

Geofísica

La Geofísica en la Exploración de Yacimientos

Existen diversas técnicas para la exploración de yacimientos, cuál aplicar, depende de muchos factores y aunque la mayoría prefiere lo convencional, las nuevas tecnologías son la clave

Antecedentes

El petróleo sigue siendo el recurso energético más importante con el que se cuenta y también uno de los negocios más rentables del mundo. Por ello, se han creado importantes desarrollos tecnológicos y aplicaciones muy especiales, tanto para la localización de yacimientos como para su explotación.

Desde que en 1859 Edwin Laurentine, conocido como el coronel Drake, aplicara técnicas consideradas no convencionales para la producción de petróleo o aceite de roca; bajo

La geofísica y algunas de sus aplicaciones prácticas disponen de increíbles herramientas para la exploración de yacimientos

principios y métodos chinos con los que se extraía la sal, más otras técnicas relacionadas; logró, ante la duda y el descrédito, establecer las bases para la producción petrolera que perduran hasta nuestros días.

Tipos de técnicas

La ciencia geofísica ha avanzado mucho para poder entender el subsuelo gracias a diferentes técnicas y aplicaciones, desde las más utilizadas consideradas como convencionales, hasta las más avanzadas y prometedoras. Establecer cuál podría ser la mejor tecnología resulta complicado. Lo ideal sería una sinergia entre diferentes aplicaciones y para calificar cuál es la más adecuada se requiere mayor información. Por ejemplo, ¿cuál es el criterio? ¿cuánto tiempo se tiene? ¿con qué presupuesto se cuenta? etcétera; pero en la mayoría de los casos, los aspectos económicos suelen ser los que imperan.

Desde el punto de vista de la ingeniería, existen diferentes criterios para evaluar de forma

integral, el uso y aplicación de cada una de las tecnologías disponibles, aunque podría ser relativo (como tratar de establecer un criterio de éxito para los seres humanos cuantificándolo en términos de paz, felicidad, conocimiento o dinero). Resulta más fácil medir aspectos tangibles y para ello, una de las formas más utilizadas es medir en términos económicos y, aun así, se deben cuidar muchos detalles en este tipo de análisis.

En este trabajo se detallarán algunos de los métodos más conocidos y empleados en la búsqueda de yacimientos; es difícil establecer una división adecuada para aquellos considerados convencionales y no convencionales porque dicha clasificación se basa sobre todo en aquellas tecnologías que han sido más entendidas y utilizadas que otras, lo que hasta cierto punto es relativo dado que se mide de acuerdo con los objetivos establecidos y al paradigma de: “como se han hecho siempre las cosas” y más específicamente, conforme al mejor balance posible entre riesgo y recompensa.

Costos de exploración y producción

En la última década se ha triplicado el costo por el descubrimiento de cada nuevo barril de petróleo. Al parecer, la época del “petróleo fácil” ha terminado y aparentemente los prospectos más prometedores se encuentran en cuencas marinas de aguas profundas y ultra profundas. Por lo tanto, las mejoras en tecnologías y aplicaciones geofísicas más sofisticadas han llevado a explorar lugares más remotos e inhóspitos, donde los costos y la complejidad para la explotación de yacimientos se incrementa cada vez más.

En 2015, el costo promedio de producción de Petróleos Mexicanos (Pemex) fue de 7.91 dólares por barril y los costos de exploración y desarrollo ascendieron a 14.35 dólares por barril. Para 2016, el costo de producción fue de 8.22 dólares por barril y los costos de exploración y desarrollo fueron de 17.97 dólares por barril. En 2017 el costo de exploración y desarrollo fue de 19.64 dólares por barril. De manera que el presupuesto de Pemex Exploración y Producción fue de 241 mil millones de pesos en 2016, 168.4 mil millones de pesos en 2017 y para finales de 2018 se espera ejercer 249 mil millones de pesos¹.

Aparentemente los rusos son quienes llevan la delantera en teledetección y ahora cuentan con grandes herramientas de termovisión

En los últimos años, la tasa de éxito promedio en la exploración, se redujo de 40 a 35 por ciento. De ahí la importancia de contar con herramientas y tecnologías de última generación donde actualmente la geofísica tiene grandes avances, como la tomografía por termovisión y otras, sea que se conozcan o no, como métodos convencionales.

La caída estrepitosa de los precios del petróleo en 2014 provocó, además de una profunda crisis y la consecuente reducción de costos en el sector, pérdida de empleos, etcétera. Aun así, las empresas petroleras tenían que incrementar sus recursos a medida que menguaban las reservas. Ahora, en 2018 con precios por arriba de 65 dólares por barril, el mercado petrolero está en plena fase de recuperación. Por lo que el impulso para incrementar las reservas va en aumento y para este año se estiman alrededor de 37 mil millones de dólares de manera global, un siete por ciento menos que en 2017 y un 60 por ciento menos que el máximo alcanzado en 2014 a nivel mundial².

Métodos de exploración

Entre los métodos más importantes utilizados en la exploración geofísica del subsuelo, según las propiedades a estudiar, están: los sísmicos, geo-eléctricos, gravimétricos, magneto-métricos y termométricos.

Prospección geofísica.- De las aplicaciones industriales más importantes y prácticas de la geofísica destaca el inferir la estructura geológica, mediante la distribución de las propiedades físicas del subsuelo y de la tierra en general; así como localizar yacimientos, por medio de sus propiedades y con técnicas aplicadas desde la superficie a fin de realizar mediciones de la conductividad eléctrica del subsuelo, la velocidad de

Los modelos tridimensionales pueden mostrar con mucha precisión la localización de yacimientos y según su tecnología son más rápidos y económicos que otras tecnologías geofísicas actuales

propagación de las ondas de sonido en sus diferentes medios, la densidad de masa, la susceptibilidad magnética y recientemente, las propiedades térmicas.

Una de las técnicas más aceptadas y conocidas para la exploración petrolera es la tecnología sísmica, que consiste en el uso de ondas acústicas o de sonido para la interpretación del subsuelo.

Métodos sísmicos

Éstos se utilizan para medir la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el subsuelo, lo que permite caracterizar al mismo desde la superficie, a centenas o miles de metros en los que intervienen parámetros relacionados con la naturaleza de las rocas o de los medios que atraviesan. Con pequeños movimientos sísmicos; emplean-

do detonaciones, vibraciones o golpes a la tierra con objetos pesados; se estudia la distribución de las ondas sísmicas y se graban los efectos acústicos por medio de sensores o geófonos, colocados previamente de manera estratégica.

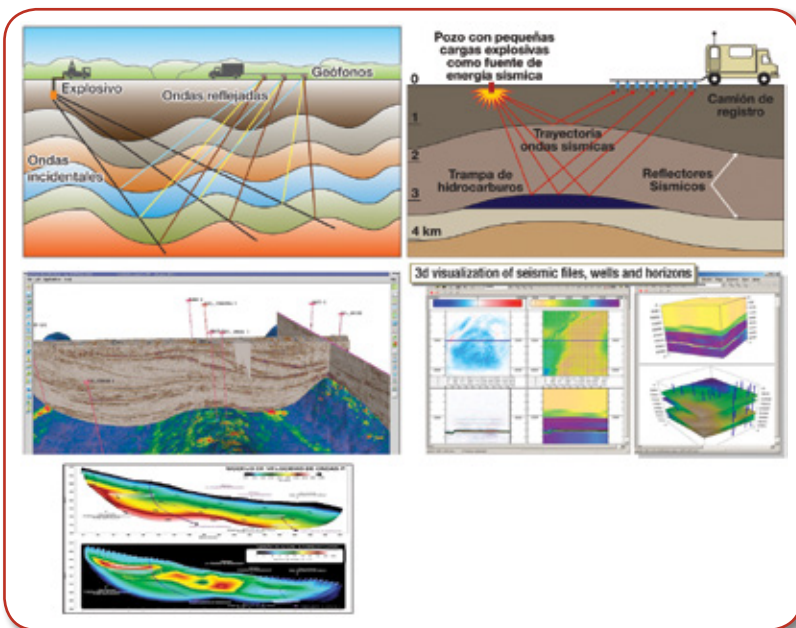
La tecnología sísmica permite obtener importantes conclusiones respecto a la naturaleza de las rocas del subsuelo y existen dos técnicas: la sísmica de reflexión y la de refracción. La tecnología sísmica está muy aceptada y se cataloga como convencional. Sus avances son muy interesantes, dado los conceptos de segunda, tercera y hasta cuarta dimensión (2D, 3D, 4D), éste último es una sucesión de estudios de sísmica 3D a lo largo del tiempo, para ver cómo ha cambiado el entorno en cuanto a la relación de fluidos y todas las características petrofísicas del yacimiento.

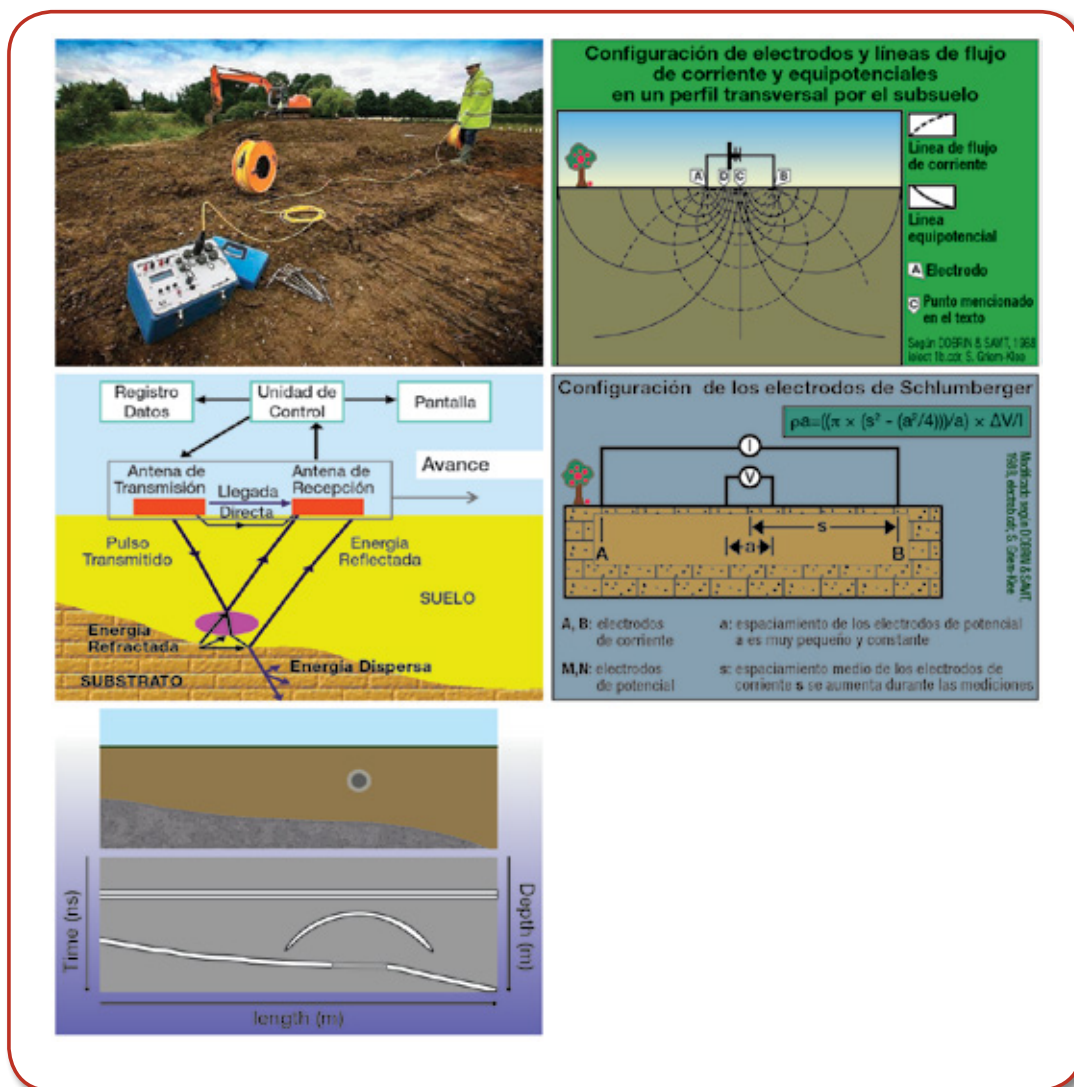
Una de las desventajas de la tecnología sísmica es su alto costo asociado, esto debido a la infraestructura requerida, el tiempo necesario para movilizar e instalar equipos, cables, geófonos, permisos y toda la ejecución de los estudios. Una vez realizado, debe tenerse en cuenta una cantidad de tiempo considerable y adicional para la interpretación de las gráficas obtenidas y la construcción de los modelos. Es decir, el procesamiento de todos los datos obtenidos mediante la adquisición sísmica.

Métodos geo-eléctricos

Éstos se basan en la conductividad eléctrica de la tierra, o en su inverso, la resistividad. Hay dos tipos básicos; el pasivo y el activo. En el pasivo se miden los potenciales eléctricos existentes en el subsuelo, producto de reacciones electroquímicas, gradientes de temperaturas o fenómenos relacionados al movimiento de aguas subterráneas. En el método activo, es preciso pasar la corriente eléctrica al subsuelo y un sistema de medición de la resistividad o conductividad para ver la respuesta de los materiales de acuerdo a sus propiedades. Para ambos casos se cuenta con una gran cantidad de dispositivos de electrodos.

Los métodos geo-eléctricos se han utilizado en infinidad de aplicaciones y en la actualidad han tenido mucho éxito. En la exploración





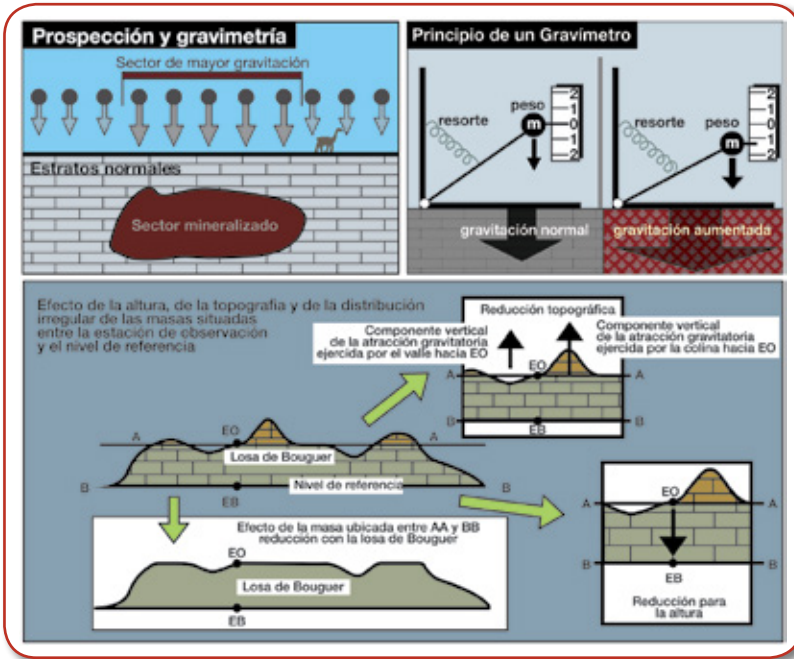
petrolera se les conoce como registros eléctricos y dentro de su enorme cantidad de aplicaciones pueden mencionarse: la detección de agua subterránea (acuíferos y corrientes subterráneas); la investigación de depósitos de minerales (metálicos y no metálicos); la determinación de intrusión salina en acuíferos costeros; la detección de cavidades y fractura; la detección de plumas contaminantes por hidrocarburos o lixiviados; estudios para zonas arqueológicas; la determinación de la estratigrafía del subsuelo; la evaluación de bancos de materia (arena y grava); la determinación de la profundidad del nivel freático y la búsqueda de vapor de agua en campos geotérmicos, entre otros.

Gravimetría

Ésta permite caracterizar el subsuelo, a través de mediciones del campo natural gravi-

métrico terrestre, es decir, aprovechando las diferencias de gravedad en distintos sectores, por mayor mineralización en ciertas áreas que en otras, conocidas como formaciones geológicas. Se realizan mediciones relativas o se miden variaciones laterales de la atracción gravitatoria, de un lugar a otro, puesto que en dichas mediciones se puede lograr una precisión satisfactoria más fácilmente; en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto.

La tomografía por termovisión permite identificar características del subsuelo que pueden reflejar datos de interés geológico para el hallazgo de minerales, agua, petróleo, etcétera



Los datos reducidos apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación. Esta técnica ha sido muy útil para determinar la geometría de cuencas sedimentarias y la evaluación de campos petroleros en apoyo a la exploración sísmica, así como en estudios de zonas arqueológicas.

Magnetometría

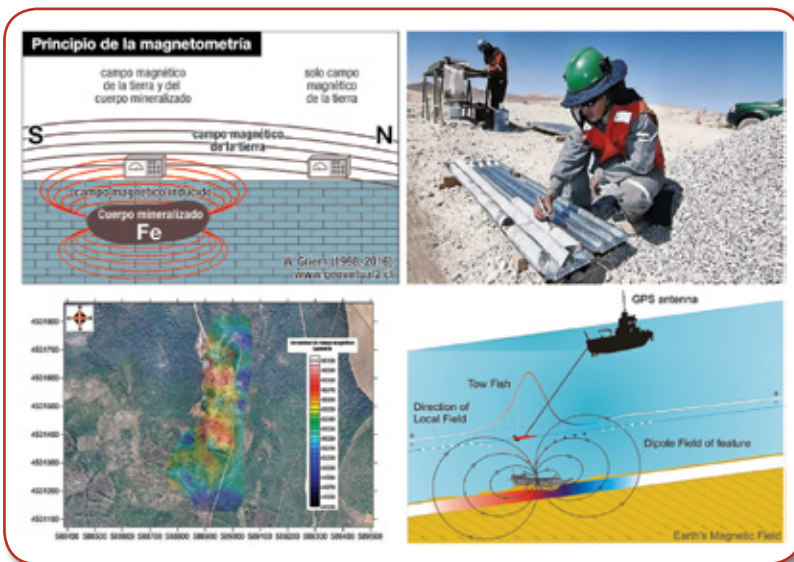
La prospección magnética es una técnica basada en la medida y el estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, a partir

de la cual se obtienen medidas del valor total del campo magnético o bien, opcionalmente, del gradiente de dicho campo magnético. Estas variaciones, se deben a la presencia de cuerpos susceptibles de ser magnetizados que, por tal motivo, contribuyen a modificar el campo magnético terrestre en su entorno.

La magnetometría permite caracterizar el subsuelo a través de la medición y el estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, debido a los distintos materiales de la tierra en relación con el contenido de minerales y propiedades magnéticas. Asimismo, caracteriza el subsuelo desde algunos metros y hasta decenas de kilómetros de profundidad. Dentro de sus aplicaciones están: la investigación de depósitos minerales (magnéticos), estudios en zonas arqueológicas y evaluación de campos petroleros como complemento de la exploración con tecnología sísmica.

Termovisión

La utilización de satélites artificiales para la exploración del subsuelo puede considerarse como una tecnología no convencional y desde mi punto de vista, una gran ventaja actual con brillante futuro, son las coordenadas con puntos específicos para analizar el área deseada y un objetivo claro de lo que se busca; gran parte del trabajo puede desarrollarse y evaluarse desde gabinete, además de complementarse, con base en los hallazgos, con otras técnicas, cuya sinergia resultante, daría un gran valor agregado para encontrar todo tipo de yacimientos.



Los principios de esta tecnología se basan en las características térmicas de los elementos de la Tierra. Cada elemento tiene una huella única, basada en su coeficiente de temperatura o en su conductividad térmica. La Tierra misma está muy caliente en su núcleo y la otra gran cantidad de energía que recibe la Tierra viene del sol; hay variaciones en la reflectividad del terreno frente a la radiación solar recibida, en parte se absorbe y en parte se refleja, en función de las características del terreno. Determinadas radiaciones producen sensaciones apreciables por el ojo humano, pero las más importantes son las que se pueden detectar en las zonas del espectro electromagnético, inapreciables para el ojo humano, pero que pueden ser recogidas y analizadas

The Schematic Algorithm of Studying Oil & Gas Basins With TVT Technology

regional level. As an example:

Results:

1. Technical scheme of the basin.
2. Physical-geological scheme of the basin development.
3. Prospecting map with localities of prospective structures. Ranking sites under the terms of the oil-gas prospectivity.
4. Enclosed: Maps, Profiles, Sections, Geophysical data interpretation and recommendations for subsequent works.
5. Execution time of works 6-8 months.

5.1. Volga-Ural Oil & Gas Basin (Russia)

3D model of local thermal field at the depth of 1 km with detected perspective objects for oil accumulation (marked with arrows)

Innovative technology for geophysical research

Thermal Flux density

5.3. Bay of Cádiz Oil & Gas Basin (Spain)

Map of prospective structures, models of seismic (a) and thermal field (b)

Main conclusion: Geothermal Stocks, expressed as a structure of the sedimentary cover, are not subject to hydrocarbon exploration.

mediante sensores específicos y fotografías de visión infrarroja. La teledetección o termovisión aprovecha las bandas del espectro para identificar características del terreno que pueden reflejar datos de interés geológico, como alteraciones, presencia de ciertos minerales, variaciones de temperatura, agua, petróleo, etcétera.

En mi experiencia, los rusos llevan la delantera en la aplicación de esta tecnología, debido a sus grandes avances en geofísica y matemáticas para el desarrollo de algoritmos necesarios en la construcción de modelos tridimensionales. Dichos modelos pueden mostrar con mucha precisión la localización de los yacimientos buscados de manera más rápida y competitiva que otras tecnologías geofísicas actuales.

La geofísica y sus aplicaciones prácticas disponen de increíbles herramientas para la exploración, cuál aplicar en cada caso, depende de muchos factores. En mi experiencia en el campo, la mayor parte de los usuarios prefieren lo convencional para ir a la 'segura'. Sin embargo, el uso de nuevas tecnologías y la sinergia disponible, parece la clave para que las empresas logren triunfar. Aquéllas que

utilicen mejor los avances actuales en todos los ámbitos, serán y continuarán siendo las líderes en los años por venir.

Tecnología geo-física convencional	Tecnología geo-física no convencional
Sísmica	Termovisión
Ventajas y limitantes	Ventajas y limitantes
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología muy conocida en el medio petrolero, grandes avances de sísmica 3D y 4D. • Riesgos importantes para alcanzar resultados en tiempo y forma. • Invasiva, permisos ambientales especiales. • Altos costos involucrados. • Mucho tiempo para tener resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tiempo de ejecución (mil Km² listos de tres a seis meses, contra hasta tres años con sísmica). • La precisión de la termovisión es envidiable, resulta invaluable combinada o en sinergia con otras herramientas y aplicaciones geofísicas. • Altamente competitiva. • Muy poco conocida en el medio.
Fuente: Tomografía de termovisión. Tecnología satelital innovadora para la investigación geofísica: https://skygeotech.com/	

Referencias:

1. Sección de inversionistas del portal de Petróleos Mexicanos:
<http://www.pemex.com/ri/Paginas/default.aspx#.W43Fd85Kipo>
2. Portal de *Wood Mackenzie* (WoodMac): <https://www.woodmac.com/>

Bibliografía consultada:

- Marjoribanks, R. (1997). *Geological methods in mineral exploration and mining*. Chapman & Hall. 115 pp
- Geofísica: <http://ingenieriageofisica.com/tecnicas-convencionales-de-geofisica-de-superficie-aplicadas-en-hidrogeologia/>
- Apuntes de geología general: <http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap01e.htm>
- Geofísica exploraciones: <http://geofisicaexploraciones.com>
- Métodos geofísicos: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso%20Fundaciones/Exposiciones%20estudiantes/metodos%20geofisicos.pdf>
- Telford, W. M; Geldart, L. P; Sheriff, R. E; Keys D. A. *Applied Geophysics*; Cambridge University Press; 1976, 860 pp. <https://www.cambridge.org/core/journals/geological-magazine/article/w-m-telford-l-p-geldart-r-e-sheriff-d-a-keys-1976-applied-geophysics-xvii-860-pp-numerous-figs-cambridge-university-press-london-cambridge-price-2600-isbn-0-521-20670-7/7435AF9C621A3FDAB1729F81A859EE2F>
- Estrada, Luis; Geofísica – FACET – UNT – *Prospección geoelectrica para geólogos*.
- Burger, Robert H.; *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*, Prentice Hall PTR; 1992
- John M., Reynolds; *An Introduction to applied and environmental geophysics*, Wiley , 1997
- Tomografía de termovisión. Tecnología satelital innovadora para la investigación geofísica: <https://skygeotech.com/> <https://skygeotech.com/>
- Cruz, Noé; *Piden 249 mil mdp para exploración y producción en 2018*
<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/economia/2017/08/7/piden-249-mil-mdp-para-exploracion-y-produccion-en-2018>
- *Los descubrimientos de petróleo y gas se secan al total más bajo durante 60 años*; Financial Times. <https://www.ft.com/content/441d0184-f13f-11e6-8758-6876151821a6>
- *Quest for new oil discoveries still on back burner*; CNBC <https://www.cnbc.com/2018/01/04/oil-companies-still-hesitant-over-oil-exploration.html>
- Chapman, Ian; *The end of peak oil? Why this topic is still relevant despite recent denials*. Energy Policy, 64; pp. 93-101 Universidad de Cumbria
<https://zdoc.site/chapman-ian-2014-the-end-of-peak-oil-why-this-topic-is-insig.html>
- Yakuel, Pini; *To Explore or Exploit – That Is the Question*; diciembre 2016
<https://www.optimove.com/blog/the-exploration-exploitation-trade-off>
- *El costo de producción*, Oil & gas Magazine, enero de 2016 <https://www.oilandgasmagazine.com.mx/2016/01/el-costodeproduccion/>
- Agencia Reuters, *Petroleras reducirán gasto en exploración por quinto año consecutivo*, <https://expansion.mx/empresas/2018/01/04/petroleras-reduciran-gasto-en-exploracion-por-quinto-ano-consecutivo>