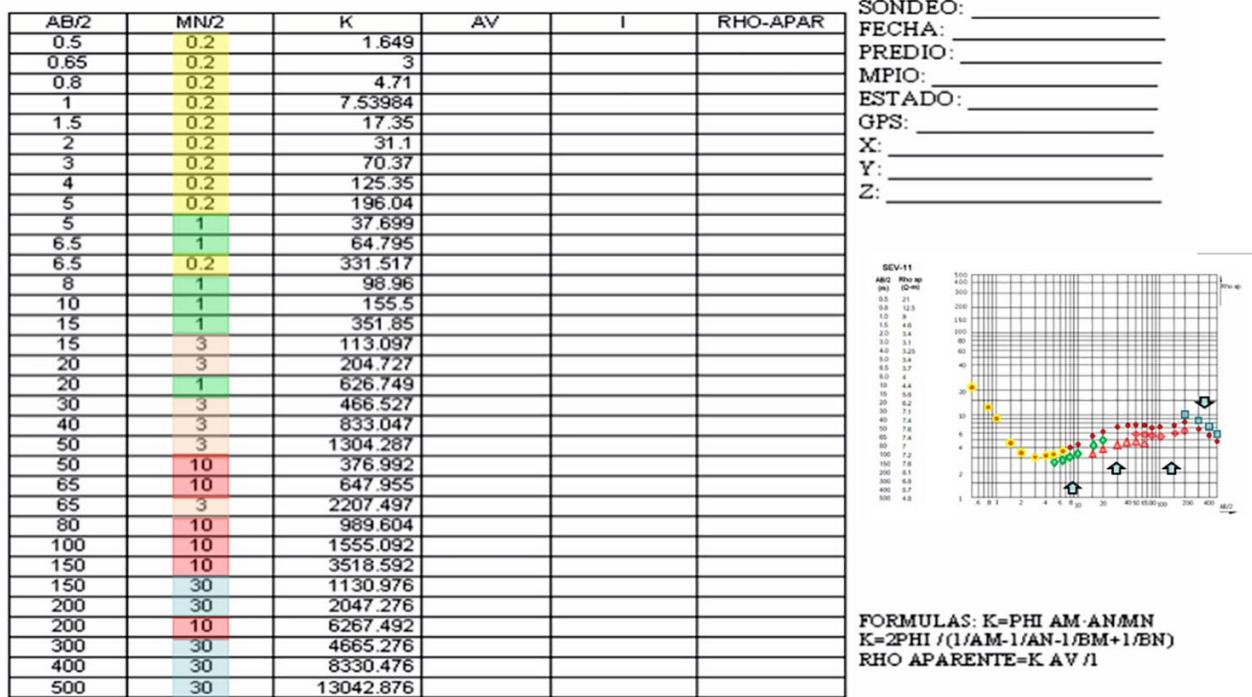


Fig. 6. Hoja de Campo en la adquisición de SEV's.

En la adquisición de Sondeos Eléctricos Verticales, lo más importante es lograr medir cuánta corriente se está suministrando al subsuelo entre los electrodos de corriente AB, y medir la diferencia de voltaje entre los dos electrodos de recepción MN, para lo cual se deben ir obteniendo los valores de resistividad aparente, usando la constante k dependiente de la posición de electrodos para, finalmente, ir graficando cada dato en un gráfico bilogarítmico y observar que cada pendiente de la curva nos indica cada capa identificada en el SEV.

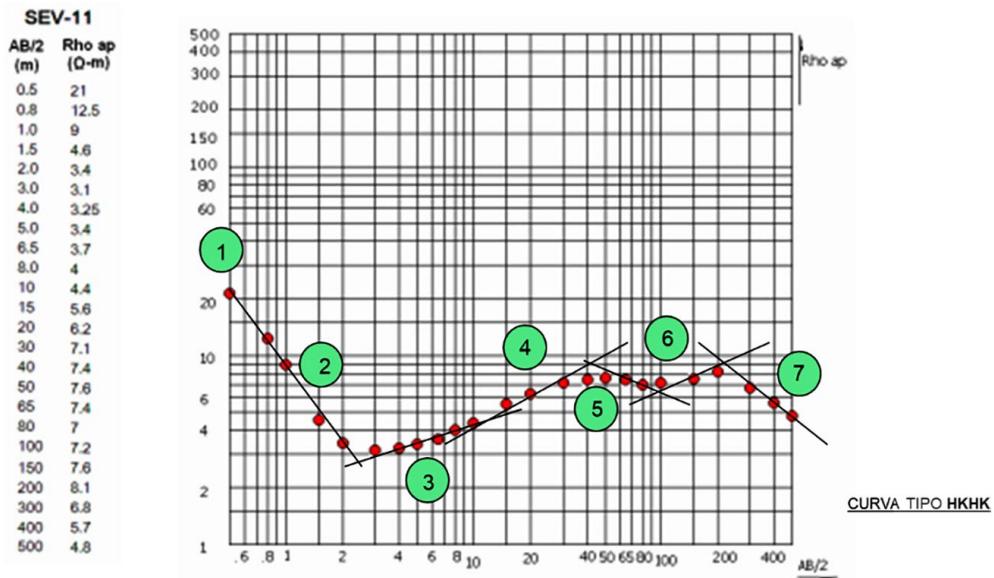


Fig. 7. Gráfico de Campo en la adquisición de SEV's.

Los valores de resistividad finales se calculan utilizando el método de interpretación del punto auxiliar, mediante la comparación de las pendientes de las curvas de campo con las curvas Patrón, curvas teóricas de ORELLANA & MOONEY, que se sobreponen con los gráficos de la resistividad aparente contra la distancia entre electrodos de corriente AB/2 obtenidos de los datos de campo. Es por ello, que con claridad se identifican los contrastes. Cabe mencionar, que la información obtenida en cada sondeo es hacia la vertical de cada sondeo y que el sitio a perforar, en caso de resultar positivo uno de los sondeos, debe contar con las coordenadas obtenidas con GPS en campo.

1. Graficar los datos de campo.
2. Realizar el ajuste de valores MN/2, generando una Curva final a ser interpretada.
3. Realizar la interpretación del sondeo, utilizando el método del Punto Auxiliar con la sobreposición de la curva del sondeo con gráficos de las curvas patrón de dos capas y sus correspondientes gráficos auxiliares A, H, K y Q de ORELLANA & MOONEY.

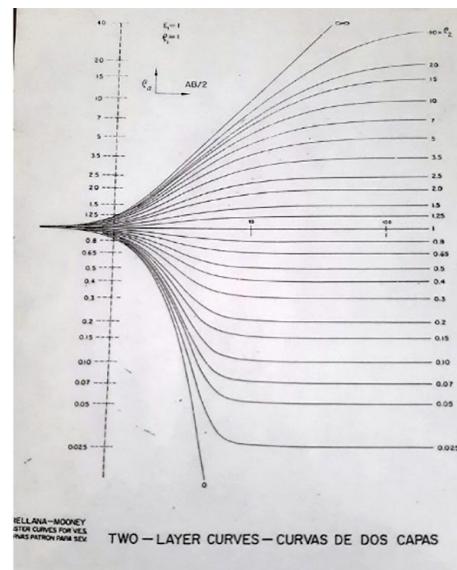
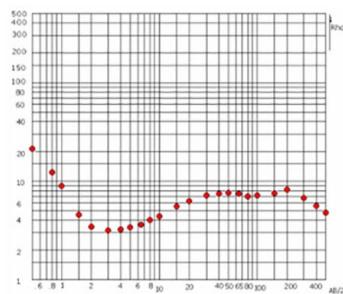
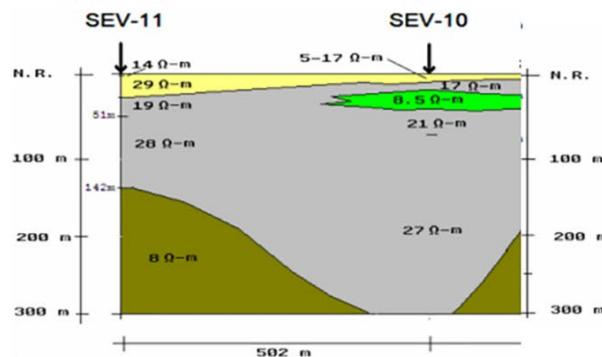
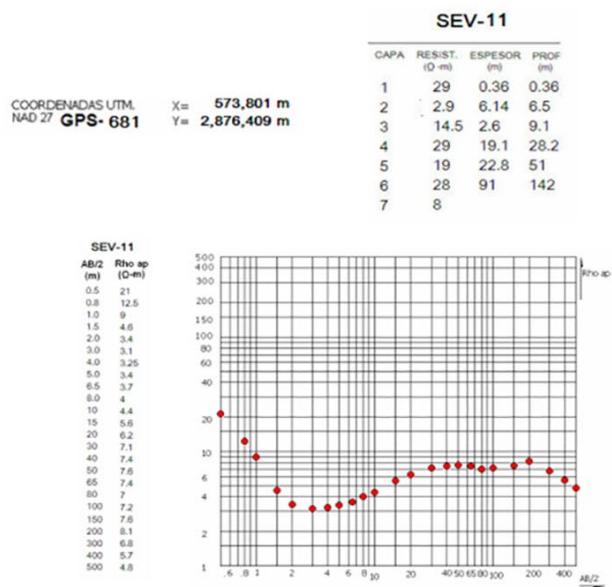


Fig. 8. Método de Interpretación de SEV's.



Los resultados deben contar con un mapa de ubicación, coordenadas, número de capas y sus valores de resistividad, espesor y profundidad. Así como, el gráfico de campo con sus valores AB/2 vs Resistividad aparente en $\Omega\text{-m}$.

Los resultados deben representarse en perfiles electroestratigráficos asociando cada capa con el tipo de material que le corresponda.

Fig. 9. Interpretación de SEV y representación en Perfil Geoeléctrico.

Los resultados de cada estudio geofísico con métodos eléctricos de resistividad se representan en perfiles geoeléctricos, proporcionando información del espesor de capas geoeléctricas al unir cada sondeo interpretado, definiendo la distribución de capas y resistividades asociadas a diversos materiales permeables e impermeables, que se asocian al tipo de material correspondiente, ya sea gravas y arenas, contrastando con las arcillas que son impermeables y que no permiten la movilidad del agua. La profundidad de investigación se logrará al extender los cables de corriente AB/2, con una distancia suficiente para prospectar la profundidad a la que se encuentre el acuífero, la cual puede llegar a alcanzar los 400 m.

Como ejemplo, se incluye la información de un Perfil Geoeléctrico (electroestratigráfico), de un estudio donde se perforó y se encontró, en el SEV-1, el sitio en el cual se obtuvo agua de buena calidad y que contribuye en el abastecimiento de agua en un sector de Reynosa.

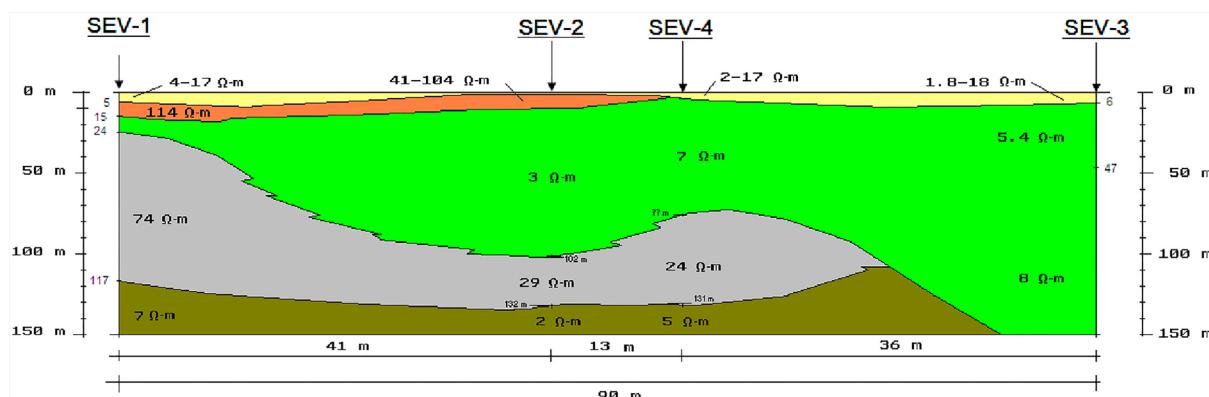


Fig. 10. Perfil Geoeléctrico (electroestratigráfico), de un estudio donde se perforó y se encontró agua de buena calidad en el SEV-1.



Fig. 11. Resultados de la perforación del SEV-1, de la figura anterior.

Análisis del Ambiente de Depósito

Geológicamente, en el sistema de depósito fluvial existen zonas de lutitas o de material arcilloso, siendo el entorno del recorrido de cauces y/o arroyos los que arrastraron materiales de gravas y arenas, depositándose irregularmente en las zonas internas de los meandros.

Se busca encontrar depósitos acrecionados de arenas y gravas que proporcionen resistividades entre 15 y 100 $\Omega\text{-m}$, asociados con agua de buena calidad y espesores que permitan proponer sitios idóneos para las perforaciones.

Por esta razón, es importante saber las características geoeléctricas de las capas del subsuelo y así definir las zonas permeables.

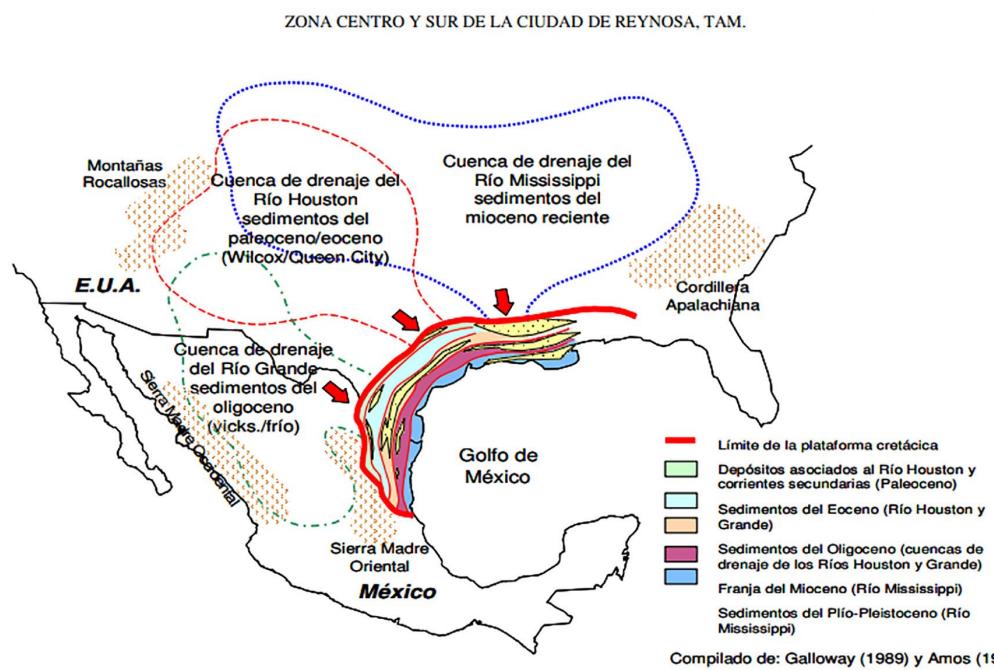


Fig. 4. Fuentes de aporte de sedimentos para la Cuenca de Burgos.

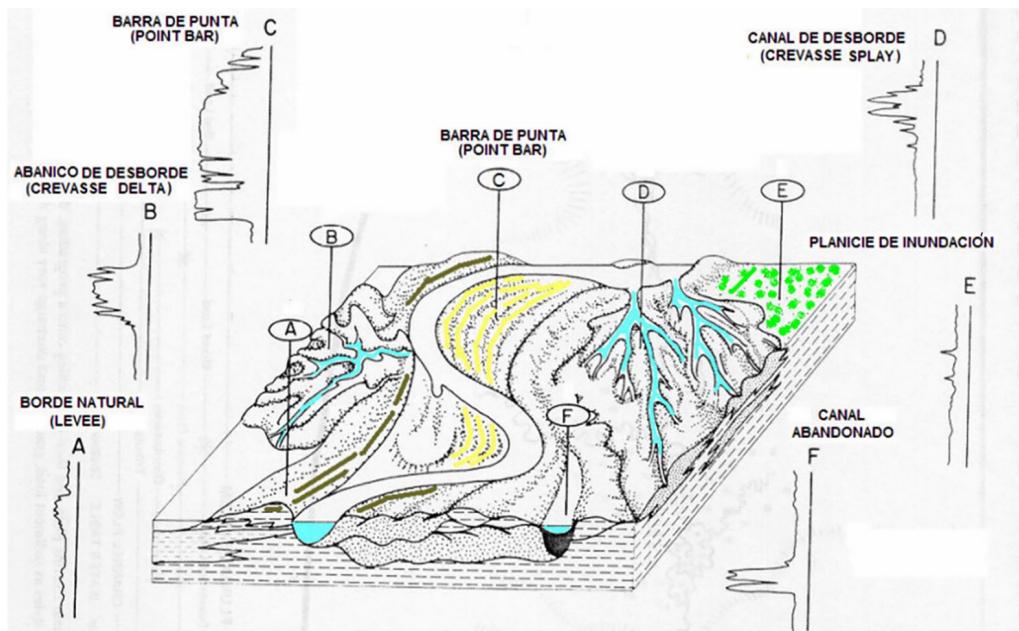
Fig. 12. Análisis del ambiente de depósito en sistemas fluviales.

FEBRERO 2007. ESTUDIOS GEOFÍSICOS DEL BRAVO. TEL. 01(899) 9291940. CD. REYNOSA, TAM. CEL. 01(899) 9560507 ING. BADILLO



I.H.R.D.C. GL-502 "Exploración En Búsqueda De Yacimientos No Marinos".

Fig. 13. Representación de Sistemas fluviales.



Terrigenous Clastic Depositional System W.E. Galloway & D.K. Hobday

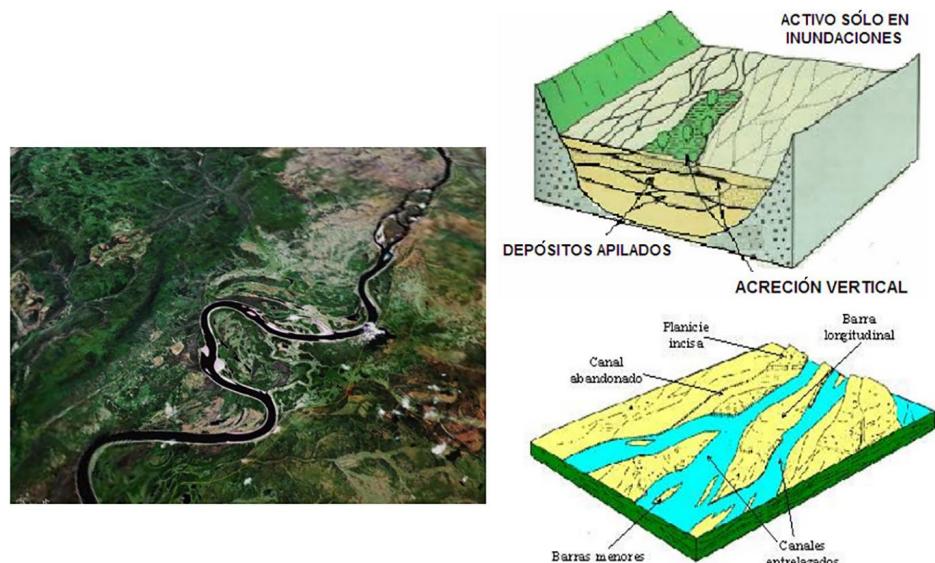
Fig. 14. Representación de Sistemas de depósitos terrígenos.

De la imagen anterior se observa que, la distribución de arenas y gravas por la erosión y el acarreo de materiales de las zonas altas, que transportan por arrastre materiales de diferente gradación, desde cantos rodados, gravas, arenas y sedimentos de arcilla, se pueden encontrar en zonas acrecionadas de diversos depósitos apilados de las partes internas de los meandros y en barras longitudinales, a lo largo del margen activo del sistema fluvial.



Fig. 15. Zona de Corrientes Meándricas.

ZONE CENTRO Y SUR DE LA CIUDAD DE REYNOSA, TAM.



FEBRERO 2007. ESTUDIOS GEOFÍSICOS DEL BRAVO. TEL. 01(899) 9291940. CD. REYNOSA, TAM. CEL. 01(899) 9560507 ING. BADILLO

Fig. 16. Barras y depósitos apilados.

Casos de Éxito

En 2017 y 2021 se realizaron dos campañas de adquisición de datos geoeléctricos en terrenos del Municipio de Dolores Hidalgo, Guanajuato. De la interpretación se identificaron 3 sondeos SEV's con posibilidades de agua por sus valores de resistividad. Uno de los sondeos, en el 2017, se realizó justo junto al pozo productor de 200 m de profundidad. En el 2021, al integrar todos los sondeos del proyecto, resultó que por contar ya con la instalación eléctrica del pozo y por tener problemas en la tubería, se recomendó perforar otro pozo más profundo, justo a unos metros del pozo antiguo, que al perforarlo a 350 m resultó, exitosamente, ser un pozo productor de agua limpia que aporta 20 lps. Se destaca que, aunque el sondeo fue el 2017 y la perforación del 2021, no hubo problema alguno con la información interpretada.

INTERPRETACION DEL PERFIL GEOELÉCTRICO No. 2 (SEV-3, SEV-1 CALIBRACIÓN Y SEV-2)

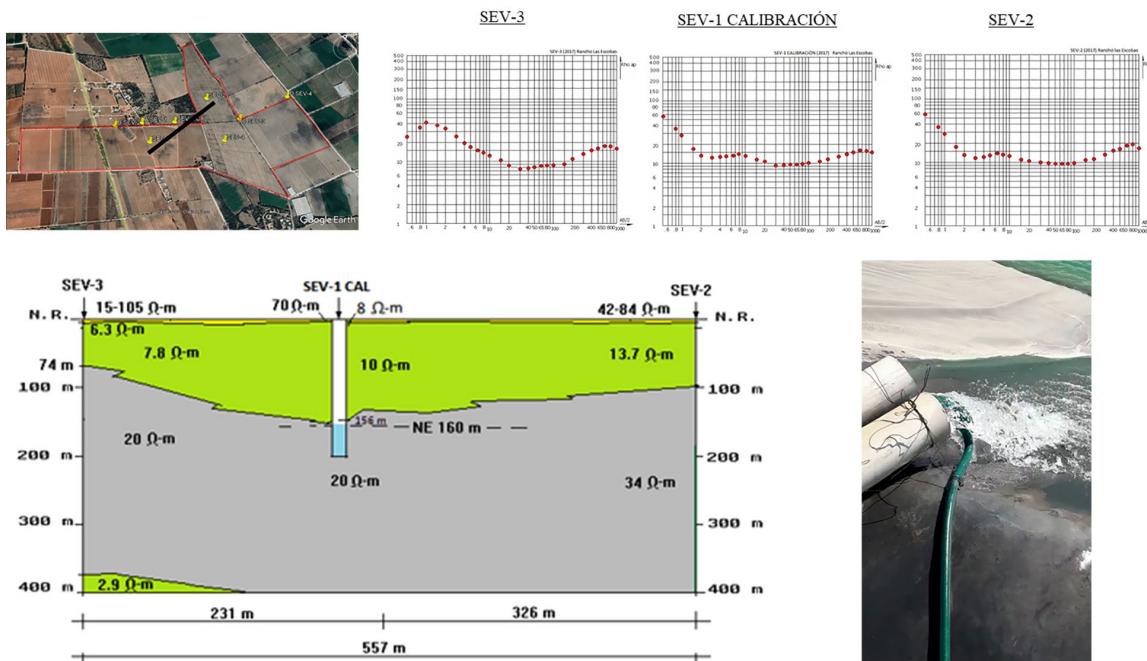
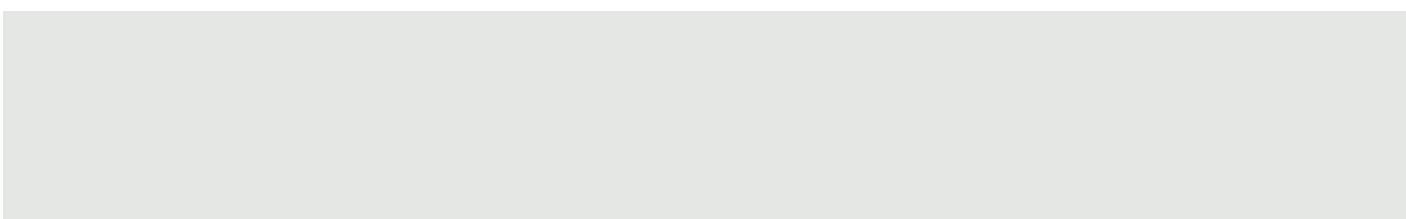
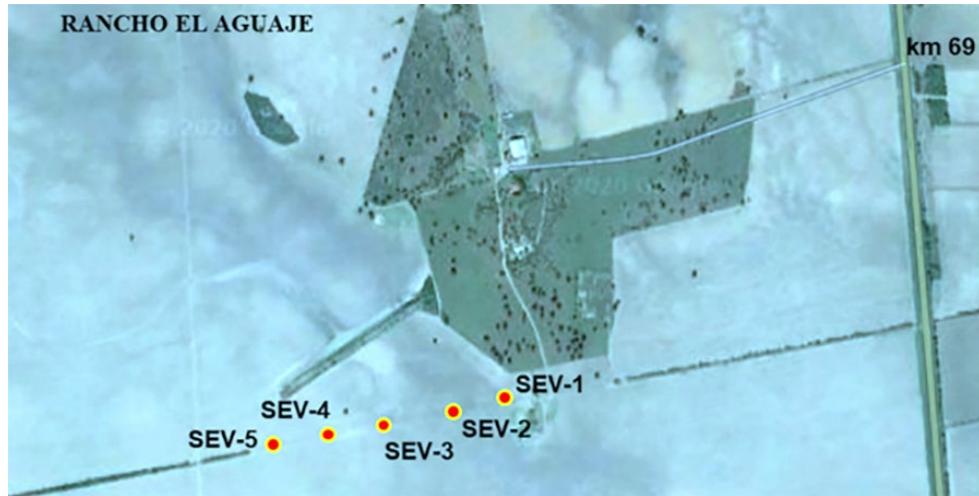


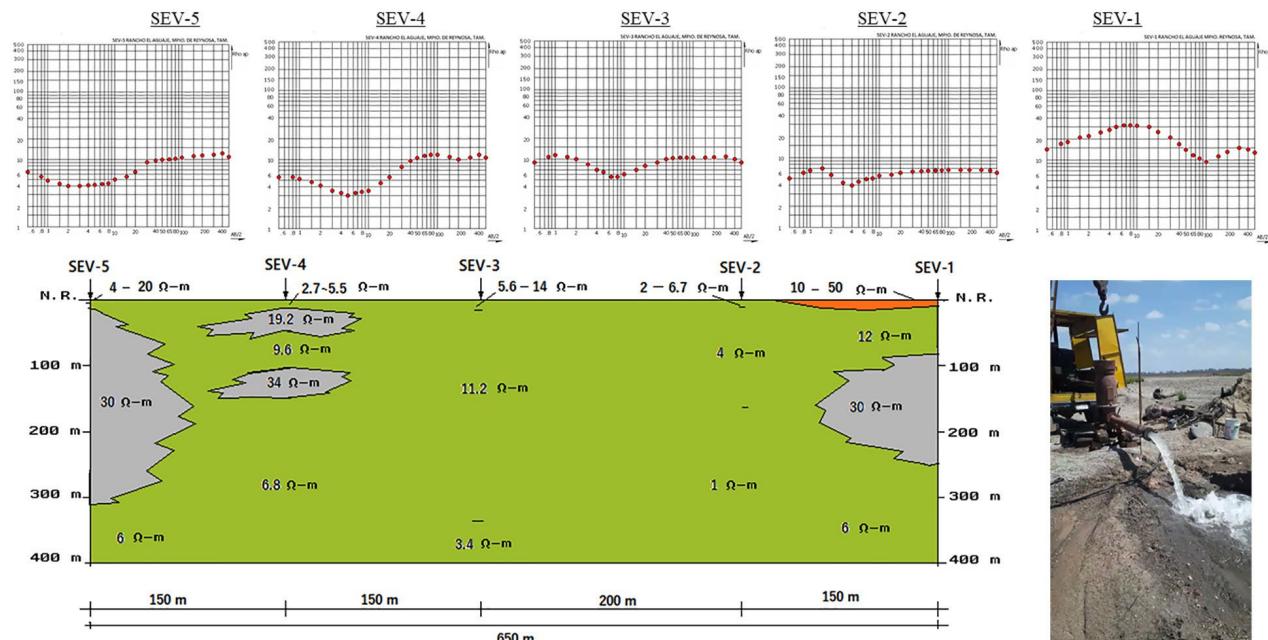
Fig. 17. Perforación exitosa del pozo en el SEV-1 de Calibración a mayor profundidad.

En el 2020 se realizó un estudio geofísico con fines de búsqueda de agua subterránea en terrenos de un rancho, en las inmediaciones del kilómetro 69 de la carretera Reynosa - San Fernando, en Tamaulipas. Se hicieron 5 sondeos formando un perfil geoeléctrico. Al unir los resultados de cada SEV, se recomendó la perforación de un pozo exploratorio en el SEV-1 dada la ventaja de estar más próximo al casco del Rancho, razón por la cual tomó máximo interés ese sitio recomendado. Luego de la perforación en el SEV-1 durante el 2021, el perforador envió la evidencia del aforo que aportó un caudal de 25 lps.





INTERPRETACIÓN DEL PERFIL GEOELÉCTRICO (SEV-5 AL SEV-1)



Se recomendó perforar en el SEV-1 a una profundidad de 250 m logrando un pozo productor de **25 lps**.
Cabe señalar, que también en el SEV-5 se puede perforar en una segunda etapa.

Fig. 18. Perforación del pozo exitoso en el SEV-1 a una profundidad de 250 m.

En Monterrey, en el Municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León, se realizó un estudio para identificar las resistividades del subsuelo y verificar las condiciones en las que se encuentra el mismo. De los tres sondeos SEV's que se ejecutaron, uno a 80 m de un pozo de la zona y otros dos a lo largo de un camino, en uno de ellos se interpretó y corroboró la presencia de una oquedad y fue identificada por el alto valor de resistividad contrastante con sus zonas, sobreacente y subyacente. En el tercer sitio SEV-3, se interpretó un valor mucho

mayor y con un espesor anómalo de 25 m atribuido a la posibilidad de ser una caverna, dando las recomendaciones de tomar en cuenta la posición y profundidad de la oquedad y posible caverna para futuras obras de estructuras civiles.



PERFIL GEOELÉCTRICO Y COMPARATIVO DE SEV'S

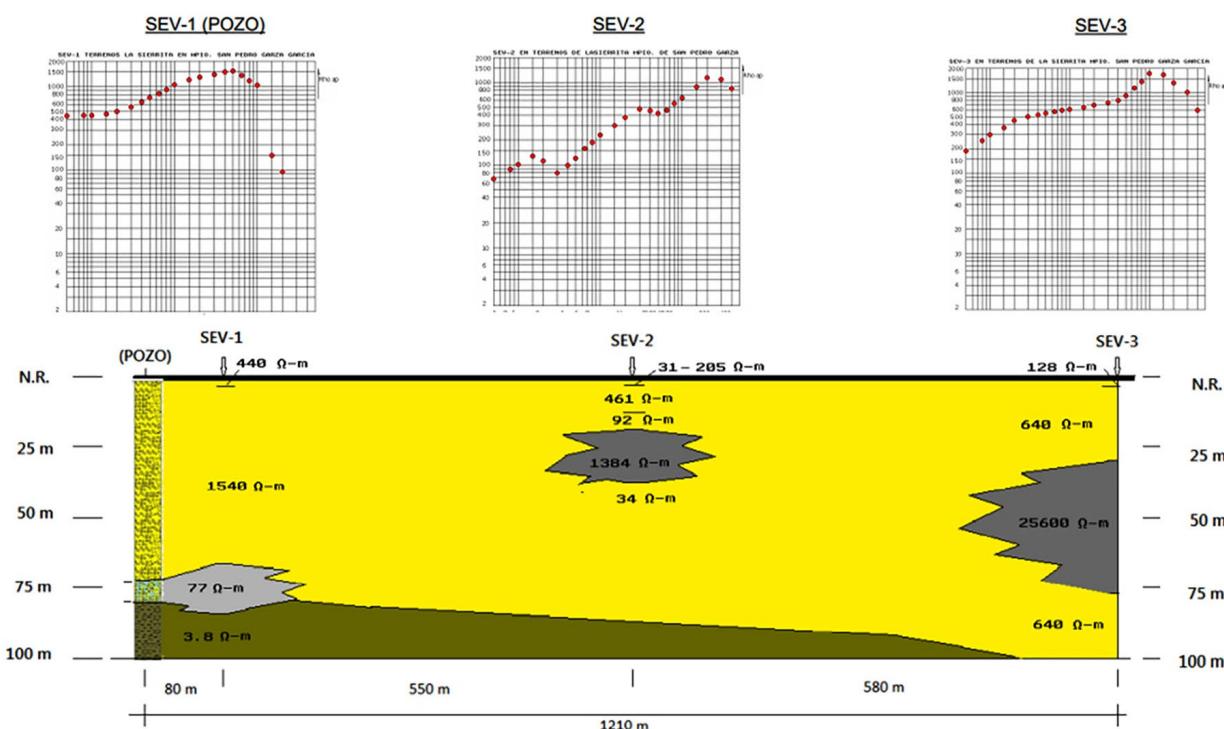


Fig. 19. Perfil Geoelectrónico identificando acuífero (SEV-1), una oquedad (SEV-2) y caverna (SEV-3).

El siguiente caso de éxito se refiere a un cruce subfluvial en el estado de Tabasco. Se realizaron sondeos SEV's para conocer y definir la trayectoria y ángulos de entrada y salida de la perforación direccional horizontal, para la colocación de ductos y tuberías.

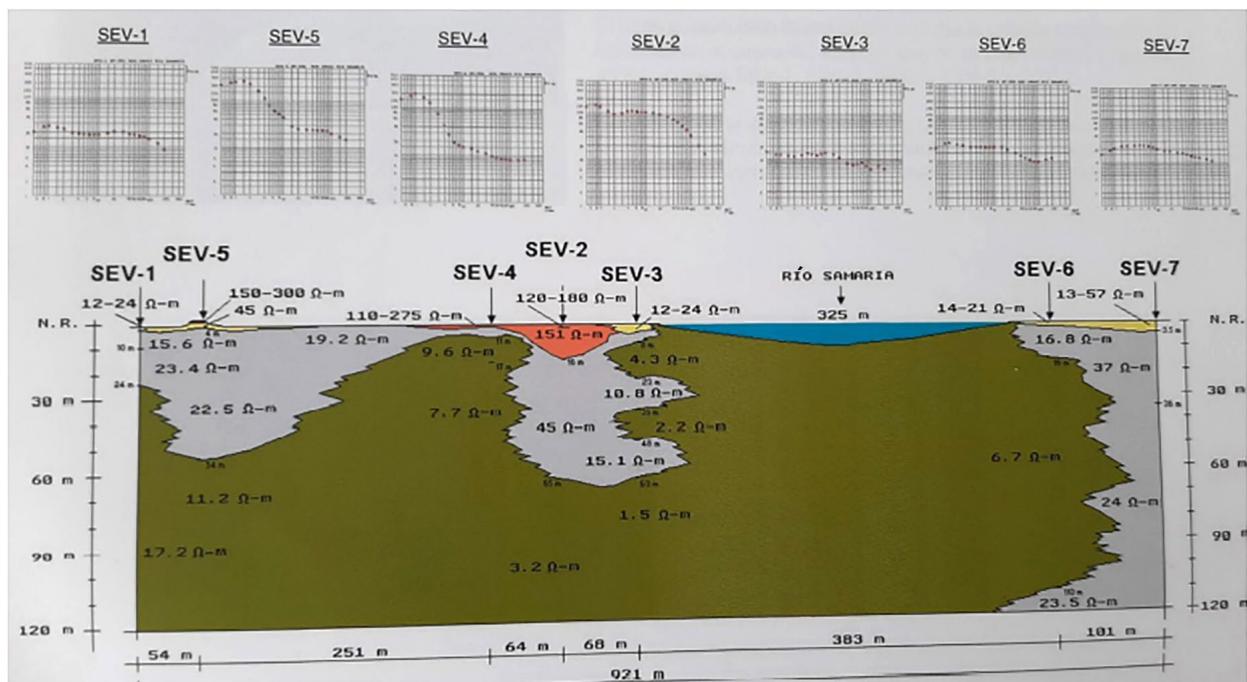
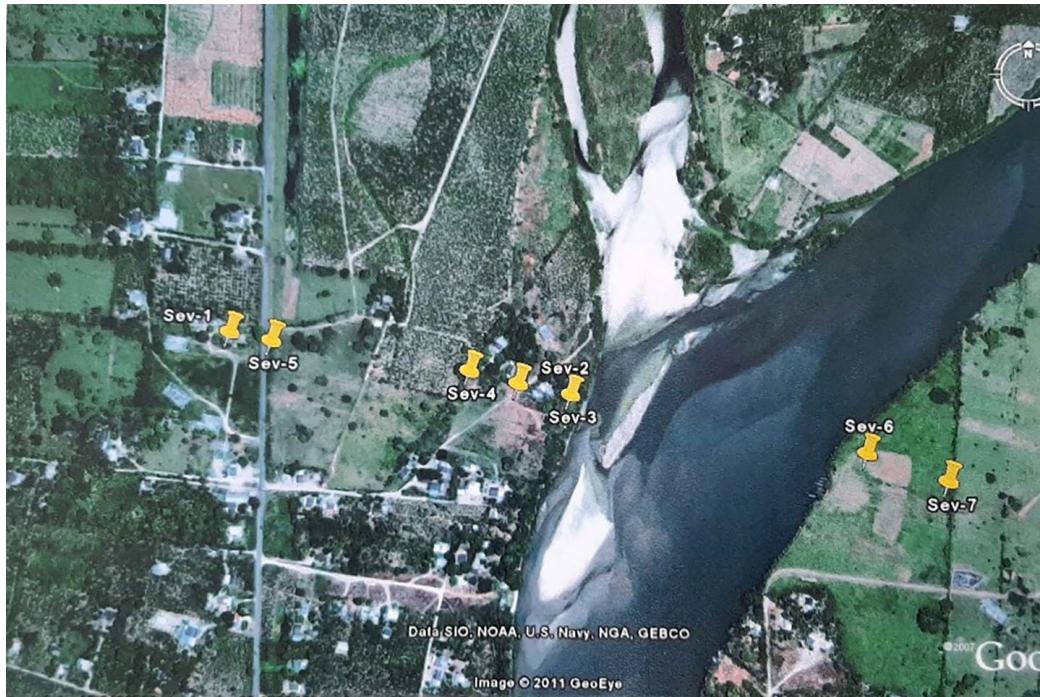


Fig. 20. localización de sondeos SEV's y Perfil Geoeléctrico del cruce subfluvial.

Se identificó la distribución de zonas de depósitos de gravas y arenas a lo largo de los meandros, situación confirmada en el resultado de la interpretación de los sondeos SEV's en el Perfil Geoeléctrico.

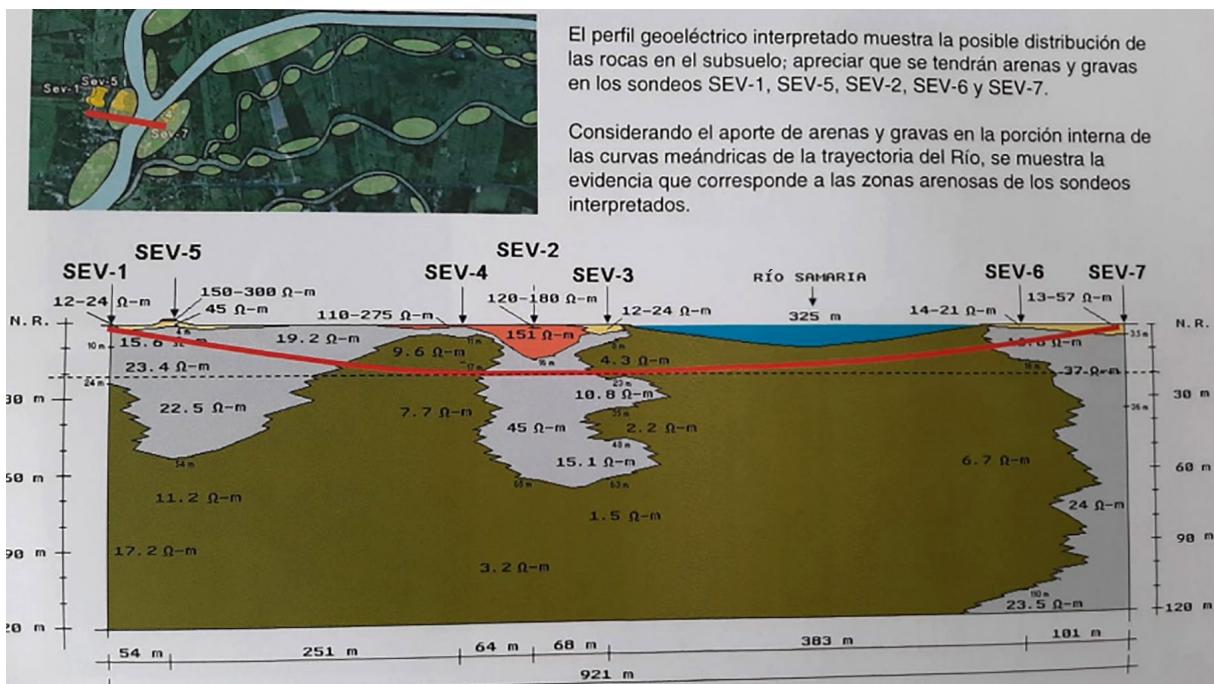


Fig. 21. Análisis de distribución de arenas y gravas en sistema fluvial y trayectoria óptima para el cruce direccional subfluvial.

Ventajas de la Prospección Geoeléctrica

- Los resultados de la Prospección Geoeléctrica son muy útiles para los estudios de Geohidrología, Geología y Geotecnia.
- La adquisición de los datos de campo es rápida, segura y no provoca daños al medio ambiente.
- La interpretación de los datos se presenta en perfiles junto con las curvas obtenidas.
- La obtención de los resultados es muy rápida, se pueden entregar de 3 a 6 días después del trabajo de campo.

Agradecimientos

Mi agradecimiento para la AMGE Nacional y AMGE-VHSA, por apoyarme y aceptar mi trabajo de "La Prospección Geoeléctrica y sus Aplicaciones".

Referencias

Todo el material presentado, incluyendo imágenes, fotografías, gráficos y figuras han sido elaborados y utilizados por un servidor en los informes finales, según los proyectos presentados, con el propósito de dar a conocer este tema de importancia.

Trayectoria profesional del autor:
M.I. Jesús Humberto Badillo Rivera

Ing. Geofísico egresado del Instituto Politécnico Nacional (1981-1985), con maestría en Exploración de Hidrocarburos y Gas Natural en la Universidad Nacional Autónoma de México (2005-2007), obteniendo el grado de Maestro en Ingeniería con Mención Honorífica. Su desarrollo profesional en Exploración incluye las áreas de métodos eléctricos, sísmicos y electromagnéticos, ha participado en varias empresas en el sector privado (1986-2000). En Pemex Exploración y Producción inició sus actividades como intérprete de datos sísmicos 2D y 3D en el Activo Integral Burgos (2000-2010), en la Gerencia de Estudios Geofísicos se desempeñó como supervisor y encargado de la residencia de los servicios de exploración electromagnética (2010-2022). Desde 1999 a la fecha, como profesionista independiente, realiza su actividad empresarial como persona física en Estudios Geofísicos del Bravo.

Análisis, Proceso e Interpretación Integrada de Gravimetría, Magnetometría, Datos Sísmicos y Geológicos, para Visualizar Oportunidades Exploratorias en el Sur de la Cuenca de Illinois, USA

Autor: Edilberto Román Hernández Flores

● Resumen

La Cuenca de Illinois, es una cuenca intracratónica contemporánea al sistema de rifts del Eocámbrico. Una de sus principales estructuras es la Plataforma Esparta, situada al sur occidente del estado de Illinois. En los años de 1940-1972, la integración de información gravimétrica, magnetométrica, sismológica, geológica superficial y del subsuelo, apoyó el descubrimiento de 27 campos productores de aceite. Los campos, están asociados a arrecifes de pináculo del Siluriano. La producción, hasta 1985, fue de 33 millones de barriles de aceite. Adicionalmente a esta producción y, durante el mismo periodo, los estratos del Misisipiense que sobreyacen a los arrecifes han producido 61 millones de barriles de aceite.

La actividad magmática ultramáfica del Pérmico, en el sur del estado de Illinois, y su reactivación hasta el Reciente, ha producido un alineamiento magnético de longitud mayor a 200 km, orientado de NW a SE y asociado al emplazamiento de rocas ígneas intrusivas y extrusivas. La Plataforma Esparta, forma parte del alineamiento magnético. Al sureste del estado de Illinois USA, algunos intrusivos deformaron las rocas del Pensilvaniense -Misisipiense.

El basamento Precámbrico de la Cuenca de Illinois está constituido por rocas graníticas y riolíticas de la Provincia del Este de Estados Unidos. En la sísmica adquirida, en el sureste del Arco de San Gamón, se observan, debajo del basamento, horizontes sísmicos de alta amplitud, relacionados a rocas ígneas intrusivas.

El objetivo general de este trabajo fue visualizar oportunidades exploratorias de arrecifes de pináculo en la Plataforma Esparta y en el sureste del estado de Illinois, donde los ígneos intrusivos emplazados deformaron las rocas sobreyacentes generando anticlinales de interés económico-petrolero. Objetivos específicos fueron: control de calidad de las mallas de datos, determinar la

relación anomalía gravimétrica residual-estructura, determinar la geometría de la Plataforma Esparta, realizar el mapa de la estructura del basamento magnético de la Plataforma Esparta y sureste del arco de San Gamón, así como la interpretación de fuentes magnéticas en un transecto sísmico.

Como parte de los resultados de este trabajo, se pueden citar:

- a) Del mapa de anomalía gravimétrica de pasa-banda, se encontró la relación anomalía gravimétrica residual-estructura del arrecife de pináculo del campo Marine. Con esta expresión, se visualizaron 47 oportunidades exploratorias del Play Illinois Basin-Silurian Reef, relacionados con los yacimientos carbonatados de arrecifes de pináculo.
- b) Del mapa de la Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética, se interpretó la geometría de la Plataforma Esparta ($8,650 \text{ km}^2$). En esta área, se definen seis dominios magnéticos, en cuyos límites se han documentado terremotos de diferentes magnitudes. El basamento magnético interpretado varía de Occidente a Oriente desde 3.6 hasta 8.7 kmbnm. También, de este mapa, se interpretaron 26 oportunidades exploratorias del Play Illinois Basin-Post-New Albany.
- c) Ubicando los perfiles de Anomalía de Bouguer y de Primera Derivada Magnética Vertical sobre un transecto sísmico, se interpretan cuatro ígneos intrusivos. La cima de los intrusivos puede estar asociada a minerales de cobre similares a los explotados al occidente de la placa Ozark.

Se concluye que la metodología empleada en la visualización de arrecifes de pináculo y de cuerpos ígneos intrusivos, puede ser aplicada en plataformas carbonatadas de rampa suave análogas



y áreas de actividad magmática ultrabásica.

I Introducción

En la cuenca de Illinois, se han descubierto diez plays convencionales y dos no convencionales. De los plays convencionales, el Play de Arrecifes de Pináculo está distribuido en la Plataforma Esparta, mientras que el Play Illinois Basin-Post-New Albany tiene una distribución más regional.

En Exploración Petrolera, la información gravimétrica y magnetométrica, se utiliza para realizar interpretación regional y local de estructuras geológicas como: fallas, geometría y profundidad del basamento cristalino, plataformas y cuencas sedimentarias, intrusivos arcillosos-salinos e ígneos intrusivos y extrusivos. En la Cuenca de Illinois, la información de Gravimetria, Geología Superficial y los estudios de la elevación topográfica, han ayudado a la interpretación de arrecifes de pináculo, descubriendose los campos Sandoval (1908), Bartelso (1936), Mckinley (1938) y Boulder (1941). El empleo de la sismología 2D y Gravimetria en 1943, apoyaron el descubrimiento de la estructura del arrecife de pináculo del campo Marine.

La producción de los 26 campos de arrecifes de pináculo del periodo Siluriano, hasta 1985, fue de 31.35 millones de barriles de aceite. Los campos más productivos son los campos Marine (con una producción acumulada de 12.44 millones de barriles de aceite) y Boulder. Adicionalmente a esta producción, los carbonatos de la Formación Geneva del Devoniano y los siliciclastos de las Formaciones Cypress y Benoit del Misissípiense, que sobreyacen a los arrecifes de pináculo, han contribuido con 60 millones de barriles de aceite.

La extensión areal de los arrecifes de pináculo, según Heigold P. and Whitaker S. 1989, varía desde 20 hasta 2470 acres (1 km^2 hasta 120 km^2). Los parámetros petrofísicos promedio del yacimiento son: espesor (9m), porosidad (14.6%), permeabilidad (113.2 md) y profundidad promedio (723 mbnm). Estos parámetros, califican la calidad de yacimiento de buena a excelente. Adicionalmente, los estudios de núcleos cortados en los pozos en el oriente del Arco de San Gamón, permitieron descubrir parches arrecifales.

Considerando que los arrecifes de pináculo tienen expresión

gravimétrica y los intrusivos tienen expresión magnética, se pretende cumplir el objetivo general y los objetivos específicos mediante el análisis, proceso e interpretación cualitativa de una ventana de datos del sur del estado de Illinois. La ventana de datos proviene de las mallas regionales de la Unificación de la Anomalía de Bouguer y de la Anomalía Magnética de los Estados de Illinois, Indiana y Ohio, realizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), (<https://pubs.usgs.gov/ds/321/data/>).

Las Oportunidades exploratorias interpretadas, se restringieron con la información de los resultados de campos y pozos perforados del Mapa Interactivo de Recursos de Petróleo y Gas del Estado de Illinois. Esta base de datos fue realizada por el Servicio Geológico de Illinois ISGS, (<https://isgs.illinois.edu/illinois-oil-and-gas-resources-interactive-map>). El análisis y procesado de los datos se realizó por el propio autor de este trabajo. Adicionalmente, se integró la información geológica y geofísica de diferentes fuentes.

II Antecedentes

II.1 La Cuenca de Illinois

Higley, D. et al., (2003) describen que la Cuenca de Illinois U.S.A. (Figura 1), como una cuenca intracratónica de edad precámbrica, de forma ovalada con dirección NW-SE; tiene una superficie aproximada de 155,400 Km² y ocupa el 90% del estado de Illinois, el suroeste del estado de Indiana y la porción noroeste del estado de Kentucky. Geológicamente, la cuenca se limita al norte por los arcos de Wisconsin, y Kankakee, al sureste por el arco de Cincinnati, al suroeste por el rift Reelfoot y al noroeste por el arco del Río Mississippi. Las principales estructuras en la cuenca son anticlinales, sinclinales, monoclinales, fallas normales y fallas de desplazamiento lateral (Figura 2).

Destacan:

- El cinturón anticlinal La Salle, con dirección NE-SW y longitud aproximada de 400 km.
- El graben Rough Creek, localizado al Sur.
- La cuenca Fairfield, localizada al oriente de la Plataforma Esparta.
- El sistema de fallas de desplazamiento lateral Cottage Grove al Sur.
- El Arco de Sangamón, y la Plataforma Esparta (círculo morado en la Figura 1), ubicados al Noroeste y Suroeste, respectivamente.

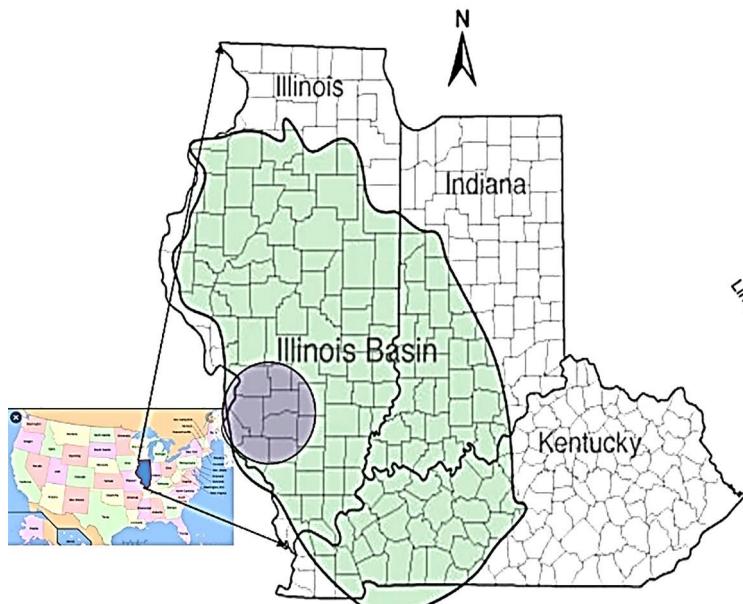


Figura 1. Ubicación de la Cuenca de Illinois, y la Plataforma Esparta.

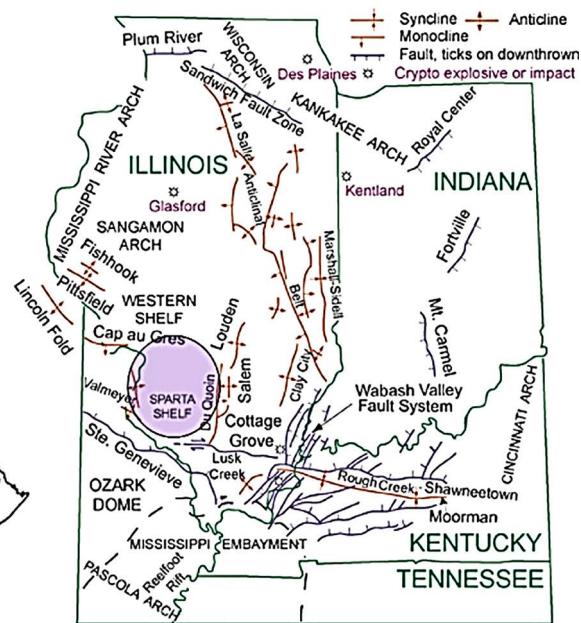
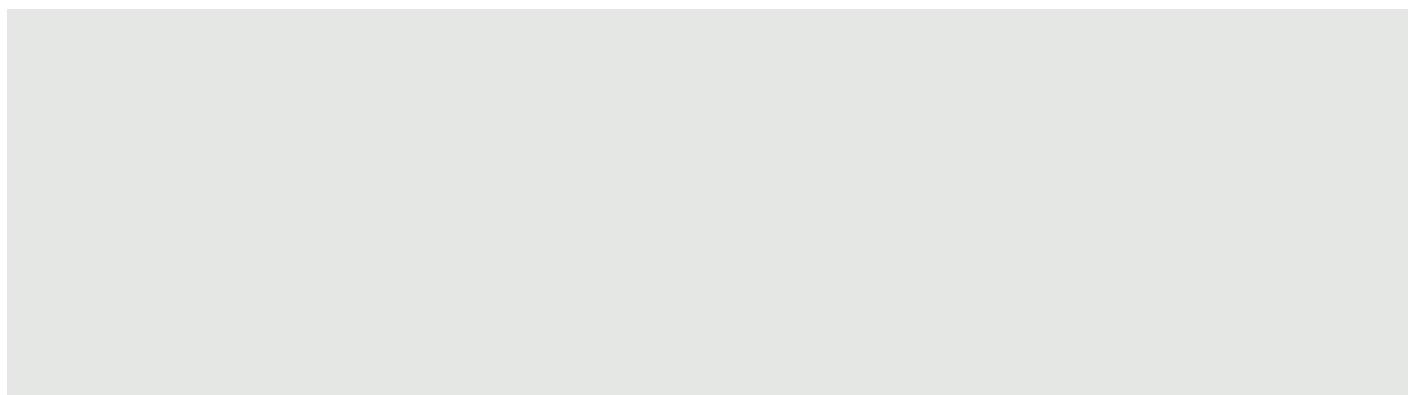


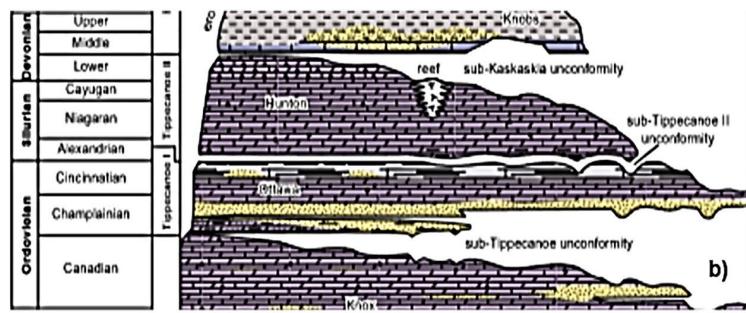
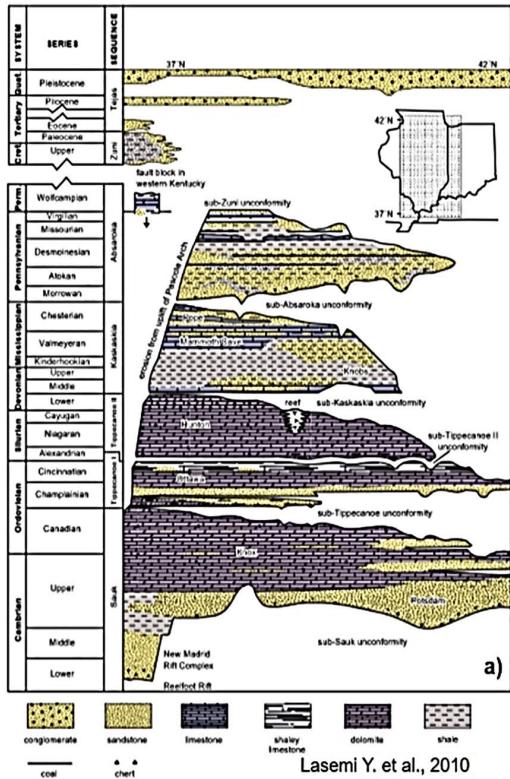
Figura 2. Principales estructuras en la Cuenca de Illinois.
Higley, D. et al., (2003).

II.2 Basamento y Estratigrafía

El basamento cristalino de la Cuenca de Illinois es del Periodo Precámbrico, y se ha identificado durante la perforación de 19 pozos. Está constituido por: granitos, granodioritas y riolitas (Bradbury et al., 1965). La mayor profundidad del basamento es la del pozo Humble (2,872mbnm). En 2016, Marshak et al., utilizando sísmica profunda, actualizaron el mapa de basamento Precámbrico y calcularon profundidades desde 132 hasta 9,678mbnm, en la parte más profunda de la cuenca.

La estratigrafía de la Cuenca de Illinois (Figura 3a), consiste en una alternancia de arenas y lutitas con intercalaciones de carbón del Pensilvaniense, lutitas, areniscas y carbonatos del Misissipíense, así como areniscas, lutitas y carbonatos del Devoniano, Siluriano, Ordovícico y Cambriano. Las rocas de estas Formaciones están afectadas por discordancias erosionales que marcan el cambio de ambientes sedimentarios originados por las transgresiones y regresiones marinas. La Figura 3b, muestra el tipo de rocas de las Formaciones de los Periodos Devoniano, Siluriano y Ordovícico, donde se observan los arrecifes de pináculo. Las rocas del Siluriano afloran en el NE y NW del estado (Figura 3c).





Thornton Quarry & mill, Cook Co., Illinois, USA

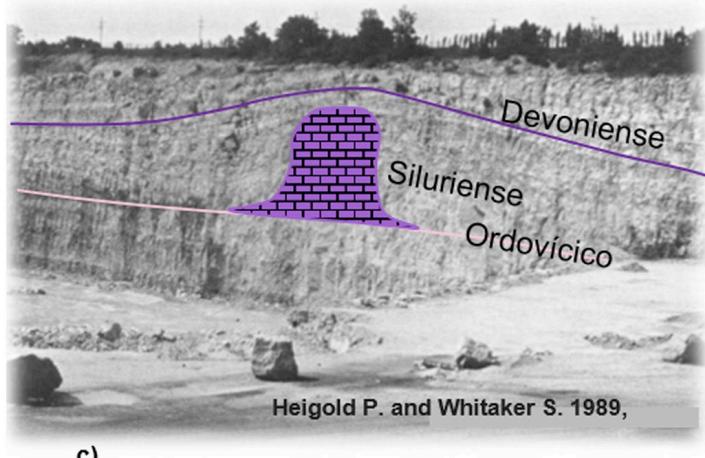


Figura 3. a) Tabla estratigráfica de la Cuenca de Illinois; b) Acercamiento de la estratigrafía de los períodos Devoniano, Siluriano y Ordovícico; c) Afloramiento de arrecifes de pináculo.

II.3 Plays y Sistemas Petroleros

Macke, David (1995), divide la Cuenca de Illinois en dos porciones. La norte, originada por el emplazamiento de arcos magmáticos alrededor de la cuenca, y la sur, originada por la subsidencia de la Costa del Golfo. El mismo autor propone que la Cuenca de Illinois tiene 10 Plays Convencionales y 2 No Convencionales. De acuerdo con los objetivos propuestos, en este trabajo se analizarán dos Plays Convencionales: a) Illinois Basin-Post-New Albany, y b) Illinois Basin-Silurian Reef.

a) Play Illinois Basin-Post-New Albany

Incluye todos los yacimientos de edad Pensilvaniense y Misissipiente que producen aceite, gas y gas seco en terrígenos y carbonatos de la Cuenca de Illinois. Está limitado al sur por la zona de Fallas Rough Creek y el área mineralizada del sureste de Illinois y noroeste de Kentucky.

Las trampas son estructurales (Campo consolidado Salem), estratigráficas (Campo consolidado El Dorado), Domos (Campo Omaha), combinadas y estratigráficas contra falla (campos asociados al Sistema de fallas del Wabash Valley, la Falla del Monte Carmelo y Sistema de Fallas Rough Creek-Shawneetown). La roca generadora es la New Albany Shale del Misissipiente inferior.

En el Misisipiense se han descubierto 16 campos. Los yacimientos en arenas tienen en promedio 7m de columna de aceite. Los espesores más grandes (50m) de los campos producen más de un millón de barriles de aceite.

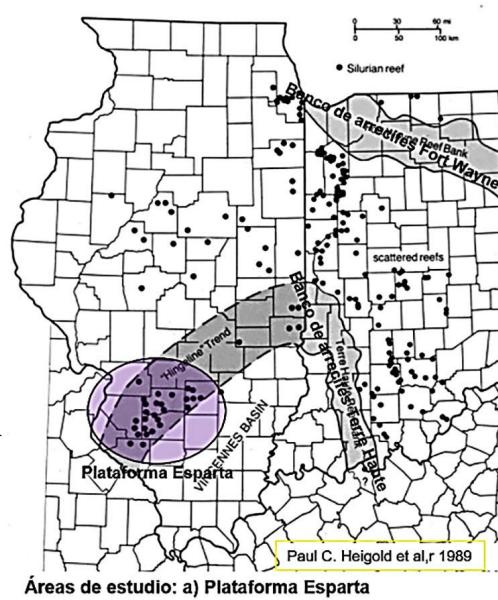
Este Play representa más del 95% de producción de hidrocarburos de la cuenca. Se han descubierto más de 160 yacimientos con más de 1 millón de barriles de aceite, cinco yacimientos de 6 mil millones de pies cúbicos de gas y uno de 154 mil millones de pies cúbicos de gas. La gravedad API del petróleo promedia 38° y contiene 0.3% de azufre. Dos campos, el Salem Consolidado y Louden han acumulado una producción de más de 500 millones de barriles de aceite, respectivamente, y el campo Lawrence 400 millones de barriles de aceite.

b) Play Illinois Basin-Silurian Reef

El Play de arrecifes del Siluriano, es un Play estructural-estratigráfico, donde se incluye la acumulación en yacimientos carbonatados de arrecifes de pináculo y yacimientos de sedimentos más jóvenes que sobreyacen a los arrecifes.

Los elementos del sistema petrolero del siluriano son: la trampa, que corresponde a los arrecifes de pináculo; el sello y la roca generadora son las rocas arcillosas de la Formación New Albany Shale; la roca almacén, que consiste en carbonatos cristalinos dolomitizados, sincronía y migración del aceite ocurren desde el

Figura 4. a) Distribución de arrecifes de pináculo en la Plataforma Esparta y Banco de arrecifes Terre Haute (Heigold et al., 2010).



Pérmico hasta el Triásico Temprano. Los yacimientos de los arrecifes son de edad Siluriana y en muchos casos producen las calizas del Devoniano y del Misisipiense, que forman parte del espesor total del yacimiento. La extensión del área de los arrecifes, según Heigold Paul and Whitaker Sthepen (1989), varía desde 20 acres a 2470 acres (1 km² hasta 120 km²). El grosor de 13 yacimientos promedia 8.6 m. La porosidad de nueve arrecifes promedia 14.6%, y la permeabilidad promedia 113.2 mD.

En la plataforma Esparta, se han descubierto 27 campos de aceite en estructuras de arrecifes de pináculo (Figura 4), la producción acumulada hasta 1985, fue de aproximadamente 32 millones de barriles de aceite y 60 millones de barriles de aceite en las rocas siliciclásticas del Pensilvaniense y carbonatos del Misisipiense y Devoniano. La exploración de los arrecifes de pináculo se inició en 1900, mediante la integración de la información de: elevación topográfica, Geología de Superficie, Gravimetría y Magnetometría.

Lasemi, Y. et al., (2010), refieren que el Play de arrecifes de pináculo, está distribuido en la Plataforma Esparta, continuándose al Occidente del estado de Indiana formando el alineamiento Terre Haute Reef Bank (THB) (Figura 4). Los autores, utilizando registros geofísicos, interpretaron parches arrecifales al SE del Arco de Sangamón (Figura 5). Los parches arrecifales interpretados, son estructuras sutiles con espesores de 9 m y variación lateral limitada.

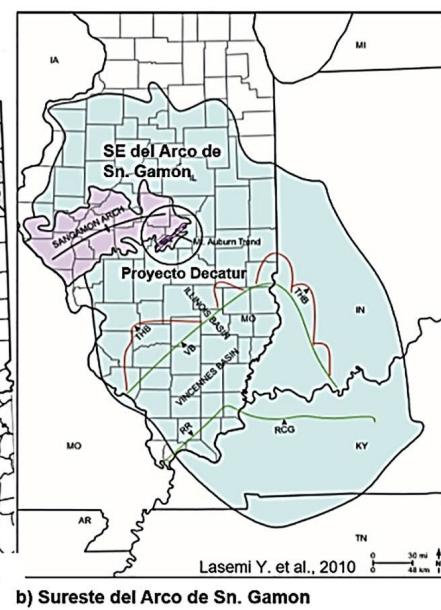


Figura 4. b) Parches arrecifales del alineamiento Mt. Auburn al Sureste del Arco de San Gamón.

El análisis de facies del campo Marine, realizado por Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen (1989), reporta que el área del campo es de 9 millas cuadradas. La regresión marina durante el Devoniano Temprano, erosionó los estratos de una gran parte de la Plataforma Esparta, incluyendo el arrecife de este campo, conservándose 175 m de espesor. La estructura del arrecife está discordantemente cubierta por una capa delgada (de hasta 12 m de espesor), de escombros de carbonatos. Un factor que puede contribuir al contraste de densidad entre las rocas del arrecife con las rocas no arrecifales de la misma edad, es el contenido de un mayor porcentaje de carbonatos del 90% comparado con un 80%, (valor típico). Los carbonatos limpios que constituyen el núcleo del arrecife son masivos y contienen abundantes detritos bioclásticos. En este campo, el núcleo del arrecife es dolomítico, posiblemente originado por la exposición subaérea del arrecife durante el Devoniano y su consecuente disolución por aguas meteóricas. La porosidad visible se desarrolló a través de cavidades que crecieron por la disolución y por numerosas fracturas del núcleo del arrecife. La Figura 5, muestra un modelo de densidad del arrecife del campo Nashville, ubicado en el condado Washington, Illinois.

De acuerdo con la configuración del espesor de la Formación Makoqueta (base del depósito de los arrecifes de pináculo), se considera que el modelo de sedimentación de la Plataforma Esparta es una porción de un homoclinal de rampa suave, que se extiende desde el Oeste del estado de Illinois hasta el Oriente del estado de Indiana. En la Figura 6a, se muestra una sección esquemática de Oeste a Este de la Plataforma Esparta, donde se ilustra la subsidencia hacia el Este de los estratos del Ordovícico durante el depósito de la Formación Makoqueta. La Figura 6b muestra un acercamiento de la porción correspondiente al estado de Illinois.

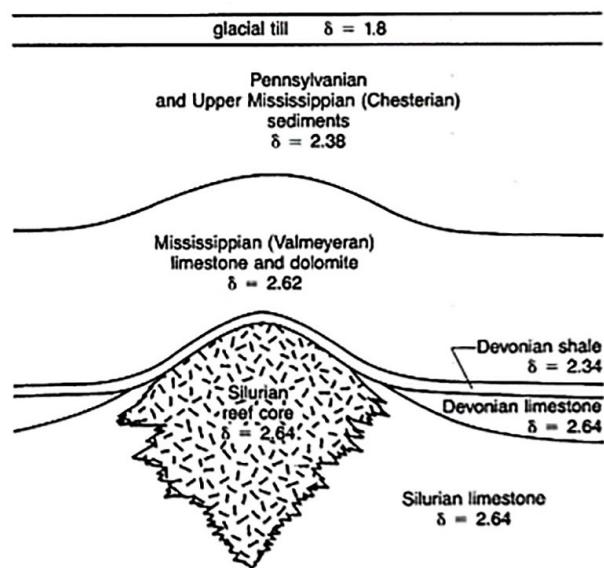


Figura 5. Modelo de densidad del arrecife de pináculo asociado al campo Nashville. Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen (1989).

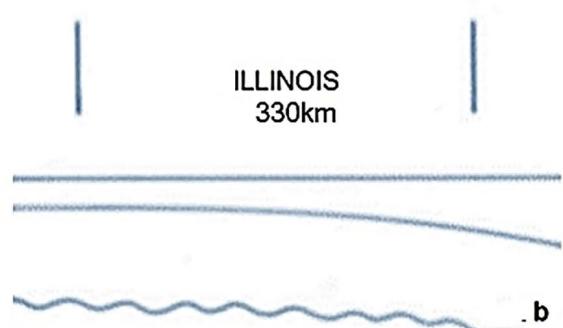
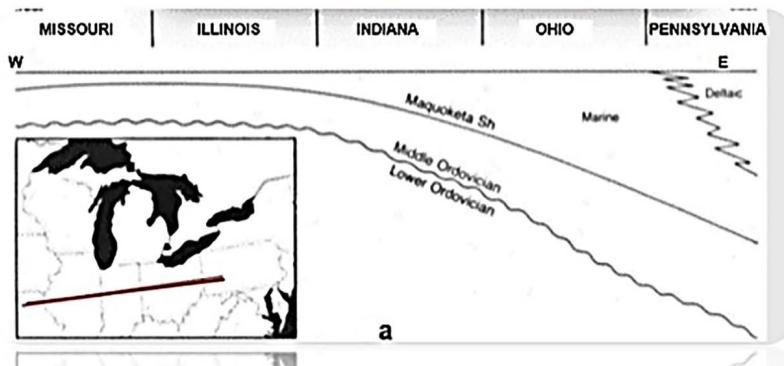


Figura 6. a) Sección esquemática de la subsidencia de los estratos del Ordovícico durante el depósito de la Formación Makoqueta, Figura 6b) Acercamiento del modelo de rampa suave para el estado de Illinois.

Las facies de los arrecifes de pináculo se formaron durante el aumento relativamente rápido del nivel del mar, cuando la producción de carbonatos mantenía su ritmo (Figura 7), originándose como biohermas aisladas durante el Periodo Niagara, continuando su desarrollo en el Periodo Cayugan (Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen 1989). Los arrecifes se construyeron inicialmente de algas, corales y estromaporoides. La agitación del fondo no es tan grande sobre los pináculos, los arrecifes de parche y los montículos de sedimentos como lo es en los arrecifes del borde de la plataforma, por lo que los organismos tienden a ser diferentes y la construcción de estructuras son menos importantes. Los arrecifes de pináculo y los arrecifes de parche están formados por constructores de estructuras, mientras que los montículos, son acumulaciones de limo, limo y arcilla atrapados por esponjas, octocorales, algas y crinoides.

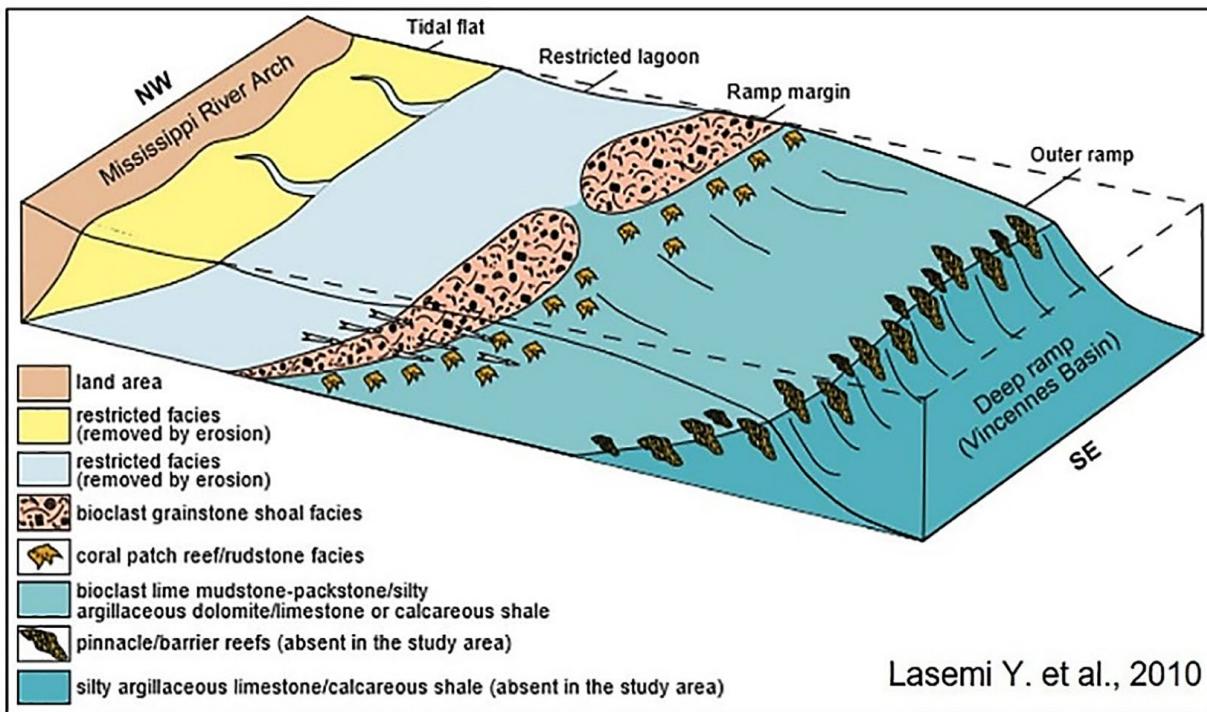


Figura 7. Modelo de depósito de parches arrecifales y arrecifes de pináculo.

En la Cuenca de Illinois, Kolata, Dennis et al., (2005), construyeron dos secciones estructurales, una orientada de Norte a Sur y la otra orientada de Oeste a Este. La Figura 8, muestra la segunda sección, con una longitud de aproximadamente 270 km.

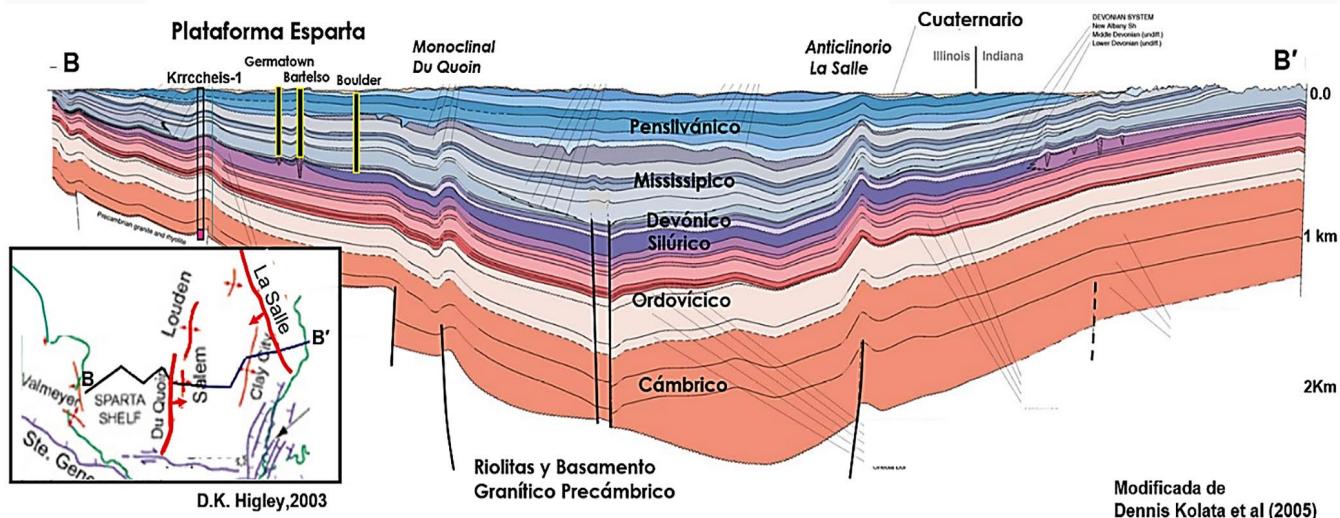


Figura 8. Sección estructural BB' transversal a la Cuenca de Illinois, donde se muestran algunas de sus estructuras. De Oeste a Este, se han ubicado: el pozo Kirccheis-1 que cortó basamento granítico a aproximadamente 1,000 mbnm, arrecifes de pináculo asociados a los campos Germatown, Bartelso y Boulder, monoclinal Du Quoin, Anticlinorio La Salle. Se incluye la estratigrafía del Cámbrico al Cuaternario sobreyaciendo al basamento Precámbrico, afectado por fallas normales.

II.4 Mapa interactivo de recursos de petróleo y gas de Illinois

Con el objeto de reactivar la exploración y producción petrolera en el estado de Illinois, el Servicio Geológico del Estado de Illinois (ISGS), desarrolló una base de datos de más de 200,000 registros de pozos de petróleo y gas, del estado de Illinois (Figura 9a). Otros datos y estadísticas disponibles en la base incluyen: horizontes de producción, muestras y datos de análisis de núcleos, contornos de estructuras, áreas de inundación de agua y campos de petróleo (Berg, Richard, (2021).

Para restringir las oportunidades exploratorias visualizadas, se consultó en la base de datos la información de los pozos de los campos productores de hidrocarburos en arrecifes de pináculo y del sureste del estado de Illinois. En la Figura 9b, se muestra una ventana del mapa del estado de Illinois, los polígonos de color verde representan los campos productores en los nueve condados, donde se localiza la Plataforma Esparta. La Figura 9c, muestra los pozos (círculos de color negro), del campo Marine, en tanto que la Figura 9d, muestra los datos de identificación de un pozo en particular.

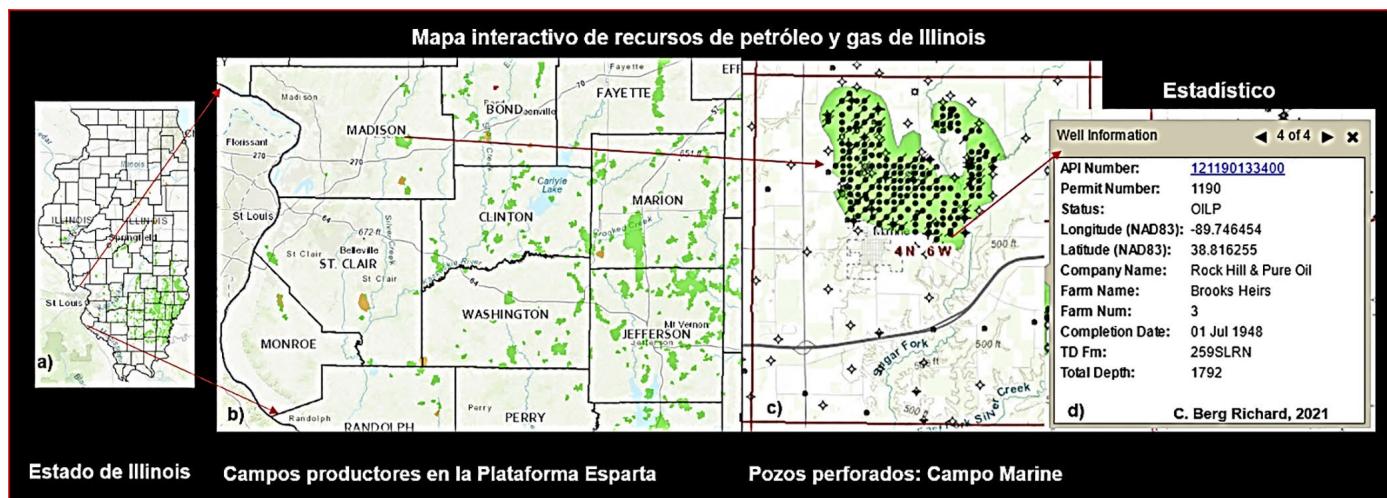


Figura 9. a) Mapa de campos productores y condados del estado de Illinois USA (Berg, Richard 2021), b) Acercamiento de campos productores, c) Pozos perforados en el campo Marine, d) Ejemplo de la información de pozos perforados consultada en este trabajo.

II.5 Geofísica

II.5.1 Sismología

En diferentes áreas del continente medio de la Provincia granito-riolita del Este, se han realizado adquisiciones sísmicas 2D y 3D, donde se han observado horizontes de alta amplitud debajo del basamento Precámbrico. La sección sísmica de la Figura 10b, es una de tres secciones observadas en 1989-1990. El objetivo de ese estudio fue interpretar una parte del sistema de fallas del Valle Wabash, así como la estructura profunda de la Cuenca de Illinois. El sistema de fallas mide más de 90 km de longitud y 70 km de ancho, son fallas normales de alto ángulo con tendencia noreste que forman grabens, de edad Pensilvaniense Tardío o del Pre-Pleistoceno, (R., Rene and F.L., Stanoni, 1995).

La Figura 10a, muestra la configuración estructural de la Formación Cypress del Misisipiense superior, donde los tres anticlinales configurados corresponden a las trampas de tres yacimientos.

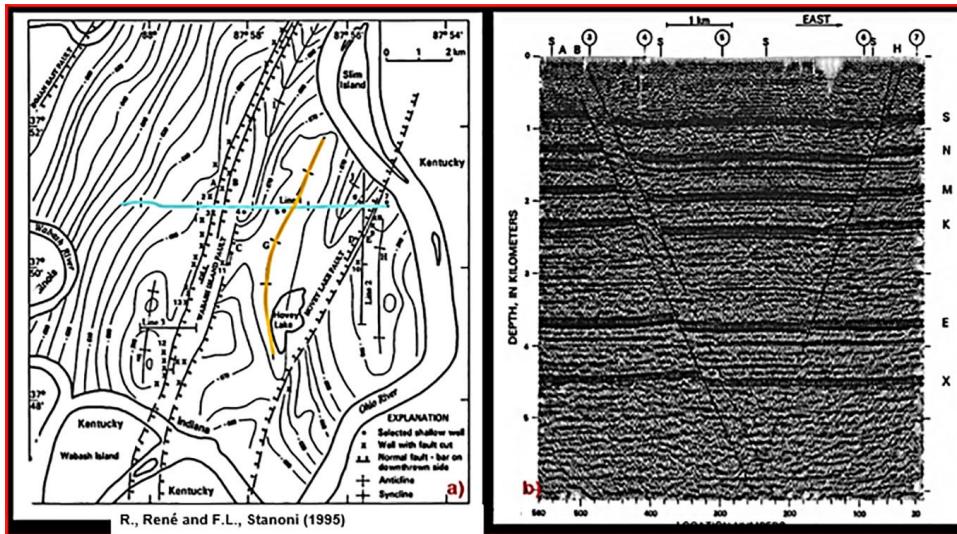


Figura 10. a) Configuración estructural de la cima de la Formación Cypress; **b)** Sección 1 en profundidad. Horizontes sísmicos interpretados: (S) Sta. Genoveva, (N) New Albany Shale, (M) Makoqueta, (X) Knox, Eu Claire, y (X) basamento acústico.

McBride, J. H., et al., 2016, en el sur este del Arco de San Gamón, interpretaron dos líneas sísmicas 2D (Figura 11b), un cubo sísmico y pozos que cortaron el basamento precámbrico (Horizonte tp C). Los horizontes sísmicos se ajustaron a las edades de las Formaciones cortadas en los pozos. De la integración de la información, se propuso un modelo de diques alimentadores de material magmático que forman una depresión (Figura 11 c). De acuerdo con Higley, D., et al. (2003), los ígneos intrusivos pueden proceder del emplazamiento del magma ultrabásico, del Pérmico durante la Orogenia Allegheniana.

La depresión interpretada, se considera una parte del modelo mostrado en la Figura 11d, donde se observan de la porción profunda a la sombra: un batolito, varios lacolitos, diques, así como un volcán, flujo de lavas y chimeneas volcánicas con diques radiales.

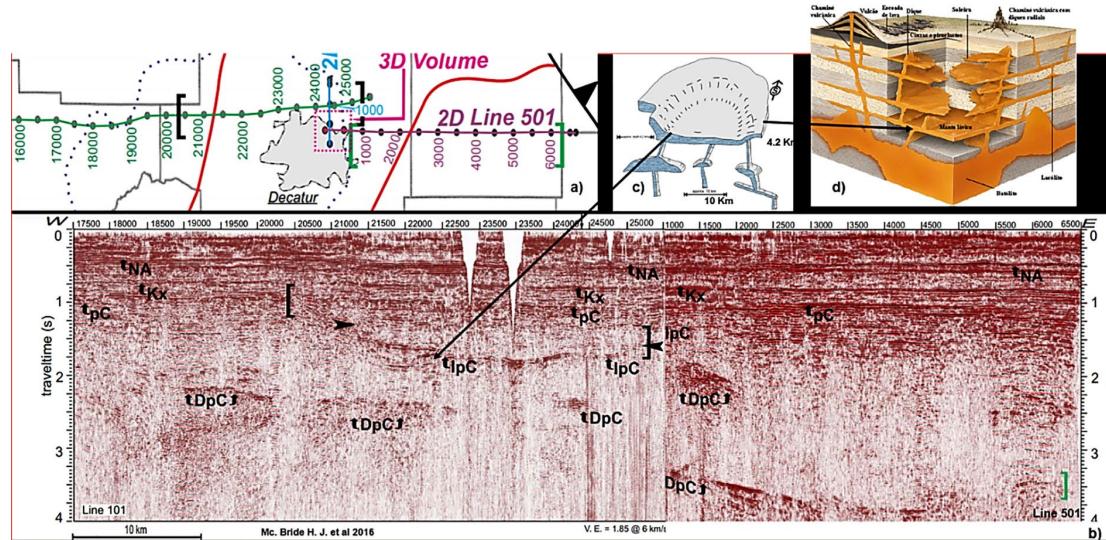


Figura 11. a) Ubicación de las líneas sísmicas 2D, 101 y 501; **b)** Transecto sísmico formado por la unión de las dos secciones; **c)** Lacolito en forma de una pequeña depresión con su base a 4.2 Km de profundidad; **d)** Modelo conceptual de un batolito y estructuras generadas por la intrusión de magma.

Liner, Kevin (2015) en su Tesis, presentó una investigación de los reflectores sísmicos debajo del basamento precámbrico en la Plataforma Cherokee, Condado Osage, del estado de Oklahoma. Utilizando la información de 2 cubos sísmicos, y núcleos de pozos, concluye:

- El análisis de la señal sísmica indica que la amplitud y la polaridad son similares entre los eventos del basamento y el mineral Tripoli detectados.
- Por la baja impedancia del Tripoli respecto al granito circundante, no existen puntos brillantes. Mediante análisis de los núcleos de tres pozos que cortaron basamento, se identificó que contenían minerales de cuarzo, caolinita, dikita y dioptasa.

Al occidente de la Plataforma Cherokee (Figura 12a), existe un Distrito minero denominado Tres Estados, activo desde 1879 hasta 1962. En este Distrito se explotó el metal cobre contenido en el mineral dioptasa.

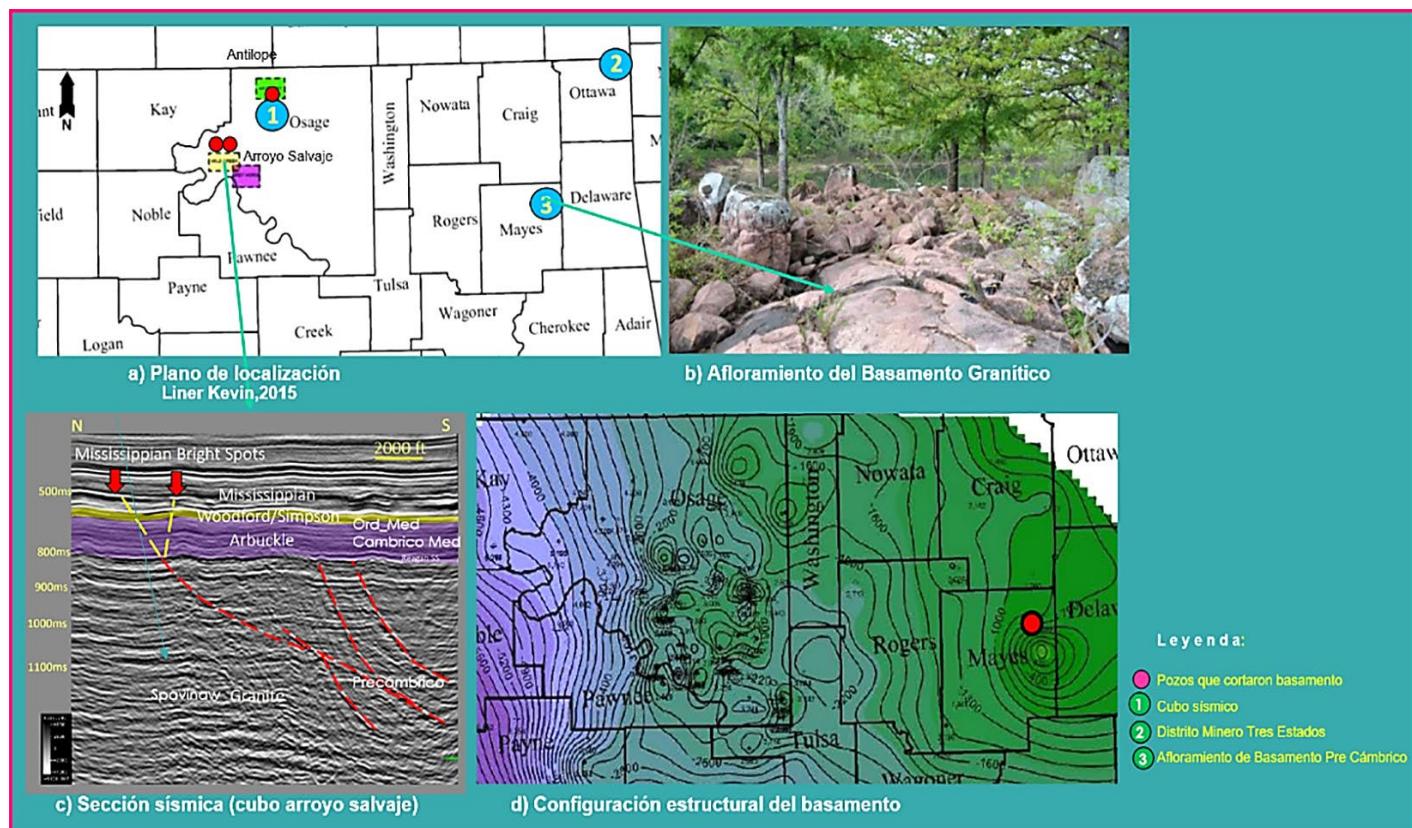


Figura 12. a) Plano de localización; b) Afloramiento del basamento; c) Sección sísmica; d) Configuración estructural del basamento, (Liner, Kevin 2015).

11.5.2 Gravimetría y Magnetometría

Heigold, Paul and Whitaker, Stephen (1989), reportan en su artículo la adquisición de Gravimetría, para conocer la expresión gravimétrica de la estructura arrecifal del campo Marine y, con este conocimiento, buscar otros arrecifes de pináculo. De la interpretación sísmica generaron el mapa estructural del campo Marine. La configuración estructural está asociada a una estructura arrecifal de más de 100 km² en forma de hendidura de caballo (Figura 13a). En las Figuras 13b y 13c, se muestran la Anomalía de Bouguer adquirida y la Anomalía Gravimétrica Residual procesadas en ese tiempo. Se observa que la anomalía gravimétrica residual obtenida no coincidió con la forma de la estructura. Mediante el análisis de la densidad de los carbonatos de los núcleos cortados en los campos Marine y Nashville, los autores investigaron las facies que constituyen la estructura arrecifal de pináculo.

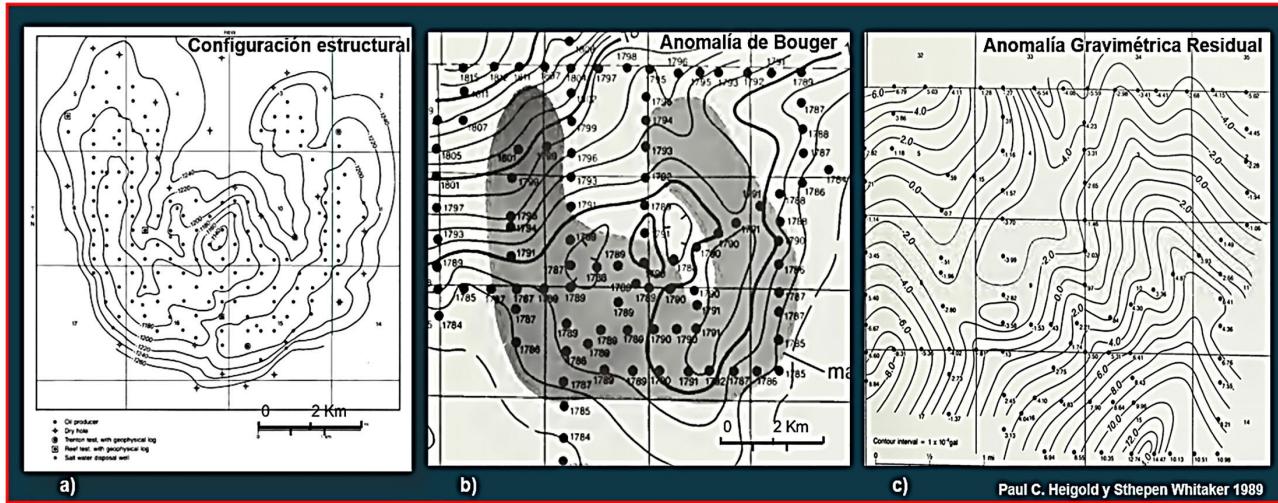


Figura 13. a) Configuración sismico-estructural del campo Marine, b) Anomalia de Bouguer sobrepuesta al campo Marine, y c) Anomalia Residual, (Heigold, Paul and Whitaker, 1989).

En el sureste del estado de Illinois, se ha documentado el emplazamiento de enjambres de diques (Figura 14a). En una anomalía magnética positiva (Figura 14b) asociada al domo Omaha, se perforó en 1940 el pozo Luther Rister-1 y durante la perforación se cortaron dos diques a diferentes niveles estructurales del Misisipiense. Las rocas cortadas se clasificaron como alonita, que es una roca ígnea ultramáfica derivada del manto con una edad de 260 Ma (Pérmico Tardío). El pozo resultó productor de hidrocarburos en las arenas de la Formación Cypress. Posteriormente, se desarrolló el campo Omaha y otros más (Figura 14d).

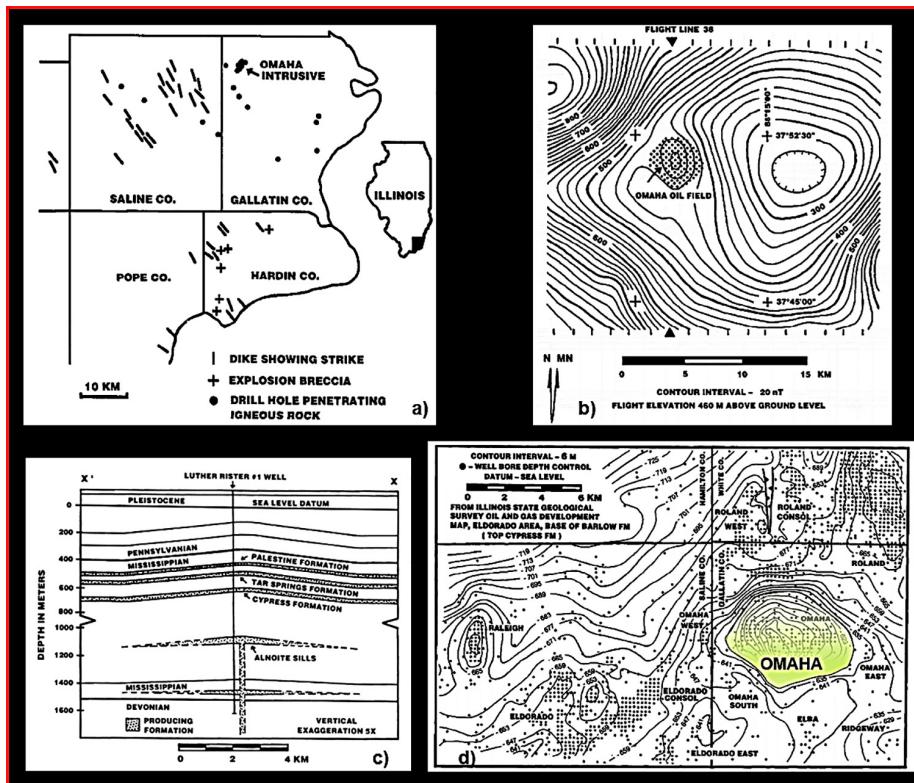


Figura 14. a) Condados Saline, Gallatin, Pope y Hardin localizados en el sureste del estado de Illinois. En estos condados se ha encontrado actividad ígnea expresada por enjambres de diques, brechas explosivas y pozos que cortaron sills; b) Expresión magnética del domo Omaha; c) Sills encontrados durante la perforación del pozo Luther Rister-1; d) Campo Omaha y configuración estructural de la cima de la Formación Cypress.

III Metodología

La visualización de oportunidades exploratorias en el sur del estado de Illinois, se realizó en dos partes: la primera se fundamenta en la aplicación, en la Plataforma Esparta, de la hipótesis de Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen (1989). Esta hipótesis, consiste en el conocimiento de la expresión gravimétrica residual de los campos petroleros asociados a arrecifes de pináculo. La segunda parte consiste en la visualización de oportunidades exploratorias al sureste del estado de Illinois, asociadas a estructuras anticlinales producidas por el emplazamiento de ígneos intrusivos, similares al intrusivo que produjo el anticinal del campo Omaha. Todas las oportunidades exploratorias visualizadas se restringirán con la información de pozos perforados de la Base de Datos del Mapa Interactivo de Aceite y Gas del estado de Illinois.

El basamento Precámbrico no tiene expresión magnética, su estructura regional es de profundizarse suavemente hacia el Este. En la Plataforma Esparta, tiene una variación de 1m de profundidad por cada 50m de distancia. En las secciones sísmicas observadas al sureste del arco de San Gamón, debajo del basamento granítico, se han interpretado horizontes sísmicos de alta amplitud que forman una geometría similar a una depresión. Con la finalidad de conocer la estructura del basamento magnético, se propuso generar el mapa de basamento magnético de la Plataforma Esparta y del sureste del Arco de Sangamón. Adicionalmente, utilizando los perfiles de Anomalía de Bouguer, de Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética y el perfil del basamento magnético, se interpretaron las fuentes magnéticas en un transecto sísmico.

III.1 Gravimetría

III.1.1 Análisis, proceso e interpretación de la Anomalía de Bouguer.

Las bases de datos, en formato .grd (Geosoft-Seequent), correspondientes a la unificación de la Anomalía Magnética (Figura 15a), y de la Anomalía de Bouguer (Figura 15b), de los estados de Illinois, Indiana y Ohio USA, fueron descargados del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS, (Daniels, David,et al., 20016). Los datos de la malla de la Anomalía de Bouguer son valores separados a 500 m (Figura 15a), este mapa se observa contaminado de anomalías de altas longitudes de onda (Figura 16a).

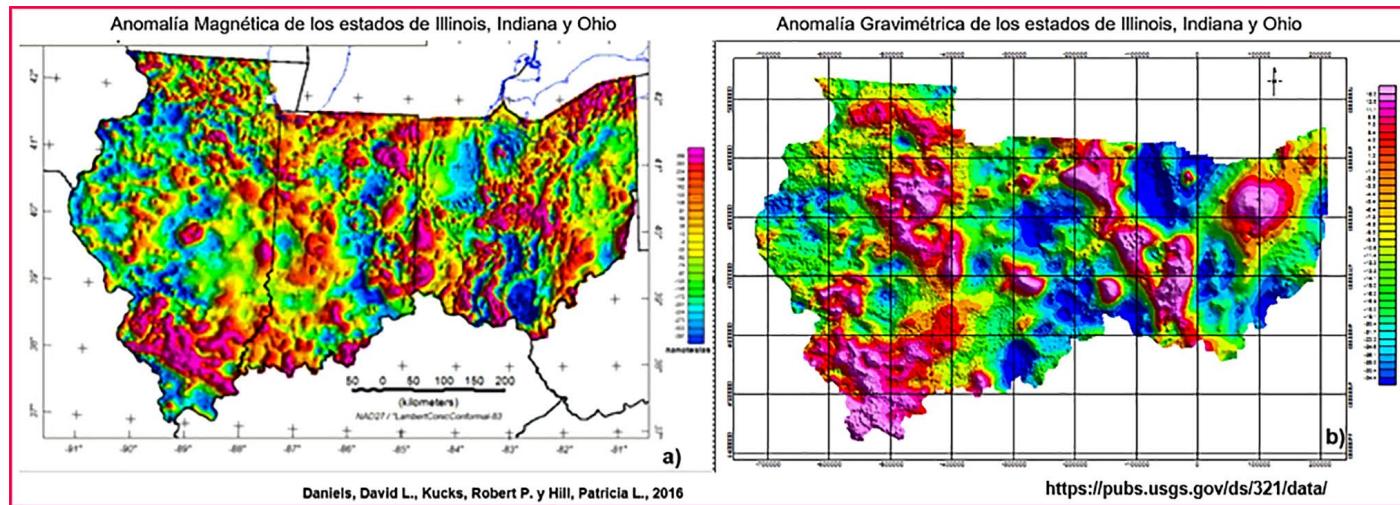


Figura 15. a) Anomalía magnética, y b) Anomalía gravimétrica de los estados de Illinois, Indiana y Ohio.

Para atenuar estas anomalías, se generó un nuevo mapa con datos separados a 1km (Figura 16b). Después del remallado, las altas frecuencias continuaban, se decidió entonces aplicar un filtro pasa bajas de 1km de longitud de onda de corte (Figura 16c), finalmente, al mapa anterior, se le aplicó un filtro pasa-bajas de 3 km (Figura 16d). Obsérvese que después de cada proceso, la señal de la Anomalía de Bouguer se fue mejorando hasta obtener una señal más "límpia y útil" para ser interpretada.

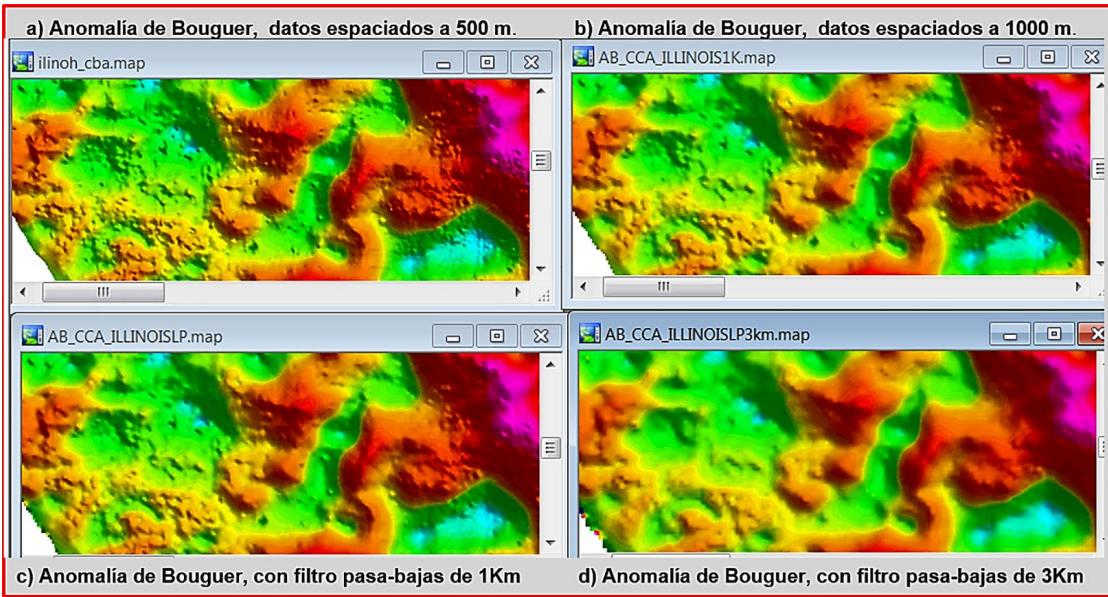


Figura 16. a) Anomalía de Bouguer contaminada de altas longitudes de onda; b) Remallado con datos separados a 1km; c) Atenuación de anomalías de hasta 1km de longitud de onda; d) Atenuación de las señales de hasta 3 km de longitud de onda.

Aun cuando el mapa de Anomalía de Bouguer no es un mapa estructural, la distribución de los campos petroleros en la Plataforma Esparta, asociados a estructuras arrecifales, indicará la relación que guardan los campos con los alineamientos de máximos-mínimos gravimétricos y sus tendencias. En el mapa de Anomalía de Bouguer y campos petroleros (Figura 17), se identificaron los alineamientos de cierres de máximos gravimétricos (color amarillo) y los mínimos gravimétricos (color verde). A partir de los cierres se identifica la orientación de su tendencia (línea continua de color rojo). Por ejemplo, al occidente del mapa, se localiza el campo Marine y su tendencia de máximos gravimétricos termina en el campo New Memphis South. Otra tendencia de máximos se define al oriente de la primera, donde se ubican los campos Oakville North, Oakville y Nashville, obsérvese que esta tendencia continúa hacia el sur, donde ya no hay campos descubiertos. Otra tendencia importante es la localizada al oriente del mapa, donde se ubican los campos Patoka y Racoon Lake, esta tendencia continúa hacia el sureste, donde tampoco se han descubierto arrecifes de pináculo. Con líneas discontinuas de color rojo se han marcado otras tendencias de máximos gravimétricos que pueden estar asociados a arrecifes de pináculo. En las tendencias de mínimos gravimétricos se ubican los campos Boulder, New Baden East, Bartelso Este, St. Libory, Lively Grove, Tilden North, Buttermilk y Baldin.

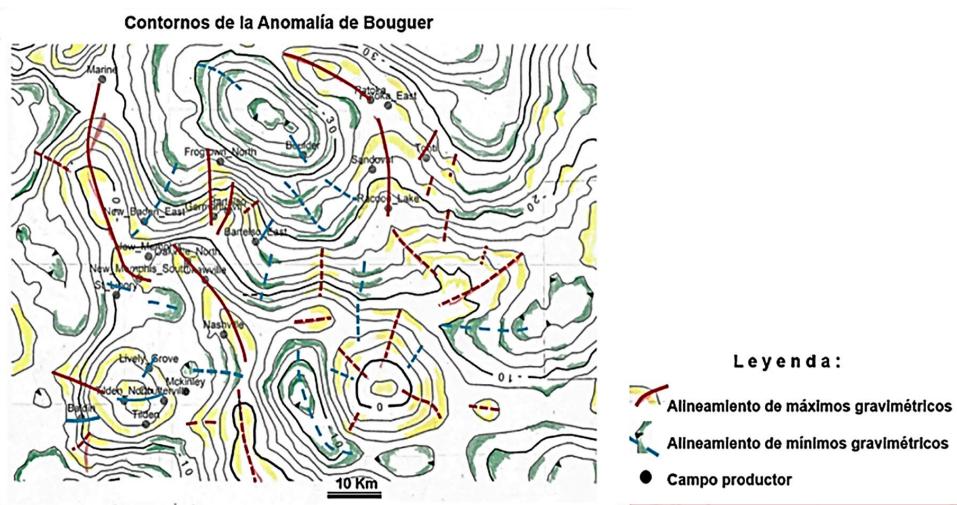


Figura 17. Anomalía de Bouguer. Campos productores en las tendencias y alineamientos de máximos, mínimos y de gradiente gravimétrico.

El campo Boulder es el segundo de mayor producción, se localiza al sureste de un cierre de mínimo gravimétrico. En el mapa se observan tres cierres de mínimos gravimétricos donde no se han descubierto arrecifes de pináculo. Los campos Tilden, New Memphis, Frogtown North, Sandoval, Patoka Este y Tonti, se ubican en el gradiente. El análisis cualitativo realizado, muestra la existencia de campos (estructuras arrecifales), en alineamientos de máximos y mínimos gravimétricos, y en sus tendencias.

Para visualizar oportunidades exploratorias asociadas a arrecifes de pináculo, se requiere conocer la expresión gravimétrica de los campos y su configuración sísmico-estructural. De los estudios sísmicos publicados, sólo se dispone de la configuración estructural del campo Marine (Figura 13a).

III.1.2 Relación Anomalía Gravimétrica Residual-estructura arrecifal

Para evaluar la relación arriba señalada, se diseñaron y probaron algunos filtros pasa-banda hasta obtener la expresión gravimétrica del campo Marine. El filtro que recuperó la forma de la estructura del campo Marine, tiene (6-2.5) km de longitud de onda de corte. En la Figura 18a, se muestra la Anomalía de Bouguer de una porción del Condado Madison donde se localiza el campo Marine; en la Figura 18b, se muestra la anomalía gravimétrica de pasa-banda procesada de la Anomalía de Bouguer; y en la Figura 18c, se muestra la anomalía gravimétrica residual del campo Marine. Para verificar la relación anomalía gravimétrica residual-estructura, se ha sobrepuerto la estructura del campo Marine sobre la anomalía gravimétrica residual, observándose la coincidencia (Figura 18d).

Esta coincidencia da confianza para comprobar la hipótesis de Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen (1989). Así con el mapa regional de anomalía gravimétrica de pasa-banda, se confirmará la expresión gravimétrica asociada a los campos de arrecifes de pináculo localizados en alineamientos de máximos y mínimos gravimétricos, y en sus tendencias. Para la ventana de datos de la Anomalía de Bouguer que ellos adquirieron (Figura 13c), escriben: "Los datos de gravedad son útiles para localizar arrecifes. Sin embargo, no todos los arrecifes muestran anomalías de gravedad, ni cada anomalía gravitatoria indica la presencia de un arrecife". Lo cual es cierto si se observa el mapa de la Figura 18b.

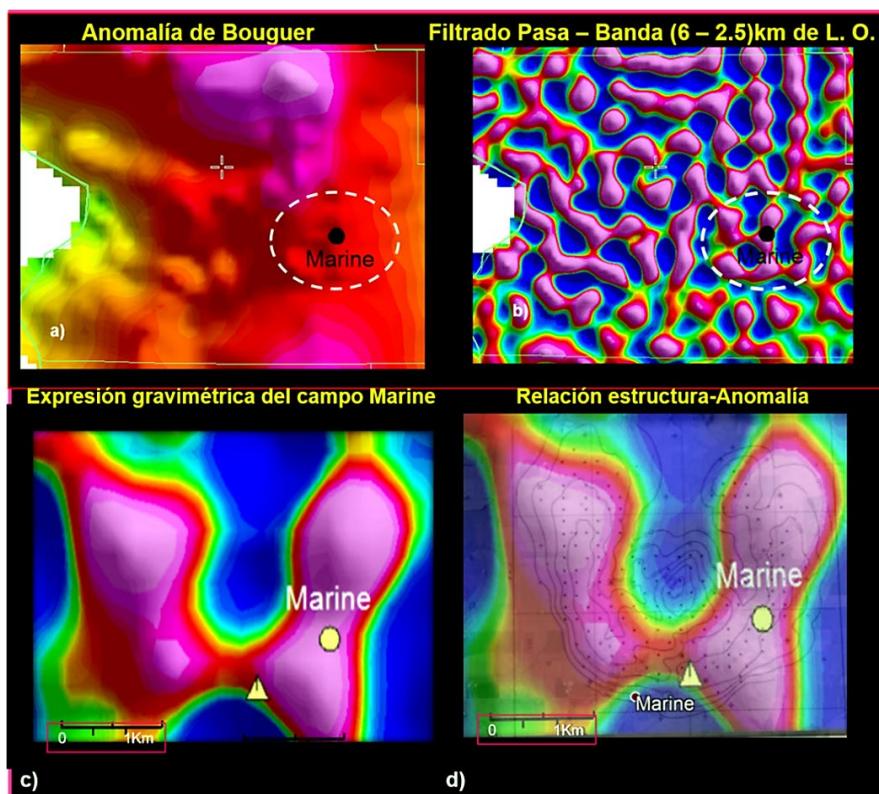


Figura 18. a) Anomalía de Bouguer; b) Anomalía Gravimétrica de Pasa-banda; c) Anomalía Gravimétrica Residual del campo Marine; d) Observe la coincidencia de la estructura del campo Marine sobre la Anomalía Gravimétrica Residual.

En este trabajo la visualización de oportunidades exploratorias, se realizó revisando las anomalías gravimétricas asociadas a los campos que se consideraron como análogos, posteriormente se seleccionó el área con la misma expresión gravimétrica, finalmente, las áreas seleccionadas se restringieron con el resultado de la perforación de pozos cercanos. De la revisión realizada, se encontró que la expresión gravimétrica de los arrecifes de pináculo localizados en los alineamientos de máximos gravimétricos corresponde a una Anomalía Gravimétrica Residual positiva. Aquellos que se ubican en los lineamientos de mínimos gravimétricos, su expresión gravimétrica residual es un mínimo gravimétrico y aquellos que se ubican en las tendencias, su expresión gravimétrica residual es la variación (la pendiente) del máximo al mínimo o del mínimo al máximo gravimétrico residual.

III.1.3 Oportunidades Exploratorias en la Plataforma Esparta

Conocida la relación Anomalía Gravimétrica Residual-campo, se procedió a visualizar áreas de interés económico petrolero en las tendencias de máximos, mínimos gravimétricos y en la pendiente (Figura 19a). Del método aplicado, se visualizaron 47 oportunidades exploratorias, la mayoría de ellas están localizadas en las tendencias gravimétricas marcadas (Figura 19b).

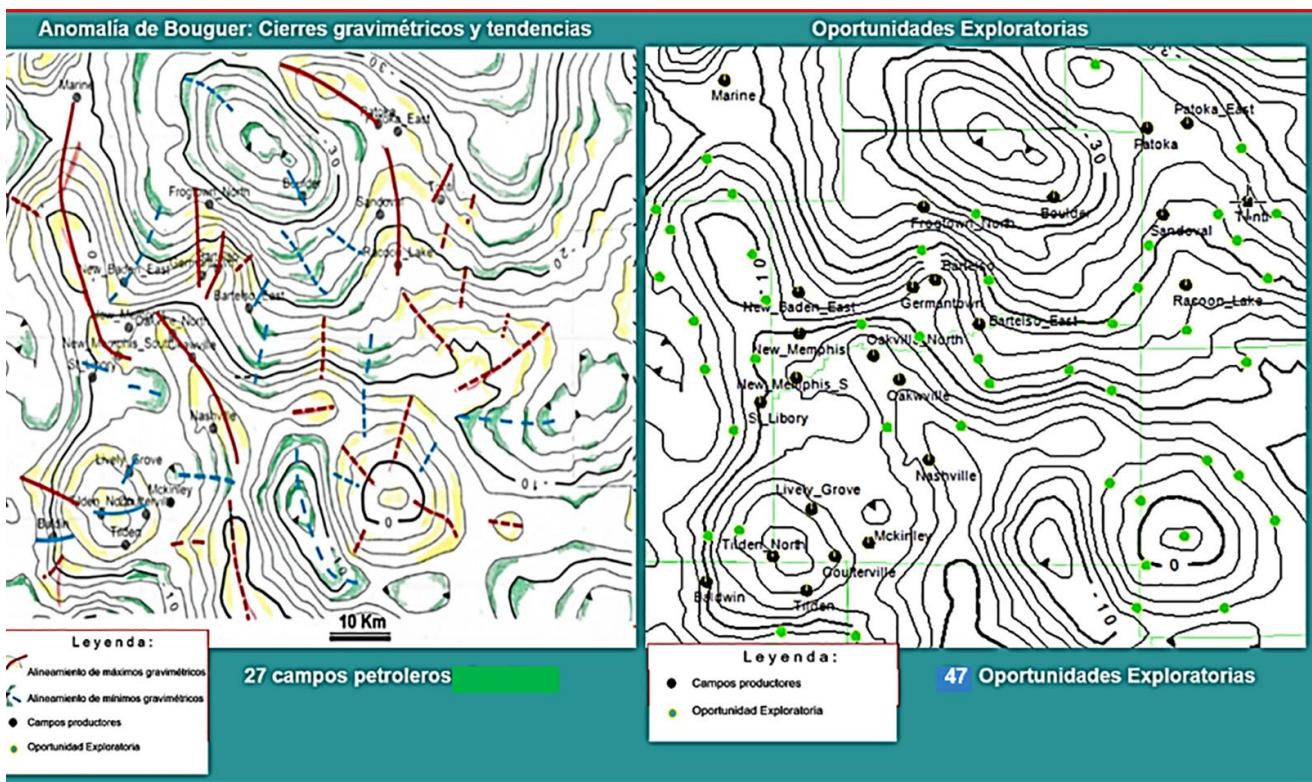


Figura 19. a) Mapa de contornos de Anomalía de Bouguer y campos productores, b) 47 Oportunidades Exploratorias visualizadas.

III.2 Magnetometría

III.2.1 Reducción al Polo y Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética

Al igual que para los datos gravimétricos, la información de la anomalía magnetométrica, utilizada en este trabajo, se descargó de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), unificada y continuada analíticamente a 305 m sobre el terreno en una proyección Cónica Conforme Lambert (Meridiano Central: 83 grados de Longitud Oeste; Paralelos estándar: 33 y 45 grados de Latitud Norte; Eje semi mayor del elipsode = 6378206.4m; Datum Horizontal: NAD27; Elipsoide: Clarke 1866; Transformación del Datum Local= USA NADCON Geoid99).

Para interpretar esta malla de información, se reprojetó al sistema WGS 84 y Datum Illinois CS27 West zone (Figura 20a). Para realizar el proceso de Reducción al Polo (RTP) de la Anomalía Magnética, se consideró la Inclinación y la Declinación Magnética de datos contenidos en una ventana de datos del sur del estado de Illinois, definida por una línea imaginaria de Latitud Máxima al Norte de 38.835769° y Longitud Oeste de -90.123318° y de -88.974430° de Longitud Este. El cálculo de Declinación e Inclinación magnética se realizó con la Calculadora de Componentes de Campo Magnético del Centro Nacional de Información Ambiental dependencia del NOAA de los Estados Unidos, donde se utilizó un Modelo IGRF (1590-2024). Los valores calculados fueron: 1.8304° para la Declinación y 65.99285° de Inclinación. En la Figura 20 b) se muestra el mapa obtenido para el estado de Illinois. Para determinar la variación del campo magnético respecto a la distancia, se efectuó la Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética RTP (Figura 20c).

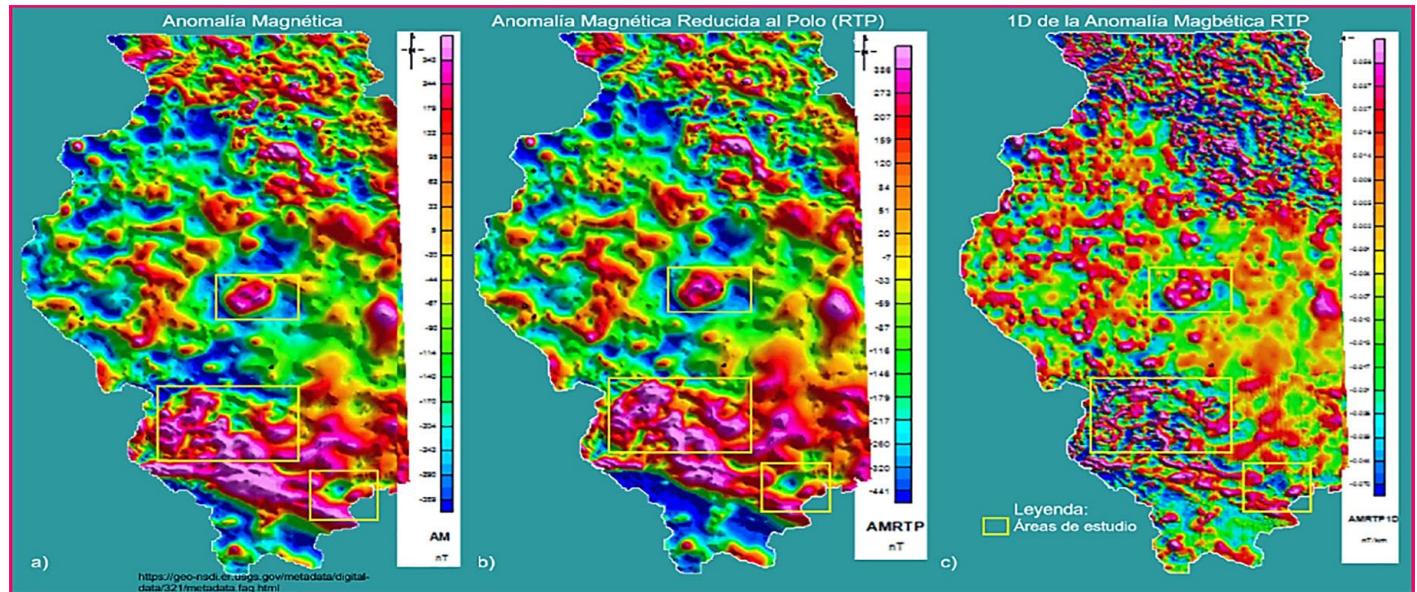


Figura 20. a) Anomalia Magnética del estado de Illinois y áreas de estudio (polígonos de color amarillo); b) Anomalia Magnética Reducida al Polo, c) Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética RTP.

En el mapa de la Anomalía Magnética RTP, se ubicaron los campos productores asociados a los arrecifes de pináculo. La distribución de los campos muestra el área aproximada de la Plataforma Esparta (Figura 21a). Magnéticamente, la Plataforma Esparta está definida por un conjunto de máximos magnéticos de origen ultramáfico, emplazados en el Pérmico y reactivados hasta el Reciente. Los valores de amplitud de los máximos magnéticos varían de -441 hasta 386 nanoteslas (nT) con longitudes de onda de: 5, 7, 12, 16, 18, 20 y 23 Km. Los valores de amplitud de los máximos magnéticos en la Plataforma Esparta, tienen la mayor magnitud que cualquier otro valor de máximos magnéticos en el estado de Illinois (escala de valor-color de la Figura 20a).

III.2.2 Interpretación de la geometría de la Plataforma Esparta

La geometría interpretada de la Plataforma Esparta es parecida a una elipse (Figura 21a), con un área de 8,650 km². En el mapa de la Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética RTP se define mejor esta geometría, dentro de ella, se interpretan 6 dominios magnéticos, donde los máximos magnéticos en los dominios se interpretan como ígneos intrusivos. En el sur este de este mapa, se observa distorsión de los dipolos magnéticos en una línea recta de oeste a este en los límites de los condados: Madison, Bond, y termina a 20 km al oriente del Condado Fayette. En ese punto, la distorsión cambia su dirección de norte a sur atravesando los Condados de Marion, Jefferson y Franklin. Estas líneas de distorsión corresponden a los límites de la adquisición magnética, y pueden estar asociadas a: 1) errores de micronivelación de la adquisición, y 2) proceso de unificación de proyectos adyacentes, estos errores se enfatizan en el proceso de Derivadas. Afortunadamente, para este trabajo, la interpretación de la geometría de la Plataforma Esparta, el cálculo de profundidad de fuente magnética y la configuración del basamento magnético, no son afectados.

Las áreas de los dominios magnéticos, en el sentido de las manecillas del reloj, son: 2,264 (D1), 1,229 (D2), 792 (D3), 958 (D4), 1,051 (D5) y 529 km² (D6) (Figura 21b), en sus límites han ocurrido terremotos de magnitudes desde 2 hasta 5.2, (Marshak, Stephen, et al., 2016). originados por la disipación de la energía almacenada en los límites de los dominios magnéticos. Estos límites de dominio, pueden interpretarse como fallas que han permitido su movimiento vertical relativo desde el Pérmico hasta el Reciente.

En la Figura 21c), se muestran: polígonos de los dominios magnéticos, afloramiento y configuración del basamento Precámblico, Sistema de Fallas Sta. Genoveva, Sistema de Fallas Cottage Grove, Monoclinal Du Quoin, Anticlinal Salem, Anticlinal Louden y epicentros de terremotos.

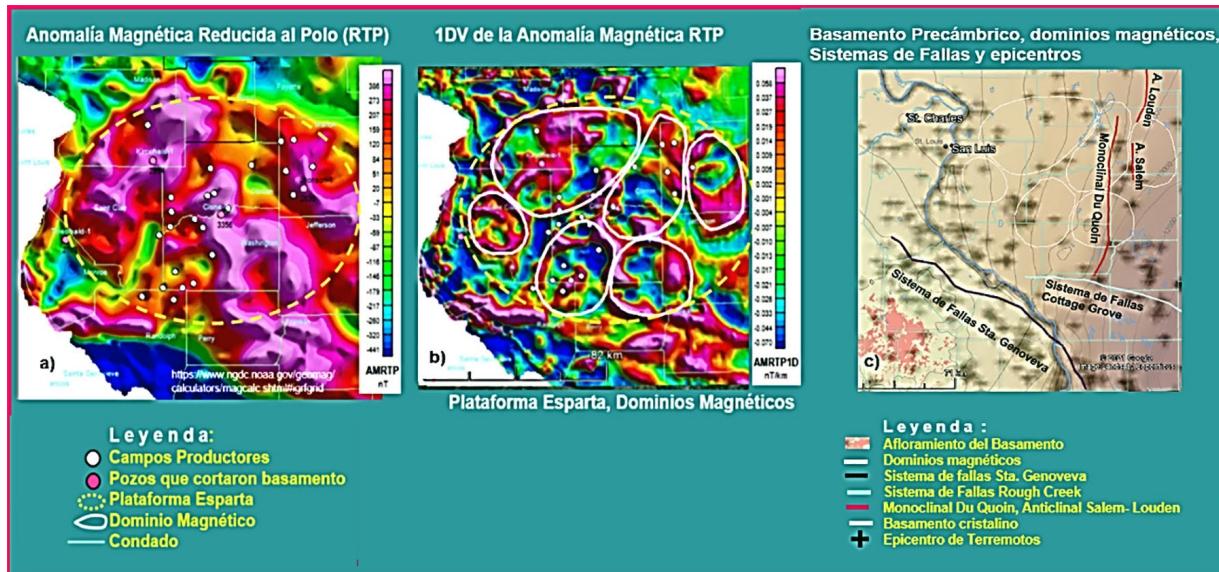
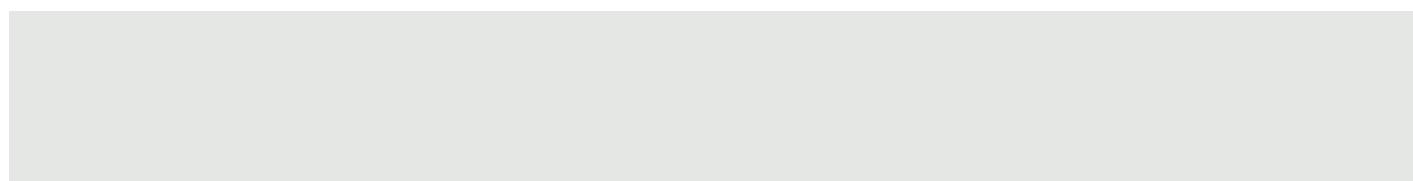


Figura 21. a) Anomía Magnética RTP y geometría de la Plataforma Esparta; b) Primera Derivada Vertical de la Anomía Magnética RTP y Dominios Magnéticos; c) Epicentros, Sistemas de fallas, dominios magnéticos y anticlinales Salem y Louden.

III.2.3 Mapa de Basamento magnético de la Plataforma Esparta y del Oriente del Arco de San Gamón

Telford, W. et al., (1990), describen que el método de las pendientes es adecuado para la estimación de profundidad de fuente magnética del basamento con contactos de caída pronunciada, así como para en el análisis de datos aerotransportados. Empleando el mapa de la Anomalía Magnética (Figura 20a) y utilizando el método de la pendiente para la estimación de profundidad de fuente magnética, se trazaron 110 perfiles magnéticos. En la Figura 22a, se muestran, como ejemplo, los perfiles 2 y 3. Los valores calculados de profundidad de fuente magnética, se configuraron para obtener el comportamiento del basamento magnético, se determinó que la profundidad varía de 2.6 hasta 8.2 kmbnm (Figura 22b). En el cálculo de la profundidad de fuente magnética, por este método, se aplica un factor que multiplica la profundidad estimada por una constante, su valor se encuentra entre 0.8 y hasta 2. El factor utilizado en este trabajo fue de 0.9, y se obtuvo de la calibración de la profundidad del basamento magnético en el sureste del Arco de Sangamón, donde hay control de la profundidad del basamento precámbrico cortado por tres pozos y dos líneas sísmicas 2D en profundidad, interpretadas en 2016 por McBride, J. H., et al. (Figuras 11b y 11c).



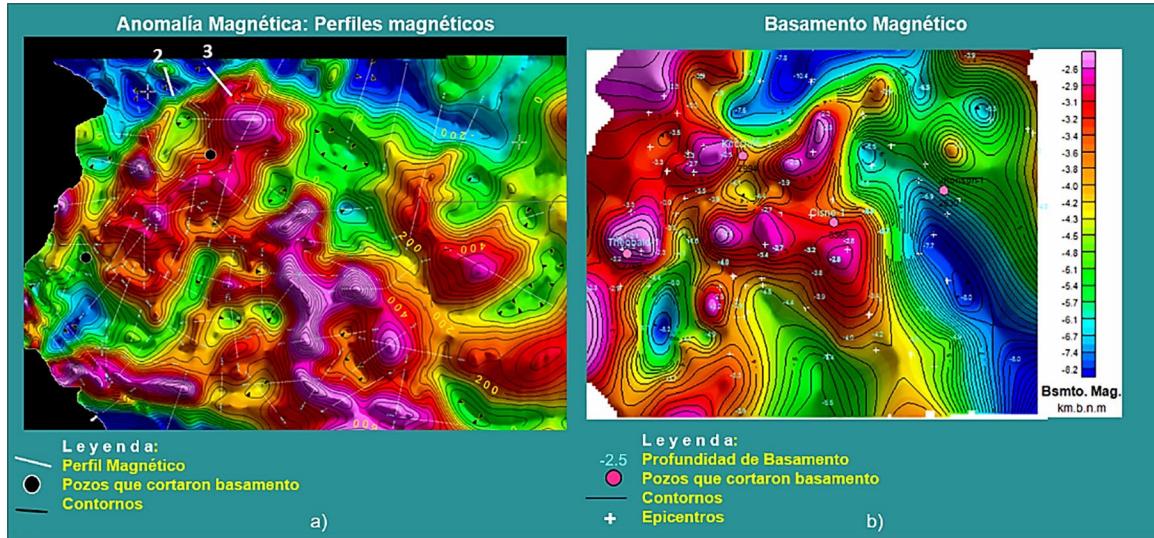


Figura 22. a) Anomalía Magnética y ubicación de los perfiles magnéticos 2 y 3, utilizados para la estimación de profundidad de fuente magnética; b) Configuración del basamento magnético en kmbnm.

Del mapa de la Anomalía Magnética (Figura 20a), al sur del estado de Illinois, se observa un alineamiento magnético orientado de NW a SE y más de 200 km de longitud. En la porción occidental del alineamiento, se localiza la Plataforma Esparta y sus dominios magnéticos (Figura 23a). Al sureste del alineamiento, en los condados Saline, Gallatin, Pope y Hardin (Figura 14a), se ha registrado intensa actividad magmática. Al sur, de estos condados, se localiza el Distrito Minero Fluorita.

El alineamiento magnético se enfatiza en los mapas de Anomalía Magnética RTP y de Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética (Figuras 23a y 23b), donde se interpretan estructuras como: el Sistema de Fallas Cottage Grove (falla de desplazamiento lateral derecho), que es el límite sur del alineamiento magnético, el Sistema de Fallas Sta. Genoveva (falla de desplazamiento lateral izquierdo), que representa el límite de la Placa Ozark con la Cuenca de Illinois, y fallas normales del Paleozoico superior. Estas estructuras y otras como: el Graben Rough Creek, el rift Reelfoot, el Sistema de Fallas del Valle Wabash y el Distrito Minero Fluorita, forman parte de una zona de debilidad de una estructura mayor, originada por la extensión cortical del Precámbrico.

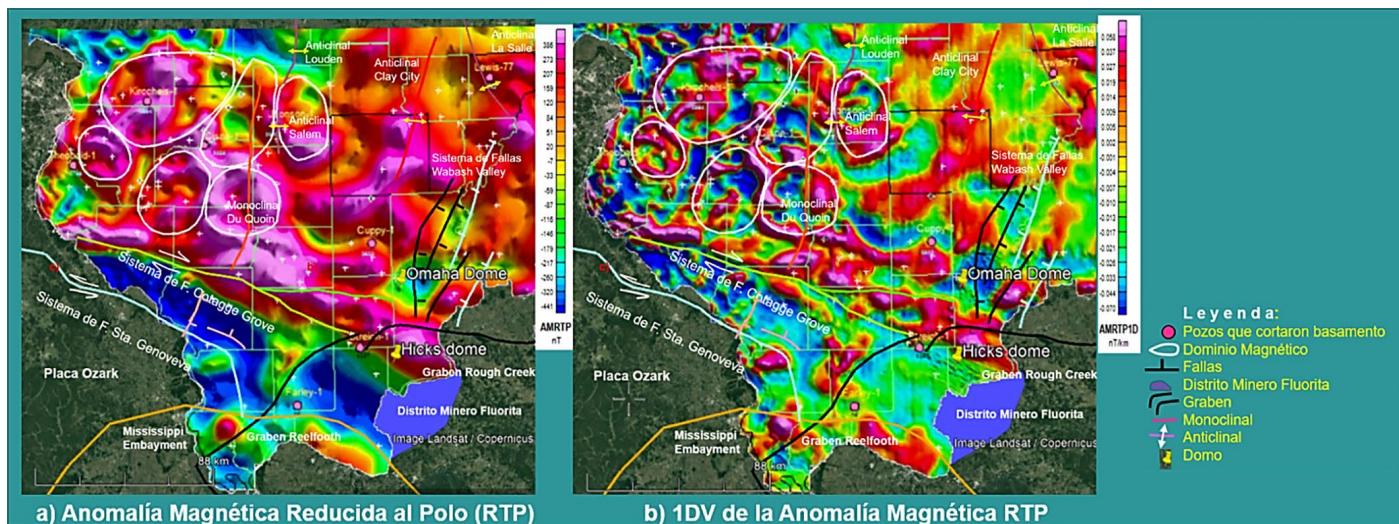


Figura 23. a) Alineamiento magnético del sur del estado de Illinois; b) Estructuras que conforman el alineamiento magnético: Dominios magnéticos en la Plataforma Esparta, Falla de desplazamiento lateral derecha Cottage Grove, Sistema de Fallas Sta. Genoveva, Sistema de fallas normales del Valle Wabash, enjambre de diques, Domos Omaha e Hicks y el Distrito Minero Fluorita (polígono azul).

Para obtener el mapa de profundidad del basamento magnético en el oriente del Arco de Sangamón, se trazaron 17 perfiles magnéticos de la Anomalía Magnética RTP. En la Figura 24a, se ilustran 3 de ellos. Para calcular la profundidad de la fuente magnética, se utilizó el método de las pendientes (Figura 24b). El factor aplicado para el cálculo de la profundidad de la fuente magnética se calibró con un transecto sísmico en profundidad del Proyecto Decatur. Con los valores de profundidad de fuente magnética, se creó una base de datos (Figura 24c). La configuración del basamento magnético se muestra en la Figura 24d, donde se observa que el basamento magnético en el oriente en el Arco de Sangamón varía de -3.6 hasta -8.7 km bnm. La línea blanca en el mapa de la configuración del basamento magnético corresponde a la ubicación del transecto sísmico formado por las líneas sísmicas 2D, nombradas L101 y L501, separadas 3.5 km de norte a sur. El transecto sísmico tiene 89 km de longitud y orientación de occidente a oriente. El perfil del basamento magnético del transecto sísmico se muestra en la Figura 24e.

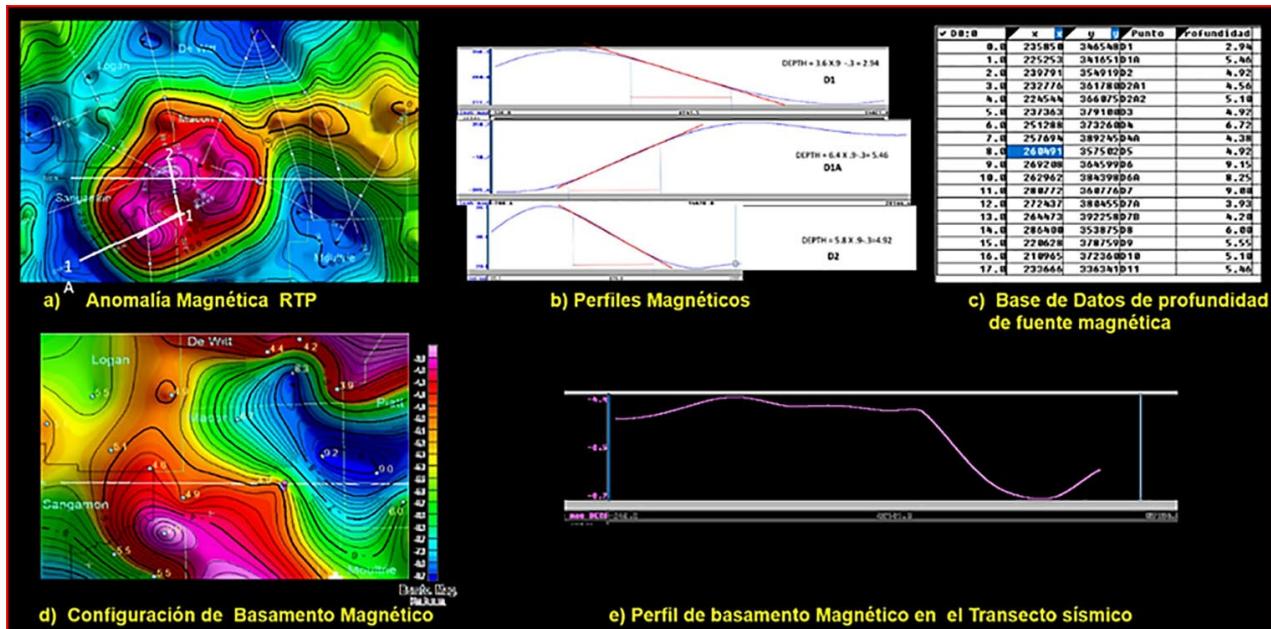


Figura 24. a) Ejemplo de perfiles magnéticos trazados en el mapa de la Anomalía Magnética Reducida al Polo; b) Estimación de la profundidad de la fuente magnética, por el método de las pendientes; c) Base de datos de la profundidad de la fuente magnética; d) Configuración del basamento magnético; e) Perfil del basamento magnético del transecto sísmico.

III.2.4 Interpretación de estructuras ígneas en un transecto sísmico

Cuando se realiza una interpretación que integra datos sísmicos, gravimétricos y magnetométricos con la Geología, se interpretan tres propiedades físicas de las rocas: la velocidad, la densidad y la susceptibilidad magnética.

El transecto sísmico que se interpretará es el mencionado en la sección anterior y se localiza al sureste del Arco de Sangamón (Figura 25a). Se utilizarán los mapas de Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética (Figura 25b) y de anomalía gravimétrica de pasa-banda (Figura 25c).

En estos mapas, se ha dibujado un polígono de color negro de línea interrumpida. El polígono indica el límite oriental del Arco de Sangamón, emplazado en el Devoniano Temprano, donde existe producción de hidrocarburos en parches arrecifales. El polígono marcado, se interpreta como un dominio magnético formado por máximos magnéticos (Figura 25b), asociados a estructuras ígneas de un magma ultrabásico del Pérmico Temprano.

En la figura 25d, los perfiles de la Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética (línea de color rojo) y de la Anomalía Gravimétrica de Pasa-Banda (línea de color verde), muestran la distribución de la densidad y susceptibilidad magnética a lo largo del perfil. Se observan

4 máximos magnéticos, con amplitudes de: 13.5, 60.4, 69.2 y 18.9 nT/km, de izquierda a derecha. En el perfil de anomalía gravimétrica de pasa-banda (12-5 km de longitud de onda), se observan 3 máximos con amplitudes de: 4.15, 1.5 y 1.55 miligales, así como 4 mínimos gravimétricos con amplitudes de: -2.57, -3.43, -2.0 y -1.5 miligales. En los perfiles, la coincidencia de las anomalías magnéticas y gravimétricas indican su relación con rocas de alta densidad y alta susceptibilidad magnética asociadas a estructuras ígneas en el subsuelo.

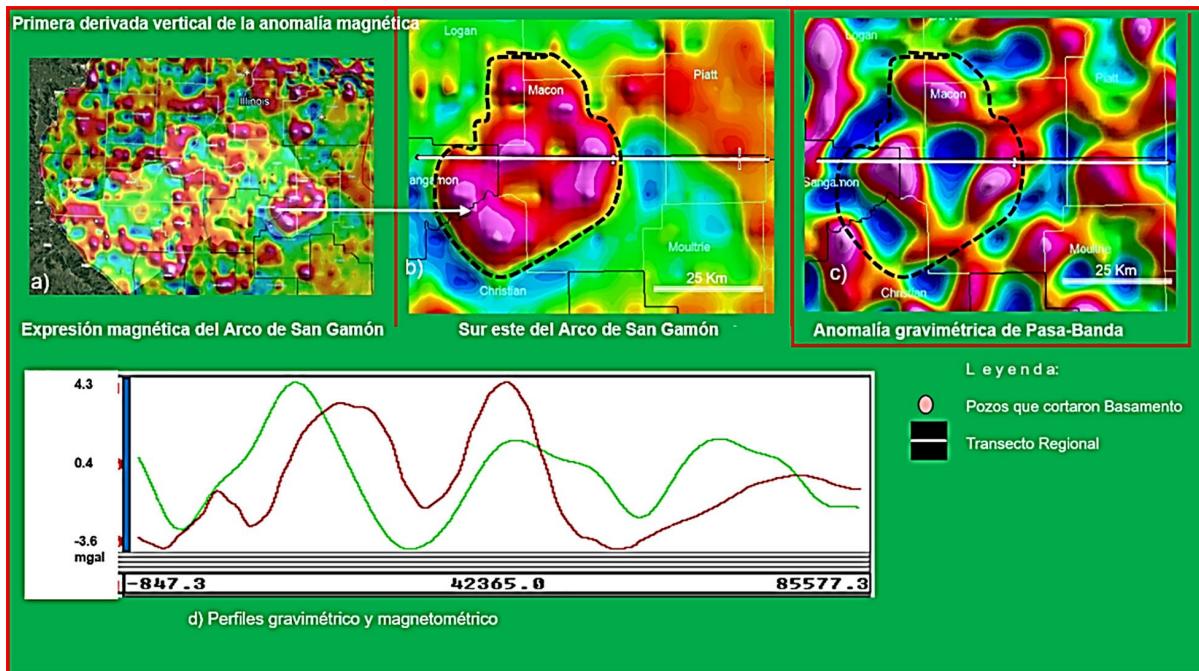


Figura 25. a) Anomalía magnética de Primera Derivada Vertical del Arco de Sangamón (polígono iluminado); b) Dominio magnético del sureste del Arco de Sangamón; c) Anomalía Gravimétrica Residual; d) Perfiles de la Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética y Anomalía Gravimétrica de Pasa-Banda, mostrando la variación de susceptibilidad magnética y densidad de las rocas en el subsuelo.

Para interpretar las estructuras ígneas en el subsuelo, se sobreponen al transecto sísmico los perfiles de la primera derivada de la anomalía magnética RTP y de la anomalía gravimétrica de pasa-banda (Figuras 26 a, b, y c). En los perfiles, se observa la variación de alta y baja densidad y de alta susceptibilidad magnética a lo largo del transecto. Las puntas de las flechas de color rojo apuntan al horizonte sísmico de alta amplitud y que corresponde a la cima de cuatro cuerpos intrusivos. Del mapa de Primera Derivada de la Anomalía Magnética RTP, se observa que los tres primeros intrusivos se localizan dentro del dominio magnético (Figura 25b). La anomalía magnética del oriente pertenece a otro dominio magnético, cuyos intrusivos se encuentran más profundos. Las anomalías gravimétricas positivas son el resultado del contraste lateral y vertical de densidad entre las rocas graníticas y los ígneos intrusivos, las anomalías gravimétricas negativas están asociadas al contraste vertical de densidad de las lutitas de la Formación New Albany, las areniscas de la Formación Knox y los granitos del basamento magnético, sumada al contraste lateral entre los dos intrusivos y los granitos que los separan.

En la Figura 26c, se muestra la configuración del basamento magnético y la ubicación del transecto regional. El perfil de la profundidad del basamento magnético se ha ubicado en el transecto regional mediante el cálculo del tiempo doble de las profundidades de (-4.4 y -8.7) kmbnm. Lo anterior, se realizó al considerar una velocidad media de 5,000 m/s, obsérvese que el perfil del basamento magnético coincide con los segmentos sísmicos de alta amplitud. Estos segmentos, podrían ser zonas mineralizadas por fluidos hidrotermales similares a los encontrados en la Plataforma Cherokee.

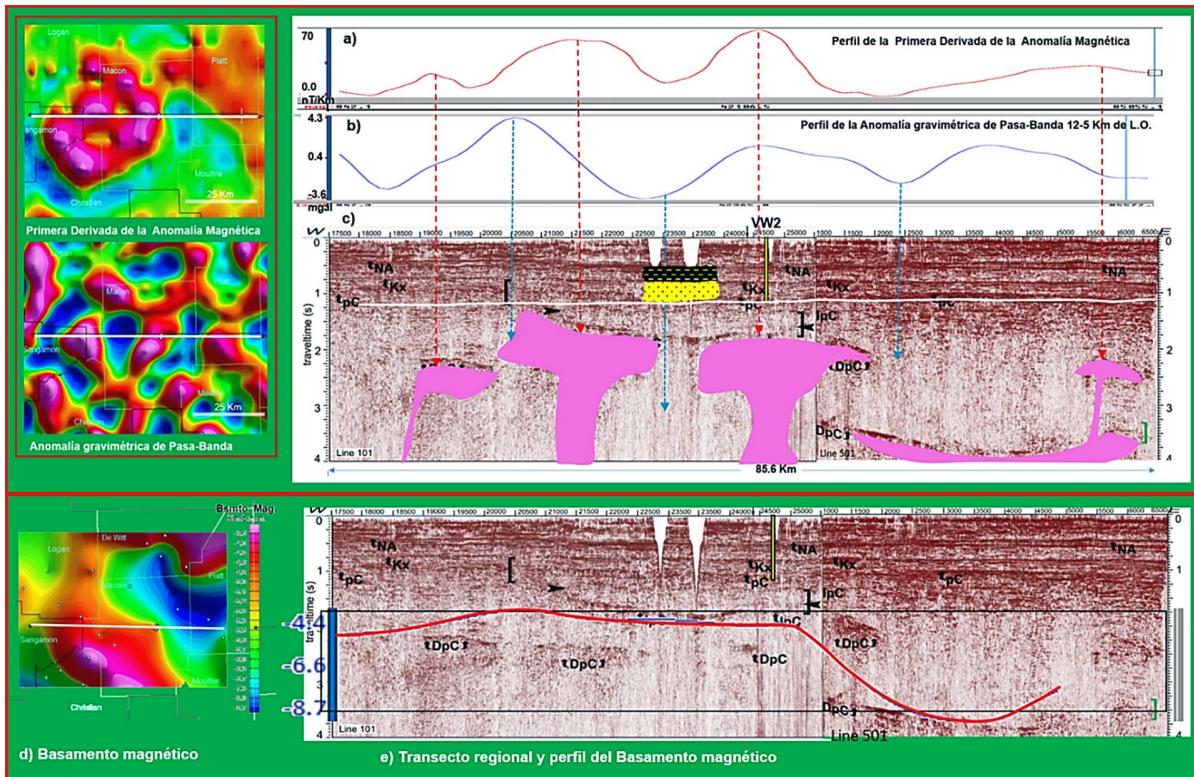
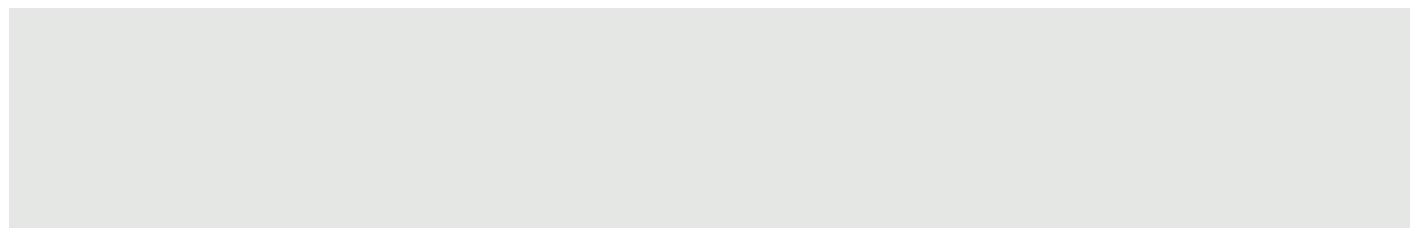


Figura 26. a) y b) Perfiles magnético de la Primera Derivada y gravimétrico residual; c) Interpretación de 4 ígneos intrusivos; d) Configuración del basamento magnético; e) Perfil del basamento magnético.

III.2.5 Oportunidades Exploratorias en el sur del estado de Illinois

Económicamente, el sur este del estado de Illinois, es importante por existir campos productores de hidrocarburos (Figura 27a) y el Distrito Minero de Fluorita Kentucky-Illinois (Denny, F.B. et al., 2008). Una parte de este Distrito Minero está localizado en el sureste del estado de Illinois y la otra, se localiza en el noroeste del estado de Kentucky (Figuras 23a y b). Algunos de los campos productores están asociados a estructuras ígneas denominadas sills que, durante su emplazamiento, deformaron las rocas del Misisipiense de las Formaciones Palestina, Manantiales de Alquitrán y Cypress, creando estructuras anticlinales donde se entramparon los hidrocarburos (Figura 27b). Otras estructuras ígneas asociadas a anomalías magnéticas se observan en el mapa de Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética Reducida al Polo. Las anomalías magnéticas corresponden a: enjambres de diques, brechas de explosión y domos del Pérmico (Figura 27c).

Asimismo, los arrecifes de pináculo son potenciales estructuras empleadas para el almacenamiento (secuestro), de CO₂, como sucede en la Cuenca de Michigan (Rodosta, T. and Damiani, D. 2013). Otro yacimiento empleado para el almacenamiento de CO₂, son las areniscas del Supergrupo Knox, del Proyecto Decatur, en la Cuenca de Illinois (Berger, et al., 2019).



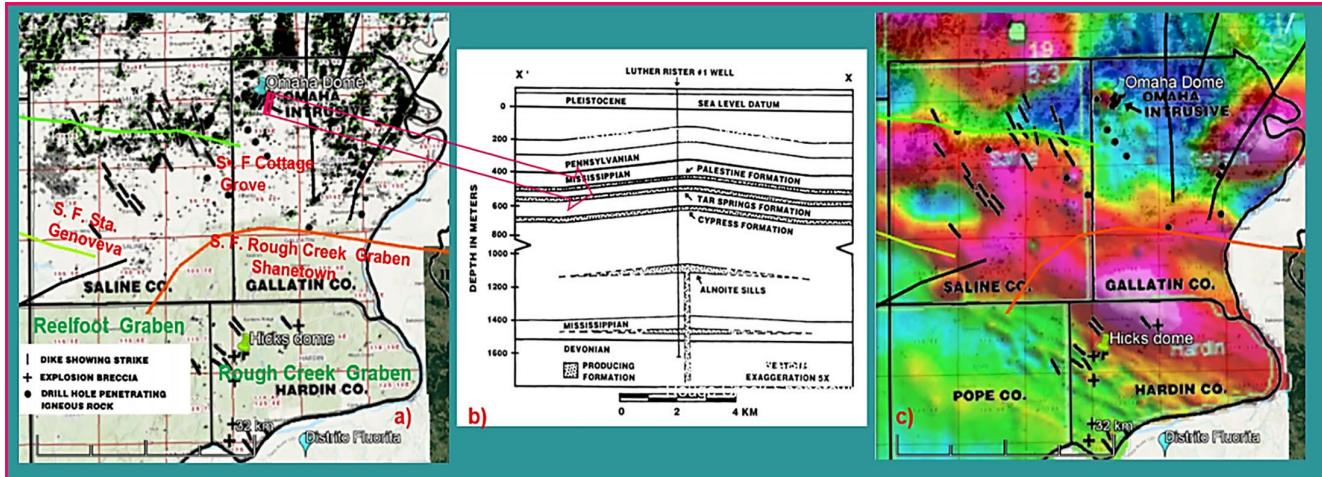


Figura 27. a) Campos productores de Hidrocarburos en el sur este del estado de Illinois; b) Deformación de los sedimentos del Misisipiense; c) Expresión magnética de enjambres de diques, brechas de explosión y domos.

Para la visualización de oportunidades exploratorias, asociadas a estructuras anticlinales formadas por sills, similares a la estructura del domo-campo Omaha, éstas deberán cumplir tres condiciones: 1) estar restringidas con los datos estadísticos de pozos del mapa interactivo de Petróleo y Gas del Estado de Illinois (Figura 28a); 2) conforme al Sistema Petrolero, el elemento sello del yacimiento debe estar asociado a las rocas del Pensilvaniense (Figura 28b); y 3) tener expresión magnética (Figura 28c). Aplicando estas condiciones, se visualizaron 26 oportunidades exploratorias (Figura 28d).

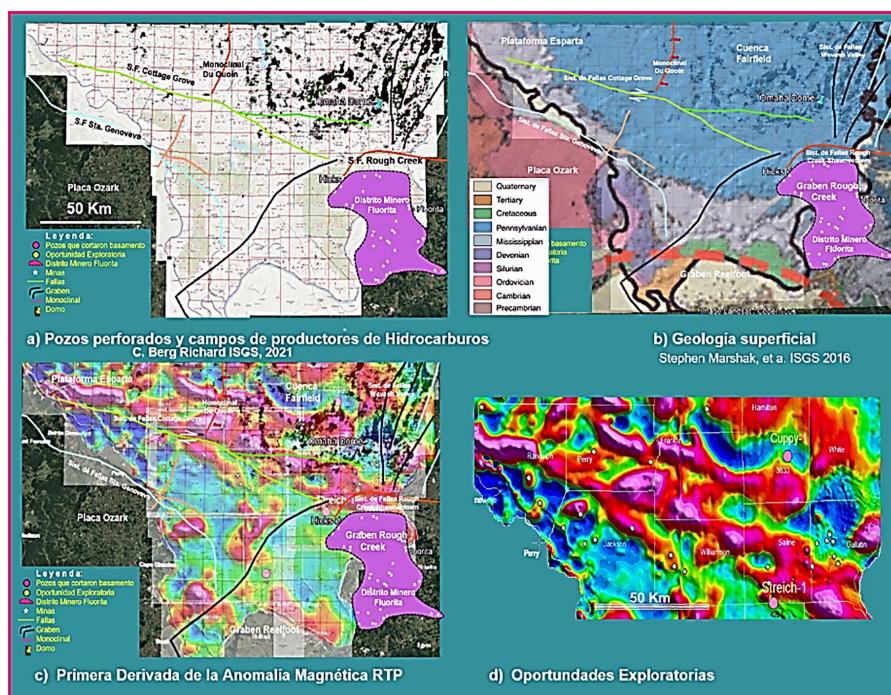


Figura 28. a) Pozos perforados, campos productores de Hidrocarburos y Distrito Minero Fluorita; b) Afloramientos de rocas del Pensilvaniense, Misisipiense, Cámbrico y Pre Cámbri-co; c) Mapa de Primera Derivada de la Anomalía Magnética Reducida al Polo y principales estructuras del sur del estado de Illinois USA; d) Oportunidades Exploratorias visualizadas.

IV. Resultados Obtenidos

En la Plataforma Esparta se utilizaron los mapas de la Anomalía de Bouguer, Anomalía Gravimétrica de Pasa-Banda, y la Base de Datos de Campos de Petróleo y Gas del Estado de Illinois, para visualizar 47 oportunidades exploratorias, asociadas a arrecifes de pináculo.

De la distribución de los campos productores de hidrocarburos asociados a arrecifes de pináculo, ubicados en el mapa de la primera derivada vertical de la anomalía magnética, se interpretó la geometría de la Plataforma Esparta. Esta geometría, parecida a una elipse tiene un área de 8,650 km², dentro de ella se definen seis dominios magnéticos. Como un dato adicional recopilado en este trabajo, en los límites y dentro de cada dominio, han ocurrido terremotos de diferentes amplitudes, indicando la existencia de fallas y el movimiento vertical relativo de los dominios.

En la Plataforma Esparta, el basamento magnético varía desde -2.6 hasta -8.2 kmbnm y en el sureste del Arco de Sangamón, el basamento varía desde -4.4 hasta -8.7 kmbnm. En ambos casos, el comportamiento del basamento magnético es de profundizarse suavemente de Occidente a Oriente.

La actividad magmática desde el Pérmico hasta el Reciente ha emplazado rocas ultramáficas. En el Pensilvaniense se generaron estructuras dómicas que deformaron las rocas subyacentes creando anticlinales donde se entramparon hidrocarburos. El campo petrolero Omaha es un ejemplo de la posible existencia de otros campos. Empleando el mapa de la Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética se visualizaron 26 oportunidades exploratorias.

Del mapa de la anomalía magnética reducida al polo, al Sur del estado de Illinois, se interpreta un alineamiento de máximos magnéticos orientados de NW a SE de más de 250 km de longitud.

En un transecto sísmico, localizado en el sureste del Arco de Sangamón, se realizó la interpretación integrada de datos sísmicos, gravimétricos y magnetométricos, donde el perfil del basamento magnético interpretado está asociado a un horizonte sísmico de alta amplitud que coincide con la cima de tres ígneos intrusivos.

V Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Los campos productores de hidrocarburos, asociados a arrecifes de pináculo, se localizan en los alineamientos gravimétricos de máximos, mínimos o en el gradiente. Se comprobó que la anomalía gravimétrica residual del mapa procesado de la Anomalía de Bouguer es similar a la estructura del campo Marine. Utilizando el mapa de anomalías gravimétricas de Pasa-Banda y el mapa interactivo de campos y pozos se interpretaron 47 Oportunidades Exploratorias.
- La geometría de la Plataforma Esparta con un área de 8,750 km², se interpretó del mapa de la Primera Derivada Vertical de la Anomalía Magnética RTP. Se configuró el mapa de basamento magnético de la Plataforma Esparta y del Oriente del Arco de Sangamón. Del mapa de la Primera Derivada Vertical de la anomalía magnética RTP se visualizaron 26 oportunidades exploratorias.
- Las estructuras ígneas interpretadas en el subsuelo, y otras

estructuras en superficie como domos, diques y brechas volcánicas, que tienen gran extensión areal, están asociadas a la actividad magmática ultrabásica del Pérmico. El basamento granito-riolita no tiene expresión magnética.

- La metodología empleada en la visualización de arrecifes de pináculo y de cuerpos ígneos intrusivos, es de aplicación en plataformas carbonatadas de rampa suave análogas y áreas de actividad magmática ultrabásica.

Recomendaciones

- Debido a las pequeñas extensiones horizontales de los arrecifes de pináculo, se recomienda adquirir Gravimetría y Magnetometría de alta resolución en la Plataforma Esparta y en el sur este del estado de Illinois para dar más certidumbre a la interpretación realizada. Asimismo, adquirir sísmica 2D-3D para confirmar la relación anomalía gravimétrica residual-estructura, mediante el modelado directo-inverso de secciones geológicas balanceadas y restauradas e interpretar la componente estratigráfica de los arrecifes de pináculo.

- Continuar la visualización de Oportunidades Exploratorias en la Plataforma Oeste y en la rampa profunda.
- Los arrecifes de pináculo son potenciales estructuras empleadas para el almacén (secuestro) de CO₂.

Referencias Citadas

1. Berg Richard C., 2021. Terremotos en Illinois 1925-2015. Servicio Geológico del Estado de Illinois. Junta de Fideicomisarios de la Universidad de Illinois. <https://isgs.illinois.edu/earthquakes>.
2. Berger, Peter, et al., (2019). Secuestro de Carbono, Proyecto Decatur en la Cuenca de Illinois: resultados experimentales y simulaciones geoquímicas de almacenamiento. Servicio Geológico del estado de Illinois.
3. Bradbury, C., et al., (1965), The Precambrian Basement of Illinois. 2003. Illinois State Geological Survey. John C. Frye, Chief Urbana Circular 38.
4. Daniels, David, et al., (2008), Mapas y datos magnéticos y gravitatorios de Illinois, Indiana y Ohio: Serie de datos 321, Servicio geológico (EE. UU.), Denver CO. <https://pubs.usgs.gov/ds/321/data/>
5. Denny, F.B. et al., (2008). The Illinois-Kentucky Fluorite District, Hicks Dome, and Garden the Gods in southeastern Illinois and northwestern Kentucky. The Geological Society of America Field Guide 12. p. 11–24, doi: 10.1130/2008.fl d012(02).
6. Heigold, Paul and Whitaker, Sthepen, (1989). A Gravity survey of Marine field: A case study for Silurian reef Exploration. Illinois State Geological Survey. Department of Energy and Natural Resources.
7. Higley, D., et al., (2003). The New Albany Shale Petroleum System, Illinois Basin -Data and Map image Archive from The Material-Balance Assessment. USGS publication Warehouse open file 2003-37.
8. Kolata, Dennis et al., (2005). Bedrock Geologic Map of Illinois. Illinois State Geological Survey, page 1. Prairie Research Institute.
9. Lasemi, Y. et al., (2010). Sedimentology and Reservoir Characterization of the Silurian Carbonates in the Mt. Auburn Trend of the Sangamon Arch West-Central Illinois. University of Illinois at Urbana-Champaign, Institute of Natural Resource Sustainability Illinois State Geological Survey.
10. Liner, Kevin., (2015). An Investigation of 3D Seismic Deep Basement Events in Osage County, Oklahoma. Thesis at University of Arkansas Department of Geosciences.
11. Macke, David., (1995), Illinois Basin Province (064) mydigitalchalkboard.org/cognoti/content/file/resource/documents/db.
12. Marshak Stephen, et al., (2016). Geological and Geophysical Maps of the Illinois Basin-Ozark Dome Region Map 8: Structure Contours of the top of the Precambrian. Illinois State Geological Survey, Illinois Map 23-8, 1:1,500,000.
13. McBride, J. H., et al., (2016). Fine-scale structure of the Precambrian beneath the Illinois Basin. GEOSPHERE, v. 12, no. 2, p.585-606.
14. R., René and F.L., Stanoni (1995). Reflection Seismic Profiling of the Wabash Valley Fault System in the Illinois Basin. U.S. Geological Survey Professional Paper 1538-O.
15. Telford, W. et al., (1990), Applied Geophysics 2nd., Ed. Cambridge University Press, p. 6-62.

Motivación y Agradecimientos

Las ideas originales para el desarrollo de este trabajo, nacen de pláticas informales sostenidas entre el autor y el Ing. Arturo Pérez Aldana (QEFD), resaltando las amplias posibilidades prospectivas de los arrecifes de pináculo en el estado de Illinois y su interpretación mediante métodos potenciales.

Mi agradecimiento al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), por permitirme consultar la información geofísico-geológica publicada en su página web, así como el empleo de los datos digitales de la Unificación de Gravimetría y Magnetometría del estado de Illinois, Indiana y Ohio. Asimismo, al Servicio Geológico del estado de Illinois (ISGS), por permitir la consulta del Mapa Interactivo de Recursos de Petróleo y Gas del estado de Illinois. Sin esta información, el desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible.

El análisis y procesado de los datos se realizó por el propio autor

de este trabajo con el software Geosoft-Seequent.

C.V. EDILBERTO ROMÁN HERNÁNDEZ FLORES

correo: edil_hdez@hotmail.com

EDUCACIÓN PROFESIONAL

Ing. en Comunicaciones y Electrónica (ESIME – IPN, 1973-1977), M. en I. de Recursos Energéticos del Subsuelo (DEPFI – UNAM, 1989-1991), Diplomado en Administración de la Calidad Total (ITESM, 1996-1996), Diplomado en Geología Superficial (UANL, 2005), Ing. en Sistemas Computacionales, (ITS de Zongolica, 2018-2020).

EXPERIENCIA PROFESIONAL:

Laboró para COMESA (1978-1980), en adquisición de datos sísmicos, mantenimiento de sismógrafos digitales DFSV, geófonos y líneas de transmisión.

Trabajó 30 años para Petróleos Mexicanos en diversas áreas de especialidad, incluyendo:

- 1981-1986: Geofísico auxiliar, Calculista de Brigada Sismológica y Supervisor de Operación de Brigadas Sismológicas (Zona Sur).
- 1987-1988: Interpretación Geofísico-Geológica del Basamento Cristalino de la Cuenca de Veracruz (Zona Centro).
- 1992: Instalación y Administración de Redes de Computadoras Personales de la Región Norte (Zona Centro).
- 1996-2009: Proyectos en Golfo de México: Análisis, proceso, unificación e integración de Gravimetría Magnetometría para estudios de Análisis de Cuenca, Sistema Petrolero, Plays y Generación de Localizaciones en los Proyectos: Delta del Bravo, Cordilleras Mexicanas, Tlancanán, Cinturón Plegado Perdido, Sardina-Lamprea, Lankahuasa y Oriente del Eje Neovolcánico; Proyectos terrestres: mismas actividades en el Golfo de Sabinas, Cuenca de Veracruz, Canal de Chicontepec, Cuenca Tampico-Misantla y Cuenca Jalisco-Colima.

Como Asesor Independiente:

- 2009-2014: Unificación e Interpretación Regional de la Información Gravimétrica y Magnetométrica de Alta Resolución en Aguas Profundas de la Región Norte de Pemex, Proyectos Cordilleras Mexicanas-Tlancanán-Perdido, Modelado 2D de Secciones Regionales Balanceadas y Restauradas para generar el mapa de basamento cristalino y tipo de corteza del Centro-Oeste del Golfo de México. Cálculo de la cima y base de la sal alóctona y visualización de estructuras subsal en el Cinturón Plegado Perdido.

- 2019-2022: Visualización de Oportunidades Exploratorias, asociadas a arrecifes de pináculo, en la Plataforma Esparta (Illinois USA). Interpretación de la extensión hacia México de las cuencas de Petén y Corozal.

- 2022: Interpretación de áreas mineras del Norte del estado de Zacatecas, México.

ENSEÑANZA:

1984-1985: Profesor de Educación Superior. Tecnológico Regional de Minatitlán Ver.

1989-1990: Profesor de Enseñanza Media. CEBTYS No. 47 de Córdoba Ver.

2009-2014: Instructor de cursos de Exploración Petrolera en PEMEX.

2017: Instructor del curso Aplicación de la Gravimetría en la Exploración Petrolera. Universidad Politécnica del Centro, Villahermosa Tab.

2019: Instructor del curso de Gradiometría Gravimétrica de Tensor Completo FTG. Activo de Exploración Poza Rica.

2021: Instructor del curso de Gradiometría Gravimétrica de Tensor Completo FTG, al personal de la Gerencia Modelado Regional de Poza Rica.

Edilberto, ha escrito más de 30 artículos técnicos, algunos de ellos publicados en los boletines de la AMGE y AMGP. Ha dado presentaciones técnicas en el Congreso Mexicano del Petróleo, AMGP, Simposio de Geofísica AMGE y foros de AAPG. Pertenece, como miembro activo, a la AMGE, AMGP y AAPG.





Boletín Técnico **AMGE**

S e g u n d a G e n e r a c i ó n



Asociación Mexicana de Geofísicos
de Exploración, A.C.

Para someter manuscritos en el Boletín Técnico AMGE – Segunda Generación, así como conocer las normas editoriales y guía de publicación, favor de comunicarse con alguno de los siguientes editores:



Efraín Méndez Hernández
Email: emendez2310@gmail.com



Raúl del Valle García
Email: raul.vontal@gmail.com



